

双路激光混沌复用系统的混沌同步及安全性能研究

穆鹏华 潘炜 李念强 闫连山 罗斌 邹喜华 徐明峰

Performance of chaos synchronization and security in dual-chaotic optical multiplexing system

Mu Peng-Hua Pan Wei Li Nian-Qiang Yan Lian-Shan Luo Bin Zou Xi-Hua Xu Ming-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 124206 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.124206

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.124206>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I12>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

243 nm 稳频窄线宽半导体激光器

A narrow linewidth diode laser at 243 nm

物理学报.2015, 64(13): 134205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.134205>

有机激光材料及器件的研究现状与展望

Current research and future development of organic laser materials and devices

物理学报.2015, 64(9): 094202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.094202>

反馈强度对外腔反馈半导体激光器混沌熵源生成的随机数序列性能的影响

Influence of feedback strength on the characteristics of the random number sequence extracted from an external-cavity feedback semiconductor laser

物理学报.2015, 64(8): 084204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.084204>

基于外光注入互耦合垂直腔面发射激光器的混沌随机特性研究

Chaotic randomness of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting laser by optical injection

物理学报.2015, 64(2): 024209 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024209>

互注入垂直腔表面发射激光器的多次偏振转换特性研究

Multiple polarization switching in mutually coupled vertical-cavity surface emitting lasers

物理学报.2015, 64(2): 024208 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.024208>

双路激光混沌复用系统的混沌同步及安全性能研究*

穆鹏华[†] 潘炜 李念强 闫连山 罗斌 邹喜华 徐明峰

(西南交通大学信息光子与通信研究中心, 成都 610031)

(2014年11月20日收到; 2014年12月17日收到修改稿)

针对一种新型的双路激光混沌复用系统, 建立相应的速率方程模型, 详细分析了两个主激光器的单个参数失配、多个参数同时失配、反馈强度差异以及频率失谐对混沌同步性能的影响, 并对此复用系统的安全性能和频谱性能进行了研究. 研究表明: 采用参数失配方案, 通过合理选择两个主激光器的参数, 可以保证两个主激光器之间的同步性能较差而两对主从激光器间实现高品质的混沌同步, 因此满足双路激光混沌复用的条件; 两个主激光器之间的参数失配对它们之间的同步性能影响较大, 然而对配对主从激光器间同步性能的影响并不明显, 进一步说明参数失配方案的有效性和可行性. 另外, 通过自相关函数和频谱分别分析混沌复用信号的时域和频域特征, 发现双路激光混沌复用系统可提供更高的安全性.

关键词: 混沌复用, 主被动分解法, 参数失配, 混沌同步

PACS: 42.55.Px, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.64.124206

1 引言

半导体激光器是光纤通信中最常用的光源之一. 在引入附加自由度后, 它们可以产生丰富的非线性动力学行为, 如果合理选择控制参数, 则很容易输出高维混沌光信号^[1,2], 能够广泛应用于混沌保密通信^[3-8]、混沌雷达^[9]、光时域反射仪^[10]、储备池计算^[11]以及高速物理随机数^[12,13]等重要领域.

在混沌保密通信中, 发送端激光器产生混沌载波信号, 采用混沌掩藏、混沌键控及混沌调制等编码方式将有用信号加载到载波中并通过传输信道传输到接收端. 基于混沌同步和混沌滤波效应, 接收端激光器能够重现混沌载波, 并将其与接收到的传输信号进行减法运算来恢复有用信号. 混沌保密通信常以硬件参数作为“密钥”, 从物理层实现信息加密、传输及解密, 提高光通信系统的安全性, 因而备受人们关注^[14-18]. 2005年, Argyris等

多个国家的学者在希腊雅典的城市商用光纤网络中首次成功实现了单向混沌保密通信, 传输距离为120 km, 速率已达 Gb/s 量级, 成为混沌光通信的里程碑式实验^[6]. 近年来, 学者们又提出大量的混沌保密通信方案^[15-18], 力求加速其实用化进程. 尽管单个激光器输出混沌信号的带宽可达 10 GHz 量级或更高, 传输速率仍然不能满足人们对高信息速率以及大传输容量的需求, 因此混沌复用和网络拓扑结构系统成为人们关注的热点^[18-24]. 文献^[20]提出了一种一对多和多对一的激光混沌通信系统, 可以支持单播、多播及广播等通信方式. 文献^[18]针对一种新型的双信道混沌光通信方案, 建立了相应的理论模型, 得到的数值结果与已有实验结果相符. 为了实现普通光信道与混沌光信道的复用, 文献^[21]数值证实了混沌通信与 OC-48 光纤通信的波分复用, 实现了两路数字信号的同时传输. 文献^[23, 24]进一步证实了多路混沌信号可进行密集波分复用.

* 国家自然科学基金(批准号: 61274042)和西南交通大学博士创新基金(2013-2016)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: mcgram007@126.com

上述的多种复用系统需要合理选择信道间隔以避免相邻信道间的串扰, 因此具有一定的局限性. 最近, Rontani 等^[22]提出一种基于主被动分解法(APD)的双路混沌光信号复用系统, 理论上, 此方案可通过完全同步实现混沌信号的解复用, 并且允许频谱的重叠, 可以有效利用频谱效率, 所以具有潜在的应用价值. 文献^[23]基于类似的系统结构, 对混沌信号的正交性进行了初步探讨. 在理想情况下, 要实现基于 APD 的混沌复用, 两路混沌信号必须满足正交性, 即完全不相关, 而它们之间存在互耦合. 所以, 我们发现仅能保证一种“伪”正交性, 即相关性较低. 然而, 文献^[22]并未涉及双路激光混沌复用系统中激光器参数的选择, 以及参数失配对混沌同步的影响和安全性能的相关研究. 本文针对文献^[22]的双路激光混沌复用系统, 采用 Lang-Kobayashi 对其建模, 证明了参数选择的重要性, 详细分析了参数失配对混沌同步的影响; 对此双路激光混沌复用系统的安全性进行了简要分析, 与单个外腔光反馈半导体激光器的时延特征进行对比, 证明此系统能提供更高的安全性, 对于实现多路激光混沌复用系统具有一定的指导意义和实用价值.

2 理论模型

基于半导体激光器的双路激光混沌复用系统的结构模型如图 1 所示. 在发送端, 主激光器 1(M1) 和主激光器 2(M2) 相互耦合 (互注入结构),

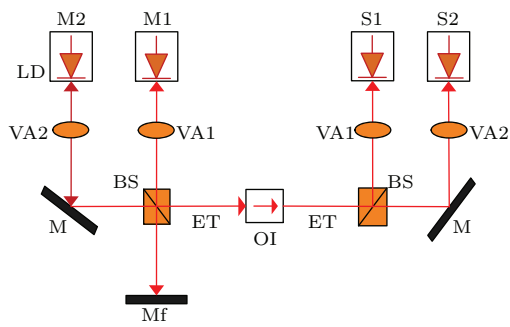


图 1 混沌复用通信系统示意图. LD 为半导体激光器; M1, M2 为主激光器; S1, S2 为从激光器; VA 为衰减器; Mf 为外腔反射镜; BS 为 50/50 分束器; OI 为光隔离器; ET 为两主激光器的复用混沌信号

Fig. 1. Schematic diagram of the chaotic multiplexing communication system. LD-semiconductor laser; M1, M2-master lasers; S1, S2-slave lasers; VA-variable attenuator; Mf-mirror; BS-50/50 beam splitter; OI-optical isolator; ET is the multiplexed field sent to the slave lasers.

并公用一个外腔反射镜 (Mf), 从而实现高维混沌输出, 混沌复用信号经发射端分束器 (BS) 进入信道并传输到接收端; 在接收端, 接收到的混沌复用信号经接收端 BS 分别注入从激光器 1(S1) 和从激光器 2(S2), 使得它们也产生复杂混沌信号. 由于 M1/S1 和 M2/S2 两两配对, 从而基于 APD 原理实现匹配主从激光器间的完全混沌同步.

文献^[22]中指出此方案的主要优点是两路相互耦合的混沌信号具有相同的混沌带宽, 允许高度重叠, 而且混沌复用信号的带宽也与它们大致相同, 从而有效提高频谱效率. 其实, 我们发现, 此方案输出的混沌复用信号具有复杂的时延特征, 在一定程度上阻止攻击者获取系统参数 (如反馈时延和互耦合时延), 进而提高通信系统的安全性.

图 1 所示的方案共包括 4 个激光器: 两个主激光器 (M1 和 M2) 和两个从激光器 (S1 和 S2). 基于 Lang-Kobayashi 模型, 它们的慢变电场复振幅 $E(t)$ 和载流子密度 $N(t)$ 的速率方程可以表示为^[22,25]

$$\begin{aligned} \frac{dE_{M1}}{dt} = & 1/2(1 + i\alpha_{M1})(G_{M1} - 1/\tau_{pM1})E_{M1} \\ & + k_{f1}E_{M1}(t - \tau_{f1}^M) \exp(-i\omega_{M1}\tau_{f1}^M) \\ & + \eta_{21}^M \exp(-i\omega_{M2}\tau_{21}^M + i\Delta\omega_{21}^{M/M}t) \\ & \times E_{M2}(t - \tau_{21}^M), \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{M2}}{dt} = & 1/2(1 + i\alpha_{M2})(G_{M2} - 1/\tau_{pM2})E_{M2} \\ & + k_{f2}E_{M2}(t - \tau_{f2}^M) \exp(-i\omega_{M2}\tau_{f2}^M) \\ & + \eta_{12}^M \exp(-i\omega_{M1}\tau_{12}^M + i\Delta\omega_{12}^{M/M}t) \\ & \times E_{M1}(t - \tau_{12}^M), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{S1}}{dt} = & 1/2(1 + i\alpha_{S1})(G_{S1} - 1/\tau_{pS1})E_{S1} \\ & + \eta_{11}^C E_{M1}(t - \tau_{11}^C) \exp(-i\omega_{M1}\tau_{11}^C) \\ & + \eta_{21}^C \exp(-i\omega_{M2}\tau_{21}^C + i\Delta\omega_{21}^{M/C}t) \\ & \times E_{M2}(t - \tau_{21}^C), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dE_{S2}}{dt} = & 1/2(1 + i\alpha_{S2})(G_{S2} - 1/\tau_{pS2})E_{S2} \\ & + \eta_{22}^C E_{M2}(t - \tau_{22}^C) \exp(-i\omega_{M2}\tau_{22}^C) \\ & + \eta_{12}^C \exp(-i\omega_{M1}\tau_{12}^C + i\Delta\omega_{12}^{M/C}t) \\ & \times E_{M1}(t - \tau_{12}^C), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dN_k}{dt} = J_k - \tau_s N_k - G_k |E_k|^2. \quad (5)$$

上述各式中, M, S 分别表示主从激光器; k 表示混沌复用系统中的四个激光器 (M1, M2, S1, S2); $G = g(N - N_0)/(1 + \epsilon|E_k|^2)$ 为非线性增益 (g 为差

分增益系数, N_0 为透明载离子数, ε 为增益饱和系数); α 表示线宽增强因子; τ_p 为光子寿命; τ_s 为载流子寿命; J 为注入电流; k_{f_1} 与 k_{f_2} 分别表示激光器 M1 与 M2 的反馈强度; η_{12}^M 表示 M1 对 M2 的注入强度, η_{21}^M 表示 M2 对 M1 的注入强度; η_{11}^C 表示 M1 对 S1 的注入强度; η_{12}^C 表示 M1 对 S2 的注入强度; η_{22}^C 表示 M2 对 S2 的注入强度; η_{21}^C 表示 M2 对 S1 的注入强度; $\tau_{f_1}^M$ 和 $\tau_{f_2}^M$ 分别表示 M1 和 M2 的反馈时延; τ_{12}^M 表示 M1 对 M2 的注入时延; τ_{21}^M 表示 M2 对 M1 的注入时延; τ_{11}^C 表示 M1 对 S2 的注入时延; τ_{22}^C 表示 M2 对 S2 的注入时延; τ_{21}^C 表示 M2 对 S1 的注入时延; $\Delta\omega_{12}^{M/M}$ 表示主激光器 M1 与 M2 的频率差; $\Delta\omega_{12}^{M/C}$ 表示主激光器 M1 与从激光器 S2 的频率差.

图 1 所示系统结构需保证配对激光器间 (M1/S1 和 M2/S2) 实现完全同步, 则必须合理选择注入参数与反馈参数. 根据文献 [22] 可知, 反馈强度、反馈时延、注入强度和注入时延需满足如下条件:

$$\begin{aligned} \tau_{12}^M &= \tau_{21}^M = \tau_{f_1}^M + 1/2\Delta\tau_{21}^M, \\ \Delta\tau_{12}^M &= -\Delta\tau_{21}^M = \tau_{f_1}^M - \tau_{f_2}^M, \\ \eta_{12}^M\eta_{21}^M &= \sqrt{k_{f_1}k_{f_2}}, \\ \tau_{f_1}^M - \tau_{f_2}^M &= \tau_{11}^C - \tau_{21}^C, \\ \eta_{12}^M &= \eta_{12}^C. \end{aligned} \quad (6)$$

本文主要分析系统中激光器输出混沌的同步性能, 为了进行定量分析, 我们定义如下相关系数 [13]:

$$C_{jk}(\Delta t) = \frac{\langle [I_j(t + \Delta t) - \langle I_j \rangle][I_k(t) - \langle I_k \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I_j(t + \Delta t) - \langle I_j \rangle]^2 \rangle \langle [I_k(t) - \langle I_k \rangle]^2 \rangle}}, \quad (7)$$

其中, $I_{j,k} = |E_{j,k}|^2$ 表示激光器混沌输出的强度时间序列, Δt 为两混沌时间序列的位移, $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均. 需要注意的是, 当 $|C| = 1$ 时, 两激光器混沌信号达到高品质混沌同步; 当 $|C| = 0$ 时, 两激光器混沌信号间不存在任何相关性. 由于系统中存在多个时延, 很难做到对时移-相关系数中的每个时延点进行详细分析. 因此, 本文重点关注两激光器输出混沌信号在 $\Delta t \in [-20 \text{ ns}, 20 \text{ ns}]$ 范围内的最大相关系数, 并以此表征它们的同步性能.

3 数值结果

(1)—(5) 式为时滞微分方程组, 无法得到精确的解析解, 因此我们采用四阶 Runge-Kutta 算法进

行数值求解, 其中积分步长选择为 1 ps, 仿真所用的参量先假定取值为 [22] $J_{M_1} = J_{S_1} = 2.75J_{th}$, $J_{M_2} = J_{S_2} = 2.5J_{th}$, $k_{f_1}^M = \eta_{11}^C = 10 \text{ GHz}$, $k_{f_2}^M = \eta_{22}^C = 15 \text{ GHz}$, $\tau_{f_1}^M = 1 \text{ ns}$, $\tau_{f_2}^M = 4 \text{ ns}$, $\tau_{11}^C = 10 \text{ ns}$, $\tau_{22}^C = 15 \text{ ns}$, $\alpha_{M_1} = \alpha_{S_1} = 5$, $\alpha_{M_2} = \alpha_{S_2} = 4$, $\tau_{pM_1} = \tau_{pS_1} = 2 \text{ ps}$, $\tau_{pM_2} = \tau_{pS_2} = 1 \text{ ps}$, $\tau_{sM_1} = \tau_{sS_1} = 2 \text{ ns}$, $\tau_{sM_2} = \tau_{sS_2} = 1 \text{ ns}$, $\varepsilon_{M_1} = \varepsilon_{S_1} = 5 \times 10^{-7}$, $\varepsilon_{M_2} = \varepsilon_{S_2} = 2.5 \times 10^{-7}$, $g_{M_1} = g_{S_1} = 1.5 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $g_{M_2} = g_{S_2} = 1 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$, $N_{0M_1} = N_{0S_1} = 1.5 \times 10^8$, $N_{0M_2} = N_{0S_2} = 2 \times 10^8$. 本文中的 4 个激光器必须工作在混沌状态, 所以可以采用分岔图、相空间轨迹图和功率谱图来判别激光器是否工作在混沌状态, 并利用关联维数确定其输出高维混沌信号.

通过数值仿真, 我们实现了 M1/S1(M2/S2) 之间完全同步, 如图 2 中的混沌时间序列所示, 为了便于比较, 已做了相应的时间平移. 即使当考虑自发辐射噪声时, 它们之间的最大相关系数也能保证在 0.9 之上, 说明此系统具有一定的噪声鲁棒性, 从而验证了文献 [22] 中的结果. 此外, 此方案可以实现多用户频谱叠加混沌复用通信, 其中, 配对的主从激光器间可以达到完全同步, 实现多路独立信息同时传输, 从而提高频谱利用率. 如引言所述, 为了保证信息的安全传输且避免串扰, M1 和 M2 输出的混沌载波必须满足“伪”正交性, 即二者的最大相关系数处于较低水平, 进而保证两路有用信息的独立加密与解密. 但是, 根据文献 [22] 给出的参数, 我们发现 M1 和 M2 间的最大相关系数大于 0.8, 其结果如图 3 所示. 虽然 M1/S1(M2/S2) 间能实现高品质的混沌同步, 但是 M1/M2 间并不满足“伪”正交性. 可以预测, 如果仅在 M1 输出混沌载波中加载有用信息, 由于 M1 和 M2 存在较高的相关性, 那么 M2 和 S2 都可能恢复部分有用信息, 从而降低此复用系统的安全性; 如果 M1 和 M2 同时加载两个独立的有用信息, 那么必然存在串扰, 导致有用信息无法被相应的从激光器正确恢复. 上述结果说明文献 [22] 给出的激光器参数并不是最优组合, 需要进行合理调节, 保证 M1 和 M2 输出混沌信号的“伪”正交性. 因此, 我们提出采用参数失配分析来达到以上目的.

下面具体讨论参数失配对系统同步性能的影响. 激光器包含 6 个关键参数, 分别为线宽增强因子 α 、光子寿命 τ_p 、载流子寿命 τ_s 、增益饱和因子 ε 、差分增益系 g 以及透明载流子密度 N_0 , 改变它们的

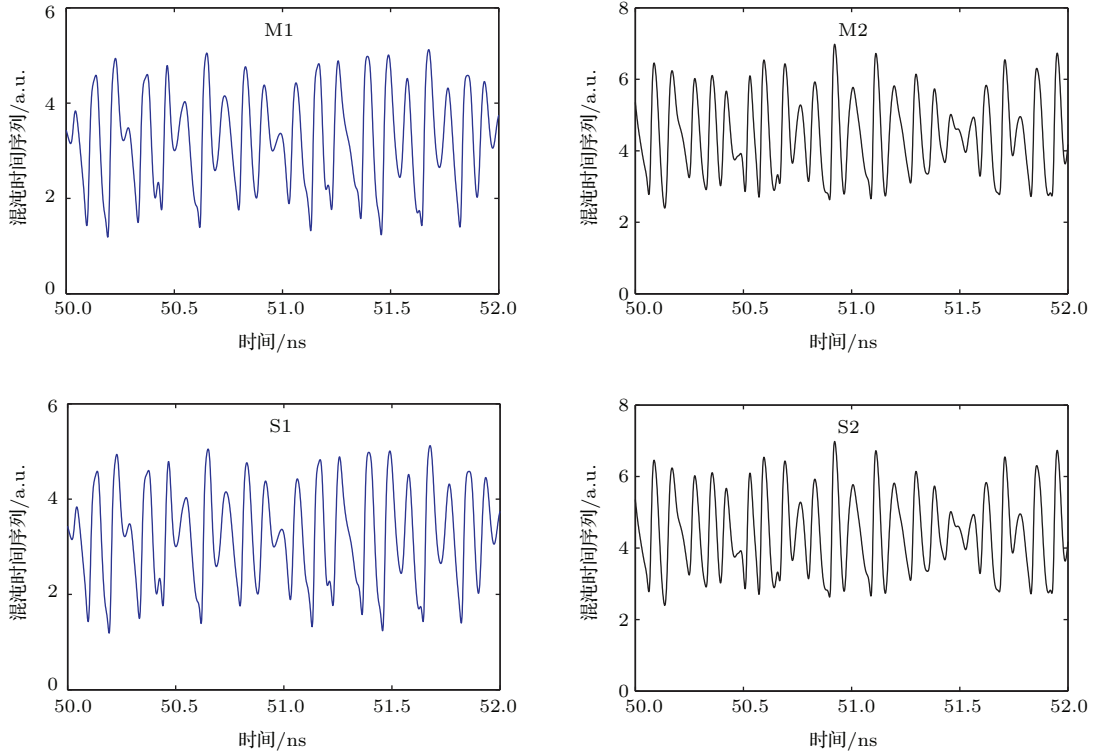


图2 激光器混沌时间序列

Fig. 2. The time series of the semiconductor lasers output.

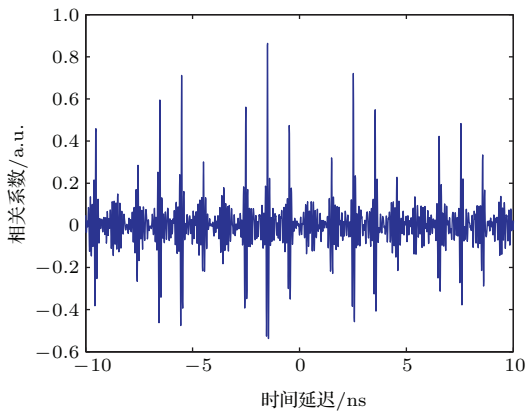


图3 M1与M2混沌输出的时移-相关系数

Fig. 3. The cross-correlation between the chaotic outputs of M1 and M2.

值会直接影响同步性能 [7]. 这里, 分别探讨它们对同步性能的影响. 需要强调的是, 本文的后续内容中, 我们假定 M1 与 S1 的参数完全相同, M2 与 S2 的参数完全相同. 详细讨论以下两种情况: 1) M1 和 M2 的反馈强度相同 ($k_{f1} = k_{f2} = 10 \text{ ns}^{-1}$); 2) M1 和 M2 的反馈强度不同 ($k_{f1} = 10 \text{ ns}^{-1}$, $k_{f2} = 15 \text{ ns}^{-1}$). 在以上两种情况中, 假定 M1 的参数固定不变, 调节 M2 的一个关键参数, 并通过

(7) 式给出的最大相关系数定量分析同步性能. 因此, 定义如下参数失配率 [7]:

$$\mu = \frac{\Pi^{M_1} - \Pi^{M_2}}{\Pi^{M_1}}, \quad (8)$$

其中, Π 可取 α , τ_p , τ_s , ε , g 以及 N_0 . 两个主激光器的其他参数已在上文中给出. 图 4 给出了情况 1) 的结果. 可见, 仅调节 M2 的一个关键参数并不能有效抑制 M1 与 M2 的同步性能. 这是因为 M1 与 M2 之间存在较强的互耦合, 它们相互影响各自的非线性动力学行为, 一个参数的失配不足以保证它们间的弱相关性.

另外, 从图 4 还可以看到, 每个参数带来的影响是不同的, 载流子寿命 τ_s 和增益饱和因子 ε 可能使得最大相关系数在 0.6 左右. 为了进行对比, 图 5 给出了情况 2) 的结果. 可以清楚地看到, 当 M1 和 M2 的反馈强度不同时, 单个参数失配可以更有效地抑制二者的同步性能, 但仅在较小的范围内满足最大相关系数在 0.5 左右. 以上结果说明, 单个参数失配并不能保证 M1 和 M2 输出混沌信号具有较好的“伪”正交性. 因此, 我们选择采用多个参数同时失配的方案.

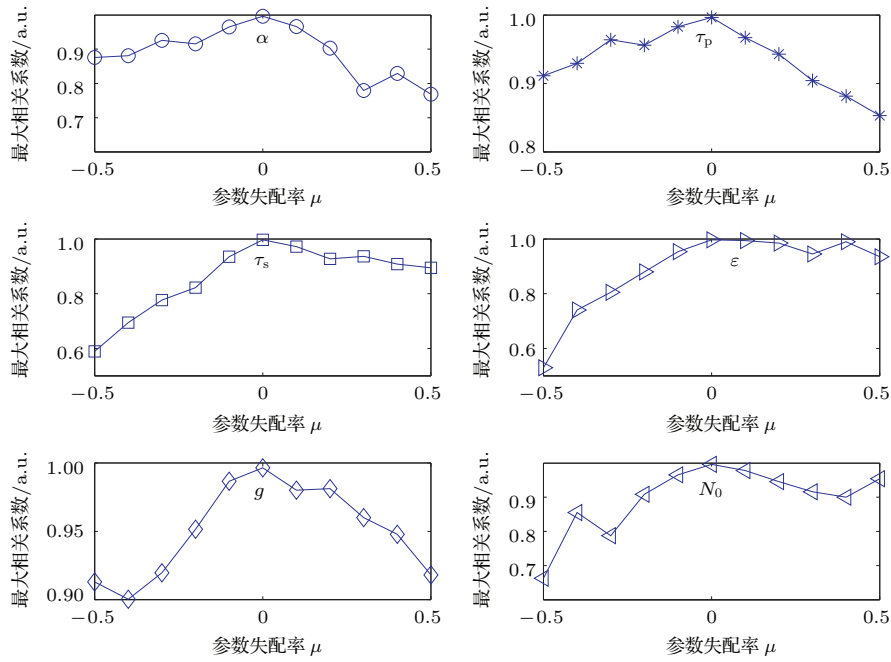


图4 M1与M2反馈强度相同时单个参数失配对系统同步性能影响

Fig. 4. The influence of single-parameter mismatch on synchronization performance when M1 and M2 have the same feedback level.

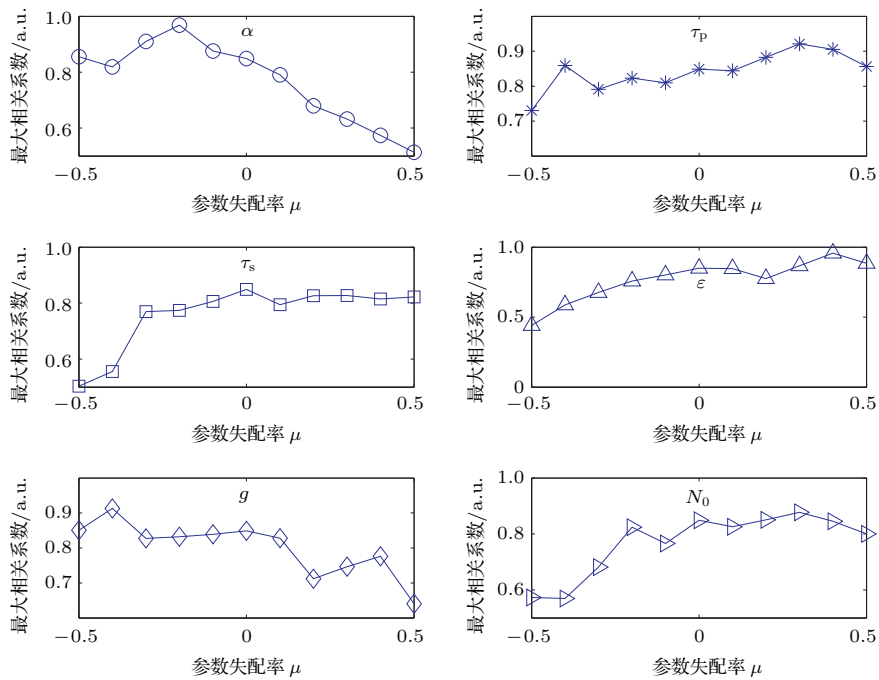


图5 M1与M2反馈强度不同时单个参数失配对系统同步性能影响

Fig. 5. The influence of single-parameter mismatch on synchronization performance when M1 and M2 have different feedback levels.

根据文献[7]的建议, 可通过如下选择进行多个参数同时失配: $\alpha^{M_2} = (1 - \mu)\alpha^{M_1}$, $\tau_p^{M_2} = (1 - \mu)\tau_p^{M_1}$, $\tau_s^{M_2} = (1 + \mu)\tau_s^{M_1}$, $\epsilon^{M_2} = (1 + \mu)\epsilon^{M_1}$, $g^{M_2} = (1 - \mu)g^{M_1}$, $N_0^{M_2} = (1 + \mu)N_0^{M_1}$. 理论上, 当M1和M2的上述几个参数同时存在差异时, 它

们的输出可能满足混沌复用系统的需求. 图6为多个参数失配时的仿真同步性能结果图. 为了证实我们的结果, 图6给出了两种工作电流的结果: 1) $J_1 = 2.5J_{th}$, $J_2 = 2.5J_{th}$; 2) $J_1 = 2.75J_{th}$, $J_2 = 2.5J_{th}$. 可以发现, 在这两种情况下, M1和

M2的最大相关系数随参数失配因子率的变化行为是一致的, 即当参数失配因子率从-0.5增大到0.5的过程中, 最大相关系数先单调递增, 最终在 μ 增大到0.2后, 最大相关系数出现饱和, 并稳定在0.9左右, 所以, 要保证M1和M2混沌输出具有“伪”正交性(相关度较小), 需要合理选择参数失配因子率, 如当选择 $\mu = -0.4$ 时, 最大相关系数约等于0.4. 更重要的是, 当 $\mu \in [-0.5, -0.2]$ 的范围内, 最大相关系数可以保证在0.6以下. 其实, 在实际应用中, 由于噪声和加载信息引入的同步误差, 最大相关系数在较大参数失配范围内可以保证在0.4以下, 从而满足两个主激光器的“伪”正交性.

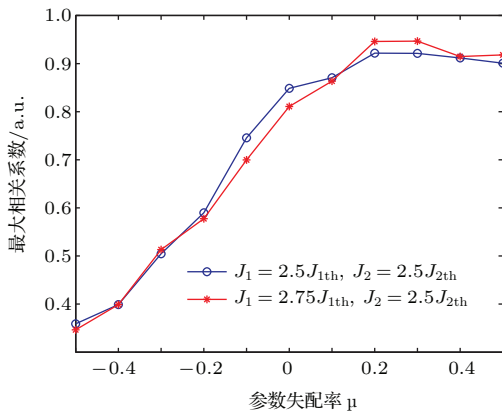


图6 (网刊彩色) 多个参数失配对同步性能影响
Fig. 6. (color online) The influence of multi-parameter mismatch on synchronization performance for two different settings of the pump current.

为了进一步分析参数失配对同步性能的影响, 进一步讨论了当M2的反馈强度和参数失配率同时

变化的情况. 图7为当频率失谐 $\Delta f_{12}^{M/M} = 0$ GHz时, 最大相关系数随参数失配率 μ 和反馈强度 k_{f_2} 的变化行为, 其中 $k_{f_1} = 10 \text{ ns}^{-1}$. 图7(a)—(c)分别对应M1/S1, M2/S2和M1/M2的结果. 由图7(a)和图7(b)可以看出, 在考虑的 μ 和 k_{f_2} 范围内, 配对激光器(M1/S1和M2/S2)总可以实现高品质的混沌同步(这两个参数的变化对它们的同步性能并无明显影响). 然而, 它们对M1/M2间同步性能的影响较为显著, 结果见图7(c). 特别地, 仅在图7(c)左上方区域可以保证M1和M2具有较差的同步性能, 即当参数失配率 $\mu < 0$ 并且反馈强度 $k_{f_2} > 20 \text{ ns}^{-1}$ 时, 满足系统两个主激光器混沌输出“伪”正交性的要求.

下面分析当选定 $\mu = -0.4$, 最大相关系数随 $\Delta f_{12}^{M/M}$ 和 k_{f_2} 的变化行为, 结果如图8所示. 可以清楚地看到, $\Delta f_{12}^{M/M}$ 对M1/S1, M2/S2和M1/M2的同步性能有一定影响, 但 k_{f_2} 对它们的影响更加明显. 因此, 合理选择 $\Delta f_{12}^{M/M}$ 也可以有效改善系统性能.

为了证明 $\Delta f_{12}^{M/M}$ 的影响, 图9给出了两种频率失谐的结果. 图9(a)—(c)为当 $\Delta f_{12}^{M/M} = -5$ GHz时, 最大相关系数随 μ 和 k_{f_2} 的变化行为; 图9(d)—(f)为当 $\Delta f_{12}^{M/M} = -10$ GHz时, 最大相关系数随 μ 和 k_{f_2} 的变化行为. 通过对比图7和图9, 可以发现, 当选择 $\Delta f_{12}^{M/M} = -5$ GHz时, M1/M2的最大相关系数在所考虑的 μ 和 k_{f_2} 范围内总是保持在较低水平, 二者满足“伪”正交性.

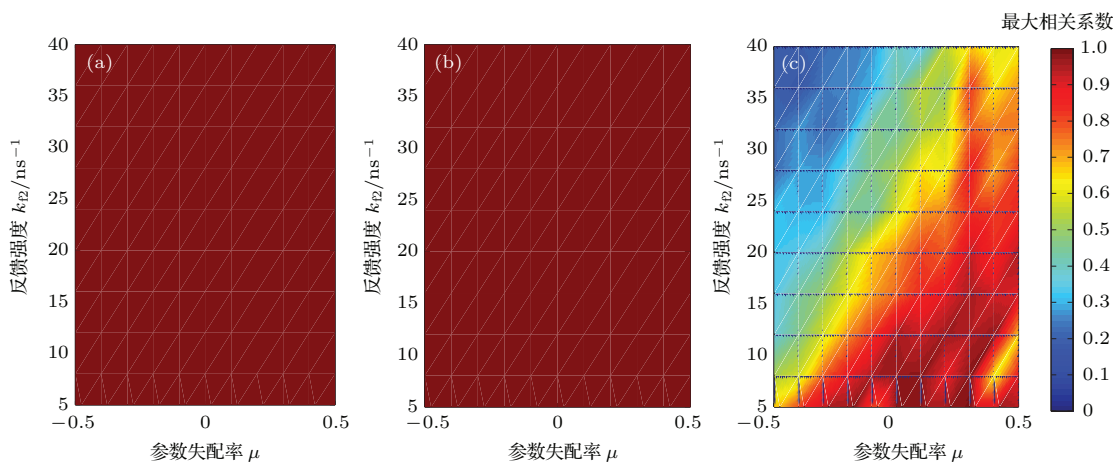


图7 (网刊彩色) 当 $\Delta f_{12}^{M/M} = 0$ 时最大相关系数随参数失配率 μ 和反馈强度 k_{f_2} 的变化 (a) M1/S1; (b) M2/S2; (c) M1/M2

Fig. 7. (color online) The maximum correlation coefficient as functions of μ and k_{f_2} when $\Delta f_{12}^{M/M} = 0$: (a) M1/S1; (b) M2/S2; (c) M1/M2.

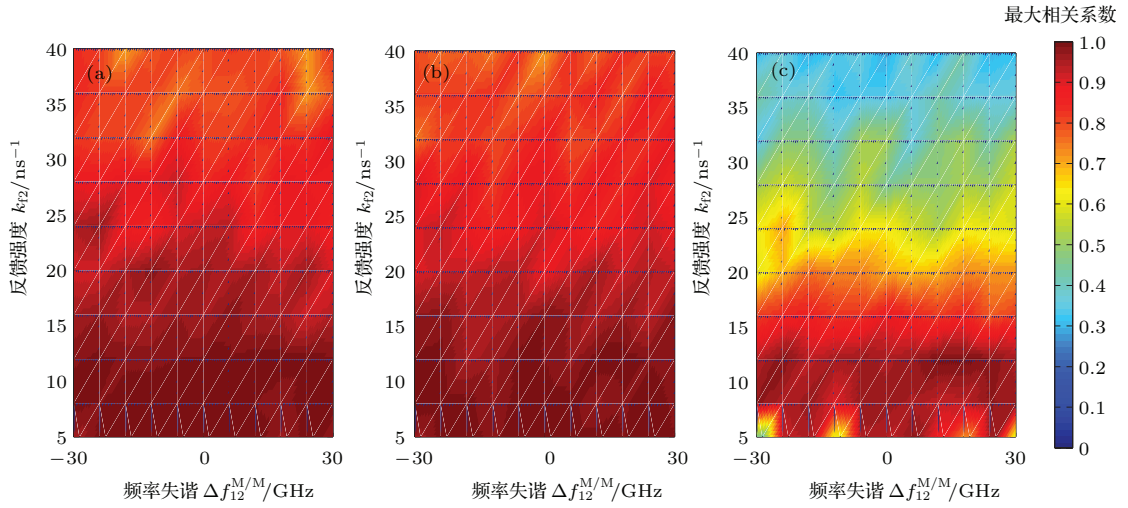


图8 (网刊彩色) 当 $\mu = -0.4$ 时最大相关系数随频率失谐 $\Delta f_{12}^{M/M}$ 和反馈强度 k_{f_2} 的变化 (a) M1/S1; (b) M2/S2; (c) M1/M2

Fig. 8. (color online) The maximum correlation coefficient as functions of $\Delta f_{12}^{M/M}$ and k_{f_2} when $\mu = -0.4$: (a) M1/S1; (b) M2/S2; (c) M1/M2.

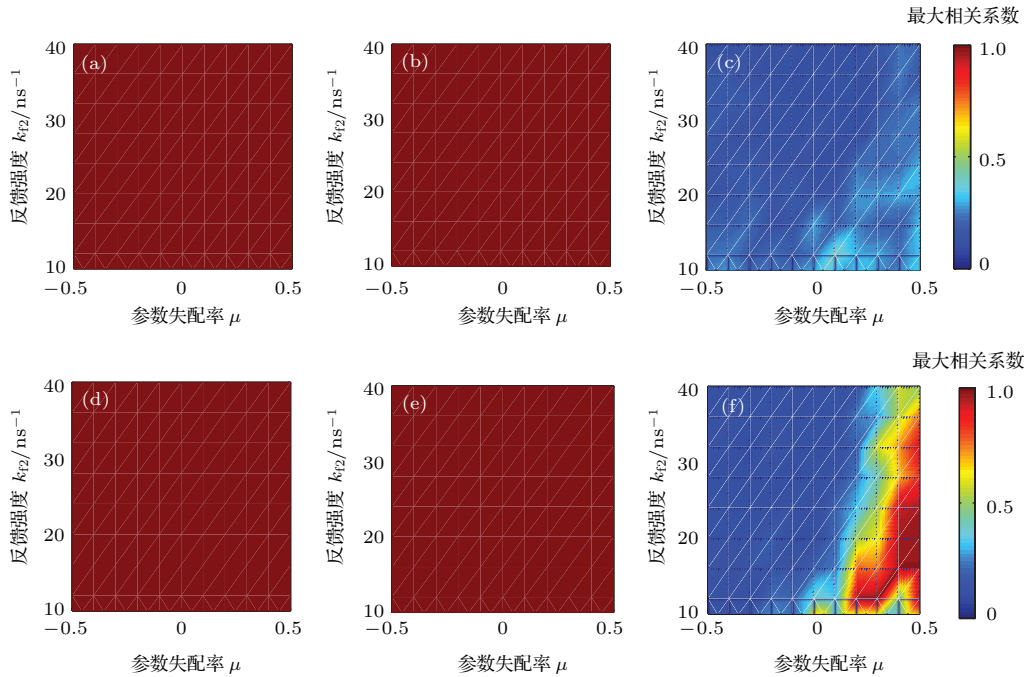


图9 (网刊彩色) 当 $\Delta f_{12}^{M/M} = -5$ GHz(第一行) 和 $\Delta f_{12}^{M/M} = -10$ GHz(第二行) 时最大相关系数随 μ 和 k_{f_2} 的变化 (a), (d) M1/S1; (b), (e) M2/S2; (c), (f) M1/M2

Fig. 9. (color online) The maximum correlation coefficient as functions of μ and k_{f_2} in the case of $\Delta f_{12}^{M/M} = -5$ GHz (the first row) and $\Delta f_{12}^{M/M} = -10$ GHz (the second row): (a), (d) M1/S1; (b), (e) M2/S2; (c), (f) M1/M2.

以上结果说明, 合理选择反馈参数、频率失谐、参数失配, 可以保证M1/M2只具有较弱的相关性, 而配对激光器(M1/S1和M2/S2) 总能达到高品质的混沌同步, 进一步论证了文献[22]中提出的激光混沌复用系统的可行性.

最后, 讨论双路激光混沌复用系统的安全性

能. 近年来, 混沌保密通信的安全性成为了一个热门研究方向[26-31]. 文献[26]中指出, 通过自相关函数(ACF)和延迟互信息等统计方法分析混沌时间序列, 可以得出外腔光反馈半导体激光器的反馈时延, 从而降低混沌发生器的安全性. 此后, 许多学者提出采用双反馈[27,28]、单混沌注入[29]、双混

沌注入^[30]、互耦合等^[31]结构来实现时延隐藏. 这里, 我们引入ACF来分析图1所示系统产生的混沌复用信号的时延特征, ACF的具体定义为

$$\Gamma(\Delta t) = \frac{\langle (x(t) - \langle x(t) \rangle)(x(t + \Delta t) - \langle x(t) \rangle) \rangle}{\langle x(t) - \langle x(t) \rangle \rangle^2}, \quad (9)$$

其中, $x(t)$ 代表混沌时间序列, Δt 为时间延迟, $\langle \cdot \rangle$ 表示对时间求平均. 由文献^[26]可知, 当反馈强度(注入强度)适中或者较强时, ACF会在时延附近出现峰值, 对应于混沌信号的“弱”周期性.

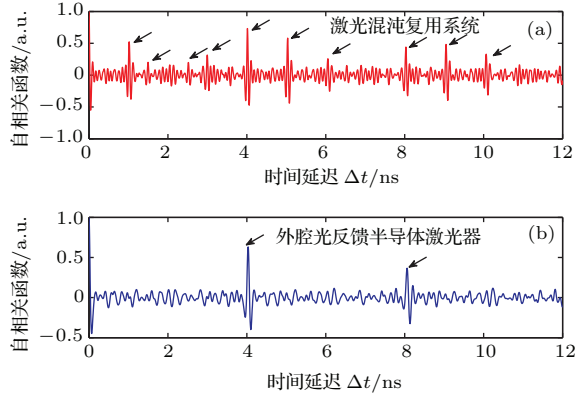


图10 (网刊彩色) (a) 混沌复用系统与 (b) 单个外腔反馈半导体激光器的时延特征对比

Fig. 10. (color online) ACF for (a) multiplexing system and (b) single external-cavity semiconductor laser.

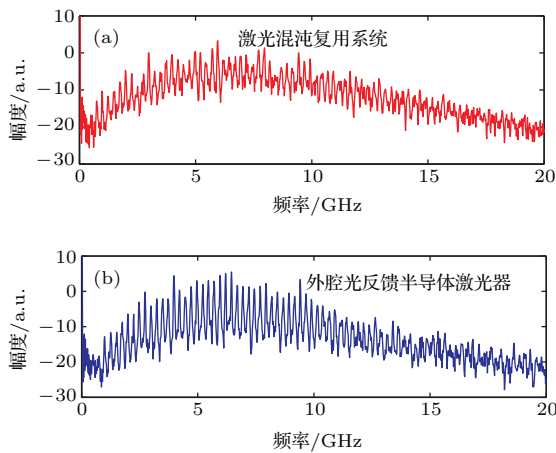


图11 (网刊彩色) (a) 混沌复用系统与 (b) 单个外腔反馈半导体激光器的频谱对比

Fig. 11. (color online) The spectra of (a) multiplexing system and (b) single external-cavity semiconductor laser.

图10(a)为双路激光混沌复用系统输出的混沌复用信号的ACF结果, 其中 $\mu = -0.4$, $\Delta f_{12}^{M/M} = -5$ GHz. 可以发现, 此ACF曲线表现出复杂的时延特征, 其中峰值由箭头来突显. 这里, 复杂的时延特征源于M1和M2都具有反馈时延, 而且它们

相互耦合进一步引入附加时延. 为了更清楚地说明问题, 图10(b)给出了M2仅具有反馈腔的ACF结果(阻断M1与M2间的耦合链路). 可见, 此ACF仅在反馈时延和其倍数位置附近出现峰值, 时延特征非常简单. 通过对比图10(a)和图10(b)可以发现, 攻击者很难通过分析混沌时间序列得到此双路激光混沌复用系统的时延信息, 从而增强混沌保密通信的安全性.

另外, 根据以上选定参数, 我们对比了双路激光混沌复用系统输出的混沌复用信号和M2仅具有反馈腔时(阻断M1与M2间的耦合链路)输出混沌信号的带宽. 如图11所示, 混沌复用系统与单个外腔光反馈半导体激光器的带宽大致相同, 因此多个互耦合的混沌载波可以进行复用, 频谱叠加后, 复用信号的带宽并无明显展宽, 从而提高了频谱利用率. 这些结果也进一步验证了文献^[22]的推测. 需要强调的是, 此激光器混沌复用系统同时加载多路有用信息也可以进一步提高安全性, 一方面可以阻止通过线性或非线性滤波器直接滤波恢复信息的攻击者, 另一方面也可以阻止通过强注入实现注入锁定混沌同步的攻击者. 这进一步说了本文研究的双路激光混沌复用系统在混沌保密通信领域具有潜在的应用价值.

4 结 论

本文对基于APD的双路混沌复用通信系统进行了数值研究. 采用Lang-Kobayashi方程建模, 讨论了反馈参数、频率失谐和参数失配对系统同步性能的影响. 结果表明: 单个参数失配并不能保证M1和M2输出混沌信号的“伪”正交性, 只有系统多个参数同时失配并且当参数失配率 $\mu < 0$, 反馈强度 $k_{f_2} > 20 \text{ ns}^{-1}$ 时, 系统两主激光器混沌输出满足“伪”正交性的要求, $\Delta f_{12}^{M/M}$ 对系统同步性能有一定的影响. 通过ACF对系统的安全性能进行了讨论, 混沌复用信号呈现出复杂的时延特征, 从而增强了系统安全性能. 最后分析了混沌复用通信系统输出混沌复用信号带宽, 发现频谱叠加后, 复用信号带宽并没有明显增强, 从而提高了频谱利用率.

参考文献

[1] Heil T, Mulet J, Fischer I, Mirasso C R, Peil M, Colet P 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1162

- [2] Rogister F, Locquet A, Pieroux D, Sciamanna M, Deparis O, Megret P, Blondel M 2001 *Opt. Lett.* **26** 1486
- [3] Pisarchik A N, Ruiz-Oliveras F R 2010 *IEEE J. Quantum Electron.* **46** 279
- [4] Paul J, Sivaprakasam S, Shore K A 2004 *J. Opt. Soc. Am. B* **21** 514
- [5] Annovazzi L V, Donati S, Scire A 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 953
- [6] Argyris A, Syvridis D, Larger L, Annovazzi V, Colet P, Fischer P, Garcia O J, Mirasso C R, Pesquera L, Shore K A 2005 *Nature* **438** 343
- [7] Li N Q, Pan W, Yan L S, Luo B, Xu M F, Tang Y L, Jiang N, Xiang S Y, Zhang Q 2012 *J. Opt. Soc. Am. B* **29** 101
- [8] Li X F, Pan W, Luo B, Ma D 2006 *IEEE J. Quantum Electron.* **42** 953
- [9] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **10** 991
- [10] Wang A B, Wang Y C 2010 *Sci. China: Inform. Sci.* **53** 398
- [11] Zhao Q C, Yin H X 2013 *Laser Optoelectron. Prog.* **50** 1 (in Chinese) [赵清春, 殷洪玺 2013 激光与光电子进展 **50** 1]
- [12] Uchida A, Amano K, Inoue M, Hirano K, Naito S, Someya H, Oowada I, Kurashige T, Shiki M, Yoshimori S, Yoshimura K, Davis P 2008 *Nat. Photon.* **2** 728
- [13] Zhang J Z, Wang Y C, Liu M, Xue L G, Li P, Wang A B, Zhang M J 2012 *Opt. Express* **20** 7496
- [14] Li N Q, Pan W, Luo B, Yan L S, Zou X H, Jiang N, Xiang S Y 2012 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **24** 1072
- [15] Hu H P, Su W, Liu L F, Yu Z L 2014 *Phys. Lett. A* **378** 184
- [16] Bogris A, Kanakidis D, Argyris A, Syvridis D 2004 *IEEE J. Quantum Electron.* **40** 1326
- [17] Yan S L 2012 *Commun. Nonlinear Sci.* **17** 2896
- [18] Liu Y R, Wu Z M, Wu J G, Li P, Xia G Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 024203 (in Chinese) [刘宇然, 吴正茂, 吴加贵, 李萍, 夏光琼 2012 物理学报 **61** 024203]
- [19] Deng W, Xia G Q, Wu Z M 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 164209 (in Chinese) [邓伟, 夏光琼, 吴正茂 2013 物理学报 **62** 164209]
- [20] Zhang W L, Pan W, Luo B, Zou X H, Wang M Y 2008 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **20** 712
- [21] Zhang J Z, Wang A B, Wang Y C 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3793 (in Chinese) [张建忠, 王安帮, 王云才 2009 物理学报 **58** 3793]
- [22] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2010 *Opt. Lett.* **35** 2016
- [23] Zhao Q C, Yin H X 2013 *Opt. Laser Technol.* **47** 208
- [24] Zhao Q C, Yin H X, Chen X L 2012 *Appl. Opt.* **51** 5585
- [25] Lang R, Kobayashi K 1980 *IEEE J. Quantum Electron.* **16** 347
- [26] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2007 *Opt. Lett.* **32** 2960
- [27] Lee M W, Rees P, Shore K A, Ortin S, Pesquera L, Valle A 2005 *IEE Proc. Optoelectron.* **152** 97
- [28] Wu J Q, Xia G Q, Wu Z M 2009 *Opt. Express* **17** 20124
- [29] Li N Q, Pan W, Xiang S Y, Yan L S, Luo B, Zou X H, Zhang L Y, Mu P H 2012 *IEEE J. Quantum Electron.* **48** 1339
- [30] Li N Q, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H, Xiang S Y 2013 *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.* **19** 0600109
- [31] Wu J Q, Wu Z M, Tang X, Lin X D, Deng T, Xia G Q, Feng G Y 2011 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **23** 759

Performance of chaos synchronization and security in dual-chaotic optical multiplexing system*

Mu Peng-Hua[†] Pan Wei Li Nian-Qiang Yan Lian-Shan Luo Bin
Zou Xi-Hua Xu Ming-Feng

(Center for Information Photonics and Communications, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

(Received 20 November 2014; revised manuscript received 17 December 2014)

Abstract

Based on a novel multiplexing system of two distinct chaotic signals, the corresponding modified Lang-Kobayashi rate equations are established. The numerical investigations into the performance of chaos synchronization are carried out. In more detail, the influences of single-parameter mismatch, multi-parameter mismatch, feedback-strength discrepancy, and frequency detuning between the two master semiconductor lasers (MLs) on synchronization performance are investigated, respectively. Moreover, the security and spectrum characteristics are addressed briefly in this work. The numerical simulations show that by adopting parameter mismatch, i.e., choosing appropriate system parameters of the two MLs, the correlation between the two MLs becomes extremely low, while the matched master-slave laser pairs can achieve high-quality chaos synchronization, indicating that the condition of optical chaos multiplexing is satisfied; the parameter mismatch between the MLs has a significant influence on their synchronization quality, but no obvious influence on their synchronization quality of the matched master-slave laser pairs, which further demonstrates the validity and feasibility of the chaos multiplexing scheme. More importantly, in this paper, the multiplexed chaotic signals in the time and frequency domains in terms of autocorrelation function and power spectrum are analyzed, demonstrating that the present system could provide higher security than the single external-cavity semiconductor laser.

Keywords: chaos multiplex, active-passive decomposition, parameter mismatch, chaos synchronization

PACS: 42.55.Px, 05.45.Pq

DOI: [10.7498/aps.64.124206](https://doi.org/10.7498/aps.64.124206)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61274042) and the Doctoral Innovation Funds of Southwest Jiaotong University, China (2013-2016).

[†] Corresponding author. E-mail: mcgram007@126.com