

基于主被动分解法的微纳激光混沌系统的复用同步实现*

穆鹏华[†] 王译乔 贺鹏飞 徐源[‡]

(烟台大学物理与电子信息学院, 烟台 264005)

(2024 年 11 月 28 日收到; 2024 年 12 月 27 日收到修改稿)

纳米激光器 (NL) 是实现光集成的重要光学元件, 近年来成为研究热点之一. 然而, 对于 NL 在混沌同步方向上的研究仍较为稀少. 本文提出一种基于 NL 的双路激光混沌复用系统, 并详细研究了其同步性能. 研究中还创新性地引入了主被动分解法, 通过主动和被动信号的分解实现高效的信号处理和复用. 具体而言, 通过建立速率方程模型, 探究了 NL 两个关键参数 (Purcell 因子 F 、自发辐射耦合因子 β)、系统参数、单参数失配以及多参数同时失配对同步性能的影响. 结果表明, 通过合理选择系统的参数配置, 两主激光器可以在较大的参数范围内保持较低的相关性, 同时确保主从激光器间保持高品质的混沌同步, 满足混沌复用系统的条件. 此外, 单参数失配对主激光器间同步性的影响具有差异性, 但对配对激光器的同步性影响较小; 多参数失配时, 系统仍能在广泛的参数失配范围内满足两主激光器混沌输出的“伪正交性”要求. 本文结果不仅验证了所提系统的可行性, 还充分体现了主动被动分解法在推动 NL 混沌同步研究中的重要价值, 为该领域的发展提供了新思路.

关键词: 纳米激光器, 混沌同步, 主被动分解法, 混沌复用

PACS: 42.55.Px, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.74.20241659

CSTR: 32037.14.aps.74.20241659

1 引言

半导体激光器 (SL) 在光纤通信中的应用及其广泛, 是最常用的光源设备之一, 具有结构简单、质量轻、体积小、耗电少、工作寿命长和易于集成等诸多优点. 普遍认为, SL 在受到外部扰动时, 可以表现出复杂的非线性动力学行为. 通过合理的选择和控制参数, 能够高效地实现高维、宽带、复杂的混沌输出, 可以广泛应用于混沌保密通信^[1-5]、压缩感知^[6]、混沌雷达^[7]、储备池计算^[8-13]、神经计算^[14-18]和高速物理随机数生成^[19-21]等领域.

在混沌通信中, 小幅度信息嵌入到混沌载波中并传送到接收端, 而接收端激光器利用混沌同步和混沌滤波效应又再现混沌载波, 最后通过传输信号与接收端激光器输出的差异正确恢复信息^[22]. 因此, 混沌同步是混沌通信的必备条件. 混沌同步在光通信、保密通信、随机数生成以及混沌信号处理^[23]等领域中具有重要的应用潜力. 由于混沌激光器对初始条件和系统参数的高度敏感性, 可以产生复杂而难以预测的混沌信号, 这为加密通信提供了一种高效的解决方案. 在混沌激光通信系统中, 通过实现多个激光器之间的同步, 可以确保不同信号通道之间的独立性与安全性. 截至目前, 有关混沌同步

* 山东省自然科学基金 (批准号: ZR2020QF090) 和烟台市 2023 年校地融合发展项目 (批准号: 2323013-2023XDRH001) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ph_mu@ytu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: xuyuan@ytu.edu.cn

的研究集中在不同的激光器上^[24-26]. 例如, Zhang 等^[24]从理论上研究了两个相互耦合的垂直腔面发射激光器 (VCSEL) 的偏振切换 (PS) 动力学和同步性能, 发现足够强的偏振选择性注入可以抑制 PS, 若考虑频率失谐, 则偏振选择性相互注入的影响将减弱. Wang 等^[25]证明了两个自由运行的 VCSEL 产生的偏振混沌可以在相互耦合的配置中实现同步, 详细研究了平行注入和正交注入两种情况下偏振混沌的同步质量和稳健性. Li 等^[26]还以数值方式研究了主从配置中混沌同步的特性, 在所研究的耦合模式中, 采用全局注入方案, 两个混沌半导体环形激光器 (SRL) 模式之间的同步性能更好. 然而, 随着通信系统对小型化、高效性和稳定性的要求不断提高, NL^[27-29]因其体积小、功耗低和响应速度快, 逐渐成为混沌通信领域的新兴研究方向.

在混沌保密通信中, 当多个 SLs 之间信号同时传输时, 信号间的相互干扰势必会对系统的同步性能有所影响, 具有一定的局限性. Rontani 等^[30]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, 该方法通过合理设计系统参数, 使得多个激光器 (例如主激光器和从激光器) 之间能够实现高品质的混沌同步, 从而实现光信号的复用和解复用. 在此方案的基础上, 陆续有学者对混沌复用通信的频谱利用问题进行了研究^[31,32]. El-Azab 等^[32]针对混沌复用系统提高信道传输速率为 4 Gbit/s. Flunkert 和 Schöll^[31]对互耦 SL 系统中耦合相位对混沌同步性能的影响进行了研究. 此外, Liu 和 Feng^[33]研究了开环 SL 混沌通信系统的系统增益和参数失配对通信性能的影响. 赵跃鹏等^[34]在光注入 Fabry-Perot 系统中完成了高速光时分复用 (OTDM) 的全光解复用研究. Jing 等^[35]提出并演示了一种基于同步混沌谱相位加密和解密的新型物理、安全高速光通信方案, 将原始消息加密为类噪声信号, 并且原始消息的定时时钟有效地隐藏在加密信号中. 文献^[36]基于类似的系统结构, 对混沌信号的正交性进行了初步讨论. 在理想情况下, 要想实现基于 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, 这意味着两个信号可以被完全分离 (复用和解复用过程无干扰), 任何一个信号的存在都不会影响另一个信号, 因此是理想状态. 但是两路激光器之间存在相互耦合的现象, 无法实现完全正交性. 因此, 我们发现无法实现完全正交性的情况下, 存在一种“伪正

交性”, 即相关性很低, “伪正交性”是对完全正交性的一种近似, 它允许信号之间有微弱的相关性, 而非完全为零. 在实际系统中, 由于激光器间存在耦合、噪声和系统非理想性, 信号无法完全正交, 但其相关性可以降低到很低. 虽然文献^[37]分析了两个主激光器参数失配及参数选择对混沌同步性能的影响, 并对其复用系统的安全性能和频谱性能进行了研究, 但其只能在较小的范围内实现“伪正交性”. 相较于传统的 SL, NL 响应速度快、频谱利用效率高且具有较高的参数可调性, 有助于提升系统的传输速率以及优化混沌信号的同步性能, 更加适合研究高速复用通信. 同时, NL 体积小, 耦合性弱, 其间的相互干扰比传统激光器更低, 有助于实现更接近理想状态的“伪正交性”, 这为高质量混沌同步提供了稳定的物理基础. 因此, 我们选择 NL 来研究基于 APD 的微纳激光混沌系统的复用同步.

本文主要研究了基于 NL 的双路激光混沌复用系统的同步性, 相较于传统的 SL, 效果要好得多, 能够在较大参数范围内实现两主激光器间保持较低的相关性. 并且, 详细分析了系统参数、单个参数及多个参数同时失配对该复用系统同步性能的影响. 本文的结构如下: 第 2 节构建了双路激光混沌复用系统的理论模型和相应的速率方程; 第 3 节对得到的数值结果进行分析; 最后, 在第 4 节给出相应的结论.

2 理论与模型

基于 NL 的双路激光混沌复用系统的结构模型如图 1 所示. 该系统中有 4 个 NLs, 包括两个主激光器和两个从激光器. 在发送端, 主激光器 1 (M1) 和主激光器 2 (M2) 之间相互耦合, 它们各自接收两个信号: 一个是其自身的反馈信号, 另一个是来自互耦合 NL 的信号. 两个主激光器输出的复用混沌信号 (ET) 经过偏振控制器 (PC) 和光衰减器 (VA) 后由光纤耦合器 (FC) 合并到同一链路. 最后, ET 经过光隔离器 (OI) 和 VA 单向传送到接收端的从激光器 1 (S1) 和从激光器 2 (S2), 使得两个从激光器也产生混沌信号. 值得注意的是, M1/S1 和 M2/S2 相互配对, 基于 APD 原理, 两配对激光器之间能实现高质量的混沌同步.

图 1 中 M1 为主激光器 1, M2 为主激光器 2, S1 为从激光器 1, S2 为从激光器 2, PC 为偏振控制

器, VA 为光衰减器, FC 为光纤耦合器, M 为反射镜, ET 为两主激光器输出的复用混沌信号, OI 为

光隔离器.

所提出系统的速率方程为^[38–40]

$$\frac{dS_{M_{1,2}}(t)}{dt} = \Gamma \left[\frac{F\beta N_{M_{1,2}}(t)}{\tau_n} + \frac{g_n(N_{M_{1,2}}(t) - N_0)}{1 + \varepsilon S_{M_{1,2}}(t)} S_{M_{1,2}}(t) \right] - \frac{1}{\tau_p} S_{M_{1,2}}(t) + 2kd_{1,2} \sqrt{S_{M_{1,2}}(t) S_{M_{1,2}}(t - \tau_{d_{1,2}})} \cos(\theta_{1,2}(t)) + 2kr_{21,12}^M \sqrt{S_{M_{1,2}}(t) S_{M_{2,1}}(t - \tau_{r_{21,12}}^M)} \cos(\theta_{3,4}(t)), \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_{M_{1,2}}(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} \Gamma g_n(N_{M_{1,2}}(t) - N_{th}) \pm 2\pi \Delta f_{1,2} - kd_{1,2} \frac{\sqrt{S_{M_{1,2}}(t - \tau_{d_{1,2}})}}{\sqrt{S_{M_{1,2}}(t)}} \sin(\theta_{1,2}(t)) - kr_{21,12}^M \frac{\sqrt{S_{M_{2,1}}(t - \tau_{r_{21,12}}^M)}}{\sqrt{S_{M_{1,2}}(t)}} \sin(\theta_{3,4}(t)), \quad (2)$$

$$\frac{dN_{M_{1,2},S_{1,2}}(t)}{dt} = \frac{I}{eV_a} - \frac{N_{M_{1,2},S_{1,2}}(t)}{\tau_n} (F\beta + 1 - \beta) - \frac{g_n(N_{M_{1,2},S_{1,2}}(t) - N_0)}{1 + \varepsilon S_{M_{1,2},S_{1,2}}(t)} S_{M_{1,2},S_{1,2}}(t), \quad (3)$$

$$\frac{dS_{S_{1,2}}(t)}{dt} = \Gamma \left[\frac{F\beta N_{S_{1,2}}(t)}{\tau_n} + \frac{g_n(N_{S_{1,2}}(t) - N_0)}{1 + \varepsilon S_{S_{1,2}}(t)} S_{S_{1,2}}(t) \right] - \frac{1}{\tau_p} S_{S_{1,2}}(t) + 2kr_{11,22}^C \sqrt{S_{S_{1,2}}(t) S_{M_{1,2}}(t - \tau_{r_{11,22}}^C)} \cos(\theta_{5,7}(t)) + 2kr_{21,12}^C \sqrt{S_{S_{1,2}}(t) S_{M_{2,1}}(t - \tau_{r_{21,12}}^C)} \cos(\theta_{6,8}(t)), \quad (4)$$

$$\frac{d\phi_{S_{1,2}}(t)}{dt} = \frac{\alpha}{2} \Gamma g_n(N_{S_{1,2}}(t) - N_{th}) - 2\pi \Delta f_{11,22}^C - 2\pi \Delta f_{21,12}^C - kr_{11,22}^C \frac{\sqrt{S_{M_{1,2}}(t - \tau_{r_{11,22}}^C)}}{\sqrt{S_{S_{1,2}}(t)}} \sin(\theta_{5,7}(t)) - kr_{21,12}^C \frac{\sqrt{S_{M_{2,1}}(t - \tau_{r_{21,12}}^C)}}{\sqrt{S_{S_{1,2}}(t)}} \sin(\theta_{6,8}(t)), \quad (5)$$

$$\theta_{1,2}(t) = 2\pi f_{M_{1,2}} \tau_{d_{1,2}} + \phi_{1,2}(t) - \phi_{1,2}(t - \tau_{d_{1,2}}), \quad (6)$$

$$\theta_{3,4}(t) = 2\pi f_{M_{2,1}} \tau_{r_{21,12}}^M + \phi_{1,2}(t) - \phi_{2,1}(t - \tau_{r_{21,12}}^M) - 2\pi \Delta f_{21,12}^M t, \quad (7)$$

$$\theta_{5,7}(t) = 2\pi f_{M_{1,2}} \tau_{r_{11,22}}^C + \phi_{S_{1,2}}(t) - \phi_{S_{1,2}}(t - \tau_{r_{11,22}}^C), \quad (8)$$

$$\theta_{6,8}(t) = 2\pi f_{M_{2,1}} \tau_{r_{21,12}}^C + \phi_{S_{1,2}}(t) - \phi_{S_{1,2}}(t - \tau_{r_{21,12}}^C) - 2\pi \Delta f_{21,12}^C t. \quad (9)$$

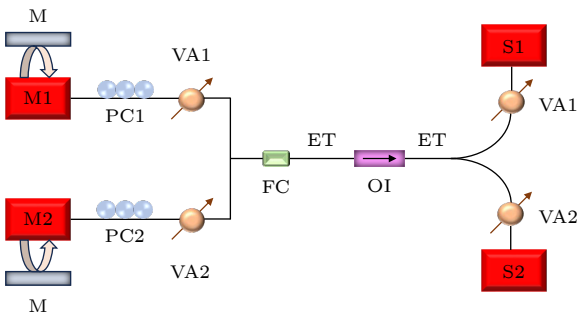


图 1 基于纳米激光器的双路激光混沌复用系统结构图

Fig. 1. Structure diagram of the dual-laser chaotic multiplexing system based on nanolasers.

在上述速率方程(1)–(5)中,下标“ $M_{1,2}$ ”和“ $S_{1,2}$ ”分别代表主激光器 M1 和 M2 以及从激光器 S1 和 S2. 其中, $S(t)$ 是相位密度, $\phi(t)$ 是相位, $N(t)$ 是载流子密度. 在该模型中 F 是 Purcell 因子, β 是自发辐射耦合因子, Γ 为约束因子, τ_n 和 τ_p 分别是辐射载流子寿命和光子寿命. g_n 为考虑群速度影响的差分增益, N_0 为透明载流子密度, ε 为增益饱和因子, α 为线宽增强因子. I 为直流偏置电流, I_{th} 是与 F 和 β 相关的阈值电流, V_a 为活性区体积, e 为电子电荷, N_{th} 为阈值载流子密度. 方程(6)–(9)中, $2\pi f_{M_{1,2}}$ 和 $2\pi f_{M_{2,1}}$ 是 M1 和 M2 之间的角频率失谐, 其中 $\Delta f_{21,12}^M = f_{M_{2,1}} - f_{M_{1,2}}$, 而 $\Delta f_{21,12}^C$ 则表示主从激光器间的频率失谐.

值得注意的是, 相互配对的主从激光器之间要想实现完全同步, 需要设置合理的注入参数和反馈参数. 方程(1)和(4)的最后一项表示注入项, 该项包括注入延迟(τ_r)和注入强度(kr), kr 的计算公式为^[38]

$$kr = (1 - R) \sqrt{\frac{R_{\text{inj}}}{R}} \frac{c}{2nL}, \quad (10)$$

其中, R 表示 NL 的腔面反射率, R_{inj} 表示注入比, c 为光在自由空间中的速度, n 代表折射率, L 表示 NL 反馈腔的长度.

同样, 在方程 (1) 和 (4) 中, 倒数第 2 项表示反馈项, 在该项中, 包含了反馈延迟 (τ_d) 和反馈强度 (kd). 这里, R_{ext} 为外镜的功率反射率, f 为反馈耦合分数, 即反射光场重新注入激光模式的分数. kd 的表达式表示为^[40]

$$kd = f(1 - R) \sqrt{\frac{R_{\text{ext}}}{R}} \frac{c}{2nL}. \quad (11)$$

假设 4 个激光器的内部参数都是相同的, 并且在仿真中忽略噪声对该系统带来的影响. 众所周知, 在注入系统中, τ_r 对激光器输出的动态特性的影响是最小的. 因此, 在接下来的研究中, 假设 $\tau_r = 0$. 表 1 列出了仿真中一些关键参数的数值.

表 1 仿真中使用的参数^[41]
Table 1. Parameters used in the simulation^[41].

参数	符号	参考值
约束因子	Γ	0.645
载流子寿命/ns	τ_n	1
光子寿命/ps	τ_p	0.36
反馈延迟/ns	τ_d	0.2
差分增益/(cm ³ ·s ⁻¹)	g_n	1.64×10^{-6}
透明载流子密度/cm ⁻³	N_0	1.1×10^{-18}
增益饱和因子/cm ³	ε	2.3×10^{-17}
线宽增强因子	α	5
活性区体积/cm ³	V_a	3.96×10^{-13}
纳米激光器的波长/nm	λ_0	1591
激光面反射率	R	0.85
注入比	R_{inj}	0—0.1
外镜的功率反射率	R_{ext}	0.95
折射率	n	3.4
空腔长度/ μm	L	1.39
反馈耦合分数	f	0—0.9

本文主要分析的是该系统激光器混沌输出的同步性能, 利用互相关函数 (CCF) 来量化 M1/S1 和 M2/S2 之间的同步质量, 定义的 CCF 为^[42]

$$C_{ij}(\Delta t) = \frac{\langle [I_i(t + \Delta t) - \langle I_i(t + \Delta t) \rangle][I_j(t) - \langle I_j(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I_i(t + \Delta t) - \langle I_i(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle \langle [I_j(t) - \langle I_j(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (12)$$

其中, i 和 j 分别表示为 M1/M2 和 S1/S2. Δt 是两个混沌时间序列之间的位移, $\langle \rangle$ 表示强度时间序列的平均值. 值得注意的是, $|C| = 1$ 表示相互配对的主从激光器间实现了完全的混沌同步, $|C| = 0$ 则表示两个激光器之间没有任何相关性. 在本文认为当 $|C| > 0.95$ 时, 两激光器之间混沌信号实现了高质量的混沌同步.

3 数值结果

本节采用四阶 Runge-Kutta 算法对上述混沌复用系统的速率方程进行数值模拟, 分析该系统的混沌同步特性, 探究关键参数及参数失配对同步性能的影响. 通过数值仿真, 实现了 M1/S1 和 M2/S2 之间的完全同步. 图 2 所示为 M1, M2, S1 和 S2 的时域输出波形, 由此可以看出所有激光器都工作在混沌状态. 图 3(a), (b) 分别为 M1/S1 和 M2/S2 的互相关曲线. 从图 3(a) 可以发现, M1 和 S1 输出之间的互相关函数曲线关于 $\Delta t = 0$ 对称, 且在该点相关性为 1, 这说明 M1 和 S1 同步且同步延迟为 0. 同理, 从图 3(b) 中可得出相同结论.

在 M1/S1 和 M2/S2 之间达到完全同步、实现各路独立信息同时传输的同时, 为了保证信息的安全传输, 信道间的串扰问题需要得到解决. 如引言所述, 要想实现基于 APD 的混沌复用, M1 和 M2 输出的混沌载波必须满足“伪正交性”, 即两者之间相关性较低. 图 4 为主激光器间的互相关曲线, 可以发现 M1 和 M2 间的最大相关系数为 0.7. 这表明, 各配对激光器之间虽然能实现高质量的混沌同步, 但是主激光器之间不满足“伪正交性”. 由于主激光器间存在的高相关性, 在主激光器 M1 输出的混沌载波中加载有用信息, 那么部分有用信息就可能被 M2 和 S1 恢复, 从而降低了该混沌复用系统的安全性. 若 M1 和 M2 同时加载两个完全独立有用信息, 则会出现信道串扰问题, 导致信息恢复不准确. 但是, 相比于传统 SL 仅能在小范围内实现“伪正交性”, 基于 NL 的混沌复用系统能够在广泛的参数范围内实现, 并且在较大的参数范围内保持其互相关系数在 0.4 以下, 这保证了两路有用信息的加密与解密. 为了在实现混沌同步的同时, 还能保证 M1/M2 输出的混沌信号满足“伪正交性”, 我们将详细研究相关参数对该系统实现同步的影响.

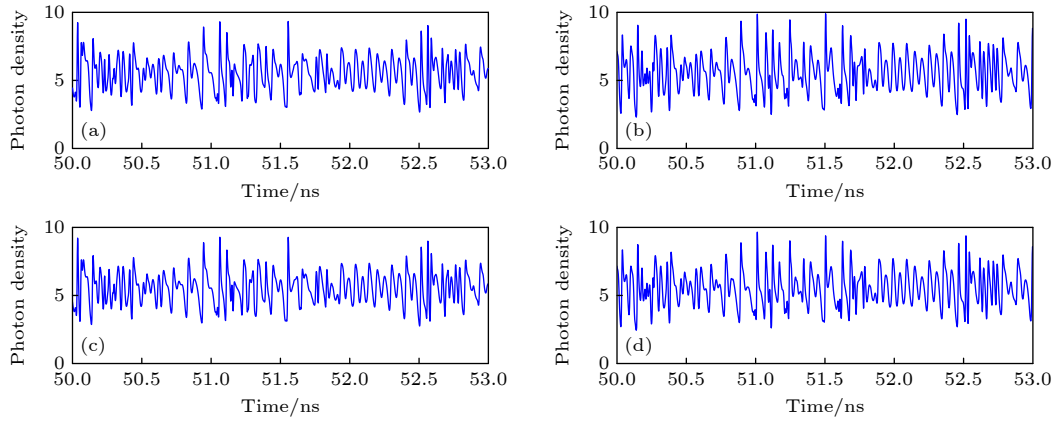


图 2 M1/S1 和 M2/S2 的混沌时间序列 (a) M1; (b) M2; (c) S1; (d) S2

Fig. 2. The time series of M1/S1 and M2/S2: (a) M1; (b) M2; (c) S1; (d) S2.

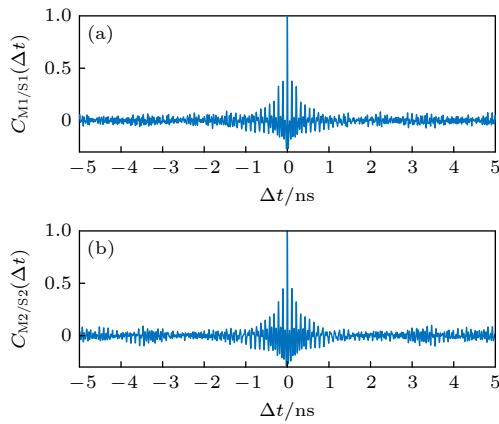


图 3 (a) M1/S1 和 (b) M2/S2 的互相关函数图

Fig. 3. Cross-correlation function plots of (a) M1/S1 and (b) M2/S2.

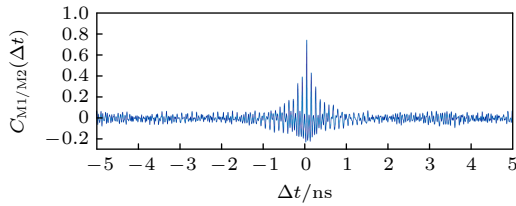


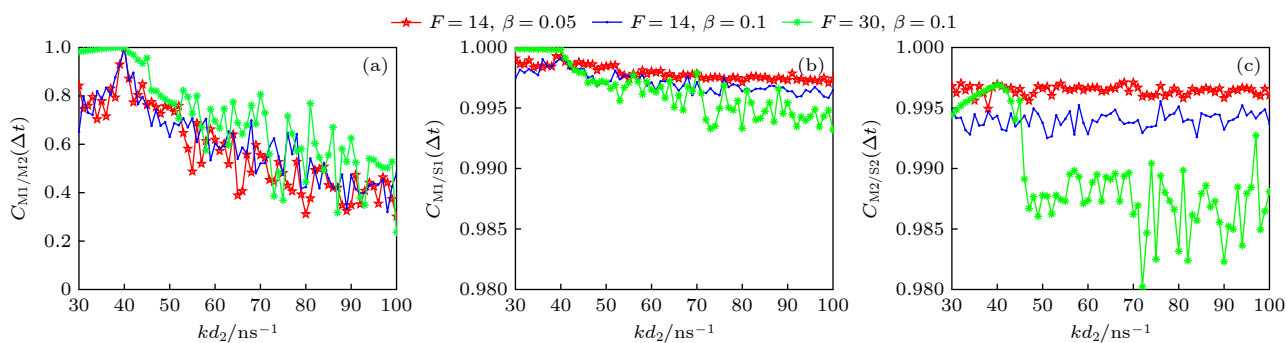
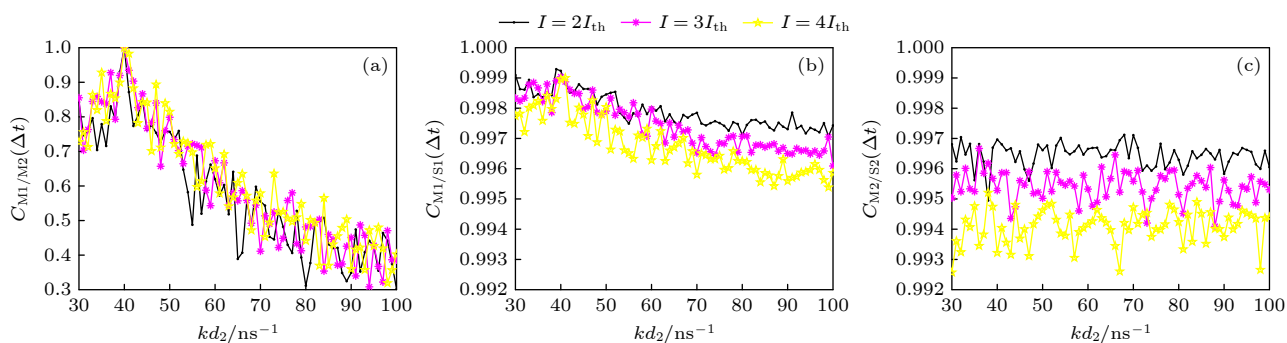
图 4 M1/M2 的同步图

Fig. 4. Synchronization diagram of M1/M2.

对于 NL 来说, 有两个重要的物理因子, 即 Purcell 因子 F 和自发辐射耦合因子 β [43,44], 对混沌同步的影响具有重要意义, Purcell 因子 F 反映了光学腔对自发辐射速率的增强效应, 通过精确调控, 能够显著提高光子发射速率和系统的非线性响应能力; 而自发辐射耦合因子 β 则表示进入受激辐射过程的自发辐射比例, β 越大, 激光器的自发辐射对输出光场的贡献越显著, 通过调节 F 和 β , NL 系统可以在更广泛的反馈强度和频率失谐范围

内维持高品质的混沌输出, 这显著优于传统激光器系统的能力. 因此, 接下来, 分析了 F 和 β 对 M1/M2, M1/S1 和 M2/S2 同步性能的影响, 结果如图 5 所示. 从图 5(a) 可以看出, kd_2 的增大对主激光器之间互相关函数的影响是非线性的. 在不同 F 和 β 的组合下, M1 和 M2 之间的最大相关系数 C_{12} 随 kd_2 的增大, 呈现先增大后减小的趋势. 这说明适中的反馈增强了激光器之间的相关性, 而过强的反馈则可能引入了不稳定性 and 噪声, 使得互相关函数呈现下降趋势, 这种趋势反映了激光器在 kd_2 变化下从同步态到混沌态的过渡. 相较于 $F = 14$, $\beta = 0.1$ 和 $F = 30$, $\beta = 0.1$, 当 $F = 14$, $\beta = 0.05$ 时, M1 和 M2 之间的相关性更低. 同时, 图 5(b), (c) 分别为不同参数组合下 M1/S1 和 M2/S2 的互相关曲线, 根据结果显示, 不同 F 和 β 取值下已配对的激光器均可以实现高质量同步. 其中 $F = 14$, $\beta = 0.05$ 时, M1/S1 和 M2/S2 的相关系数最高. 根据之前的研究我们发现 [45], 较小的 F 和 β 可以使时延能够在较大范围内实现隐藏. 因此, 在后续的研究中选择 $F = 14$, $\beta = 0.05$ 是合适的.

注入电流是决定激光器输出特性的重要外部参数之一, 并且对混沌系统的同步性具有显著的调控作用. 因此, 有必要研究激光器注入电流对系统混沌同步的影响. 所以接下来将 $F = 14$ 和 $\beta = 0.05$ 固定, 然后研究不同 q 值, 即注入电流比对系统同步的影响. 图 6(a)—(c) 分别为 M1/M2, M1/S1 和 M2/S2 的最大相关系数随 kd_2 变化的示意图. 在图 6(a) 中可以发现, 随着 kd_2 的增大, 不同 q 取值下 M1 和 M2 之间的最大相关系数都呈现出先增大后减小的趋势, 并且对主激光器 M1 和 M2 之间

图 5 F 和 β 不同时, NLs 之间的 CCF 图 (a) M1/M2; (b) M1/S1; (c) M2/S2Fig. 5. CCF plots between NLs under different values of F and β : (a) M1/M2; (b) M1/S1; (c) M2/S2.图 6 不同 I 值对 M1/M2, M1/S1 和 M2/S2 同步影响图 (a) M1/M2; (b) M1/S1; (c) M2/S2Fig. 6. Effect of different I values on the synchronization of M1/M2, M1/S1, and M2/S2: (a) M1/M2; (b) M1/S1; (c) M2/S2.

的最大相关系数的影响相似. 然而, 对于 M1/S1 和 M2/S2 的同步情况, 3 种电流表示出不同的结果. 从图 6(b), (c) 可以看出, 虽然 M1/S1 和 M2/S2 在 3 种电流下都能实现较好的同步, 但是, 随着注入电流的增大, M1/S1 和 M2/S2 的最大相关系数 C_{13} 和 C_{24} 的数值则下降. 由此可得到, 较小的注入电流, 即工作电流 $I = 2I_{th}$, 能够使配对的激光器实现更高质量的混沌同步. 其中, 该系统所设定的阈值电流 $I_{th} = 1.1$ mA, 在该系统中 I_{th} 是调整 I 的基准, 将激光器的 I 保持在略高于 I_{th} 的水平, 可以使其维持稳定的输出, 这对于系统之间同步的动态特性和稳定性至关重要. 因此, 为了保证 M1/S1 和 M2/S2 的高质量同步, 选择 $I = 2I_{th}$ 能够更好地进行后续的研究.

众所周知, 反馈强度和频率失谐是影响混沌系统动态特性的重要因素. 下面讨论反馈强度 kd_2 和频率失谐 Δf_{12}^M 对此复用系统的混沌同步性能的影响. 图 7 给出了当 kd_2 和 Δf_{12}^M 同时变化时, 激光器间最大相关函数的变化趋势, 图 7(a)—(c) 分别对应 M1/M2, M1/S1 和 M2/S2 的结果. 从图 7(b), (c) 可以看出, M1/S1 和 M2/S2 在整个参数平面内都

实现了混沌同步, 表明这两个参数对它们的同步性能并无明显影响. 然而, 从图 7(a) 可以发现, 反馈强度和频率失谐对主激光器间同步性能具有明显影响. 相较于反馈强度对同步性能的影响, 频率失谐对其影响更为显著. 具体来说, 当频率失谐在 -10 — 10 GHz 范围内时, C_{12} 的值均大于 0.4 . 并且, 当 $kd_2 < 50$ ns $^{-1}$ 时, C_{12} 值甚至超过了 0.8 . 说明 M1 和 M2 在 $\Delta f_{12}^M = [-10$ GHz, 10 GHz] 范围内不能满足两个激光器的“伪正交性”. 但是, 相较于基于传统 SL 双路混沌系统, 该 NL 系统能够在更广泛的参数范围内保证主激光器具有较差的同步性能, 即当 $\Delta f_{12}^M < -10$ GHz 和 $\Delta f_{12}^M > 10$ GHz 时满足系统两个主激光器“伪正交性”的要求. 进一步证明了本文所提出的系统能够在更大程度上实现降低两个主激光器之间相关系数, 进而保证两路独立信息的加密与解密.

参数失配在实际应用中是不可避免的, 尤其在复杂的混沌系统中, 它会对系统的同步性能产生显著影响. 因此, 我们探究了关键参数失配对该系统同步性能的影响. 在这里, M1 和 S1 之间的参数以及 M2 和 S2 之间的参数保持一致. 并且, 设置 M1

和 S1 的注入强度为 40 ns^{-1} , M2 和 S2 之间的注入强度为 50 ns^{-1} . 假定 M1 的参数固定不变, 调节 M2 的关键参数, 来定量分析两个激光器之间的同步性能. 定义参数失配率如下 [43]:

$$\mu = \frac{\Pi^{\text{NL1}} - \Pi^{\text{NL2}}}{\Pi^{\text{NL1}}}, \quad (13)$$

其中, Π 表示参数包括载流子寿命 τ_n 、差分增益系数 g_n 、光子寿命 τ_p 、线宽增强因子 α 和透明载流子密度 N_0 .

图 8 所示为单个参数失配时, M1/M2, M1/S1 和 M2/S2 的最大相关系数随参数失配率的变化. 通过观察图 8(a) 可发现, 不同参数对 M1/M2 的同步性能有不同程度的影响. 其中, τ_p , τ_n , g_n 在较大的参数失配率下可以使主激光器的最大相关系数保持在 0.4 以下, 而其他参数对主激光器的同步性能影响较小, 无法保证它们之间的弱相关性, 且这些参数的失配不会明显改变激光器之间的同步状态, 这说明该混沌系统对这些参数并不敏感. 图 8(b), (c) 分别展示了单个参数失配对 M1/S1 和 M2/S2 同步性能的影响, 可以发现在参数失配的

整个范围内, 各配对激光器之间的互相关函数值总是大于 0.995, 可以实现高品质的混沌同步. 因此, 单个参数失配并不会对配对激光器的同步性能有较大影响.

当多个参数同时失配时, 可能会对混沌系统的同步性能产生更复杂和显著的影响, 所以接下来, 又继续研究了多个参数同时失配对该系统同步性能的影响. 为了减少 Δf_{12}^M 的影响, 在接下来的数值模拟中, 设置 $\Delta f_{12}^M = 0$. 图 9 所示为当 $\Delta f_{12}^M = 0$ 时, 最大相关系数随参数失配率 μ 和 kd_2 变化的结果. 图 9(a)–(c) 对应 M1/M2, M1/S1 和 M2/S2 的结果. 由图 9(a) 可以看出, 仅在 $-0.03 < \mu < 0.03$ 范围内, 主激光器间的最大互相关系数大于 0.4, 在参数失配率 $\mu = 0$ 左右且反馈强度 $kd_2 < 50 \text{ ns}^{-1}$ 范围内的最大相关系数接近于 1. 然而, 在广泛的参数失配范围内可以保证 M1/M2 具有较差的同步性能, 即当 $\mu < -0.03$ 或 $\mu > 0.03$ 时, 满足系统两个主激光器混沌输出的“伪正交性”的要求, 可以在更大的参数失配范围内确保每个通道独立传输信息而不会互相干扰, 增强了系统的保密性和抗干扰能力.

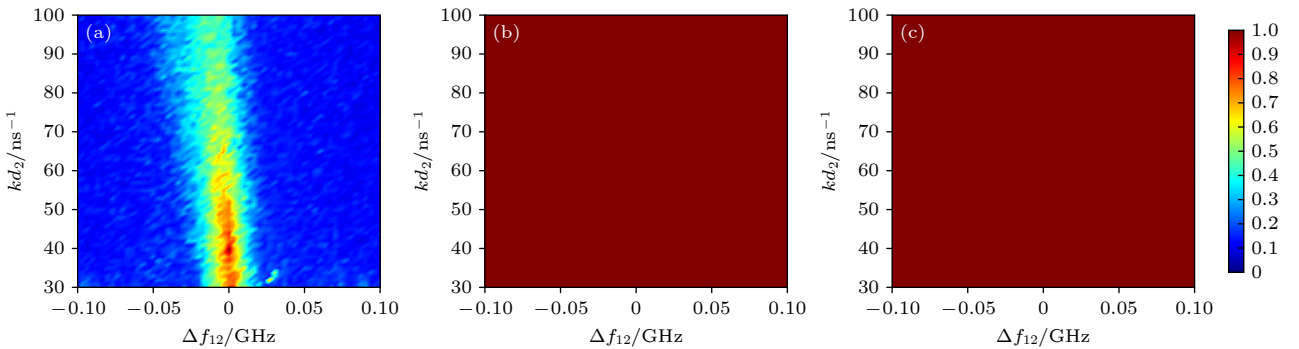


图 7 反馈强度和频率失谐对 (a) M1/M2, (b) M1/S1 和 (c) M2/S2 同步性影响的二维彩图

Fig. 7. The two-dimensional colormap of feedback intensity and frequency detuning on the synchronization of (a) M1/M2, (b) M1/S1, and (c) M2/S2.

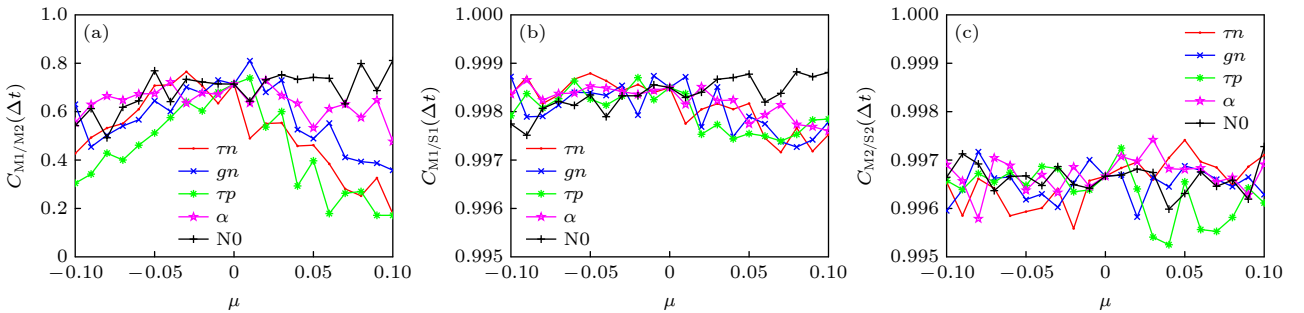


图 8 单个参数失配对 (a) M1/M2, (b) M1/S1 和 (c) M2/S2 同步影响图

Fig. 8. Effect of single parameter mismatch on the synchronization of (a) M1/M2, (b) M1/S1, and (c) M2/S2.

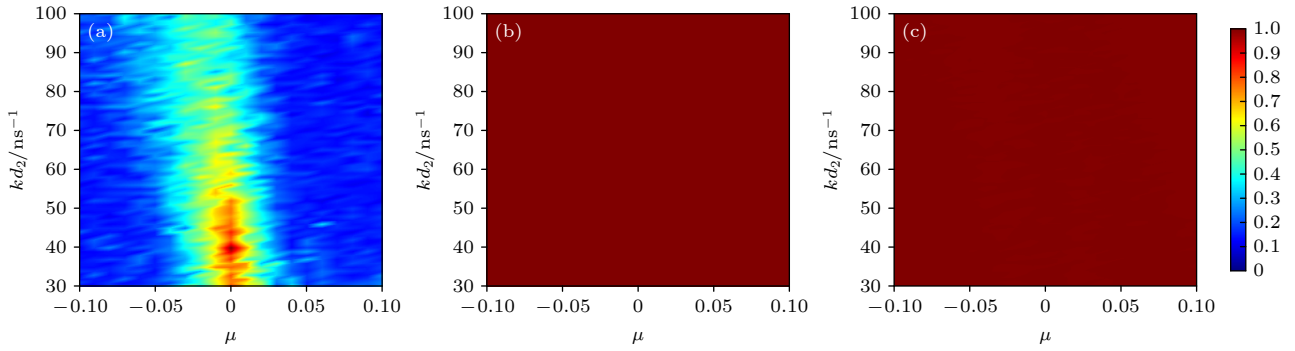


图 9 参数失配对 (a) M1/M2, (b) M1/S1 和 (c) M2/S2 同步影响的二维图

Fig. 9. The two-dimensional colormap of the effects of parameter mismatch on the synchronization of (a) M1/M2, (b) M1/S1, and (c) M2/S2.

以上结果说明, 合理选择频率失谐和参数失配的值, 可以保证 M1/M2 之间具有较弱的相关性, 并且, 各配对的激光器之间总是能够实现高质量的混沌同步. 同时, 论证了本文所提出的基于 NL 的激光混沌复用系统的可行性.

4 结 论

本文对基于纳米激光器的双路激光混沌复用系统的同步性进行了详细研究. 在建立理论模型和相关速率方程的基础上, 讨论了 F 和 β 、系统参数、单个参数失配以及多个参数同时失配对混沌同步的影响. 研究结果表明, 该系统在合理选择激光器参数和系统参数的情况下, 可以保证主激光器之间的相关性较低且各配对激光器之间能够实现高品质的混沌同步. 在此基础上, 我们发现单个参数失配并不会对配对激光器的同步性能有较大影响, 而当多个参数同时失配时, 在广泛的参数范围内可以保证 M1/M2 具有较差的同步性能, 满足系统两个主激光器混沌输出的“伪正交性”的要求. 因此, 这项研究为基于纳米激光器的混沌同步技术提供了理论支持, 也为构建安全、稳定和高效的光通信系统提供了新的思路.

参考文献

- [1] Jiang N, Zhao A K, Liu S Q, Xue C P, Qiu K 2018 *Opt. Express* **26** 32404
- [2] Tang Y W, Li Q L, Dong W L, Hu M, Zeng R 2021 *Opt. Commun.* **498** 127232
- [3] Wang L S, Du X Y, Mao X X, Guo Y Y, Wang A B, Wang Y C 2024 *Opt. Lett.* **49** 5901
- [4] Wang Y M, Huang Y, Zhou P, Li N Q 2023 *Electronics* **12** 509
- [5] Wang L S, Guo Y Y, Wang D M, Wang Y C, Wang A B 2019 *Opt. Commun.* **453** 124350
- [6] Rontani D, Choi D, Chang C Y, Locquet A, Citrin D S 2016 *Sci. Rep.* **6** 35206
- [7] Lin F Y, Liu J M 2004 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **10** 991
- [8] Cai D Y, Mu P H, Huang Y, Zhou P, Li N Q 2024 *Chaos Soliton. Fract.* **189** 115652
- [9] Li X Y, Jiang N, Zhang Q, Tang C J, Zhang Y Q, Hu G, Cao Y S, Qiu K 2023 *Opt. Express* **31** 28764
- [10] Liu Y, Wu Z M, Tan S L, Xia G Q 2023 *Opt. Laser Technol.* **161** 109200
- [11] Jin J Y, Jiang N, Zhang Y Q, Feng W Z, Zhao A K, Liu S Q, Peng J F, Qiu K, Zhang Q W 2022 *Opt. Express* **30** 13647
- [12] Wang Q P, Xia G Q, Tan S L, Liu Y, Liu Y T, Zhao M R, Wu Z M 2022 *Appl. Opt.* **61** 10086
- [13] Zhou C D, Huang Y, Yang Y G, Cai D Y, Zhou P, Lau K, Li N Q, Li X F 2024 *Opto-Electron Adv.* **8** 240135
- [14] Robertson J, Wade E, Kopp Y, Bueno J, Hurtado A 2019 *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **26** 1
- [15] Xiang S Y, Wen A J, Pan W 2016 *IEEE Photonics J.* **8** 1
- [16] Fan X Q, Mao X X, Wang L S, Fu S N, Wang A B, Wang Y C 2024 *Opt. Lett.* **49** 4445
- [17] Xiang S Y, Song Z W, Gao S, Han Y N, Zhang Y H, Guo X X, Hao Y 2021 *Acta Photonica Sin.* **50** 1020001
- [18] Xiang S Y, Ren Z X, Song Z W, Zhang Y H, Guo X X, Han G Q, Hao Y 2021 *IEEE T. Neur. Net. Lear.* **32** 2494
- [19] Xiang S Y, Wang B, Wang Y, Han Y N, Wen A J, Hao Y 2019 *J. Lightwave Technol.* **JLT** **37** 3987
- [20] Zhang S Y, Tang X, Xia G Q, Wu Z M 2020 *Semiconductor Lasers and Applications X* **11545** 70
- [21] Huang Y, Zhou P, Lau K Y, Li N Q 2024 *ACS Photonics* **11** 5012
- [22] Kinzel W, Kanter I 2007 *Handbook of Chaos Control* pp301–324
- [23] Li A R, Jiang N, Geng Y, Zhang Q, Xiao Y L, Zhang Y Q, Xu B, Qiu K 2024 *J. Lightw. Technol.* **42** 8730
- [24] Zhang W L, Pan W, Luo B, Li X F, Zou X H, Wang M Y 2007 *Chin. Phys.* **16** 1996
- [25] Wang Z R, Li P, Jia Z W, Wang W J, Xu B J, Shore K A, Wang Y C 2021 *Opt. Express* **29** 17940
- [26] Li N Q, Pan W, Yan L S, Luo B, Zou X H 2014 *Commun. Nonlinear Sci.* **19** 1874
- [27] Saldutti M, Yu Y, Mørk J 2024 *Laser Photonics Rev.* **18** 2300840
- [28] Fan Y L, Shi T, Zhang J, Shore K A 2024 *Opt. Express* **32** 19361
- [29] Fan Y L, Shore K A, Shao X P 2023 *Photonics* **10** 1249
- [30] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, Citrin D S 2010 *Opt. Lett.* **35** 2016

- [31] Flunkert V, Schöll E 2012 *New J. Phys.* **14** 033039
- [32] El-Azab J, El-Khodary A, Hassab-Elnaby S 2013 *High Capacity Optical Networks and Emerging/Enabling Technologies*, Magosa, Cyprus, 2013, pp199–203
- [33] Liu H J, Feng J C 2011 *J. Electron. (China)* **28** 126
- [34] Zhao Y P, Zhang M, Jiang A Y, Wang Y C 2008 *Acta Opt. Sin.* **28** 1236 (in Chinese) [赵跃鹏, 张明, 江安义, 王云才 2008 光学学报 **28** 1236]
- [35] Jiang N, Zhao A K, Xue C P, et al. 2019 *Opt. Lett.* **44** 1536
- [36] Zhao Q C, Yin H X 2013 *Opt. Laser Technol.* **47** 208
- [37] Mu P H, Pan W, Li N Q, Yan L S, Lou B, Zou X H, Xu M F 2015 *Acta Phys Sin.* **64** 124206 (in Chinese) [穆鹏华, 潘炜, 李念强, 闫连山, 罗斌, 邹喜华, 徐明峰 2015 物理学报 **64** 124206]
- [38] Zhang X T, Guo G, Liu X T, Hu G S, Wang K, Mu P H 2023 *Photonics* **10** 1196
- [39] Wu S F, Buckley S, Schaibley J R, Feng L F, Yan J Q, Mandrus D G, Hatami F, Yao W, Vučković J, Majumdar A, Xu X D 2015 *Nature* **520** 69
- [40] Qu Y, Xiang S Y, Wang Y, Lin L, Wen A J, Hao Y 2019 *IEEE J. Quant.* **55** 1
- [41] Jiang P, Zhou P, Li N Q, et al. 2020 *Opt. Express* **28** 26421
- [42] 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
- [43] Sattar Z A, Shore K A 2015 *IEEE J. Sel. Topi. Quant.* **21** 500
- [44] Sattar Z A, Shore K A 2016 *IEEE J. Quant.* **52** 1
- [45] Jiang P, Zhou P, Li N Q, Mu P H, Li X F 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 114201 (in Chinese) [蒋培, 周沛, 李念强, 穆鹏华, 李孝峰 2021 物理学报 **70** 114201]

Multiplexing synchronization implementation of micro-nano laser chaotic system based on active-passive decomposition method*

MU Penghua[†] WANG Yiqiao HE Pengfei XU Yuan[‡]

(School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China)

(Received 28 November 2024; revised manuscript received 27 December 2024)

Abstract

Nanolaser (NL), as an important optical source device, has a significant influence on photonic integrated circuits and has become a research hotspot in recent years. In this work, the synchronization performance of a dual-channel laser chaotic multiplexing system is investigated based on NLs and an active-passive decomposition is used to enhance signal processing and multiplexing efficiency. By establishing a rate equation model, the synchronization characteristics of the system are analyzed, with a focus on two key parameters—Purcell factor (F) and spontaneous emission coupling factor (β)—as well as the effects of system parameters, single-parameter mismatch, and multi-parameter mismatch. Numerical simulations show that with appropriate parameter configurations, the two master NLs can maintain low correlation, ensuring the "pseudo-orthogonality" of chaotic signals while achieving high-quality chaotic synchronization with their paired slave NLs. In this work it is found that both the Purcell factor (F) and the spontaneous emission coupling factor (β) significantly affect the synchronization performance of the system, and the optimal parameter ranges for achieving high-quality synchronization are identified. Additionally, the effects of feedback strength and frequency detuning are explored, revealing that frequency detuning plays a more critical role in the synchronization between the master NLs. The influence of parameter mismatches on system synchronization performance is also emphasized. The system exhibits robustness against single-parameter mismatch and has minimum influence on master-slave synchronization quality. However, multi-parameter mismatch gives rise to more complex effects. Compared with the traditional semiconductor laser systems, this system can maintain "pseudo-orthogonality" over a wider range of parameters, thus achieving higher security and lower channel interference. This research lays a theoretical foundation for chaos synchronization based on NLs and provides new insights for designing secure, stable, and efficient optical communication systems.

Keywords: nanolaser, chaotic synchronization, master-slave decomposition method, chaotic multiplexing

PACS: 42.55.Px, 05.45.Pq

DOI: 10.7498/aps.74.20241659

CSTR: 32037.14.aps.74.20241659

* Project supported by the Natural Science Foundation of Shandong Province, China (Grant No. ZR2020QF090) and the Yantai City 2023 School-Land Integration Development Project Fund, China (Grant No. 2323013-2023XDRH001).

[†] Corresponding author. E-mail: ph_mu@ytu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: xuyuan@ytu.edu.cn



基于主被动分解法的微纳激光混沌系统的复用同步实现

穆鹏华 王译乔 贺鹏飞 徐源

Multiplexing synchronization implementation of micro–nano laser chaotic system based on active–passive decomposition method

MU Penghua WANG Yiqiao HE Pengfei XU Yuan

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 054203 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241659

CSTR: 32037.14.aps.74.20241659

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241659>

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

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

级联耦合纳米激光器混沌时延特征消除和带宽增强

Chaotic time delay feature cancellation and bandwidth enhancement in cascaded–coupled nanolasers

物理学报. 2024, 73(10): 104204 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231643>

基于共振波导光栅结构准连续域束缚态的低阈值纳米激光器的数值研究

Numerical study of the low– threshold nanolaser based on quasi–bound states in the continuum supported by resonant waveguide grating structures

物理学报. 2023, 72(4): 044202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221894>

自混沌光相位调制光反馈半导体激光器输出光的混沌特性

Chaotic characteristics of output light from semiconductor laser with self–chaotic phase modulation and optical feedback

物理学报. 2022, 71(15): 150502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220204>

混沌光注入半导体激光器中极端事件的演变

Evolution of extreme events in chaotic light–injected semiconductor lasers

物理学报. 2023, 72(16): 164201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230759>

激光局域网络的混沌控制及并行队列同步

Chaos–control and parallel queue synchronization of laser local area network

物理学报. 2021, 70(8): 080501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201251>

基于滑模趋近律的忆阻混沌系统有限和固定时间同步

Finite and fixed–time synchronization of memristive chaotic systems based on sliding mode reaching law

物理学报. 2024, 73(18): 180503 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241013>