

文章编号: 1000-5862(2012)01-0075-04

多纵模半导体激光器的混沌同步研究

柯 强, 胡菊菊

(江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)

摘要: 建立了多纵模外腔半导体激光器与单纵模半导体激光器的单向耦合系统理论模型, 研究了不同纵模间的混沌同步及系统参数的影响. 研究表明, 当内部参数完全匹配时该系统的同步性能较好, 而且在内部参数不完全匹配的情况下也能保持较好的鲁棒性, 这说明在基于混沌的保密光通信中利用多纵模同步进行混沌复用通信是完全有可能的.

关键词: 混沌同步; 多纵模激光器; 单纵模激光器; 参数失配

中图分类号: TN 248.4; TN 929.1; O 437

文献标志码: A

0 引言

近10年来, 混沌同步引起了人们的广泛关注, 有很多关于单向耦合混沌激光器同步的报道^[1-3], 也有对互耦合边发射半导体激光器(EESL)^[4-6]和垂直腔面发射激光器(VCSEL)同步的研究^[7]. 混沌同步最显著的应用就是保密通信, 因为它具有高维动力学复杂性、类噪声和宽频等特性, 利用这些固有特性可以有效地实现信号的隐藏. 在混沌通信中, 信息被加到发射机产生的混沌载波中, 然后用混沌同步接收机提取. 要实现信息的有效提取, 接收机与发送机的同步质量至关重要. 学者们先后提出了很多混沌通信系统, 它们都能成功恢复原始信号^[8-10], 主要分为闭环和开环2种结构, 闭环是使用外腔接收激光器, 而开环则是使用独立激光器. 要获得混沌同步, 接收激光器与发送激光器的参数必须匹配, 对开环结构的完全同步而言, 由发送机到接收机的光注入应与发送机的反馈相等, 但是, 如果光注入比光反馈大得多时, 即使设备参数不匹配, 激光器也可以实现注入锁定^[11-12]. 这种同步方式与完全同步不同, 称作注入锁定同步或广义同步. 当完全同步时, 接收机只是和发送机载波同步, 而不是与加信息后的输出同步, 所以只需用接收机的输入减去输出即可实现信息的提取. 注入锁定同步时, 接收

机是和加信息后发送机的输出同步, 但由于接收机的信息幅度比发送机的信息幅度小, 所以同样可以由接收机的输入与输出差恢复出原始信号^[13-15]. 另外, 光频匹配也是实现同步的必要条件, 通常采用的是2个单模激光器作为发送机和接收机, 而M.W.Lee等^[16]实验研究了1个多纵模激光器到2个单纵模激光器的光注入, 它们的频率分别和多模激光器2个不同模式的频率匹配, 这种结构很容易扩展到复用通信, 但至今为止相关的理论研究甚少. 本文通过建立一个系统模型, 从理论上验证单模激光器的纵模与相应多模激光器的纵模同步, 并分析参数失配对同步性能的影响.

1 系统方案与理论模型

系统结构如图1所示, 外腔光反馈多纵模半导体激光器的输出单向注入到不同的单纵模半导体激光器, 2个接收激光器的频率分别与发送激光器的2个纵模相同.

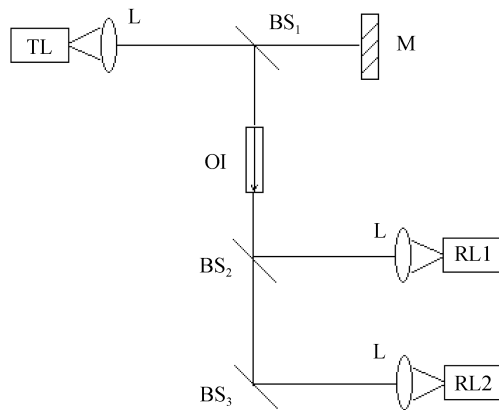
根据 Lang-Kobayashi 方程, 描述多纵模激光器与单纵模激光器开环混沌同步系统动力学特性的速率方程为

$$\begin{aligned} \frac{dE_{1,2}^t}{dt} = & k_{1,2}^t (1 + \alpha_{1,2}^t) (G_{1,2}^t - 1) E_{1,2}^t + \\ & \gamma_{1,2}^t E_{1,2}^t (t - \tau_f) \exp(-i\omega_{1,2}^t \tau_f), \end{aligned} \quad (1)$$

收稿日期: 2011-08-29

基金项目: 江西省自然科学基金(20114BAB202003)和江西省教育厅科技课题(GJJ10401)资助项目.

作者简介: 柯 强(1979-), 男, 江西南昌人, 讲师, 硕士, 主要从事信号检测与处理方面的研究.



注: TL 为发送激光器; RL 为接收激光器; BS 为分束器; M 为反射镜; OI 为光隔离器; L 为透镜。

图 1 同步系统结构图

$$dE_{1,2}^r/dt = k_{1,2}^r (1 + \alpha_{1,2}^r) (G_{1,2}^r - 1) E_{1,2}^r + \eta_{1,2}^r E_{1,2}^t (t - \tau_c) \exp[-i(\omega_{1,2}^r \tau_c + \Delta\omega_{1,2} t)], \quad (2)$$

$$dN_{1,2}^{t,r}/dt = \left(J_{1,2}^{t,r} - N_{1,2}^{t,r} - G_{1,2}^{t,r} |E_{1,2}^t|^2 \right) / \tau_{1,2}^{t,r}, \quad (3)$$

其中 E 为慢变复电场, N 为归一化载流子密度, k 为腔损耗, α 为线宽增强因子, γ 和 τ_f 分别为发送激光器的外腔反馈强度和反馈时间, η 和 τ_c 分别为发送激光器到接收激光器的耦合强度和耦合时间, $G_{1,2}^{t,r} = N_{1,2}^{t,r} \left(1 - \varepsilon_{11,22}^{t,r} |E_{1,2}^t|^2 - \varepsilon_{12,21}^{t,r} |E_{2,1}^t|^2 \right)$ 为光增益, 其中 $\varepsilon_{11,22}$ 为自增益饱和系数, $\varepsilon_{12,21}$ 为互增益饱和系数, J 为归一化注入电流, τ 为载流子寿命, $\Delta\omega$ 为发送激光器与接收激光器相应模式的频率失谐。上标 t 、 r 分别代表发送激光器和接收激光器, 发送激光器中下标 1、2 表示多模激光器的 2 个纵模, 接收激光器中下标 1、2 表示 2 个单模激光器的纵模。

2 数值结果

虽然单模和多模半导体激光的动力学特性极其不同, 但根据 Lee 和 Shore 的实验结果可知, 尽管多模激光器各模式间存在一定的干扰, 但总体上它们仍然可以获得同步。为了从理论上验证这一实验结果, 在仿真实验中, 先考虑发送机与接收机相应模式参数完全匹配时系统的同步性能, 各参数取值如表 1 所示, 频率失谐 $\Delta\omega = 0$, 归一化频率

$\omega_{11} = 0.30$, $\omega_{12} = 0.25$, 这时每个接收机分别与发送机的 2 个模式对应, 其输出特性如图 2 所示, 左侧是各模式的输出功率, 右侧是对应的光功率谱, 从波形图可以看出, 接收机和发送机的输出功率很相似, 为了定量地分析二者之间的关系, 图 3 给出了对应时间序列的同步图并计算了互相关函数, 互相关函数可由下式得到:

$$C_{1,2}(\Delta\tau) = \frac{\langle I_{1,2}(t - \Delta\tau) - \langle I_{1,2}(t) \rangle \rangle \langle I_3(t) - \langle I_3(t) \rangle \rangle}{\sqrt{\langle (I_{1,2}(t) - \langle I_{1,2}(t) \rangle)^2 \rangle \langle (I_3(t) - \langle I_3(t) \rangle)^2 \rangle}}, \quad (4)$$

其中 $\Delta\tau = \tau_c - \tau_f$, $I_{1,2}$ 分别是多纵模激光器 2 个模式的输出功率, I_2 、 I_3 分别是单模激光器的输出功率。由图 3(c) 和图 3(d) 可以看出, 在 $\Delta\tau = 5 \times 10^{-6}$ s 处互相关函数有最大值, 即实现了延迟完全同步, 但由于模式之间的相互影响, 不同模式间的相关程度不同, 从数值研究结果看, 频率较高的模式对频率较低的模式干扰较大, 因此在复用通信中频率较低的信道误码率会更大, 这与实验结果一致, 从而说明该理论模型是有效的。

表 1 数值仿真参数值

参数	取值
腔损耗 K/GHz	500
线宽增强因子 α	3
自增益饱和系数 $\varepsilon_{11,22}$	0.001
互增益饱和系数 $\varepsilon_{12,21}$	0.000 5
反馈强度 γ/GHz	2.5
反馈时间 $\tau_f/(10^{-6}\text{s})$	5
耦合强度 η/GHz	2.5
耦合时间 $\tau_c/(10^{-6}\text{s})$	10
注入电流 J	1.5
载流子寿命 $\tau/(10^{-6}\text{s})$	1

下面再考虑参数不匹配时系统的同步性能, 由于外部参数可以调控, 而激光器内部参数难以匹配, 因此我们假设某些固有参数如表 2 所示, 同样计算发送机与接收机输出功率的互相关函数如图 4 所示, 在较大失配条件下, 虽然两信道上的最大互相关系数都减小了, 但从整体上看, 其同步质量是可以接受的, 即该系统有较好的鲁棒性, 具有应用于混沌复用通信的潜能。

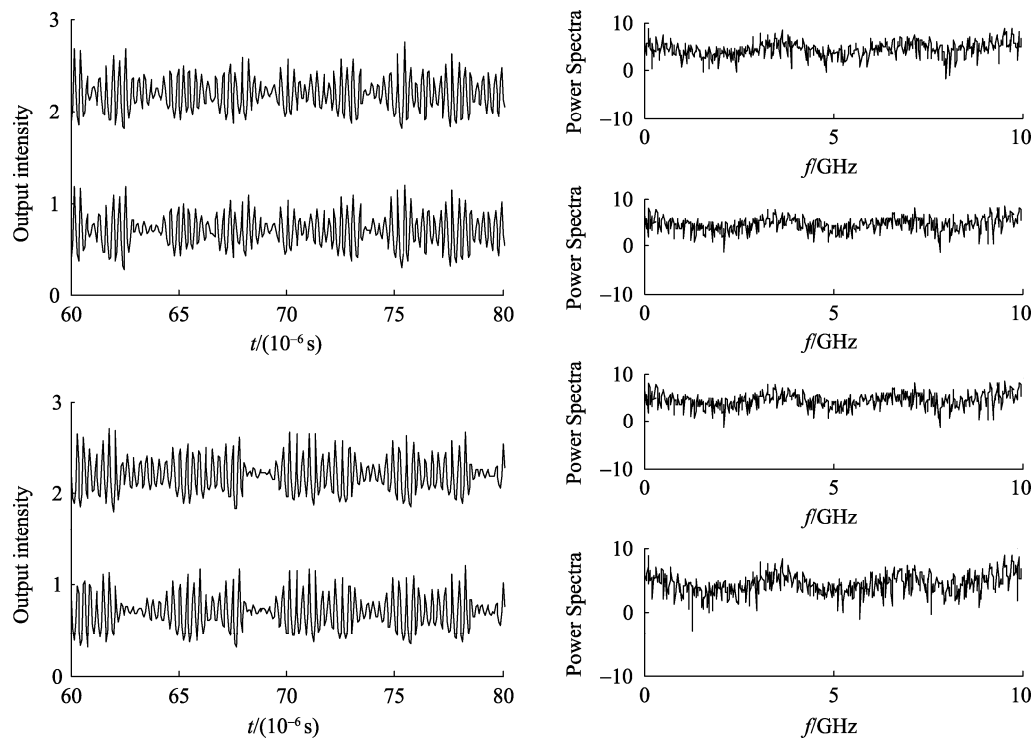
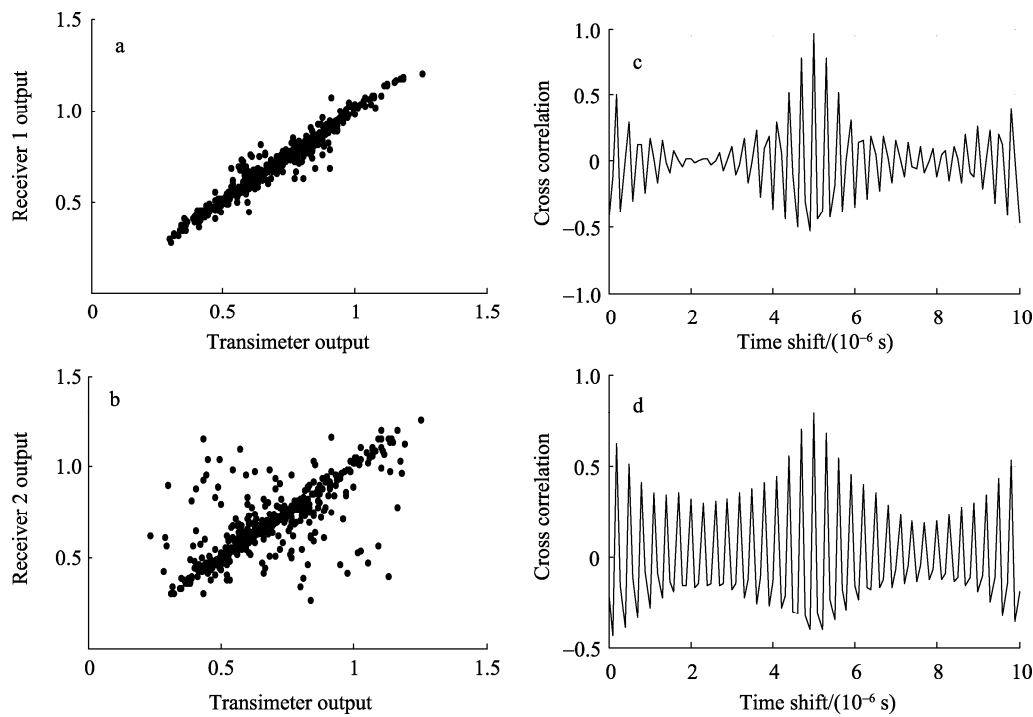


图 2 混沌输出时间序列和功率谱



(a)发送机与接收机 1 同步图; (b) 发送机与接收机 2 同步图; (c) 发送机与接收机 1 相关图; (d) 发送机与接收机 2 相关图.

图 3 混沌同步

表 2 参数失配值

参数	发送激光器	接收激光器
腔损耗 k/GHz	500	490
线宽增强因子 α	3.00	2.95
自增益饱和系数 $\epsilon_{11,22}$	0.001 00	0.001 05
载流子寿命 $\tau/(\times 10^{-6} \text{ s})$	1	1.05

3 结论

本文建立了多纵模外腔半导体激光器与单纵模半导体激光器的单向耦合系统理论模型,数值研究

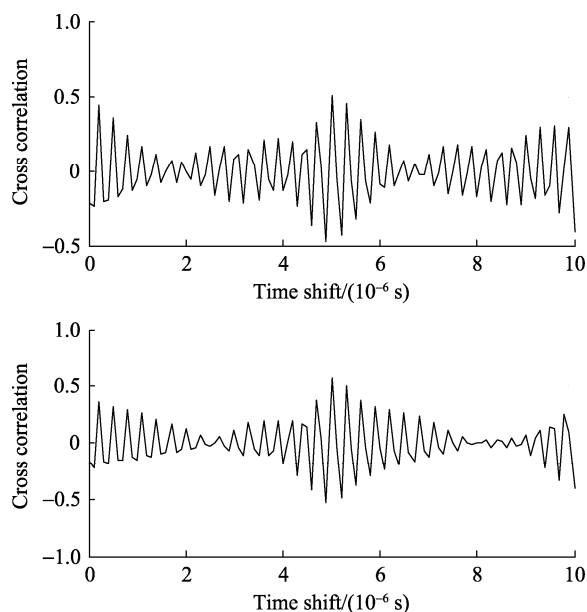


图4 参数失配时发送机与接收机的互相关函数

了单模激光器与多模激光器不同模式的混沌同步,得到了与实验一致的结果,表明该理论模型对于描述多模激光器与单模激光器开环混沌同步系统动力学特性是有效的. 分析了内部参数对系统同步性能的影响,结果表明: 尽管多模激光器与单模激光器动力学特性极其不同,但在参数匹配条件下,相应纵模间能实现高质量同步,而在一定参数失配下,该系统仍具有较好的鲁棒性. 本文的工作将有助于研究利用多模激光器混沌同步进行复用信息传输.

4 参考文献

- [1] Sivaprakasam S, Shore A K. Demonstration of optical synchronization of chaotic external-cavity laser diodes [J]. *Opt Lett*, 1999, 24(7): 466-468.
- [2] Fujino H, Ohtsubo J. Experimental synchronization of chaotic oscillations in external-cavity semiconductor lasers [J]. *Opt Lett*, 2000, 25, (9): 625-627.
- [3] Peil M, Heil T, Fischer I, et al. Synchronization of chaotic semiconductor laser systems: A vectorial coupling- dependent scenario [J]. *Phys Rev Lett*, 2002, 88(17): 174101-174104.
- [4] Heil T, Fischer I, Elsässer W, et al. Mirasso, Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers [J]. *Phys Rev Lett*, 2001, 86(5): 795-798.
- [5] Mulet J, Masoller C, Mirasso C R. Modeling bidirectionally coupled single-mode semiconductor lasers [J]. *Phys Rev A*, 2002, 65(6): 63815.
- [6] Buldú J M, Vicente R, Pérez T, et al. Periodic entrainment of power dropouts in mutually coupled semiconductor lasers [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 81(27): 5105-5107.
- [7] Fujiwara N, Takiguchi Y, Ohtsubo J. Observation of the synchronization of chaos in mutually injected vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(18): 1677-1679.
- [8] Tang S, Liu J M. Message encoding-decoding at 2.5 Gbits/s through synchronization of chaotic pulsing semiconductor lasers [J]. *Opt Lett*, 2001, 26(23): 1843-1845.
- [9] Mirasso C R, Mulet J, Masoller C. Chaos shift-keying encryption in chaotic external-cavity semiconductor lasers using a single-receiver scheme [J]. *IEEE Photon. Technol Lett*, 2002, 14: 456-458.
- [10] Lee M W, Larger L, Goedgebuer J P. Transmission system using chaotic delays between lightwaves [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 39: 931-935.
- [11] Murakami A, Ohtsubo J. Synchronization of feedback- induced chaos in semiconductor lasers by optical injection [J]. *Phys Rev A*, 2002, 65(3): 33826-33833.
- [12] Liu Y, Davis P, Takiguchi Y, et al. Injection locking and synchronization of periodic and chaotic signals in semiconductor lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2003, 39: 269-278.
- [13] Fischer I, Liu Y, Davis P. Synchronization of chaotic semiconductor laser dynamics on sub-ns timescales and its potential for chaos communication [J]. *Phys Rev A*, 2000, 62(1): 11801-11804.
- [14] Ohtsubo J. Chaos synchronization and chaotic signal masking in semiconductor lasers with optical feedback [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2002, 38: 1141-1154.
- [15] Paul J, Sivaprakasam S, Spencer P S, et al. Optically modulated chaotic communication scheme with external-cavity length as a key to security [J]. *J Opt Soc Amer B*, 2003, 20(3): 497-503.
- [16] Lee M W, Shore K A. Two-mode chaos synchronization using a multi-mode external-cavity laser diode and two single-mode laser diodes [J]. *IEEE J Lightwave Technol*, 2005, 23(3): 1068-1072.

(下转第 82 页)