

文章编号: 1001-3806(2013)03-0330-04

光注入多模半导体激光器的混沌及其同步

李林福

(贵州民族大学 计算机与信息工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 为了在光纤通信中实现多模同步传输以提高通信容量, 构建了一个光注入多模半导体激光器开环混沌通信系统, 并利用 MATLAB 数值仿真了系统的同步性能。结果表明, 选取合适的系统参量, 多模半导体激光器混沌通信系统能够实现完全同步; 发射激光器和接收激光器对应模式可以实现完全同步, 而且系统对内部参量失配具有较好的容忍性。

关键词: 光通信; 多模激光器; 混沌同步; 参量失配

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.03.014

Chaos and chaotic synchronization in light injected multimode semiconductor lasers

LI Lin-fu

(School of Computer & Information Engineering, Guizhou Minzu University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to achieve synchronous transmission in multimode optical fiber communication, a light injected multimode semiconductor laser open-loop chaotic communication system was constructed, and its performance was numerically simulated. The results show that multimode semiconductor laser chaotic communication system is able to achieve complete synchronization if selecting appropriate system parameters. Corresponding modes of transmitted laser diode (T-LD) and received laser diode (R-LD) can achieve complete synchronization, and the system has a good tolerance to the internal parameter mismatch between T-LD and R-LD.

Key words: optical communication; multimode laser; chaos synchronization; parameter mismatch

引 言

自 1990 年美国海军实验室研究人员 PECORA 和 CARROLL 首次用电子线路实现混沌同步以来^[1], 利用混沌同步实现保密通信已成为近年来混沌应用研究领域中的热点^[2-12]。半导体激光器具有体积小、重量轻、运转可靠、耗电少、效率高等优点, 因而成为光通信以及光混沌通信的理想光源。

信息爆炸刺激了全球通信业务的疯狂增长, 这种增长的最直接后果是出现了所谓的“光纤耗尽”现象。由于光缆线路的敷设费用很高, 光复用技术越来越引起人们的兴趣。在光纤通信中实现多模同步传输通信将可以极大提高通信容量。因

此, 对多模混沌同步研究是十分有意义的。作者基于光反馈型多模半导体激光器开环混沌保密通信系统模型, 数值分析研究了光反馈型多模半导体激光器非线性动态输出以及发射和接收激光器的特性参量对混沌同步特性的影响。为了便于讨论, 使用 Lang-Kobayashi (L-K) 方程描述多模半导体激光器的动力学行为, 该模型已多次成功描述单模半导体激光器的动态行为^[4-9]。

1 系统模型

多模混沌同步系统结构示意图如图 1 所示。一个用平面镜 M 实现外部光反馈的多模发射激光器 (transmitted laser diode, T-LD) 产生混沌信号, 它的输出信号经过光隔离器 (optical isolator, OI) 注入到接收激光器 (received laser diode, R-LD), R-LD 本身

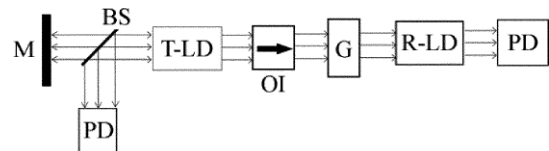


Fig. 1 Schematic diagram of multimode chaotic synchronization system

基金项目: 贵州省科学技术厅及贵州民族大学科学技术联合基金资助项目(黔科合 J 字 LKM [2012]23 号); 贵州民族大学科研基金资助项目

作者简介: 李林福(1981-), 男, 讲师, 现主要从事非线性光学和超精密光学加工的研究。

E-mail: fulin369@126.com

收稿日期: 2012-07-23; 收到修改稿日期: 2012-08-23

没有光反馈,构成一个开环混沌同步通信系统。光隔离器确保光单向注入的 R-LD,避免 T-LD 受到 R-LD 干扰。光分束器(beam splitter,BS)分出部分 T-LD 输出,一部分光透过光分束器经 M 反射回 T-LD,另一部分反射到光电探测器(photodetector,PD),它能够检测 T-LD 和 R-LD 的动态输出。选模光栅 G 可以根据需要实现部分或全部光注入。

2 理论分析

基于 L-K 方程描述多模激光器开环混沌同步通信系统动力学特性的速率方程可以写为^[4,8]:

$$dE_{m,T}(t)/dt = (1/2) [G_m(N_T) - \gamma]E_{m,T}(t) + k_f E_{m,T}(t - \tau_f) \cos[\Delta_{m,T}(t)] + \sqrt{2\beta N(t)} \zeta_m(t) \quad (1)$$

$$dE_{m,R}(t)/dt = (1/2) [G_m(N_R) - \gamma]E_{m,R}(t) + k_{i,m} E_{m,R}(t - \tau_i) \cos[\Delta_{m,R}(t)] + \sqrt{2\beta N(t)} \zeta_m(t) \quad (2)$$

$$d\varphi_{m,T,R}(t)/dt = (\alpha/2) [G_m(N_{T,R}) - \gamma] - [k_f E_{m,T,R}(t - \tau_f)/E_{m,T,R}(t)] \sin[\Delta_{m,T,R}(t)] \quad (3)$$

$$dN_{T,R}(t)/dt = \gamma_e [JN_{T,R} - N_{T,R}] - \sum_{m=1}^M G_m(N_{T,R}) |E_{m,T,R}(t)|^2 \quad (4)$$

$$\Delta_{m,T,R} = \omega_g \pm m2\pi/\tau_L + \varphi_{m,T,R}(t) - \varphi_{m,T,R}(t - \tau_{(i)}) \quad (5)$$

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [|E_T(t + \Delta t)|^2 - \langle |E_T(t)|^2 \rangle] [|E_R(t)|^2 - \langle |E_R(t)|^2 \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [|E_T(t)|^2 - \langle |E_T(t)|^2 \rangle]^2 \rangle \langle [|E_R(t)|^2 - \langle |E_R(t)|^2 \rangle]^2 \rangle}} \quad (7)$$

式中 Δt 表示时间偏移, $\langle \rangle$ 表示对时间取平均。

3 数值仿真分析

3.1 光注入多模激光器的混沌同步

当 R-LD 的注入系数 k_i 和 T-LD 的反馈系数 k_f 完全相等时,多模混沌同步通信系统的发射激光器和接收激光器实现了完全同步的混沌输出,如图 2a 和图 2b 所示。

图 2 所示为 T-LD 和 R-LD 输出时间序列。从图中脉冲波形可以看出,激光器开始运行经过短暂震荡后就进入混沌态输出,这在多模激光器的边模 ($m = \pm 2$) 表现尤为明显。从激光器输出时间序列强度可以发现:由于模式竞争的原因,激光器各个模式都得到了激发,都呈现类似混沌态的输出;中心模式 ($m = 0$) 的强度,要比临近的模式 ($m = \pm 1, \pm 2$) 强度大一些;边模强度虽然小,但是仍然可以

$$G_m(N_{T,R}) = \frac{g(N_{T,R} - N_{T,R,th})}{1 + s \sum_{m=1}^M |E_{m,T,R}(t)|^2} \left[1 - \left(m \frac{\Delta\omega_L}{\Delta\omega_g} \right)^2 \right] \quad (6)$$

式中,下标 T 和 R 分别代表发射激光器和接收激光器 M 是激光器总的输出模式数 m 是激光器输出的模式数 E 是多模激光器的慢变场振幅 φ 是光场相位 N 是载流子数 γ 为激光器光腔损耗系数 γ_e 为反转载流子寿命 α 是线宽增强因子 β 是自发辐射率, k_f 和 k_i 分别是反馈和注入强度系数 $k_{i,m}$ 是多模情况下的注入强度系数 τ_f 和 τ_i 分别是反馈延迟时间和注入传输时间 τ_L 是内腔往返 1 周的时间 J 为归一化注入电流 N_{th} 是阈值载流子数 N_0 是透明载流子数 ω_g 为峰值增益频率 $\Delta\omega_L$ 为多模激光器模间隔, $\Delta\omega_g$ 为材料增益线宽 g 是微分增益系数 s 为增益饱和系数 ζ_m 为朗之万噪声。采用 4 阶 Runge-Kutta 法数值求解方程(1)式~(4)式,可以得到激光器混沌信号输出。各个参量采用的值为: $M = 5$, $\gamma = 0.238\text{ps}^{-1}$, $\gamma_e = 6.21 \times 10^{-4}\text{ps}^{-1}$, $\alpha = 4.0$, $k_f = 0.02\text{ps}^{-1}$, $\tau_f = \tau_i = 4\text{ns}$, $\tau_L = 8.5\text{ps}$, $J = 1.015$, $N_0 = 1.25 \times 10^8$, $\Delta\omega_g = 21.17 \times 10^{12}$, $g = 3.2 \times 10^3$, $s = 1.0 \times 10^{-7}$ 。

多模混沌同步通信系统发射激光器和接收激光器同步性能的好坏可以由关联系数描述,它可以定义为^[11]:

探测,这为多模混沌同步通信的实现提供了物理基础。

图 3 中给出了 T-LD 混沌吸引子随时间的变化,可以看出,随着时间变化,发射激光器一直处于混沌态的输出。

图 4 所示为 T-LD 和 R-LD 输出的关系图,从图中可以看出二者对应的模式实现了完全的同步输出,需要说明的是,图 4a 中所示的是 T-LD 和 R-LD 中心模式的对应关系,其它模式也做了数值仿真,发现同步特性和中心模式是一致的,说明只要参量适当,多模接收激光器能够和发射激光器实现完全一致的状态输出,这为混沌通信是实现提供了可能。图 4b 中所示的是 T-LD ($m = 2$) 和 R-LD ($m = -2$) 模式的对应关系,从图中可以看出,由于两个模式是关于中心模式对称的,因此二者具有一定的同步性。

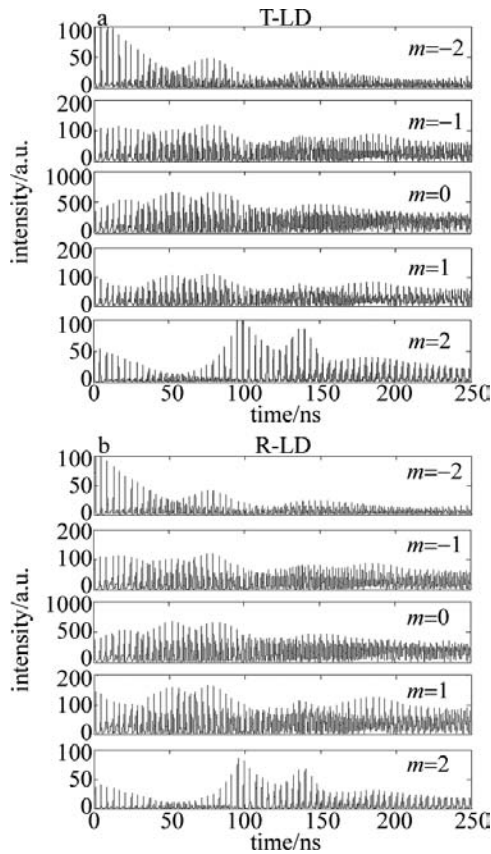


Fig. 2 Transmitting and receiving laser output time series

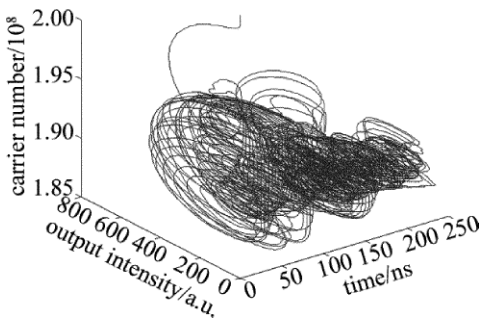


Fig. 3 T-LD/chaotic attractors

数值研究表明,如果是非对称模式,同步性将大大降低,图5a所示为T-LD($m=2$)和R-LD($m=0$)的对应关系,图5b所示为T-LD($m=2$)和R-LD($m=-1$)的对应关系,可见不仅中心模式与边模不同步,边模与边模之间也是非同步的。

图6为T-LD和R-LD输出的关联系数。与图4a对应,图6a所示为发射和接收激光器中心模式的关联系数,由图可知关联系数最大值为1,且最大值在移动时间为0的地方,再次说明两个激光器的中心模式实现了完全同步。图6b所示为T-LD($m=-2$)、R-LD($m=2$)的关联系数,关联系数最大值为0.857。关联系数在0.8以上,说明两个模式具有一定的同步性。考虑T-LD($m=-2$)、R-LD($m=2$)分别关于各自中心模($m=0$)对称的两个模式,因此二

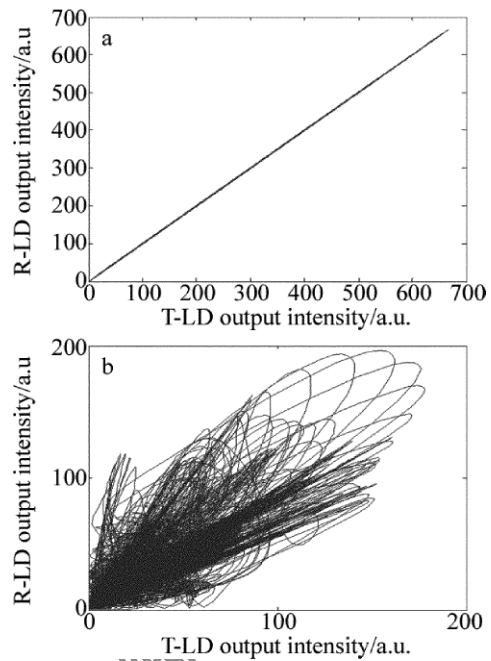


Fig. 4 T-LD and R-LD output diagram

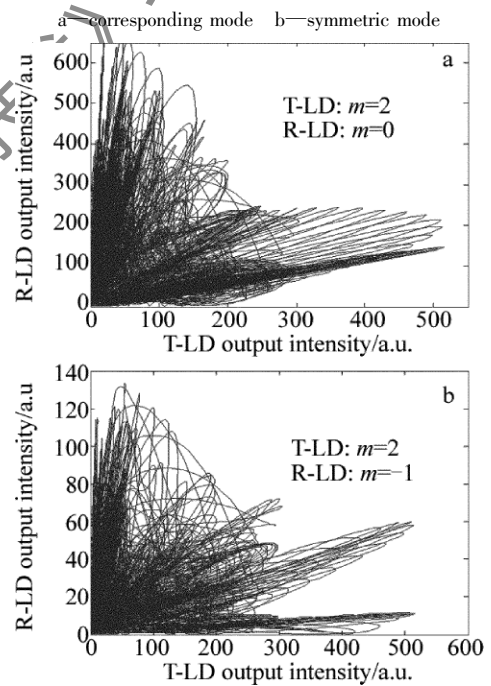


Fig. 5 T-LD and R-LD non-corresponding model output relationship
者在激光场的输出上具有一定类似性。

3.2 内部参量失配对同步性的影响

要使发射激光器和接收激光器达到精确同步,要求两个激光器的参量要完全相同,激光器外部参量容易实现一致,但激光器内部参量受本身结构和制造工艺的影响,在实际应用中很难达到完全相同,因此,有必要研究内部参量失配对多模混沌通信系统同步性的影响。

激光器光腔损耗系数 γ 和反转载流子寿命 γ_c 。

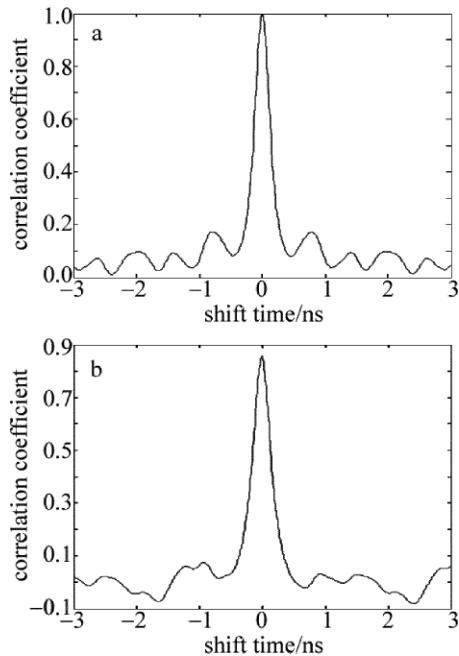


Fig. 6 T-LD and R-LD output correlation coefficient
a—corresponding mode b—symmetric mode

的失配对系统同步性的影响如图 7 所示。不难发现,参量失配会造成系统同步性能的降低。两参量单独影响而其它参量保持不变时,失配在 1% 范围内,发射和接收激光器关联系数仍可以达到 0.987 以上;失配在 2% 范围内,发射和接收激光器相关系数可以达到 0.831 以上。值得注意的是,如果 γ 和 γ_e 同时失配 5% 范围内而保持其它参量不变,关联系数可以达到 0.993 以上,与 γ 和 γ_e 单独失配时相比,发射和接收激光器能实现更好的同步。对于多个参量共同失配时系统同步性也作了仿真,数值仿真发现内部参量 γ , γ_e , $\Delta\omega_g$ 和 g 失配在 2% 以内,关联系数都可以达到 0.910 以上,说明系统对参量失配的容忍性是比较好的。

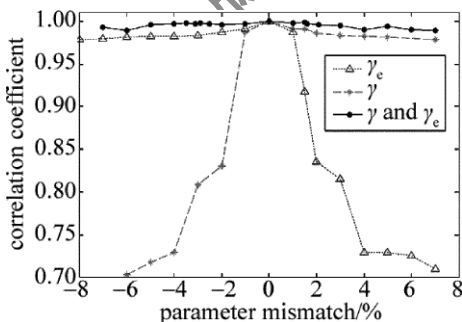


Fig. 7 Variation of correlation coefficients with parameters mismatch

4 结论

提出了基于光注入多模半导体激光器开环混沌

保密通信系统模型,并对系统的同步性进行了数值研究。结果表明,当发射和接收激光器满足一定条件时,多模混沌通信系统能够实现对应模式的完全同步,即对应主模和对应边模可以实现完全的同步,同时该系统对激光器参量失配具有较好的容忍性。参量失配 1%,关联系数可以达到 0.987 以上。希望本文中的结果对实用多模混沌通信系统的建立能提供一些参考。

参 考 文 献

- [1] PECORA L M, CARROLL T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-824.
- [2] TANG S, LIU J M. Chaotic pulsing and quasi-periodic route to chaos in a semiconductor laser with delayed opto-electronic feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2001, 37(3): 329-336.
- [3] LIU Y, TAKIGUCHI Y, DAVIS P, et al. Experimental observation of complete chaos synchronization in semiconductor lasers [J]. Applied Physics Letters, 2002, 80(23): 4036-4038.
- [4] XIA G Q, WU Zh M, WU J G. Theory and simulation of dual-channel optical chaotic communication system [J]. Optics Express, 2005, 13(9): 3445-3453.
- [5] LI X F, PAN W, LUO B, et al. Mismatch robustness and security of chaotic optical communications based on injection-locking chaos synchronization [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2006, 42(9): 953-960.
- [6] HONG Y H, LEE M W, PAUL J, et al. Enhanced chaos synchronization in unidirectionally coupled vertical-cavity surface-emitting semiconductor lasers with polarization-preserved injection [J]. Optics Letters, 2008, 33(6): 587-589.
- [7] KONG L Q, WANG A B, WANG H H, et al. Dynamics of semiconductor laser with optical feedback: Evolution from low-frequency fluctuations to chaos [J]. Acta Physica Sinica, 2008, 57(4): 2266-2272 (in Chinese).
- [8] YAN S L. All-optical realization of \times NOR logic gate using chaotic semiconductor lasers under phase modulator control [J]. Chinese Optics Letters, 2010, 8(12): 1147-1149.
- [9] LI L F. Studying the VCSEL to VCSEL injection locking for enhanced chromatic dispersion compensation [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7846: 784614.
- [10] XIANG S Y, PAN W, LUO B, et al. Synchronization of unpredictability-enhanced chaos in VCSELs with variable-polarization optical feedback [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2011, 47(10): 1354-1361.
- [11] DING L, WU Zh M, WU J G, et al. Unidirectional open-loop chaotic synchronization communication based on a semiconductor laser with double optical feedback [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(1): 014212 (in Chinese).
- [12] HU J J, MA J S. Synchronization and encoding of polarization modes of two unidirectionally coupled vertical cavity surface-emitting lasers [J]. Laser Technology, 2010, 34(6): 785-788 (in Chinese).