

文章编号: 1001-3806(2011)05-0656-03

## 信号调制延时光反馈混沌系统的多路复用通信

柯强, 王一凡, 胡菊菊

(江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

**摘要:** 为了研究信号调制延时的光反馈与光注入半导体激光器激光混沌系统的多路复用通信, 采用数值仿真的方法, 通过支路用户信号对相应支路延时进行调制实现对信号的编码, 然后利用混沌同步和互相关检测进行解码, 成功实现了3个用户1Gbit/s信号的复用与解复用, 分析了有效解码的条件及产生误码的主要原因。这一结果对于探讨用户数量更多、传输速率更快的混沌复用通信是有帮助的。

**关键词:** 光通信; 复用通信; 混沌; 信号调制; 延时反馈

**中图分类号:** TN929.1; O437 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.05.022

### Multiplexed communication based on a chaotic system with multiple signal-modulation delay optical feedback

KE Qiang, WANG Yi-fan, HU Ju-ju

(Department of Physics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** To investigate the multiplexed communication in a chaos system with semiconductors subject to optical feedback and optical injection where delays are modulated by signals, the encryption is realized through modulating the channel delay with the corresponding user's signal and the decryption is implemented utilizing chaos synchronization and cross correlation measurement by numerical simulation. The multiplexing and de-multiplexing of three user's signals of 1Gbit/s were realized. Also, the conditions for efficient decryption and the main factors affecting bit error were analyzed.

**Key words:** optical communication; multiplexed communication; chaos; signal modulation; delayed feedback

## 引言

混沌系统固有的不确定性和宽频谱特性给保密通信的发展开拓了新的方向, 这种基于物理层的保密方法相比于传统保密方法具有更高的保密性, 因而倍受人们青睐<sup>[1-4]</sup>, 研究者相继提出了各种各样的信号加密方案<sup>[5-11]</sup>。在光混沌通信中, 混沌载波是由全光或电光反馈半导体激光器产生, 由于信号传输速度有限、反馈环的延时等原因, 数学上通常用延时微分方程组 (delay differential equations, DDEs) 来描述<sup>[12]</sup>。目前大部分混沌系统都是基于单个固定延时的, 其延时可以通过自相关函数、互信息等方法恢复, 然后利用简单的本地重构法提取信号, 因此, 其安全性得不到保障<sup>[13-14]</sup>。而多延时系统比单延时系统具有更复杂的动力学<sup>[15]</sup>, 利用多延迟系统的高度复杂性可以提高混沌保密通信系统的安全, 而且附加延时对混沌系统的

同步具有稳定作用<sup>[16-18]</sup>。但最近的研究发现, 在这些多固定延时反馈系统中, 延时信息仍可以成功恢复, 进而重构系统的动力学<sup>[19]</sup>。另一种提高混沌通信系统保密性的策略是采用延时调制系统, 这种系统的延时是不确定的, 其吸引子的复杂性进一步提高, 对其进行相位空间重构几乎是不可能的, 因此, 可以抵御窃听者的攻击<sup>[20]</sup>。SHAHVERDIEV 等人<sup>[21]</sup>研究了激光调制多延时系统的混沌同步性能, 其中各支路延时受激光器输出功率调制, 在物理实现上存在很大的挑战。RONTANI 等人<sup>[22]</sup>提出了一种基于信号调制延时的电光反馈系统, 其各支路延时受相应支路信号控制, 易于物理实现, 但电子器件具有“瓶颈”效应。为了克服由此导致的系统传输容量下降, 在此基础上, 作者详细研究了信号调制延时的全光反馈混沌通信系统的同步性能和编码/解码方案, 实现了3条支路的高速复用与解复用, 与传统的波分复用和时分复用相比, 该方法不需要进行频谱和时隙划分, 而且发送端和接收端分别只需一个混沌谐振子, 结构简单。

## 1 系统结构与理论模型

图1为3路复用的混沌激光通信系统结构图, 其

作者简介: 柯强 (1979-), 男, 讲师, 主要研究方向是信号检测与处理。

E-mail: jxnukq@163.com

收稿日期: 2010-08-16; 收到修改稿日期: 2010-12-13

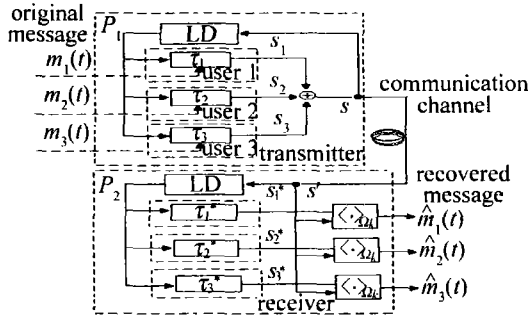


Fig. 1 Scheme diagram for a chaotic communication system with three-signal-modulation delay optical feedback

发送机和接收机分别由结构参量一致的半导体激光器组成,其中发送机含 3 条反馈支路,反馈项是 3 条延时支路输出之和。接收激光器为开环结构,对应有 3 条解复用支路。发送机与接收机之间为公共信道,为简便起见,假设发送机到接收机间的距离为 0。每条支路信号的编码是通过信号对相应支路延时进行调制来实现的,信号的提取则采用有限时间互相关检测法。图 1 中,  $P_1$  为发送激光器输出,  $m_i(t)$  为发送端支路用户输入信号,  $\tau_i$  为发送端支路延迟时间,  $s_i$  为发送端支路延时输出,  $s$  为 3 条支路输出之和,  $P_2$  为经发送端信号经过光纤传输后接收激光器的输出,  $\tau_i^*$  为接收端支路延迟时间,  $s_i^*$  为接收端支路延时输出,  $s'$  为  $s$  经过光纤传输后到达接收激光器的输出,  $\hat{m}_i(t)$  为接收端解码信号。

根据 Lang-Kobayashi 方程,由 3 条反馈支路构成的单向耦合半导体激光器系统,其光子密度和载流子密度的动力学特性用如下 DDEs 来描述<sup>[23]</sup>:

$$\frac{dP_1}{dt} = \left[ G_{N_1} (1 - \varepsilon_1 P_1) (N_1 - N_{01}) - \frac{1}{\tau_{p1}} \right] \times P_1(t) + \beta_1 N_1(t) \quad (1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = i_1(t) - \frac{N_1(t)}{\tau_{s1}} - G_{N_1} (1 - \varepsilon_1 P_1) (N_1 - N_{01}) \times [P_1(t) + k_1 P(t - \tau_1) + k_2 P_1(t - \tau_2) + k_3 P_1(t - \tau_3)] \quad (2)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \left[ G_{N_2} (1 - \varepsilon_2 P_2) (N_2 - N_{02}) - \frac{1}{\tau_{p2}} \right] \times P_2(t) + \beta_2 N_2(t) \quad (3)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = i_2(t) - \frac{N_2(t)}{\tau_{s2}} - G_{N_2} (1 - \varepsilon_2 P_2) (N_2 - N_{02}) \times [P_2(t) + k_1 P_1(t - \tau_1) + k_2 P_1(t - \tau_2) + k_3 P_1(t - \tau_3)] \quad (4)$$

式中,  $P_j$  和  $N_j$  分别是激光器输出的光子数和载流子数,  $j=1$  为发送机,  $j=2$  为接收机,  $N_{0j}$  为透明载流子数,  $\tau_{pj}$ ,  $\tau_{sj}$ ,  $i_j$ ,  $G_{N_j}$ ,  $\varepsilon_j$  分别是光子寿命、载流子寿命、注入电流、增益系数和增益饱和系数;  $\beta_j$  为自发辐射系数,发送机的 3 路反馈强度和接收机的 3 路注入强度

均为  $k_1$  (或  $k_2, k_3$ ),  $\tau_1$  (或  $\tau_2, \tau_3$ ) 是发送机输出的 3 路反馈延时。

## 2 编码/解码方法

假设每条支路对应一个用户,每个用户的输入信号为  $m_i(t)$ ,则要实现编码,每条支路的延时分别受相应用户信号调制,即:

$$\tau_i = \tau_{i0} + a_i m_i(t), (i = 1, 2, 3) \quad (5)$$

式中,  $\tau_{i0}$  为固定延时,  $a_i$  为调制幅度。为了简化,假设用户信号为二进制符号,则每条支路的延时值  $\tau_i$  在  $\tau_{i0}$  和  $\tau_{i0} + a_i$  间按用户信号规律跳变,  $[\tau_{i0}, \tau_{i0} + a_i]$  称为编码时隙。假设每个码元的持续时间为  $T_s$ ,则第  $k$  个码元时隙为  $\Omega_k = [kT_s, (k+1)T_s]$ ,因此,每条支路在不同的码元时隙对应的延时不同,可表示为:  $\tau_i = \sum_k \tau_{i|\Omega_k} \times \{H(t - kT_s) - H[t - (k+1)T_s]\}$ ,其中,  $H$  为 Heaviside 函数,  $\tau_{i|\Omega_k}$  为第  $i$  个用户第  $k$  个码元对应的延时,其编码原理如图 2 所示。

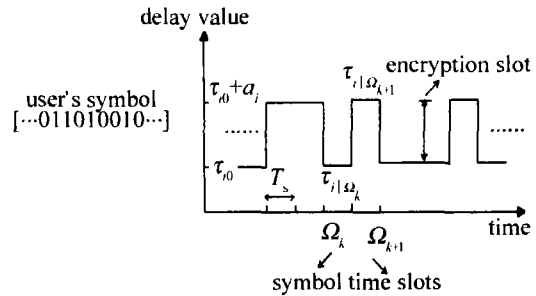


Fig. 2 Encryption diagram

解码时采用有限时间互相关检测法,即互相关计算是基于比特进行的。假设接收端预先知道发送端的密钥  $(T_s, f_{m \rightarrow \tau})$ ,发送激光器输出功率  $P_1$  和接收激光器输出功率  $P_2$  完全同步,则当且仅当  $\tau_i = \tau_i^*$  ( $i=1, 2, 3$ ) 时 ( $\tau_i^*$  是接收激光器输出到相关器的延时,取值为编码时隙中的任意值),相关器输出值最大,由此可判断发送端延时  $\hat{\tau}_{i|\Omega_k} = \operatorname{argmax} \langle s, s_i^* \rangle_{\Omega_k}$ ,其中  $\langle \cdot \rangle$  为互相关运算,  $s(t) = \sum_{i=1}^3 s_i(t) = \sum_{i=1}^3 P_1(t - \tau_i)$ 。  $s_i^* = P_2(t - t_i^*)$ ,进而根据调制(5)式恢复用户信号  $\hat{m}_i(t)$ 。

## 3 数值结果

数值计算时假定接收激光器与发送激光器完全匹配,各参量取值如下<sup>[21]</sup>:  $\tau_p = 2\text{ps}$ ,  $\tau_s = 2\text{ns}$ ,  $G_N = 1.1 \times 10^4 \text{s}^{-1}$ ,  $N_0 = 1.1 \times 10^8$ ,  $\beta = 5 \times 10^3 \text{s}^{-1}$ ,  $i = 8 \times 10^{17}$ ,  $\varepsilon = 2.5 \times 10^{-8}$ ,  $\tau_{10} = 1.5\text{ns}$ ,  $\tau_{20} = 2.9\text{ns}$ ,  $\tau_{30} = 5\text{ns}$ ,  $k_1 = 0.41$ ,  $k_2 = 0.45$ ,  $k_3 = 0.47$ ,调制幅度  $a = 0.01\text{ns}$ ,则在忽略噪声和信道失真情况下得到发送激光器的混沌时域波形,如图 3a 所示,系统的同步误差如图 3b 所示,接收激光

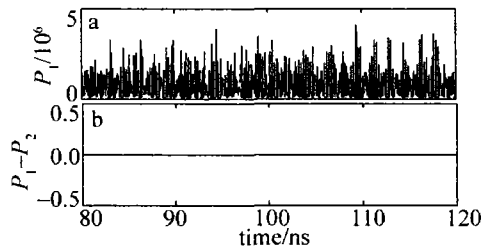


Fig. 3 a—chaotic output for transmitting laser b—systematic synchronization error

器与发送激光器达到完全混沌同步,即 $P_1 = P_2$ 。

当用户信号速率为1Gbit/s,即每比特持续时间 $T_s = 1$ ns时,系统的解码结果如图4所示。其中,第1行为每个用户信号调制后的支路延时 $\tau_i$ ,第2行为相关检测后的解码延时 $\hat{\tau}_i$ ,第3行为解码误差 $e_i = (\tau_i - \hat{\tau}_i) / \tau_i$ 。由此可见,系统在经历一段时间振荡后可以完全恢复出原始信号。但由相关检测原理可知, $\langle s_i, s_i^* \rangle_{\Omega_k} = \langle s_i, s_i^* \rangle_{\Omega_k} + \sum_{j=1, j \neq i}^3 \langle s_j, s_i^* \rangle$ ,第1项对延时信息的恢复起主要作用, $s_i^* = s_i$ 时产生共振,相关值最大;第2项是与 $s_i^*$ 无关的项,可以看作是背景噪声,随着用户数量的增加,第2项的值相应增加,势必影响延时信息的提取,导致误比特率增加。所以,如何减少用户间的干扰、降低误比特率同样是混沌复用通信中的关键问题。

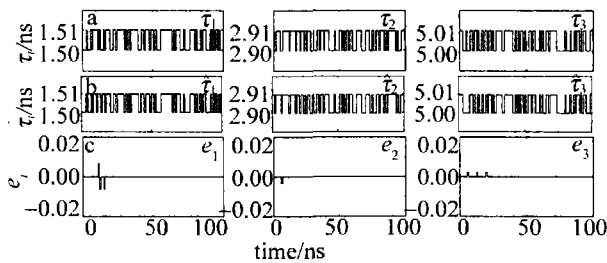


Fig. 4 Encryption/decryption results

a—delays modulated with signals b—recovered delays after correlation detection c—relative error

值得注意的是,这里的互相关检测是基于比特进行的,即每次相关计算区间是相应的码元时隙。因此,成功解码必须满足如下条件:(1)码元持续时间 $T_s$ 内混沌系统输出样值必须足够多,即 $T_s$ 有下限值,通常是载波消相关时间的几倍;但 $T_s$ 也不能过大,当支路信号的码元持续时间大于该支路的最小延时,信息将很容易被窃取<sup>[22]</sup>;(2)各支路的编码时隙 $[\tau_{i0}, \tau_{i0} + a_i]$ 不能相交,且其间隔必须大于支路混沌载波的最大本征消相关时间;(3)当每个用户的信号电平数大于2时,每个编码时隙内的码元数不能超过相关检测的分辨极限。所以,在实际混沌复用通信中必须综合考虑系统的可实现性和安全性。

## 4 结论

研究了3路延时光反馈与光注入半导体激光器激

光混沌通信系统,通过用户信号对反馈延时的调制将信号加载到混沌载波中,由于用户信号的幅度不直接影响混沌调制,所以用户信号不需要太小;另外,与传统的混沌编码不同,这种编码方法不是依靠用户信号对混沌载波轨道的扰动来实现编码的,所以接收端不能通过相空间中重构的轨道波动来识别用户信息。本文中采用有限时间互相关检测法来提取信息,结果表明,该系统能够成功实现多个用户高速率的复用与解复用通信,研究结果将有助于进一步探讨用户数量更多、传输速率更快的混沌复用通信。

## 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] HAYES S, GREBOGI C, OTT E. Communicating with chaos [J]. *Physical Review Letters*, 1993, 70(20): 3031-3034.
- [3] VANWIGGEREN G D, ROY R. Communication with chaotic lasers [J]. *Science*, 1998, 279(5354): 1198-1200.
- [4] UDALTSOV V S, GOEDGEBUER J P, LARGER L, *et al.* Communicating with optical hyperchaos: Information encryption and decryption in delayed nonlinear feedback systems [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(9): 1892-1895.
- [5] KOCAREV L, PARLITZ U. General approach for chaotic synchronization with applications to communication [J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(25): 5028-5031.
- [6] SUNDAR S, MINAI A A. Synchronization of randomly multiplexed chaotic systems with application to communication [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85(25): 5456-5459.
- [7] LIU J M, CHEN H F, TANG S. Synchronized chaotic optical communications at high bit rates [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(9): 1184-1196.
- [8] HEIL T, FISCHER I, ELSASSER W, *et al.* Chaos synchronization and spontaneous symmetry-breaking in symmetrically delay-coupled semiconductor lasers [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(5): 795-798.
- [9] AVIAD Y, REIDLER I, KINZEL W, *et al.* Phase synchronization in mutually coupled chaotic diode lasers [J]. *Physical Review*, 2008, E78(2): 025204/01-025204/04.
- [10] ZHANG J Zh, WANG A B, WANG Y C. Wavelength division multiplexing of chaotic optical communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(6): 3793-3798 (in Chinese).
- [11] LI F, PAN W, LUO B, *et al.* Effect of cross talk on multichannel chaotic optical communication systems [J]. *Laser Technology*, 2008, 32(4): 445-448 (in Chinese).
- [12] MASOLLER C. Anticipation in the synchronization of chaotic semiconductor lasers with optical feedback [J]. *Physical Review Letters*, 2001, 86(13): 2782-2785.
- [13] LEPRI S, GIACOMELLI G, POLITI A, *et al.* High-dimensional chaos in delayed dynamical systems [J]. *Physica*, 1994, D70(3): 235-249.
- [14] ZHOU Ch S, LAI C H. Extracting messages masked by chaotic signals of time-delay systems [J]. *Physical Review*, 1999, E60(1): 320-323.
- [15] LEE M W, LARGER L, UDALTSOV V, *et al.* With two time delays [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(4): 325-327.

(下转第663页)

值不同而相应变化,当 $\Delta = 0\text{mm}$ 即分划板处于焦平面时,反射光束相对强度有极大值,且沿 $z$ 轴方向传输并逐渐发散。当分划板在焦平面前后轴向微量失调时,反射光束相对强度明显下降。如图6b所示,透镜横位移 $\varepsilon = 0.1\text{mm}$ ,角位移 $\varepsilon' = 0^\circ$ 时,反射光束传输特性与透镜未失调条件下相比没有变化。如图6c所示,透镜横位移 $\varepsilon = 0\text{mm}$ ,角位移 $\varepsilon' = 0.5^\circ$ 时,反射光束沿 $z$ 轴方向传输但光束中心向 $x$ 轴负方向明显偏移。如图6d所示,透镜横位移 $\varepsilon = 0.1\text{mm}$ ,角位移 $\varepsilon' = 0.5^\circ$ 时,反射光束传输方向仍沿 $z$ 轴方向且光束中心向 $x$ 轴负方向明显偏移。当分划板在焦平面前后轴向微量失调时,反射光束相对强度明显下降。

比较图4a、图5a和图6a可看出,随着光束沿 $z$ 轴传输距离的增加,反射光束逐渐发散。当分划板相对于 $z$ 轴存在轴向位移时,反射光束强度会受到明显影响。比较图4b、图5b和图6b可看出,在近距离传输条件下,透镜横位移使反射光束传输方向产生微量位移,随着传输距离的增加,影响逐渐降低。比较图4c、图5c和图6c可看出,透镜角位移存在时反射光束仍沿 $z$ 轴方向传输,但明显偏离 $z$ 轴中心,光束偏移量大小和方向与透镜角位移大小,传输距离远近有关。比较图4d、图5d和图6d可看出,当透镜横位移和角位移都存在时,透镜角位移使反射光束传输方向产生偏移且作用明显,透镜横位移对光束强度和传输方向产生的影响不太显著。

### 3 结 论

根据推导的反射光束近似解析式,定量分析了透镜失调条件下高斯光束经猫眼光学系统反射特性,探讨了透镜横位移和角位移对反射光束传输特性的影响。结果表明,对于特定猫眼光学系统,反射光束偏

移量的大小、方向与透镜角位移大小及传输距离远近有关,透镜横位移对反射光束强度不产生明显影响,透镜角位移比横位移对反射光束传输特性影响更为显著。可见,反射光束传输特性极易受到猫眼光学系统内光学元件装配误差的影响,且反射光束存在一定的发散和偏移。因此,深入分析光学系统“猫眼效应”的适用条件很有必要。

### 参 考 文 献

- [1] GU S L, SUN H Y, ZHANG Y J, *et al.* Laser active detection of aerial target[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(7): 476-478 (in Chinese).
- [2] QIAO Y. A study of the laser active reconnaissance[J]. *Electro-optic Technology Application*, 2005, 20(3): 22-24 (in Chinese).
- [3] ZHAO H W, WANG J, SONG M, *et al.* Laser experimental study of “cat-eye” effect[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(1): 62-65 (in Chinese).
- [4] SHEN X J, SHEN H B, ZHOU Sh G, *et al.* Propagation properties of Gaussian beam passing through a misaligned optical system with misaligned narrow slot aperture [J]. *High Power Laser and Partial Beams*, 2008, 20(9): 1447-1451 (in Chinese).
- [5] ZHAO G P, LÜ B D. Improved algorithm for beam transformation through hard-aperture optics [J]. *High Power Laser and Partial Beams*, 2004, 16(6): 707-711 (in Chinese).
- [6] JIA X M, XIE X L. Propagation property of Gaussian beams passing through spatial filter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2006, 33(9): 1220-1224 (in Chinese).
- [7] HAN Y D, SHEN X J. Transmission characteristics of flattened Gaussian beams passing through a misaligned optical system [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(5): 704-707 (in Chinese).
- [8] WANG Sh M, ZHAO D M. Principles of matrix optics[M]. Hangzhou: Hangzhou University Press, 1994: 40-198 (in Chinese).
- [9] MAO H D, ZHAO D M. Different models for a hard-aperture function and corresponding approximate analytical propagation equations of a Gaussian beam through an apertured optical system[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2005, A22(4): 647-653.
- [10] SHEN X J, HAN Y D. propagation properties of Gaussian beam passing through an misaligned optical system with misaligned circular aperture[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(7): 1106-1110 (in Chinese).
- [16] MASOLLER C, MARTI A C. Random delays and the synchronization of chaotic maps [J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(13): 134102/1-134102/5.
- [17] SHAHVERDIEV E M, SHORE K A. Chaos synchronization regimes in multiple-time-delay semiconductor lasers [J]. *Physical Review*, 2008, E77(5): 057201/1-057201/4.
- [18] SHAHVERDIEV E M, SHORE K A. Synchronization of chaos in unidirectionally and bidirectionally coupled multiple time delay laser diodes with electro-optical feedback [J]. *Optics Communication*, 2009, 282(2): 310-316.
- [19] LEE M W, REES P, SHORE K A, *et al.* Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications [J]. *IEEE Proceeding of Optoelectronics*, 2005, 152(2): 97-102.
- [20] KYE W H, CHOI M, KIM M W, *et al.* Synchronization of delayed systems in the presence of delay time modulation [J]. *Physics Letters*, 2004, A322(5): 338-343.
- [21] SHAHVERDIEV E M, SHORE K A. Impact of modulated multiple optical feedback time delays on laser diode chaos synchronization [J]. *Optics Communication*, 2009, 282(17): 3568-3572.
- [22] RONTANI D, SCIAMANNA M, LOCQUET A, *et al.* Multiplexed encryption using chaotic systems with multiple stochastic-delayed feedbacks [J]. *Physical Review*, 2009, E80(6): 066209/1-066209/5.
- [23] ROGISTER F, LOCQUET A, PIEROUX D, *et al.* Secure communication scheme using chaotic laser diodes subject to incoherent optical feedback and incoherent optical injection [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(19): 1486-1488.

(上接第 658 页)