

文章编号:1004-4213(2011)01-0055-6

非线性光电延时反馈混沌同步复用通信系统研究

胡菊菊^{1,2}, 周小勇¹, 马军山¹

(1 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(2 江西师范大学 物理与通信电子学院, 南昌 330022)

摘 要:提出了一种基于电光调制器的非线性光电延时反馈超混沌复用通信系统. 与传统混沌通信系统不同, 其混沌波形不是由激光器产生, 而是由电光调制器产生, 该系统具有非线性维数高、易于再生和精确控制的优势. 介绍了信号调制反馈延时的编码方法和相关检测解码方法, 数值仿真了三条支路的高速复用与解复用, 分析了误码产生的主要原因, 并进一步研究了光纤传输特性对该混沌复用通信系统的影响. 结果表明: 只要采用相应的增益补偿方案, 光纤信道对混沌同步的影响会大大减小, 系统能够成功解码原始信号.

关键词:复用通信; 混沌同步; 信号调制; 延时反馈

中图分类号: TN248.4; TN929.1; O437 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/gzxb20114001.0055

0 引言

混沌系统固有的不确定性和宽频谱特性可运用于保密通信, 而且普遍认为这种基于物理层的保密方法相比于传统的软件加密方法具有更高的保密性^[1-4]. 在混沌通信中, 混沌载波通常由半导体激光器在光注入、光反馈、光电反馈或电光反馈下产生^[5-9], 然后通过将信息隐藏在混沌载波中实现信息的加密, 接收端利用混沌同步将原始信息恢复出来. 衡量混沌系统保密性的重要指标是系统正的李雅普诺夫指数, 尽管目前提出了很多有效的混沌同步系统及加密方案, 但大多数系统的维数较低, 经实验证实的正的李雅普诺夫指数数目小于 5^[10], 利用非线性动力学预测和回归映射分析很容易提取出原始信息^[11-13]. 另一种混沌保密通信方案是采用光学非线性延时反馈, 这种系统的维数高, 正的李雅普诺夫指数数目至少提高了 100 倍. 文献[10]给出了一种基于电光调制器的超混沌同步光通信方案, 其优势在于调制器产生的非线性相比激光实验中其他类型的非线性更容易再生和易于精确控制, 而且维数极高, 系统非线性与激光器无关, 激光器工作在功率电流曲线的线性区域.

当前, 通信的主要手段是光纤传输, 因此光纤信

道的特性直接关系通信的质量, 文献[14-16]详细阐述了光纤色散和非线性效应对混沌同步及传输距离的影响. 而且, 实际的通信系统不可能是单个用户的, 要实现多个用户通信, 必须研究多用户同时在相同的物理信道中进行信息传输, 传统的多用户通信采用的是波分复用 (Wavelength Division Multiplexing, WDM) 和时分复用 (Time Division Multiplexing, TDM), 它们需要对频谱和时隙进行划分, 且混沌谐振子数量多, 信道间的串扰比传统光通信严重^[17]. 本文提出了一种基于电光调制器的非线性光电延时反馈超混沌复用通信系统, 详细介绍了信号调制反馈延时的编码方法和相关检测解码方法, 数值仿真了三条支路的高速复用与解复用, 并进一步研究了光纤传输特性对混沌通信的影响.

1 理论模型

1.1 系统结构

图 1 为 N 路复用的激光混沌通信系统结构图, 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, 其中发送激光器输出经过光电转换后, 分别延时不同单位 τ_i 后驱动电光调制器 (Electrical Optical Modulator, EOM), 使其工作在高度非线性区域 (驱动电压大于 EOM 的半波电压), 每个 EOM

基金项目:上海市教委科研创新项目 (No. 09YZ223) 和上海市研究生创新基金 (No. JWCXSL0901) 资助

第一作者:胡菊菊 (1979-), 女, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为混沌光通信. Email: jxnubjj@126.com

导 师:马军山 (1967-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为光通信理论与技术、光电检测. Email: junshanma@163.com

收稿日期: 2010-06-18; **修回日期:** 2010-08-27

对应一载波光源 s , 由此构成 N 条反馈支路, 每条支路的编码是通过信号对相应支路延时进行调制来实现的, N 路 EOM 输出相加后一部分经过光电转换

反馈至发送激光器形成光电反馈, 另一部分经光纤传输后转换成电信号注入接收激光器。

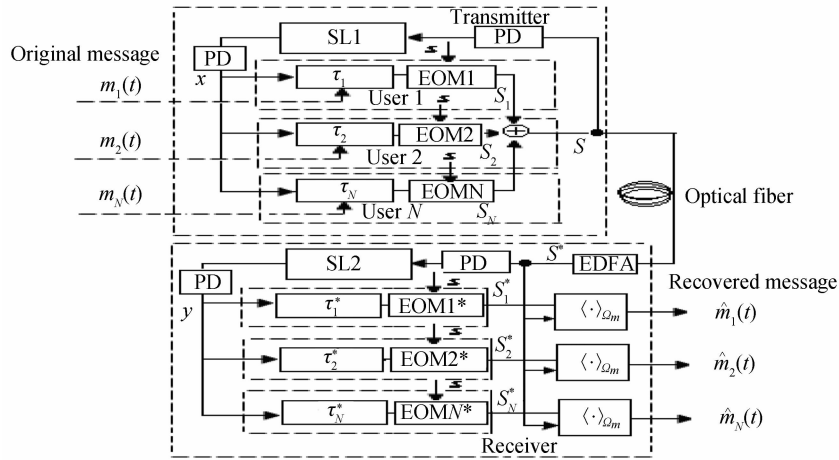


图 1 信号调制延时的非线性光电反馈混沌多路复用通信系统原理图
Fig. 1 Scheme diagram for multiplexed chaos communication system of nonlinear optoelectronic feedbacks with delays modulated by signals

接收激光器为开环结构, 对应有 N 条解复用支路, 每条解复用支路由类似单元组成, 该系统不同于 Pecora-Carroll 混沌同步方法, 其反馈支路是 EOM 非线性延时反馈, 激光器本身不产生混沌信号, 它工作在线性区域. 而信号是通过调制延时进行反馈, 输出信号 s_i 不是信号与混沌信号的简单迭加, 因此信号幅度可以大于混沌载波的幅度, 而且信号的提取不能利用混沌波相减法, 这一点与经典隐藏传输方案完全不同. 系统动力学可用如下积分微分方程表示^[18]

$$x + T \frac{dx}{dt} + \frac{1}{\theta} \int_0^t x(s) ds = \sum_{i=1}^N \beta_i \cos^2(x_1(t - \tau_i) + \phi_i) \quad (1)$$

$$y + T \frac{dy}{dt} + \frac{1}{\theta} \int_0^t y(s) ds = \sum_{i=1}^N \beta_i \cos^2(x_1(t - \tau_i) + \phi_i) \quad (2)$$

式中 x, y 分别是发送机和接收机中与激光器输出光强相关的无量纲变量, T 为上限截止时间, θ 是下限截止时间, β_i 为第 i 个 EOM 的归一化反馈强度, ϕ_i 为与 EOM 偏置电压成正比的归一化相位差, τ_i 为第 i 条支路的延时. 令 $n = \frac{1}{T} \int_0^t x(s) ds$, 则上式形式与标准的激光混沌系统速率方程相同, 利用 ung-Kutta 法很容易求解.

1.2 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

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

式中 τ_{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 τ_i 在

τ_{i0} 和 $\tau_{i0} + a_i$ 间按用户信号规律跳变, $\Delta_i = [\tau_{i0}, \tau_{i0} + a_i]$ 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

$$\tau_i = \sum_k \tau_{i|\Omega_k} \{H(t - kT_s) - H(t - (k+1)T_s)\}$$

式中 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.

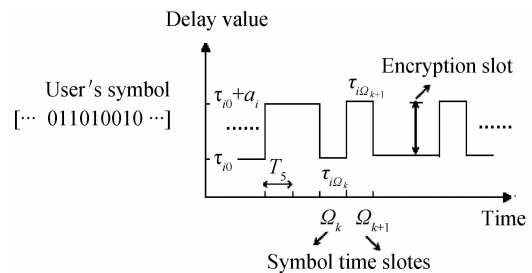


图 2 编码原理
Fig. 2 Plot of encoding theory

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, h) , (T_s, f, h) 分别是比特持续时间、输入输出映射关系和 EOM 非线性函数. 发送激光器输出和接收激光器输出 y 完全同步, 则当且仅当 $\tau_i = \tau_i^*$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 时 (τ_i^* 是解复用支路延时, 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 $\tau_{i|\Omega_k} = \hat{\Delta} \langle s^*, s_i^* \rangle_{\Omega_k}$, 其中 $\langle \cdot \rangle$ 为互相关运算, s^* 为信号 s 经光纤传输后的输出, 即

$$s = \sum_{i=1}^N s_i = \sum_{i=1}^N \cos^2(x(t - \tau_i) + \phi_i)$$

$$s_i^* = \cos^2(y(t - \tau_i^*) + \phi_i)$$

进而根据调制公式(3)恢复用户信号 $\hat{m}_i(t)$.

2 数值结果与分析

数值计算时假定有 3 个用户,即 $N=3$. 其他参数取值为: $T=25$ ps, $\theta=10$ μ s, $\tau_{10}=1.5$ ns, $\tau_{20}=2.9$ ns, $\tau_{30}=3.3$ ns, $a_i=1\%$, $\phi_i=(2\pi/4)i$, $\beta_i=30$ ($i=1,2,3$).

2.1 理想情况

当不考虑通信信道引起的失真时,假定每个用户信号均为 1 Gbit/s 的随机二进制 NRZ 码,即每比特持续时间 $T_s=1$ ns,符号能量在持续时隙内保持恒定. 编码后发送激光器输出波形及系统同步误差如图 3 所示,此时系统达到高质量的完全同步. 图 4 为对应的频谱图,显然,在 1 GHz 处无明显峰值出现,系统实现了对信号的有效编码.

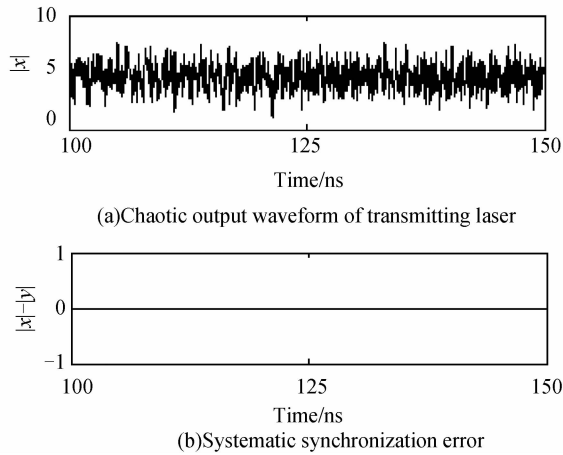


图 3 发送激光器的混沌输出波形及系统同步误差
Fig. 3 Chaotic output waveform and synchronization error of transmitting laser

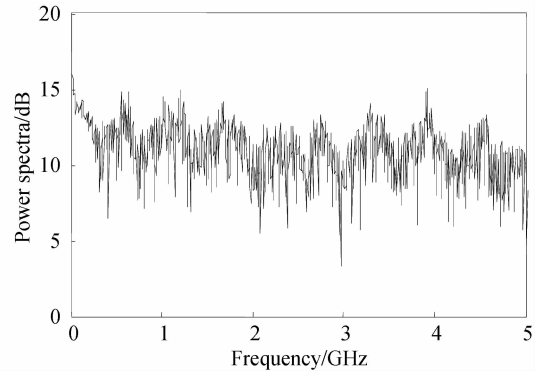


图 4 发送激光器输出信号频谱
Fig. 4 Output spectrum of transmitting laser

经理想信道传输后的解码结果如图 5,其中第一行为每个用户信号调制后的支路延时 τ_i ,第二行为相关检测后的解码延时 $\hat{\tau}_i$,第三行为解码误差 $e_i=(\tau_i - \hat{\tau}_i)/\tau_i$. 由此可以看出,系统可以完全恢复出原始信号. 但由相关检测原理可知, $\langle s_i, s_i^* \rangle_{\Omega_k} = \langle s_i, s_i^* \rangle_{\Omega_k} + \sum_{j=1, j \neq i}^3 \langle s_j, s_i^* \rangle$, 第一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;第二项是与 s_i^* 无关的项,可以看作是背景噪声,随着用户数量的增加,第二项的值相应增加,势必影响延时信息的提取,导致误码率增加. 所以如何减少用户间的干扰、降低误码率同样是混沌复用通信中的关键问题.

必须说明的是,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

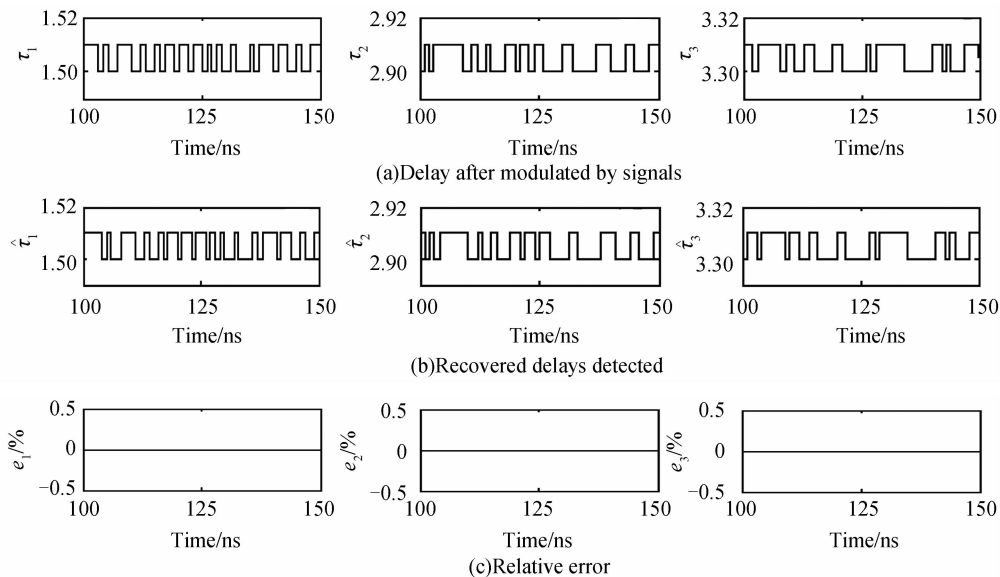


图 5 编码/解码结果
Fig. 5 Encryption/decryption result

息将很容易被窃取;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.

2.2 光纤传输信道

当信号在实际光纤信道中传输时,光纤损耗、色散和非线性效应对光场的影响可用非线性薛定谔方程描述^[15]

$$\frac{\partial A}{\partial z} = -\frac{\alpha}{2}A - \frac{i}{2}\beta\frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + i\gamma(|A|^2 + 2|A'|^2)A \quad (4)$$

式中 $A(A')$ 为激光场包络的慢变振幅, z 是传输距离, T 是随脉冲以群速度移动的参考系中的时间量度, α 是光纤损耗系数, β 为光纤二阶色散常数, γ 是光纤非线性系数.显然,该方程描述的是激光光场的变化,式(1)、(2)并不适用.但从文献[17]的研究结果可知,群速度色散会限制光纤通信系统的比特率和传输距离,影响脉冲的形状,而非线性效应会改变光场的相位,两种因素的最终结果都会严重影响激光混沌同步,劣化解码质量.在本文所给出的混沌复用通信方案中,所有信道共用同一频率,因此不存在交叉相位调制(Cross Phase Modulation, XPM);另外,自相位调制(Self Phase Modulation, SPM)只改变光场的相位,不改变光场的大小,而本方案采用的是光电反馈与光电注入,所以混沌同步不受 SPM 影响;因为同频率信道不需考虑四波混频效应,所以色散的影响则可通过色散位移光纤解决.最后再来讨论光纤损耗的影响,由方程(4)可知,忽略色散和非线性效应影响时可得

$$|A| = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha z/2) \quad (5)$$

式中 P_0 为发送端混沌激光入射到光纤中的功率, $|A|$ 为经过光纤传输后到达接收端的激光功率,显

然激光功率将随传输距离增大而减小.图6为 $\alpha = 0.2$ dB/km, $z = 50$ km 时两端与激光光强相关的电信号输出及同步误差.

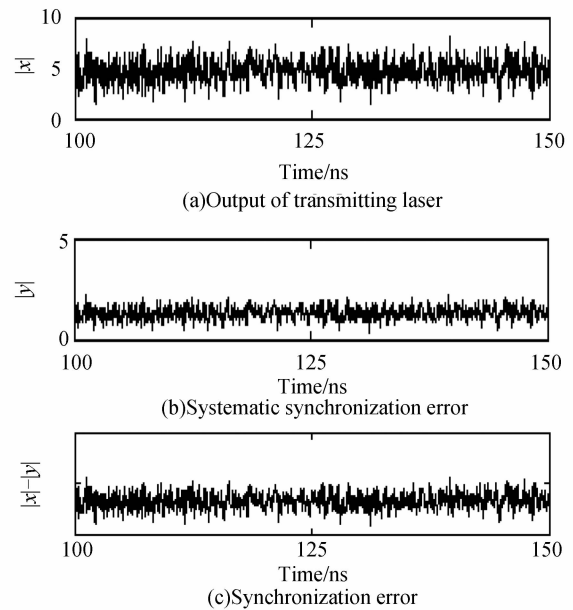
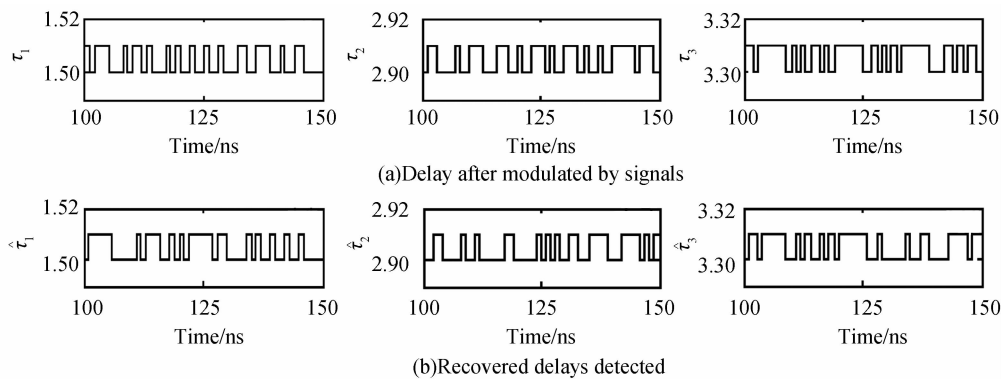


图6 光纤损耗作用下系统的输出特性

Fig. 6 Systematic output performance under fiber loss

由于光纤损耗作用,到达接收激光器的光功率大大减小,即接收激光器注入强度与发送激光器的反馈强度不匹配,从而使系统同步误差增大,解码性能劣化甚至完全不能解码,如图7.为了补偿光纤损耗引起的光强减弱,通常而有效的方法是在接收端用掺铒光纤放大器(Erbium Doped Fiber Amplifier, EDFA)进行放大,然后再注入接收激光器.在上述参量下,光强的损耗约为 -5.42 dB,因此 EDFA 的增益系数应在 3.5 左右.图8给出了用增益系数为 3.3 的 EDFA 进行补偿后系统的输出特性,此时系数的同步误差大大减小,系统能够成功恢复出原始信号,其解码结果如图9.



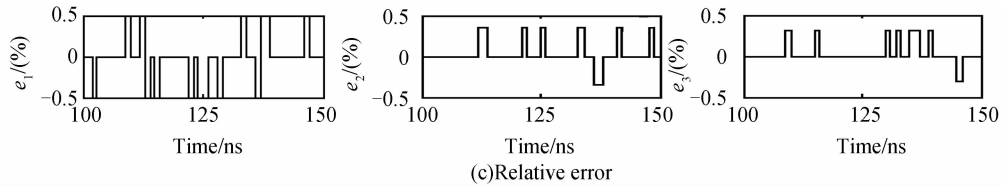


图7 光纤损耗作用下系统的解码结果

Fig. 7 Encryption/decryption result under fiber loss

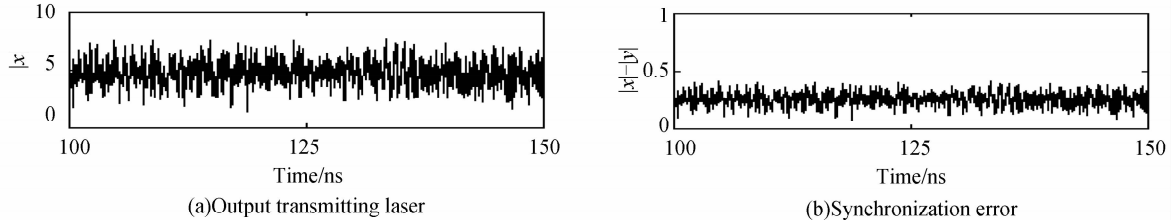


图8 增益补偿后系统的输出特性

Fig. 8 Output performance after gain compensation

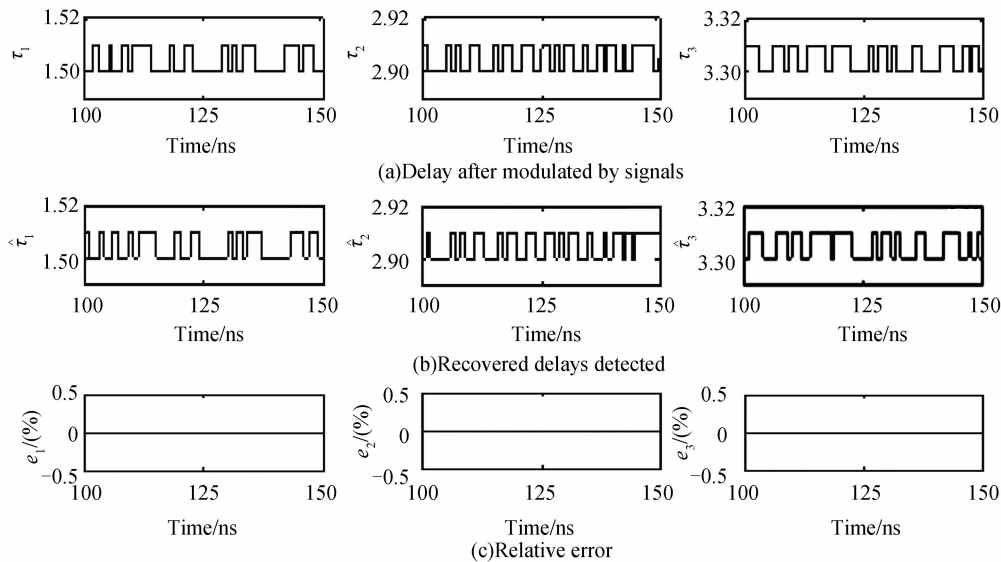


图9 增益补偿后系统的解码结果

Fig. 9 Decryption result after gain compensation

3 结论

利用电光调制器非线性维数高、易于再生和精确控制等特点,提出了一种非线性光电延时反馈超高速混沌复用通信系统,与传统混沌通信系统不同,该系统的混沌波形不是由激光器产生,而是由电光调制器产生,其激光器工作在功率电流曲线的线性区域.详细阐述了信号调制反馈延时的编码方法,与经典隐藏传输方案不同在于,该方法通过信号对相应支路的延时进行调制来实现信号的加载,输出信号不是信号与混沌信号的简单迭加,信号的幅度不用受限于混沌载波的幅度,解码时不能用混沌波相减法.利用所给的相关检测方法,数值实现了三条支路的高速复用与解复用,相关检测的误码主要来源于其他用户信号的干扰.与传统的 WDM 和 TDM 相比,该方案中所有用户共有相同的频率,因此不需

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.在实际光纤传输信道中,只要采用相应的增益补偿方案,光纤信道对混沌同步的影响会大大减小,系统能够成功解码原始信号.

参考文献

- [1] PECORAL L M, CARROLLI T L. Synchronization in chaotic systems [J]. *Physical Review Letters*, 1990, **64**(9): 821-824.
- [2] HAYES S, GREBOGI C, OTT E. Communicating with chaos [J]. *Physical Review Letters*, 1993, **70**(20): 3031-3034.
- [3] VAN WIGGEREN 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] HU J J, MA J S. Research on three cascade chaotic system based on incoherent optical feedback and injection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10): 2553-2557.

胡菊菊, 马军山. 基于非相干光反馈与注入的级联混沌系统研

- 究[J]. 光子学报, 2009, **38**(10): 2553-2557.
- [6] LIN F Y, LIU J M. Nonlinear dynamical characteristics of an optically injected semiconductor laser subject to optoelectronic feedback[J]. *Optics Communications*, 2003, **221** (1-3): 173-180.
- [7] 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.
- [8] LIN F Y, TSAI M C. Chaotic communication in radio-over-fiber transmission based on optoelectronic feedback semiconductor lasers [J]. *Optics Express*, 2009, **15**(2): 302-311.
- [9] GASTAUD N, POINSOT S, LARGER L, *et al.* Electro-optical chaos for multi-10 Gbit/s optical transmissions[J]. *Electronics Letters*, 2004, **40**(14): 898.
- [10] GOEDGEBUER J P, LEVY P, LARGER L, *et al.* Optical communication with synchronized hyperchaos generated electrooptically[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, **38**(9): 1178-1183.
- [11] SHORT K M, PARKER A T. Unmasking a hyperchaotic communication scheme[J]. *Physical Review E*, 1998, **58**(1): 1159-1162.
- [12] PEREZ G, CERDEIRA H. Extracting messages masked by chaos[J]. *Physical Review Letters*, 1995, **74**(11): 1970-1973.
- [13] KYE W H, CHOI M, KIM C M. Encryption with synchronized time-delayed systems[J]. *Physical Review E*, 2005, **71**(4): 5202-5205.
- [14] ARGYRIS A, SYRIDIS D, LARGER L. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(7066): 343-346.
- [15] KANAKIDIS D, BOGRIS A, ARGYRIS A, *et al.* Numerical investigation of fiber transmission of a chaotic encrypted message using dispersion compensation schemes[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, **22**(10): 2256-2263.
- [16] YAN Sen-lin, Studies on dual-core-bidirectional optical fiber chaotic secure communication system [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(5): 2819-2826.
颜森林. 光纤混沌双芯双向保密通信系统研究[J]. 物理学报, 2008, **57**(5): 2819-2826.
- [17] ZHANG Jian-zhong, WANG An-bang, WANG Yun-cai, Wavelength division multiplexing of chaotic optical communication and OC248 fiber communication [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(6): 3793-3798.
张建忠, 王安帮, 王云才. 混沌光通信与 OC248 光纤通信的波分复用[J]. 物理学报, 2009, **58**(6): 3793-3798.
- [18] CHEMBO K Y, COLET P, LARGER L, *et al.* Chaotic Breathers in delayed electro-optical systems [J]. *Physical Review Letters*, 2005, **95**(20): 3903-3906.

Multiplexed Chaos Synchronization Communication System with Nonlinear Delayed Optoelectronic Feedbacks

HU Ju-ju^{1,2}, ZHOU Xiao-yong¹, MA Jun-shan¹

(1 School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

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

Abstract: A hyper dimensional multiplexed chaos communication system was proposed based on nonlinear delayed feedbacks of electrooptical modulator. Different from traditional chaos communication system, the chaotic waveform is not produced by the semiconductor but by the electro-optical modulator. The scheme is advantageous of high nonlinear dimension, easily reproduced and manipulated accurately. The encryption method of signals modulating feedback delays and cross-correlation decryption method were illustrated. High rates of multiplexing and demultiplexing were numerically simulated for three channels. The main factor for error bit rate was analyzed. The influence of optical fiber on the multiplexed chaos communication system was further investigated. The research results indicate that the influence of optical fiber on chaos synchronization can be reduced significantly and the original signals can be recovered successfully as long as corresponding gain compensation schemes are adopted.

Key words: Multiplexed communication; Chaos synchronization; Signal modulating; Delayed feedback