

光纤混沌双向保密通信系统研究

颜森林

(江西科技师范学院通信与电子工程学院, 江西南昌 330013)

摘 要: 本文提出光纤混沌双向保密通信设想,通过耦合光注入半导体激光器激光混沌全光耦合反馈同步系统和光纤传输信道,建立了光纤混沌双向通信系统模型,数值实现了该系统在长距离光纤传输中的同步,详细地分析了系统同步时间随光纤传输长度的关系.证明了光纤的交叉相位调制是限制激光混沌在光纤传输中同步的主要原因,导出了系统传输的非线性相移.数值模拟了具有正弦调制信号的调制频率 0.5 GHz 混沌模拟通信和数字信号调制速率 0.4 Gbit/s 以及 20 Gbit/s 的混沌数字通信以及调制速率 0.05 Gbit/s 混沌键控通信的应用,计算出光纤混沌数字通信速率和同步误差等关系,还特别分析了系统解码特性和调制带宽,表明系统具有非常好的保密性能和具有高速率通信的能力.光纤混沌双向保密通信是可以实现的.

关键词: 光纤;混沌;同步;保密通信

中图分类号: TP273, TN918 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 02-0266-05

Studies on Optical Fiber Bi-Directional Chaos Secure Communication Systems

YAN Sen-lin

(School of Communication & Electronic Engineering, Jiangxi Science & Technology Normal University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: An optical fiber bi-directional chaos secure communication system is proposed and a model of optical fiber bi-directional chaos communication is presented by coupling the all-light chaos coupling-feedback synchronous system with the injection-light semiconductor lasers and optical fiber channel. The synchronization is numerically achieved in long-haul optical fiber propagation and the system synchronous error is in detail analyzed. Chaotic laser synchronization is mainly limited by cross-phase modulation in the fiber and the propagation nonlinear phase shift is reduced. Chaos analog secure communication with a sinusoidal modulation signal of 0.5 GHz, chaos digital secure communication with a digital modulation signal of 0.4 Gbit/s and 20 Gbit/s rates and chaos shift keying secure communication with rate 0.05 Gbit/s are numerically simulated, respectively. Relationship between the bit rate and the synchronous error is numerically calculated in optical fiber chaos digital secure communications. The decoding performance and the modulation bandwidth of the system are also analyzed in detail. The system shows the good abilities of robust security and high rate communications. So it could be realized for long-haul bi-directional optical fiber chaotic secure communications.

Key words: optical fiber; chaos; synchronization; secure communications

1 引言

近十几年,混沌系统在保密通信中的应用得到了广泛重视^[1~3].由于,全光激光混沌系统有大的带宽和低的衰减,且动力学系统比较复杂以及系统对参数具有极高的敏感性^[2~5],因而,非常适合高速远程保密通信并可提高系统的保密性能.文献[2~11]基于“驱动-响应”同步思想方法,分别提出了激光混沌开环同步通信系统、反馈同步通信系统、延时反馈同步通信系统、电光延时反馈同步通信系统、光纤激光混沌同步通信系统以及激光混沌多信道同步通信系统等,但“驱动-响应”系统只能进行混沌单向通信,而激光混沌耦合同步系

统由于耦合要改变系统的动力学行为,所以参数选取比较困难.另外,目前激光混沌通信基本都是编码研究^[1~6],其在光纤保密通信中的应用研究是非常少见的,所以必须重视激光混沌在光纤保密通信中应用的研究.

本文研究全光混沌耦合反馈同步系统及其在光纤保密通信中应用.提出有外部光注入半导体激光器混沌全光耦合反馈同步系统,其物理机制是当系统同步后,耦合和反馈将相互抵消,系统的原来动力学特性仍被保持,所以系统参数可以在较大范围内选择而不影响系统动力学行为.通过耦合光注入半导体激光器激光混沌全光耦合反馈同步系统和光纤传输信道建立光纤混沌双向通信系统模型,分析激光混沌信号在光

纤中双向传输的物理机制, 数值计算不同传输距离时光纤中的同步时间, 模拟了该系统在混沌模拟、数字编码保密通信中的应用, 还特别分析了系统解码特性和调制带宽等. 本文第二部分建立光纤混沌双向通信系统模型, 第三部分是该系统编码通信应用的数值模拟, 第四部分是结论.

2 同步

2.1 模型

外部光注入半导体激光器激光混沌全光耦合反馈同步系统的发射子系统和接收子系统模块组成如图 1 所示.

它们都由相同的主 (M)、副 (S) 半导体激光器二极管 (LD) 所组成, 且两 S-LD 都有一反馈回路. 就注入半导体激光器系统而言,

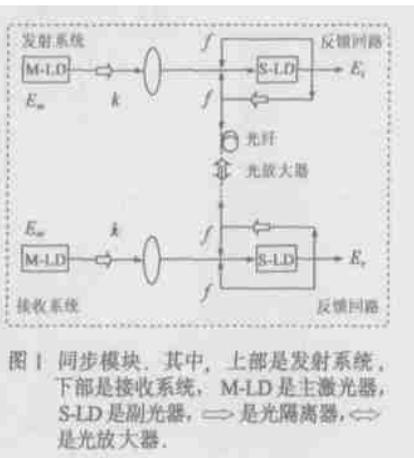


图 1 同步模块. 其中, 上部是发射系统, 下部是接收系统, M-LD 是主激光器, S-LD 是副激光器, \rightarrow 是光隔离器, \leftrightarrow 是光放大器.

M-LD 的激光场 $E_m \exp(-j\omega t)$ 注入可以驱动 S-LD 激光趋向于混沌态. 对于发射系统, 设 S-LD 的激光场 $E_t(t) \exp\{-j[\omega t + \phi_t(t)]\}$ 发射注入到接收系统 S-LD 中, 而接收系统 S-LD 激光场 $E_r(t) \exp\{-j[\omega t + \phi_r(t)]\}$ 被耦合注入到发射系统 S-LD 中, 这样, 两系统接收耦合反馈就实现了. 耦合反馈平衡是必要的, 为了简化, 两系统接收耦合反馈系数均取为 f . 有外部注入相干光场发射系统和接收系统的 S-LD 耦合速率方程分别是^[3-11]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_t}{dt} &= \frac{1}{2} (G_t - \gamma) E_t + \frac{k}{L} E_m \cos(\omega t - \phi_t) \\ &\quad + \frac{1}{L} f [E_r \cos(\phi_r - \phi_t) - E_t] \\ \frac{dN_t}{dt} &= \frac{1}{2} \gamma_c (G_t - \gamma) + \frac{k f E_r}{L E_t} \sin(\omega t - \phi_t) \\ &\quad + \frac{1}{L} \frac{f E_r}{E_t} \sin(\phi_r - \phi_t) - \gamma_m \\ \frac{dN_r}{dt} &= \frac{1}{q} - \gamma_a N_r - G_r V_p E_r^2 \end{aligned} \quad (1)$$

和

$$\begin{aligned} \frac{dE_r}{dt} &= \frac{1}{2} (G_r - \gamma) E_r + \frac{k}{L} E_m \cos(\omega t - \phi_r) + \frac{1}{L} f [E_t \cos(\phi_t - \phi_r) - E_r] \\ \frac{d\phi_r}{dt} &= \frac{1}{2} \gamma_c (G_r - \gamma) + \frac{k E_m}{L E_r} \sin(\omega t - \phi_r) - \gamma_m \\ &\quad + \frac{1}{L} \frac{f E_t}{E_r} \sin(\phi_t - \phi_r) \\ \frac{dN_r}{dt} &= \frac{1}{q} - \gamma_a N_r - G_r V_p E_r^2 \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 脚注“t”和“r”分别表示发射子系统和接收子系统. N 是激光器的载流子数; 模式增益 $G = (\gamma_g a / V) (N - N_{th}) /$

$\sqrt{1 + E^2 / E_s^2}$, v_g 是激光腔内光子的群速, a 是增益常数, $\gamma = V / V_p$ 是压缩和限制因子, V 是激光腔体积, V_p 是激光模式体积, E_s 是饱和光子场强; $N_{th} = n_{th} V$ 是激光取得透明时载流子值, n_{th} 是载流子密度值; $\gamma = \gamma_g (\gamma_m + \gamma_{im})$ 是光子损耗速率, γ_m 是腔光子损耗, γ_{im} 是腔内光子损耗; γ_m 可认为是外部注入光频率和无扰动时激光光场频率的频差; $T = 2 n_g L / c$ 是光在激光腔长 L 内来回一周的时间, c 是真空中光速, $n_g = c / v_g$ 群折射率; I 是驱动电流, q 是单位电荷; $\gamma_c = \gamma (1 + \gamma_c) = A_{nr} + B (N / V) + C (N / V)^2$ 是载流子非线性损耗速率, A_{nr} 是非辐射复合速率, B 是辐射复合因子, C 是俄歇复合因子, k 是光注入指数. 研究表明, 在比较大的参数范围内, 适中的外场注入, 系统都存在混沌现象^[6-11]. 由式 (1) 和 (2) 得到同步方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} (E_t - E_r) \\ (\phi_t - \phi_r) \\ (N_t - N_r) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1(E_t, \phi_t, N_t, E_r, \phi_r, N_r) \\ F_2(E_t, \phi_t, N_t, E_r, \phi_r, N_r) \\ F_3(E_t, \phi_t, N_t, E_r, \phi_r, N_r) \end{pmatrix} \quad (3)$$

这里, 函数 F_1, F_2 和 F_3 的形式可由式 (1) 和 (2) 简单给出. 如当时 $t = 0$, 绝对值 $|E_t - E_r| = 0, |\phi_t - \phi_r| = 0, |N_t - N_r| = 0$ 时, 接收系统和发射系统同步就实现了.

2.2 光纤混沌传输信道

设发射系统和接收系统两激光混沌波具有相同的偏振态, 在光纤中以相反方向传输. 由于混沌波具有准连续、类噪声宽谱线的特点, 所以它们可由非线性薛定谔耦合方程来描述^[12]:

$$\frac{\partial E_t}{\partial z} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 E_t}{\partial T^2} + \frac{\gamma}{2} E_t = i (|E_t|^2 + 2|E_r|^2) E_t \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial z} + \frac{i}{2} \frac{\partial^2 E_r}{\partial T^2} + \frac{\gamma}{2} E_r = i (|E_r|^2 + 2|E_t|^2) E_r \quad (5)$$

其中 $E_t(z, t)$ 和 $E_r(z, t)$ 是激光场包络的慢变振幅, z (或 ξ) 是传输距离 (作为坐标轴, 前向波是正号, 后向波是负号, 即有 $|z| = |\xi|$ 和 $\partial/\partial z = -1$), T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 ($T = t - z/v_g$), γ 是光纤损耗常数, γ_2 是光纤二阶色散常数, γ_3 是光纤非线性 Kerr 效应常数. 这样由式 (3) 和 (4), (5) 组成光纤混沌双向保密通信系统. 由于群速色散会限制光纤通信系统的比特率和传输距离, 影响脉冲的形态, 并能影响激光混沌同步. 所以, 这里选用波长 $1.31 \mu\text{m}$ 时色散为零的普通单模光纤 (典型值是 0.44 dB/km , $\gamma_2 = 0$, $\gamma_3 = 2 \times 10^{-3} \text{ W}^{-1} \text{ m}^{-1}$). 所以色散效应显得次要, 这里仅考虑非线性效应, 式 (4) 和 (5) 的解是:

$$E_t(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\gamma |z|/2) \exp(i\phi_{tN}) \quad (6)$$

$$E_r(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\gamma |z|/2) \exp(i\phi_{rN}) \quad (7)$$

其中, P_0 和 P_0 为入射脉冲的峰值功率, ϕ_{tN} 和 ϕ_{rN} 是 XPM 效应使传输信号产生的非线性相移. 其中:

$$\phi_{tN}(z, T) = z_{\text{eff}} [P_0 + 2P_0] \quad (8)$$

$$\phi_{rN}(z, T) = z_{\text{eff}} [P_0 + 2P_0] \quad (9)$$

其中, $z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\gamma |z|)] / \gamma$ 是有效距离, 式 (8) 和 (9) 表明, XPM 使得非线性相移随光强的增大而增大, 由式 (6)、(7)、(8) 和 (9) 可知, 影响激光混沌同步的主要原因是光纤的损耗

和 XPM 产生的非线性相移. XPM 产生的非线性相移的净相位差是:

$$\phi = \phi_{N} - \phi_{N'} = z_{\text{eff}}(P_{0,0} - P_0) \quad (10)$$

由于混沌保密通信的基本要求是接收和发射系统要有相同的参数,系统同步后,可以取 $P_{0,0} = P_0 = P_0$,使净相位差 $\phi = 0$,这样可适当减少光纤中的 XPM 非线性相移对同步的负面影响.式(8)和(9)可写为:

$$\phi_N = 3 P_0 z_{\text{eff}} \quad (11)$$

目前,光放大器对光脉冲能很好地进行线性放大.在光纤通信中,每相距一定距离设有一光纤放大器.这样,总的最大非线性相移是:

$$\phi_{\text{max}N} = 3 n P_0 z_{\text{eff}} \quad (12)$$

其中, n 是光放大器的个数.当式(6)、(7)以及(12)代入式(3)后,接收系统和发射系统仍能同步,则式(12)就是有光放大器系统的光纤混沌双信保密通信最大的非线性相移.如激光器和光纤的耦合系数是 κ ,则入射光功率可表为:

$$P_{0,0} = \frac{\hbar \omega_p E_{0,0}^2 \kappa}{2 L} \quad (13)$$

这样由式(3)、(6)、(7)、(12)和(13)就可以进行光纤混沌保密通信具体应用研究.

2.3 数值分析

定义绝对值同步误差和相对均方根同步误差为:

$$= E_i(t) - E_r(t) \quad (14)$$

$$= \sqrt{\frac{E_i^2(t) - E_r^2(t)}{E_i^2(t) + E_r^2(t) / 2}} \quad (15)$$

其中方括号表示对时间统计平均.以下所有同步误差数值计算中均取时间在 20ns ~ 60ns 统计平均,且每相距 150km 有一光纤放大器.数值模拟分析时让 E 对 E_s , t 对 n_s , N 对 N_{th} 归一化,并取 $\kappa = 0.1, f = 0.1, k = 0.05, E_m = 0.125 E_s$ 和表 1 的数值.图 2 是激光混沌同步图,其中上插入图是同步的放大,可以看到同步误差在 6.3ns 以后消失了,下部分是混沌吸引子.图 3 是混沌信号在光纤中传输

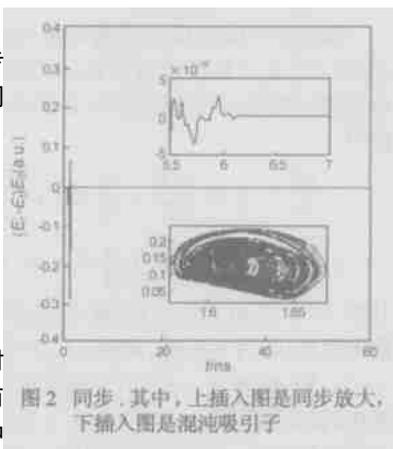


图 2 同步.其中,上插入图是同步放大,下插入图是混沌吸引子

3000km 以后的同步图,显示出随着传输距离的增加,系统到

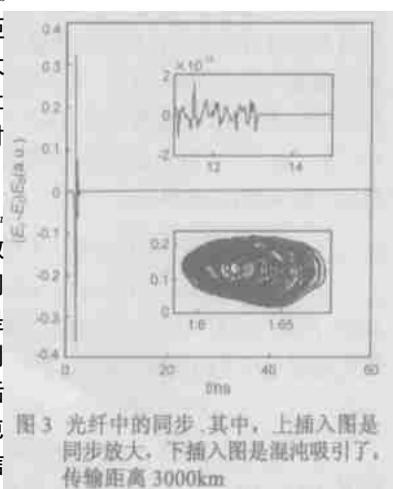


图 3 光纤中的同步.其中,上插入图是同步放大,下插入图是混沌吸引了,传输距离 3000km

达同步的时间变长了,由于信号产生了非线性相移,混沌吸引子发生了变化.但仍具有混沌特点.为了了解光纤混沌键控通信速率特性,表 2 给出系统同步时间随传输距离的数值关系.表 2 数值表明,光纤混沌键控编码通信速率上限制大约是 0.1GHz 数量级.同时,从图 2 和图 3 中还可以看到系统同步是零误差!系统达到了完全的同步.其物理机制是当系统同步后,由于耦合和反馈的相互作用,系统的负面影响相互抵消了,这就是该系统的优点和长处.

表 1 激光器参数

参数	符号	值	单位
腔长	L	350	μm
腔宽	w	2	μm
腔厚	d	0.15	μm
压缩和限制因子		0.29	
群速折射率	n_g	3.8	
腔内光子损耗	m	29	cm^{-1}
腔外光子损耗	int	20	cm^{-1}
载流子密度值	n_{th}	1.2×10^{18}	cm^{-3}
非辐射复合速率	A_{nr}	1.0×10^8	s^{-1}
辐射复合因子	B	1.2×10^{-10}	cm^3/s
俄歇复合因子	C	3.5×10^{-29}	cm^6/s
饱和光子场强	E_s	1.6619×10^{11}	$\text{m}^{-3/2}$
增益常数	a	2.3×10^{-16}	cm^2
光增强因子	c	6	
频差		2×10^9	rad/s
驱动电流	I	25	mA

表 2 同步时间随传输距离的关系

传输距离/100km	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
同步时间/ns	6.6	6.7	7.3	7.0	8.4	14.4	7.5	8.8	10.3	13.1

3 光纤混沌双向保密通信

激光混沌波具有变化复杂无序随机特点,其信号具有类噪声宽频谱,系统对初值具有极高的敏感特性且它的长时间行为是难以预测的^[2-11].混沌保密通信正是利用了混沌信号这一特性.

3.1 混沌键控

光纤混沌键控通信系统和图 1 基本相同,仅多一组接收系统,有“0”和“1”二个接收机组成.这里让发射系统 SLD 驱动电流以键控形式分别调制到 I_0 和 I_1 以驱动激光场到不同的混沌周期轨道 E_0 和 E_1 上,由于 E_0 和 E_1 的混沌周期轨道是不同的混

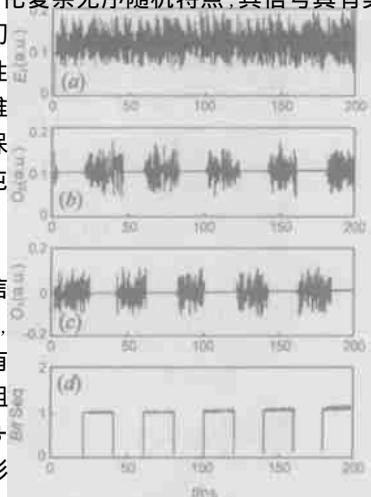


图 4 混沌键控.其中,(a)是混沌波形;(b)是在字节“0”上同步;(c)是在字节“1”上同步;(d)是归一化后的“0”和“1”字节流.传输距离 1500km

混沌吸引子,即定义了二进制码“0”和“1”。

接收解调系统中“0”接收机 SLD(驱动电流是 I_0) 和 E_0 同步,“1”接收机 SLD(驱动电流是 I_1) 和 E_1 同步. 在数值模拟中取表 1 的参数,任意的初始条件, $I_0 = 25.1\text{mA}$, $I_1 = 25\text{mA}$. 当发射和接收系统同步后,同步的混沌信号分别为 E_0 和 E_1 , 通过下式就可以实现信号解调:

$$\begin{aligned} O_0(t) &= E_0(t) - E_0(t) \\ O_1(t) &= E_1(t) - E_1(t) \end{aligned} \quad (16)$$

其中, O_0 和 O_1 和分别表示解调出来的二进制码“0”和“1”. 当“ O_0 ”或“ O_1 ”归零后,数字信号解调也就实现了. 图 4 是 1500km 处的光纤混沌键控数值模拟结果. 其中,图 4(a) 是混沌波 E_0 和 E_1 被转换发射实时构成的图示, E_0 和 E_1 是不同的混沌吸引子(但很相近),如果不了解系统参数,很难分离出二进制码“0”和“1”. 图 4(b) 是在字节“0”上同步,图 4(c) 是在字节“1”上同步,图 4(d) 是混沌信号由式(16)分离解调并归一化后按二进制码“0”和“1”实时构成的信息流图.

3.2 模拟通信和数字通信以及带宽

把发射信息 $S(t)$ 直接加到混沌波中,并和混沌信号一起

被发射,即信息隐藏在混沌波中,这样从混沌波形上分离信息就很难. 现用正弦信号 $S(t)$ 调制信息,并直接加到混沌波中. 数值模拟中取 $S(t) = A \sin(2 f_0 t)$, 这里, $A = 0.01 E_m$, $f_0 = 0.5\text{GHz}$. 当接收和发射系统达到混沌同步后,通过减法即可解调出信息 $S(t)$. 图 5 是 3000km 处光纤混沌模拟通信调制解调数值模拟结果.

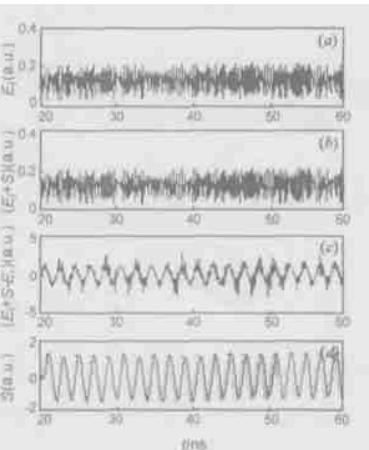


图 5 模拟通信,其中,(a)混沌波形;(b)信号隐藏在混沌波中;(c)解调出来的信号;(d)滤波后解调出来的信号(其中虚线是原始信号)传输距离 3000km

图 5(a) 是混沌波形图,图 5(b) 是信号成功地隐藏在混沌波中,图 5(c) 是解调出来的信息信号的波形图,解调出来的信息信号波明显叠加着同步误差所产生的杂波,其原因是信号和光纤干扰了混沌同步,使同步误差增加了. 此时 $A/E_m = 4.17$. 图 5(d) 是应用低通数字滤波器对解调出来的信息信号进行滤波重构后的完美信号. 为了更好地了解系统调制解调特性,表 3 给出了系统调制解调时的同步误差随传输距离的关系,1500km 以后同步误差逐步增加了. 这里我们还进一步数值模拟了带宽,当正弦信号具有调制频率 $f_0 = 20\text{GHz}$ 时,光纤混沌模拟通信调制解调还是可以实现.

表 3 同步误差随传输距离的关系

传输距离/100km	1.5	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
$/10^{-4}$	2.3	2.2	2.1	2.2	2.1	2.4	2.5	2.7	2.8	2.8	3.0
$/10^{-2}$	5.3	5.2	5.2	5.3	5.2	5.8	5.8	6.3	6.6	6.8	6.9

图 6 是光纤混沌数

字信号在 1500km 处调制解调的数值模拟结果,信号振幅是 $A = 0.01 E_m$, 速率是 0.4Gbit/s . 其中,图 6(a) 是混沌波形图,图 6(b) 是信号隐藏在混沌波中,图 6(c) 是解调出信息信号的波形图,图 6(d) 是滤波重构后的信号. 其中, $A/E_m = 3.5 \times 10^{-4}$, $= 0.0688$, $A/E_m = 2.8$. 显然数字通信要比模拟通信同步误差大,同步误差大约增大了 20%, A/E_m 大约减小了 33%. 我们还进行

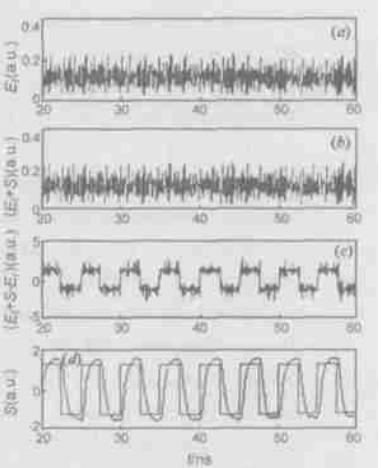


图 6 数字通信,其中,(a)混沌波形;(b)信号隐藏在混沌波中;(c)解调出来的信号;(d)滤波后解调出来的信号(其中方波是原始信号)传输距离 1500km

了传输距离 1500 km 光纤混沌数字通信具有调制速率 20Gbit/s 的数值模拟,结果表明在光纤混沌高速数字通信时,不用滤波器解调是有可能的. 混沌数字信号通信的带宽以及同步误差如表 4 所示,速率可达到 40Gbit/s . 其中在调制速率 10Gbit/s 时有最小的同步误差.

表 4 光纤混沌数字通信速率和同步误差的关系

速率/Gbit/s	0.1	0.5	1	2.5	5	10	15	20	30	40
$/10^{-4}$	3.6	3.7	3.7	5.0	3.9	2.1	1.8	1.8	1.9	2.9
$/10^{-2}$	7.0	7.1	7.2	8.6	7.2	5.3	4.8	5.0	5.1	6.3

注:数字信号是方波,幅值是 $1\% E_m$,传输距离 1500km

4 结论

本文提出光纤混沌双向通信系统,成功模拟实现了波长 $1.31\mu\text{m}$ 激光混沌系统在长距离光纤传输中的同步,证明了光纤的交叉相位调制是限制激光混沌在光纤传输中同步的主要原因,得到了这种传输的非线性相移. 通过混沌模拟通信和混沌数字通信的模拟分析,发现该系统具有较高的保密性能和反破译能力,同时系统还具有很好的调制解调特性和大的带宽. 表明远程光纤混沌双向保密通信是可以实现的.

参考文献:

- [1] VANWIGGEREN G D, ROY R. Digital communication with chaotic lasers[J]. Science, 1998, 279(3): 1198 - 1200.
- [2] VANWIGGEREN G D, ROY R. Optical communication with chaotic waveforms[J]. Phys Rev Lett, 1998, 81(4): 3547 - 3550.
- [3] WU L, ZHU S Q. Communications using multi-mode laser system based chaotic synchronization[J]. Chinese Physics, 2003, 12(3): 300 - 304.
- [4] WU L, ZHU S Q. Multi-channel communication using chaotic laser synchronization of multi-mode lasers[J]. Physics Letters A, 2003, 308(2): 157 - 161.
- [5] WU L, ZHU S Q. Digital Communication Using Multi-mode Chaotic Lasers[J]. Commun. Theor. Phys., 2004, 41(2): 225 - 230.
- [6] JUNI O. Chaos synchronization and chaotic signal making in semicon-

- ductor lasers with optical feedback [J]. IEEE Quantum Electronics, 2002, 38(9):1141 - 1154.
- [7] SIVAPRAKASAM S, PAUL S, et al. Regimes of chaotic synchronization in external-cavity laser diodes[J]. IEEE Quantum Electronics, 2002, 38(9):1155 - 1161.
- [8] TILMANN H, JOSEF M, et al. ON/OFF phase shift keying for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers [J]. IEEE Quantum Electronics, 2002, 38(9):1162 - 1170.
- [9] VALERIO A L, SABINA M, et al. Characterization of a chaotic telecommunication laser for different fiber cavity lengths [J]. IEEE Quantum Electronics, 2002, 38(9):1171 - 1177.
- [10] COEDGEBUER J P, LEVY P, et al. Optical communication with synchronized hyperchaos generated electrooptically [J]. IEEE Quantum Electronics, 2002, 38(9):1178 - 1183.
- [11] LIU J M, CHEN H F, TANG S. Synchronized chaotic communications at high bit rates[J]. IEEE Quantum Electronics, 2002, 38(9):1184 - 1196.
- [12] AGAWAL G P. Nonlinear Fiber Optics[M]. San Diego, CA: Academic, 1989.

作者简介:



颜森林 男, 1962 年生于江苏, 副教授, 1983 年毕业于南京师范大学物理系, 获学士学位, 1995 年毕业于江西师范大学物理系, 获硕士学位, 2001 年毕业于东南大学电子工程系, 获博士学位, 2001 - 2003 年在南京理工大学电光学院做光学工程博士后, 在国内外发表学术论文四十多篇, 现主要研究工作是光纤保密通信系统与技术、半导体激光器、光电子器件、光学混沌等。E-mail: senlinyan @263.net.