

光纤混沌双芯双向保密通信系统研究*

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2007 年 7 月 22 日收到, 2007 年 9 月 16 日收到修改稿)

把量子阱激光混沌耦合反馈同步系统应用于光纤保密通信中, 提出光纤混沌双芯双向保密通信设想, 通过耦合外部光注入多量子阱激光混沌全光耦合反馈同步系统和光纤传输信道, 建立了光纤混沌双芯双向通信系统物理模型. 理论和数值证明了激光混沌同步, 理论分析指出光纤中的自相位调制是限制激光混沌在光纤传输中同步的主要原因, 并推导出混沌信号双芯双向传输中的非线性相移以及混沌激光功率限制和传输距离公式. 数值实现了该系统在长距离二根光纤传输中的同步, 详细地分析了系统同步时间随光纤传输长度的关系, 模拟了调制频率 0.6 GHz 的混沌模拟通信和调制速率 0.6 Gbit/s 的混沌数字通信以及调制速率 0.05 Gbit/s 的混沌键控编码在光纤保密通信中的应用, 计算出光纤混沌数字通信速率和同步误差的关系, 还特别分析了系统解码特性和调制带宽. 表明系统确有非常好的保密性能, 光纤混沌双芯双向保密通信是可以实现的.

关键词: 混沌, 同步, 光纤, 保密通信

PACC: 0545, 4260, 4265S

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]. 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^[4-8], 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—9 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, 其大多数都是编码研究^[8-12], 而在光纤保密通信中的应用研究是非常少见的, 所以须重视激光混沌在光纤保密通信中应用的研究.

当前, 光纤传输已成为通信的主要手段, 其通信系统的保密性能也受人们的特别关注. 随着光电子技术的发展, 窃取光纤中的信号已成为可能. 为了满足光纤通信保密性能要求, 研制出高度保密性能的光纤保密通信系统是非常重要的. 激光混沌信号具有固有的宽带、类噪声和难以预测的特点, 能显著提

高系统保密性能, 能增加光电子侦察的难度. 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的应用, 研究有光纤信道存在时的光注入单模多量子阱(MQW)激光二极管(LD)混沌全光耦合反馈同步系统, 其物理机理是当系统同步后, 耦合和反馈将相互抵消, 系统的原来动力学特性仍被保持, 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. 然后通过耦合同步系统和光纤传输信道建立光纤混沌双芯双向通信系统模型, 分析收、发混沌信号分别在二根光纤中双向传输的物理机理, 数值计算不同传输距离时光纤中的同步时间, 模拟混沌模拟和数字编码保密通信中的应用, 分析系统解码特性和调制带宽等.

2. 模型

2.1. 同步

外部光注入 MQW LD 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)MQW LD 所组成, 且两 S-LD 都有一反馈回路. 就注入 MQW LD 系

* 江苏省教育厅高校自然科学研究指导性计划项目(批准号 D6KJ140111)资助的课题.

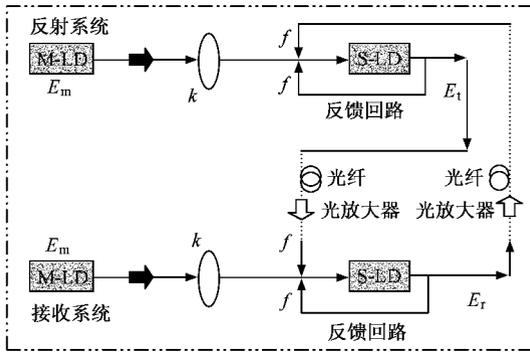


图1 同步模块(其中,上部是发射系统,下部是接收系统,M-LD是主激光器,S-LD是副激光器,➡是光隔离器)

统而言,M-LD的激光场 $E_m \exp(-j\omega_m t)$ 注入可以驱动 S-LD 激光趋向于混沌态^[10-13].对于发射系统,设 S-LD 的激光场 $E_e(t) \exp\{-j[\omega_m t + \phi_e(t)]\}$ 发射注入到接收系统 S-LD 中,而接收系统 S-LD 激光场 $E_r(t) \exp\{-j[\omega_m t + \phi_r(t)]\}$ 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,两系统的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^[3-6]

$$\begin{aligned} \frac{dE_t}{dt} &= \frac{1}{2}(G_t - \gamma_p)E_t + \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(\phi_e - \phi_t) \\ &\quad + \frac{1}{\tau_L}[E_r \cos(\phi_r - \phi_t) - E_t], \\ \frac{d\phi_t}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_t - \gamma_i) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_t} \sin(\phi_e - \phi_t) \\ &\quad + \frac{1}{\tau_L} \frac{fE_r}{E_t} \sin(\phi_r - \phi_t) - \Delta\omega, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_{Bt}}{dt} &= \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQ} N_{Bt} + \gamma_{QB} N_t, \\ \frac{dN_t}{dt} &= \gamma_{BQ} N_{Bt} - (\gamma_{er} + \gamma_{QB}) N_t \\ &\quad - G_t V_p E_t^2, \end{aligned}$$

和

$$\begin{aligned} \frac{dE_r}{dt} &= \frac{1}{2}(G_r - \gamma_p)E_r + \frac{k}{\tau_L}E_m \cos(\phi_e - \phi_r) \\ &\quad - \frac{1}{\tau_L}[E_t \cos(\phi_t - \phi_r) - E_r], \\ \frac{d\phi_r}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_r - \gamma_i) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_r} \sin(\phi_e - \phi_r) \\ &\quad - \Delta\omega + \frac{1}{\tau_L} \frac{fE_t}{E_r} \sin(\phi_t - \phi_r), \\ \frac{dN_{Br}}{dt} &= \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQ} N_{Br} + \gamma_{QB} N_r, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dN_r}{dt} &= \gamma_{BQ} N_{Br} - (\gamma_{er} + \gamma_{QB}) N_r \\ &\quad - G_r V_p E_r^2, \end{aligned} \quad (2)$$

其中,脚注 t 和 r 分别表示发射系统和接收系统.(1)式中的 E_t 和 ϕ_t 以及(2)式中的 E_r 和 ϕ_r 还须考虑传输信道的影响.非线性模式增益 $G = [(\Gamma g_0 v_g)(1 + E^2/E_s^2)] \times 1/[(N + N_s)(N_{th} + N_s)]$, g_0 是线性增益常数, $\Gamma = V/V_p$ 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 是饱和光场, $N_s = n_s V$ 是光子饱和时的载流子数, n_s 是它的密度, $N_{th} = n_{th} V$ 是有源势阱层激光取得透明时的载流子值, n_{th} 是它的密度. $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 是光子损耗速率, v_g 是激光腔内光子的群速度, α_m 是腔面光子损耗, α_{int} 是腔内光子损耗. $\tau_L = 2n_g L/c$ 是光在激光腔长 L 内的往返时间, c 是真空中光速, $n_g = c/v_g$ 群速度折射率. β_c 是线宽增强因子, η_i 是量子效率, I 是驱动电流, q 是单位电荷. N_B 和 N 表示势垒层和势阱层中的载流子数, γ_{BQ} 和 γ_{QB} 分别是载流子从有源势阱层输送到势垒层和从势垒层输送到有源势阱层的速率指数. $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 是有源势阱层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. $\Delta\omega$ 是 M-LD 和 S-LD 的激光中心频率的频差, 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^[10-13].

由(1)和(2)式得到同步方程

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} E_t - E_r \\ \phi_t - \phi_r \\ N_t - N_r \\ N_{Bt} - N_{Br} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} F_1(E_t, \phi_t, N_t, N_{Bt}, E_r, \phi_r, N_r, N_{Br}) \\ F_2(E_t, \phi_t, N_t, N_{Bt}, E_r, \phi_r, N_r, N_{Br}) \\ F_3(E_t, \phi_t, N_t, N_{Bt}, E_r, \phi_r, N_r, N_{Br}) \\ F_4(E_t, \phi_t, N_t, N_{Bt}, E_r, \phi_r, N_r, N_{Br}) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中函数 F_1, F_2, F_3 和 F_4 的形式可由(1)和(2)式简单给出.如当时间 $t \rightarrow \infty$ 时,绝对值 $|E_t - E_r| \rightarrow 0$, $|\phi_t - \phi_r| \rightarrow 0$, $|N_t - N_r| \rightarrow 0$, $|N_{Bt} - N_{Br}| \rightarrow 0$ 即接收系统和发射系统激光就实现了同步.

2.2. 光纤混沌传输信道

设发射和接收系统的激光混沌波分别在二根光

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, 它们可由非线性薛定谔耦合方程来描述^[14]:

$$\frac{\partial E_l}{\partial z} + \frac{i}{2}\beta_{2l}\frac{\partial^2 E_l}{\partial T_l^2} + \frac{\alpha_l}{2}E_l = i\gamma_l |E_l|^2 E_l, \quad (4)$$

$$\frac{\partial E_r}{\partial \hat{z}} + \frac{i}{2}\beta_{2r}\frac{\partial^2 E_r}{\partial T_r^2} + \frac{\alpha_r}{2}E_r = i\gamma_r |E_r|^2 E_r, \quad (5)$$

其中, $E_l(z, t)$ 和 $E_r(\hat{z}, t)$ 是激光场包络的慢变振幅, z (或 \hat{z}) 是传输距离, T 是随脉冲以群速度 v_g 移动的参考系中的时间量度 ($T_l = t_l - z/v_{gl}$, $T_r = t_r - \hat{z}/v_{gr}$), α 是光纤损耗常数, β_2 是光纤二阶色散常数, γ 是光纤非线性 Kerr 效应常数. 这样由 (3) (4) 和 (5) 式组成光纤混沌双芯双向保密通信系统. 由于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, 并能影响激光混沌同步. 所以选用位移色散单模光纤 (取典型值 $\alpha = 0.2$ dB/km, $\beta_2 = 0$, $\gamma = 1.5 \times 10^{-3}$ W⁻¹m⁻¹) 连接发射和接收系统. 因此光纤中的色散效应显得次要, 非线性效应是主要因素. (4) 和 (5) 式的解是

$$E_l(z, T) = \sqrt{P_0} \exp(-\alpha_l z/2) \exp(i\phi_{lN}), \quad (6)$$

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

其中, P_0 和 P_{i0} 为混沌激光入射到光纤中的功率, ϕ_{lN} 和 ϕ_{rN} 是自相位调制 (SPM) 使传输信号产生的非线性相移, 其中

$$\phi_{lN}(z, T) = \gamma_l z_{\text{eff}} P_{i0}, \quad (8)$$

$$\phi_{rN}(\hat{z}, T) = \gamma_r z_{\text{eff}} P_{i0}, \quad (9)$$

这里

$$z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_l z)]/\alpha_l,$$

$$z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha_r \hat{z})]/\alpha_r$$

是有效距离. (8) 和 (9) 式表明, SPM 使得非线性相移随光强的增大而增大. 可见影响激光混沌同步的主要原因是光纤的损耗和 SPM 产生的非线性相移. SPM 使系统产生的非线性相移的净相位差是

$$\Delta\phi = \phi_{lN} - \phi_{rN} = \gamma_l z_{\text{eff}} P_{i0} - \gamma_r z_{\text{eff}} P_{i0}. \quad (10)$$

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, 所以取 $P_{l0} = P_{r0} = P_0$, 这样净相位差是

$$\Delta\phi = \phi_{lN} - \phi_{rN} = (\gamma_l z_{\text{eff}} - \gamma_r z_{\text{eff}}) P_0. \quad (11)$$

如取相同的光纤参数, $\gamma_l = \gamma_r = \gamma$, $\alpha_l = \alpha_r = \alpha$. 则非线性相移是

$$\phi_{lN}(z, T) = \gamma z_{\text{eff}} P_0, \quad (12)$$

$$\phi_{rN}(\hat{z}, T) = \gamma z_{\text{eff}} P_0. \quad (13)$$

净相位差是

$$\Delta\phi = \phi_{lN} - \phi_{rN} = (z_{\text{eff}} - z_{\text{eff}}) \gamma P_0. \quad (14)$$

如使净相位差 $\Delta\phi = 0$, 将可减少光纤中的 SPM 对同步的负面影响. 由于是耦合反馈同步系统, 同步后, 耦合和反馈将相互抵消, 此时受到负面影响最小, 这也必将要求二传输距离相同. 一般来说, 光纤光缆中各个光纤长度差别是非常小的, 所以 $\Delta\phi = 0$ 的条件是可以假定的. 此时非线性相移是

$$\phi_{lN} = \phi_{rN} = \gamma z_{\text{eff}} P_0, \quad (15)$$

其中 $z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$. 由于 P_0 具有混沌特性, 所以非线性相移仍然具有原来激光混沌特性, 光纤的非线性作用仅是在混沌光的相位上又增加了一个和原来激光混沌 (强度) 特性有关的非线性相移. 如 ϕ_{max} 是系统同步时所准许的最大相位差, 则入射大光纤中的光功率限制是

$$P_0 \leq \frac{\phi_{\text{max}}}{\gamma z_{\text{eff}}}. \quad (16)$$

如双芯性能和长度有所不同, ϕ_{maxN} 是系统所准许的最大相位差, 则入射光纤中的光功率限制是

$$P_0 \leq \frac{\phi_{\text{maxN}}}{\gamma z_{\text{eff}}}, \quad (17)$$

或者

$$P_0 \leq \frac{\phi_{\text{maxN}}}{\gamma z_{\text{eff}}}. \quad (18)$$

为了保证同步, 入射光纤中的光功率限制是由 (15) 和 (16) 式所决定. 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 z 或 \hat{z} 设有一光纤放大器. 总的最大非线性相移是

$$\phi_{lN}(z, T) = n\gamma z_{\text{eff}} P_0, \quad (19)$$

$$\phi_{rN}(\hat{z}, T) = m\gamma z_{\text{eff}} P_0, \quad (20)$$

其中, n 和 m 分别是二根光纤光路中光放大器的个数. 则入射光纤中的激光功率限制是

$$P_0 \leq \frac{\phi_{\text{maxN}}}{n\gamma z_{\text{eff}}}, \quad (21)$$

或者

$$P_0 \leq \frac{\phi_{\text{maxN}}}{m\gamma z_{\text{eff}}}. \quad (22)$$

最大传输距离分别是

$$Z_l = zn \leq \frac{\phi_{\text{maxN}}}{\gamma z_{\text{eff}} P_0}, \quad (23)$$

$$Z_r = \hat{z}m \leq \frac{\phi_{\text{maxN}}}{\gamma z_{\text{eff}} P_0}. \quad (24)$$

如光纤通信光缆中的双芯性能特性和长度差别是非常小的, 可认为双芯性能特性和长度相同且 $n = m$,

则入射光纤中的激光功率限制是

$$P_0 \leq \frac{\phi_{\max N}}{n\gamma z_{\text{eff}}}. \quad (25)$$

传输距离限制是

$$Z = zn = \hat{z}m \leq \frac{\phi_{\max N}}{\gamma z_{\text{eff}} P_0}. \quad (26)$$

如激光器和光纤的耦合系数是 ξ , 入射光功率可表为

$$P_{0, \text{入}} = \frac{\hbar\omega_m V_p E_{0, \text{入}}^2 \xi}{2\tau_L}. \quad (27)$$

2.3. 数值分析

定义绝对值同步误差

$$\Omega = |E_s(t) - E_s(r)|, \quad (28)$$

其中尖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 20—40 ns 且 2000 个值统计平均, 且每相距 100 km 有一光纤放大器. 数值模拟分析时让 E 对 E_s , t 对 ns, N 及 N_B 对 N_{th} 归一化

(所以以下所有图的纵坐标不再出现单位), 并取 $\xi = 0.5$, $f = 0.8$, $k = 0.18$, $E_m = 0.2596 E_s$ 以及表 1 的数值. 由 (27) 式计算出激光器平均输出功率是 2.1 mW, 振幅平均值 $E_0 = 0.129 E_s$. 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 3.1 ns 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 500 km 以后的同步图(注入光纤中的光功率是 0.42 mW), 同步误差在 6.2 ns 以后消失了. 显示出随着传输距离的增加, 系统到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 0.1 GHz 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. 其物理机理是当系统同步后, 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 MQW LD 参量

参量	值	参量	值
腔长 $L/\mu\text{m}$	1200	非辐射复合速率 A_{nr}/s^{-1}	2.5×10^8
有源层宽度 $w/\mu\text{m}$	1.5	辐射复合因子 $B/(\text{cm}^3/\text{s})$	1.0×10^{-10}
有源层厚度 $d/\mu\text{m}$	0.028	俄歇复合因子 $C/(\text{cm}^6/\text{s})$	5.0×10^{-29}
压缩和限制因子 Γ	0.045	线宽增强因子 β_c	3
群速度折射率 n_g	3.6	驱动电流 I/mA	50
腔面光子损耗 α_m/cm^{-1}	11.5	量子效率 η_i	0.8
腔内光子损耗 $\alpha_{\text{int}}/\text{cm}^{-1}$	20	饱和光场 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	1.40153×10^{11}
线性增益常数 g_0/cm^{-1}	2700	有源势阱层到势垒层速率 $\gamma_{BQ}/\text{s}^{-1}$	2.5×10^{10}
饱和时的载流子数密度 n_s/cm^{-3}	0.1×10^{18}	势垒层到有源势阱层速率 $\gamma_{QB}/\text{s}^{-1}$	5.0×10^9
透明时的载流子密度 n_{th}/cm^{-3}	2.1×10^{18}	频差 $\Delta\omega/(\text{rad}/\text{s})$	$4\pi \times 10^9$

3. 光纤混沌双芯双向保密通信

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 S-LD 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_{00} 和 E_{11} 上, 由于 E_{00} 和 E_{11} 的混沌周期轨道是不同的混沌吸引子, 即定义了二进制码“0”和“1”.

接收解调系统中“0”接收机 S-LD 驱动电流设

置为 I_0 和 E_{00} 同步; “1”接收机 S-LD 驱动电流设置为 I_1 和 E_{11} 同步. 在数值模拟中取 $I_0 = 50.3$ mA 和 $I_1 = 50$ mA. 当发射和接收系统同步后, 同步后的混沌信号分别为 E_{00} 和 E_{11} , 通过下式就可以实现信号解调:

$$\begin{aligned} O_0(t) &= E_{00}(t) - E_{00}(t), \\ O_1(t) &= E_{11}(t) - E_{11}(t), \end{aligned} \quad (29)$$

其中 O_0 和 O_1 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 1000 km 处的光纤混沌键控数值模拟结果(注入光纤中的光功率是 1.05 mW). 其中, 图 4(a) 是混沌波 E_{00} 和 E_{11} 被转换发射实时构成的图示, E_{00}

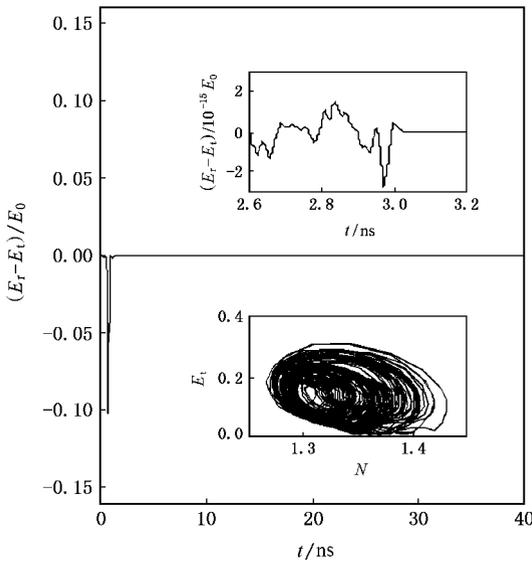


图 2 同步(其中,上插图是同步放大,下插图是混沌吸引子)

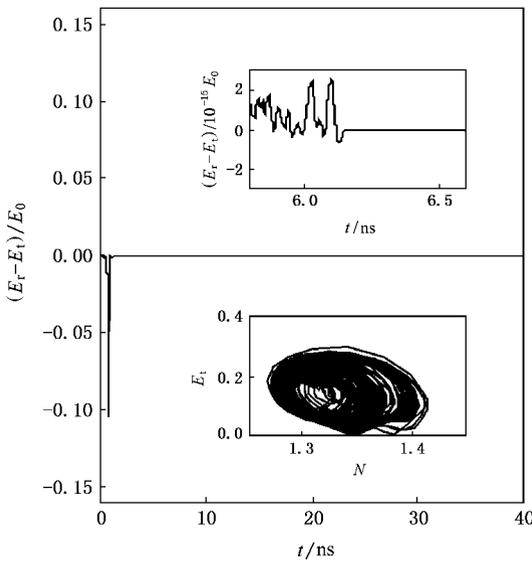


图 3 光纤中的同步(其中,上插图是同步放大,下插图是混沌吸引子,传输距离 500 km)

和 E_{t1} 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(29)式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. 混沌隐藏及带宽

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

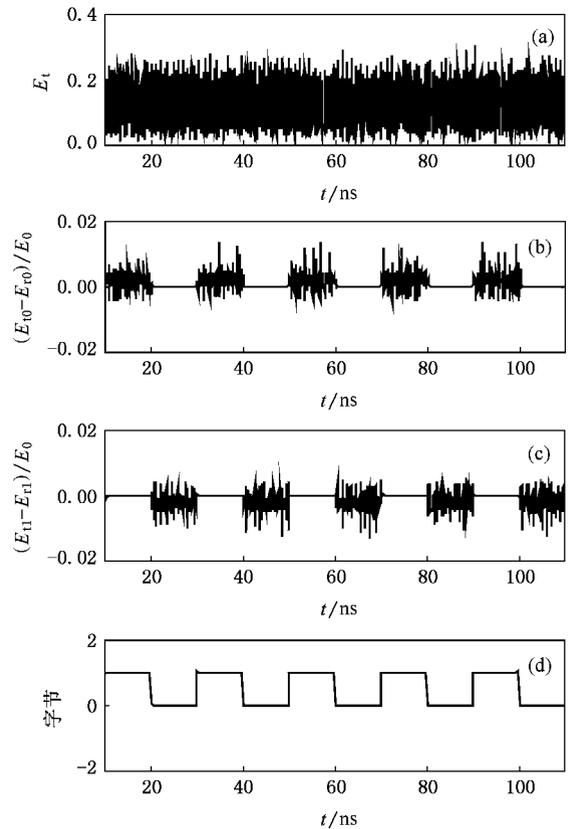


图 4 混沌键控 (a)是混沌波形 (b)是在字节“0”上同步 (c)是在字节“1”上同步 (d)是归一化后的“0”和“1”字节流

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 $s(t) = A \sin(2\pi f_m t)$, $A = 2\% E_0$, $f_m = 0.6 \text{ GHz}$. 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 $s = E_t(t) + s(t) - E_r(t)$. 考虑到光纤光缆实际情况,设二根光纤仅有点微小差别,所以仅设接收信道光纤有均值为零方差 $0.1\% E_0$ 的高斯白噪声,以示二根光纤微小差别. 图 5 是 500 km 处光纤混沌模拟通信调制解调数值模拟结果,其中,图 5(a)是混沌波形图,图 5(b)是信号 $s(t)$ 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、光纤以及噪声干扰了混沌同步,使同步误差增加了,其中信号和同步误差比 $A/\Omega = 9.5$. 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,同步误差随传输距离逐步增加了. 我们还进一步数值模拟了带宽,当

正弦信号具有调制频率 $f_m = 10$ GHz 时, 光纤混沌模拟通信调制解调还是可以实现的.

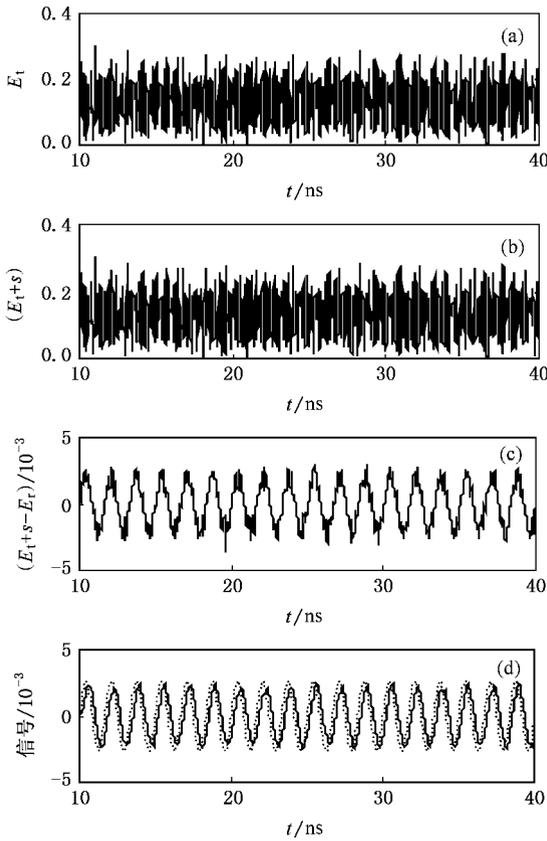


图 5 模拟通信 (a)是混沌波形 (b)是信号隐藏在混沌波中; (c)是解调出来的信号 (d)是滤波后解调出来的信号(其中虚线是原始信号)

表 3 同步误差随传输距离的关系

传输距离/100 km	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Omega/10^{-4}$	1.7	2.0	2.2	2.3	2.4	2.5	2.7	3.0	3.1	3.3	3.6

图 6 是光纤混沌数字信号在 500 km 处调制解调的数值模拟结果, 信号振幅是 $A = 2\% E_0$, 速率是 0.6 Gbit/s, 且设接收信道光纤有均值为零方差 $0.1\% E_0$ 的高斯白噪声. 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. 此时同步误差 $\Omega = 2.9 \times 10^{-4}$, 信号和同步误差比 $A/\Omega = 8.9$. 显然数字通信要比模拟通信同步误差大, 大约增加了 14%, 信号和同步误差比值较模拟通信下降了约 6%. 我们还进行了传输距离 500 km、调制速率 10 Gbit/s 的光纤混沌数字通信的数值模拟, 结果表明在光纤混沌高速数字通信时, 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 10 Gbit/s. 其中在调制速率 10 Gbit/s 时有最小的同步误差, 在调制速率 2.5 Gbit/s 时有最大的同步误差. 其主要原因是, 当信息信号调制速率(变化频率)接近混沌载波变化频率(约 4.2 GHz)时, 两波相互作用较强, 信息信号对混沌同步解调影响较大, 所以解调结果中有较大的同步误差; 当信号调制速率(变化频率)较远离混沌载波频率时, 两波相互作用相对较弱, 信息信号对同步解调影响反而较小, 解调结果就有较小的同步误差.

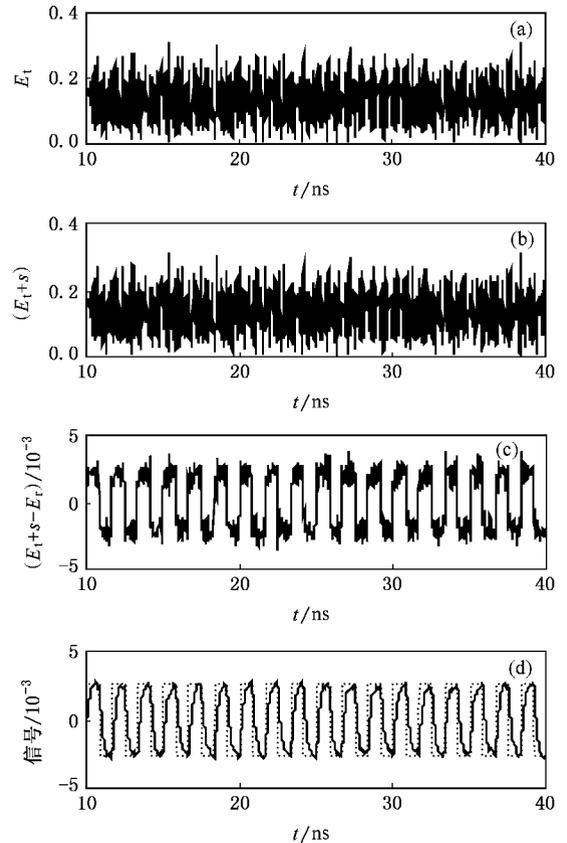


图 6 数字通信 (a)是混沌波形 (b)是信号隐藏在混沌波中; (c)是解调出来的信号 (d)是滤波后解调出来的信号(其中虚线是原始信号)

表 4 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	8	10
$\Omega/10^{-4}$	2.4	2.8	3.1	4.5	4.2	3.1	2.1

4. 结 论

本文提出光纤混沌双芯双向通信系统, 模拟实现了波长 $1.55 \mu\text{m}$ 激光混沌系统在长距离光纤传输中的同步, 证明了光纤的自相位调制是限制激光混

沌在光纤传输中同步的主要原因. 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, 且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芯双向保密通信是可以实现的. 当然, 由于是双芯通信系统, 一次通信要占用二个光通道, 通信效率较低, 但考虑到混沌保密通信是以成功地实现信息保密传递

为主, 不以通信容量大小为主, 而且该系统已具有 Gbit/s 量级, 所以该系统通信速率目前是可以接收的. 同时考虑到当前光纤光缆主要是人工铺设成本, 而对增加一根光纤芯丝的成本来说是微不足道的, 按目前光纤通信系统而言, 该通信系统是可以接受的.

-
- [1] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Colet P , Roy R 1994 *Opt. Lett.* **19** 2056
- [3] Luo L G , Chu P L , Liu H F 2000 *IEEE J. Photon. Tech. Lett.* **12** 269
- [4] Wang F Q , Liu C X 2006 *Chin. Phys.* **15** 1971
- [5] Chen H F , Lin J M 2000 *IEEE J. Quantum Electron.* **36** 27
- [6] Huang X G , Yu P , Huang W 2006 *Chin. Phys.* **15** 2894
- [7] Wu L , Zhu S Q 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [8] Li X F , Pan W , Ma D , Luo B , Zhang W L , Xiong Y 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5094 [in Chinese] 李孝峰、潘 炜、马 冬、罗 斌、张伟利、熊 悦 2006 物理学报 **55** 5094]
- [9] Yan S L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6267 [in Chinese] 颜森林 2006 物理学报 **55** 6267]
- [10] Yan S L , Chi Z Y , Chen W J 2004 *Science in China Ser. F Information Sciences* **47** 332
- [11] Atsushi U , Yun L , Perter D 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 963
- [12] Zhong D Z , Xia G Q , Wang F , Wu Z M 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3279 [in Chinese] 钟东洲、夏光琼、王 飞、吴正茂 2007 物理学报 **56** 3279]
- [13] Troger J , Nicati P A 1999 *IEEE J. Quantum Electron.* **35** 1713
- [14] Agawal G P 1989 *Nonlinear fiber optics.* (San Diego , CA : Academic)

Studies on dual-core-bidirectional optical fiber chaotic secure communication system^{*}

Yan Sen-Lin

(*Department of Physics , Nanjing Xiaozhuang College , Nanjing 210017 , China*)

(Received 22 July 2007 ; revised manuscript received 16 September 2007)

Abstract

A dual-core-bidirectional optical fiber chaotic secure communication system is proposed based on coupling-feedback synchronization of chaotic injected multi-quantum well (MQW) laser systems with fiber channels for optical fiber secure communications. A physical model of the system is built using dual-core optical fiber connecting the transmitter and receiver. Chaotic synchronization was theoretically and numerically studied and we found theoretically that self-phase modulation in the fiber would limit the chaotic synchronization. The nonlinear phase shift , power limit and propagation length are formulated. Chaotic synchronization of two long-distance fibers was numerically achieved , and synchronization time varying with fiber propagation length was numerically analysed. Optical fiber chaotic communications and their synchronization errors were numerically simulated in long-distance dual-core-bidirectional optical fiber chaotic secure communications with an analog signal of modulation frequency 0.6 GHz , a digital signal of modulation rate 0.6 bit/s and a bit rate of 0.05 Gbit/s of chaos keying shift , respectively. The system bandwidth is also numerically analysed. The system has a good security capability of application in dual-core-bidirectional fiber secure communications.

Keywords : chaos , synchronization , optical fiber , secure communications

PACC : 0545 , 4260 , 4265S

^{*} Project supported by the Academic Natural Science Directory Program of the Education Department of Jiangsu Province of China (Grant No. 06KJ140111).