

激光混沌外部调制包络隐藏及相位隐藏编码方法 及其在光纤保密通信中的应用研究

颜森林

(南京晓庄学院物理系 南京 210017)

摘要: 该文研究光纤混沌包络隐藏与光纤相位隐藏保密通信理论模型, 分析包络隐藏调制解调特性, 导出解码公式; 分析光纤自相位调制和光功率以及光放大器个数对系统的影响, 提出接入相位控制器以减小非线性相移对同步解调负面影响的想法。数值模拟了调制速率 0.2Gbit/s 的混沌包络隐藏编码以及调制速率 0.05Gbit/s 的混沌相位隐藏编码及其在波长 1.55 μm 远程光纤数字保密通信中的应用, 表明系统确具有较高的保密性能。

关键词: 光纤通信; 混沌隐藏; 混沌同步; 保密通信

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)07-1591-03

Envelope Making and Phase Encoding via External Modulation and Their Applications to Optical Fiber Secure Communications

Yan Sen-lin

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

Abstract: Theoretical models of envelope making and phase making of optical fiber chaotic secure communication are studied by coupling the chaotic encoding multiple-quantum-well laser systems and an optical fiber channel. Effects of the self-phase modulation of optical fiber and optical amplifier number are analyzed. The modulation and demodulation quality is analyzed and an encoding formula is demonstrated. A phase controller can be used to reduce the effect of nonlinear phase shift of fiber on the synchronization and demodulation. Finally, envelope making with a bit rate of 0.2Gbit/s and phase masking with a bit rate of 0.05Gbit/s are simulated in long-haul optical fiber secure communications at wavelength 1.55 μm . The systems have good secure performances.

Key words: Optical fiber communication; Chaos masking; Chaotic synchronization; Secure communication

1 引言

上世纪 90 年代初, 混沌控制和混沌同步理论得到统一^[1, 2], 混沌同步及其在保密通信中的应用研究有了深入发展^[3-6]。激光混沌系统有大的带宽和低的衰减, 动力学行为变化复杂以及系统对参数具有极高的敏感性, 具有高度的保密性能和抗破译、抗干扰能力等。激光混沌通信受到了人们的极大关注, 提出了多种多样激光混沌通信及编码系统^[3-6]。目前主要有激光内部参数的调制与键控编码, 所以研究激光混沌外部调制及应用是必要的。而通常激光混沌隐藏要有两个光源, 简化调制及应用研究也是非常重要的。本文主要研究波长 1.55 μm 光纤通信系统的混沌保密通信理论等问题。

2 理论模型

2.1 激光混沌包络隐藏同步调制解调系统

光纤多量子阱激光器(MQW LD)混沌同步系统模块组

合如图 1 所示, 其调制发射和接收系统光源由相同的主(M)、副(S)MQW LD 所组成, M-LD 的激光 $E_m \exp(-j\omega_m t)$ 注入可以使 S-LD 激光趋向混沌态^[6]。对于发射系统, S-LD 的激光 $E(t) \exp\{-j[\omega_m t + \varphi(t)]\}$ 发送给调制器, 如调制器是振幅调制器且能对混沌波幅进行调制, s 是调制的信息信号, 则调制后的混沌波形式是 $[E(t) + s(t)] \exp\{-j[\omega_m t + \varphi(t)]\}$ (即实现了激光混沌包络隐藏), 然后通过光纤信道传输到带有反馈回路的接收系统 S-LD 中, 设接收和反馈系数均为 f 。则发射和接收系统的 S-LD 激光可由下面方程组来描述^[4-6]:

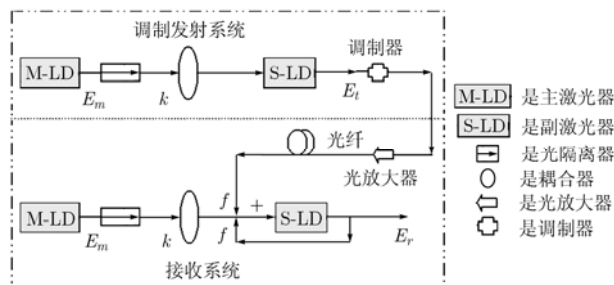


图 1 光纤混沌同步系统模块

2007-01-29 收到, 2007-09-17 改回

江苏省教育厅高校自然科学研究指导性计划项目(06KJD140011)资助课题

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_{t,r}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{t,r} - \gamma)E_{t,r} + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(-\varphi_{t,r}) \\ &\quad + \frac{n_r f}{\tau_L} [(E_t + s) \cos(\varphi_t - \varphi_r) - E_r] \\ \frac{d\varphi_{t,r}}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_{t,r} - \gamma) + \frac{k}{\tau_L} \cdot \frac{E_m}{E_{t,r}} \sin(-\varphi_{t,r}) \\ &\quad + \frac{n_r f}{\tau_L} \frac{(E_t + s)}{E_r} \sin(\varphi_t - \varphi_r) - \Delta\omega \\ \frac{dN_{Bt,r}}{dt} &= \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQ} N_{Bt,r} + \gamma_{QB} N_{t,r} \\ \frac{dN_{t,r}}{dt} &= \gamma_{BQ} N_{Bt,r} - (\gamma_{er} + \gamma_{QB}) N_{t,r} - G_{t,r} V_p E_{t,r}^2 \end{aligned} \right\} (1)$$

其中 N_B 和 N 表示势垒层和势阱层中的载流子数。脚标“ t ”和“ r ”分别表示发射和接收系统，对发射系统 $n_r=0$ ，对接收系统 $n_r=1$ 。 k 是光注入指数，载流子损耗速率和非线性模式增益分别是 $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 及 $G = [(\Gamma g_0 v_g)/(1 + E^2/E_s^2)] \times \lg\{(N + N_s)/(N_{th} + N_s)\}$ ，其相关参量说明以及该激光器其它参量参数详见文献[6]。

混沌隐藏中可把远小于混沌信号的信息信号 s 作为扰动处理(如小于 5%)，且发射和接收系统在同步以后会有相同的不动点，这样一次近似处理同步误差有 $E_t - E_r \approx \delta E_t - \delta E_r = \delta(E_t - E_r) = \delta e(t)$ ，则式(1)一次近似后，得到有信号隐藏时的同步误差方程

$$\begin{aligned} \frac{d^4}{dt^4} \delta e + b_{1s} \frac{d^3}{dt^3} \delta e + b_{2s} \frac{d^2}{dt^2} \delta e + b_{3s} \frac{d}{dt} \delta e + b_{4s} \delta e \\ = A_0 S(t) + A_1 \frac{d}{dt} S(t) + A_2 \frac{d^2}{dt^2} S(t) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $S(t) = -s(t)f/\tau_L$ ， $A_0 = (A_{34}A_{43} - A_{44}A_{33})B_{22}$ ， $A_1 = (A_{33}B_{22} + A_{44}B_{22} + A_{34}A_{43} - A_{33}A_{44})$ ， $A_2 = (B_{11} - B_{22} - A_{33} - 1)$ ，其中， A_{34} ， A_{43} ， A_{44} ， A_{33} ， B_{11} ， B_{22} 以及式(2)中 b_{1s} ， b_{2s} ， b_{3s} ， b_{4s} 等参数形式可详见文献[7,8]。

如有 $s = A_m[\exp(-j\omega t)]$ (其中 ω 是调制角频率， A_m 是调制深度)。考虑到同步误差主要来自于信息信号，可设瞬时同步误差 $\delta e(t) = a[\exp(-j\omega t)]$ 。由式(2)得

$$a(\omega) = \frac{-\omega^2 A_2 - j\omega A_1 + A_0}{\omega^4 - j\omega^3 b_{1s} - \omega^2 b_{2s} - j\omega b_{3s} + b_{4s}} \frac{f}{\tau_L} A_m \quad (3)$$

同步解调结果有

$$s_d(t) = [E_t(t) + s(t) - E_r(t)] \approx [\gamma \exp(-j\varphi) + 1] A_m \exp(-j\omega t) \quad (4)$$

这里， $\varphi = \text{Arg} a$ ， $\gamma = |a|/A_m$ 。可见解调结果和信息信号成正比，但其中还包含了同步误差。

2.2 激光混沌相位隐藏同步调制解调系统

在图 1 中，如调制器是相位调制器，可实时调制通过它的激光相位。调制后的发射光形式有 $E_t(t) \exp\{-j[\omega_m t + \varphi_t(t) + \Omega(t)]\}$ (其中 $\Omega(t)$ 是相位控制器调制后的激光相移)，

即信息 $\Omega(t)$ 隐藏在混沌相位中^[8]。接收系统 S-LD 激光场由下列方程组来描述^[4-6]

$$\left. \begin{aligned} \frac{dE_r}{dt} &= \frac{1}{2}(G_r - \gamma)E_r + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(-\varphi_r) \\ &\quad + \frac{1}{\tau_L} f[E_t \cos(\varphi_t - \varphi_r + \Omega) - E_r] \\ \frac{d\varphi_r}{dt} &= \frac{1}{2}\beta_c(G_r - \gamma) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_r} \sin(-\varphi_r) \\ &\quad + \frac{1}{\tau_L} \frac{fE_t}{E_r} \sin(\varphi_t - \varphi_r + \Omega) - \Delta\omega \end{aligned} \right\} (5)$$

其数字编码方法是：让相位调制器键控调制通过它的光场相位相移分别到 0 或 Ω_1 (Ω_1 为非零以及非 2π 整数倍的任意值)，对应码“0”或码“1”。解码原则是，同步对应于码字“0”，非同步对应于码字“1”。

2.3 光纤传输信道

具有准连续波特点的激光混沌信号在光纤中传输时可由非线性薛定谔方程来描述^[9]：

$$j \frac{\partial E}{\partial z} = -\frac{j}{2} \alpha E + \frac{1}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 E}{\partial T^2} - \gamma_f |E|^2 E \quad (6)$$

其中 $E(z, T)$ 是激光场脉冲慢变包络， 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 ($T = t - z/v_g$)， α 是光纤损耗常数， β_2 是光纤群速度色散常数， γ_f 是光纤非线性 Kerr 效应常数。目前，波长 $1.55\mu\text{m}$ 光纤系统已成为光纤通信主要网络，如选用波长 $1.55\mu\text{m}$ 时色散位移单模光纤(典型值是 $\alpha = 0.2\text{dB/km}$ ， $\gamma_f = 1.5\text{km}^{-1}\text{W}^{-1}$ ， $\beta_2 = 0$) 作为传输信道^[9]，则最大非线性相移是 $\phi_{\max} = \gamma_f P_0 z_{\text{eff}}$ (其中 $z_{\text{eff}} = [1 - \exp(-\alpha z)]/\alpha$ ， P_0 为入射光峰值功率)。如光纤通信系统中每相距一定距离 z 有一线性放大器，总的最大非线性相移为

$$\phi_{\text{NLmax}} = n \gamma_f P_0 z_{\text{eff}} \quad (7)$$

其中 n 是光放大器的个数。光纤混沌通信最大传输距离为

$$L_{\max} = nz \leq \frac{\Delta\phi}{\gamma_f z_{\text{eff}} P_0} \quad (8)$$

其中 $\Delta\phi$ 是系统能够取得同步时的最大相位差。可见，限制同步因子的主要因素是光纤的非线性 Kerr 效应常数、损耗常数以及光功率等。如在接收机前端接入相位控制器对接收到的混沌载波进行 $(2\pi - \phi_{\text{NLmax}})$ 相移控制修正，就可部分抵消光的非线性相移并使对同步的负面影响降到最小。

3 数值模拟结果

耦合方程式(1)和式(6)，可构成光纤混沌包络隐藏通信系统物理模型，耦合方程式(5)和式(6)，可构成光纤混沌相位隐藏通信系统物理模型。模拟中激光器使用文献[6]的参数，其它取归一化物理量是 $f=3.6$ ， $k=0.18$ ， $E_m=0.2529 E_s$ 以及入射光功率是 0.54mW ， $n=5$ ， $z=100\text{km}$ 。图 2 和图 3 是光纤混沌通信数值结果，光纤影响已考虑(为了书写简便，并未在图中有符号表示)。

图 2 是调制速率 0.2Gbit/s 且调制幅值 0.13% E_s 的光纤混沌包络隐藏远程数字通信模拟结果, 其中图 2(a)是包络隐藏信息, 图 2 (b)是同步解码, 有同步误差叠加在解调信号上, 图 2 (c)是滤波。可见, 在不了解系统参数情况下, 混沌包络隐藏确能增加外界破译难度的, 能提高光纤通信信息的安全性能。

图 3 是光纤混沌相位隐藏远程数字通信的数值结果(调制速率是 0.02Gbit/s, 调制幅值是 0.13% E_s 且 $\Omega = \pi$), 其中图 3 (a)是混沌包络变化, 图 3 (b)是信息隐藏在相位中, 图 3 (c)是信息隐藏在混沌波中, 图 3 (d)是相位同步解码(余弦函数值是 1 意味着同步), 图 3(e)是混沌波同步解码, 图 3(f)表示是按解调原则进行的二进制归一化后的信息信号字节流。可见混沌相位隐藏编码也能够增加外界破译难度。

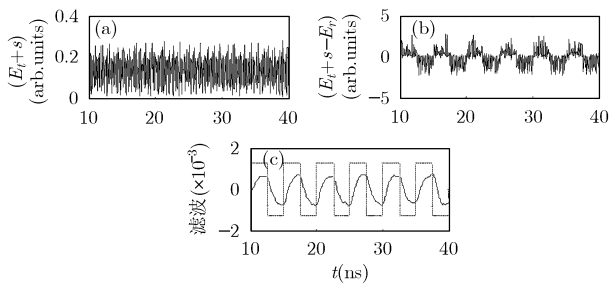


图 2 光纤混沌包络隐藏远程数字通信(图(c)中虚线表示信息信号)

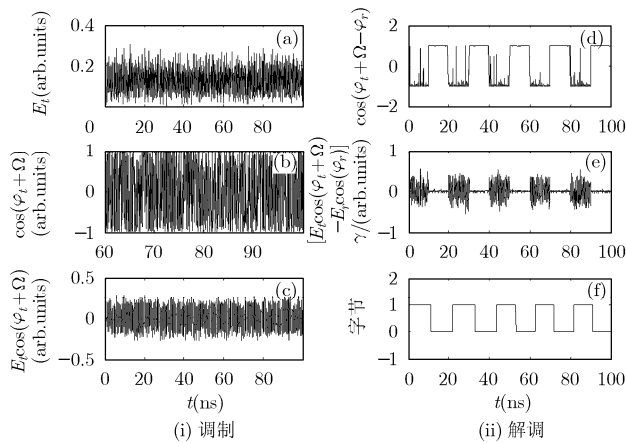


图 3 光纤混沌相位隐藏远程数字通信

4 结束语

本文主要研究光纤多量子阱激光混沌外部调制的保密通信理论模型, 数值实现了波长 1.55 μm 光纤远程混沌包络隐藏以及相位隐藏的编码保密通信。两种混沌编码方法简化了系统, 增强了保密性能, 对光纤保密通研究是有益的。

参考文献

- [1] Pecora L M and Carroll T L. Synchronization in chaotic systems. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64(10): 821-824.
- [2] Colet P and Roy R. Digital communication with synchronization chaotic laser. *Opt. Lett.*, 1994, 19(24): 2056-2058.
- [3] Wu L and Zhu S Q. Communications using multi-mode laser system based chaotic synchronization. *Chin. Phys.*, 2003, 12(3): 300-304.
- [4] Argyris A and Syvridis D. Performance of open-loop all-optical chaotic communication systems under strong injection condition. *J. lightwave Technology*, 2004, 22(5): 1272-1279.
- [5] Buldú J M, G -Ojalvo J, and Torrent M C. Demultiplexing chaos from multimode semiconductor laser. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2005, 41(2): 164-170.
- [6] Yan Senlin. All-optical chaotic MQW laser repeater for long-haul chaotic communications. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, 3(5): 283-286.
- [7] 颜森林.高速多量子阱激光器混沌保密通信系统研究[J].光学学报, 2005, 25(2): 180-185.
Yan Sen-lin. High rate chaos secure communication system of multiple-quantum-well lasers. *J. Acta Optica Sinica*, 2005, 25(2): 180-185.
- [8] 颜森林.量子阱激光器混沌相位控制同步以及编码研究[J].物理学报, 2005, 54(3): 1098-1104.
Yan Sen-lin. Studies on chaotic multiple-quantum-well laser synchronization via controlling phase and its application in secure communication using external chaos phase shift keying modulation. *J. Acta Physical Sinica*, 2005, 54(3): 1098-1104.
- [9] Agrawal G P. *Nonlinear Fiber Optics*. San Diego, CA: Academic. 1989: 37-55.

颜森林: 男, 1962 年生, 博士, 副教授, 主要研究方向为光纤通信系统与技术、激光混沌通信、非线性光学等。