

文章编号: 0253-2239(2005)02-179-7

高速多量子阱激光器混沌保密通信系统研究

颜森林

(南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

摘要: 研究了外部光注入高速多量子阱激光器激光混沌全光保密通信系统, 导出系统同步方程, 理论证明并数值实现了系统的同步, 分析了增加反馈系数以缩短同步时间且增强系统同步稳定性的方法。研究分析了多量子阱激光器混沌隐藏和混沌键控保密通信全光调制解调系统模型, 数值模拟了具有正弦调制信号的调制频率0.2 GHz混沌模拟保密通信和数字信号调制速率20 Gb/s的混沌数字保密通信以及调制速率0.05 Gb/s混沌键控保密通信的应用, 系统确实具有较高的保密性能和反破译能力; 分析了混沌数字信号保密通信调制带宽20 Gb/s调制解调时的同步误差以及混沌键控调制速率, 系统都具有非常好的调制解调特性, 且在高速混沌通信中, 系统解调具有相对较小的同步误差, 而1 Gb/s是混沌键控通信的速率上限。

关键词: 光通信; 混沌; 保密; 多量子阱激光器; 同步

中图分类号: O415.5 文献标识码: A

High Rate Chaos Secure Communication System of Multiple-Quantum-Well Lasers

Yan Senlin

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

Abstract: A high rate all-optical secure communication scheme of chaotic multiple-quantum-well lasers from external injection light is studied. The system synchronization equation is derived. Synchronization is theoretically demonstrated and numerically achieved. Synchronization time is shortened and synchronization stability is boosted with the feedback coefficient increasing in numerical simulations. Models of all-light chaos masking and chaos shift keying modulation-demodulation with multiple-quantum-well lasers are investigated for secure communications, respectively. Chaos analog secure communication with a sinusoidal signal of 0.2 GHz modulation frequency, chaos digital secure communication with a digital signal of 20 Gb/s modulation rate and chaos shift keying secure communication with the modulation rate 0.05 Gb/s are numerically simulated, respectively. It is found that the system shows a good ability of robust and anti-code-breaking. Synchronous error is numerically calculated in chaos digital communications with the modulation bandwidth of 20 Gb/s in the modulation-demodulation processes and the modulation rate characterization is analyzed to conclude that lower synchronous error under high bit rate and the maximum bit rate limit of 1 Gb/s in chaos shift keying communication.

Key words: optical communications; chaos; secure; multiple-quantum-well laser; synchronization

1 引 言

最近十几年,混沌系统在保密通信中的应用得到了广泛重视,各种各样的混沌系统被提出并被证明^[1~3]。首先是电路系统混沌在无线电保密通信中的应用,然后是半导体激光器混沌系统在光学保密通信的发展^[4~6]。由于全光激光混沌系统有更大的带宽和低的衰减,且动力学系统比较复杂以及系统

对参量具有极高的敏感性,并有更高的保密性能,因而,非常适合高速远程保密通信^[5~8]。文献[4~10]基于“驱动-响应”同步的思想方法,已分别提出了半导体激光器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、光纤激光器同步通信系统以及激光混沌多信道通信系统等多种系统。

作者简介: 颜森林(1962~),男,江苏人,博士后,副教授,现主要从事光纤保密、光电子器件、光学混沌等方面的研究工作。E-mail: senlinyan@163.com。

收稿日期: 2004-03-24; 收到修改稿日期: 2004-07-12

本文提出外部光注入单模多量子阱激光二极管(Multiple quantum well laser diode, MQW-LD)^[11~13]激光混沌四维激光混沌同步系统,并给出同步模型与该同步系统在混沌保密通信中应用的调制解调系统的构造以及数值分析和模拟结果。

2 模 型

基于“驱动-响应”串级思想构造的全光激光混沌同步系统中,发射和接收系统由相同的主(M)、副(S)多量子阱激光二极管所组成,其同步模块组合如图1所示。

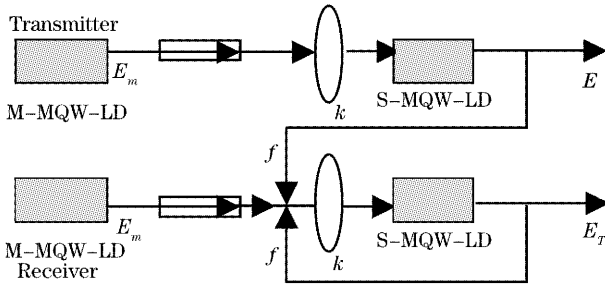


图1 同步模块。M-MQW-LD是主激光器,S-MQW-LD是副激光器,☐是光隔离器

Fig.1 Synchronization block. M-MQW-LD: Master laser, S-MQW-LD: slave laser, ☐: optical isolator

主多量子阱激光二极管的激光 $E_m \exp[-j(\omega_m t + \phi_m)]$ 注入可使副多量子阱激光二极管激光趋向混沌态^[9~13]。对发射系统,副多量子阱激光二极管的激光 $E(t) \exp\{-j[\omega_m t + \phi(t)]\}$ 发射注入到带有反馈回路的接收系统副多量子阱激光二极管中。让接收和反馈系数均取为 f 。如 N_B 和 N 分别表示势垒层和有源势阱层的载流子数。那么发射系统的副多量子阱激光二极管激光可由下面方程组来描述^[9~13]:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1}{2}(G - \gamma)E + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(-\varphi), \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\Delta\omega + \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E} \sin(-\varphi), \quad (2)$$

$$\frac{dN_B}{dt} = \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQ} N_B + \gamma_{QB} N, \quad (3)$$

$$\frac{dN}{dt} = \gamma_{BQ} N_B - (\gamma_e + \gamma_{QB})N - G V_p E^2, \quad (4)$$

其中 $\varphi = -(\phi_m - \phi)$, $\Delta\omega$ 是主多量子阱激光二极管和副多量子阱激光二极管的激光中心频率的频差; $\gamma = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 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; β_c 是线宽增强因子; $\tau_L = 2n_g L/c$ 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; k 是光注入指数; η_i 是量子效率, I 是驱动电流, q 是单位电荷。 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; $\gamma_c = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 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; 非线性模式增益 $G = \frac{\Gamma g_0 v_g}{1 + E^2/E_s^2} \lg\left(\frac{N + N_s}{N_{t0} + N_s}\right)$, 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, $N_{t0} = n_{t0} V$ 是有源势阱层激光为取得透明所需要的载流子值, n_{t0} 是它的密度。接收系统的副多量子阱激光二极管激光可由下列方程组来描述:

$$\frac{dE_r}{dt} = \frac{1}{2}(G_r - \gamma)E_r + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(-\varphi_r) + \frac{k}{\tau_L} f[E \cos(\varphi - \varphi_r) - E_r], \quad (5)$$

$$\frac{d\varphi_r}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_r - \gamma) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_r} \sin(-\varphi_r) + \frac{k}{\tau_L} \frac{fE}{E_r} \sin(\varphi - \varphi_r) - \Delta\omega, \quad (6)$$

$$\frac{dE_{Br}}{dt} = \eta_i \frac{I}{q} - \gamma_{BQr} N_{Br} + \gamma_{QB} N_r, \quad (7)$$

$$\frac{dN_r}{dt} = \gamma_{BQ} N_{Br} - (\gamma_{cr} + \gamma_{QB})N_r - G_r V_p E_r^2, \quad (8)$$

其中角标 r 表示接收系统。选择适当的参量,可使时间 $t \rightarrow \infty$ 时,绝对值 $|E - E_r| \rightarrow 0$, $|\varphi - \varphi_r| \rightarrow 0$, $|N - N_r| \rightarrow 0$, $|N_B - N_{Br}| \rightarrow 0$ 。即接收系统和发射系统激光实现了同步。

2.1 同步方程

现将(1)式~(4)式减去(5)式~(8)式,得到同步方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} (E - E_r) \\ (\varphi - \varphi_r) \\ (N_B - N_{Br}) \\ (N - N_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(E, \varphi, N_B, N, E_r, \varphi_r, N_{Br}, N_r) \\ F_2(E, \varphi, N_B, N, E_r, \varphi_r, N_{Br}, N_r) \\ F_3(E, \varphi, N_B, N, E_r, \varphi_r, N_{Br}, N_r) \\ F_4(E, \varphi, N_B, N, E_r, \varphi_r, N_{Br}, N_r) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

其中函数 F_1, F_2, F_3 和 F_4 的形式可由(1)式~(8)式简单给出。混沌保密通信的基本要求是接收系统和发射系统要取相同的参量,所以(1)式~(4)式和(5)式~(8)式有相同的不动点,即 $E_0 = E_{r0}$,

$\varphi_0 = \varphi_{r0}$, $N_{B0} = N_{Br0}$, $N_0 = N_{r0}$ 并有 $G_0 = G_{r0}$ 和
 $\gamma_{e0} = \gamma_{er0}$ 。对接收系统(也同样对发射系统),令

$$N_{Br}(t) = E_{Br} + \delta E_{Br}(t),$$

$$N_r(t) = N_{r0} + \delta N_r(t),$$

$$E_r(t) = E_{r0} + \delta E_r(t),$$

则有

$$\varphi_r(t) = \varphi_{r0} + \delta \varphi_r(t),$$

$$G_r(N_{r0} + \delta N_r, E_{r0} + \delta E_r) \approx G_{r0}(N_{r0}, E_{r0}) + G_{rN_r} \delta N_r + G_{rE_r} \delta E_r,$$

$$\gamma_{er}(N_{r0} + \delta N_r) \approx \gamma_{er0}(N_{r0}) + \gamma_{erN_r} \delta N_r,$$

其中

$$G_{rE_r} = \left. \frac{\partial G_r}{\partial E_r} \right|_{N_r=N_0, E_r=E_0} = (\Gamma g_0 v_g) \frac{-2E_r/E_s^2}{(1+E_0^2/E_s^2)^2} \log \frac{N_0 + N_s}{N_{th} + N_s} = G_E,$$

$$G_{rN_r} = \left. \frac{\partial G_r}{\partial N_r} \right|_{N_r=N_0, E_r=E_0} = (\Gamma g_0 v_g) \frac{1}{(1+E_0^2/E_s^2)^2} \frac{N_{th} + N_s}{N_0 + N_s} = G_N,$$

$$\gamma_{erN_r} = \left. \frac{\partial \gamma_r}{\partial N_r} \right|_{N_r=N_0} = \frac{B}{V} + 2C \frac{N_0}{V^2} = \gamma_{eN}.$$

由同步方程(9),得到一次近似下的同步误差方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \delta(E - E_r) \\ \delta(\varphi - \varphi_r) \\ \delta(N_B - E_{Br}) \\ \delta(N - N_r) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & B_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(E - E_r) \\ \delta(\varphi - \varphi_r) \\ \delta(N_B - E_{Br}) \\ \delta(N - N_r) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其中

$$A_{11} = \frac{1}{2}(G_0 - \gamma + E_0 G_E), \quad A_{21} = \frac{1}{2}\beta_c G_E - \frac{\rho_m}{E_0^2} \sin(-\varphi_0),$$

$$A_{12} = \rho_m \sin(-\varphi_0), \quad A_{22} = -\frac{\rho_m}{E_0} \cos(-\varphi_0),$$

$$A_{13} = 0, \quad A_{23} = 0,$$

$$A_{14} = \frac{1}{2}E_0 G_N, \quad A_{24} = \frac{1}{2}\beta_c G_N,$$

$$A_{31} = 0, \quad A_{41} = -2G_0 V_p E_0 - V_p E_0^2 G_E,$$

$$A_{32} = 0, \quad A_{42} = 0,$$

$$A_{33} = -\gamma_{BQ}, \quad A_{43} = \gamma_{BQ},$$

$$A_{34} = \gamma_{QB}, \quad A_{44} = -\gamma_{e0} - \gamma_{QB} - N_0 \gamma_{eN} - V_p E_0^2 G_N,$$

$$B_{11} = A_{11} - \rho_k, \quad B_{22} = A_{22} - \rho_k,$$

$$\rho_k = kf/\tau_L, \quad \rho_m = kE_m/\tau_L,$$

设(10)式的本征值为 χ , 其本征值方程为

$$\begin{vmatrix} B_{11} - \chi & A_{12} & 0 & A_{14} \\ A_{21} & B_{22} - \chi & 0 & A_{24} \\ 0 & 0 & A_{33} - \chi & A_{34} \\ A_{41} & 0 & A_{43} & A_{44} - \chi \end{vmatrix} = 0, \quad (11)$$

或

$$\chi^4 + \chi^3 b_{s1} + \chi^2 b_{s2} + \chi b_{s3} + b_{s4} = 0, \quad (12)$$

其中

$$b_{s1} = -(B_{11} + B_{32} + A_{33} + A_{44}),$$

$$b_{s2} = (B_{11}A_{44} - A_{12}A_{21} - A_{34}A_{43} + B_{22}A_{33} + A_{33}A_{44} + B_{11}B_{23} + B_{22}A_{44} + B_{11}A_{33} - A_{41}A_{14}),$$

$$b_{s3} = (A_{21}A_{12}A_{33} + A_{21}A_{12}A_{44} - B_{11}B_{22}A_{44} - B_{11}A_{33}A_{44} + B_{11}A_{34}A_{43} - B_{22}A_{32}A_{44} + B_{22}A_{34}A_{43} +$$

$$A_{41}A_{14}A_{33} - A_{41}A_{12}A_{41} + A_{41}B_{22}A_{14} - B_{11}B_{22}A_{33}),$$

$$b_{s4} = (B_{11}B_{22}A_{33}A_{44} - B_{11}B_{22}A_{34}A_{43} - A_{21}A_{12}A_{33}A_{44} + A_{21}A_{12}A_{34}A_{43} - A_{41}A_{12}A_{24}A_{33} - A_{41}B_{22}A_{14}A_{33}),$$

如果 $b_{s1} > 0, b_{s4} > 0, b_{s1} \times b_{s2} > 0$, 则方程本征值的所有根均有负实部, 其不动点(零点)是渐近稳定的。这就意味着发射系统和接收系统实现了同步。

2.2 数值分析

数值分析时让 E 对 E_s, t 对 n_s, N 与 N_B 分别对 N_0 归一化, 系统参量取表 1 的数值^[9~13]。

表 1 多量子阱激光二极管参量
Table 1 MQW-LD parameter

Parameter	Value
Cavity length $L / \mu\text{m}$	1200
Active region width $w / \mu\text{m}$	1.5
Active region thickness $d / \mu\text{m}$	0.028
Mode coefficient Γ	0.045
Refractive ratio of group speed n_g	3.6
Cavity photon loss $\alpha_m / \text{cm}^{-1}$	11.5
Internal photon loss $\alpha_{\text{int}} / \text{cm}^{-1}$	20
Gain constant g_0 / cm^{-1}	2700
Carrier density at saturation n_s / cm^{-3}	0.1×10^{18}
Carrier density at transparency n_0 / cm^{-3}	2.1×10^{18}
Nonradiative recombination rate $A_{\text{nr}} / \text{s}^{-1}$	2.5×10^8
Radiative recombination coefficient $B / (\text{cm}^3 / \text{s})$	1.0×10^{-10}
Auger recombination coefficient $C / (\text{cm}^6 / \text{s})$	5.0×10^{-29}
Linewidth enhancement factor β	3
Drive current I / mA	50
Internal quantum efficiency η_i	0.8
Photon number at saturation P_s	2.2×10^7
Rate of carriers to the SCH layer $\gamma_{\text{BQ}} / \text{s}^{-1}$	2.5×10^{10}
Rate of carriers to active region $\gamma_{\text{QB}} / \text{s}^{-1}$	5.0×10^9
Frequency detuning $(\Delta\omega/2\pi) / \text{GHz}$	2×10^9

2.2.1 不动点的数值计算

主激光器驱动电流 100 mA 时, 输出的激光光场平均幅值是 $E_m = 0.2529$, 且取初相位 $\phi_m = 0$, 光注入指数 $k = 0.18$ 时^[11], 由(1)式~(8)式, 解出不动点 $(E_0, \varphi_0, N_{B0}, N_0)$ 和 $(E_{r0}, \varphi_{r0}, N_{B_{r0}}, N_{r0})$ 均是 $(0.1453, 4.6601, 0.3582, 1.3191)$ 。即, $E_0 = E_{r0}, \varphi_0 = \varphi_{r0}, N_{B0} = N_{B_{r0}}, N_0 = N_{r0}$ 。即取相同的参量时, 发射机和接收机的副多量子阱激光二极管确有相同的不动点。

2.2.2 同步的数值分析

当参量取 $E_m = 0.2529, \phi_m = 0, k = 0.18$ 时:

i) 当 $f = 2$ 时, $b_{s1} = 64.5798 > 0, b_{s2} = 2.5307 \times 10^3 > 0, b_{s3} = 8.1499 \times 10^4 > 0, b_{s4} = 1.0251 \times 10^6 > 0, b_{s1} \times b_{s2} - b_{s3} = 8.1980 \times 10^4 > 0$, 本征值 χ 为

$(-3.7825 \pm 36.2240j, -34.8727, -22.1600)$, 同步误差方程(10)的零点解是全局稳定的, 即发射机和接收机的副多量子阱激光二极管是同步的, 其同步如图 2 所示, 其中图 2(a) 是发射机和接收机的副多量子阱激光二极管激光场的波形, 大约 3 ns 后, 两个波变化就非常相同了, 图 2(b) 是典型的激光混沌吸引子, 图 2(c) 是同步误差, 约 3 ns 后, 同步出现, 图 2(d) 是同步误差的放大, 约 11.5 ns 后, 同步误差已趋于零值。

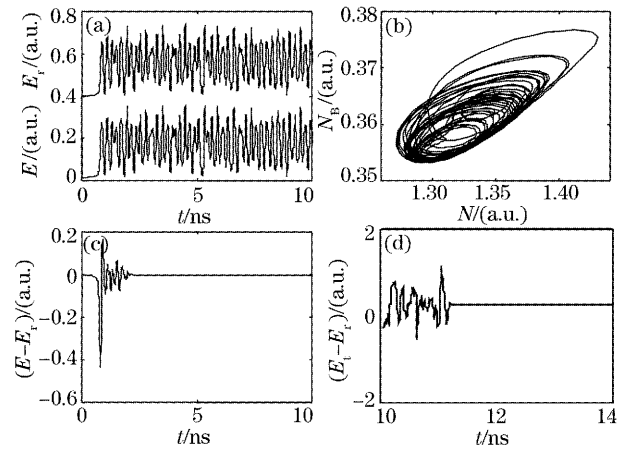


图 2 同步。(a) 是混沌波, 图的上部是所发射的波形, 下部是接收机的波形, 它已向上平移了 0.4, (b) 是混沌吸引子, (c) 是同步, (d) 是同步的放大

Fig. 2 Synchronization. Chaos waves for (a) where the lower is the transmitted waveform and the upper is the receiver's waveform, the latter has been moved up 0.4, chaos attractor for (b), synchronization for (c), zoomed synchronization for (d)

ii) 当 $f = 4$ 时, $b_{s1} = 89.5978 > 0, b_{s2} = 3.9356 \times 10^3 > 0, b_{s3} = 1.1401 \times 10^5 > 0, b_{s4} = 1.3633 \times 10^6 > 0, b_{s1} \times b_{s2} - b_{s3} = 8.1980 \times 10^4 > 0$, 本征值 χ 为 $(-11.9385 \pm 35.0986j, -42.2353, -23.4854)$, 即同步。

iii) 当 $f = 20$ 时, $b_{s1} = 289.5978 > 0, b_{s2} = 2.6424 \times 10^4 > 0, b_{s3} = 7.7114 \times 10^5 > 0, b_{s4} = 5.5572 \times 10^6 > 0, b_{s1} \times b_{s2} - b_{s3} = 6.8813 \times 10^6 > 0$, 本征值 χ 为 $(-122.02 \pm 6.78j, -10.67, -34.89)$, 即同步。

由于本征值 χ 中的复数本征值能反映同步振荡和稳定特性, 用复数 $-\alpha \pm \beta j$ 表示复数本征值, 其中 α 表示衰减系数, β 表示张弛振荡频率, 即 α 反映同步的稳定性, β 反映同步的张弛振荡特性。这里给出了 χ 中的复数本征值 $-\alpha \pm \beta j$ 与 f 的关系图 3。显

然,随着系数 f 值增加,同步的张弛振荡频率下降了,同步衰减系数变大了,即随着系数 f 值增加,同步时间变短了,同步的稳定性就越好。

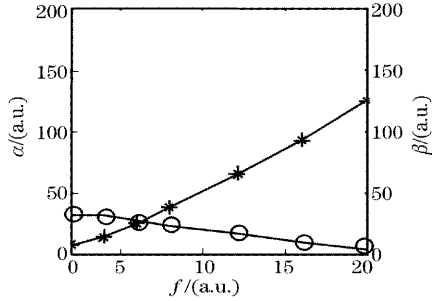


图 3 $\chi(-\alpha \pm \beta)$ 和 f 的关系。其中“*”和“o”分别表示 α 和 β 的值

Fig. 3 A relationship between $\chi(-\alpha \pm \beta)$ and f . Where “*” for α and “o” for β

3 调制解调

下面利用混沌隐藏和混沌键控技术^[5~10],构造了两组混沌调制发射和解调接收系统。现定义同步误差和瞬时同步误差:

$$\Delta = \langle |E(t) - E_r(t)| \rangle, \quad (13)$$

$$e(t) = E(t) - E_r(t), \quad (14)$$

其中尖括号表示平均值。

3.1 混沌隐藏

混沌隐藏的收、发同步模块系统其基本结构与图 1 很相似。发送信号 $s(t)$ 直接加到混沌信号波中调制信息,和混沌信号一起被发射,就构成了混沌隐藏发射系统。数值模拟时,用正弦信号调制信息,取调制信息信号为 $s(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$, 这里, $A = 0.01E_0$, $f_0 = 0.2$ GHz。则调制后的发射载波混沌信号为 $E(t) + s(t)$ 。事实上,在保密通信中, A/E_0 的比值应尽可能的小,这样信息隐藏更加有效。

数值模拟结果得到图 4,其中,图 4(a)是信息信号 $s(t)$ 的波形,图 4(b)是混沌波,图 4(c)是信号成功地隐藏在混沌波中,从图 4(b)和图 4(c)中可见,混沌波形和载有信号的混沌波形的变化非常相似,显然,这样实时地从混沌波形上分离信息是非常困难的。如果不了解系统的参量,几乎是不可能从混沌波形上分离出信息的。

当接收系统和发射系统达到混沌同步后,即可解调信息。图 4(d)是解调出来的信息 $s(t) = [E(t) + s(t) - E_r(t)] = s(t) + e(t) \approx s(t)$ 的波形图。解调出来的信息 $s(t)$ 波明显叠加着同步误差 $e(t)$ 所产生的杂波,其原因是信号 $s(t)$ 干扰了激光的混沌

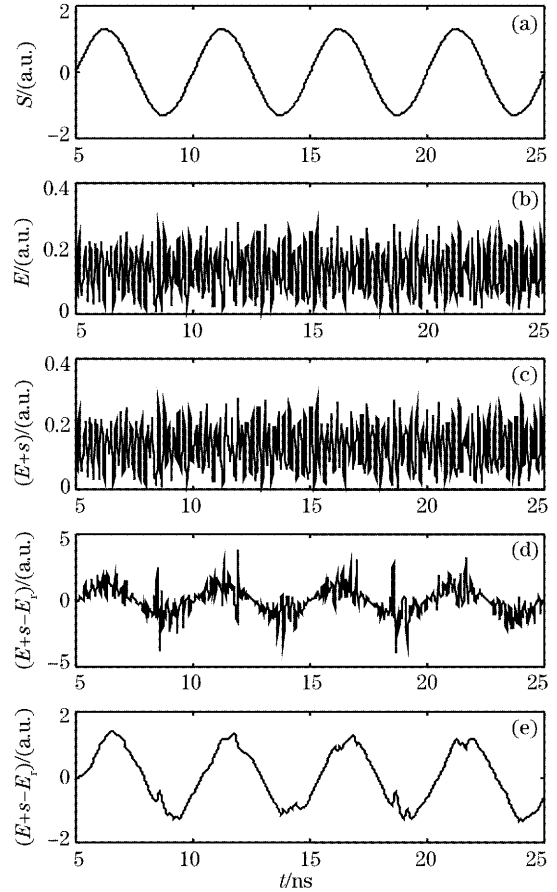


图 4 混沌模拟通信。(a)是信号,(b)是混沌波形,(c)混沌对信号的屏蔽,(d)是解码,(e)是滤波

Fig. 4 Chaos analog communication. Where the signal for (a) chaos waveform for (b), chaos wave masking the signal for (c), decoding for (d), filtering for (e)

同步,使同步误差增加了。其中 $e(t)$ 变化范围大约在 $(-5 \sim 5) \times 10^{-4}$, $\Delta = 4.7 \times 10^{-4}$, 信号和同步误差比 $A/\Delta \approx 30$ 。应用低通数字滤波器对解调信息 $s(t)$ 进行滤波后,重构的信号就非常完美了,比较图 4(e)和图 4(a)可以发现这一特点。

下面又进一步数值模拟了混沌数字信号调制解调的特点过程。如数字信号 $s(t)$ 幅值是 $A = 0.01E_0$, 调制速率是 20 Gb/s, 其结果如图 5 所示,其中图 5(a)是信息信号波形,图 5(b)和图 5(c)是混沌波形和载有数字信号的混沌波形,图 5(d)是通过相减解调出来的信息波形,其中 $e(t)$ 变化范围大约在 $(-3 \sim 3) \times 10^{-4}$, $\Delta = 2.7 \times 10^{-4}$, 信号和同步误差比 $A/\Delta \approx 54$, 图 5(e)是信号和解码信号的进一步比较,信号解调的确是非常好的。

表 2 给出了数字信号调制解调时的调制速率和同步误差的数值关系。可见在高速混沌通信中,系统解调具有较小的同步误差。

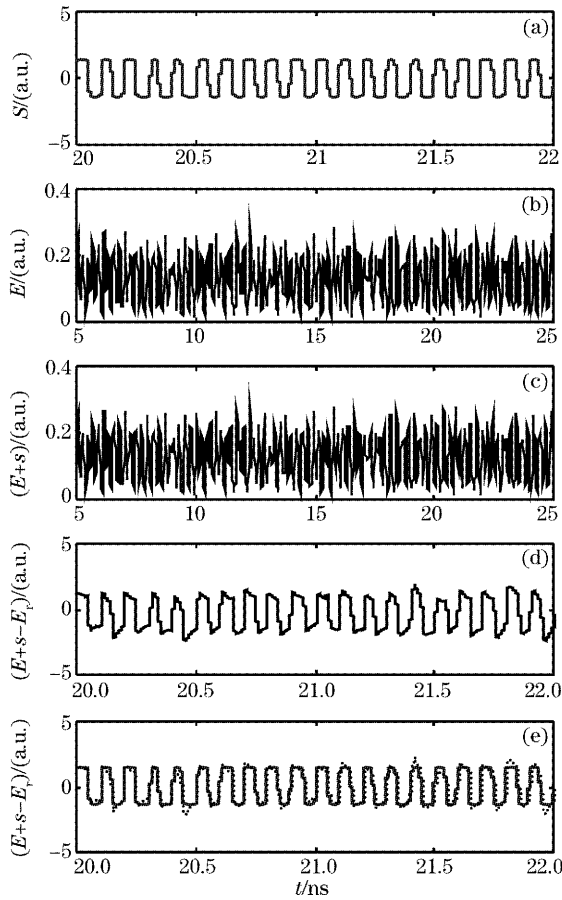


图 5 混沌数字通信。(a)是信号,(b)是混沌波形,(c)混沌对信号的屏蔽,(d)是解码,(e)是信号和解调出来的码的比较,其中点线表示解调出来的码

Fig. 5 Chaos digital communication. Where the signal for (a), chaos waveform for (b), chaos wave masking the signal for (c), decoding for (d), the signal and the decoded signal for (e) where the dashed line is the decoded signal

表 2 数字信号调制时的调制速率和同步误差的关系

Table 2 A relationship between bit rate and synchronous error under the digital signal modulation

Bit rate /(Gb/s)	$\Delta / 10^{-4}$	Bit rate /(Gb/s)	$\Delta / 10^{-4}$
20	2.7	1	10.9
15	4.2	0.6	8.8
10	6.5	0.4	7.1
4	8.7	0.2	6.8
2	9.5	0.1	5.8

3.2 混沌键控

混沌键控发射和接收系统的模块组合如图 6 所示,发射系统副多量子阱激光二极管的驱动电流以键控形式分别调制到 I_0 和 I_1 ,使副多量子阱激光二极管激光变化到不同的混沌周期轨道 E_0 和 E_1 上,这样也就定义了二进制码“0”和“1”。接收解调系统

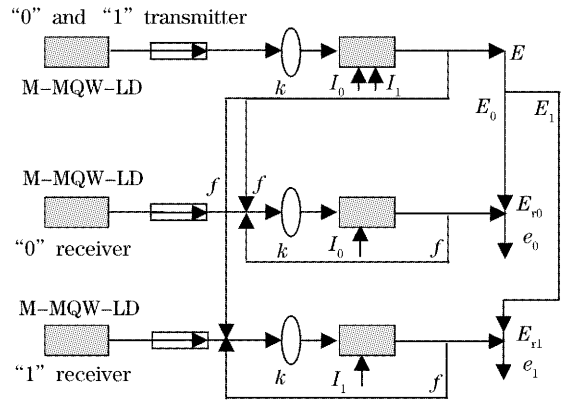


图 6 混沌键控模块。其中,上部表示“0”和“1”发射系统,中部和下部分别表示“0”和“1”接收系统。

I_0 和 I_1 表示驱动电流

Fig. 6 Chaos shift keying block. Where the upper for “0” and “1” the transmitter, the middle and the lower for “0” and “1” the receivers, respectively. I_0 and I_1 are the driving currents

是发射系统的复制且并列组成,“0”接收机的副多量子阱激光二极管驱动电流是 I_0 且接收 E_0 的混沌信息,“1”接收机的副多量子阱激光二极管驱动电流是 I_1 且接收 E_1 的混沌信息。数值模拟中分别取 $I_0 = 50 \text{ mA}$ 和 $I_1 = 50.25 \text{ mA}$ 。 I_0 和 I_1 数值微小差别的目的,是调节混沌吸引子周期轨道。当发射系统和接收解调系统同步后,同步混沌信号分别为 E_{r0} 和 E_{r1} ,取 $e_0(t) = E_0(t) - E_{r0}(t)$ 和 $e_1(t) = E_1(t) -$

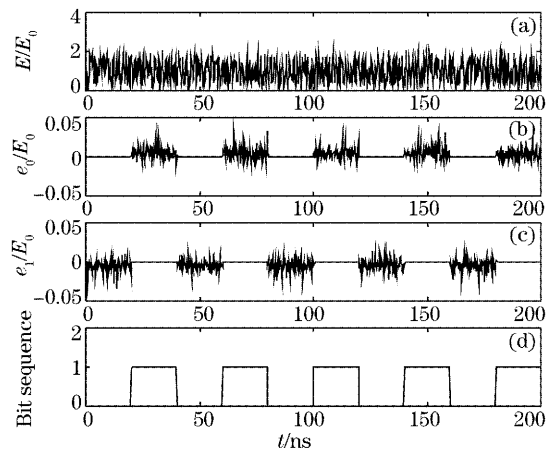


图 7 混沌键控通信。(a)表示信号“0”和“1”,(b)表示在字节“0”上同步,(c)表示在字节“1”上同步,(d)表示“0”和“1”的数字信号流

Fig. 7 Chaos shift keying communication. Where chaos waves of signal “0” and “1” for (a), synchronization at bit “0” for (b), synchronization at bit “1” for (c), digital signal sequences “0” and “1” for (d)

$E_{r1}(t)$ 。那么, e_0 和 e_1 分别就是解调出来的二进制码“0”和“1”。当“ e_0 ”或“ e_1 ”归零后, 数字信号接收和解调也就实现了。图 7 是混沌键控转换发射接收解调的数值模拟结果。其中图 7(a)是信号 E_0 和 E_1 的混沌波被转换发射实时构成的图示, 图 7(b)是在字节“0”上同步, 图 7(c)是在字节“1”上同步, 图 7(d)是混沌信号分离解调并归一化后按二进制码“0”和“1”实时构成的数据信号信息流。为了研究混沌键控通信速率, 这里还特别分析了码字同步时间。研究表明在时间 40 ns 和 80 ns 的“0”码字上的同步时间大约是 0.4 ns 和 0.6 ns, 在时间 60 ns 和 100 ns 的“1”码字上的同步时间大约是 0.8 ns 和 0.7 ns。这就意味着混沌键控通信的速率有可能达到 1 Gb/s, 这也就是量子阱激光器混沌键控通信速率的上限。

4 结 论

本文提出外部光注入多量子阱激光二极管激光混沌四维同步系统, 理论和数值证明了系统同步, 数值模拟了该同步系统在保密通信中的应用, 该系统确有很强的保密性能和反破译能力, 适用于大带宽、高速率保密通信的要求。

参 考 文 献

- Zhang Jiyue, Li Guangting, Zhang Zijia. Instabilities and chaos in laser system[J]. *Chin. J. Lasers*, 1994, **A21**(7): 540~544 (in Chinese)
张纪岳, 李广庭, 张自嘉. 激光混沌系统的不稳定性及混沌[J]. *中国激光*, 1994, **A21**(7): 540~544
- Zhuang Jun, Tan Weihuan. Unstability and chaos of a detuned two-mode homogeneously broadened laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(9): 1185~1188 (in Chinese)
庄 军, 谭维翰. 双模含失谐均匀加宽激光的不稳定性与混沌[J]. *光学学报*, 1995, **15**(9): 1185~1188
- Tan Zhongwei, Liu Yan, Fu Yongjun *et al.*. Analysis of chaotic phenomena in the fiber laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(4): 311~313 (in Chinese)
谭中伟, 刘 艳, 傅永军 等. 光纤激光器的混沌现象分析[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 311~313
- VanWiggeren G D, Roy R. Communication with chaotic lasers[J]. *Science*, 1998, **279**(20): 1198~1200
- T. Heil, I. Fischer, C. R. Mirasso *et al.*. ON/OFF phase shift for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2002, **38**(9): 1162~1170
- Kanakidis D, Argyris A, Syvridis D. Performance characterization of high-bit-rate optical chaotic communication system in a back-to-back configuration[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(3): 750~758
- Yan Senlin, Chi Zeying, Chen Wenjian. Chaos synchronization through reverse-phase and its encoding in erbium-doped fiber lasers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 29~32 (in Chinese)
颜森林, 迟泽英, 陈文建. 掺铒光纤激光器反相位混沌同步及其编码[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 29~32
- Wu Liang, Zhu Shiqun. Communications using multi-mode laser system based on chaotic synchronization[J]. *Chin. Phys.*, 2003, **12**(3): 300~304
- Yun L, Pertter D, Yoshiro T *et al.*. Injection locking and synchronization of periodic and chaotic signals in semiconductor lasers[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2003, **39**(2): 269~277
- Wu Liang, Zhu Shiqun. Digital communication using multi-mode chaotic lasers[J]. *Commun. Theor. Phys.*, 2004, **41**(2): 225~230
- Troger J, Thévenaz L, Nicati P A *et al.*. Theory and experiment of a single-mode diode laser subject to external light injection from several lasers[J]. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(4): 629~636
- Lu Ling, Li Chenren. Direct chaotic system towards periodic oscillation solution based on perturbation amplitude[J]. *Chin. J. Lasers*, 2003, **30**(4): 322~325 (in Chinese)
吕 翎, 李成仁. 扰动幅度引导混沌系统到周期振荡解[J]. *中国激光*, 2003, **30**(4): 322~325
- Tian Zhaoshuo, Chen Weibiao, Hu Qiquan. Study on diode laser end-pumped Yb:YAG rod laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 48~51 (in Chinese)
田兆硕, 陈卫标, 胡企铨. 激光二极管端面抽运的棒状 Yb:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 48~51