

激光混沌同步和解码以及优化

颜森林¹⁾²⁾ 迟泽英¹⁾ 陈文建¹⁾ 王泽农²⁾

¹⁾ (南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

²⁾ (南京晓庄学院物理系, 南京 210017)

(2003 年 8 月 4 日收到, 2003 年 9 月 24 日收到修改稿)

进行了激光混沌模拟信号(0.1—10GHz)和数字信号(0.2 和 0.3Gbit/s)以及频率键控调制解调等研究,优化分析了调制信号的频率和幅度等对同步误差和解调的影响以及激光器混沌键控速率极限;分析了彻底同步和伪同步,并优化分析了系统参数失配、反馈系数对同步误差以及同步时间的影响.

关键词:激光,混沌,同步,解码,优化

PACC: 0545, 4255P, 4250

1. 前 言

近十几年,混沌在保密通信中的应用受到了人们的广泛重视^[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,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,所以人们的注意力已开始转移到全光激光混沌系统^[4-7].最近,许多激光器混沌通信系统被提出^[4-8].为了提高解码质量和通信速率,全光激光混沌同步及其在保密通信的应用还要做进一步的研究,其系统参数选取还要作进一步的优化分析.

由于在混沌保密通信中要求混沌同步^[1-3],对于激光混沌系统的同步^[6-9],也就是要求发射和接收系统中的激光振幅、相位实现同步.为了提高通信的速率,必须进行缩短同步时间研究,为了提高解码质量必须进行同步误差和调制信号关系的研究,为了提高系统的应用能力,必须进行增强系统同步能力和参数失配及其系统参数优化等方法的研究.本文提出外部注入半导体激光器^[8-12]激光混沌反馈同步系统,进行了混沌模拟和数字信号以及频率键控等调制解调研究,优化分析了调制信号对同步误差和解码的影响,分析了系统参数失配、反馈系数对同步误差以及同步时间的影响,并给出了优化分析结论.

2. 模 型

光注入半导体激光器全光激光混沌负反馈同步模块系统如图 1 所示,发射系统和接收系统由相同的主(M)、副(S)半导体激光器(LD)^[8-12]所组成,且接收系统 S-LD 有一负反馈回路. M-LD 激光 $E_m \exp[-j(\omega_m t + \phi_m)]$ 注入驱动可使 S-LD 激光 $E(t) \exp\{-j[\omega_m t + \phi(t)]\}$ 进入混沌态^[10-12].这样发射和接收系统 S-LD 激光可由下面方程组来描述^[7-9]:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{t,x}}{dt} &= \frac{1}{2}(G_{t,x} - \gamma_p)E_{t,x} + \frac{k}{\tau_L} E_m \cos(\phi_m - \phi_{t,x}) \\ &\quad + n_r \frac{f}{\tau_L} [E_t \cos(\phi - \phi_r) - E_r], \\ \frac{d\phi_{t,x}}{dt} &= \frac{1}{2} B_c (G_{t,x} - \gamma_p) + \frac{k}{\tau_L} \frac{E_m}{E_{t,x}} \sin(\phi_m - \phi_{t,x}) \\ &\quad - \Delta\omega_m + n_r \frac{f}{\tau_L} \frac{E_t}{E_r} \sin(\phi - \phi_r), \\ \frac{dN_{t,x}}{dt} &= \frac{I_{t,x}}{q} - \gamma_{ex} N_{t,x} - G_{t,x} V_p E_{t,x}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

其中脚标“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 $n_r = 1$. N 是载流子数,模式增益 $G = (\Gamma v_g a / V) (N - N_{th}) \sqrt{1 + E^2 / E_s^2}$, v_g 是激光腔内光子的群速度, 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; $N_{th} = n_{th} V$ 是激光透明

时的载流子数 n_{th} 是它的密度值; $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ 是光子损耗速率, α_m 是腔光子损耗, α_{int} 是内部光子损耗, $\Delta\omega_m = \omega_m - \omega_{th}$ 可认为是外部注入光频率和激光光场频率的频差; $\tau_L = 2n_g L/c$ 是光在激光腔长 L 内来回一周的时间, c 是真空中光速, $n_g = c/v_g$ 是群速折射率; I 是驱动电流, q 是单位电荷; β_c 是光线宽增强因子; $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)$ 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; f 为接收和负反馈系数. 如果选取适当的参数, 时间 $t \rightarrow \infty$ 时, 当 $|E_t - E_r| \rightarrow 0$, $|\phi_t - \phi_r| \rightarrow 0$ 和 $|N_t - N_r| \rightarrow 0$ 时, 即接收系统和发射系统就实现了同步. 数值分析时取表 1 的数值, $E_m = 0.126E_s$. 分别定义同步误差和相对同步误差:

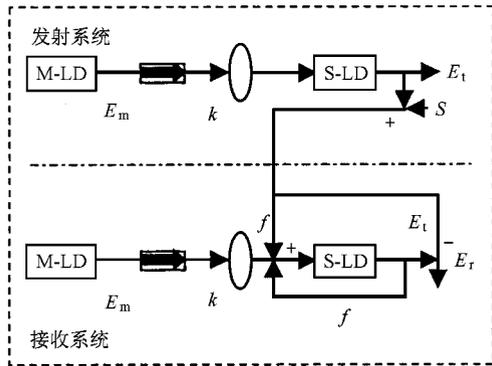


图1 同步系统模块 其中 M-LD 是主激光器, S-LD 是副激光器, \rightarrow 是光隔离器, S 是调制的信号

表 1 激光器参数

参数	符号值
腔长 $L/\mu\text{m}$	350
腔宽 $w/\mu\text{m}$	2
腔厚 $d/\mu\text{m}$	0.15
压缩和限制因子 Γ	0.29
群速折射率 n_g	3.8
腔光子损耗 a_m/cm^{-1}	29
腔内光子损耗 a_{int}/cm^{-1}	20
透明时载流子密度 n_{th}/cm^{-3}	1.2×10^{18}
非辐射复合速率 A_{nr}/s^{-1}	1.0×10^8
辐射复合因子 $B(\text{cm}^3/\text{s})$	1.2×10^{-10}
俄歇复合因子 $C(\text{cm}^6/\text{s})$	3.5×10^{-29}
饱和光子场强 $E_s/\text{m}^{-3/2}$	1.6619×10^{11}
增益常数 a	2.3×10^{-16}
光线宽增强因子 β_c/cm^2	6
频差 $\Delta\omega(\text{rad/s})$	$2\pi \times 10^9$
驱动电流 I/mA	25

$$\omega = |E(t) - E_r(t)|, \quad (2)$$

$$\bar{\omega} = \frac{|E(t) - E_r(t)|}{E_t(t)}, \quad (3)$$

其中方括号表示平均值, 数值模拟时在 10—20ns 内取 4000 点平均.

3. 混沌解调

3.1. 混沌隐藏

编码信息 $S(t)$ 直接加到混沌信号中一起被发射, 即信息隐藏在混沌波中, 这样很难从混沌波形上分离信息. 其接收和发射系统的基本结构如图 1 所示. 数值模拟时, k 均取 0.03. 当接收系统和发射系统达到同步后, 通过相减即可解调出信息 $S(t)$.

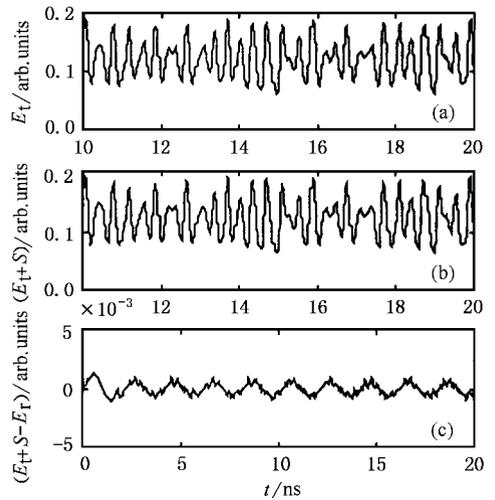


图2 模拟通信

现把正弦调制信号 $S(t) = A \sin(2\pi f_0 t)$ 加到混沌波中. 取 $A = \chi E_m$, $\chi = 0.1$, $f_0 = 500\text{MHz}$. 数值模拟结果如图 2 所示 (a) 和 (b) 分别是混沌波形和载有信号的混沌波形, 它们的变化是非常相似的. 显然, 这样很难从混沌波形上分离信息. (c) 是通过相减解调出的信息波形图. 解调出来的信息信号明显叠加着同步误差所产生的杂波, 其原因是信息信号干扰了混沌同步并增加了同步误差. 为了更好了解解调信号的质量, 这里给出了有信号调制时的信号与同步误差和相对同步误差的关系.

表 2 是有信号调制时的反馈系数和同步误差与相对同步误差的关系, 其中 $\chi = 0.1$, $f_0 = 500\text{MHz}$. 可

以看到优化的反馈系数为 0.18 时,同步误差为最小,且比值 $A/\omega = 35$ 最大.

表 3 是有信号调制时的调制幅度和同步误差的关系,其中 $f = 0.144$, $f_0 = 500\text{MHz}$. 可以看到随着调制幅度减小,同步误差越来越小.但是,信号太小提取也可能变得非常困难.事实上,比值 A/ω 却变化不大,平均值大约是 30 左右.其中 $\chi = 0.033$ 时比值 A/ω 最小,而优化的值是 $\chi = 0.02$ 时比值 A/ω 最大.

表 4 是有信号调制时的调制频率和同步误差的关系,其中 $f = 0.9$, $\chi = 0.1$. 可以看到当调制频率小于 4GHz 时,随着调制频率减小,同步误差越来越小,比值 A/ω 变化将会越来越大.而当调制频率大于 4GHz 时,随着调制频率的增加,同步误差变化是

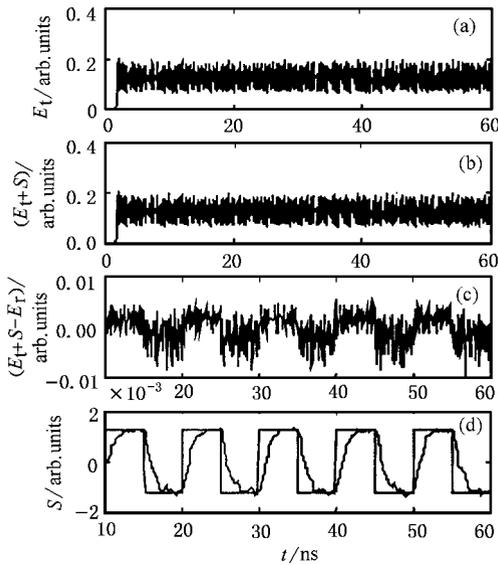


图 3 数字通信

表 3 信号调制时的调制幅度和同步误差的关系

χ	0.1	0.05	0.033	0.025	0.02	0.0166	0.0144	0.0125	0.0111	0.01
$\omega/10^{-4}$	4.33	2.11	1.54	1.05	0.77	0.68	0.58	0.51	0.45	0.41
$\bar{\omega}/10^{-3}$	4.08	2.04	1.41	0.99	0.75	0.63	0.57	0.49	0.43	0.38
A/ω	29.1	29.9	27	30	32.7	30.8	31.2	31.3	31.1	30.7

表 4 信号调制时的调制频率和同步误差的关系

f_0/GHz	10	8	6	4	2	1	0.7	0.5	0.3	0.1
$\omega/10^{-4}$	6.94	7.28	7.53	7.70	7.54	6.79	6.18	5.18	4.18	3.53
$\bar{\omega}/10^{-3}$	6.31	6.47	6.72	7.08	7.01	6.23	5.62	4.62	4.24	3.52

越来越小,也就是说低频或高频调制时,同步误差可能较小,比值 A/ω 将会变大.进一步数值模拟也证明了这一特点.

混沌数字信号调制解调以及信道噪声对同步误差的共同影响也被数值模拟.如数字信号 S (方波)幅值是 $0.1E_m$ 调制速率是 200Mbit/s,并让信道含有均值为零方差为 $0.1\% E_m$ 的噪声,反馈系数取 0.2. 其结果如图 3 所示,其中(a)和(b)是混沌波形和载有数字信号的混沌波形(c)是通过相减解调出信息的波形图.解调出来的信息波明显叠加上着噪声和同步误差所产生的杂波,噪声和所调制的信号使同步误差增加了,这里同步误差是 9.9×10^{-4} ,信号幅值和同步误差比值是 12.7.(d)是应用低通数字滤波器对解调信息进行滤波后的重构信息信号,其滤波解调出来的信号还是比较完美的(其中方波是原始信号).在这里还给出了数字信号(方波信号,幅值 $0.5\% E_m$ 速率是 0.3Gbit/s)和模拟信号(正弦信号,幅值 $0.5\% E_m$ 频率是 0.3GHz)调制的同步误差比较(图 4).其中数字信号调制产生的同步误差(虚线,对应于右轴)要比模拟信号调制产生的同步误差(实线,对应于左轴)大约多 40% 左右.其主要原因是数字信号变化比模拟信号要突然,对同步的影响也就更大.

表 2 信号调制时的反馈系数和同步误差的关系

f	0.9	0.72	0.54	0.36	0.18	0.14	0.108	0.09
$\omega/10^{-4}$	5.18	5.04	4.41	3.67	3.51	4.33	5.01	5.05
$\bar{\omega}/10^{-3}$	4.62	4.82	4.23	3.57	3.46	4.08	4.86	4.72

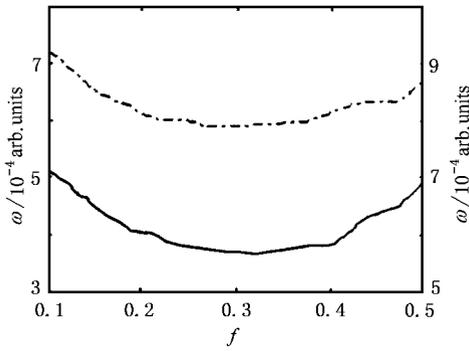


图4 模拟和数字通信时的同步误差比较

3.2. 混沌键控

一般来说,混沌键控(CSK)就是对发射系统某一参数键控以调制混沌到不同的混沌轨道上,而接收系统(有两个子系统组成)的子接收系统分别和所接收到的不同混沌信号同步以实现混沌键控解码.这里图5是混沌频率键控调制(CFSK)解调的数值模拟.其中 $k=0.03$, $f=0.324$,发射系统的注入光频率和副激光器的频率差被分别转换使 $\Delta\omega_0=1\text{GHz}$ 和 $\Delta\omega_1=0.9\text{GHz}$ 以表示“0”和“1”码.接收系统的两个子系统的“0”码接收系统主副激光器频率差设置为 $\Delta\omega_0=1\text{GHz}$ ，“1”码接收系统主副激光器频率差设置为 $\Delta\omega_1=0.9\text{GHz}$,当两个接收子系统分别和所接收到的混沌信号同步后,就意味着解码的实现.图5(a)是所发射的混沌信号.(b)和(c)是在码字“0”和“1”上同步,其中“ O_0 ”和“ O_1 ”分别示意“0”和“1”混沌码的解调.(d)是归一化后的“0”和“1”码字节流.

为了研究CSK通信速率,这里还分析了码字同步时间.为了简单,忽略键控转换的时间,研究表明在时间80ns和160ns的“0”码上的同步误差达到零的时间大约分别是1.73ns和3ns,在时间60ns和100ns的“1”码上的同步误差达到零的时间大约分别是2.33ns和1.55ns.这就意味着CFSK的速率不可能达到1Gbit/s,这就是半导体激光器混沌键控通信的速率极限.进一步的电流键控、损耗键控和增益键控等数值模拟研究也证明了这一结论.其主要原因是由混沌振荡频率和同步时间所决定的.但这个速率极限已远高于目前所知的电混沌系统和掺铒光纤激光器混沌通信系统的CSK速率.为了进一步提高混沌键控通信速率,可以使用混沌振荡频率更高的

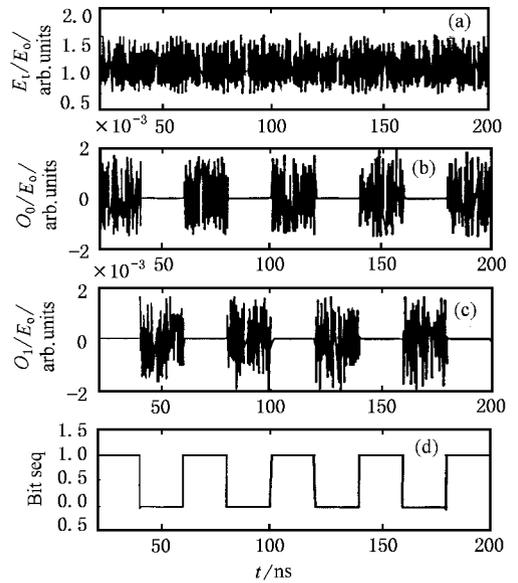


图5 CFSK

半导体量子阱激光器作为发射和接收系统.

4. 同步误差以及同步时间和反馈系数的关系

为了有效地提高混沌信号调制解调的质量和通信速率,这里还将进行同步误差以及同步时间和反馈系数关系的研究.发射系统和接收系统之间的同步有一个张弛振荡过程,即同步存在着一个时间过程,用 T_s 表示这个同步时间,数值模拟结果如表5.

从表5可以看到,反馈系数 f 在0.072—0.45之间,同步误差为零,可以称为彻底同步.当 f 在0.072—0.36之间,随着反馈系数的增加,同步误差达到零的时间 T_s 越来越小,优化取值是在 $f=0.36$ 时, $T_s=4.8\text{ns}$ 是最小的.这一特点在混沌键控通信中是非常重要的,即同步误差达到零的时间越小,越有利于提高混沌键控通信的速率,并能增强同步的能力.进一步数值分析表明,在 $f=0.036$ 时,同步误差达到数量级 10^{-8} 的时间 T_s 大约是8ns,而同步误差达到数量级 10^{-14} 的时间 T_s 大约是50ns,但同步误差是不可能达到零的,这可以称为伪同步(如相对同步误差大约在 10^{-3} 以下并能解码).随着反馈系数进一步减小,当 f 为0.029和0.018时,同步都不可能实现.当然,反馈系数太大,同步误差并非一定能达到零,如表5,系统仅能实现伪同步.

表 5 同步误差和同步时间随反馈系数变化的关系

f	0.9	0.72	0.54	0.45	0.36	0.18	0.14	0.108	0.09	0.072
$\omega/10^{-5}$	2.44	2.18	1.62	0	0	0	0	0	0	0
$\bar{\omega}/10^{-4}$	1.99	1.84	1.29	0	0	0	0	0	0	0
T_s/ns				7.1	4.8	6	7.2	14	14.2	31

5. 参数失配

在混沌通信应用中系统须准许参数在一定的范围内有参数失配,所以研究系统参数失配是非常必要的.数值模拟结果如图 6 和图 7 所示.其中 Δ_I, Δ_r 和 Δ_G 分别是发射系统和接收系统的驱动电流、光子损耗速率和增益常数参数失配数值的比值.图 6 表明驱动电流参数失配对同步影响较光子损耗速率参数失配相对要小.图 7 表明在对称轴 0.001—0.001 上优化取值可以有较小的同步误差.总的看

来系统准许有一定的参数失配,说明该系统具有一定的应用价值.

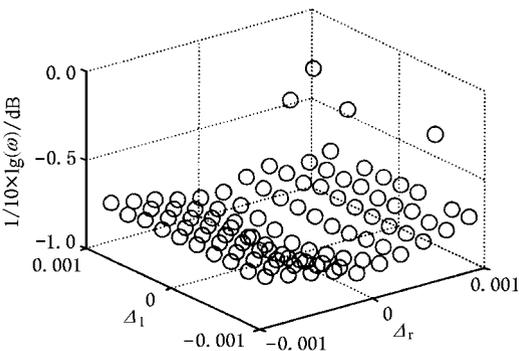


图 6 同步误差随电流和光子损耗参数失配的关系

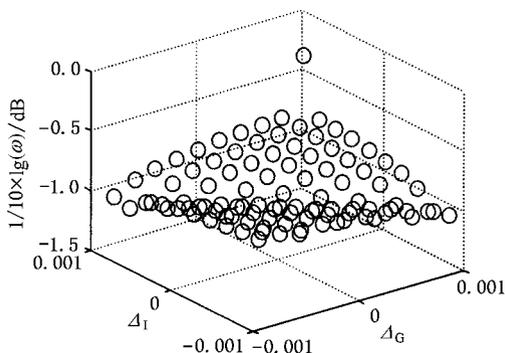


图 7 同步误差随电流和增益参数失配的关系

6. 结 论

本文进行了激光混沌模拟和数字信号调制解调以及频率键控的数值模拟研究,找到了信号调制频率、幅度等对同步误差的影响的优化值,还优化分析了系统参数失配、反馈系数对同步以及同步时间的影响,其优化分析对系统的实际应用是非常有帮助的.

[1] Fang J Q *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 435 [in Chinese] 方锦清等 2001 物理学报 **50** 435]
 [2] Gu C M and Shen K 1998 *Acta Phys. Sin.* **47** 732 [in Chinese] 顾春明、沈 柯 1998 物理学报 **47** 732]
 [3] Luo X S *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 988 [in Chinese] 罗晓曙等 2002 物理学报 **51** 988]
 [4] Claudio A S D , Colet R M D and Fernandez G 1999 *IEEE Quantum Electronics* **35** 292
 [5] Juang C and Hwang T M 2000 *IEEE Quantum Electronics* **36** 300

[6] Chen H F and Lin J M 2000 *IEEE Quantum Electronics* **36** 27
 [7] 2000 *IEEE Quantum Electronics* , **38**
 [8] Ramos R V , Souza R F 2001 *Opt. Commun.* **22** 90
 [9] Yan S L *et al* 2002 *Acta Electr. Sin.* **30** 213 [in Chinese] 颜森林等 2002 电子学报 **30** 213]
 [10] Zhao H D *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 77 [in Chinese] 赵红东等 2003 物理学报 **52** 71]
 [11] Troger J and Nicati P A 1999 *IEEE Quantum Electronics* **35** 1713
 [12] Yun L *et al* 2003 *IEEE Quantum Electronics* **39** 269

Synchronization and decoding of chaotic lasers and their optimization

Yan Sen-Lin^{1,2)} Chi Ze-Ying¹⁾ Chen Wen-Jian¹⁾ Wang Ze-Nong²⁾

¹⁾ *School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China*

²⁾ *Department of Physics, Nanjing Xiaozhuang College, Nanjing 210017, China*

(Received 4 August 2003 ; revised manuscript received 24 September 2003)

Abstract

In this paper analog signal with 0.1 to 10 GHz frequencies, digital signal with 0.2 and 0.3 Gbit/s rates and frequency shift keying decoding are studied in chaotic lasers. Influences of the frequency and the amplitude of the encoded signals and rate limit of chaotic shift key of lasers on synchronous error are optimally analyzed. Full-synchronization and pseudo-synchronization are discussed. Optimum of the effects of the parameter mismatch and the feedback coefficient on synchronous error and synchronous time is also discussed.

Keywords : lasing , chaos , synchronization , decoding , optimization

PACC : 0545 , 4255P , 4250