

系统增益对光混沌通信系统性能影响的研究^{*}

刘慧杰^{1,2)†} 冯久超¹⁾

1) 华南理工大学电子与信息学院, 广州 510641)

2) 东莞理工学院电子工程系, 东莞 523808)

(2008 年 3 月 20 日收到, 2008 年 7 月 24 日收到修改稿)

针对强注入开环结构的外腔反馈半导体激光器混沌通信系统, 数值计算得到系统增益与注入系数的定量关系曲线. 对比是否使用系统增益对接收系统输出进行校正两种情况下系统的解调性能, 表明使用增益校正的相减解调法获得的信息更接近原始信息. 通过采用不同频率的正弦信号进行调制, 表明信息频率对系统增益没有影响, 用不同调制方法对 0.2 Gbit/s 数字信号加密, 结果表明系统增益与信号类型及调制方法无关.

关键词: 光混沌通信, 强注入, 系统增益, 同步

PACC: 0545, 4255P, 4260

1. 引言

全光激光混沌通信系统具有较大的带宽和低的衰减, 并有复杂的动力学特征以及对参数极为敏感的特性使得它们在高速远程保密通信中有广阔的应用前景. 在这些系统中, 产生光学混沌最常用的方法是对半导体激光器进行光注入或施加外部反馈^[1,2]等方法. 已对基于外部光注入的光混沌通信系统有较多的研究, 而对基于光反馈结构的光混沌通信系统有较少的研究^[3-6]. 由于光反馈半导体激光器引入外部延迟光反馈, 使得系统有无穷多个特征值, 通过调节反馈系数和驱动电流, 系统可以呈现出极为复杂的混沌特性.

在实践中, 基于光反馈的光混沌通信系统通常有两种结构. 一种是发射机和接收机具有相同的外腔反馈半导体激光器, 称为闭环结构; 另一种是发射机是外腔反馈激光器, 它产生混沌载波, 而接收机仅有一个激光器二极管, 没有反馈形成, 称为开环结构. 对于开环结构, 在弱和强入射条件, 接收机有两种完全不同的同步响应. 在弱注入条件下(注入系数等于反馈系数), 发射机的输出只有小部分注入到接收机, 接收机再重构出发射机的动力学, 达到和发射机完全的同步, 这称之为一致同步; 在强注入条件下

(注入系数为反馈系数的几倍以上), 接收激光器类似于一个“放大器”, 它把发射端的混沌载波进行放大并同步, 这称之为等时同步. 在强注入条件下, 由于接收系统与发射系统的输出成正比^[7,8], 两者的差值不能完全反映系统的同步性能, 如用它们的比例系数(称之为系统增益)对接收系统输出进行校正, 经校正后的接收系统的输出与发射系统输出的差值可以较准确地反映系统的同步性能. 鉴于目前国内文献还没有系统增益的具体数值, 本文将通过实验获取系统增益, 并通过仿真实验验证使用系统增益校正后的传统解调法改善了系统的性能; 另外, 通过数值仿真, 证实系统增益与信息类型、信息频率及调制方法都无关, 因此, 在其他条件不变时, 读者可以从本文的仿真图中直接获取增益值并利用.

2. 理论模型

图 1 是数值模拟所用的光反馈半导体激光器混沌通信系统的结构图^[1]. 发射系统和接收系统均为法布里-珀罗半导体激光器二极管, 在系统中有一个巴特沃斯低通滤波器. 发射系统(主激光器 ML)在外部光反馈作用下产生混沌载波注入接收系统(即副激光器 SL). 接收系统采用的是无外部光反馈作用的开环结构(如果是闭环结构, 接收系统和发射系统

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60572025)和广东省自然科学基金(批准号: 04205783, 07006496)资助的课题.

[†] E-mail: liuhj@dgut.edu.cn

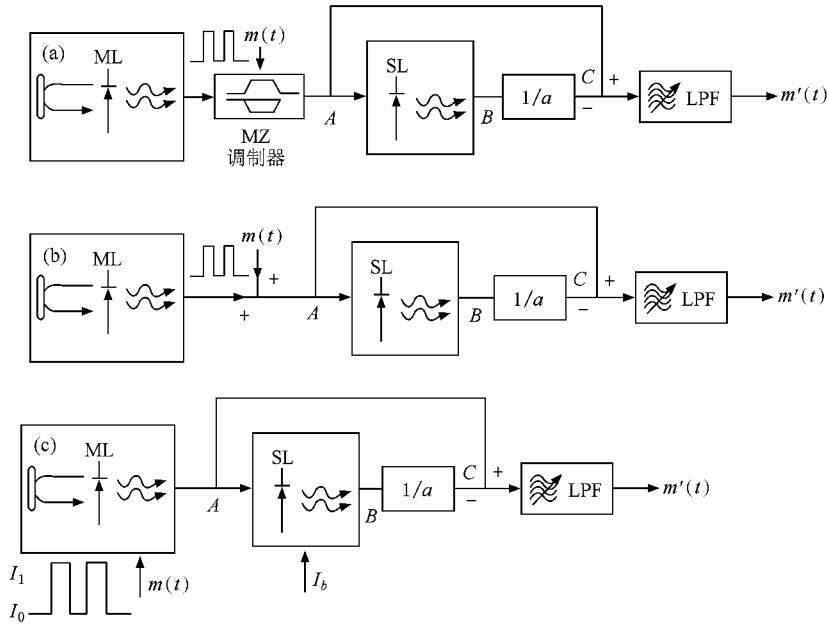


图 1 光混沌通信系统原理图 (a)混沌调制 (b)混沌掩盖 (c)混沌键控

同样有光反馈).所用的两个激光器的物理模型可用下面的 Lang-Kobayashi^[17,9]方程组描述：

$$\begin{aligned} \frac{dE_{tx}(t)}{dt} &= \frac{1+i\alpha}{2} \left(G_{tx}(t) - \frac{1}{\tau_{ptx}} \right) E_{tx} \\ &\quad + \gamma_{tx} E_{tx}(t-T) \exp[-i\omega_{tx}T] \\ &\quad + k_r E_r(t-\tau_c) \exp[-i(\omega_l\tau_c - \Delta\omega t)] \\ &\quad + \sqrt{2\beta N_{tx}(t)} \xi_{tx}(t), \\ \frac{dN_{tx}(t)}{dt} &= \frac{I_{tx}}{e} - \frac{N_{tx}(t)}{\tau_{nrx}} - G_{tx}(t) |E_{tx}(t)|^2, \\ G_{tx}(t) &= \frac{g(N_{tx} - N_0)}{(1+s|E_{tx}|^2)}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $E_{tx}(t)$ 是光场复渐变振幅(下标 t 和 r 分别代表发射和接收系统), $N_{tx}(t)$ 是发射和接收激光器中的载流子数, $G_{tx}(t)$ 为光增益, $\omega_{tx}(t)$ 是发射和接收激光器振荡频率 ($\Delta\omega = \omega_l - \omega_r$), γ 为光反馈半导体激光器的反馈系数.在开环结构中 $\gamma_r = 0$, 在闭环结构中, 设定 $\gamma = \gamma_t = \gamma_r$ (本文仅讨论开环结构), k_r 为接收系统接收来自发射系统的混沌光场的注入系数, $\xi(t)$ 为激光器的自发辐射噪声, 它的特性类似于均值为零的高斯白噪声, 发射和接收激光器的自发辐射噪声相关函数为 $\xi(t) \cdot \xi^*(t) = 2\delta_{tx} \delta(t-t')$. $1/a$ 是 a 倍衰减器.由于强注入条件下, 同步解为 $E_r(t) = aE_t(t-\tau_c)$ ^[7,8], 因此 a 就是上面指出的系统增益.

在仿真中, 我们将使用三种常见通信(加密)方

法, 即混沌调制(CM)、混沌掩盖(CMS)及混沌相移键控(CSK)对系统仿真.在 CM 方法中, 信息调制发射激光器的混沌载波, 如果 $m(t)$ 为调制信息, 则已调波为 $E_{mod}(t) = (1+m(t))E_t e^{j\phi_t}$ (对应于图 1 中 A 点, ϕ_t 为发射光场相位).在 CMS 方法中, 信息简单地叠加在发射激光器输出中, $E_{mod}(t) = E_t e^{j\phi_t} + m(t)$.在 CSK 方法中, 发射激光器的偏置电流被调制, $I_t = I_b + B(t)I_m$ (I_b 为偏置电流, I_m 为调制电流), $B(t)$ 对于“1”码值为 $1/2$, 对于“0”码值为“ $-1/2$ ”.而接收激光器的电流固定为 $I_r = I_b$.三种方法对信息的调制深度均设置为 5%, 采用相减法进行解调.一般的相减解调法是直接用接收激光器输出减去发射激光器的输出.本文用校正后的接收激光器输出减去发射激光器的输出进行解调.

3. 结果与讨论

采用四阶龙格-库塔法则对开环结构的混沌通信系统的速率方程组进行数值求解.计算中所用参量如表 1 所示, 其中 $\omega_l = \omega_0$.为了简化, τ_c 取零; k_r 的取值范围为 $2\gamma \leq k_r \leq 300\gamma$.仿真表明, 当 $k_r \geq 2\gamma$ 时, 接收系统的输出为发射系统输出的放大, 达到了强注入条件.同步误差用来表征系统的同步性能, 定义为

$$SE = \frac{|E_r(t) - E_t(t)|a}{E_r(t)}, \quad (2)$$

$$a = \left| \frac{E_s(t)}{E_i(t)} \right| \quad (3)$$

表 1 仿真参数

激光器振荡频率 $\omega_0/10^{15} \text{ s}^{-1}$	1.216
增益系数 $g/10^{-8} \text{ ps}^{-1}$	1.5
增益饱和系数 s	5×10^{-7}
线宽增强因子 α	5
自发辐射因子 $\beta/10^{-9} \text{ ps}^{-1}$	1.5
电子电荷 $e/10^{-19} \text{ C}$	1.602
透明载流子数 N_0	1.5×10^8
载流子寿命 τ_n/ns	2
光子寿命 τ_p/ps	2
发射到接收的传输时延 τ_c	可调
外腔环绕一周时间 T/ps	200
反馈系数 γ/ps^{-1}	0.01
注入系数 k_r	可调
偏置电流 I/mA	23

3.1. 模拟信息信号的混沌调制

将 500 MHz 模拟正弦信号采用混沌调制方法对发射激光器产生的混沌载波进行调制,其调制深度为 5%.通过对隐含有调制信号的发射激光器输出的时域波形图和频谱图的观察,此时无论从时域还是频域都无法分离出模拟调制信号,信息信号被很好地隐藏在混沌波中.图 2 是在 500 MHz 模拟正弦信号调制下,发射激光器的增益 a 随注入系数变化的曲线.从图中可以看出随着注入系数的增大,系统增益也逐渐增大,系统增益与注入系数几乎成正比关系.

图 3 和图 4 是采用相减解调法在未校正和校正

情况下分别得到的解调结果(已对解调的信息信号用巴特沃斯低通滤波器滤波).与图 3(a)相比,图 4(a)的 500MHz 的信息频率峰明显突出,在没有用 a 对接收激光器光场幅度校正时,解调信息频率受到低频杂波分量的干扰,使得即使对解调信息进行低通滤波,恢复的信息信号误差也较大,如图 3(b).当使用 a 对接收激光器幅度校正后,解调信息信号中的频率分量非常突出,低频分量幅度较小,这样通过选择合适截止频率的低通滤波器使得恢复出信息信号误差较小,如图 4(b).

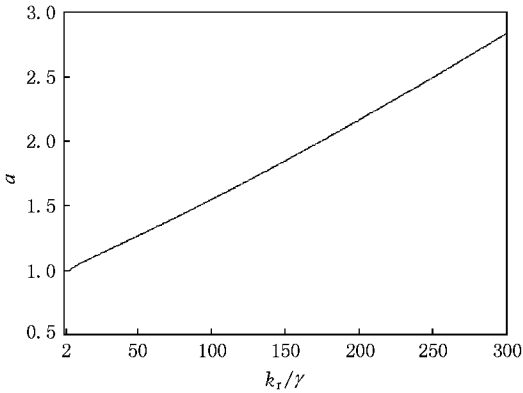


图 2 系统增益 a (500 MHz 正弦调制信号)

如果用 A_s 代表解调信号中位于信息频率处分量的幅度,用 A_c 代表低通滤波器通带范围内除信息频率以外的频率分量幅度的最大值,两者比值的大小说明信息频率相对于其他频率分量的强度,标志着信息频率分量是否更容易被识别,也就反应出解调信息的质量,这里我们用 $Q = A_s/A_c$ 来定义解调质量.图 3(a)显示了是否采用 a 校正情况下解调信息的质量,从图中可以看到,采用校正的相减解调法能够获得更高的 Q 值;随着注入系数 k_r 的增大,

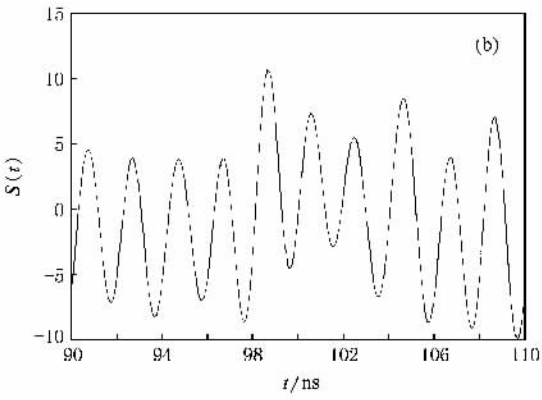
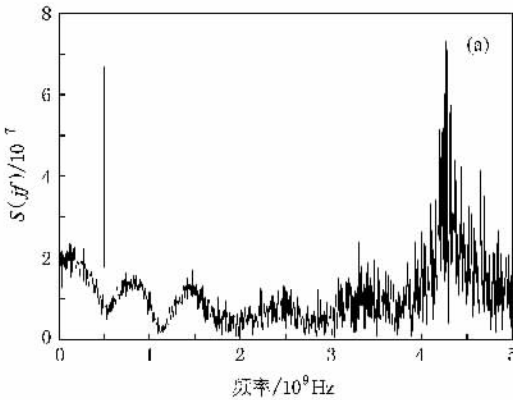


图 3 未校正 a 时的解调信息 ($k_r = 100\gamma$) (a) 频谱图 (b) 时域波形图

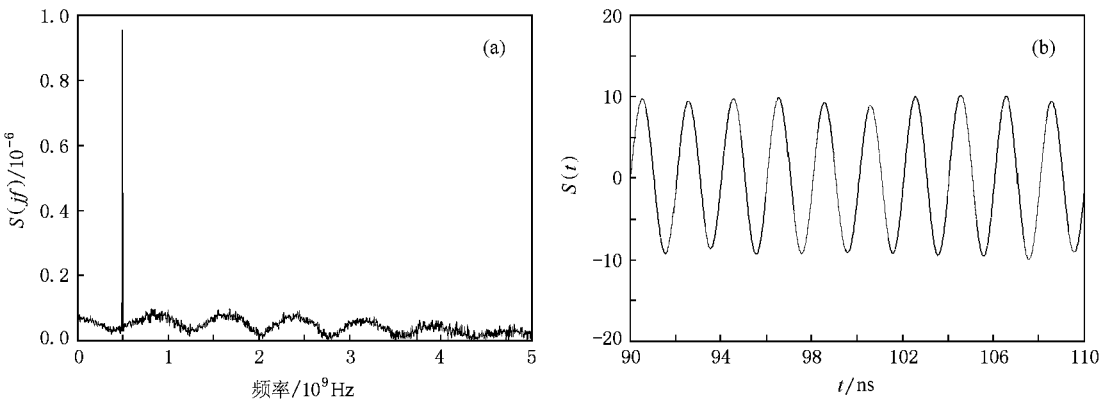


图 4 校正 a 后的解调信息 ($k_r = 100\gamma$) (a) 频谱图 (b) 时域波形图

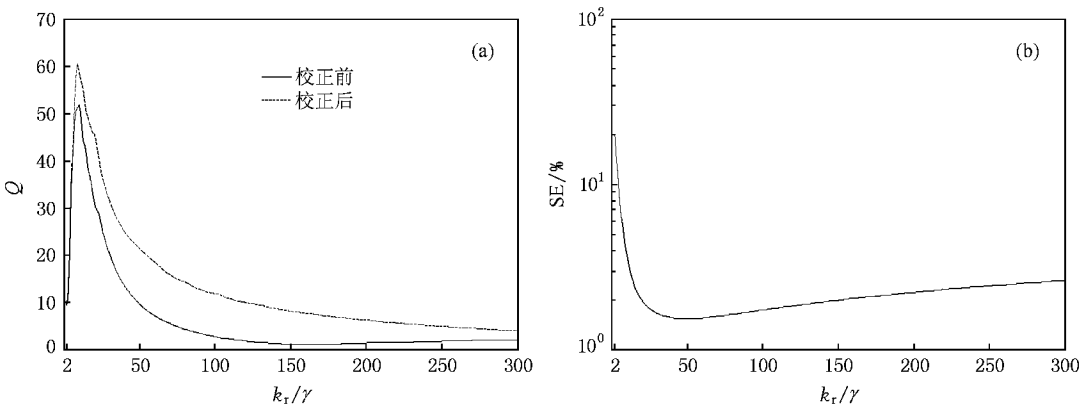


图 5 使用 a 校正前后系统解调质量及同步误差对比 (a) 解调质量 Q (b) 同步误差 SE

Q 值先增加再减小, Q 的最大值约为 60.6 (对应于 $k_r = 90\gamma$)。同步误差(SE)如图 5 (b) 所示, SE 也呈先减小后增加的趋势, SE 最小值约为 1.55%, 而 SE 的最小值出现在 $k_r = 50\gamma$ 附近, 与 Q 值最大点不对应, 这是因为解调质量的好坏不仅仅与同步误差有关。文献 [7] 说明了解调质量与解调信息信号的幅度有关, 是解调信息幅度与同步误差共同作用的结果。在入射水平较低时, 接收机根本无法与发射机同步导致了很大的同步误差, 事实上这个阶段并没有恢复信息, 同步误差起主导作用。入射水平很高时, 由于信息解码时, 从混沌载波中分离出大部分信息, 造成剩余的有效信息幅度很低, 也导致解调质量低。在中间虽解调信息幅度下降, 但由于同步误差大大下降, 使得解调质量较好。在这里, 仿真表明, 在 $5\gamma < k_r < 9\gamma$ 范围内, 虽然同步误差稍大, 但由于解调信息信号的幅度较大, 恢复信号的质量仍然较好。这里, 虽然用于反应解调质量的 Q 与文献 [7] 中 Q 的定义式不同, 但仿真结果是一致的。经测试, 在 $5\gamma <$

$k_r < 110\gamma$ 内, 仍可恢复出信息信号。

3.2. 信息信号频率变化

当调制信息信号的频率变化时, 相应地调整低通滤波器的截止频率。图 6 显示了信息频率不同时, 信息信号的 a 值, 图中三条曲线完全重叠, 可以说

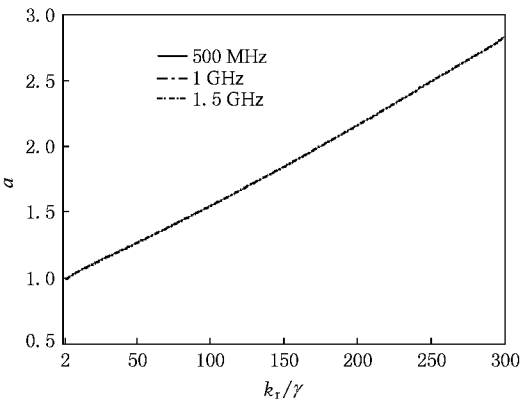


图 6 不同信息频率下的系统增益 a

明系统增益 a 与信息频率的大小是没有关系的,因此在解调信息时,可以直接从图 6 中获取相应的 a 值,以提高恢复信息信号的质量.

图 7 显示了不同信息频率时的系统同步误差 SE 与解调质量 Q 曲线.在 $k_r > 200\gamma$ 时,随着注入系数的增大,三条曲线趋于重合,说明在注入很强时,系统同步误差和解调质量基本上与信息频率没有关系.在 $k_r < 200\gamma$ 时,信息频率对同步误差及解调质

量造成显著影响,出现了随着信息频率的增大,同步误差增加继而导致解调质量下降.在不同信息频率情况下,解调质量 Q 的最大值对应的注入系数不完全相同,不过都在 $k_r = 9\gamma$ 附近,由于计算误差带来的差异,可以认为无论在怎样的信息频率时,在 $k_r = 9$ 时,都可获得最大的 Q ,只是信息频率的提高,最大 Q 值会随之减小,影响到解调质量.

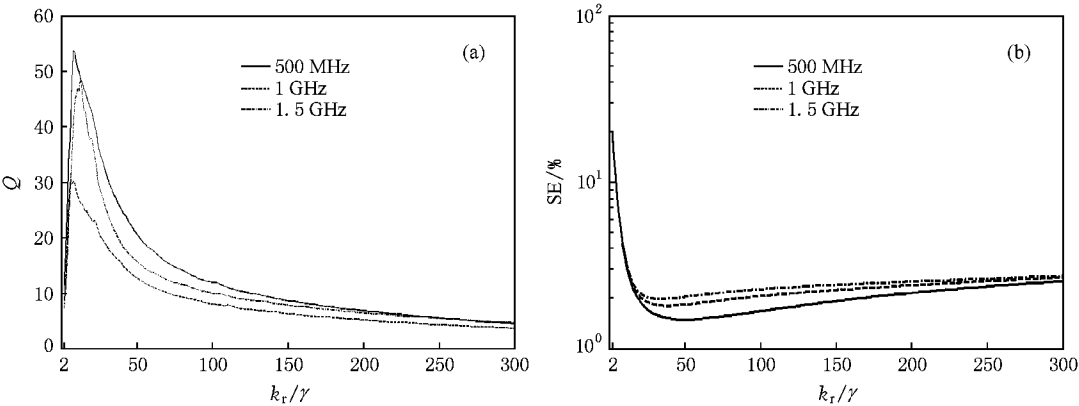


图 7 不同信息频率时的解调质量 Q (a) 和同步误差 SE (b)

3.3. 调制方法变化

采用 CM, CMS 和 CSK 三种方法对速率为 0.2 Gbit/s 的数字信息进行加密,设定 $k_r = 100\gamma$,仿真结果如图 8 所示.图 8 显示出用 CM 方法解调出的信息与原始信息几乎完全一致, CMS 和 CSK 方法解调出的信息在各个位都出现明显的振荡. CM 方法解调效果好的原因,我们可以从其加密过程本质来解

释,由于 CM 调制方式类似于典型的调幅(AM)方法,接收机所接收到的经编码的混沌载波的相位与发射机的混沌载波相位相同,把信号加入混沌载波中就不会引起系统同步过程中的明显扰动,同步过程对编码过程不敏感^[9]. CSK 方法与 CM 方法一样,可以达到相位同步,但由于发射激光器和接收激光器偏置电流不同造成同步误差增强,从图 9 (b) 中我们看到 CSK 方法的同步误差小是由于 CSK 方法根

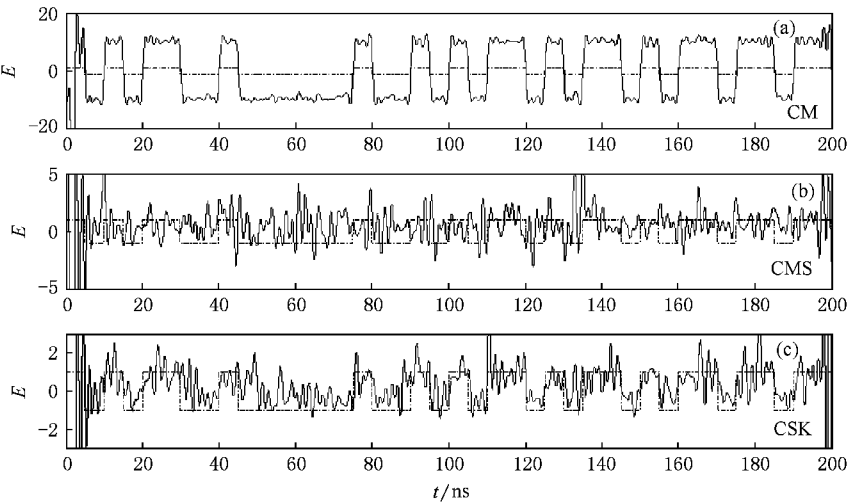


图 8 不同调制方法时的解调信息 (a) 混沌调制 (b) 混沌掩盖 (c) 混沌键控

据相减法解调的信息幅度较低(这从图 8 中可以看出,图 8(a)(b)(c)中都有虚线绘制的原始数字信息,1 位时幅度为 1,0 位时幅度为 -1),图 9(b)中 CM 方法的同步误差较大,是由于解调信息幅度很强,从这个角度可以证明 CM 方法的解调效果是优于 CSK 方法的.最后,在 CMS 方法中,信息信号完全与电场无关,直接把信息加入载波,这时信息的相位

作为扰动项致使发射机和接收机的相位偏离. CMS 方法中的相位不匹配导致在系统的同步过程中更大的扰动.从图 9(a)可以看出,采用不同调制方法,可以得到几乎完全重叠的 a 曲线,说明 a 与调制方法的选择没有关系.另外,图 9(a)与图 6 中 a 曲线也保持一致,说明 a 与数字或是模拟信息调制没有关系.

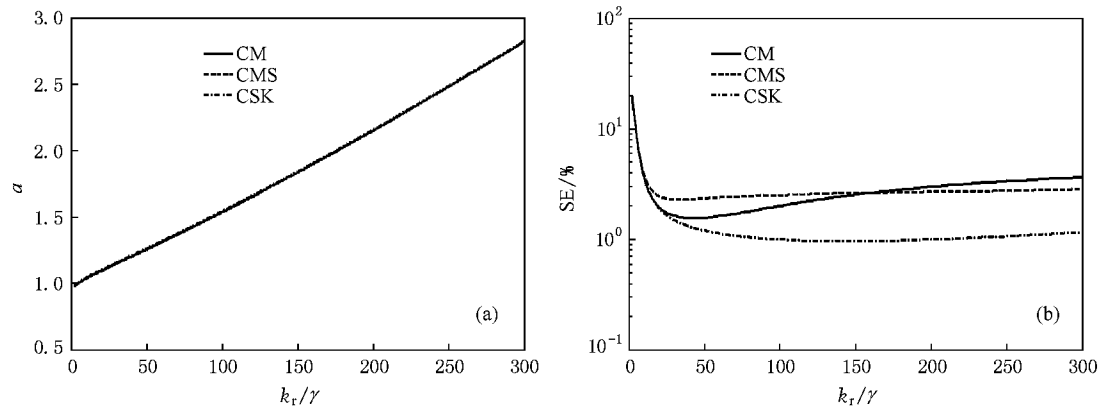


图 9 不同调制方法时 (a)系统增益 a (b)同步误差 SE($k_r = 100\gamma$,采用 0.2 Gbit/s 的数字信息信号)

4. 结 论

已研究开环结构外腔反馈半导体激光器混沌通信系统的同步及解调特性.数值计算表明接收发射激光器输出光场强度比值 a 与注入系数成正比关系.对相减法解调信息的方法进行改进,用 a 校正

后的接收激光器光场强度进行计算能够提高解调信息质量.如果注入系数很大处时,信息频率对同步误差和解调质量没有明显影响.如果注入系数不是特别大,信息频率越大,系统同步误差越大,信息解调质量也越差.另外,信息类型(模拟或数字信息)、信息频率和调制方法对 a 没有影响,在解调信息时可直接查询 a 值对接收机的输出进行校正.

[1] Dimitris K ,Apostolos A 2006 *IEEE Lightwave Technology* **24** 335

[2] Apostolos A ,Dimitris K 2005 *IEEE Quantum Electronics* **41** 892

[3] Yan S L 2005 *Chin . J . Lasers* **32** 1503 (in Chinese)[颜森林 2005 中国激光 **21** 1503]

[4] Yan S L 2005 *Elec . Sin .* **33** 266 (in Chinese)[颜森林 2005 电子学报 **33** 266]

[5] Yan S L 2005 *Acta . Phys . Sin .* **54** 2000 (in Chinese)[颜森林 2005 物理学报 **54** 2000]

[6] Wu J G ,Wu Z M ,Lin X D ,Zhang Y ,Zhong D Z ,Xia G Q 2005 *Acta . Phys . Sin .* **54** 53 (in Chinese)[吴加贵、吴正茂、林晓东、张 毅、钟东州、夏光琼 2005 物理学报 **54** 53]

[7] Apostolos A ,Dimitris S 2004 *IEEE Lightwave technology* **22** 1272

[8] Argyris A ,Kanakidis D ,Bogris A ,Syvridis D 2004 *IEEE Quantum Electronics* **10** 927

[9] Dimitris K , Apostolos A , Syvridis D 2003 *IEEE Lightwave technology* **21** 750

Effect of system gain on optical chaotic communications systems^{*}

Liu Hui-Jie^{1,2)†} Feng Jiu-Chao¹⁾

¹ *School of Electronic and Information Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China*

² *Department of Electronic Engineering, Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China*

(Received 20 March 2008 ; revised manuscript received 24 July 2008)

Abstract

The chaotic communications systems with optical feedback lasers in strong injection and open-loop configuration are studied in this paper. The quantity relationship between gain and injection factor is obtained by numerical calculation. The demodulator's performances under the conditions of whether the gain is used to adjust the output of the receiver are compared. The result indicates that the recovered message is more close to the original message by using the adjusted subtraction demodulation method. It is proved that message rate has no effect on gain by testing sine signals with different rates. Further, the gain is shown to be independent of message type and encryption mechanism by testing digital signals at 0.2 Gbit/s rate.

Keywords : optical chaotic communication , strong Injection , system gain , synchronization

PACC : 0545 , 4255P , 4260

^{*} Project supported by the National Nature Science Foundation of China (Grant No. 60572025) and the Nature Science Foundation of Guangdong (Grant Nos. 04205783 and 07006496).

[†] E-mail :liuhj@dgut.edu.cn