

激光混沌通信中半导体激光器接收机 对高频信号的滤波特性^{*}

王云才[†] 李艳丽 王安帮 王冰洁 张耕玮 郭 萍

(太原理工大学物理系, 太原 030024)

(2006 年 12 月 21 日收到, 2007 年 2 月 1 日收到修改稿)

数值研究了基于半导体激光器的混沌通信系统中构成混沌同步的接收半导体激光器对高频信号的滤波特性. 分析了闭环结构的接收机对不同频率、不同幅度的加载信号的提取能力. 研究发现, 混沌保密通信系统对传输信号的提取能力与信号的频率有关. 当信号频率较低时, 闭环结构的接收机对信号的滤波效果较好; 当信号频率接近半导体激光器的弛豫振荡频率时, 接收机的滤波效果较差. 分析结果同时表明, 混沌保密通信系统中接收机对传输信号的提取质量不仅与实现混沌同步的两激光器的同步质量有关, 而且依赖于传输信号的幅度.

关键词: 混沌, 混沌同步, 半导体激光器, 滤波

PACC: 4280W, 4255, 4260

1. 引 言

自 1990 年美国海军实验室的 Pecore 和 Carroll^[1,2]首次提出并实验实现混沌保密通信以来, 混沌保密通信在近年来得到广泛的研究. 混沌保密通信是将待传输的信号混入混沌发射机产生的混沌载波中, 经传输后用接收机接收. 当发射机与接收机实现混沌同步时, 接收机对混沌载波进行再生, 但对所加载的信号根据接收机的性能有不同程度的抑制. 通过比较接收机的输入与输出之差可以提取出隐藏在混沌载波中的信息. 利用光学系统可以产生宽带高维混沌载波, 与电子器件产生的混沌载波相比, 更易实现高速混沌保密通信. 迄今为止, 人们已相继实现了基于 CO₂ 激光器^[3]、光纤激光器^[4,5]和固体激光器^[6,7]的混沌同步实验系统. 光反馈半导体激光器是实现光学混沌通信的理想光源, 在混沌产生、同步及通信的研究中备受关注^[8-14]. 2005 年, Argyris 等^[15]在雅典利用商用光通信网络实现了传输距离达 120 km 的混沌激光保密通信, 对于 1 Gbit/s 的传输信号, 达到 10⁻⁷ 的误码率.

接收机对传输信号的滤波性能是混沌通信系统

的关键问题, 它决定了系统的误码率. 混沌激光保密通信通过混沌键控、混沌隐藏和混沌调制等方法将信号隐藏于混沌载波之中, 保密传输至与发射机同步的接收机, 再利用接收机对信号的滤波特性提取加密的信号. 接收机的滤波特性表现为对混沌载波信号的再现, 并对它所携带的信息具有过滤作用. 由于信号与载波的耦合将降低通信系统的混沌同步性^[10], 且接收机对不同信号的抑制不同, 所以, 信号本身的频率、幅度对接收机提取信号的质量将有一定的影响. 因此, 对于给定的混沌激光通信系统, 选择适当的加载信号可以提高信号提取的质量. 文献 [11] 认为, 接收机重现了混沌发射机的混沌信号而降低了隐藏在其中的加载信号幅度, 当隐藏信号的幅度非常小时, 接收机相当于一个混沌带通滤波器 (chaos pass filter). 文献 [12] 实验证实了混沌接收机对不同加载频率信号的滤波特性, 但缺少对加载信号的幅度影响滤波效果的定量分析. 文献 [14] 研究了开环混沌通信系统中接收激光器的滤波特性, 但同样没有考虑加载信号的幅度对滤波的影响. 考虑到混沌同步的闭环通信系统^[13,14]更易实现, 同步性更好, 所以对闭环系统接收激光器的滤波特性的研究就更为重要. 目前有关这方面的工作作者尚未见

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 60577019)资助的课题.

[†] E-mail: wangyc@tyut.edu.cn

有文献报道.

针对以上的原因,本文研究了强光注入锁定同步类型下闭环系统混沌接收机的滤波特性.分析了混沌接收机对不同频率、不同幅度的信号提取能力并给出了最优的选择方案.数值模拟发现,对于大幅度(可隐藏在混沌波中)的信息信号,在适当的调制幅度下有着更佳的混沌带通滤波特性.

2. 系统模型

我们选择更易于实现混沌同步的闭环通信系统为研究对象.图 1 给出了闭环结构的混沌通信系统的原理示意图.图中发射机 TL 和接收机 RL 由两个结构参数一致的带光反馈的半导体激光器组成.信号通过电流调制方式加载在发射激光器输出的混沌载波中,携带着信息的混沌激光载波经分束器 BS 分成两束:一束通过光隔离器 IS 注入到接收激光器中,另一束输入到加法器中与接收机输出的混沌波相减,得到加载信号.

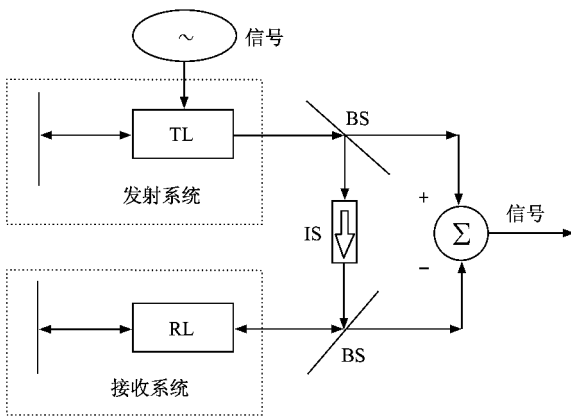


图 1 闭环结构的混沌通信系统原理示意图

发射机和接收机的动力学过程可用考虑光反馈与光注入的半导体激光器 Lang-Kobayashi 单模速率方程^[16]描述,即

$$\frac{dE_T(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ G [N_T(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right\} E_T(t) + k_T E_T(t - \tau) \exp(-i\omega_T \tau), \quad (1)$$

$$\frac{dE_R(t)}{dt} = \frac{1}{2}(1 + i\alpha) \left\{ G [N_R(t) - N_0] - \frac{1}{\tau_p} \right\} E_R(t) + k_R E_R(t - \tau) \exp(-i\omega_R \tau) + k_{inj} E_R(t - \tau_c) \exp[-i(\omega_R \tau_c - \Delta\omega t)], \quad (2)$$

$$\frac{dN_{T,R}}{dt} = \frac{I_{T,R}(t)}{qV} - \frac{1}{\tau_n} N_{T,R}(t) - G [N_{T,R}(t) - N_0] |E_{T,R}(t)|^2, \quad (3)$$

式中下标“T”和“R”分别表示发射、接收系统, E 和 N 分别是激光器腔内复电场强度和载流子密度, α 为线宽增强因子, G 为微分增益系数, N_0 为透明载流子密度, τ_p 为光子寿命, τ_n 为载流子寿命, τ 为光在外谐振腔的往返时间, τ_c 为光从发射激光器到接收激光器的延迟时间, ω 为半导体激光器的输出角频率, $\Delta\omega = \omega_T - \omega_R$ 为发射机与接收机之间的频率失谐, $I(t)$ 为半导体激光器的抽运电流密度, V 为激光腔的有源区体积, q 为电荷电量,同时定义带反馈半导体激光器的反馈系数 $k_{T,R}$ 和发射机注入到接收机的注入系数 k_{inj} 分别为

$$k_{T,R} = \frac{1}{\tau_{in}} \frac{(1 - r_0^2) r_{T,R}}{r_0}, \quad (4)$$

$$k_{inj} = \frac{1}{\tau_{in}} \frac{(1 - r_0^2) r_{inj}}{r_0}, \quad (5)$$

其中 r_0 和 $r_{T,R}$ 分别是激光器输出端面和外部反射镜面的反射率, τ_{in} 是光在激光器谐振腔内的往返周期, r_{inj} 为外光反馈注入到激光器谐振腔的注入比.若要实现混沌同步,两激光器的参数应近似相等,故数值模拟时两激光器主要参数取值相同.具体的取值如下^[13]: $\alpha = 3$, $G = 8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}$, $\tau_n = 2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$, $V = 1.2 \times 10^{16} \text{ m}^3$, $q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, $\tau_p = 1.93 \text{ ps}$, $\tau_c = \tau = 0.8 \text{ ns}$, $N_0 = 10^{24} \text{ m}^{-3}$, $\tau_{in} = 10 \text{ ps}$, $I_{th} = 13.7 \text{ mA}$.

给定半导体激光器的参数后,我们可以得到激光器的弛豫振荡频率约为 2.6 GHz.在一定的光反馈下,激光器输出的混沌载波的带宽约为 2.86 GHz.待传输的信息信号通过直流调制加载到发射激光器输出的混沌载波上.此时注入的调制电流为

$$I = I_b + I_m \sin(2\pi ft).$$

这里

$$I_m = m(I_b/I_{th} - 1)I_{th},$$

其中 I_b 是偏置电流, m 为调制深度.我们引入信噪比来表征滤波质量,信噪比定义为 $10\lg(P_S/P_N)$,其中 P_S 和 P_N 分别为信号功率和噪声功率.信噪比越大则表明滤波效果越好.同时我们用同步误差来衡量混沌同步的性能,同步误差定义为

$$\sigma = P_T - P_R / P_T,$$

其中 \cdot 表示求均值.同步误差越大,则两激光器的

同步性越差,同步误差为零时,表明达到完全同步.

数值模拟中选择 $r_T = r_R = 0.3\%$, $r_{inj} = 50\%$ 为系统工作条件,此时接收机与发射机的同步误差为 1% .图 2(a)中的上下两个波形分别对应于发射机和接收机产生的混沌波形时序图,图 2(b)为两混沌波形的同步相关图.

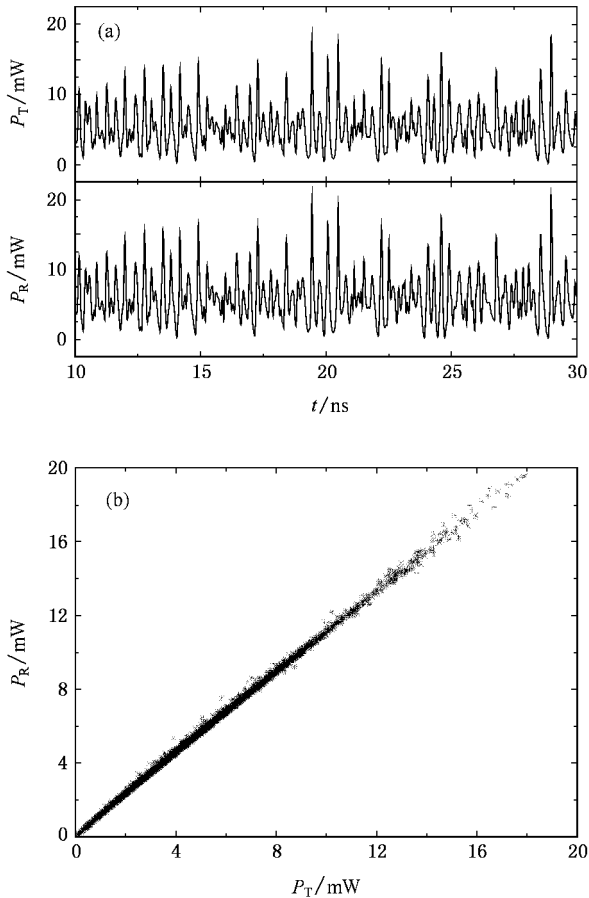


图 2 发射机与接收机产生的混沌载波时序波形 (a) 及混沌同步相关图 (b)

3. 结果及分析

3.1. 接收机的滤波特性与信号频率的关系

目前实验中实现的混沌通信系统所能传输的信号频率均在 10^9 Hz 的量级,而实现高速信号传输是混沌保密通信实用化的必经之路.以下我们主要研究混沌通信系统中接收机的滤波特性随信号频率的变化关系.为简明计,我们取所加载的信号为单频正弦信号,信号电流的调制深度 $m = 0.7$.图 3(a)是当信号的调制频率 f 分别为 1.2, 1.9, 2.6 GHz 时发射

机发出的混沌波形的功率谱;图 3(b)是对应的接收机产生的混沌波形的功率谱;图 3(c)为接收机所提取出的信号功率谱;图 3(d)为经过滤波器后提取出的信号波形.

从图 3(a)和(b)可以看出,在发射机的输出信号功率谱中,混沌载波中所混入的信息信号幅度要明显高于接收机输出功率谱中的信号幅度.同时还发现频率在 2.6 GHz 时信号的幅度明显降低,并且除了信号的基波外还存在明显的谐波分量.从图 3(d)中可以看出,当信号频率为 1.2 GHz 时提取出的信号质量最佳,其波形幅度明显大于 1.9 和 2.6 GHz 时的信号幅度,说明此时信号最易提取.通过计算信噪比可以得到,当信号频率 $f = 1.2$ GHz 时,信噪比为 21.9 dB;当信号频率增加到 1.9 GHz 时,信噪比降为 17.1 dB;而当信号频率等于激光器的弛豫振荡频率 2.6 GHz 时,信噪比降低至 3.1 dB,已不能满足通信系统对信号质量的要求.

图 4 给出了发射机和接收机中信号幅度与频率的关系,其中的实线代表发射机的输出功率谱中信号的幅度随信号频率的变化关系,虚线代表接收机的输出功率谱中信号的幅度随信号频率的变化关系,而点划线则代表两者之间的差值随信号频率的变化关系.从图 4 可以看出,发射机的信号幅度随信号频率变化缓慢,在 1—3 GHz 的信号频率范围内,信号幅度的变化范围不超过 4 dB;而接收机的信号幅度随所加载信号频率的增加而明显增加,造成两激光器输出的信号幅度差随信号频率的增加而减小.这说明在混沌载波带宽内,加载信号的频率越高则提取出信号的幅度就越小.

在 $m = 0.7$ 时,接收机所提取信号的信噪比与信号频率变化关系如图 5 所示.从图 5 可以看出:信号频率较低时提取信号的信噪比较高,此时的滤波效果最佳.当信号频率接近激光器的弛豫振荡频率时,所提取信号的信噪比最低,此时接收机的滤波效果最差.当信号频率超过激光器的弛豫振荡频率时(如 $f = 2.8$ GHz 时),所提取信号的信噪比又有所上升.产生这种现象的原因是由于激光器的弛豫振荡频率对信号的响应最大,这也类似于稳态的注入锁定激光器对小信号调制的响应^[17].

3.2. 信号幅度对接收机滤波特性的影响

接收机所提取出的信号与所加信号的幅度、频率及调制深度有关.图 6 和图 7 分别给出了调制深

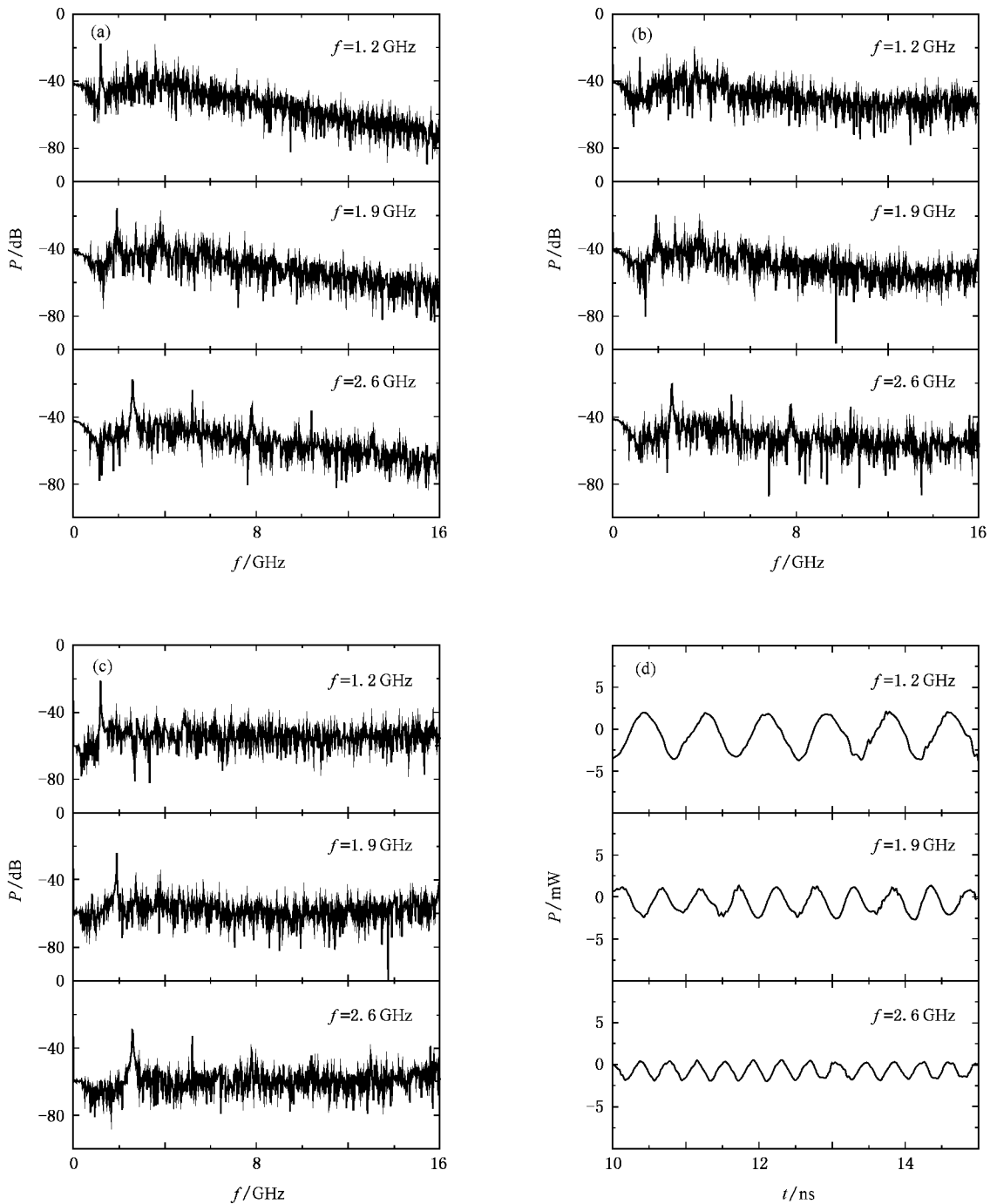


图3 混沌输出功率谱及波形 (a) $m=0.7$ 时 $f=1.2, 1.9$ 和 2.6 GHz 时发射机的输出信号功率谱; (b) $m=0.7$ 时 $f=1.2, 1.9, 2.6\text{ GHz}$ 时接收机的输出信号功率谱 (c) 接收机提取出的信号功率谱 (d) 经滤波后提取出的信号波形

度对提取的信号幅度及信噪比的影响,图8具体模拟了三种不同的信号调制幅度下所提取的信号波形,下面分别进行说明。

取固定的信号频率 $f=1.2\text{ GHz}$,图8给出了 $m=0.15, 0.50$ 和 0.80 时接收机的滤波效果.图8(a)和(b)分别对应于发射机和接收机的输出功率谱,图

8(c)为发射机和接收机输出功率谱之差,图8(d)为对应的提取信号.从图8可以看出,调制深度越大所提取出的信号的幅度就越大.大的调制深度尽管对应于较大幅度的调制信号,但也引入了较多的噪声分量,所提取信号的质量会有所降低. $m=0.5$ 时所提取信号的信噪比要优于 $m=0.8$ 时提取信号的信噪比.另外,从保密的角度考虑,大调制深度的信号

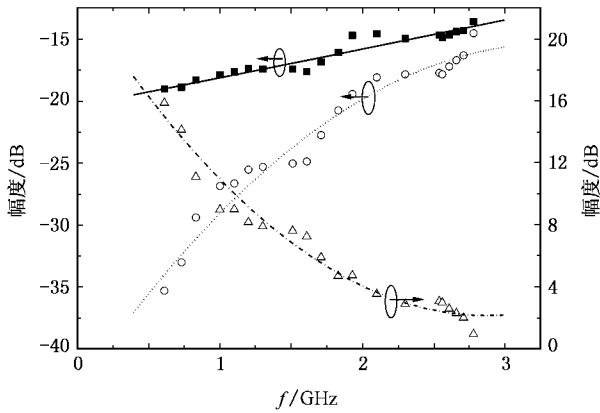


图 4 接收机滤波特性随信号频率的变化

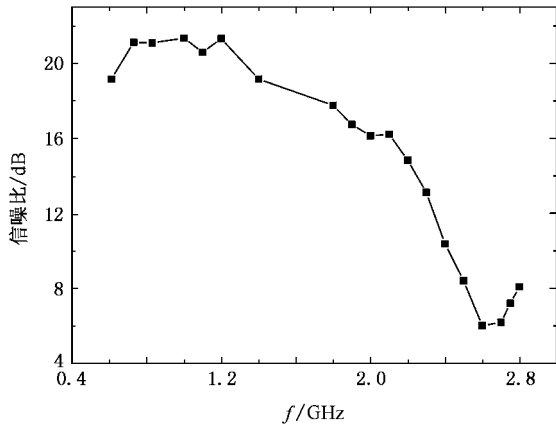


图 5 接收机提取信号的信噪比与信号频率的关系

幅度也不利于对信号进行保密。

图 6 给出了当信号频率分别为 1.2、2.6 GHz 时，调制深度在 0.1—0.9 范围内信号幅度的变化曲线，其中的实心方块线代表发射机输出功率谱中的信号幅度，空心圆线代表接收机输出功率谱中的信号幅度，空心三角线代表所提取出的信号幅度。从图 6 可以看出，频率不同的信号在发射机和接收机的功率谱上的变化趋势基本相同，都是在调制深度约为 0.5—0.7 时幅度保持不变，而后又有所升高的趋势相同。但当频率 $f = 1.2$ GHz 时的信号幅度差要高于 $f = 2.6$ GHz 的信号幅度差。这与图 5 中频率与信号幅度的关系所得出的结论相符。

调制深度与信噪比之间的关系如图 7 所示，其中实线是 $f = 1.2$ GHz 时提取信号的信噪比随调制深度的变化曲线，点虚线是 $f = 2.6$ GHz 时提取信号的信噪比随调制深度的变化曲线。从图 7 可以看出，曲线呈抛物线的形状。这是因为当调制深度太小时，信号与混沌信号几乎无法分辨，而当调制深度太大

时，信号在混沌中的隐藏性又大大下降。从图 7 还可以看出，调制深度在 0.5—0.7 范围内最易提取信号。从图 6 中也可以看出，在这一范围的调制深度下，信号幅度基本保持不变，且最稳定。这一研究结果可为采用混沌调制的混沌通信系统在实际应用中选择最佳的调制深度提供借鉴。

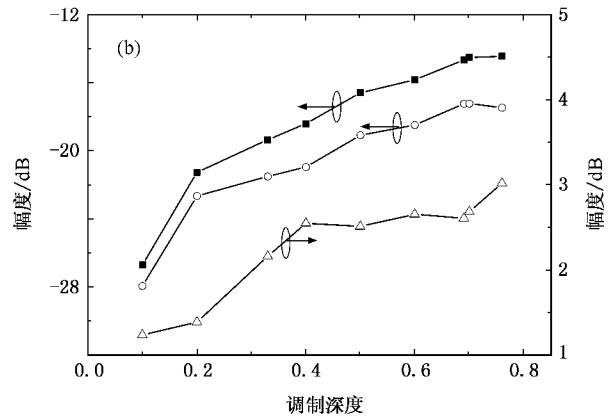
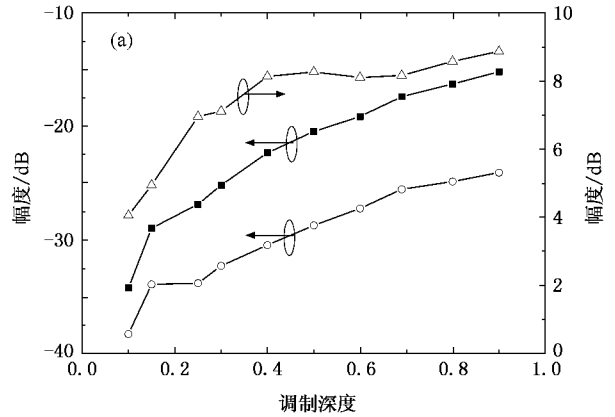


图 6 调制深度与信号幅度的关系 (a) $f = 1.2$ GHz, (b) $f = 2.6$ GHz

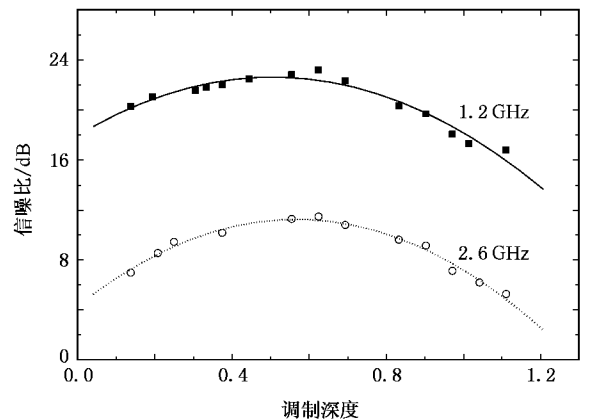


图 7 调制深度与信噪比的关系

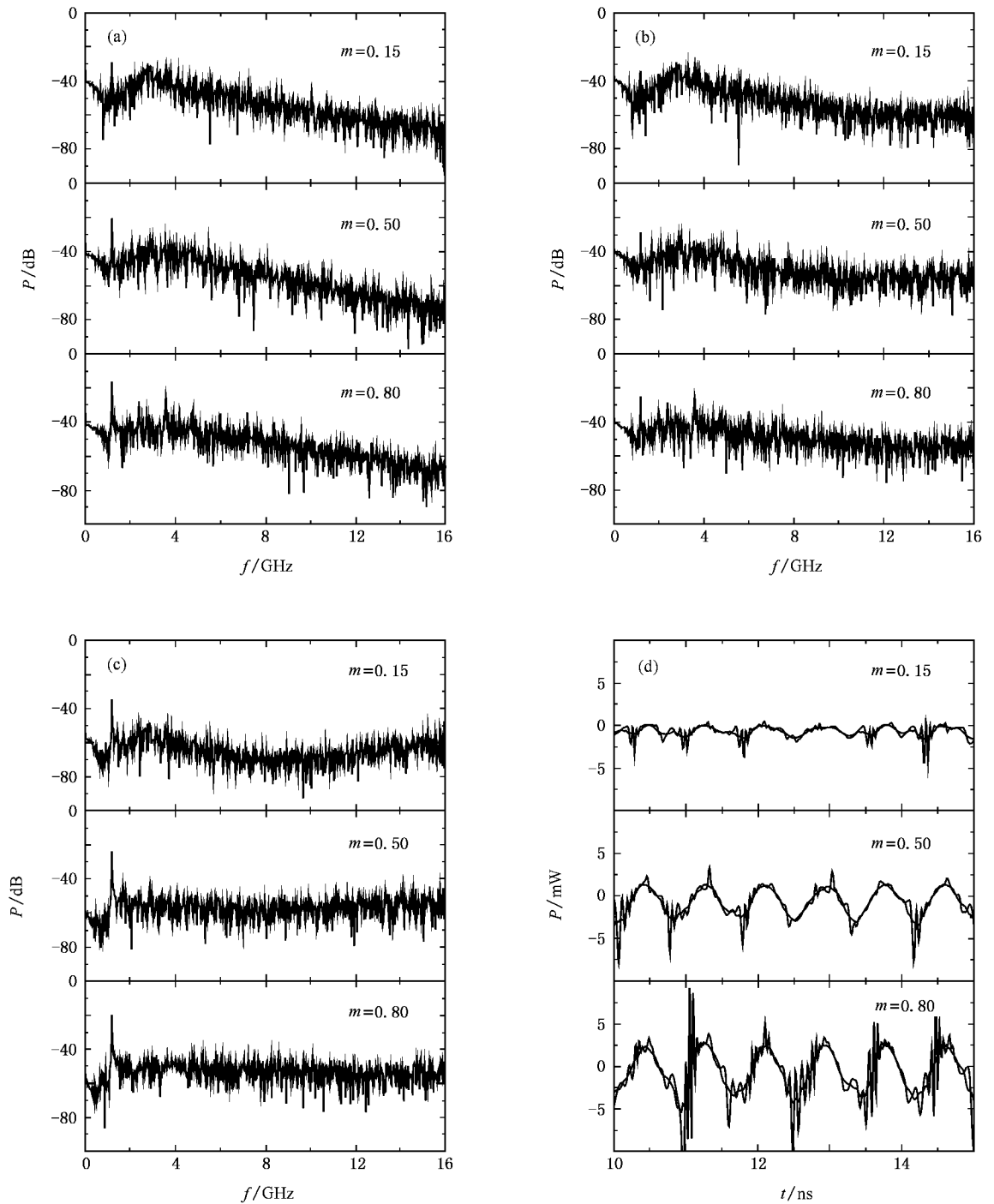


图 8 当 $f=1.2$ GHz 时, $m=0.15$ 、 0.50 和 0.80 时的输出功率谱及所提取的信号 (a) 发射机的输出信号功率谱 (b) 接收机的输出信号功率谱 (c) 提取信号的功率谱 (d) 提取出的信号波形

4. 结 论

本文理论研究了混沌通信中作为接收机的光反馈半导体激光器滤波特性. 数值模拟了两相同参数的半导体激光器构建的闭环同步混沌通信系统中,

接收机对相同幅度下不同频率和相同频率下不同幅度的传输信号的提取能力. 结果表明, 混沌保密通信系统中接收机对传输信号的提取质量不仅与实现混沌同步的两激光器的同步质量有关, 而且与传输信号的频率和幅度有关. 相同幅度下的调制信号在信号频率较低时提取信号质量较高, 此时的滤波效果最

佳.当信号频率接近激光器的弛豫振荡频率时,所提取信号的质量最低,此时接收机的滤波效果最差,信号恢复的难度也最大.相同频率下的调制信号在幅度

适中处提取信号质量较高,此时的滤波效果最佳,而调制信号的幅度太大或太小,其滤波效果都较差.这一结论对提高混沌保密通信的质量具有参考价值.

- [1] Pecora L M , Carroll T L 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 821
- [2] Pecora L M , Carroll T L 1991 *Phys. Rev. A* **44** 4
- [3] Sugawara T , Tachikawa M , Tsukamoto T , Shimizu T 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 3502
- [4] Roy R , Thornburg K S 1994 *Phys. Rev. Lett.* **72** 2009
- [5] Zhu S Q , Wu L 2003 *Chin. Phys.* **12** 300
- [6] Van Wiggeren G D , Roy R 1998 *Science* **279** 1198
- [7] Sungchul K , Byoung-ho L , Dong H K 2001 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **13** 290
- [8] Luo X S , Wang B H , Chen G R *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 988 (in Chinese) [罗晓曙、汪秉宏、陈关荣等 2002 物理学报 **51** 998]
- [9] Li X F , Pan W , Ma D , Lwo 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]
- [10] Yan S L , Chi Z Y , Chen W J , Wang Z N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 1709 (in Chinese) [颜森林、迟泽英、陈文建、王泽农 2004 物理学报 **53** 1709]
- [11] Fischer I , Liu Y , Davis P 2000 *Phys. Rev. A* **62** R011801
- [12] Paul J , Lee M W , Shore K A 2004 *Opt. Lett.* **29** 2497
- [13] Uchida A , Liu Y , Davis P 2003 *IEEE J. Quantum Electron.* **39** 963
- [14] Vicente R , Toni P , Mirasso C R 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 9
- [15] Argyris A , Syvridis D , Larger L *et al* 2005 *Nature* **438** 343
- [16] Ohtsubo J 2002 *IEEE J. Quantum Electron.* **38** 1141
- [17] Simpson T B , Liu J M , Gavrielides A 1996 *IEEE J. Quantum Electron.* **32** 1456

High frequency message filtering characteristics of semiconductor laser as receiver in optical chaos communications *

Wang Yun-Cai[†] Li Yan-Li Wang An-Bang Wang Bing-Jie Zhang Geng-Wei Guo Ping

(*Department of Physics , Taiyuan University of Technology , Taiyuan 030024 , China*)

(Received 21 December 2006 ; revised manuscript received 1 February 2007)

Abstract

The high frequency message filtering characteristics of the semiconductor laser which act as a receiver are numerically simulated in a scheme of closed-loop optical chaos communications system. Both transmitter and receiver are realized by semiconductor lasers subject to strong optical injection. We examined the filtering properties of semiconductor laser with modulation message with different frequencies and amplitudes. The results demonstrate that the filtering effectiveness of the semiconductor laser receiver is higher for low frequency message and decreases as the message frequency approaches the relaxation oscillation frequency of the semiconductor laser. The quality of message recovery in such systems is shown to depend not only on the synchronization quality but also on the difference in amplitude of the message in the transmitter and receiver outputs.

Keywords : chaos , chaos synchronization , semiconductor laser , filter

PACC : 4280W , 4255 , 4260

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60577019).

[†] E-mail : wangyc@tyut.edu.cn