

利用 Fabry-Perot 半导体激光器实现混沌光通信波长转换*

丁燕青, 王云才, 王安帮, 贺虎成, 张明江

(太原理工大学 理学院 物理系, 太原 030024)

摘要: 提出并数值验证了基于交叉增益调制效应的混沌光通信波长转换实现方案.在单向耦合的混沌光通信链路中,利用Fabry-Perot (F-P) 半导体激光器内部的交叉增益调制,实现混沌保密通信信道的波长转换.对于给定的F-P激光器,当加载信号频率为1.2 GHz时,在15 nm的波长转换范围都能获得信噪比大于8 dB的提取信号.同时发现波长转换前后系统提取信号的信噪比受波长转换间隔和信号频率的影响,但系统的传输速率上限不会因此而降低,仍与无波长转换时相同.

关键词: 混沌光通信; 波长转换; 半导体激光器; 波分复用

中图分类号: TN929.11; TN248.4 文献标识码: A

0 引言

随着光纤通信技术的快速发展,通信系统的保密性能越来越受到重视,激光混沌通信是实现数据保密传输的一种新方案,已得到广泛关注^[1-3].同时,波分复用(WDM)技术是提高系统传输容量的有效途径.结合波分复用技术的混沌波分复用系统在未来全光通信网发展中有潜在的应用前景^[4].如何实现混沌光信号的波长转换是混沌波分复用(CWDM)系统中的一个关键技术,在CWDM系统中利用波长转换器不仅能增加波长再利用,还能提高系统及光网络的灵活性,提高波分复用系统的容量.2007年Annovazzi等人实验上证实了在混沌同步通信系统中利用半导体光放大器(SOA)作为波长转换器的可行性:基于SOA的四波混频效应实现了混沌隐藏信号的波长转换,并提取出隐藏在混沌载波中的信号^[5].

基于半导体激光器的波长转换技术具有转换带宽较大、啁啾小、消光比特性好、成本低廉等诸多优点^[6-8].本文提出利用Fabry-Perot (F-P) 半导体激光器作为波长转换器,基于其内部的交叉增益调制效应实现光混沌通信中的波长转换方案,建立了理论模型,数值模拟实现在15nm转换波长间隔内光混沌信号的波长转换及混沌载波中隐藏信息的提取,并进一步分析了转换的波长间隔及加载信号的频率对接收机提取信号质量的影响.

1 系统模型

图1为闭环混沌通信系统中基于FP半导体激光

器实现波长转换的原理示意图,图中发射机与接收机是由两个结构参量一致的带反馈DFB半导体激光器组成,它们的波长分别为 λ_1 和 λ_2 .选择适当的反馈光强度,DFB1激光器将输出混沌激光作为保密通信中的混沌载波.信号可通过电流调制方式加载在发射机输出的混沌载波中.加载信号的混沌载波与DFB2产生的波长为 λ_2 的连续光同时注入到FP半导体激光器中,由于交叉增益调制效应,FP半导体激光器的波长为 λ_2 输出将随着注入的发射机混沌光信号的变化而变化,并与发射机的信号反相,完成全光波长转换.FP激光器经过可调谐滤波器后滤出波长为 λ_2 的带有信息的混沌载波后,再通过分束器BS分成两束:一束通过光隔离器OI注入到波长为 λ_2 的接收激光器DFB3中,另一束输入到减法器中与接收机输出的混沌波相减,得到波长转换后的加载信息.

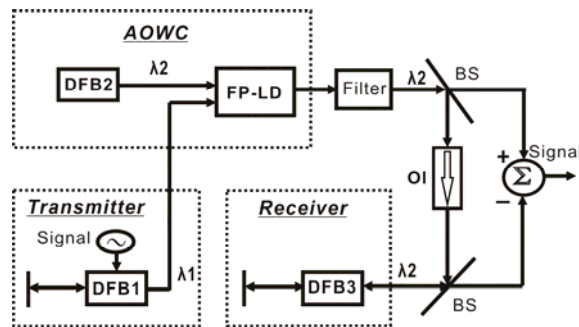


图1 波长转换的原理

Fig.1 Schematic diagram of wavelength conversion

对于以上物理模型,发射机和接收机采用考虑光反馈与光注入的半导体激光器 Lang-Kobayashi 速率方程进行描述^[10],这里为简单考虑用双模速率方程描述FP半导体激光器

*国家自然科学基金(60577019 和 60777041)资助

Tel:0351-6018134

E-mail:wangyc@tyut.edu.cn

收稿日期: 2008-12-13

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{I(t)}{qV} - \frac{N(t)}{\tau_n} - \frac{S_1(t)(N(t)-N_0)g_1}{1+\varepsilon(S_1(t)+S_2(t))} - \frac{S_2(t)(N(t)-N_0)g_2}{1+\varepsilon(S_1(t)+S_2(t))} \quad (1)$$

$$\frac{dS_{1,2}(t)}{dt} = \frac{\Gamma\beta N(t)}{\tau_n} - \frac{S_{1,2}(t)}{\tau_p} + \frac{S_{1,2}(t)(N(t)-N_0)g_{1,2}\Gamma}{1+\varepsilon(S_1(t)+S_2(t))} + 2\frac{k_{inj1,2}}{\tau_{in}}\sqrt{S_{1,2}(t)P_{1,2}(t)}\cos\xi_{1,2}(t) \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi_{1,2}(t)}{dt} = \frac{1}{2}\alpha g_{1,2}\Gamma\left(\frac{N(t)-N_0}{1+\varepsilon(S_1(t)+S_2(t))} - \frac{1}{\tau_p}\right) - \frac{k_{inj1,2}}{\tau_{in}}\sqrt{\frac{P_{1,2}(t)}{S_{1,2}(t)}}\sin\xi_{1,2}(t) \quad (3)$$

式(1)~(3)中脚标“1”和“2”分别表示外光注入 F-P 激光器对应的两个模式 $\lambda_{1,2}$, $S_{1,2}(t)$ 表示两个模式对应的光子数密度, $P_{1,2}(t)$ 为激光器 DFB1 和 DFB2 的光子数密度, $N(t)$ 和 $\varphi(t)$ 分别是半导体激光器的载流子密度及电场的相位, 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, $I(t)$ 为半导体激光器的偏置电流, $\xi_{1,2}(t) = \varphi_{1,2}(t) + \Delta\omega_{1,2}t$, 其中 $\Delta\omega_{1,2}$ 为激光器 DFB1 和 DFB2 对 FP 激光器相应模式的光频失谐, V 为激光腔的有源区体积, q 为电荷电量, 同时定义被注入激光器的注入系数 k_{inj} 分别为

$$k_{inj} = (1/\tau_{in})(1-r^2)(r_{inj}/r) \quad (4)$$

其中 r 是激光器输出端面反射率, τ_{in} 是光在激光器谐振腔内的往返周期, r_{inj} 为外光注入到激光器谐振腔的注入比. 若要实现波长转换以及 FP 激光器的滤波后输出与接收机混沌同步, 最终得到波长转换后的信息, 各激光器的参量应近似相等, 数值模拟时首先考虑各激光器主要参量取值相同, 具体的取值如表 1:

表 1 各个符号的物理意义和取值

符号	物理意义	值
q	电荷电量	$1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
V	有源区体积	$1.2 \times 10^{-16} \text{ m}^3$
τ_n	载流子寿命	2 ns
τ_p	光子寿命	2 ps
τ_{in}	谐振腔内往返周期	10 ps
Γ	光场限制因子	0.5
τ_c	注入光延迟时间	1 ns
τ	反馈光延迟时间	1 ns
N_0	透明载流子密度	10^{24} m^{-3}
N_{th}	阈值载流子密度	$1.5 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
I_{th}	阈值电流	13.7 mA
α	线宽增强因子	3
g_0	中心波长微分增益	$2 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{s}$
λ_0	中心波长	1550 nm

给定半导体激光器的参量后, 可以得到发射激光器偏置电流为 20.55 mA 时, 其弛豫振荡频率约为 2.74 GHz, 传输的保密信息是通过注入电流调制加载到发射机输出的混沌载波上. 我们定义注入的调制电流为 $I = I_b + m(I_b - I_{th})I_{th}\sin(2\pi ft)$, 其中 I_b 是偏置电流, m 是调制深度, f 是加载信息的频率.

2 模拟结果及分析

2.1 混沌通信系统中波长转换的实现

在本系统模型下, 通过选择适当的光注入和控制 FP-LD 的偏置电流可实现全光波长转换, 而接收机与 FP-LD 对应模式的混沌同步性能优劣决定了信息恢复能力. 模拟中, 当未加载信息时, 选择 FP-LD 和 DFB3 激光器的偏置电流分别为 30.14 mA 和 16.44 mA, $r_f = 0.3\%$, $r_{inj} = 50\%$, 且激光器输出波长为 $\lambda_1 = 1554.8 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$ 条件下 (此时 $g_i = g_0 / (1 + (\lambda_i - \lambda_0)^2 / \Delta\lambda^2)$, g_0 为中心波长增益系数, $\Delta\lambda$ 为半导体激光器的 3 dB 增益带宽, $\Delta\lambda = 20 \text{ nm}$), 我们可以得到接收机与 FP-LD 对应模式输出光功率的同步相关图 (如图 2), 其对应的相关系数 $\rho = 0.9636$, 略低于无波长转换时系统的同步相关系数 0.9994, 而相关系数越大, 则同步性越好, 相关系数为 1 时, 两者达到完全同步. 同时引入信噪比 (Signal-to-noise Ratio, SNR) 来表征提取出的信号质量, SNR 定义为 $\text{SNR} = 10 \log(P_S/P_N)$, 其中 P_S 和 P_N 分别是信号功率和噪音功率, SNR 越大说明提取的信息质量越好.

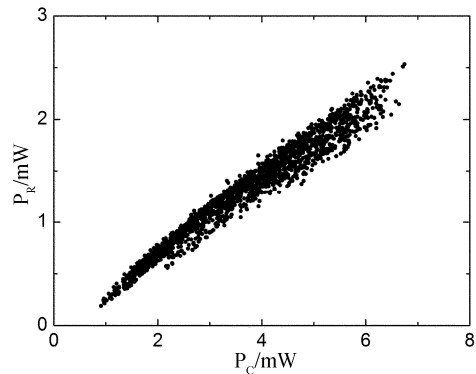


图 2 波长转换后的混沌信号与接收机的输出混沌同步相关

Fig.2 Synchronization correlation plot between the filtered output of convertor and the receiver output

将 0.5 GHz 单频正弦信号通过电流调制方式加载在发射机输出的混沌载波上, 得到波长转换后输出和提取信号的结果. FP 激光器输出波长为 $\lambda_1 = 1554.8 \text{ nm}$ 和 $\lambda_2 = 1550 \text{ nm}$, 信号电流的调制深度 $m = 0.5$. 图 3(a)、(c) 和 (e) 分别是发射机、FP-LD 滤波输出 (λ_2) 和接收机的输出波形, 图 3(b)、(d) 和 (f) 是与之对应的输出功率谱, 图 3(g) 和 (h) 是接收机所提取出的信号波形和功率谱. 从图 3(a) 和 (c) 可以看出, 经过波长转换后的混

混沌载波其波形与发射机输出波形是反相的, 两者的相关系数为-0.68, 从图 3(d)和(f)可以看出, 接收机输出功率谱中信息幅度要低于波长转换后的混沌载波中的信息幅度. 从图 3(g)可以看出经过相减后提取出的信号质量佳, 信噪比为 19.74 dB. 比较发射机输出频谱(图 3(b))与提取出的信号频谱(图 3(h)), 可以

得到提取出的信号功率比发射时下降约 4 dB, 而混沌载波功率明显下降 18 dB 左右, 表明接收机具有较好的滤波特性. 由此证实利用半导体激光器可以实现混沌光通信中加载信号的混沌载波波长转换以及信号的提取.

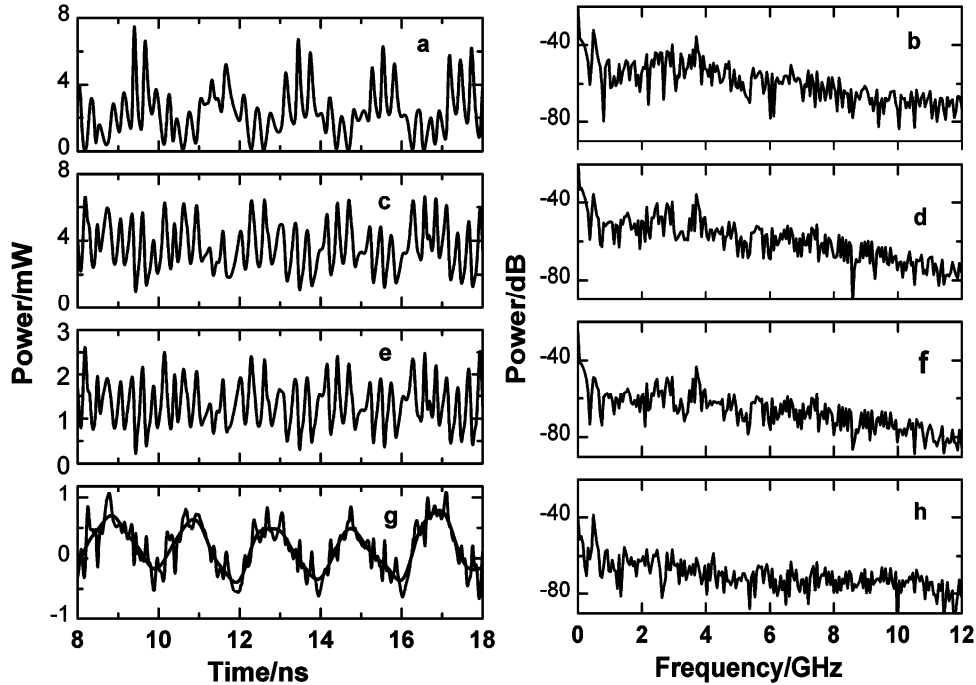


图3 激光器输出光功率谱和波形
Fig.3 Time traces and power spectra of the lasers

2.2 波长转换范围

图4为加载信号频率分别为0.5 GHz和1.2 GHz时, 提取信号的信噪比随着波长转换范围的变化情况. 波长间隔 $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$, 当 $\Delta\lambda > 0$ 时为上转换, $\Delta\lambda < 0$ 时为下转换. 从图中可以看出, 波长转换范围在15 nm内、信号频率低于1.2 GHz时, 提取的信号的信噪比均大于8 dB, 且在上转换和下转换区间各存在一个最佳的波长间隔值, 使提取出的信号信噪比最高, 继续增大转换的波长间隔, 信噪比又将下降.

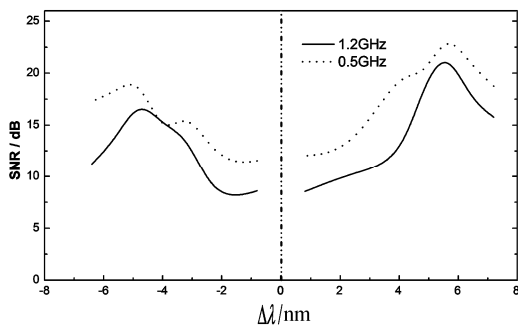


图4 信噪比与转换波长范围的关系
Fig.4 SNRs as a function of the wavelength conversion span

该最佳波长间隔值的存在, 是由于FP半导体激光器增益谱中各模式获得的增益不同, 外光注入下其载流子受到调制, 各模式对增益变化的响应不同^[9]; 而再增

大波长转换间隔, 信噪比又将下降, 是由于半导体激光器的交叉增益饱和和作用随着波长间隔增大而减弱, 造成转换效率的降低. 这结果可为在混沌通信中实现波长转换后得到最佳提取信号质量选择合适的激光器转换波长提供参考.

2.3 波长转换对传输带宽的影响

图 5 是接收机提取出的信号信噪比随着加载信号频率的变化. 图中实线所示为转换波长间隔 4.8 nm 时的情况, 可以看出随着信号频率的增加, 提取信号的信噪比降低, 当信号频率为 2.5 GHz 时, 信噪比已低至 5.4 dB, 当信号频率接近弛豫振荡频率时 (2.74

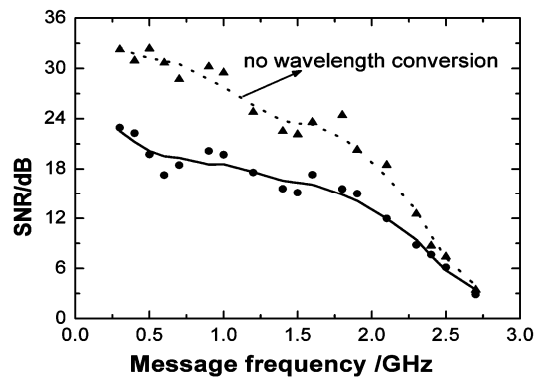


图5 提取出的信号信噪比与信号频率的关系
Fig.5 SNRs as a function of the message frequency

GHz)信噪比低于 3 dB,已不能满足通信系统对信号质量的要求.这种趋势与接收机滤波效果随着信号频率的增加而降低^[10]的现象相似.通过与未进行波长转换的混沌通信系统相比较(如图中虚线部分所示),波长转换后系统提取信号的信噪比有整体降低的趋势,但系统的传输速率上限不会因此而降低,与无波长转换时相同,都取决于混沌载波带宽或激光器的弛豫振荡频率.如果要进一步提高系统的传输速率,可以通过提高混沌载波带宽的途径.

3 结论

本文理论提出了利用FP半导体激光器实现混沌光通信中波长转换的方案,建立了波长转换的混沌光通信的理论模型,数值模拟证实了基于FP激光器交叉增益调制可以实现混沌光信号的波长转换及信号提取.结果表明当加载信号频率为1.2 GHz时,在15 nm的波长转换范围都能获得信噪比大于8 dB的提取信号.同时,该方法不会影响系统的传输带宽,只是在一定程度上降低了系统提取信号的信噪比,且经过波长转换后系统接收机的滤波特性与系统无波长转换时相似.利用FP激光器交叉增益调制效应实现激光混沌通信的波长转换具有结构简单,转换范围宽等特点,这一结果对于混沌光通信中波长转换的应用具有重要的指导作用.

参考文献

- [1] VANWIGGEREN G D, ROY R. Communication with Chaotic Lasers[J]. *Science*, 1998, **279**(20): 1198-1200.

- [2] TANG S, CHEN H F, HWANG S K, *et al.* Message encoding and decoding through chaos modulation in chaotic optical communications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2002, **49**(2): 163-169.
- [3] ARGYRIS A, SYVRIDIS D, LARGER L, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, **438**(17): 343-346.
- [4] MATSUURA T, UCHIDA A, YOSHIMORI S. Chaotic wavelength division multiplexing for optical communication[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(23): 2731-2733.
- [5] VALERIO A L, GIUSEPPE A, MAURO B, *et al.* All-optical wavelength conversion of a chaos masked signal[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(22): 1783-1785.
- [6] HÖRER J, PATZAK E. Large-Signal Analysis of All-Optical Wavelength Conversion Using Two-Mode Injection-Locking in Semiconductor Lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1997, **33**(4): 596-608.
- [7] ZHAO Tong-gang, REN Jian-hua, LI Wei, *et al.* Theoretical Model Analysis of Wavelength Conversion Based on Semiconductor Laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9):1071-1075.
赵同刚, 任建华, 李蔚, 等. 半导体激光器实现波长转换的理论模型分析[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1071-1075.
- [8] YE H C H, CHI S. A wavelength converting and switching method based on Fabry-Perot laser diodes[J]. *Optics Communications*, 2005, **256**(1-3): 103-107.
- [9] AN Yi, WANG Yun-Cai, ZHANG Ming-Jiang, *et al.* All optical wavelength conversion and optimum longitudinal mode selection using an injection-locked Fabry-Perot laser diode[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(8):4995-4999.
安义, 王云才, 张明江, 等. 基于 Fabry-Perot 半导体激光器实现全光波长转换及其最优纵模选择[J]. *物理学报*, 2008, **57**(8): 4995-4999.
- [10] WANG Yun-Cai, LI Yan-Li, WANG An-Bang, *et al.* High frequency message filtering characteristics of semiconductor laser as receiver in optical chaos communications[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(8): 4686-4692.
王云才, 李艳丽, 王安帮, 等. 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[J]. *物理学报*, 2007, **56**(8): 4686-4692.

All-optical Wavelength Conversion for Chaotic Optical Communication Using Fabry-perot Laser

DING Yan-qing, WANG Yun-cai, WANG An-bang, HE Hu-cheng, ZHANG Ming-jiang
(Department of Physics, College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Received data:2008-12-13

Abstract: Wavelength conversion for chaotic optical communication based on cross-gain modulation effect was proposed and numerically demonstrated. In an unidirectional coupled link of chaotic optical communication, wavelength conversion was achieved by using a Fabry-Perot laser. For 1.2 GHz message frequency, the wavelength conversion range was 15nm, in which the signal to noise ratio of recovered message was beyond 8dB. Though the SNR of recovered message is affected by the wavelength conversion span and the message frequency in such system compared with no wavelength conversion, the upper limit of transmission rate still remains.

Key words: Optical chaos communication; Wavelength conversion; Semiconductor laser; Wavelength division multiplexing



DING Yan-qing was born in 1980. She received B. S. degree from Taiyuan University of Technology in 2004. Now she is a M.S. degree candidate at Department of Physics in Taiyuan University of Technology, and she is engaged in the studies of optical communication.