

# 基于相位共轭及交叉相位共轭反馈的 耦合激光器混沌增频

颜森林\*

南京晓庄学院电子工程学院, 江苏 南京 211171

**摘要** 提出了一种基于相位共轭及交叉相位共轭反馈半导体激光器的耦合非线性动力学系统, 分析了频率失谐及频率增强原理, 研究了 4 个相位共轭反馈技术方案并进行两激光器混沌增频。研究表明, 当利用相位共轭反馈对单个激光器进行混沌增频时, 增频效果显著增强到原来的 4 倍; 当利用相位共轭双反馈对两耦合激光器同时进行混沌增频时, 增频效果达到原来的 5 倍以上, 且谱线明显展宽; 当利用相位共轭交叉反馈对激光器进行混沌增频时, 激光器混沌振荡频率可被显著增加到原来的 4.4 倍; 当利用相位共轭双交叉反馈对两个激光器同时进行混沌增频时, 两激光器混沌振荡频率同时显著增加到原来的 4 倍或 6 倍, 频谱明显展宽。此外, 还提出了一种利用相位共轭双交叉反向反馈增加激光器混沌振荡频率的方法, 研究表明: 随着反馈量的增加, 两激光器混沌振荡频率增加, 最大可增加到原来的 4.2 倍或 5.9 倍, 且频谱显著展宽。

**关键词** 非线性光学; 混沌; 激光技术; 增频; 相位共轭

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0808003

## Enhancing Chaotic Frequency of Coupled Lasers Based on Phase Conjugation and Cross-Phase Conjugation Feedback

Yan Senlin\*

Electronic Engineering School, Nanjing Xiaozhuang University, Nanjing, Jiangsu 211171, China

**Abstract** A coupling nonlinear dynamic system based on semiconductor lasers with phase conjugation and cross-phase conjugation feedback is presented. The principles of frequency detuning and frequency enhancement are analyzed, and four phase conjugation feedback schemes for frequency enhancement of two chaotic lasers are studied. It is found that the chaotic spread frequency effect of the laser can be increased to 4 times when the phase conjugation feedback is applied to a single laser. When the chaotic frequencies of two coupled lasers are increased with phase conjugation double-feedback, it is found that the frequencies of chaotic oscillation are obviously increased to more than 5 times and spectra are obviously broadened. When the cross-phase conjugation feedback is operated on a laser, the chaotic oscillation frequency can be increased to 4.4 times. When the cross-phase conjugation feedback is operated on two lasers, the chaotic oscillation frequencies of the two lasers are increased significantly, which can be increased to 4 times or 6 times, and the spectra are greatly broadened. In addition, a method for increasing the chaotic oscillation frequency is proposed based on phase conjugation double-cross reverse feedback. Results show that the chaotic oscillation frequencies of the two lasers can increase to 4.2 times or 5.9 times with the increasing feedback level, and the spectra are effectively widened.

**Key words** nonlinear optics; chaos; laser technique; enhanced frequency; phase conjugation

**OCIS codes** 190.3100; 140.1540; 140.3535; 140.3325

## 1 引 言

近年来, 激光混沌在光学保密通信、激光混沌随

机信号发射器以及激光混沌检测等领域得到广泛应用<sup>[1-7]</sup>。其中单个混沌激光器(如光延时反馈激光器、外部光注入激光器、电流调制激光器等)因其结

收稿日期: 2019-03-07; 修回日期: 2019-04-07; 录用日期: 2019-04-19

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20151079)

\* E-mail: senlinyan@163.com

构简单,易于集成、封装以及输出混沌光等优点,已成为混沌信号发射机的首选器件<sup>[1-7]</sup>。在现代数字信号处理中,高速数据处理是最为核心的技术指标之一。在混沌保密通信中,高频或大带宽能够实现激光混沌信号高速保密传送。由于混沌载波的振荡频率影响着带宽以及混沌数字信号高速传送与高速处理等过程,高频混沌产生或混沌增频已成为一项关键技术。目前高频混沌信号产生或混沌增频技术包括外部光注入技术、平面镜光反馈以及光纤环境反馈技术等<sup>[8-11]</sup>,其主要研究对象是单个激光器系统。

本文利用相位共轭技术以及相关组合技术,进行两个耦合半导体激光器的混沌波振荡频率增强等研究。与单个激光器系统相比,两个耦合激光器系统具有更多非线性自变量、维数和结构参数密钥,并能够输出双路混沌载波等优点,可应用于随机信号发生器、保密通信和光计算等领域<sup>[12-20]</sup>。因此,进

行耦合半导体激光器高维混沌系统以及相关增频研究是非常有意义的<sup>[12-20]</sup>。与延时反馈不同的是,相位共轭反馈来回相移为零,因此相位共轭反馈并不增加相移。本文将这项技术以及相关组合技术引入激光混沌增频研究中,提出交叉相位共轭以及反向交叉相位共轭方法,进一步丰富了激光混沌增频技术。

## 2 基本方法与理论

耦合半导体激光器非线性系统具有强烈的非线性相互作用,导致产生了许多非线性动力学行为,如分岔、不稳定及混沌等。在此,首先研究两激光器相位共轭双反馈方法,再研究双共轭交叉反馈方法。考虑两激光器相位共轭双反馈,激光器载流子数、光场的振幅和相位的变化可由耦合非线性方程组来描述<sup>[1-5,14-16]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{\eta}{\tau_L}E_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{k_1}{\tau_L}E_1(t - \tau_1) \cos \Delta_1(t) \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{\eta}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \Delta\omega - \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_1(t - \tau_1)}{E_1(t)} \sin \Delta_1(t), \\ \frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{\eta}{\tau_L}E_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{k_2}{\tau_L}E_2(t - \tau_2) \cos \Delta_2(t) \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{\eta}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \Delta\omega - \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_2(t - \tau_2)}{E_2(t)} \sin \Delta_2(t), \\ \frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - G_2V_pE_2^2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $E$ 表示光场振幅; $\varphi$ 表示相位; $N$ 表示激光器载流子数;下标1和2分别表示激光器1和2; $\Delta(t) = \varphi(t) + \varphi(t - \tau)$ ; $\tau$ 表示延时。激光器主要参量见表1,此外载流子非线性损耗速率和模式增益分别是 $\gamma_e = A_{nr} + B(N/V) + C(N/V)^2$ 和 $G = (\Gamma v_g a/V)(N - N_{th})/\sqrt{1 + E^2/E_s^2}$ ,其中 $v_g$ 表示激光腔内光子的群速度, $V$ 表示激光腔体积, $V_p$ 表示激光模式体积, $\Gamma = V/V_p$ , $N_{th} = n_{th}V$ 表示激光透明时的载流子数;光子损耗速率 $\gamma_p = v_g(\alpha_m + \alpha_{int})$ ; $\tau_L = 2n_g L/c$ 表示光在腔长 $L$ 内来回的时间, $c$ 表示真空中的光速,群速度折射率 $n_g = c/v_g$ ; $k$ 表示光反馈系数; $q$ 表示电子电量。(1)式和(2)式构成了相位共轭双反馈控制条件下的激光耦合混沌增频动力学系统。

下面通过分析在相位共轭双反馈控制条件下激光器不动点的特点,了解其增频基本原理。由(1)式和(2)式可获得两激光器频率失谐为

$$\Delta\omega = \frac{\eta}{\tau_L}E_{20}[\sin(\varphi_{20} - \varphi_{10}) - \beta_c \cos(\varphi_{20} - \varphi_{10})] - \frac{k_1}{\tau_L}E_{10}[\sin(\varphi_{20} + \varphi_{10}) + \beta_c \cos(\varphi_{20} + \varphi_{10})], \quad (3)$$

或

$$\Delta\omega = -\frac{\eta}{\tau_L}E_{10}[\sin(\varphi_{10} - \varphi_{20}) - \beta_c \cos(\varphi_{10} - \varphi_{20})] + \frac{k_2}{\tau_L}E_{20}[\sin(\varphi_{10} + \varphi_{20}) + \beta_c \cos(\varphi_{10} + \varphi_{20})], \quad (4)$$

式中:下标10和20分别代表激光器1和2的不动点。可以发现,当存在相位共轭反馈时,频率失谐将被改变。与此同时,由于混沌具有对系统参数变化

表 1 激光器主要参量  
Table 1 Main parameters of laser

Parameter	Value	Parameter	Value
Cavity length $L / \mu\text{m}$	350	Optical field amplitude at saturation $E_s / \text{m}^{-3/2}$	$1.6619 \times 10^{11}$
Volume of laser cavity $V / \mu\text{m}^3$	105	Gain constant $\alpha / \text{cm}^2$	$2.3 \times 10^{-16}$
Mode coefficient	0.29	Optical linewidth enhancement factor $\beta_c$	6
Photon group velocity index $n_g$	3.8	Frequency detuning $\Delta\omega / \text{GHz}$	1
Photon loss $(\alpha_m + \alpha_{nt}) / \text{cm}^{-1}$	49	Carrier density $n_{th} / \text{cm}^{-3}$	$1.2 \times 10^{18}$
Nonradiative recombination rate $A_{nr} / \text{s}^{-1}$	$1.0 \times 10^8$	Coupling coefficient $\eta$	0.065
Radiative recombination coefficient $B / (\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$1.2 \times 10^{-10}$	Current $I_1 / \text{mA}$	26
Auger recombination coefficient $C / (\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1})$	$3.5 \times 10^{-29}$	Current $I_2 / \text{mA}$	28

极其敏感的固有特性,激光器对光场相位变化(特别是对延时相位变化)也是极其敏感的。当存在相位共轭反馈时,激光器线宽增强因子、非线性增益以及载流子非线性损耗速率等物理量都被改变,这将进一步导致光场相位和频率发生变化。

### 3 相位共轭反馈激光混沌增频结果与讨论

#### 3.1 相位共轭单反馈混沌频率增强特点

图 1 是耦合激光器系统输出的两混沌激光波形及吸引子。其中,激光器 1 混沌波频率是 3.2 GHz,激光器 2 混沌波频率是 4.3 GHz,频率计算时间都在

20~50 ns 范围内。当对激光器 1 进行相位共轭反馈增频时,两激光器混沌频率增强特点如图 2 所示。其中  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $k_1 = 0.3$ ,  $k_2 = 0$ 。图 2 表明,激光器 1 混沌波频率被扩展到 11.9 GHz,频率增加为原来的 3.7 倍,增频效果显著;激光器 2 混沌波频率被扩展到 7.3 GHz,频率增加为原来的 1.7 倍,增频速度缓慢。图 3 给出激光混沌增频和反馈水平的数值关系。其中  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $k_1$  取值为 0.1~0.35,其中,“o”表示激光器 1,“\*”表示激光器 2,  $F$  表示频率,激光器 1 频率整体已向上平移。图 3 表明,激光器 1 混沌增频效果明显,频率随着反馈水平增加而增大,最大可达原来频率的 4 倍,而激光器 2 频率增加比较缓慢。

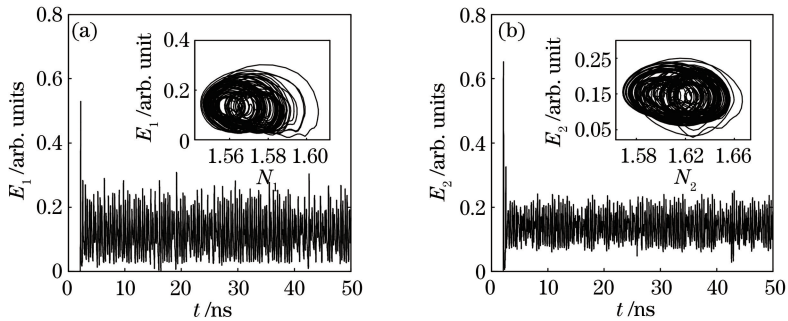


图 1 耦合激光器系统输出的两混沌激光波形及混沌吸引子。(a)激光器 1;(b)激光器 2  
Fig. 1 Chaotic waveforms and attractors of coupled laser system. (a) Laser 1; (b) laser 2

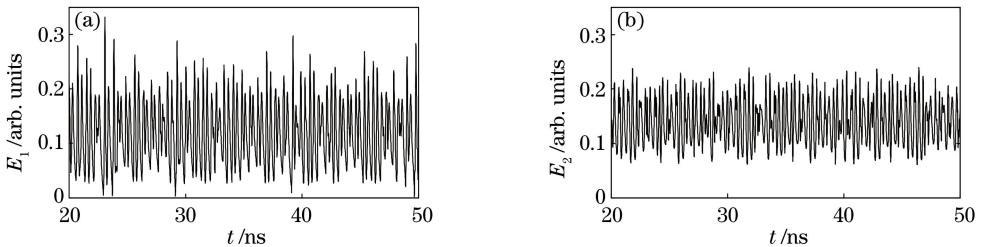


图 2 当对激光器 1 进行相位共轭反馈增频时两激光器的混沌波形。(a)激光器 1;(b)激光器 2  
Fig. 2 Chaotic waveforms of two lasers when phase conjugation feedback is applied to laser 1. (a) Laser 1; (b) laser 2

为了说明激光器参量变化对增频的影响,仅在相位共轭反馈条件下,对激光器 1 的增益和载流子损耗速率的改变进行分析。图 4 和图 5 分别为无相

位共轭反馈情况下激光器 1 增益和载流子损耗速率,两者的速率变化均为 2.7 GHz。而图 6 和图 7 分别为仅当激光器 1 存在相位共轭反馈时,激光器

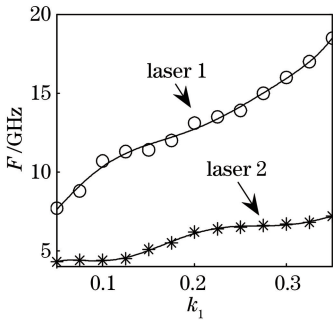


图 3 激光混沌增频和反馈水平的数值关系  
Fig. 3 Numerical relationship between chaotic frequency increase and feedback level

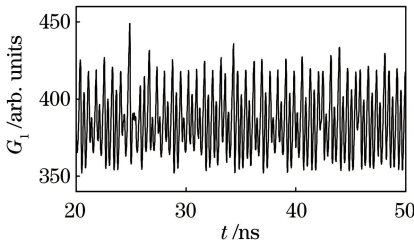


图 4 增益  
Fig. 4 Gain

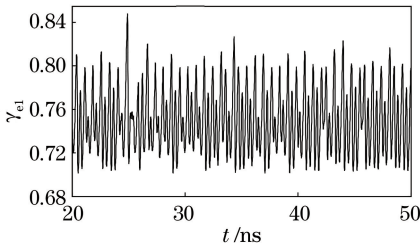


图 5 无相位共轭反馈情况下激光器 1 的载流子损耗速率  
Fig. 5 Carrier loss rate of laser 1 without phase conjugation feedback

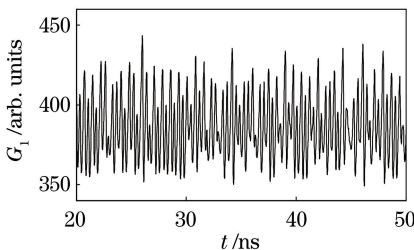


图 6 仅当激光器 1 存在相位共轭反馈时的增益  
Fig. 6 Gain of laser 1 with phase conjugation feedback

1 的增益和载流子损耗速率。其中  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $k_1 = 0.3$ ,  $k_2 = 0$ 。图 6 和图 7 表明,激光器 1 的增益变化频率是 8.9 GHz,而激光器 1 的载流子损耗速率变化为 7.3 GHz。由于相位共轭反馈的存在,激光器 1 的增益变化和载流子损耗速率均发生改变,从而导致激光频率的改变,这也是激光器频率增加的主要

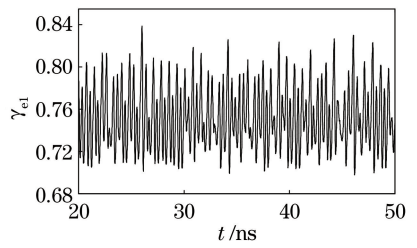


图 7 仅当激光器 1 存在相位共轭反馈时的载流子损耗速率  
Fig. 7 Carrier loss rate of laser 1 with phase conjugation feedback

原因之一。

图 8 为延时对激光器增频的影响,取  $k_1 = 0.3$ ,  $k_2 = 0$ ,延时变化范围为 0.6~4 ns。由图可知,在  $\tau_1 = 1.5 \text{ ns}$  时激光器 1 增频最大;在  $\tau_1 = 2.5 \text{ ns}$  时,激光器 1 增频最小,延时对激光器 1 增频影响显著,而对激光器 2 增频影响不明显。当仅对激光器 2 进行相位共轭反馈增频时,两激光器混沌频率增强特点如图 9 所示,其中,“o”表示激光器 1,“\*”表示激光器 2,取  $k_1 = 0$ ,  $\tau_2 = 1 \text{ ns}$ ,  $k_2$  取值范围为 0.1~0.325。由图可知,两激光器混沌波频率随着反馈水平增加而增大。激光器 2 混沌波频率被扩展到 14.5 GHz,增加约 3.4 倍,增频效果显著;而激光器 1 混沌波频率扩展较缓慢,频率被扩展到 6.6 GHz,增加约 2 倍。总体而言,单个激光器相位共轭反馈增频时,单个激光器频率增加明显,可以达到 3 倍以上,而另外一个激光器频率增加缓慢,但也达到增频目的。

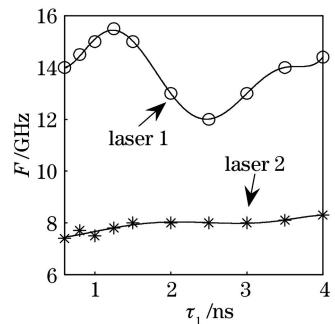


图 8 延时对激光器增频的影响  
Fig. 8 Influence of delay on frequency increase

### 3.2 相位共轭双反馈混沌频率增强特点

当激光器 1 和 2 都存在相位共轭反馈时,可实现相位共轭双反馈混沌频率增强目的。当  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $\tau_2 = 1 \text{ ns}$ ,  $k_1$  和  $k_2$  取值范围为 0.1~0.325 时,激光混沌增频结果如图 10 所示,两个激光器混沌波频率扩展都非常明显。激光器 1 频率最大可扩展到 16.6 GHz,增加到原来的 5.2 倍;激光器 2 频率最大

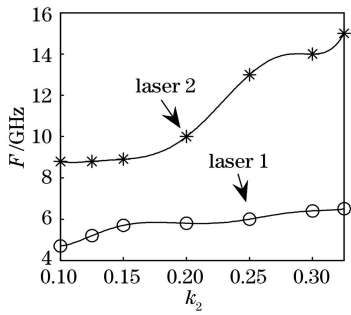


图 9 当仅对激光器 2 进行相位共轭反馈增频时，两激光器激光混沌增频与反馈水平的数值关系

Fig. 9 Numerical relationship between chaotic frequency increase and feedback level when phase conjugation feedback is applied to laser 2

可扩展到 14.8 GHz, 增加到原来的 3.4 倍。当取  $\tau_1=1\text{ ns}, \tau_2=1.5\text{ ns}, k_1=k_2=0.3$  时, 激光器 1 频率可扩展到 14.7 GHz, 达到原来的 4.6 倍; 激光器 2 频率可扩展到 14.3 GHz, 达到原来的 3.3 倍, 激光混沌频率扩展效果也很显著。取不同延时和不同反

馈条件(如  $\tau_1=1\text{ ns}, \tau_2=1.5\text{ ns}, k_1=0.3, k_2=0.325$ )时, 激光器 1 频率可扩展到 14.9 GHz, 达到原来的 4.6 倍; 激光器 2 频率可扩展到 14.8 GHz, 达到原来的 3.4 倍, 激光混沌频率扩展效果也很显著。图 11 和图 12 为激光器增频前、后的频谱图, 对比可得, 两激光器增频后频谱都明显增宽。上述结果说明, 相位共轭双反馈混沌频率增强效果显著。

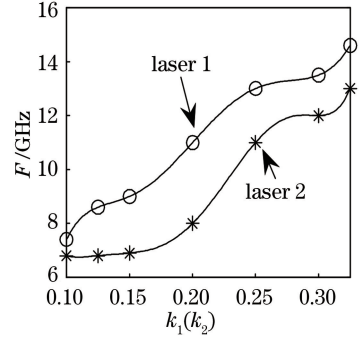


图 10 反馈水平对增频的影响

Fig. 10 Effect of feedback level on frequency increase

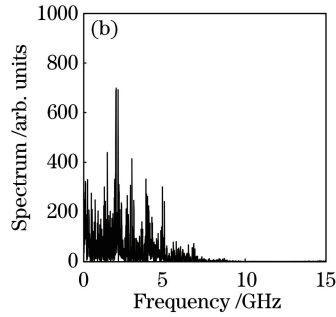
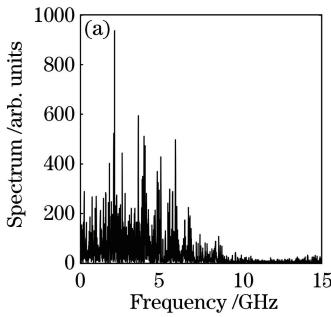


图 11 激光器增频前频谱。(a)激光器 1; (b)激光器 2

Fig. 11 Spectra of lasers before increasing frequency. (a) Laser 1; (b) laser 2

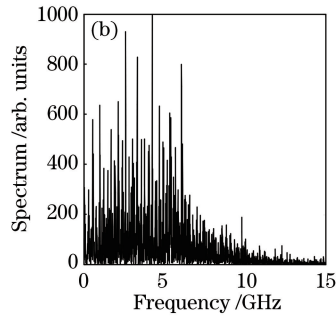
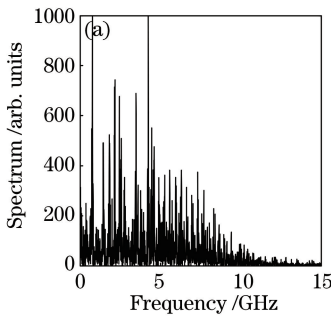


图 12 激光器增频后频谱。(a)激光器 1; (b)激光器 2

Fig. 12 Spectra of lasers after increasing frequency. (a) Laser 1; (b) laser 2

## 4 相位共轭交叉反馈激光混沌增频

### 4.1 基本方法与物理模型

相位共轭交叉反馈激光混沌增频基本方法如

下: 使激光器 1 输出光经过相位共轭反射镜反馈输送给激光器 2, 再经过相位共轭反射镜反馈输送给激光器 1。事实上, 这是一个双循环激光耦合动力学系统, 其理论模型为

$$\begin{cases} \frac{dE_1}{dt} = \frac{1}{2}(G_1 - \gamma_p)E_1 + \frac{\eta}{\tau_L}E_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) + \frac{k_1}{\tau_L}E_2(t - \tau_2) \cos \Delta_2(t) \\ \frac{d\varphi_1}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_1 - \gamma_p) + \frac{\eta}{\tau_L} \frac{E_2}{E_1} \sin(\varphi_2 - \varphi_1) - \Delta\omega - \frac{k_1}{\tau_L} \frac{E_2(t - \tau_2)}{E_1} \sin \Delta_2(t), \\ \frac{dN_1}{dt} = \frac{I_1}{q} - \gamma_{e1}N_1 - G_1V_pE_1^2 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{dE_2}{dt} = \frac{1}{2}(G_2 - \gamma_p)E_2 + \frac{\eta}{\tau_L}E_1 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \frac{k_2}{\tau_L}E_1(t - \tau_1) \cos \Delta_1(t) \\ \frac{d\varphi_2}{dt} = \frac{1}{2}\beta_c(G_2 - \gamma_p) + \frac{\eta}{\tau_L} \frac{E_1}{E_2} \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + \Delta\omega - \frac{k_2}{\tau_L} \frac{E_1(t - \tau_1)}{E_2} \sin \Delta_1(t). \\ \frac{dN_2}{dt} = \frac{I_2}{q} - \gamma_{e2}N_2 - G_2V_pE_2^2 \end{cases} \quad (6)$$

## 4.2 结果与讨论

### 4.2.1 单个激光器交叉相位共轭反馈增频

令激光器 1 发射光经过相位共轭反馈给激光器 2 进行频率增强。当  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $k_2$  取值为  $0.1 \sim 0.325$  时, 单个激光器交叉反馈水平对增频的影响如图 13 所示。由图可知, 激光器 1 频率最大可增加至  $14.8 \text{ GHz}$ , 增加为原来的 4.4 倍, 激光器 2 频率最大可增加至  $15 \text{ GHz}$ , 增加为原来的 3.4 倍, 两个激光器增频效果显著, 并随着反馈水平增加而增加。

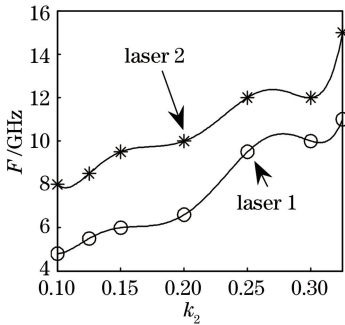
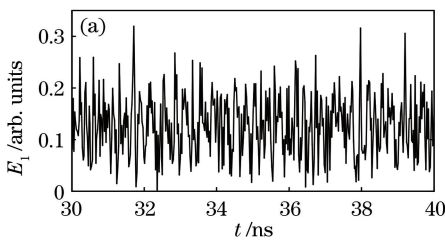


图 13 单个激光器交叉反馈水平对增频的影响

Fig. 13 Effect of cross feedback level of single laser on frequency increase

### 4.2.2 交叉相位共轭双反馈两激光器增频

研究交叉相位共轭双反馈两激光器混沌增频



时, 取  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $\tau_2 = 1.2 \text{ ns}$ ,  $k_1$  取值范围为  $0.1 \sim 0.4$ ,  $k_2$  取值范围为  $0.11 \sim 0.41$ , 两激光器交叉反馈水平对增频的影响如图 14 所示。由图可知, 激光器 1 频率最大增加至  $17.7 \text{ GHz}$ , 增加为原来的 5.5 倍, 激光器 2 频率最大增加到  $17.5 \text{ GHz}$ , 增加为原来的 4 倍, 该交叉相位共轭双反馈两激光器增频效果显著。

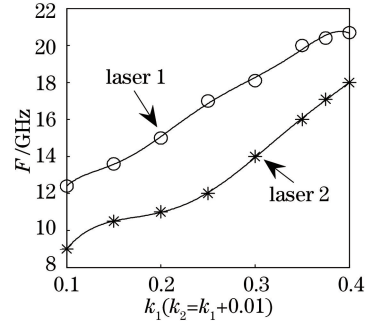


图 14 两激光器交叉反馈水平对增频的影响

Fig. 14 Effect of cross feedback levels of two lasers on frequency increase

图 15 为交叉相位共轭双反馈两激光器混沌增频效果, 图 16 为交叉相位双反馈增频激光频谱。当  $\tau_1 = 6 \text{ ns}$ ,  $\tau_2 = 5 \text{ ns}$ ,  $k_1 = 0.4$ ,  $k_2 = 0.41$  时, 激光器 1 频率最大增加到  $19.4 \text{ GHz}$ , 增加为原来的 6 倍; 激

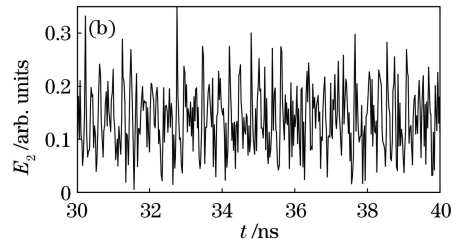


图 15 交叉相位共轭双反馈两激光器混沌增频效果。(a)激光器 1;(b)激光器 2

Fig. 15 Chaotic frequency increasing effect of two lasers with cross-phase conjugation double-feedback. (a) Laser 1; (b) laser 2

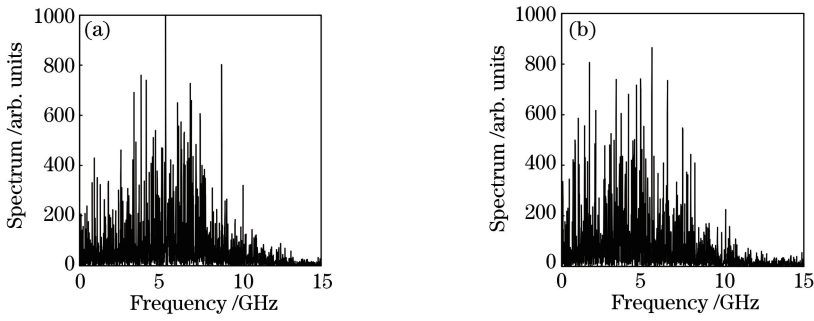


图 16 交叉相位共轭双反馈增频激光频谱。(a)激光器 1;(b)激光器 2

Fig. 16 Laser frequency spectra via cross-phase conjugation double-feedback. (a) Laser 1; (b) laser 2

激光器 2 频率最大增加到 17.5 GHz,增加为原来的 4 倍,其混沌频率增加及频谱展宽效果非常显著。

#### 4.2.3 交叉相位共轭反向双反馈两激光器混沌增频

在交叉相位共轭双反馈方法基础上,分别对双反馈光进行偏振方向控制(如偏振方向改变  $180^\circ$ ),再分别输入到两激光器中,实现交叉相位共轭反向双反馈两激光器混沌增频。两激光器交叉反向反馈水平对增频的影响如图 17 所示。其中,参量取  $\tau_1 = \tau_2 = 1.2 \text{ ns}$ ,  $k_1$  和  $k_2$  的取值范围为  $0.1 \sim 0.4$ ,两激光器混沌波振荡频率均随着反馈水平增加而增加,增频效果显著。其中,激光器 1 频率最大可增加到 19.1 GHz,频率扩展为原来的 5.9 倍。激光器 2 频率最大可增加到 18.1 GHz,频率扩展为原来的 4.2 倍。

当  $\tau_1 = 1 \text{ ns}$ ,  $\tau_2 = 1.25 \text{ ns}$ ,  $k_1 = k_2 = 0.3$  时,激光器 1 频率可增加到 15.1 GHz,频率扩展为原来的 4.7 倍,激光器 2 频率可增加到 14.5 GHz,频率扩展为原来的 3.3 倍;当  $\tau_1 = 0.75 \text{ ns}$ ,  $\tau_2 = 0.95 \text{ ns}$ ,  $k_1 =$

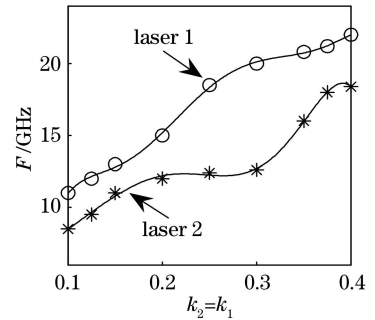


图 17 两激光器交叉反向反馈水平对增频的影响  
Fig. 17 Effects of cross reverse feedback levels of two lasers on frequency increase

$k_2 = 0.4$  时,激光器 1 频率可以增加至 16.8 GHz,频率扩展为原来的 5.2 倍,激光器 2 频率可增加至 16.4 GHz,频率扩展为原来的 3.8 倍。图 18 给出了交叉相位共轭反向双反馈激光增频频谱。与图 11 相比,图 18 中谱线明显增宽,说明交叉相位共轭反向双反馈对两激光器混沌增频扩谱效果是显著的。

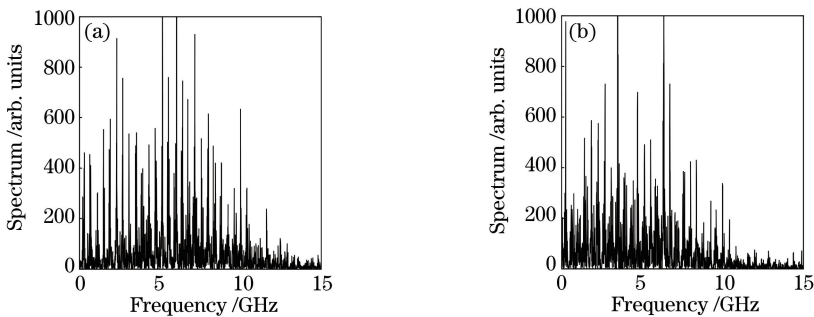


图 18 交叉相位共轭反向双反馈激光增频频谱。(a)激光器 1;(b)激光器 2

Fig. 18 Spectra after frequency increasing via cross-phase conjugation reverse dual-feedback. (a) Laser 1; (b) laser 2

## 5 结 论

分析了频率失谐以及频率增加原理,研究了 4 种相位共轭反馈方法对耦合激光器进行混沌增频,形成了相位共轭以及交叉相位共轭反馈耦合非线性激光动力学系统。研究结果表明,激光器增益、载流

子损耗速率等参量的改变均使频率增加。相位共轭双反馈对两耦合激光器混沌增频效果显著,频谱明显展宽,振荡频率增至原来的 5 倍以上。当进行单个激光器相位共轭反馈时,共轭反馈的激光器混沌频率也可增加为原来的 4 倍;当利用相位共轭双交叉反馈对两个激光器进行增频时,两激光器混沌振

荡频率同时被显著增至原来的 4 倍或 6 倍;仅对一个激光器进行增频时,振荡频率还可增加为原来的 4 倍。此外,研究了相位共轭双交叉反向反馈对激光器进行混沌增频,结果表明,振荡频率随着反馈量的增加而增大,可分别增至原来的 4.2 倍和 5.9 倍,增频扩谱效果明显。总体看来,4 种相位共轭反馈方法对耦合激光器的混沌增频扩谱效果是显著有效的。在混沌保密通信方面,利用该激光器系统进行增频,可显著提高调制速率,增加带宽,大大增宽信号屏蔽范围,增加信息窃取难度,实现了混沌保密通信;在混沌光计算方面,利用该激光器系统进行增频,可增加计算速率;将该激光系统作为随机信号发生器,将会显著提高随机信号发射速率,且由于该系统能够输出两路激光(相当于具有 2 个混沌信号发生器),也可明显提高其使用效益。提出的激光动力学系统,对激光技术与系统、激光混沌增频、非线性光学研究也是非常有益的。

## 参 考 文 献

- [1] Heil T, Mulet J, Fischer I, *et al.* ON/OFF phase shift keying for chaos-encrypted communication using external-cavity semiconductor lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2002, 38(9): 1162-1170.
- [2] Paul J, Lee M W, Shore K A. 3.5-GHz signal transmission in an all-optical chaotic communication scheme using 1550-nm diode lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 17(4): 920-922.
- [3] Annovazzi-Lodi V, Benedetti M, Merlo S, *et al.* Message encryption by phase modulation of a chaotic optical carrier [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, 19(1): 76-78.
- [4] Yuan G H, Zhang X, Wang Z R. Generation and synchronization of feedback-induced chaos in semiconductor ring lasers by injection-locking [J]. *Optik*, 2014, 125(8): 1950-1953.
- [5] Wu J G, Wu Z M, Liu Y R, *et al.* Simulation of bidirectional long-distance chaos communication performance in a novel fiber-optic chaos synchronization system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(3): 461-467.
- [6] Al Bayati B M, Ahmad A K, Al Naimee K A M. Influence of optical feedback strength and semiconductor laser coherence on chaos communications[J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2018, 35(4): 918-925.
- [7] Lawrence A J, Papamarkou T, Uchida A. Synchronized laser chaos communication: statistical investigation of an experimental system [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(2): 8000210.
- [8] Wang A B, Wang Y C, He H C. Enhancing the bandwidth of the optical chaotic signal generated by a semiconductor laser with optical feedback [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1633-1635.
- [9] Wang A B, Wang Y C, Wang J F. Route to broadband chaos in a chaotic laser diode subject to optical injection [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(8): 1144-1146.
- [10] Uchida A, Heil T, Liu Y, *et al.* High-frequency broad-band signal generation using a semiconductor laser with a chaotic optical injection [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2003, 39(11): 1462-1467.
- [11] Takiguchi Y, Ohayagi K, Ohtsubo J. Bandwidth-enhanced chaos synchronization in strongly injection-locked semiconductor lasers with optical feedback [J]. *Optics Letters*, 2003, 28(5): 319-321.
- [12] Erzgräber H, Wiczorek S, Krauskopf B. Locking behavior of three coupled laser oscillators [J]. *Physical Review E*, 2009, 80(2): 026212.
- [13] Zhang W L, Pan W, Luo B, *et al.* Polarization switching of mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2007, 24(6): 1276-1282.
- [14] Hong Y H. Flat broadband chaos in mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 1801007.
- [15] Rogister F, Blondel M. Dynamics of two mutually delay-coupled semiconductor lasers [J]. *Optics Communications*, 2004, 239(1/2/3): 173-180.
- [16] Quirce A, Valle A, Thienpont H, *et al.* Chaos synchronization in mutually coupled 1550-nm vertical-cavity surface-emitting lasers with parallel polarizations and long delay time [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2016, 33(1): 90-98.
- [17] Sciamanna M, Shore K A. Physics and applications of laser diode chaos [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(3): 151-162.
- [18] Ji Y L, Guo X M, Li P, *et al.* Suppression of time-delay signature and enhancement of stochastic statistical properties of chaotic laser by filtering [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1008001. 姬玉林, 郭晓敏, 李璞, 等. 滤波对激光混沌信号时延特征抑制与随机统计特性增强的研究 [J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1008001.
- [19] Li Q L, Lu S S, Bao Q, *et al.* Bidirectional signal



transmission based on two coupled chaotic semiconductor lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(5): 0506001.

李齐良, 卢珊珊, 包琪, 等. 基于耦合混沌半导体激光器之间双向信号传输的研究[J]. 中国激光, 2018, 45(5): 0506001.

optical fiber acoustic sensing based on chaotic laser interference[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328016.

王宇, 靳宝全, 张建国, 等. 基于混沌激光干涉的分布式光纤声音传感[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328016.

[20] Wang Y, Jin B Q, Zhang J G, *et al.* Distributed