

混沌半导体激光器延时特征与有效带宽的实验研究

刘蓬勃, 张胜海*, 卫正统, 吴天安, 张晓旭, 陈文博

中国人民解放军信息工程大学基础部, 河南 郑州 450001

摘要 通过数值计算和实验研究了外部光注入和光反馈双重调制的半导体激光器混沌有效带宽和延时特征。实验结果表明,该方案可以获得较大的混沌信号带宽,与单一光反馈调制的半导体激光器相比,双重调制的半导体激光器的延时特征明显减弱。这与数值计算的结果吻合得较好,说明该方案能更好地提升基于混沌激光保密通信的保密性能。同时实验研究发现,激光器在频率负失谐区域能够获得更大的有效带宽和更小的延时特征峰,在频率正失谐区域延时特征抑制会有明显的恶化。

关键词 激光器; 混沌; 保密通信; 延时特征; 带宽; 频率失谐

中图分类号 O437 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1714003

Experimental Study on Time-Delay Characteristic and Effective Bandwidth for Chaotic Semiconductor Lasers

Liu Pengbo, Zhang Shenghai*, Wei Zhengtong, Wu Tian'an, Zhang Xiaoxu, Chen Wenbo

Foundation Department, PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450001, China

Abstract The time-delay characteristic and effective bandwidth of semiconductor lasers produced by dual modulation of external optical injection and feedback are numerically and experimentally investigated. The experimental results show that the dual-modulated laser system has large bandwidth, and the time-delay characteristic is weakened compared with the single-modulated laser system. The experimental results have been compared to verify the obtained numerical results, indicating that the proposed scheme can improve the security performance of chaotic laser-based secure communication. Besides, more effective bandwidth and less time-delay characteristic can be obtained in the negative frequency-detuning region. The delay characteristic suppression will deteriorate in the positive frequency-detuning region.

Key words lasers; chaos; secure communication; time-delay characteristic; bandwidth; frequency detuning

OCIS codes 140.1540; 140.3430; 190.3100

1 引言

光纤通信技术伴随信息革命的深入发展,已

经渗透到社会生活的方方面面,数据信息传输需求迅猛增加,传输速度显著提升。光纤通信的飞速发展在为人类生产生活带来便捷的同时,信息

收稿日期: 2020-12-05; 修回日期: 2020-12-17; 录用日期: 2021-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(61605249)、河南省科技攻关项目(182102210577)、信息工程大学双重建设自主科研项目(f4924)

通信作者: *ccstshz@163.com

安全问题备受关注,尤其在国防军工、金融商贸、跨境结算等领域,信息传输安全是首要问题。近年来,基于半导体激光器(semiconductor lasers, SL)的混沌保密通信受到极大关注,该理论是以系统物理参数为加密密钥,以产生的混沌信号为信息载体,将传输信号隐藏于混沌信号中,从而实现保密通信的目的,并且这种系统可以与光纤通信网络较好融合^[1-4]。

半导体激光器在外部光注入或光反馈作用下组成混沌激光系统,能够输出类噪声和具有连续宽带频谱的混沌激光。该混沌激光具有高维非线性特征和随机性,可作为实现信息高速保密传输的理想载波^[5-8]。基于混沌激光系统进行通信,其保密性和安全性主要取决于窃密者是否能够掌握混沌激光系统的物理参数,实现逆向系统重构。目前已有的研究表明,激光在外腔往返时会产生延时,利用自相关函数(auto correlation function, ACF)对混沌激光信号的时间序列进行分析,可以获得明显的延时特征峰^[9-14](time delay signature, TDS),并从中提取出外腔长度信息,这就为系统

重构提供了可能。

本文首先理论研究了具有光注入和光反馈的混沌激光系统中驱动激光器和响应激光器的延时特征与有效带宽;然后,在此基础上对实验结果与理论结果进行对比,分析了系统的混沌特性、延时特性和有效带宽,并研究了频率失谐对延时特性和有效带宽的影响。

2 实验装置与理论模型

图1所示为具有光注入和光反馈的混沌半导体激光系统的实验装置。从驱动激光器(D-SL)输出的光通过偏振控制器(PC)和光纤耦合器(OC)后分为两路光,一路光通过可调光衰减器(VOA)经光纤反射镜(FM)反射回激光器产生混沌态,另一路光依次通过隔离器(ISO)和VOA后注入响应激光器(R-SL)。响应激光器在受到驱动激光器注入光调制的同时,自身输出光经OC后分为两路:一路经VOA和FM反馈回自身,使响应激光器同时在光注入和光反馈两种调制下进入混沌态;另一路光经ISO和光电转换器(PD)后进入示波器(OSC)。

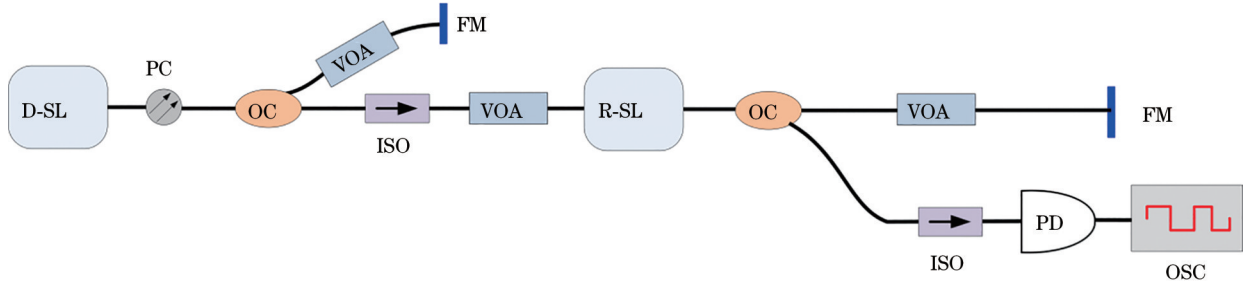


图1 混沌激光实验装置原理图

Fig. 1 Schematic of chaotic laser experimental device

基于Lang-Kobayashi (L-K)模型^[15],驱动激光器在光反馈调制下输出混沌激光,速率方程可表示为

$$\dot{E} = 0.5(1 + i\alpha) [G(t) - \gamma_p] E(t) + \gamma E(t - \tau) \exp(-i\omega\tau), \quad (1)$$

$$\dot{N} = PJ_{th} - N(t)/\tau_N - G(t) |E(t)|^2, \quad (2)$$

式中: $\dot{E} = dE(t)/dt$; $\dot{N} = dN(t)/dt$; $E(t)$ 为半导体激光器慢变电场振幅; $N(t)$ 为载流子密度; α 为线宽增强因子; γ_p 为光子衰减率且 $\gamma_p = 1/\tau_p$, 其中, τ_p 为光子寿命。响应激光器在光反馈和光注入双重调制下产生混沌激光,速率方程可表示为

$$\dot{E} = 0.5(1 + i\alpha) [G(t) - \gamma_p] E(t) + \gamma E(t - \tau) \exp(-i\omega\tau) + \eta E_i(t - \tau_i) \exp(-i\omega_i\tau_i + i\Delta\omega t), \quad (3)$$

$$\dot{N} = PJ_{th} - N(t)/\tau_N - G(t) |E(t)|^2, \quad (4)$$

式中: $\gamma E(t - \tau) \exp(-i\omega\tau)$ 为光反馈项, 其中, γ 为反馈强度, τ 为外腔光反馈延迟时间; $G(t)$ 为增益系

数, 且 $G(t) = g[N(t) - N_0] / [1 + \epsilon E(t)^2]$, 其中, g 为微分增益系数, ϵ 为增益饱和系数, N_0 为透明载流子密度; P 为抽运因子; J_{th} 为电流密度阈值; τ_N 为载

流子寿命; $\eta E_i(t - \tau_i) \exp(-i\omega_i \tau_i + i\Delta\omega t)$ 为光注入项, 其中, η 为光注入强度, $\Delta\omega$ 为频率失谐, 且 $\Delta\omega = 2\pi\Delta f$, $\Delta f = f_d - f_r$, f_d 和 f_r 分别为驱动激光器和响应激光器的运行频率。

为定量描述混沌激光信号的延时特性, 本研究使用 ACF 作为量化工具。ACF 表征一个信号与其对应延时信号的相似程度, 相似程度越高, 自相关值越大, 函数定义为^[16-18]

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [I(t) - \langle I(t) \rangle][I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [I(t) - \langle I(t) \rangle]^2 \rangle \langle [I(t + \Delta t) - \langle I(t + \Delta t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (5)$$

式中: $I(t)$ 为混沌信号强度时间序列; $\langle \rangle$ 表示对时间求平均; Δt 为时移值。利用自相关函数曲线中延时特征峰来定量描述混沌光的延时特性, 有研究者认为当信号延时处的自相关值小于 0.2 时, 自相关峰值较难辨别, 延时特征得到了有效隐藏^[19-20]。

3 数值模拟与分析

采用四阶 Runge-Kutta 法对混沌激光实验装置进行定量仿真, 数值计算方程为(1)~(4)式, 利用 ACF 来描绘驱动激光器和响应激光器输出混沌光信号延时特性, 采用 80% 能量带宽定义, 即从零频(不包含零频)起到能量为总能量 80% 处的频率来表示混沌光信号的有效带宽^[5]。在数值模拟中使用的实验装置参量如表 1 所示。

图 2(a1)、(b1)、(c1) 所示为驱动激光器的时间序列、功率谱和 ACF 曲线, 图 2(a2)、(b2)、(c2)

所示为响应激光器的时间序列、功率谱和 ACF 曲线。从图 2(a1)、(b1) 和图 2(a2)、(b2) 可以看到, 驱动激光器和响应激光器输出激光信号的时间序列如同噪声信号一样无规律振荡, 频谱连续分布, 说明驱动激光器和响应激光器均进入了混沌状态, 这是因为反馈光与注入光的相干调制作用, 使得激光器输出光从稳态进入了混沌态。根据 80% 能量带宽定义, 图 2(b1)、(b2) 虚竖线左侧部分为激光器有效带宽, 驱动激光器带宽为 19.9 GHz, 响应激光器带宽为 20.2 GHz, 可见混沌激光系统具有较大带宽, 主要原因是半导体激光器受到自身光反馈和外部光注入的调制作用, 输出激光由稳态进入振荡态, 频率成分复杂, 带宽也随之增加。根据香农信息传输速率公式, 具有更宽载波带宽的激光能够为通信提供更高的传输速率^[21-23]。混沌激光具有大带宽和类噪声特性, 对参数具有极高的敏感性, 可以用于高速保密通信。图 2(c1)、(c2) 所示为驱动激光器和响应激光器的 ACF 变化曲线, 尖峰即为 TDS。驱动激光器的 TDS 最大值为 0.39, 大于 0.2, 且出现在 $\tau = 75$ ns 附近, 与自身反馈延时接近, 暴露了混沌激光系统结构参数, 这是因为外腔具有固定长度, 激光在反馈后呈现出一定周期特性。响应激光器的 TDS 为 0.15, 小于 0.2, 说明从响应激光器输出的混沌光具有更好的随机性, 延时特征得到了明显抑制。响应激光器的 TDS 出现在 $\tau = 65$ ns 处, 虽然暴露了自身外腔长度信息, 但在注入延时 $\tau_i = 52$ ns 处和驱动激光器反馈延时 $\tau = 75$ ns 处, 并没有出现 TDS, 说明在注入型混沌激光系统中, 输出的混沌激光没有驱动部分的物理信息, 这就增加了窃密者重构系统的难度。因此, 具有光反馈和光注入双重调制样式的混沌激光系统相较于只有单一光反馈调制的系统, 呈现出更好的随机性和安全性。

表 1 混沌激光实验装置参数

Table 1 Parameters of chaotic laser experimental device

Parameter	Value
Linewidth enhancement factor α	4
Photon lifetime τ_p /ps	4.2
Differential gain coefficient g /s ⁻¹	7.8×10^4
Carrier lifetime τ_N /ns	5.6
Feedback strength γ /ns ⁻¹	24
Feedback delay time (D-SL) τ_{D-SL} /ns	75
Feedback delay time (R-SL) τ_{R-SL} /ns	65
Injection delay time τ_i /ns	52
Optical angular frequency ω / (rad·s ⁻¹)	1.216×10^{15}
Detuning frequency Δf /GHz	3.7
Gain saturation coefficient ϵ	1×10^{-7}
Carrier density at transparency N_0	1.25×10^8
Pumping factor P	1.6
Injection current at threshold J_{th}	8×10^{16}
Injection strength η /ns ⁻¹	15

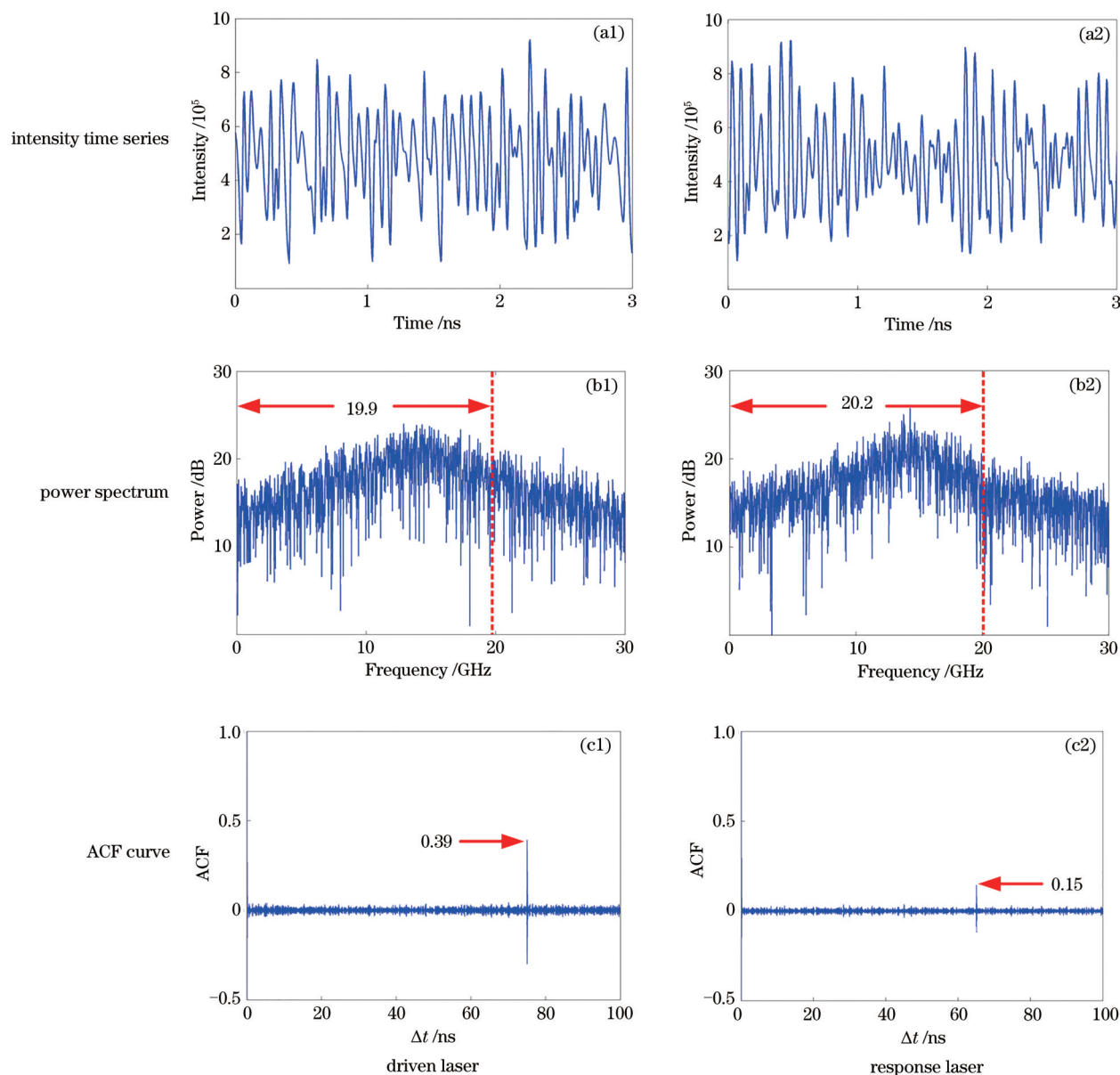


图2 混沌激光实验装置的强度时间序列、信号功率谱和ACF曲线的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of intensity time series, power spectra, and ACF curves of chaotic laser experimental device

4 实验结果与分析

目前,对混沌激光器延时特征与有效带宽的研究大多是理论计算,较少考虑外在因素影响,由于激光器在实际工作时对外部环境比较敏感,且不同激光器必然存在物理参数的差异,因此实验研究混沌激光器的延时特征与有效带宽具有更重要的实际意义。

4.1 不同调制的激光系统的有效带宽与延时特征

图1所示的混沌实验装置中,驱动激光器D-SL的控制温度为18℃,偏置电流为100 mA,单独工作

时中心波长为1549.67 nm,进入混沌状态后中心波长为1549.73 nm,响应激光器R-SL的控制温度为23.3℃,偏置电流为70 mA,单独工作时中心波长为1549.70 nm,激光波长可由光谱仪AQ6370D测得。对D-SL而言,通过调节反馈强度使其进入混沌态,对R-SL来说,通过调节注入强度和反馈强度,使其进入混沌状态。图3所示为驱动激光器D-SL和响应激光器R-SL的混沌实验结果,图3(a1)、(a2)为D-SL和R-SL的时间序列,由示波器DSOX93204A测得,可以明显看到信号的随机振荡情况。图3(b1)、(b2)为D-SL和R-SL的功率谱,由频谱分

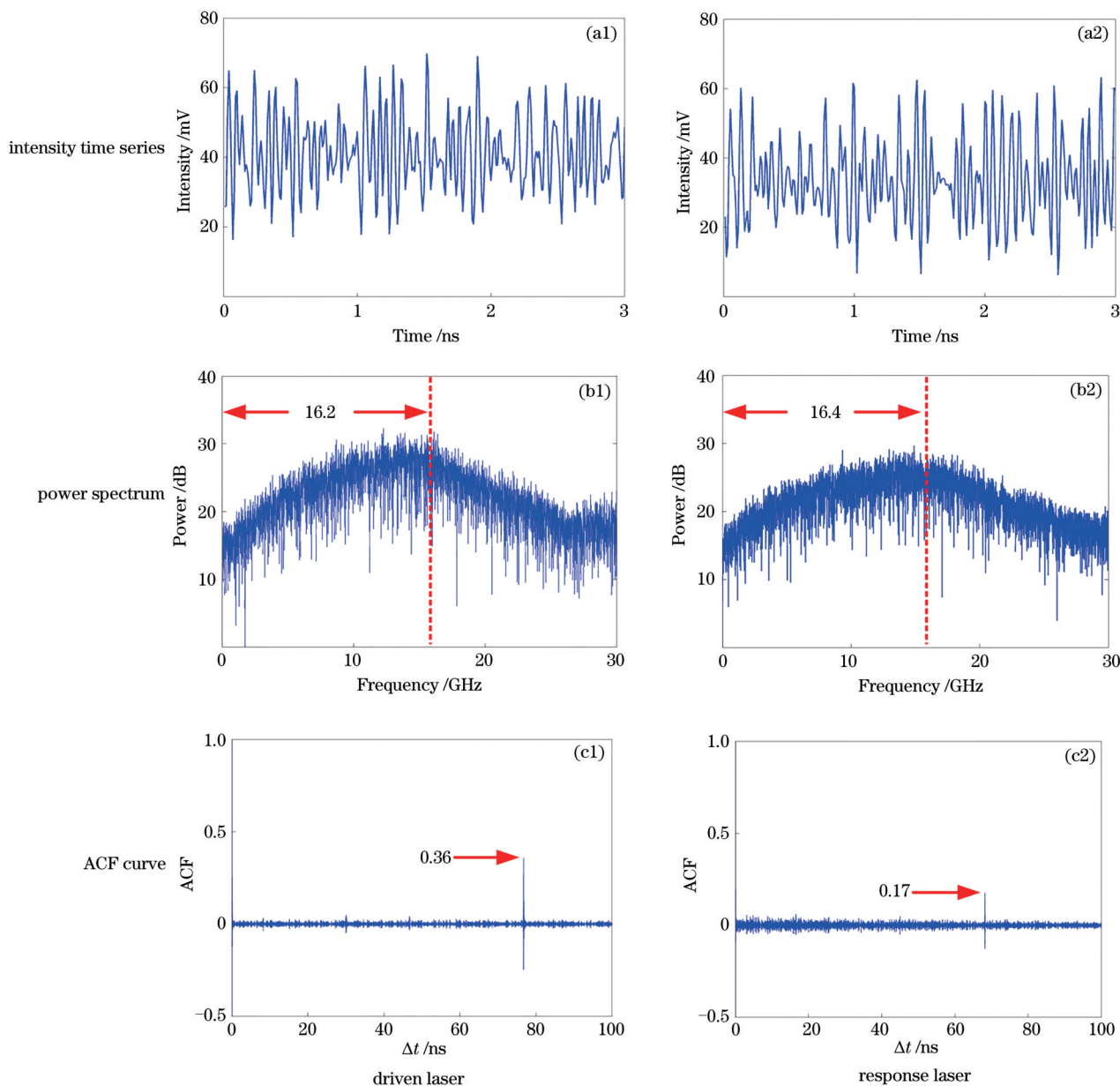


图3 混沌激光实验装置的强度时间序列、信号功率谱和ACF曲线的实验测量结果

Fig. 3 Experimental measurement results of intensity time series, power spectra, and ACF curves of chaotic laser experimental device

析仪FSV3030测得,D-SL的有效带宽为16.2 GHz,R-SL的有效带宽为16.4 GHz,小于仿真计算的结果,这可能是因为光电转换器的响应阈值较大,掩盖了混沌信号中的弱信号成分,从而使部分信息丢失。图3(c1)、(c2)所示为D-SL和R-SL的ACF曲线,驱动激光器的TDS为0.36,出现在 $\tau=77$ ns处,响应激光器的TDS为0.17,出现在 $\tau=68$ ns处。显而易见,R-SL产生混沌信号的内在周期性明显弱于D-SL产生的混沌信号,这正是注入、反馈双重调制的结果。TDS的实验值与理论值存在一定偏差,这

可能是因为实验装置对反馈强度和注入强度的控制精确度有欠缺,并且实验光路中器件转接部分不可避免地激光产生细微反馈扰动,进而影响混沌态。为尽量减小理论与实验的误差,今后考虑将器件集成在光纤光路中,减少转接元件,并采用数字衰减器代替机械衰减装置。综上所述,尽管响应激光器带宽只是稍有增大,但延时特征明显降低,这对于提高混沌保密通信的安全性具有重要作用。同时,从实验结果中也可发现,TDS虽然被抑制小于0.2,但仍然可以被观察到。因此,若要实现时

延特征有效隐藏,峰值幅度应该隐藏于自相关曲线的噪声基底中。

4.2 频率失谐对激光系统的混沌有效带宽和延时特征的影响

在实验过程中发现随着环境温度的改变和激光器运行时间的不同,半导体激光器的波长有一定漂移,波长变化直接影响到混沌激光系统频率失谐程度,因此探究频率失谐对混沌激光系统延时特征的影响,确保系统稳定地处于混沌状态有着现实意义。将响应激光器中心波长保持在 1549.40 nm,将驱动激光器中心波长控制在 1549.16 nm 至 1549.64 nm 范围内来调节失谐频率,对应的失谐区间为 30 GHz 至 -30 GHz。频率失谐对延时特征影响的实验结果如图 4 所示,可以看到 TDS 在负失谐区域的抑制效果比较好,都小于 0.2,当频率失谐为 0 时, TDS 最小,为 0.1191。在正失谐区, TDS 随着 Δf 的增加而增大,从 20 GHz 处开始大于 0.2,说明该实验方案在应用时应尽量使激光器工作于负失谐区域,可获得更高的系统安全性。

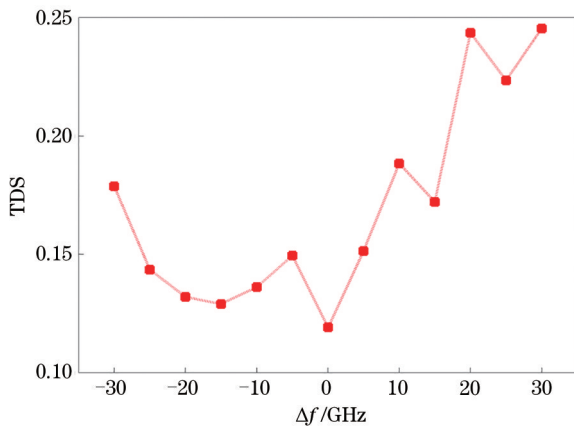


图4 频率失谐对延时特征影响的实验结果

Fig. 4 Experimental results for the influence of frequency detuning on time delay signature

通过实验进一步研究了频率失谐对混沌半导体激光器有效带宽的影响,结果如图 5 所示。可以看到,混沌半导体激光器在频率负失谐区域的有效带宽要明显大于正失谐区域,最大带宽出现在失谐频率为 -5 GHz 处,有效带宽为 16.6 GHz,说明混沌激光系统应用于保密通信时,选择在频率负失谐区域匹配驱动激光器和响应激光器中心波长,既能使系统具有较小的 TDS,又能获得较大带宽。

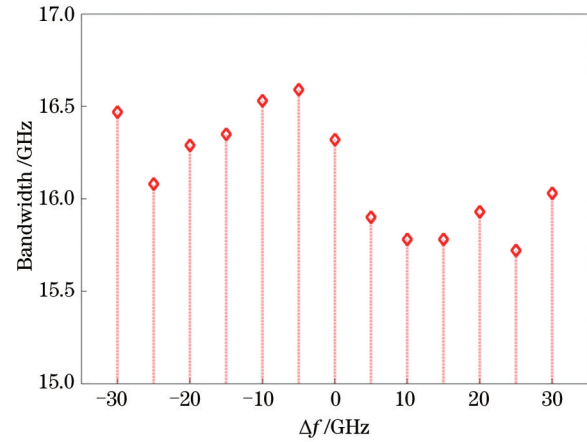


图5 频率失谐对有效带宽的影响

Fig. 5 Influence of frequency detuning on effective bandwidth

5 结 论

对基于光反馈和光注入的混沌激光实验装置的延时特征和有效带宽进行详细的理论和实验研究,驱动激光器的 TDS 理论值为 0.39,实验值为 0.36,响应激光器的 TDS 理论值为 0.15,实验值为 0.17,说明相较于单一调制,双重调制能够明显抑制混沌激光器的延时特征,混沌激光的有效带宽实验值达到 16.6 GHz,因此,该实验装置在为高速保密通信提供低时延、大带宽载波方面具有较高的应用潜能。通过实验研究发现频率负失谐区域的混沌激光系统的 TDS 抑制效果要普遍优于频率正失谐区域,其有效带宽普遍大于正失谐区域。该研究结论有助于在建立混沌保密通信系统时,合理匹配激光器参数,使混沌激光系统工作于频率负失谐区域,提供安全性更高的混沌载波。基于上述结论,未来将开展两方面工作:1)研究设置合适的系统物理参数,最大限度地抑制延时特征并增大带宽;2)优化、改造实验装置,研究能够彻底隐藏延时特征,并显著提升带宽的新方案。

参 考 文 献

- [1] Syvridis D, Argyris A, Bogris A, et al. Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. Proceedings of SPIE, 2006, 6353: 63531K.
- [2] Pecora L M, Carroll T L. Synchronization in chaotic systems[J]. Physical Review Letters, 1990, 64(8): 821-823.
- [3] Zhao D L, Li P, Liu X L, et al. Online real-time

- 7 Gbit/s physical random number generation utilizing chaotic laser pulses [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(5): 050501.
赵东亮, 李璞, 刘香莲, 等. 利用混沌激光脉冲在线实时产生 7 Gbit/s 物理随机数 [J]. *物理学报*, 2017, 66(5): 050501.
- [4] Lawrance A J, Papamarkou T, Uchida A, et al. Synchronized laser chaos communication: statistical investigation of an experimental system [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2017, 53(2): 1-10.
- [5] Qiao L J, Yang Q, Chai M M, et al. Progress in chaotic semiconductor lasers [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2020, 38(4): 595-611.
乔丽君, 杨强, 柴萌萌, 等. 混沌半导体激光器研究进展 [J]. *应用科学学报*, 2020, 38(4): 595-611.
- [6] Yi L L, Ke J X. Research progress of chaotic secure optical communication [J]. *Journal on Communications*, 2020, 41(3): 168-181.
义理林, 柯俊翔. 混沌保密光通信研究进展 [J]. *通信学报*, 2020, 41(3): 168-181.
- [7] Yan S L. Theory and technique of cross transmittance and alternate parallel reception of laser chaos in secure communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(9): 0906001.
颜森林. 激光混沌交叉发射与交替并行接收在保密通信中应用的基本理论与技术 [J]. *中国激光*, 2020, 47(9): 0906001.
- [8] Hu Z H, Zhao T, He P X, et al. Improving dynamic range of chaos optical time domain reflectometry using fiber ring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1004006.
胡志宏, 赵彤, 贺培鑫, 等. 基于光纤环的混沌光时域反射仪动态范围增大 [J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1004006.
- [9] Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, et al. Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: a dynamical point of view [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, 45(7): 879-891.
- [10] Wang D M, Wang L S, Guo Y Y, et al. Key space enhancement of optical chaos secure communication: chirped FBG feedback semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 3065-3073.
- [11] Soriano M C, Ojalvo J G, Mirasso C R, et al. Complex photonics: dynamics and applications of delay-coupled semiconductor lasers [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2013, 85(1): 421-470.
- [12] Wang Y, Xiang S Y, Wang B, et al. Time-delay signature concealment and physical random bits generation in mutually coupled semiconductor lasers with FBG filtered injection [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8446-8455.
- [13] Mu P H, He P F, Li N Q, et al. Simultaneous chaos time-delay signature cancellation and bandwidth enhancement in cascade-coupled semiconductor ring lasers [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 11041-11048.
- [14] Zhang X X, Wu T A, Chang K G, et al. Time-delay characteristic and bandwidth analysis of chaotic output from single-ended feedback and mutually coupled vertical-cavity surface-emitting lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(5): 0501010.
张晓旭, 吴天安, 常凯歌, 等. 单端反馈互耦合垂直腔面发射激光器混沌输出的时延特征和带宽分析 [J]. *中国激光*, 2017, 44(5): 0501010.
- [15] Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [16] Li Z, Feng Y L, Yao Z H, et al. Autocorrelation and bandwidth research of chaotic laser from semiconductor lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 021405.
李增, 冯玉玲, 姚治海, 等. 半导体激光器输出混沌光的自相关性及其带宽研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 021405.
- [17] Han T, Liu X L, Li P, et al. Influence of the linewidth enhancement factor on the characteristics of the random number extracted from the optical feedback semiconductor laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(12): 124203.
韩韬, 刘香莲, 李璞, 等. 线宽增强因子对光反馈半导体激光器混沌信号生成随机数性能的影响 [J]. *物理学报*, 2017, 66(12): 124203.
- [18] Wu T, Li Q L, Bao X B, et al. Time-delay signature concealment in chaotic secure communication system combining optical intensity with phase feedback [J]. *Optics Communications*, 2020, 475: 126042.
- [19] Gao F, Li N Q, Zhang L Y, et al. Study to suppress time delay signature of chaotic carrier utilizing chaotic optical injection [J]. *Journal of Quantum Optics*, 2016, 22(3): 289-297.
高飞, 李念强, 张力月, 等. 采用混沌光注入实现混沌载波时延特征隐藏的研究 [J]. *量子光学学报*, 2016, 22(3): 289-297.
- [20] Zhang Y N, Feng Y L, Wang X Q, et al. Time delay signature and bandwidth of chaotic laser output

- from semiconductor laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(9): 090501.
- 张依宁, 冯玉玲, 王晓茜, 等. 半导体激光器混沌输出的延时特征和带宽[J]. *物理学报*, 2020, 69(9): 090501.
- [21] Wang Y C, Zhang G W, Wang A B, et al. Bandwidth enhancement of semiconductor laser as a chaotic transmitter by external light injection [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(8): 4372-4377.
- 王云才, 张耕玮, 王安帮, 等. 光注入提高半导体激光器混沌载波发射机的带宽[J]. *物理学报*, 2007, 56(8): 4372-4377.
- [22] Ding Z Y, Fan L, Chen J J, et al. Generation of wide-bandwidth polarized chaotic signals based on VCSEL subject to dual chaotic optical injection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(2): 0214002.
- 丁珠玉, 樊利, 陈建军, 等. 双混沌光注入 VCSEL 获取宽带偏振混沌信号[J]. *光学学报*, 2019, 39(2): 0214002.
- [23] Yan S L. Enhancing chaotic frequency of coupled lasers based on phase conjugation and cross-phase conjugation feedback[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(8): 0808003.
- 颜森林. 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[J]. *中国激光*, 2019, 46(8): 0808003.