

双光反馈双光注入混沌半导体激光器延时特征峰抑制

孙巍阳 张胜海 吴天安 张晓旭

(解放军信息工程大学理学院, 河南 郑州 450000)

摘要 提出利用双光反馈(DOF)主半导体激光器(SL)双光注入(DPI)到从SL的方案来隐藏混沌激光光强和相位的延时特征峰,利用自相关函数和互信息函数对不同方案下延时特征峰的抑制情况进行了对比分析。研究结果表明,对同种类型的激光器,在相同参数区间内,DOF-DPI方案与其他方案相比,具有更好的抑制效果;另外,带混沌光注入的方案对相位延时特性的抑制要比对光强延时特性的抑制效果好;在延时特征峰抑制到相同水平的前提下,DOF-DPI方案比其他方案具有更宽的参数区间。

关键词 激光技术;半导体激光器;混沌激光;双光注入;双光反馈;延时特性

中图分类号 O415; N93 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.121406

Time Delay Signature Concealment in Chaotic Semiconductor Lasers with Double Optical Feedback and Dual-Path Injection

Sun Weiyang Zhang Shenghai Wu Tian'an Zhang Xiaoxu

(Institute of Science, the PLA Information Engineering University, Zhengzhou, Henan 450000, China)

Abstract It is proposed that a slave semiconductor laser (SL) with dual-path injection (DPI) can be driven by a master SL with double optical feedback (DOF) to conceal the time delay signature from both intensity and phase chaos. With the usage of auto-correlation function (ACF) and mutual information (MI) function, the time delay signature concealment effects under different schemes are compared and analyzed. The research results indicate that, as for the same type of lasers with the same parameter ranges, the time delay signature can be better concealed with the DOF-DPI scheme than the other schemes. In addition, as for the scheme with chaotic light injection, the concealing effect of the phase time delay characteristic is better than that of the intensity time delay characteristic; on the same concealment level of time delay characteristic peaks, the DOF-DPI scheme has a wider parameter range than the other schemes.

Key words laser technique; semiconductor laser; chaotic laser; dual-path injection; double optical feedback; time delay signature

OCIS codes 140.5960; 140.1540; 190.3100; 060.4510

1 引言

随着计算机技术、通信技术和信息安全技术的快速发展,数据传输的安全性受到越来越大的挑战^[1-3]。要保证数十吉比特每秒数据传输的安全,必须生成与之相应的速率随机数。因此,基于混沌激光器的高速物理随机数发生器的研究越来越受到国内外广大学者的重视^[4-13]。然而,在超高速随机码获取中,利用一般外腔延时反馈半导体激光器(SL)产生的混沌序列获取的随机码具有和反馈延时时间相对应的周期性,从而使得随机码的随机性和保密通信的安全性受到严重影响^[14-15]。因此,为了提高信息的安全性和改善随机码的

收稿日期: 2016-08-25; **收到修改稿日期:** 2016-08-29; **网络出版日期:** 2016-12-06

基金项目: 河南省重点科技攻关计划(152102210012)

作者简介: 孙巍阳(1992—),男,硕士研究生。E-mail: 1533396627@qq.com

导师简介: 张胜海(1971—),男,博士,副教授,硕士生导师。E-mail: ccstshz@163.com(通信联系人)

统计性能,混沌序列的延时反馈特性抑制^[16-19]成为了技术的关键。已有的单光反馈(SOF)-单光注入(SPI)方案和 SOF-双光注入(DPI)方案能够在一定程度上对系统延时特征峰进行抑制,但仍无法满足超高速数据传输的要求。针对超高速数据传输,本文提出了双光反馈(DOF)-DPI 方案以更好地抑制系统延时特征峰。

2 理论模型

DOF-DPI 方案模型如图 1 所示,其中 DFB 为分布反馈激光器。主激光器的输出光经过光循环器 1,然后经过分束器 1 分为两束光 a、b。a 经分束器 2 再分为两束光,该两束光经过不同的延时路径后经耦合器 1 和光循环器 1 反馈到主激光器中,实现双光延时反馈;b 经分束器 3 再分为两束光,该两束光经过不同的延时路径后经耦合器 2 和光循环器 2 注入到从激光器中,实现双光延时注入。DOF-DPI 方案中 SL 的基本参数见表 1。

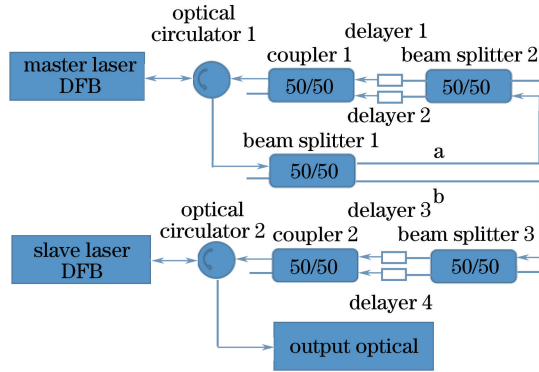


图 1 DOF-DPI 方案模型

Fig. 1 Model of DOF-DPI scheme

表 1 激光器的内部参数

Table 1 Internal parameters of lasers

Internal parameter	Parameter value
Gain factor (G_n)	$8.4 \times 10^{-13} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Carrier density (n_0)	$1.4 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$
Photon lifetime (t_p)	$1.927 \times 10^{-12} \text{ s}$
Master laser wavelength (λ_1)	$1.537 \times 10^{-6} \text{ m}$
Speed of light (c)	$3.0 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Line-width amplification factor (α)	3.0
Threshold current (j_{th})	$9.89 \times 10^{32} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$
Carrier lifetime (t_s)	$2.04 \times 10^{-9} \text{ s}$
Master laser work current (j_1)	$1.44 j_{th}$
Gain saturation coefficient (ϵ)	2.5×10^{-23}

利用改进的 L-K 方程^[20]描述混沌激光系统的工作状态,有

$$\frac{dE_m(t)}{dt} = 0.5 \left\{ G_n [N_m(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} E_m(t) + k_1 E_m(t - \Delta t_1) \cos [\omega_1 \Delta t_1 + \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta t_1)] + k_2 E_m(t - \Delta t_2) \cos [\omega_1 \Delta t_2 + \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta t_2)], \quad (1)$$

$$\frac{d\phi_m(t)}{dt} = 0.5 \alpha \left\{ G_n [N_m(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} - k_1 \frac{E_m(t - \Delta t_1)}{E_m(t)} \sin [\omega_1 \Delta t_1 + \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta t_1)] - k_2 \frac{E_m(t - \Delta t_2)}{E_m(t)} \sin [\omega_1 \Delta t_2 + \phi_m(t) - \phi_m(t - \Delta t_2)], \quad (2)$$

$$\frac{dE_s(t)}{dt} = 0.5 \left\{ G_n [N_s(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} E_s(t) + k_3 E_s(t - \Delta t_3) \cos [\omega_1 \Delta t_3 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_3) - t \Delta \omega] + k_4 E_s(t - \Delta t_4) \cos [\omega_1 \Delta t_4 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_4) - t \Delta \omega], \quad (3)$$

$$\frac{d\phi_s(t)}{dt} = 0.5\alpha \left\{ G_n [N_s(t) - n_0] - \frac{1}{t_p} \right\} - k_3 \frac{E_s(t - \Delta t_3)}{E_s(t)} \sin [\omega_1 \Delta t_3 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_3) - t \Delta \omega] - k_4 \frac{E_s(t - \Delta t_4)}{E_s(t)} \sin [\omega_1 \Delta t_4 + \phi_s(t) - \phi_s(t - \Delta t_4) - t \Delta \omega], \quad (4)$$

$$\frac{dN_{m,s}(t)}{dt} = j_{1,2} j_{th} - \frac{N_{m,s}(t)}{t_s} - \frac{G_n [N_{m,s}(t) - n_0]}{1 + \epsilon E_{m,s}^2(t)} E_{m,s}^2(t), \quad (5)$$

式中 $E(t)$ 和 $\phi(t)$ 分别为输出光振幅和相位; $N(t)$ 为载流子浓度, 下标 m、s 分别代表主、从激光器; k_1 、 k_2 为主激光器反馈强度, k_3 、 k_4 为从激光器注入强度; Δt_1 、 Δt_2 为主激光器反馈延时时间, Δt_3 、 Δt_4 为从激光器注入延时时间; j_1 、 j_2 分别为主、从激光器的工作电流; ϵ 为增益饱和系数; $\Delta \omega = \omega_1 - \omega_2$, 其中主激光器角频率为 $\omega_1 = \frac{2\pi c}{\lambda_1}$, 从激光器角频率为 $\omega_2 = \frac{2\pi c}{\lambda_2}$; 主、从激光器失谐频率 $\Delta f = \frac{\Delta \omega}{2\pi}$; 总注入强度 $k = k_3 + k_4$ 。

利用自相关函数和互信息函数^[17,21]分析外腔反馈延时特性。自相关函数 C 定义为

$$C(\Delta t) = \frac{1}{N(t)} \sum [I(t)I(t + \Delta t)], \quad (6)$$

式中 $I(t) = E^2(t)$ 为混沌激光器输出光强度, Δt 为移动时间。

互信息函数 M 定义为

$$M(\Delta t) = \sum_{I(t), I(t+\Delta t)} p [I(t), I(t + \Delta t)] \lg \frac{p [I(t), I(t + \Delta t)]}{p [I(t)] p [I(t + \Delta t)]}, \quad (7)$$

式中 $p(t)$ 为概率密度。

3 数值模拟结果

3.1 输出光强的反馈延时特征峰抑制

图 2 对比了 SOF、SOF-SPI、SOF-DPI、DOF-DPI 方案下 SL 的输出光强时序图、自相关函数图、互信息函数图之间的差异。

如图 2 所示, SOF 激光器的反馈延迟时间为 6 ns, 反馈强度为 14 ns^{-1} ; SOF-SPI 激光器的反馈延时时间为 6 ns, 主激光器反馈强度为 14 ns^{-1} , 注入强度为 16 ns^{-1} , 从激光器光波长为 $1.53692 \times 10^{-6} \text{ m}$; SOF-DPI 激光器的反馈延时时间为 6 ns, 主激光器反馈强度为 14 ns^{-1} , 注入强度均为 8 ns^{-1} , 从激光器光波长为 $1.53692 \times 10^{-6} \text{ m}$; DOF-DPI 激光器两个反馈路径的延时时间分别为 6 ns 和 6.1 ns, 主激光器反馈强度均为 7 ns^{-1} , 注入强度均为 8 ns^{-1} , 从激光器光波长为 $1.53692 \times 10^{-6} \text{ m}$, 通过仿真可以确定这组参数结果较好。

从图 2(a₁)~(a₃)可以看出, SOF 方案下 SL 处于混沌状态, 但输出光的光强明显存在一定周期性。SOF 自相关函数图存在一系列特征峰, 其中主特征峰峰值为 0.6102, 对应反馈延时时间 $\tau_1 = 6 \text{ ns}$ 为周期的信号, 其他峰对应以 $n\tau_1$ 为周期的输出特性, 这正是延时反馈使得激光器产生的混沌输出中存在一定周期性的原因, 对被用于保密通信的随机数的统计特性十分不利。为了抑制这种延时特征峰、改善混沌激光的带宽和随机数的统计特性, 可以采用 SOF-SPI、SOF-DPI、DOF-DPI 方案来尽可能抑制延时特征峰。图 2(b₂)~(b₃)为 SOF-SPI 混沌光系统对特征峰的抑制情况, 其中自相关函数图的主特征峰峰值为 0.2356, 相对图 2(a₂)特征峰明显降低, 说明该方案具有一定的抑制效果。相比 SOF 方案, SOF-SPI 方案有更好的抑制效果, 其主要原因是主、从激光器的频率失谐($\Delta f = 10 \text{ GHz}$)增强了输出光的带宽, 从而使得自相关函数特征峰明显降低。图 2(c₂)~(c₃)为 SOF-DPI 混沌光系统对特征峰的抑制情况, 其中自相关函数主特征峰峰值为 0.07851, 除主特征峰之外, 次高峰已不明显, 且相比图 2(b₂)主特征峰明显降低, 抑制效果显著。由于 DOF 比 SOF 多一条反馈路径, 且通过调节图 1 中的延时器 1 和延时器 2 分别控制两条反馈路径的延时时间, 使两条路径的延时时间稍有偏差, 如 $\tau_1/\tau_2 = 6.0/6.1 \approx 0.9836$, 从而掩盖了混沌信号因反馈产生的周期性, 也就使自相关函数特征峰明显降低。图 2(d₂)~(d₃)为 DOF-DPI 混沌光系统对特征峰的抑制情况, 其中自相关函数图的主特征峰峰值为 0.03434。对比 SOF-DPI 方案, DOF-DPI 特征峰降低不明显, 但 SOF-DPI 方案在其他参数区间抑制效果不佳, 而 DOF-DPI 方案能在更宽的参数区间内对特征峰起到良好的抑制效果。

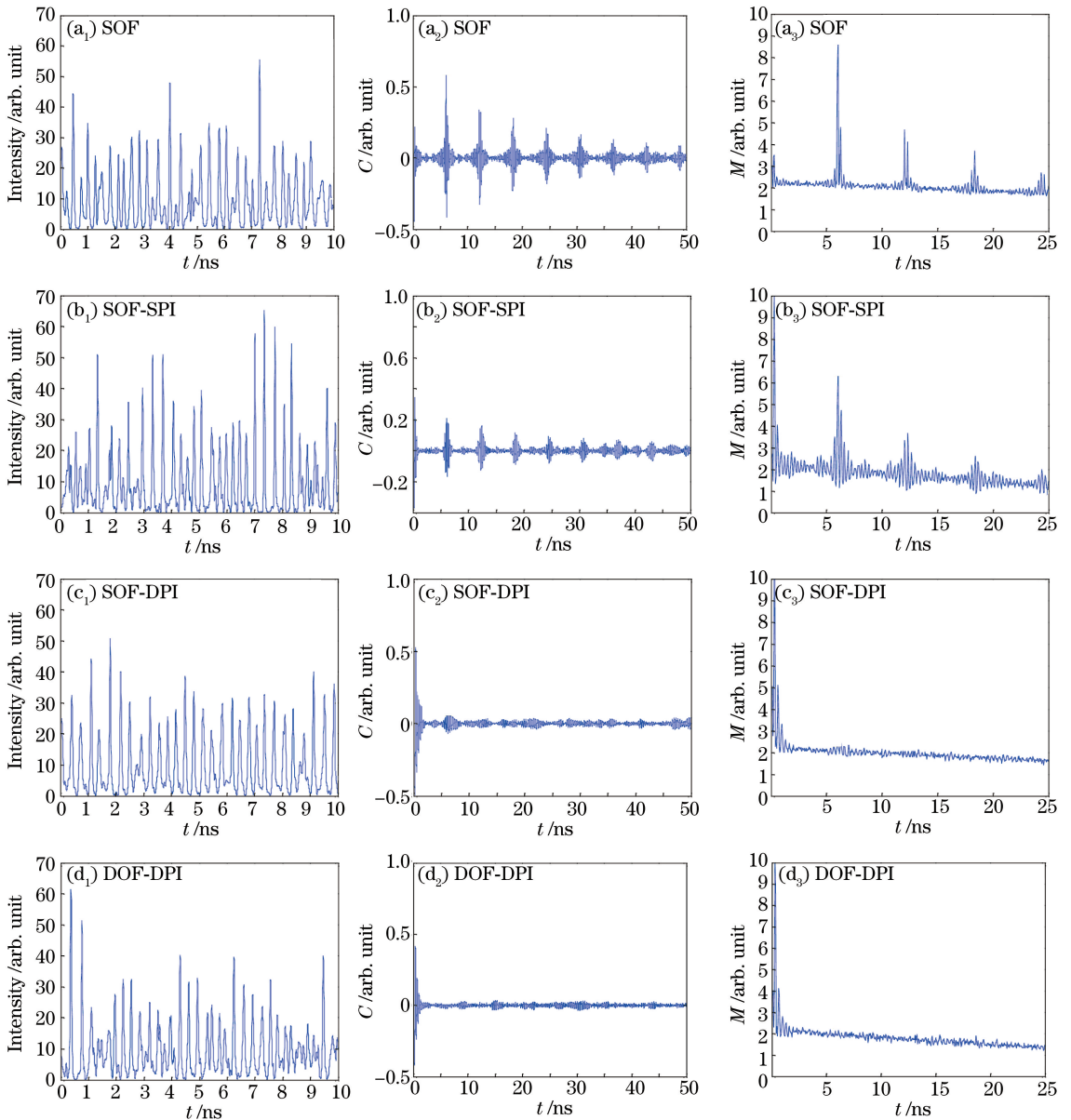


图2 在不同方案下, (a₁)(b₁)(c₁)(d₁)光强时序图; (a₂)(b₂)(c₂)(d₂)自相关函数图; (a₃)(b₃)(c₃)(d₃)互信息函数图

Fig. 2 Under different schemes, (a₁)(b₁)(c₁)(d₁) light intensity sequence diagrams, (a₂)(b₂)(c₂)(d₂) ACF diagrams, and (a₃)(b₃)(c₃)(d₃) MI function diagrams

3.2 输出光相位的反馈延时特征峰抑制

为了保证从混沌序列中提取的随机码具有良好的随机性,不仅要抑制混沌光的光强周期性,还需要抑制其相位周期性。在激光器参数相同的情况下,图3对比了SOF、SOF-SPI、SOF-DPI、DOF-DPI方案下SL的输出光相位的自相关函数和互信息函数之间的差异。

由图3(a₁)可以看出,SOF方案下SL输出光相位的自相关函数特征峰很明显,互信息函数在6 ns处也有明显特征峰。由图3(b₁)~(d₁)可以看出,SOF-SPI方案、SOF-DPI方案以及DOF-DPI方案这三种方案输出光的相位延时特征峰不明显。对比图2发现,在相同激光器参数下,这几种方案对相位延时特性的抑制要好于对光强延时特性的抑制,这正是混沌光注入对相位反馈延时特性的抑制作用。

3.3 参数影响分析

通过仿真模拟发现,若干激光器参数对输出光反馈延时特性的抑制效果影响显著,其中包括注入强度(k)、从激光器工作电流(j_2)和主、从激光器频率失谐(Δf)等。

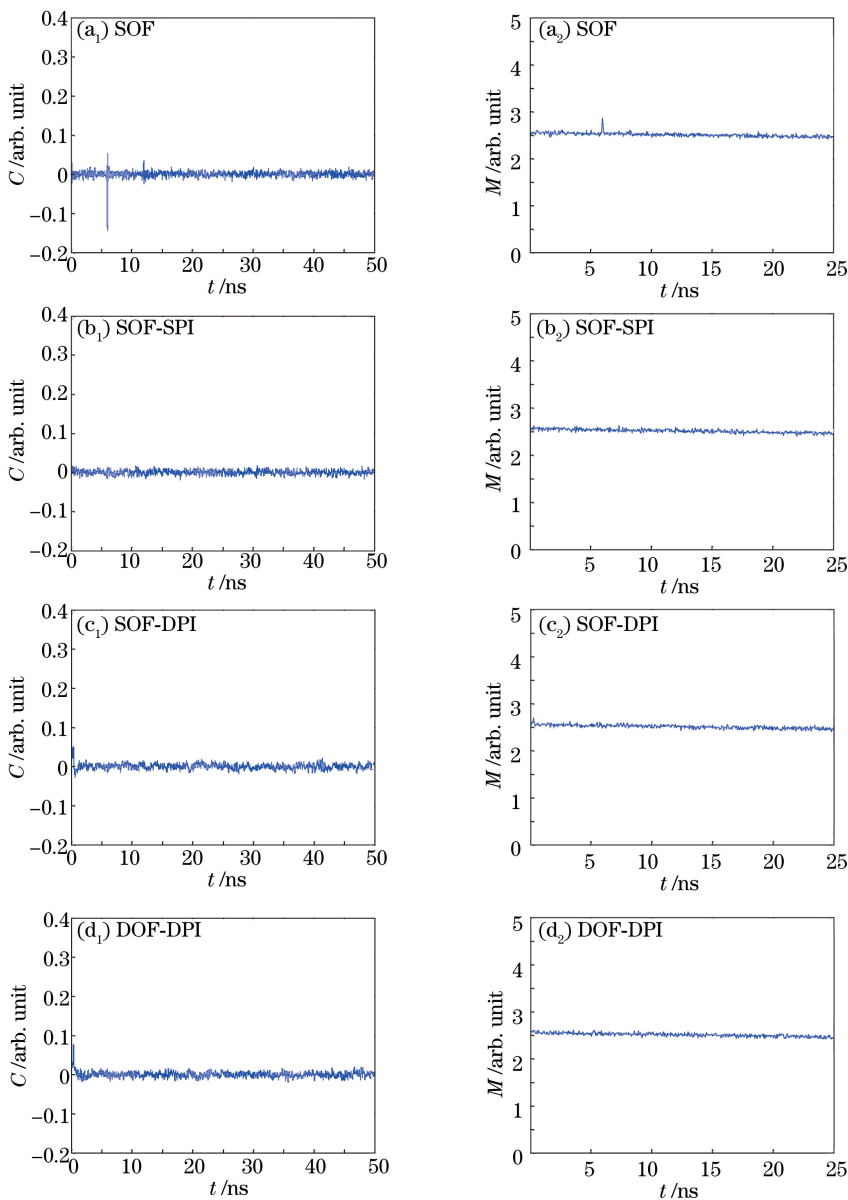


图 3 在不同方案下 (a₁) (b₁) (c₁) (d₁) 自相关函数图; (a₂) (b₂) (c₂) (d₂) 互信息函数图

Fig. 3 Under different schemes, (a₁)(b₁)(c₁)(d₁) ACF diagrams; (a₂)(b₂)(c₂)(d₂) MI function diagrams of DOF-DPI scheme

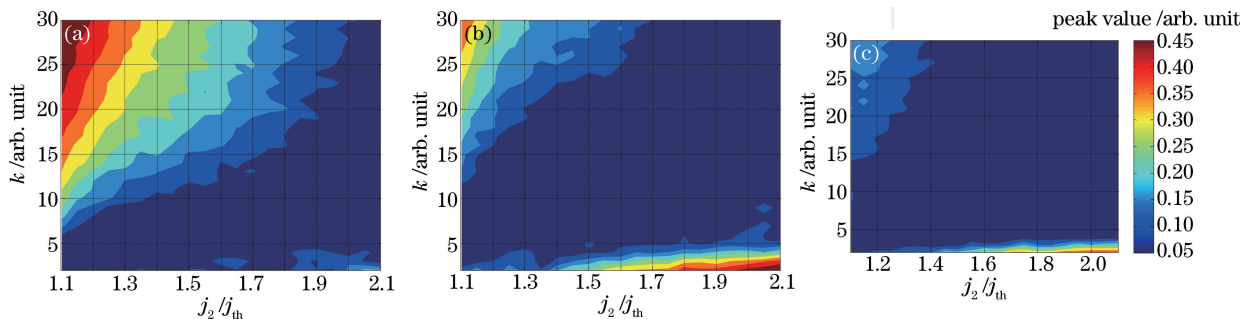


图 4 输出光强延时特征峰峰值二维彩图。(a₁) SOF-SPI 方案; (a₂) SOF-DPI 方案; (a₃) DOF-DPI 方案

Fig. 4 Two-dimensional color maps of peak values of time-delay characteristic peaks of output light intensity.

(a₁) SOF-SPI scheme; (a₂) SOF-DPI scheme; (a₃) DOF-DPI scheme

输出光强延时特征峰峰值在注入强度 k 和从激光器工作电流 j_2 的参数区间内的二维彩图如图 4 所示,

可以看出 SOF-SPI、SOF-DPI、DOF-DPI 三种方案的工作电流和注入强度对延时特征峰峰值抑制效果的综合影响。当从激光器工作电流大于 1.4 倍阈值电流、归一化注入强度大于 4 时,DOF-DPI 方案能使延时特征峰峰值降低到 0.05 以下,而其他方案不能在这个参数区间内使特征峰峰值降低到 0.05 以下,因此 DOF-DPI 方案比 SOF-SPI 方案及 SOF-DPI 方案具有更宽的参数区间,即更容易在实际操作中实现对延时特征峰峰值的抑制。

仿真结果表明,一定范围内的失谐注入能够改善输出混沌光的反馈延时特性。三种不同方案下光强和相位反馈延时特征峰峰值在主、从激光器失谐频率参数区间内的函数图如图 5 所示。

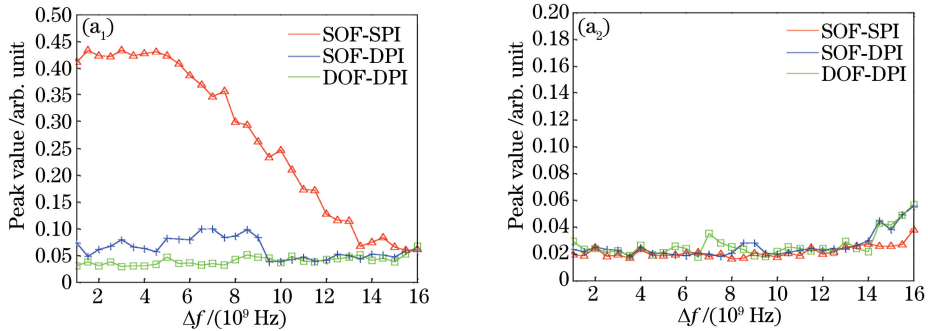


图 5 不同机制下,输出混沌光的延时特征峰峰值随失谐的变化。(a₁)光强延时;(a₂)相位延时
Fig. 5 Variations of peak values of time-delay characteristic peaks of chaotic laser output with detuning Δf under different schemes. (a₁) light intensity time delay; (a₂) phase time delay

由图 5(a₁)可以看出,在主从激光器失谐频率(Δf)位于 0~16 GHz 范围内时,DOF-DPI 方案可以把延时特征峰峰值抑制到 0.05 以下。对于 SOF-DPI 方案而言,当 Δf 在 0~9 GHz 范围内时,延时特征峰峰值已大于 0.05;只有当 Δf 在 9.5~16 GHz 范围内时,延时特征峰峰值小于 0.05。对于 SOF-SPI 方案而言,当 Δf 在 0~16 GHz 范围内时,延时特征峰峰值大于 0.06,且当 Δf 小于 12 GHz 时,延时特征峰峰值大于 0.1,最大可达到 0.43,说明其抑制效果较差。由图 5(a₂)可以看出,在整个失谐频率的参数区间内,三种带混沌光注入的激光器输出光相位延时特征峰均得到良好抑制,但是当 Δf 大于 14 GHz 时,三种方案的相位延时特征峰峰值均呈上升趋势,因此失谐频率不能过大。

4 结 论

通过对激光器输出光的自相关函数和互信息函数进行分析发现,在相同激光器参数条件下,SL 混沌输出光相位反馈延时特征峰的抑制效果比光强的反馈延时特征峰的抑制效果好,并且在一定条件下可以同时实现对混沌激光光强和相位延时特征峰的有效抑制。在相同激光器参数下,相比于 SOF、SOF-SPI、SOF-DPI 方案,DOF-DPI 方案延时特征峰抑制效果更好;在相同抑制程度下,DOF-DPI 方案比其他几种方案具有更宽的参数区间。

参 考 文 献

- 1 Zhao Qingchun, Wang Yuncai. Research progress in security analysis of chaotic optical communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(3): 030602.
赵清春,王云才.混沌激光通信的保密性能研究进展[J].激光与光电子学进展,2010,47(3):030602.
- 2 Li Pu, Wang Yuncai. Research progress in physical random number generator based on laser chaos for high-speed secure communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(6): 060002.
李 璞,王云才.面向高速保密通信的激光混沌物理随机数发生器研究进展[J].激光与光电子学进展,2014,51(6):060002.
- 3 Che Huisheng, Shao Yi. Laser chaos secure communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2003, 40(5): 7-13.
车会生,邵 毅.激光混沌保密通信[J].激光与光电子学进展,2003,40(5):7-13.
- 4 Bourmpos M, Argyris A, Syvridis D. Sensitivity analysis of a star optical network based on mutually coupled

- semiconductor lasers[J]. *J Lightwave Technol*, 2012, 30(16): 2618-2624.
- 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]. *J Lightwave Technol*, 2013, 31(3): 461-467.
 - 6 Wu J G, Wu Z M, Tang X, *et al.* Experimental demonstration of LD-based bidirectional fiber-optic chaos communication[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2013, 25(6): 587-590.
 - 7 Argyris A, Syvridis D, Annovazzi-Lodi V, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fiber optic links[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 343-346.
 - 8 Hong Y H, Lee M W, Jon P, *et al.* GHz bandwidth message transmission using chaotic vertical-cavity-surface-emitting lasers[J]. *J Lightwave Technol*, 2009, 27(22): 5099-5105.
 - 9 Annovazzi-Lodi V, Aromataris G, Benedetti M, *et al.* Private transmission with chaotic lasers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48(8): 1095-1101.
 - 10 Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, *et al.* Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser[J]. *Phys Rev Lett*, 2009, 103(2): 024102.
 - 11 Li P, Wang Y C, Wang A B, *et al.* Direct generation of all-optical random numbers from optical pulse amplitude chaos[J]. *Opt Express*, 2012, 20(4): 4297-4308.
 - 12 Li X Z, Chan S-C. Random bit generation using an optically injected semiconductor laser in chaos with oversampling[J]. *Opt Lett*, 2012, 37(11): 2163-2165.
 - 13 Uchida A, Amano K, Lnoe M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photon*, 2008, 2(12): 728-732.
 - 14 Li N Q, Pan W, Xiang S Y, *et al.* Loss of time delay signature in broadband cascade-coupled semiconductor lasers[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2012, 24(23): 2187-2190.
 - 15 Xiang S Y, Pan W, Zhang L Y, *et al.* Phase-modulated dual-path feedback for time delay signature suppression from intensity and Phase chaos in semiconductor laser[J]. *Opt Commun*, 2014(324): 38-46.
 - 16 Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, *et al.* Loss of time-delay signature in the chaotic output of a semiconductor laser with optical feedback[J]. *Opt Lett*, 2007, 32(20): 2960-2962.
 - 17 Rontani D, Locquet A, Sciamanna M, *et al.* Time-delay identification in a chaotic semiconductor laser with optical feedback: A dynamical point view[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2009, 45(7): 879-891.
 - 18 Wu Y, Wang Y C, Li P, *et al.* Can fixed time delay signature be concealed in chaotic semiconductor laser with optical feedback[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 2012, 48 (11): 1371-1379.
 - 19 Guo Y Y, Wu Y, Wang Y C. Method to identify time delay of chaotic semiconductor laser with optical feedback[J]. *Chinese Optics Letters*, 2012, 10(6): 061901.
 - 20 Lang R, Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1980, 16(3): 347-355.
 - 21 Sukow D W, Heil T, Fischer I, *et al.* Statistical studies of semiconductor lasers with delayed optical feedback[C]. *SPIE*, 1999, 3625: 668-678.