

布里渊散射对光反馈混沌源时延特征的抑制

张建忠^{1,2}, 冯昌坤^{1,2}, 张明江^{1,2}, 刘毅^{1,2}, 张永宁^{1,2}

¹太原理工大学物理与光电工程学院, 山西太原 030024;

²新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 山西太原 030024

摘要 提出了一种利用光纤布里渊散射效应抑制光反馈半导体激光器时延特征的方法。实验研究发现,当平均功率为 200 mW 的混沌激光注入到长为 10 km 的单模光纤中,经过光纤的后向布里渊散射作用,混沌激光自相关曲线在时延 105 ns 处的峰值从 0.251 降低到 0.075,互信息曲线在时延 105 ns 处的峰值从 0.087 降低到 0.008。在此基础上,实验分析了注入光功率对混沌激光时延特征抑制效果的影响,结果表明,当混沌激光注入的平均功率在 200~1500 mW 范围内时,混沌激光的时延特征得到有效抑制;当测量次数在 1~50 范围内时,光纤布里渊散射对混沌激光时延特征的抑制效果较稳定。

关键词 非线性光学; 布里渊散射; 光反馈半导体激光器; 时延特征; 混沌激光

中图分类号 TN248.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0208002

Time-Delay Signature Suppression in Chaotic Laser Source with Optical Feedback by Brillouin Scattering

Zhang Jianzhong^{1,2}, Feng Changkun^{1,2}, Zhang Mingjiang^{1,2},

Liu Yi^{1,2}, Zhang Yongning^{1,2}

¹College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

²Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

Abstract A new method of time-delay signature suppression in semiconductor lasers with optical feedback by utilizing Brillouin scattering effect in optical fibers is proposed. Experimental results show that, when a chaotic laser with an average power of 200 mW is injected into the single mode fiber with a length of 10 km and after the action of Brillouin backscattering in fibers, the peak value at time delay of 105 ns of the chaotic laser auto-correlation trace is reduced from 0.251 to 0.075 and the peak value at time delay of 105 ns of the chaotic laser mutual information trace is reduced from 0.087 to 0.008. On this basis, the influence of optical injection power on time-delay signature suppression effect is experimentally investigated and the results indicate that, when the average power of chaotic laser is within the range of 200-1500 mW, the time-delay signature can be effectively suppressed; when the number of measurements is within the range of 1-50, the time-delay signature suppression effect of chaotic laser by the fiber Brillouin scattering is relatively stable.

Key words nonlinear optics; Brillouin scattering; semiconductor lasers with optical feedback; time delay signature; chaotic laser

OCIS codes 190.3100; 290.1350; 140.5960; 170.6920

收稿日期: 2016-09-19; 收到修改稿日期: 2016-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(61377089,61527819)、山西省自然科学基金项目(2015011049)、山西省回国留学人员科研资助项目(2016-036)

作者简介: 张建忠(1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事分布式光纤传感、高速物理密钥产生方面的研究。

E-mail: zhangjianzhong@tyut.edu.cn

1 引 言

近年来,混沌激光作为激光器一种新的输出形式,已经广泛应用于高速保密通信^[1]、高速物理密钥产生^[2-3]、高精度测距雷达^[4]、光时域反射仪^[5]以及分布式光纤传感^[6]等领域。混沌激光通常由结构简单、性能稳定且能与光通信系统兼容的光反馈半导体激光器产生。然而,光反馈半导体激光器产生的混沌激光存在时延特征,这会在某种程度上限制混沌激光的应用^[3]。因此,混沌激光时延特征的抑制或者消除对混沌激光的应用至关重要。

目前,抑制混沌激光时延特征的方法有很多,主要分为两大类:一类是从混沌激光源本身出发,消除时延特征。Rontani 等^[7]首次从理论上指出,在选择合适的反馈强度和注入电流的条件下,单反馈半导体激光器可有效抑制外腔的时延特征。同时, Lee 等^[8]在双反馈半导体激光器系统中观察到了时延特征被抑制的现象。Wu 等^[9-10]通过实验研究发现,对于相干和非相干单反馈半导体激光器,在选择适当反馈强度和注入电流的条件下,可抑制外腔引起的时延特征。Li 等^[11]通过理论分析和实验验证指出,适当控制失谐频率和反馈强度两个参数可有效抑制光纤光栅单反馈半导体激光器的反馈时延特征。然而,上述通过控制混沌激光源参数来消除时延特征的机理尚不明确,能否成功消除时延特征仍存在异议^[12]。Li 等^[13]利用三个级联耦合的半导体激光器输出了无时延特征的混沌激光信号,但是其混沌光源结构极其复杂。另一类抑制混沌激光时延特征的方法是针对混沌激光的不同应用,通过后续处理来消除时延特征。例如:在基于混沌激光产生随机数的过程中,通过异或差分的方式消除时延特征,即同时构建两个不同的混沌光源,产生不相关的随机序列,通过逻辑异或操作消除周期性^[2],或是采用一种基于最低有效位的纯逻辑运算方法来消除周期性^[3]。这些方案对逻辑器件的要求较高,存在成本昂贵、电子速率瓶颈等问题。在混沌激光保密通信应用中,利用伪随机序列调制相位混沌延迟系统可隐藏时延特征,进而确保通信系统的安全^[14]。然而,该方案仅在理论上得到验证。

除了上述方案,还可以对混沌激光源输出的混沌信号直接进行作用来消除混沌激光的时延特征。例如, Wang 等^[15]提出对光反馈半导体激光器输出的混沌激光直接进行延迟光外差作用可产生时延特征被抑制的、宽带的混沌激光信号。在此基础上,本文提出利用光纤的布里渊散射特性来抑制光反馈半导体激光器输出混沌信号的时延特征,避免了混沌激光源结构改造、参数调节等繁琐过程,有利于提高分布式光纤传感系统的相关性能^[6]。

2 实验装置

利用光纤布里渊散射效应抑制混沌激光时延特征的实验装置如图 1 所示,其中利用光纤环构成的外腔光反馈混沌半导体激光器如图 1 中虚线框所示。无光隔离器的半导体激光器(DFB-LD, 阈值电流为 22 mA、中心波长为 1550 nm)在工作电流为 33 mA 时输出连续光,该连续光经过由光环行器(OC1)、50:50 的光耦合器、可变光衰减器(VA)、偏振控制器(PC)构成的长为 21 m 的光纤反馈环后,再次回到内腔中。通过调节反馈信号的偏振态和反馈强度,光反馈半导体激光器可输出混沌激光。光隔离器(ISO)用于确保光反馈半

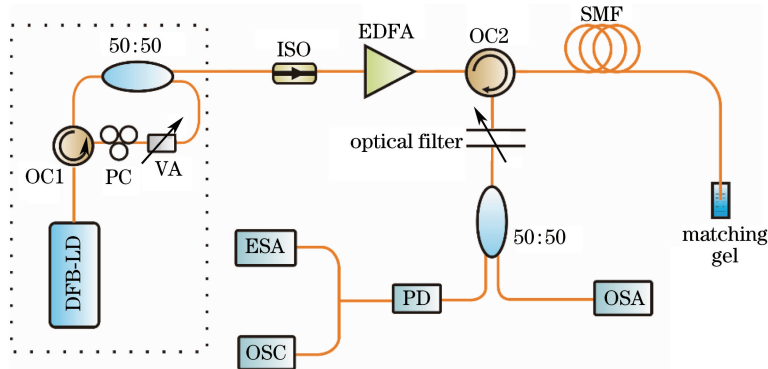


图 1 利用光纤布里渊散射效应抑制混沌激光时延特征的实验装置

Fig. 1 Experimental setup for suppressing time-delay signature in chaotic lasers by Brillouin scattering effect in fibers

导体激光器产生的混沌激光信号的单向传输,信号经光放大器(EDFA)放大后,由光环行器(OC2)注入到长为 10 km 的标准单模光纤(SMF)中。为了防止光信号在单模光纤末端产生菲涅耳反射,将单模光纤的末端放入折射率匹配液中。单模光纤散射的混沌激光信号经过光滤波器后,后向布里渊散射的斯托克斯光信号被滤出;再经50:50光耦合器分束,一束输入到高分辨率光谱分析仪(OSA,分辨率为 5 MHz)中以测量混沌激光的光谱,另一束经宽带光电探测器(PD)转换成电信号后,输入到带宽为 26.5 GHz 的频谱仪(ESA)和带宽为36 GHz、采样率为 80 GS/s 的实时示波器(OSC)中以分析混沌信号的光谱和时序。

3 实验结果

设置DFB-LD的工作电流为阈值电流(33 mA)的 1.5 倍,调节反馈光强度为-2 dB,光反馈半导体激光器输出了平均光功率为 87 μ W 的混沌激光信号,对应的光谱如图 2(a)所示。利用 OSA 测得光谱-3 dB 和 -10 dB 的线宽分别为 1.8 GHz 和 6.2 GHz。将光反馈半导体激光器输出的混沌激光注入到单模光纤中,经光纤瑞利散射和布里渊散射后,得到后向散射的混沌激光,其光谱如图 2(b)所示。利用带宽为 5.9 GHz 的可调光滤波器得到后向布里渊散射的斯托克斯光信号,对应的光谱如图 2(c)所示。

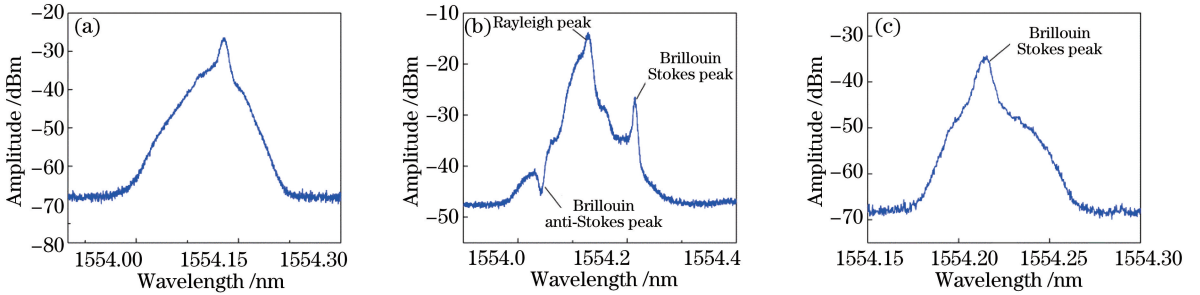


图 2 (a) 光反馈半导体激光器输出的混沌激光光谱;(b) 后向散射的混沌激光光谱;(c) 光滤波器滤出的斯托克斯光谱
Fig. 2 (a) Chaotic laser spectrum from semiconductor laser with optical feedback; (b) chaotic laser spectrum from Brillouin backscattering; (c) Stokes spectrum after an optical filter

将上述光反馈半导体激光器输出的混沌激光注入到单模光纤中,然后对经光纤布里渊散射前、后的混沌激光信号进行对比来确认时延特征抑制的效果。在此,主要利用自相关和互信息函数来证明混沌激光时延特征的抑制。自相关函数通常用来表征一个信号与其时延信号的相似程度,定义为

$$C(\Delta t) = \frac{\langle [P(t + \Delta t) - \langle P(t) \rangle] [P(t) - \langle P(t) \rangle] \rangle}{\sqrt{\langle [P(t) - \langle P(t) \rangle]^2 \rangle \langle [P(t + \Delta t) - \langle P(t) \rangle]^2 \rangle}}, \quad (1)$$

式中 $P(t)$ 为光反馈半导体激光器发射的混沌时间序列, Δt 为时间延迟。反馈外腔对应的延迟时间可从混沌激光信号自相关曲线的峰值位置提取得到。

互信息是信息论中一种有用的信息度量,它是指两个事件集合之间的相关性。 $P(t)$ 和 $P(t + \Delta t)$ 之间的互信息可定义为

$$M(\Delta t) = \sum_{P(t), P(t+\Delta t)} \varphi [P(t), P(t + \Delta t)] \text{lb} \frac{\varphi [P(t), P(t + \Delta t)]}{\varphi [P(t)] \varphi [P(t + \Delta t)]}, \quad (2)$$

式中 $\varphi [P(t), P(t + \Delta t)]$ 为联合分布概率密度, $\varphi [P(t)]$ 和 $\varphi [P(t + \Delta t)]$ 为边缘分布概率密度。通过混沌激光信号互信息曲线上的峰值对应的时延值可确定混沌激光源的外腔时延。

实验中光反馈半导体激光器产生的混沌激光时序如图 3(a1)所示。混沌激光经 EDFA 光放大器放大后注入至单模光纤的入射端的平均功率达到 200 mW,经长为 10 km 的单模光纤的布里渊散射后,其滤出的斯托克斯光信号的时序如图 3(b1)所示。从图中可以看出,混沌激光经光纤的布里渊散射后仍为混沌信号,经计算,其李雅普诺夫指数为 3.42×10^8 /s。图 3(a2)、(b2)分别为混沌激光经光纤布里渊散射前、后对应的自相关函数曲线。由图可知,在外腔反馈时延 $\tau = 105$ ns 和 $\tau = 210$ ns 处,光反馈半导体激光器直接输出的混沌激光信号自相关函数曲线有明显的峰值,分别为 0.251 和 0.102。经光纤布里渊散射后,在反馈时延 $\tau = 105$ ns 处,混沌激光信号自相关函数曲线相关峰值明显下降($C = 0.075$),而且在时延 $\tau = 210$ ns 处相关峰值

下降为 0.043。这是由于从单模光纤输出的后向布里渊散射信号是各点散射信号的叠加,且各点散射的信号在光纤中传输没有规律,因此混沌激光的时延特征在散射的过程中得到有效抑制。图 3(a3)、(b3)分别给出了混沌激光经光纤布里渊散射前、后对应的互信息函数曲线。由图可知,在外腔反馈时延 $\tau = 105$ ns 处,互信息曲线对应的峰值从 0.087 降低到 0.008,进一步有效地证明了混沌激光经过光纤布里渊散射后,其时延特征得到明显抑制。

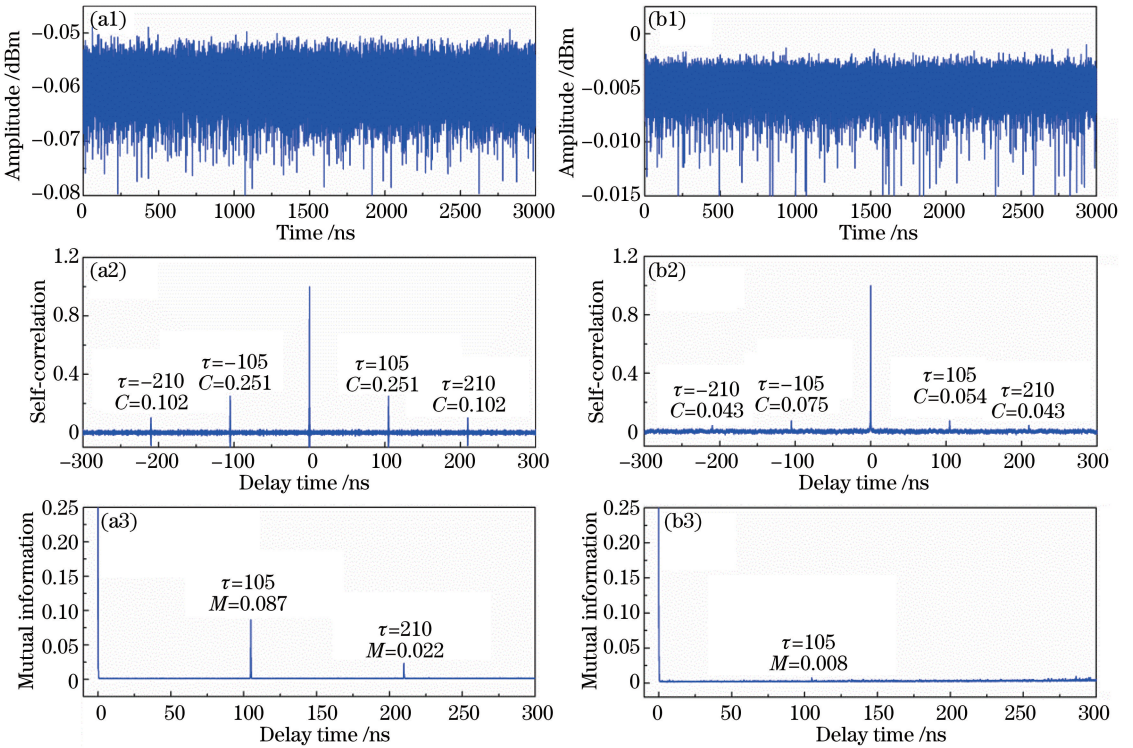


图 3 当混沌光注入的平均光功率为 200 mW 时,混沌激光经光纤布里渊散射前(左)、后(右)的 (a1)(b1)时序、(a2)(b2)自相关曲线和(a3)(b3)互信息曲线

Fig. 3 When the average power of incident chaotic laser is 200 mW, (a1)(b1) time sequences, (a2)(b2) auto-correlation traces, and (a3)(b3) mutual information traces of chaotic laser before (left) and after (right) fiber Brillouin scattering

为了进一步证明光纤布里渊散射对混沌激光的时延特征具有抑制作用,将混沌激光注入单模光纤的平均光功率从 200 mW 提高到 450 mW,混沌激光经光纤布里渊散射前、后的时序、自相关曲线和互信息曲线如图 4 所示。混沌激光经光纤布里渊散射后仍为混沌激光,其李雅普诺夫指数为 2.85×10^8 /s。经光纤布里渊散射后,混沌激光的自相关曲线在时延 $\tau = 105$ ns 处,其峰值从 0.251 降低为 0.054;互信息曲线在时延 $\tau = 105$ ns 处,其峰值从 0.087 降到 0.005。因此,当混沌激光的注入光功率为 450 mW 时,光纤的布里渊散射仍可以有效地抑制混沌激光的时延特征。

图 5 给出了注入混沌激光的平均光功率在 200~1500 mW 范围时,混沌激光经过 10 km 光纤的布里渊散射前、后的时延特征强度的变化情况。由图可以看出,混沌激光在注入光纤前,其自相关曲线峰值几乎均为 0.351;经过光纤布里渊散射后,其自相关曲线峰值得到明显降低,大约为 0.017,时延特征得到有效抑制。

为了说明利用光纤布里渊散射抑制混沌激光时延特征这一方法的稳定性,进一步给出了在不同测量次数下,光纤布里渊散射对混沌激光时延特征的抑制作用。在实验中,选择混沌激光注入单模光纤时的平均光功率为 200 mW。图 6 为混沌激光在时延 $\tau = 105$ ns 处的自相关峰值随测量次数的变化曲线。由图可以看出,当测量次数在 1~50 范围内时,单模光纤入射处混沌激光自相关峰值的波动范围为 0.257~0.278,其平均值为 0.26;经光纤传输透射后的混沌激光相关峰值的波动范围为 0.250~0.260,其平均值为 0.255;经光纤布里渊散射作用后的混沌激光相关峰值的波动范围为 0.088~0.10,其平均值为 0.095。由此得出,经过光纤布里渊散射后,混沌激光的相关峰值明显低于混沌激光在光纤入射处和透射后的相关峰值,且测量 50 次得到的抑制结果几乎相同。因此,光纤布里渊散射效应对混沌激光的时延特征具有比较稳定的抑制效果。

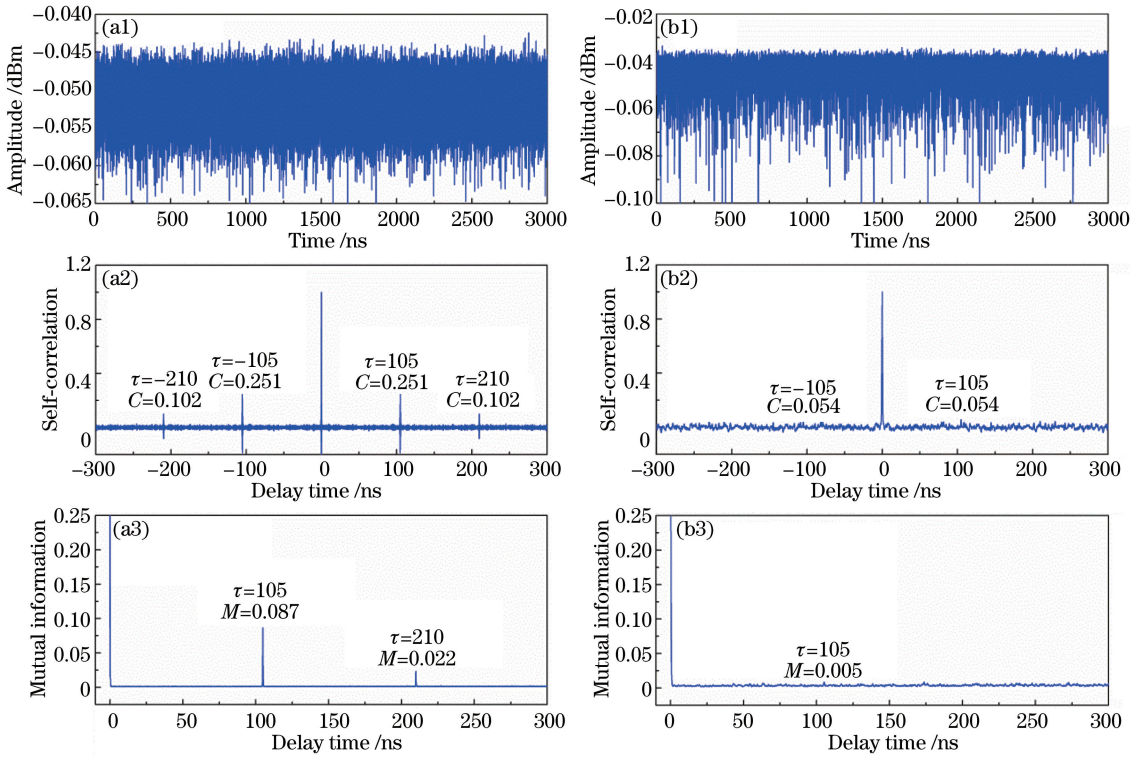


图 4 当混沌光注入的平均光功率为 450 mW 时,混沌激光经光纤布里渊散射前(左)、后(右)的 (a1)(b1)时序、(a2)(b2)自相关曲线和 (a3)(b3)互信息曲线

Fig. 4 When the average power of incident chaotic laser is 450 mW, (a1)(b1) time sequences, (a2)(b2) auto-correlation traces, and (a3)(b3) mutual information traces of chaotic laser before (left) and after (right) fiber Brillouin scattering

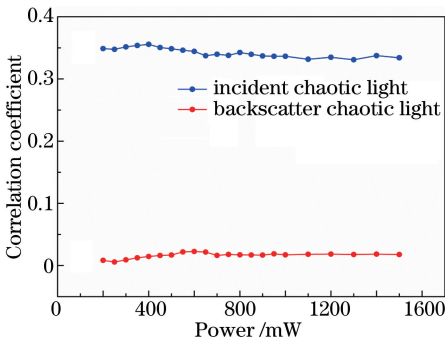


图 5 混沌激光在 $\tau=105$ ns 处自相关峰值随注入光功率的变化

Fig. 5 Variation of auto-correlation peak value at $\tau=105$ ns of chaotic laser with incident laser power

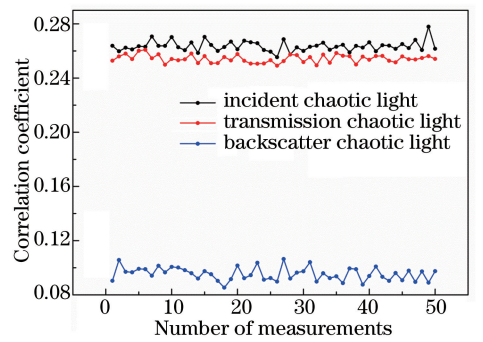


图 6 混沌激光在 $\tau=105$ ns 处自相关峰值随测量次数的变化

Fig. 6 Variation of auto-correlation peak value at $\tau=105$ ns of chaotic laser with number of measurements

4 结 论

利用光纤布里渊散射效应成功抑制了光反馈半导体激光器输出的混沌激光信号的时延特征。当注入光功率分别为 200 mW 和 450 mW 时,散射前的混沌激光的自相关曲线和互信息曲线在 $\tau=210$ ns 处均有很高的相关峰值;经过布里渊散射后的混沌激光在 $\tau=210$ ns 处,相关峰值很难观测到,且在 $\tau=105$ ns 处具有非常低的相关峰值。实验结果表明,经过光纤布里渊散射作用后,混沌激光的时延特征得到很好抑制,且时延抑制的稳定性较好。该研究可为混沌激光保密通信、高速物理密钥产生、混沌激光雷达和光时域反射仪、分布式光纤传感提供性能优良的混沌信号。

参 考 文 献

- [1] Argyris A, Syvridis D, Larger L, *et al.* Chaos-based communications at high bit rates using commercial fibre-optic links[J]. *Nature*, 2005, 438(7066): 343-346.
- [2] Uchida A, Amano K, Inoue M, *et al.* Fast physical random bit generation with chaotic semiconductor lasers[J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(12): 728-732.
- [3] Reidler I, Aviad Y, Rosenbluh M, *et al.* Ultrahigh-speed random number generation based on a chaotic semiconductor laser[J]. *Physical Review Letters*, 2009, 103(2): 024102.
- [4] Lin F Y, Liu J M. Chaotic radar using nonlinear laser dynamics[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2004, 40(6): 815-820.
- [5] Wang Y C, Wang B J, Wang A B. Chaotic correlation optical time domain reflectometer utilizing laser diode[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(19): 1636-1638.
- [6] Ma Z, Zhang M J, Liu Y, *et al.* Incoherent Brillouin optical time-domain reflectometry with random state correlated Brillouin spectrum[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2015, 7(4): 1-7.
- [7] 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]. *Optics Letters*, 2007, 32(20): 2960-2962.
- [8] Lee M W, Rees P, Shore K A, *et al.* Dynamical characterisation of laser diode subject to double optical feedback for chaotic optical communications[J]. *IEE Proceedings-Optoelectronics*, 2005, 152(2): 97-102.
- [9] Wu J G, Xia G Q, Tang X, *et al.* Time delay signature concealment of optical feedback induced chaos in an external cavity semiconductor laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(7): 6661-6666.
- [10] Wu J G, Xia G Q, Cao L P, *et al.* Experimental investigations on the external cavity time signature in chaotic output of an incoherent optical feedback external cavity semiconductor laser[J]. *Optics Communications*, 2009, 282(15): 3153-3156.
- [11] Li S S, Chan S C. Chaotic time-delay signature suppression in a semiconductor laser with frequency-detuned grating feedback[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(6): 541-552.
- [12] 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 Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(11): 1371-1379.
- [13] Li N Q, Wei P, Xiang S Y, *et al.* Loss of time delay signature in broadband cascade-coupled semiconductor lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(23): 2187-2190.
- [14] Nguimdo R M, Colet P, Larger L, *et al.* Digital key for chaos communication performing time delay concealment[J]. *Physical Review Letters*, 2011, 107(3): 034103.
- [15] Wang A B, Yang Y B, Wang B J, *et al.* Generation of wideband chaos with suppressed time-delay signature by delayed self-interference[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8701-8710.