

激光与光电子学进展

基于光谱快速探测的光纤随机激光动态传感

齐逸飞, 林圣淘, 包兴宇, 倪龙群, 王攀, 张娇娇, 王子南*

电子科技大学光纤传感与通信教育部重点实验室, 四川 成都 611731

摘要 拉曼光纤随机激光结合无源传感单元可以实现超长距离的准分布式传感。然而, 受限于光谱探测速度, 该传感方案通常只适用于静态传感领域。针对该问题, 将拉曼光纤随机激光与拍频光谱探测技术相结合, 提出了一种新型的拉曼光纤随机激光长距离动态传感技术。首先, 基于含时光谱稳态模型论证了光谱快速测量对长距离动态传感的适用性。随后, 在原理性验证实验中通过处理本振光与光纤随机激光拍频后的时域信号, 实现了对光纤随机激光光谱的快速测量, 并突破了光波往返时间对传感带宽的限制。同时, 利用去噪卷积神经网络对光谱的中心波长变化进行标定, 大幅提高了扰动信号探测的信号质量, 实现了对不同频率、不同波形的扰动信息的准确测量。该研究为进一步拓展光纤随机激光的应用领域提供了新的思路。

关键词 光纤传感; 光纤随机激光; 拉曼散射; 瑞利散射; 去噪卷积神经网络

中图分类号 O437.3

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230697

Random Fiber Laser Dynamic Sensing Based on Rapid Spectral Detection

Qi Yifei, Lin Shengtao, Bao Xingyu, Ni Longqun,

Wang Pan, Zhang Jiaojiao, Wang Zinan*

Key Laboratory of Optical Fiber Sensing & Communications (Education Ministry of China), University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China

Abstract Raman random fiber laser combined with passive sensing units can realize quasi-distributed sensing over ultra-long distances. However, limited by the spectrum detection speed, this sensing scheme is usually only applicable to static sensing fields. To address this issue, a novel Raman random fiber laser long-distance dynamic sensing system is proposed by integrating Raman random fiber laser with beat frequency interrogation. Firstly, the suitability of rapid spectral measurement for long-distance dynamic sensing is demonstrated based on the time-dependent spectrum-balanced model. Then, in the proof-of-concept experiment, the spectrum of Raman random fiber laser can be measured rapidly by processing the temporal signals of the local oscillator light and the random fiber laser after beating, breaking through the limitation of the round-trip time of the light on the sensing bandwidth. Meanwhile, the center wavelength of the spectrum is calibrated by using a denoising convolutional neural network, which significantly improves the signal quality of disturbance signal detection and achieves accurate measurement of disturbance information with different frequencies and waveforms. This research provides new insights for further expanding the application fields of Raman random fiber laser.

Key words fiber sensor; random fiber laser; Raman scattering; Rayleigh scattering; denoising convolutional neural networks

1 引言

2010年 Turitsyn 等^[1]首次提出基于拉曼散射的分布式光纤随机激光器, 不同于传统激光器^[2-3], 拉曼光纤随机激光器没有传统的谐振腔结构, 它是利用光纤中的瑞利散射提供反馈, 拉曼散射提供增益。基于光纤随机激光独特的散射和增益机制, 其光谱相关性以及动力学统计特性等方面成为前沿研究方向^[4-5], 也使

得光纤随机激光成为了研究复杂物理系统的理想平台^[6]。此外, 因为其具有结构简单^[7]、光-光转换效率高^[8-9]和波长可调谐^[10-12]等特性, 光纤随机激光在长距离传感^[13]、高功率激光^[14-16]和分布式放大^[17-19]等领域得到广泛的应用。并且因其具有低相干和光谱可控等特点, 光纤随机激光目前被认为是下一代激光惯性约束聚变装置的种子源候选方案之一^[20]。

在长距离传感领域, 拉曼光纤随机激光基于其稳

收稿日期: 2023-02-23; 修回日期: 2023-03-30; 录用日期: 2023-04-28; 网络首发日期: 2023-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(62075030)、高等学校学科创新引智基地项目(B14039)

通信作者: *znwang@uestc.edu.cn

定的激射特性^[21],出色的抗外界干扰能力^[13]以及独特的长腔结构展现出了显著的优势。2012年,本团队^[13]提出了基于拉曼光纤随机激光的长距离传感方案,并且在 100 km 的传感距离上实现了高达 35 dB 的信噪比,后续本团队阐明了结合有源光纤可进一步延长其传感距离^[22]。与前述方案仅使用单根光纤不同,Fernandez-Vallejo 等^[23]提出了一种基于前向泵浦光纤随机激光的双路径方案,将传感距离提升至 200 km,但只能实现光纤尾端传感器的静态信号解调。此外,基于波分复用可以实现多点传感^[24],Leandro 等^[25]基于脉冲型光纤随机激光和波分复用技术,实现了对 10 个传感点的准分布式感知,但信噪比较低。目前,上述传感方案都是通过光谱仪对光谱进行探测,探测速度受限(通常为 Hz 量级),因此只能实现对准静态扰动的测量。

为了进一步拓展拉曼光纤随机激光传感系统的应用场景,2022年,本团队^[26]基于拉曼增益谱的时谱映射关系进行超快的光谱变化映射,实现了长距离、大带宽的光纤随机激光传感。此外,在该项工作的基础上还提出了含时光谱稳态模型,分析了传感器反馈带宽对系统传感灵敏度的影响,以此优化了传感性能^[27]。但上述传感方案中,传感信号起源于激射波长对应的拉曼增益系数变化,但由于光纤拉曼增益谱在传感系统工作区间变化幅度很小,激光的强度变化有限,难以实现较高的信噪比。

针对上述问题,本文提出了一种基于拉曼光纤随机激光光谱快速测量的长距离动态传感技术。首先基于含时光谱稳态模型,探讨了基于光谱快速测量实现光纤随机激光动态传感的原理,在原理性验证实验中设计了基于后向泵浦的 75 km 窄带拉曼光纤随机激光器,激光器由相移光纤布拉格光栅(FBG)提供激射反馈,并且 FBG 作为其传感元件。拉曼光纤随机激光与窄线宽本振光进行拍频,通过对拍频后的时域数据进行短时傅里叶变换,可以得到拉曼光纤随机激光光谱信息。此外,为了解决实验中光谱存在较大噪声的问题,基于实验结果构造了训练数据集,对去噪卷积神经网络(DnCNN)

进行训练,利用训练后的网络对光谱信息进行去噪处理,从而实现快速测量,并分别展示了对正弦波、啁啾波和三角波三种扰动信号的精确还原。

2 仿真研究

所提长距离动态传感技术基于一阶后向泵浦光纤随机激光,对应的含时光谱稳态模型^[28]为

$$\frac{dP_0^\pm}{dz} \pm \frac{1}{v_g} \frac{dP_0^\pm}{dt} = \mp \alpha_0 P_0^\pm \mp g_1 \frac{f_0}{f_1} P_0^\pm$$

$$(P_1^+ + P_1^- + \Gamma_1) \pm \epsilon_0 P_0^\mp, \quad (1)$$

$$\frac{dP_1^\pm(f)}{dz} \pm \frac{1}{v_g} \frac{dP_1^\pm(f)}{dt} =$$

$$\pm g_1(f) (P_0^+ + P_0^-) [P_1^\pm(f) + 0.5\Gamma_1] \mp$$

$$\alpha_1(f) P_1^\pm(f) \pm \epsilon_1(f) P_1^\mp(f), \quad (2)$$

$$\Gamma_i = 4hf_i \Delta f_i \left\{ 1 + \frac{1}{\exp[h(f_{i-1} - f_i)/K_B T] - 1} \right\}, \quad (3)$$

$$P_0^+(0) = P_m, P_1^+(0, \omega) = R_{11}(\omega) P_1^-(0, \omega), \quad (4)$$

$$P_0^-(L) = R_{10} P_0^+(L), P_1^-(L, \omega) = R_{11}(\omega) P_1^+(L, \omega), \quad (5)$$

式中:下标‘0’和‘1’分别为 1465 nm 泵浦光和一阶 1550 nm 斯托克斯光;上标‘+’和‘-’分别代表正向和后向; T 为光纤的绝对温度; h 为普朗克常数; K_B 为玻尔兹曼常数; Γ 为拉曼自发噪声引入的光子数; v_g 为群速度; P 、 f 、 α 、 g 和 ϵ 分别为功率、频率、损耗系数、拉曼增益系数和瑞利散射系数。式(4)和式(5)为边界条件,式中: P_m 为输入泵浦功率,设置为 1.5 W; L 为光纤长度,设置为 75 km; R_{10} 代表泵浦光在光纤后端的端面反射; $R_{11}(\omega)$ 和 $R_{11}(\omega)$ 分别为一阶斯托克斯光在光纤前端的端面反射和光纤后端 FBG 的反射谱。该模型在一阶斯托克斯光部分引入频率分量 ω ,在整个过程引入时间分量 t ,可得到随时间变化的光谱信息。此外,该模型可以通过时域有限差分法(FDTD)进行求解,光谱信息如图 1(a)所示。

FBG 反射峰的中心波长满足下式

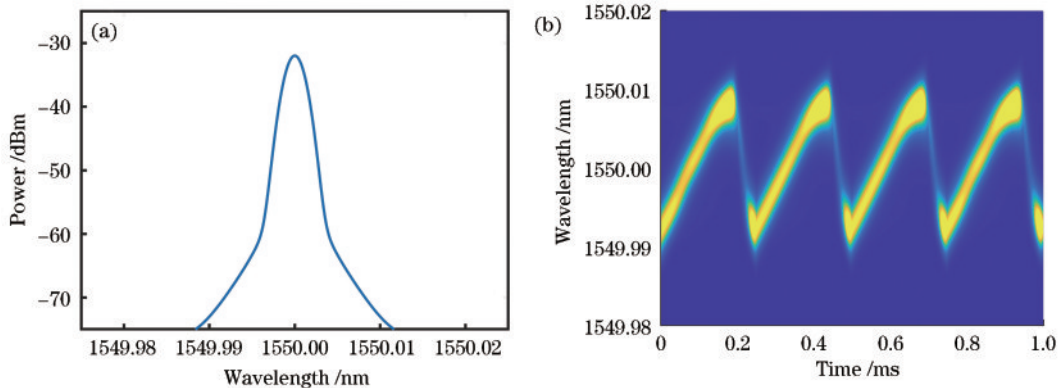


图 1 仿真结果。(a)仿真光谱图;(b)受到三角波扰动的时频图

Fig. 1 Simulation result. (a) Simulation spectrum; (b) time-frequency diagram disturbed by triangular waves

$$\lambda_{\text{FBG}} = 2n\Lambda, \quad (6)$$

式中： n 为纤芯有效折射率； Λ 为光纤光栅周期。当对FBG施加应力时，光纤光栅周期 Λ 会产生相应的变化，从而导致FBG中心波长产生对应的频移。所以在仿真中只需改变FBG反射峰的中心波长便可以验证系统的传感能力。对FBG施加频率为4 kHz的两侧斜率不同的三角波扰动，受到扰动的时频图如图1(b)所示，斯托克斯光谱的中心波长随时间变化对应了FBG所受到的扰动信息。因为当反馈发生变化时，光纤随机激光需要时间进行重建^[28]，所以在图1(b)中斜率大的一侧光功率小。仿真证实了光谱快速测量可以实现长距离动态传感。

3 实验设计

基于光谱快速探测的光纤随机激光动态传感系统实验装置如图2所示。1455 nm泵浦激光通过波分复用器(1455 nm/1550 nm)的1455 nm端口注入

75 km普通单模光纤。泵浦功率设定为2 W，泵浦功率与光谱的中心波长无关，扰动信号的还原基于对光谱中心波长的标定，因此当泵浦功率变化时，不会影响信号解调结果。受到探测器带宽的限制，需要窄带光纤随机激光，因此选择相移FBG的透射峰作为反馈。普通单模光纤尾端与四通道环形器2端口相连，匹配FBG与环形器3端口相连，相移FBG两端分别与环形器1、4端口相连。相移FBG的透射谱与匹配FBG的反射谱共同为一阶拉曼光纤随机激光提供反馈，其反馈光谱如图3所示，普通单模光纤中的拉曼散射提供增益。实验中使用窄线宽可调谐激光(NLL)作为本振光，波分复用器1550 nm端口生成的一阶光纤随机激光与本振光进行拍频。在数据采集方面，首先采用一个高分辨率光谱仪测量拍频之后的激光光谱，随后使用一个带宽为12 GHz的光电探测器探测时域信号，并通过一个采样率为20 GSa/s的示波器进行采集。

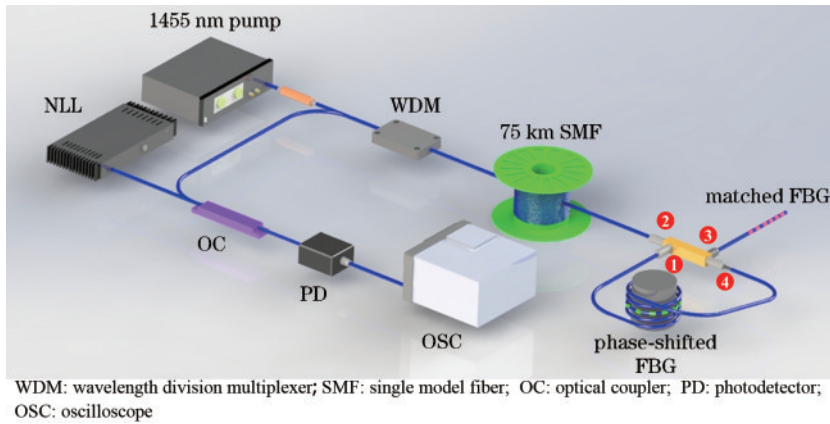


图2 基于光谱快速探测的光纤随机激光动态传感实验装置图

Fig. 2 Experimental setup for random fiber laser dynamic sensing based on rapid spectral detection

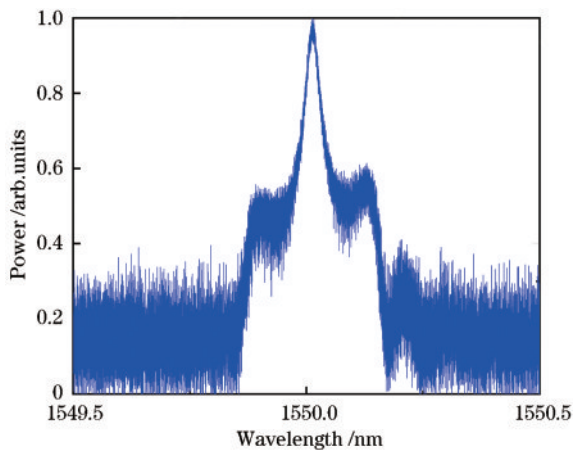


图3 光纤随机激光的反馈光谱

Fig. 3 Spectrum of random fiber laser feedback

拉曼光纤随机激光和NLL的输出时域电场强度 $E_{\text{R}}(t)$ 和 $E_{\text{NLL}}(t)$ 表示为

$$E_{\text{R}}(t) = \sum_{i=1}^n |P(\omega_i)| \sin(2\pi\omega_i t + \varphi_i), \quad (7)$$

$$E_{\text{NLL}}(t) = |P_{\text{NLL}}| \sin(2\pi\omega_{\text{NLL}} t + \varphi_{\text{NLL}}), \quad (8)$$

式中： ω_i 和 ω_{NLL} 分别为拉曼光纤随机激光和NLL的频率； φ_i 和 φ_{NLL} 分别为拉曼光纤随机激光和NLL的相位。光电探测器带宽有限，和频部分被滤除，因此在探测器中只能测得差频信号，表示为

$$E(t) \propto |P_{\text{NLL}}| \sum_{i=1}^n |P(\omega_i)| \sin[2\pi(\omega_{\text{NLL}} - \omega_i)t + \Delta\varphi]. \quad (9)$$

然后对产生的时域信号进行短时傅里叶变换，可以实现对拉曼光纤随机激光器光谱的快速探测^[29]。

4 实验结果及分析

图4是基于高分辨率光谱仪测得的一阶拉曼光纤随机激光与本振光拍频的频谱图。本振光与光纤随机激光中心波长的频差为4.17 GHz，满足探测器的带宽要求。通过对采集的时域信号进行短时傅里叶变换可以得到拉曼光纤随机激光的光谱信息。如图5(a)所示，对FBG施加扰动，并将得到的光谱信息以时间和

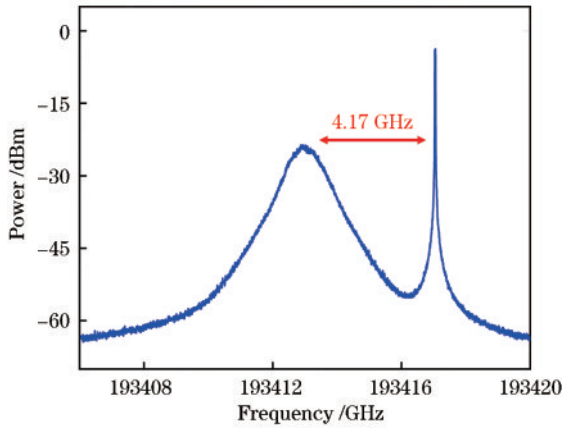


图4 拉曼光纤随机激光与窄线宽激光耦合后的频谱图
Fig. 4 Spectrum of Raman random fiber laser coupled with NLL

频率上的二维图像形式呈现,时间分辨率为 $0.1 \mu\text{s}$ 。由于光纤随机激光光谱的峰值具有宽包络,所以需要

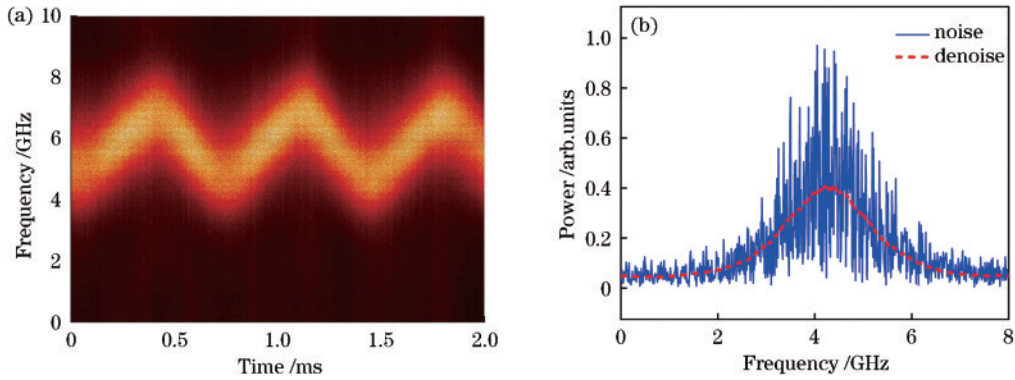
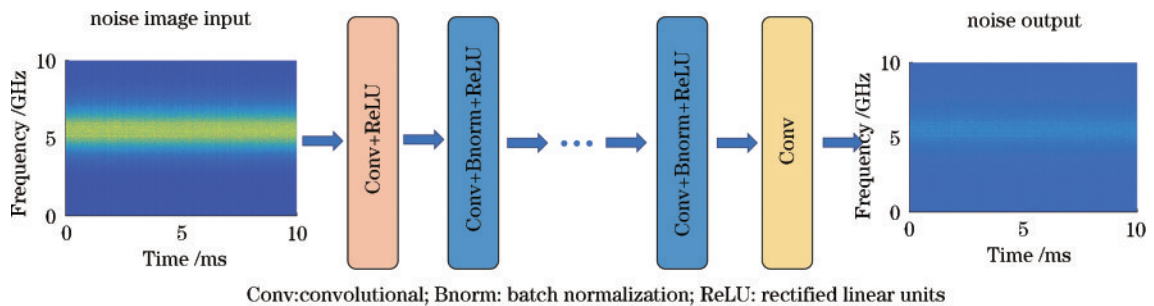


图5 时频域解调结果。(a)受到扰动的时频图;(b)未去噪的光谱与去噪后的光谱对比图

Fig. 5 Time-frequency domain demodulation result. (a) Disturbed time-frequency diagram; (b) comparison between noised spectrum and denoised spectrum



Conv:convolutional; Bnorm: batch normalization; ReLU: rectified linear units

图6 去噪卷积神经网络的流程图

Fig. 6 Flow chart of denoising convolutional neural networks

实验中通过压电陶瓷传感器(PZT)分别对相移FBG施加频率为2 kHz的正弦波扰动,频率为1~2 kHz的啁啾波扰动和频率为500 Hz的三角波扰动,通过对光谱中心波长进行标定,得到的未去噪的扰动信号如图7(a)、(c)、(e)所示,扰动信息的信号质量较差。随后使用经过训练的DnCNN对二维光谱信号进行去噪处理,然后对光谱的中心波长进行标定,去噪后

通过对光谱的中心波长进行标定获得更准确的扰动时域信息。然而,如图5(b)实线所示,由于光纤随机激光没有固定的腔体结构,没有稳定的纵模信号,因此展现出瞬时多纵模的动态波动。这导致解调出的光谱信息无法准确判断其中心波长的位置,在图5(a)中表现出类似噪声的二维图像。

采用DnCNN图像去噪的手段对光谱的中心波长进行精确标定^[30]。DnCNN利用残差学习的方式将噪声从图像中分离,通过将批量归一化与残差学习相结合来加快训练过程并提升去噪性能。DnCNN结构图如图6所示,通过输入带噪声的图像,输出图像中的噪声信息,最后将噪声减去便可得到无噪图像。首先需要构造训练数据集对该网络进行训练,使用实验中采集到的无扰动并经过多次平均后的光谱作为训练数据对网络进行训练;然后使用训练后的DnCNN对光谱进行去噪处理,去噪之后的光谱如图5(b)虚线所示,可以得到平滑的光谱曲线。

的扰动信号如图7(b)、(d)、(f)所示,实现了对扰动信号的准确还原。对光谱中心波长的准确标定是实现扰动信号还原的关键,而对于未去噪的光谱,其中心波长存在一个较大的不确定范围。对于去噪后的光谱,由于显著降低了中心波长范围的不确定程度,可以更准确地标定其中心波长。如图7(d)所示,由于PZT对不同频率的信号响应不同,扰动幅度的大小随着扰动频

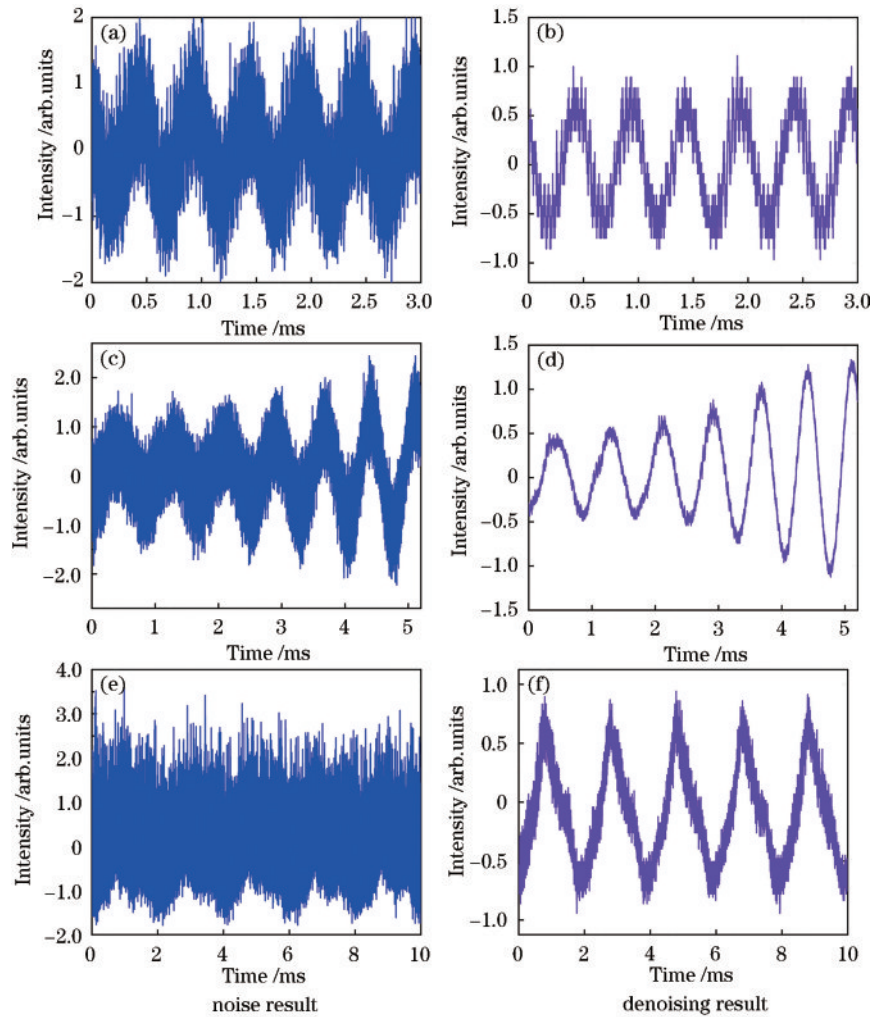


图7 实验结果。(a)(b)正弦波; (c)(d)啁啾波; (e)(f)三角波
Fig. 7 Experiment results. (a)(b) sine wave; (c)(d) chirp wave; (e)(f) triangle wave

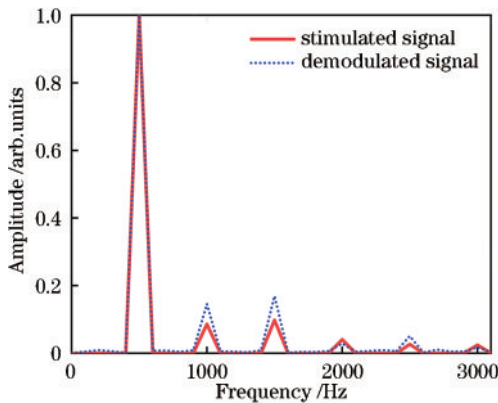


图8 解调的三角波信号和其预设激励信号的频谱图
Fig. 8 Frequency spectrum of the demodulated triangle signal and its preset stimulated signal

率的变化而变化。解调的三角波信号和其预设激励信号的频谱对比如图8所示。虽然三角波重复频率为500 Hz,但其频谱中包含着1 kHz、1.5 kHz、2 kHz等诸多谐波分量,并且实验中解调信号与预设激励信号基本吻合,因此实验时通过对频率范围覆盖1~2 kHz的

啁啾波扰动信号和重复频率为500 Hz三角波扰动信号进行还原,验证了该技术具有感知不同频率信号扰动的能力。此外该传感系统是对连续光信号进行探测的,因此可以克服光往返时间对传感带宽的限制(75 km 光纤长度对应的传统方式传感带宽上限为667 Hz),实现宽带传感,实验也充分证实了这一特性。

5 结 论

本文提出并实现了一种基于光谱快速探测的光纤随机激光长距离动态传感技术。通过使用窄线宽本振光与拉曼光纤随机激光拍频,并对拍频后采集的时域信息进行分析,实现了对光纤随机激光光谱的快速测量。同时,还引入DnCNN对光谱中心波长变化进行标定,实现了在75 km传感距离上对正弦扰动、啁啾扰动以及三角扰动的高质量还原。本工作将对基于拉曼光纤随机激光的长距离动态传感相关研究起到推动作用。

参 考 文 献

[1] Turitsyn S K, Babin S A, El-Taher A E, et al. Random distributed feedback fibre laser[J]. Nature Photonics,

- 2010, 4(4): 231-235.
- [2] Ma P F, Song J X, Wang G J, et al. 高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(9): 0916002.
马鹏飞, 宋家鑫, 王广建, 等. 高功率窄线宽光纤激光突破 6 kW 级近单模输出[J]. 中国激光, 2022, 49(9): 0916002.
- [3] 刘一州, 乔文超, 高空, 等. 高功率超快光纤激光技术发展研究[J]. 中国激光, 2021, 48(12): 1201003.
Liu Y Z, Qiao W C, Gao K, et al. Development of high-power ultrafast fiber laser technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(12): 1201003.
- [4] Sugavanam S, Sorokina M, Churkin D V. Spectral correlations in a random distributed feedback fibre laser[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15514.
- [5] Lima B C, Pincheira P I R, Raposo E P, et al. Extreme-value statistics of intensities in a cw-pumped random fiber laser[J]. Physical Review A, 2017, 96(1): 013834.
- [6] González I R R, Lima B C, Pincheira P I R, et al. Turbulence hierarchy in a random fibre laser[J]. Nature Communications, 2017, 8: 15731.
- [7] Churkin D V, Sugavanam S, Vatik I D, et al. Recent advances in fundamentals and applications of random fiber lasers[J]. Advances in Optics and Photonics, 2015, 7(3): 516-569.
- [8] Wang Z N, Wu H, Fan M Q, et al. High power random fiber laser with short cavity length: theoretical and experimental investigations[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2015, 21(1): 10-15.
- [9] Xu J M, Huang L, Jiang M, et al. Near-diffraction-limited linearly polarized narrow-linewidth random fiber laser with record kilowatt output[J]. Photonics Research, 2017, 5(4): 350-354.
- [10] Pinto A M R, Frazão O, Santos J L, et al. Multiwavelength Raman fiber lasers using Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirrors combined with random cavities[J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(10): 1482-1488.
- [11] Shawki H, Kotb H, Khalil D. Single-longitudinal-mode broadband tunable random laser[J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3247-3250.
- [12] Sugavanam S, Yan Z, Kamynin V, et al. Multiwavelength generation in a random distributed feedback fiber laser using an all fiber Lyot filter[J]. Optics Express, 2014, 22(3): 2839-2844.
- [13] Wang Z N, Rao Y J, Wu H, et al. Long-distance fiber-optic point-sensing systems based on random fiber lasers[J]. Optics Express, 2012, 20(16): 17695-17700.
- [14] Du X Y, Zhang H W, Wang X L, et al. Short cavity-length random fiber laser with record power and ultrahigh efficiency[J]. Optics Letters, 2016, 41(3): 571-574.
- [15] Du X Y, Zhang H W, Ma P F, et al. Kilowatt-level fiber amplifier with spectral-broadening-free property, seeded by a random fiber laser[J]. Optics Letters, 2015, 40(22): 5311-5314.
- [16] Zhang H W, Zhou P, Wang X, et al. Hundred-watt-level high power random distributed feedback Raman fiber laser at 1150 nm and its application in mid-infrared laser generation[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 17138-17144.
- [17] Wang Z N, Zeng J J, Li J, et al. Ultra-long phase-sensitive OTDR with hybrid distributed amplification[J]. Optics Letters, 2014, 39(20): 5866-5869.
- [18] Jia X H, Rao Y J, Peng F, et al. Random-lasing-based distributed fiber-optic amplification[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 6572-6577.
- [19] Tan M, Rosa P, Le S T, et al. Transmission performance improvement using random DFB laser based Raman amplification and bidirectional second-order pumping[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2215-2221.
- [20] Fan M Q, Lin S T, Yao K, et al. Spectrum-tailored random fiber laser towards ICF laser facility[J]. Matter and Radiation at Extremes, 2023, 8(2): 025902.
- [21] Zhang Y L, Wang S S, She M Z, et al. Spectrally programmable Raman fiber laser with adaptive wavefront shaping[J]. Photonics Research, 2023, 11(1): 20-26.
- [22] Wang Z N, Sun W, Wu H, et al. Long-distance random fiber laser point sensing system incorporating active fiber[J]. Optics Express, 2016, 24(20): 22448-22453.
- [23] Fernandez-Vallejo M, Bravo M, Lopez-Amo M. Ultra-long laser systems for remote fiber Bragg gratings arrays interrogation[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(14): 1362-1364.
- [24] 曹健华, 林圣淘, 王子南, 等. 超长距离光纤随机激光多点传感系统的设计与实现[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306006.
Cao J H, Lin S T, Wang Z N, et al. Design and implementation for ultra-long-distance multi-point sensing system based on random fiber laser[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306006.
- [25] Leandro D, DeMiguel Soto V, Perez-Herrera R A, et al. Random DFB fiber laser for remote (200 km) sensor monitoring using hybrid WDM/TDM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(19): 4430-4436.
- [26] Lin S T, Wang Z N, Qi Y F, et al. Wideband remote-sensing based on random fiber laser[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(9): 3104-3110.
- [27] Qi Y F, Lin S T, Zhang J J, et al. Impact of feedback bandwidth on Raman random fiber laser remote-sensing[J]. Optics Express, 2022, 30(12): 21268-21275.
- [28] Lin S T, Wang Z N, Zhang J J, et al. Radiation build-up and dissipation in Raman random fiber laser[J/OL]. Science China Information Sciences: 1-10 [2023-01-02]. <https://www.sciengine.com/SCIS/doi/10.1007/s11432-022-3677-7>.
- [29] 冯智宇, 成煜, 苑立波, 等. 波长可调谐窄线宽激光器的线宽特性[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(21): 2114003.
Feng Z Y, Cheng Y, Yuan L B, et al. Linewidth characteristics of wavelength tunable narrow linewidth laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(21): 2114003.
- [30] Zhang K, Zuo W M, Chen Y J, et al. Beyond a Gaussian denoiser: residual learning of deep CNN for image denoising[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2017, 26(7): 3142-3155.