

激光与光电子学进展

基于双边带干涉的预泵浦布里渊光时域分析系统

秦莉, 王澜澜, 梁浩*, 程凌浩

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

摘要 为了降低布里渊频谱展宽造成的拟合误差, 提出采用双边带连续光作为探测信号, 并利用干涉谱进行传感。与传统的布里渊增益谱相比, 所得频谱在共振频谱附近具有更窄的线宽, 预泵浦温度传感中双峰拟合的误差减小, 系统的频率分辨率得到了提高, 从而实现高空间分辨率和高频率分辨率的基于双边带干涉的预泵浦布里渊光时域分析(BOTDA)系统。实验结果表明, 利用所提方法在 100 m 保偏光纤上可以实现 50 cm 的空间分辨率和 0.37 MHz 的频率分辨率。与传统的单边带预泵浦系统相比, 相同空间分辨率下所提系统的频率分辨率提高 2 倍。

关键词 光纤光学; 布里渊散射; 脉冲预泵浦; 布里渊干涉谱; 光纤传感

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0106003

Pre-Pump Brillouin Optical Time Domain Analysis System Based on Double-Sideband Interference

Qin Li, Wang Lanlan, Liang Hao*, Cheng Linghao

Institute of Photonics Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract In order to reduce the fitting error caused by the broadening of the spectrum, this paper proposes to use the double-sideband continuous light as the detection signal and use its interference spectrum for sensing. Compared with the traditional Brillouin gain spectrum, the obtained spectrum has a narrower linewidth near the resonance spectrum, the error of the double-peak fitting in the pre-pump temperature sensor is reduced, and the frequency resolution of the system is improved, so as to achieve high spatial resolution and high frequency resolution of a pre-pump Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) system based on double-sideband interference. Experimental results show that 50 cm spatial resolution and 0.37 MHz frequency resolution can be achieved on 100 m polarization maintaining fiber by using this method. Compared with the traditional single side band pre-pump system, the frequency resolution of the system is increased by 2 times under the same spatial resolution.

Key words fiber optics; Brillouin scattering; pulse pre-pump; Brillouin interference spectrum; fiber sensing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 290.5900

1 引言

在分布式光纤传感技术中, 基于布里渊受激散射的布里渊光时域分析(BOTDA)技术由于可以在大范围内实现较高精度的温度或者应力传

感, 因此在大型建筑的结构健康监测中具有广阔的应用前景。空间分辨率是分布式光纤传感器的主要性能指标^[1-6], 是传感器在沿光纤长度上所能分辨的最小尺度^[7-11]。然而传统的布里渊传感器受声子寿命的限制, 为了有效激发布里渊效应, 脉

收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2020-06-01; 录用日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(61675091)

*E-mail: tlianghao@jnu.edu.cn

冲光持续时间不能小于 10 ns, 导致空间分辨率不能优于 1 m。脉冲预泵浦技术 (PPP) 通过低功率的长脉冲建立稳态声场, 利用该声场激发的高功率短脉冲与探测光的相互作用来突破声子寿命的限制, 实现高空间分辨率的传感^[12-17]。然而, 该技术在传感过程中采集到的布里渊频谱是整个脉冲覆盖光纤段的布里渊频谱的叠加, 因此在热点位置会出现多峰的结构^[18-19]。布里渊频谱具有一定宽度, 在进行多峰数据拟合时, 会造成较大的拟合误差。因此, 本文提出利用双边带连续光与预泵浦脉冲光在光纤中相互作用下的干涉谱进行传感。传感过程中泵浦脉冲受激布里渊散射 (SBS) 效应影响上下两个边带的振幅和相位, 通过同时检测两个边带的相干叠加信号, 获得光功率随相位变化的信息。与传统布里渊增益谱相比, 所获得的干涉谱在中心频率附近具有更窄的线宽, 在多峰拟合时可以通过降低拟合误差获得更高的频率分辨率。在温度传感实验中, 利用 5 ns 的预泵浦脉冲光在 100 m 的保偏光纤中获得了 50 cm 的空间分辨率和 0.37 MHz 的频率分辨率 (对应的温度分辨率为 0.37 °C), 这为利用基于预泵浦技术的布里渊分布式传感器实现高空间分辨率和高频率分辨率提供了新的技术方向。

2 基本原理

基于脉冲预泵浦技术的 BOTDA 是利用受激布里渊 (SBS) 过程中的声子弛豫效应实现厘米量级空间分辨率的传感方案。其脉冲光构成如图 1 所示。通常 α 和 γ 分量为相位和幅度相等的长脉冲, 持续时间远大于 10 ns。 β 分量为宽度小于 10 ns 的窄脉冲, 其相位和幅度与另外两个分量不同。在传感过程中, α 分量首先进入光纤与反向传输的连续探测光进行 SBS 作用, 激发出稳态的声子。当 β 分量进入光纤与探测光相互作用时, 该脉冲宽度很窄, 来不及对 β 分量窄脉冲激发的声子进行相位匹配, 因此其对稳态声子的微小扰动不足以导致布里渊频谱和峰值功率下降, 该过程等效于 β 分量的能量被光纤各处的稳态相干声场反射并叠加到探测光上^[18, 20]。因此可以在不降低系统信噪比 (SNR) 的条件下实现厘米量级的空间分辨率。

利用预泵浦脉冲的方式进行 BOTDA 传感实验时, 如图 2(a) 所示, 如果热点位置 (加热段/受力

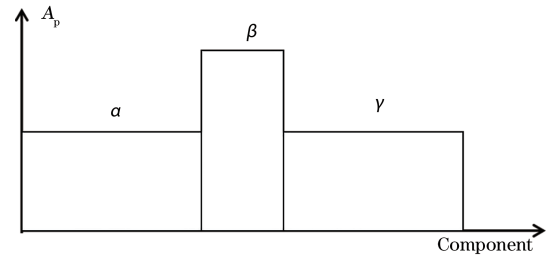


图 1 预泵浦脉冲示意图
Fig. 1 Diagram of pre-pump pulse

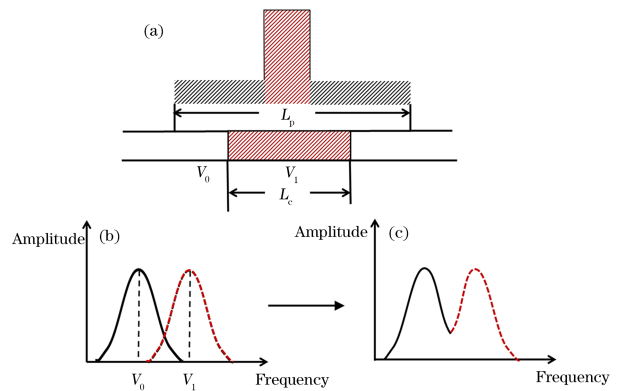


图 2 预泵浦系统在不同加热光纤长度处的布里渊频谱。
(a) 预泵浦脉冲示意图; (b) $L_c > L_p$ 时的布里渊频谱;
(c) $L_c < L_p$ 时的布里渊频谱

Fig. 2 Brillouin spectra of pre-pumping system at different length of heating optical fiber. (a) Schematic diagram of pre-pump pulse; (b) Brillouin spectrum for $L_c > L_p$; (c) Brillouin spectrum for $L_c < L_p$

段) 光纤长度 L_c 大于预泵浦脉冲覆盖的长度 L_p , SBS 效应的作用长度为 L_p , 热点位置呈现一个稳态的 SBS 过程, 因此布里渊频谱能实现完全频移, 如图 2(b) 所示。然而, 当 L_c 小于 L_p 时, SBS 效应的作用长度为 L_c , 此时在热点处获得的频谱叠加了热点位置包含频移的布里渊谱分量和在其他位置没有频移的频谱分量, 从而出现双峰的结构, 如图 2(c) 所示^[21]。通常通过双峰拟合来获得热点位置处的频移。理论上, 频谱线宽越窄, 在热点位置处拟合的精度越高, 误差越小, 其频率分辨率会得到提升。

当频率为 ω_0 的泵浦光与包含两个频率分量 ($\omega_0 + \Delta\omega$ 和 $\omega_0 - \Delta\omega$) 的探测光反向传输时, 若三束激光之间满足相位匹配条件, 探测光的两个频率分量的振幅和相位会通过 SBS 效应受到调制。此时探测光的低频分量获得增益, 高频分量被损耗。忽略光纤损耗和偏振效应的影响, 经过声光相互作用, 探测光的输出可以表示为

$$E_{\text{out}}(t, \Delta\omega) = E_1 \exp[j(\omega_0 + \Delta\omega)t + j\varphi_1] + E_2 \exp[j(\omega_0 + \Delta\omega)t + j\varphi_1] \exp[H_{\text{as}}(\omega_0 + \Delta\omega)] + E_1 \exp[j(\omega_0 - \Delta\omega)t + j\varphi_2] + E_2 \exp[j(\omega_0 - \Delta\omega)t + j\varphi_2] \exp[H_{\text{s}}(\omega_0 + \Delta\omega)], \quad (1)$$

式中： φ_1, φ_2 为两个边带的相位； E_1 和 E_2 为复振幅； $H_{\text{s}}(\omega)$ 和 $H_{\text{as}}(\omega)$ 分别为频率 ω 处布里渊增益和损耗的复数形式， $G_{\text{s}}(\omega)$ 和 $G_{\text{as}}(\omega)$ 分别为 $H_{\text{s}}(\omega)$ 和 $H_{\text{as}}(\omega)$ 的实部， $\varphi_{\text{s}}(\omega)$ 和 $\varphi_{\text{as}}(\omega)$ 分别为 $H_{\text{s}}(\omega)$ 和 $H_{\text{as}}(\omega)$ 的虚部，即斯托克斯和反斯托克斯的相位。

$H_{\text{s}}(\omega)$ 和 $H_{\text{as}}(\omega)$ 分别满足

$$\begin{cases} H_{\text{s}}(\omega) = G_{\text{s}}(\omega) + j\varphi_{\text{s}}(\omega) \\ H_{\text{as}}(\omega) = G_{\text{as}}(\omega) + j\varphi_{\text{as}}(\omega) \end{cases}, \quad (2)$$

且有对应关系^[22-24]：

$$\begin{cases} G_{\text{s}}(\omega_0 - \Delta\omega) = -G_{\text{as}}(\omega_0 + \Delta\omega) = \frac{g_{\text{B}}\Gamma^2}{4(\Delta\omega - \Omega_{\text{B}})^2 + \Gamma^2} \\ \varphi_{\text{s}}(\omega_0 - \Delta\omega) = \varphi_{\text{as}}(\omega_0 + \Delta\omega) = \frac{2g_{\text{B}}(\Delta\omega - \Omega_{\text{B}})\Gamma}{4(\Delta\omega - \Omega_{\text{B}})^2 + \Gamma^2} \end{cases}, \quad (3)$$

式中： g_{B} 为布里渊增益系数； Ω_{B} 为布里渊共振频率； Γ 为本征布里渊谱半峰全宽(FWHM)。如(3)式所示，两个边带在调制SBS过程中获得的增益相反、相位相同，两束光在光纤中发生干涉效应。当在输出端用窄带宽的光电探测器对双边带信号进行探测时，可以忽略边带拍频产生的高频分量，此时探测器探测到的相干光功率为

$$I_{\text{out}}(t, \Delta\omega) = E_{\text{out}}(t, \Delta\omega) E_{\text{out}}^*(t, \Delta\omega) = |E_1|^2 + |E_2|^2 + 2E_1 E_2 \cos[\varphi_{\text{s}}(\omega_0 - \Delta\omega)], \quad (4)$$

式中： $E_{\text{out}}^*(t, \Delta\omega)$ 为 $E_{\text{out}}(t, \Delta\omega)$ 的共轭。由(4)式可知，探测到的光功率与布里渊相位相关，而布里渊的相位受频率失谐量的影响。因此可以通过扫频的方式，得到双边带的干涉谱。由于探测器同时采集了

两个边带的信息，因此包含了高频边带与泵浦光相互作用和泵浦光与低频边带相互作用两个SBS过程，其频谱类似电磁诱导透明(EIT)效应的频谱图^[25]。图3(a)为干涉谱和增益谱的对比图。由图中可以看到干涉谱光功率在共振频率附近快速变化，形成一个窄线宽的峰。当两个SBS共振强度不同时，其线宽也会发生相应的变化，两个SBS共振强度的差距越大，其频谱越接近布里渊增益谱的形状。图3(b)为采用消光比为20 dB的5 ns脉冲获得的干涉谱与传统BOTDA技术获得的布里渊增益谱的对比图。干涉谱的线宽为12 MHz，小于布里渊增益谱线宽(32 MHz)。因此，理论上利用图3(b)所示的双边带干涉信号窄线宽的特性可以提高脉冲预泵浦BOTDA在热点位置的频率分辨率。

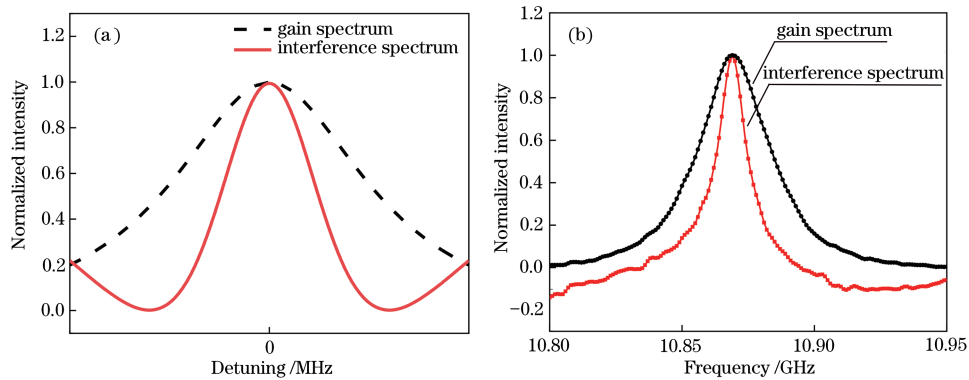


图3 布里渊干涉谱和布里渊增益谱。(a)仿真结果；(b)实验结果

Fig. 3 Brillouin interference spectra and Brillouin gain spectra. (a) Simulation results; (b) experimental results

3 传感实验结果和分析

实验系统如图4所示。激光器发出的1550 nm

连续光通过50:50的耦合器分成两路。其中一路光经过电光调制器(EOM)被调制成抑制载波的双边带信号，信号频率由驱动调制器的微波信号源的输

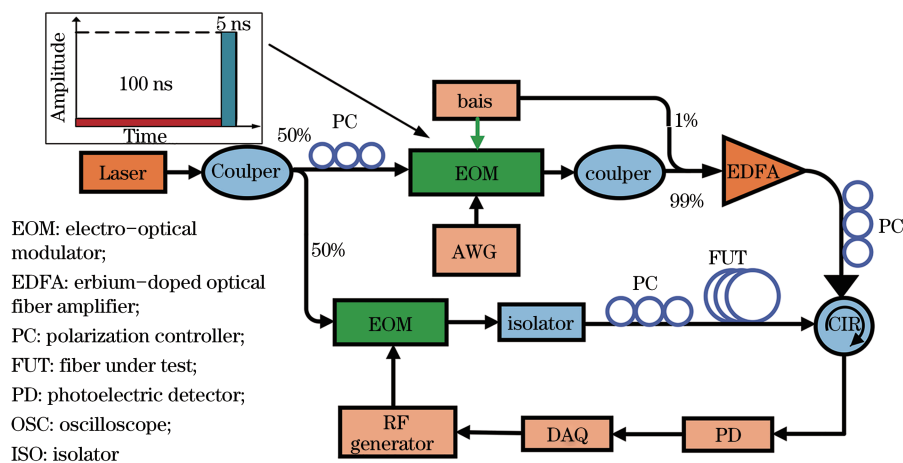


图 4 实验装置图

Fig. 4 Diagram of experimental setup

出频率 Ω_{RF} 决定。调制后的双边带连续光经过隔离器和偏振控制器作为探测信号进入被测光纤 (FUT)。另一路光经过任意波形发生器 (AWG) 驱动的 EOM 被调制成探测脉冲光。EOM 的最大消光比为 30 dB。泵浦脉冲光经过掺铒光纤放大器 (EDFA) 的放大后, 从环形器输入到被测光纤。探测光与脉冲光在光纤中相互作用后, 由光电探测器 (PD) 进行探测。改变探测光调制频率, 用示波器采集双边带泵浦光的时域信号。光电探测器带宽为

4 GHz, 因此频率高于 10 GHz 的边带拍频信号被滤掉, 低频的干涉信号被保留。通过扫频的方式最终获得布里渊干涉谱在光纤中的分布。为了避免光纤双折射波动的影响, 实验采用保偏光纤作为传感光纤。实验中采用简化的亮脉冲预泵浦形式, 即与图 1 中对应的分量 α 是一个时延为 0、脉宽为 100 ns 的脉冲, 其功率为 25 mW, β 分量是一个时延为 100 ns、脉宽为 5 ns 的短脉冲, 其功率为 500 mW, γ 分量的功率近似为 0, 如图 5 所示。

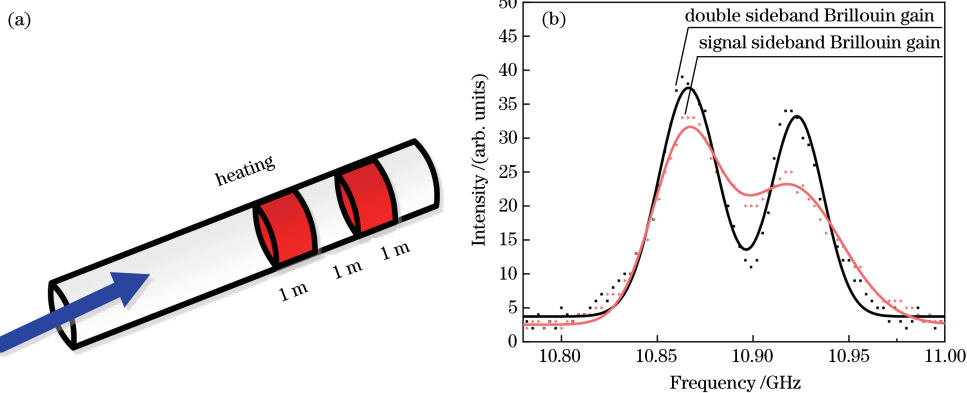


图 5 预泵浦温度传感实验。(a) 光纤加热的示意图; (b) 双边带和单边带探测下光纤加热段的频谱图

Fig. 5 Pre-pumping temperature sensing experiment. (a) Diagram of optical fiber heating; (b) spectra of optical fiber heating section for double-sideband and single-sideband detections

在 100 m 保偏光纤末端分出三段 1 m 的光纤, 将间隔的两段 1 m 光纤放入恒温水箱中加热, 如图 5 (a) 所示, 两端为加热段, 中间 1 m 光纤暴露在室温环境中。水箱的温度从 50 °C 以 5 °C 的间隔升高到 70 °C。图 5 (b) 为加热处为 70 °C 时获得的布里渊频谱图, 可以看出在加热位置获得的频谱为双峰结构, 由热点处频移后的频谱和未加热处的频谱叠加而成。其中

方形+实线为双边带连续光的干涉谱, 三角形+实线为单边带连续光的增益谱。由图中可以明显看出, 双边带干涉谱由于具有较窄的线宽, 拟合误差较小。

图 6 (a) 为采用双边带干涉方案探测到的沿着光纤的三维频谱, 可以看出两个加热段光纤的布里渊干涉谱有明显频移, 图 6 (b) 为不同温度下测到的频谱, 其中心频率拟合误差为 0.22 MHz。

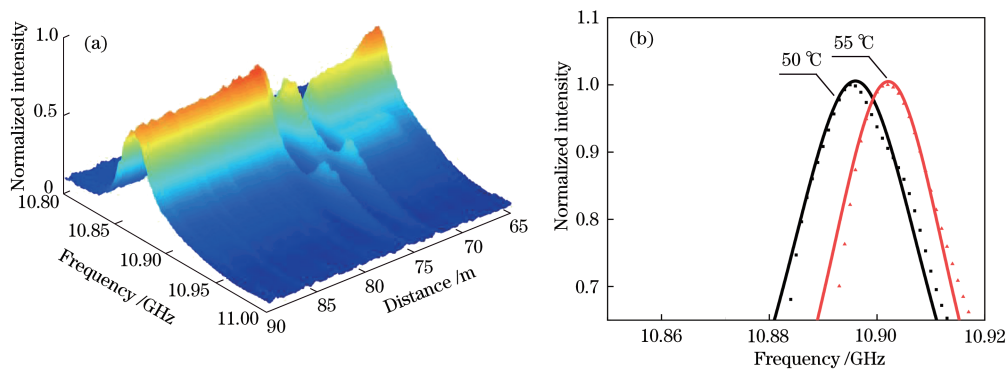


图 6 温度传感结果。(a) 光纤频谱图；(b) 不同温度加热段的频谱图

Fig. 6 Results of temperature sensing. (a) Spectrum of optical fiber; (b) spectra of different heating sections

经过洛伦兹双峰拟合处理可以得到采用布里渊干涉谱[图7(a)]和传统布里渊增益谱[图7(b)]得到的布里渊频移与温度的关系曲线以及误差棒图,采用干涉谱得到的温度系数为 1.09 MHz/°C,采用传统布里渊增益谱得到的温度系数为 1.15 MHz/°C,本文实验采用的光纤温度系数应该在 1.09 MHz/°C 左右,而采用传统布里渊增益谱得到的温度系数误差较大,这是由利用传统布里渊增益谱加热至 50 °C 得到双峰结构的拟合温度误差较大导致的。传统预泵浦系统的测量误差为 0.98 MHz,对应的温度分辨率为 0.9 °C,

采用干涉谱得到的测量误差是 0.37 MHz,对应的温度分辨率为 0.3 °C,系统使用的是 5 ns 的传感脉冲,因此理论上应该达到 50 cm 的空间分辨率。图 7(c) 为光纤在频率 10.921 GHz 处的时域信号,从图中可以明显看到两段加热光纤处的功率变化。功率变化处的下降沿和上升沿时间为 5 ns,对应的空间分辨率为 50 cm,这与预泵浦脉冲高功率分量对应的分辨率一致。这些结果证明预泵浦脉冲结合泵浦光双边带干涉谱的 BOTDA 传感器可以获得 cm 量级的空间分辨率,同时频率分辨率得到较大的提升。

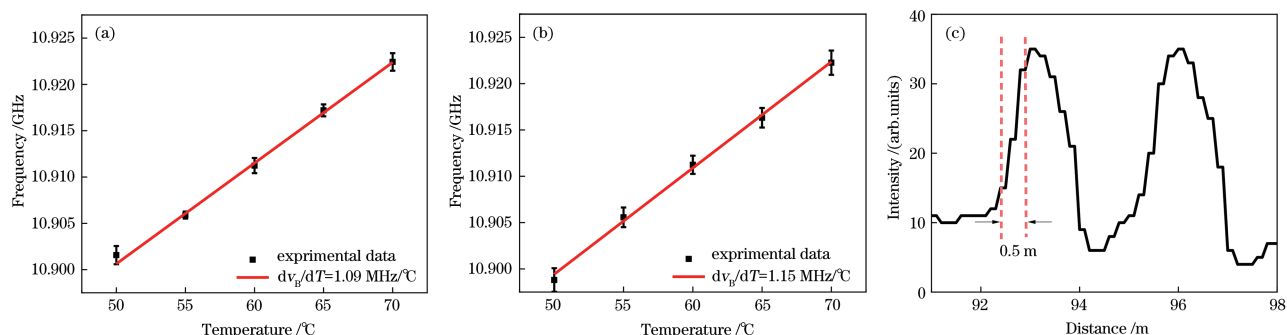


图 7 布里渊干涉谱和传统增益谱随温度的变化以及加热段时域信号。(a) 布里渊干涉谱；(b) 传统的布里渊增益谱；(c) 加热段时域信号

Fig. 7 Brillouin interference spectrum and traditional Brillouin gain spectrum varying with temperature, and time domain signal of heating section. (a) Brillouin interference spectrum; (b) traditional Brillouin gain spectrum; (c) time domain signal of heating section

4 结 论

采用基于双边带连续光与预泵浦脉冲光在光纤中的相互作用获得的干涉谱代替传统单边带预泵浦获得的布里渊增益谱进行传感,可以获得更窄线宽的散射谱。该窄线谱减小了预泵浦温度传感中双峰结构的拟合误差,提高了系统的频率分辨率,从而实现高空间分辨率和高频率分辨率双边带

干涉的预泵浦 BOTDA 系统。实验结果表明,利用 100 ns 的预泵浦脉冲和 5 ns 的传感脉冲分别作为泵浦与双频连续光的布里渊相互作用进行干涉探测时,可在 100 m 保偏光纤上实现 50 cm 空间分辨率和 0.37 MHz 频率分辨率。与传统单边带预泵浦系统相比,本文系统在实现相同空间分辨率下的频率分辨率提高 2 倍。该传感方案为解决基于预泵浦技术的布里渊分布式传感器实现高空间分辨率和高

频率分辨率提供了新的技术方向。

参 考 文 献

- [1] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Simple distributed temperature sensor based on Brillouin gain spectrum analysis [J]. *Proceeding of SPIE*, 1994, 2360: 138-141.
- [2] Horiguchi T, Tateda M. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(8): 1170-1176.
- [3] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [4] Urricelqui J, Ruiz-Lombera R, Sagues M, et al. Overcoming non-local effects and Brillouin threshold limitations in Brillouin distributed sensors [J]. *Proceeding of SPIE*, 2015, 9634: 963487.
- [5] Kurashima T, Tateda M, Horiguchi T, et al. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(3): 360-362.
- [6] Wang J J, Li Y Q. Review of methods for improving performance of Brillouin optical time-domain analysis system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(11): 110003.
王健健, 李永倩. 布里渊光时域分析系统性能提高方法综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(11): 110003.
- [7] Brown A W, Colpitts B G, Brown K. Dark-pulse Brillouin optical time-domain sensor with 20-mm spatial resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(1): 381-386.
- [8] Foaleng S M, Tur M, Beugnot J C, et al. High spatial and spectral resolution long-range sensing using Brillouin echoes [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(20): 2993-3003.
- [9] Zhang X P, Wang F, Lu Y G. Fully distributed optical fiber sensor based on Brillouin effect[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(11): 14-20.
张旭莘, 王峰, 路元刚. 基于布里渊效应的连续分布式光纤传感技术[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, 46(11): 14-20.
- [10] Ippen E P, Stolen R H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *Applied Physics Letters*, 1972, 21(11): 539-541.
- [11] Zhong X X, Liang H, Cheng L H, et al. A highly accurate distributed sensor based on the Brillouin gain-loss spectrum [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(10): 100603.
仲晓轩, 梁浩, 程凌浩, 等. 基于布里渊增益-损耗谱的高精度分布式传感器[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(10): 100603.
- [12] Li W H, Bao X Y, Li Y, et al. Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616-21625.
- [13] Zou L F, Bao X Y, Wan Y D, et al. Coherent probe-pump-based Brillouin sensor for centimeter-crack detection [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(4): 370-372.
- [14] Nishiguchi K. PPP-BOTDA method to achieve 2 cm spatial resolution in Brillouin distributed measuring technique [EB/OL]. (2008-05-16) [2020-05-06]. <https://www.ieice.org/ken/paper/20080516kaDn/eng/>.
- [15] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 81-103.
- [16] Minardo A, Bernini R, Zeni L. Low distortion Brillouin slow light in optical fibers using AM modulation [J]. *Optics Express*, 2006, 14(13): 5866-5876.
- [17] Wang T, Tian F, Tang W Q, et al. Brillouin frequency shift extraction method for distributed optical fiber temperature sensing system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170631.
王婷, 田凤, 汤文青, 等. 分布式光纤温度传感系统的布里渊频移提取方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170631.
- [18] Ravet F, Bao X Y, Li Y, et al. Signal processing technique for distributed Brillouin sensing at centimeter spatial resolution[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 25(11): 3610-3618.
- [19] Parker T R, Farhadiroushan M, Feced R, et al. Simultaneous distributed measurement of strain and temperature from noise-initiated Brillouin scattering in optical fibers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(4): 645-659.
- [20] Lecoecue V, Webb D J, Pannell C N, et al. Transient response in high-resolution Brillouin-based distributed sensing using probe pulses shorter than the acoustic relaxation time [J]. *Optics Letters*, 2000, 25(3): 156-158.
- [21] Shi J, Chen X, Ouyang M, et al. Theoretical investigation on the threshold value of stimulated

- Brillouin scattering in terms of laser intensity [J]. Applied Physics B, 2009, 95(4): 657-660.
- [22] Urricelqui J, Zornoza A, Sagues M, et al. Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation [J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26942-26949.
- [23] Okawachi Y, Bigelow M S, Sharping J E, et al. Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber[J]. Physical Review Letters, 2005, 94(15): 153902.
- [24] Agrawal G. Introduction[M]//Nonlinear Fiber Optics. Amsterdam: Elsevier, 2013: 1-25.
- [25] Pant R, Siva Shakthi A, Yelikar A B. Wideband excitation of Fano resonances and induced transparency by coherent interactions between Brillouin resonances [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 9175.