

基于布里渊增益-损耗谱的高精度分布式传感器

仲晓轩**, 梁浩*, 程凌浩, 李杰

暨南大学光子技术研究院, 广东 广州 510632

摘要 提出一种基于布里渊增益和损耗相互作用的光时域分析系统,该系统将连续光与反向的斯托克斯和反斯托克斯脉冲同时输入光纤,通过声光相互作用在布里渊增益谱中心频率处产生一个窄线宽的吸收峰。该吸收峰的线宽约为布里渊增益谱宽的1/5,并且其频率与布里渊频移相关。因此利用该窄线宽吸收峰可以提高布里渊传感器的频率分辨率,从而实现高精度的温度和应变测量。实验结果表明,与传统的基于布里渊增益谱的传感器相比,该方案的温度测量精度提高了1倍多。

关键词 光纤光学; 布里渊散射; 温度和应变传感; 光纤传感

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100603

A Highly Accurate Distributed Sensor Based on the Brillouin Gain-Loss Spectrum

Zhong Xiaoxuan **, Liang Hao *, Cheng Linghao, Li Jie

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

Abstract An optical time domain analysis system that is based on the interaction between the Brillouin gain and loss is proposed. A continuous wave propagates with reverse pulses at its Stokes and anti-Stokes frequencies in an optical fiber. Further, a narrow linewidth absorption peak is observed at the center frequency of the Brillouin gain spectrum. The linewidth of the absorption peak is approximately 1/5 of that observed in the Brillouin gain spectrum, and the frequency of the absorption peak is related to the Brillouin frequency shift. Therefore, the frequency resolution of a Brillouin sensor can be improved by the narrow linewidth absorption peak; thus, highly accurate temperature or strain measurements can be achieved. The experimental result depicts that the accuracy of the temperature measured by this scheme is more than doubled, compared with the traditional Brillouin gain spectrum based sensor.

Key words fiber optics; Brillouin scattering; temperature and strain sensing; optical fiber sensor

OCIS codes 060.2310; 190.2640; 280.4788; 290.5900

1 引言

基于布里渊散射的分布式光纤传感器已经有20多年的研究历史^[1-4],其可以通过测量布里渊功率谱的频移来进行长距离的分布式温度和应变测量^[5-13],因此在智能材料和结构等领域有着很大的工程应用潜力。这类传感器的温度、应变测量精度与频率分辨率有关,而布里渊功率谱中心频率测量精度与所探测谱的半峰全宽(FWHM)成反比^[14]。虽然长脉宽的脉冲会产生较窄的谱宽,但受声子阻尼速率限制,固有

布里渊增益谱宽度均在几十兆赫兹量级^[15-16],导致传感器的测量精度很难进一步提高。

为了解决这一问题,本文提出了一种基于布里渊增益和损耗过程的光时域分析传感器^[17]设计方法。该方法让连续光与两个脉冲光在光纤中反向传输,两个脉冲光的频率分别位于连续光的斯托克斯和反斯托克斯谐振频率处,连续光与两个脉冲光通过受激声场进行耦合,同时产生布里渊增益和损耗。当脉冲光的频率在布里渊频谱范围内进行扫频时,通过对连续光的探测,可以获得布里渊增益-损耗结合谱。该谱

收稿日期: 2018-03-30; 修回日期: 2018-04-26; 录用日期: 2018-05-09

基金项目: 国家自然科学基金(61307100,61675091)

* E-mail: lianghao1509@gmail.com; ** E-mail: zhongxiaoxuan@outlook.com

的形状与布里渊增益谱的区别在于,它在布里渊斯托克斯谐振频率处会产生一个窄线宽的吸收峰。另外,通过实验研究了该吸收峰线宽和深度随连续光和脉冲光功率的变化,并分析了吸收峰频移与温度和应力的对应关系。实验结果表明,在保偏光纤中50 ns脉冲获得的布里渊增益谱半峰全宽为50 MHz,利用增益-损耗过程在增益谱中间产生的吸收峰的线宽约9 MHz。由于该吸收峰频率与布里渊增益谱峰值频率一致,对温度和应变非常敏感,为高精度分布温度和应变测量提供了一种新的选择。

2 基本原理

受激布里渊散射(SBS)是抽运光和斯托克斯光通过声波进行耦合的过程。当两束相干光波在光纤中反向传输时,若其频率差与声波频率相同时,会在光纤中产生受激布里渊散射,使得高频的抽运光能量耦合到低频率的斯托克斯光。忽略色散和光纤双折射的影响,SBS过程可以表示为^[18]

$$\begin{cases} \frac{\partial E_1}{\partial z} = \frac{i\epsilon_0 \omega q^2 \gamma_e}{2nc\rho_0} \frac{|E_2|^2 E_1}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} - \frac{\alpha}{2} E_1 \\ \frac{\partial E_2}{\partial z} = -\frac{i\epsilon_0 \omega q^2 \gamma_e}{2nc\rho_0} \frac{|E_1|^2 E_2}{\Omega_B^2 - \Omega^2 + i\Omega\Gamma_B} + \frac{\alpha}{2} E_2 \end{cases}, \quad (1)$$

式中: E_1 为传输频率为 ω_1 的光波的振幅; E_2 为传输频率为 ω_2 ($\omega_1 > \omega_2$)的光波的振幅; ϵ_0 为真空介电常数; γ_e 为电致伸缩常数; ρ_0 为光纤的平均密度; n 为折射率; c 为光速; Γ_B 为由声子寿命决定的布里渊谱的FWHM; Ω_B 为布里渊频移, $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ 。在这个过程中,能量从高频抽运光通过声波传输到低频斯托克斯光。

当与连续光反向传输的脉冲光包含两个频率分量,且其频率分别位于连续光的斯托克斯和反斯托克斯谐振频率上时,可以将该脉冲光等效于两个功率和偏振态相同的脉冲光。如图1所示,连续光将会同时经历布里渊增益和损耗过程。将连续光作为探测光,则在这个过程中,光能量将从反斯托克斯光耦合到探测光,从探测光耦合到斯托克斯光,可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial E_s}{\partial z} = -\frac{i\epsilon_0 \omega q^2 \gamma_e}{2nc\rho_0} \frac{|E_p|^2 E_s}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} + \frac{\alpha}{2} E_s \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} = -\frac{i\epsilon_0 \omega q^2 \gamma_e}{2nc\rho_0} \frac{|E_s|^2 E_p}{\Omega_B^2 - \Omega^2 + i\Omega\Gamma_B} + \frac{i\epsilon_0 \omega q^2 \gamma_e}{2nc\rho_0} \frac{|E_{as}|^2 E_p}{\Omega_B^2 - \Omega^2 + i\Omega\Gamma_B} - \frac{\alpha}{2} E_p, \\ \frac{\partial E_{as}}{\partial z} = \frac{i\epsilon_0 \omega q^2 \gamma_e}{2nc\rho_0} \frac{|E_p|^2 E_{as}}{\Omega_B^2 - \Omega^2 - i\Omega\Gamma_B} + \frac{\alpha}{2} E_{as} \end{cases}, \quad (2)$$

式中: E_s 为斯托克斯光的振幅; E_p 为连续探测光的振幅; E_{as} 为反斯托克斯光的振幅。

对脉冲频率进行扫频,可以通过检测不同频率脉冲下的连续光的强度变化来记录相干布里渊增益-损耗谱。连续光强度 $I_{\text{probe}}^{\text{out}}(\omega)$ 可表示为

$$I_{\text{probe}}^{\text{out}}(\omega) = I_{\text{probe}}^{\text{in}}(\omega) \exp [G_{\text{gain}}(\omega) - G_{\text{loss}}(\omega)], \quad (3)$$

式中: $I_{\text{probe}}^{\text{in}}$ 为连续探测光的入射光强度; G_{gain} 为探测光通过SBS过程获得的增益; G_{loss} 为探测光通过SBS过程获得的损耗,且符合洛伦兹曲线形式。当连续光较小时,抽运光的损耗可以忽略,探测光的增

益和损耗相同,因此在各个频率上的光强变化为零。当光强增加时,由于抽运消耗和增益饱和,这个平衡过程很难继续维持。若从反斯托克斯脉冲耦合到探测光的能量大于从探测光耦合到斯托克斯脉冲的能量,探测光功率将增加。反之,若探测光从反斯托克斯脉冲得到的能量小于向斯托克斯脉冲转移的能量,探测光功率将减小。由于增益和损耗过程不平衡,检测到的布里渊谱的形状有可能随光强度改变发生变化。

理论上已经证明布里渊频谱谱宽 Γ 与SBS过程中抽运功率密切相关,可表示为^[19-20]

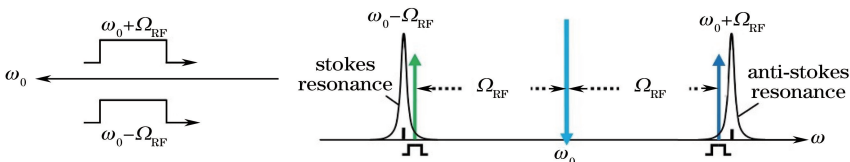


图1 不同频率的光在光纤中频移的示意图

Fig. 1 Schematic of frequency shifting of light with different frequencies in optical fibers

$$\Gamma = \Gamma_B (\ln 2/G)^{1/2}, \quad (4)$$

式中： G 为由 $G = g_0 P_{\text{pump}} L_{\text{eff}}$ 定义的增益； g_0 为光纤的布里渊增益系数； P_{pump} 为抽运功率； L_{eff} 为光纤有效长度。由于光在光纤中存在损耗，通过相干布里渊增益和损耗过程，光纤中布里渊增益谱和损耗谱的 FWHM 和峰值不可能相同。因此，连续光在同时经历增益和损耗的过程中，布里渊增益和损耗的不平衡会使该连续光在不同的频率处获得的增益不同，在高光功率情况下，连续光在中心频率处的增益更容易达到饱和，使得采集到的布里渊频谱中间出现一个类似吸收峰的凹陷，如图 2 所示，且凹陷的线宽与在光纤中进行 SBS 的两束光的光功率相关。

3 实验方法

为了观测布里渊增益-损耗谱，采用图 3 所示的装置进行实验。激光器发出 1550 nm 的连续光通过 50:50 的耦合器分成两束。一束通过隔离器作为探测光输入被测光纤，另一束使用电光调制器调制产生脉冲光。该脉冲光包含两个频率分量，其频率由驱动调制器的微波信号源的输出频率 Ω_{RF} 决定。

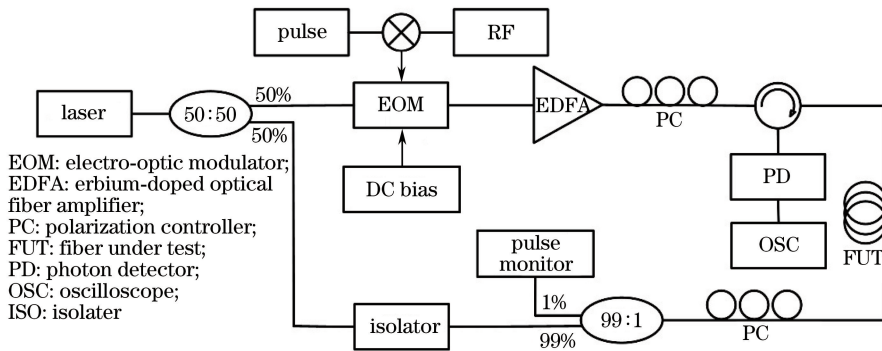


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

为避免光纤双折射的影响，本实验采用了 100 m 的熊猫保偏光纤 (PMF)。在光纤中获得的布里渊增益-损耗谱如图 4 中蓝色曲线所示。实验中脉冲宽度为 50 ns，峰值功率为 500 mW，消光比约为 30 dB，连续光功率约为 5 mW。本实验中使用示波器采集的数据均进行了 1024 次平均。从图中可以看到在 10.86 GHz 附近出现了一个线宽约为 9 MHz 的凹陷。当微波信号频率从 10.8 GHz 扫频到 10.9 GHz 时，连续光先经历了一个增益过程，在 10.86 GHz 附近迅速变为损耗过程，之后又变回增益过程。

为了与传统的布里渊增益谱进行比较，将脉冲的两个频率分量分别用光带通滤波器进行滤除，获

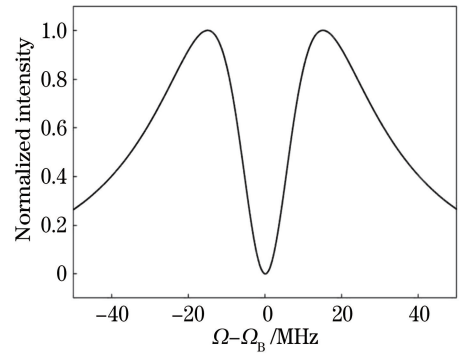


图 2 布里渊增益和损耗过程的相干频谱

Fig. 2 Coherent spectrum of Brillouin gain and loss processes

该脉冲光可等效于振幅和偏振态相同的两个不同频率的脉冲。调制器的偏置电压由一个偏压控制器控制在最低点，保证产生的脉冲具有很高的消光比。电光调制器调制产生的脉冲光进入掺铒光纤放大器放大后通过环形器输入到被测光纤的另一端。使用光电探测器检测探测光的光强，通过示波器记录时域信息。偏振控制器用来调节光的偏振态保证受激布里渊效率。可调谐光滤波器用来选择脉冲的频率分量。

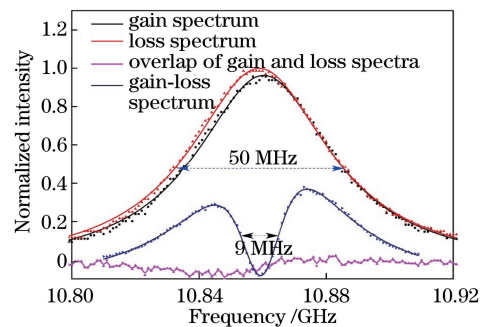


图 4 保偏光纤中的增益-损耗谱与布里渊增益谱和损耗谱的对比

Fig. 4 Comparison of the gain-loss spectrum and the Brillouin gain and loss spectra in a PMF

得单独的布里渊增益谱和损耗谱,如图 4 中的黑色和红色曲线所示。布里渊增益谱和损耗谱符合洛伦兹曲线型,中心频率约为 10.86 GHz,FWHM 约为 50 MHz,是吸收峰线宽的 5 倍以上。若直接将增益谱和损耗谱叠加,得到图 4 中的粉色曲线,显然该信号比增益-损耗谱的信号弱。

为了研究光场对被测谱的影响,采用不同宽度和峰值功率的脉冲产生布里渊增益-损耗谱,如

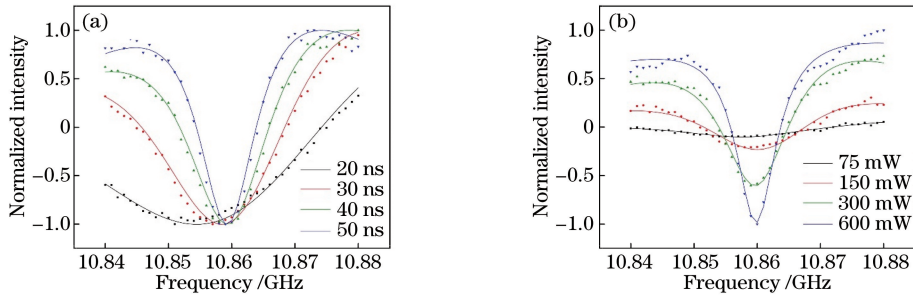


图 5 在保偏光纤中测得的布里渊增益-损耗谱。(a)不同脉宽;(b)不同脉冲吸收峰功率

Fig. 5 Measured Brillouin gain-loss spectra in a PMF. (a) For different pulse widths; (b) for different pulse peak powers

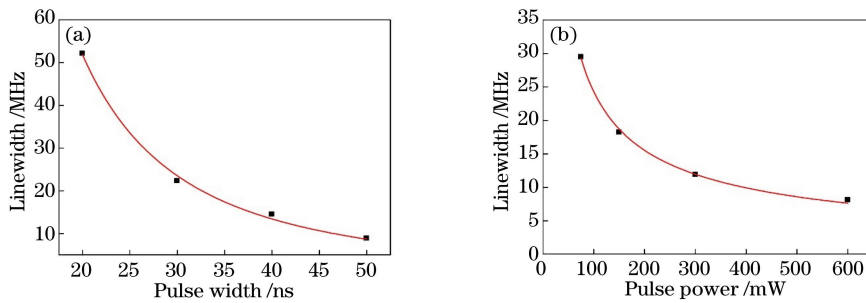


图 6 中心吸收峰的线宽随脉宽和功率的变化图。(a)脉宽;(d)功率

Fig. 6 Linewidth of the center absorption peak as a function of the pulse width and power. (a) Pulse width; (b) power

由图 5 和图 6 可知,要获得高信噪比的增益-损耗谱,必须采用高功率的脉冲信号。前期研究表明,强抽运信号引起的受激布里渊效应会使得脉冲能量大量转移至斯托克斯光,从而导致抽运光的消耗。为了研究脉冲光经过光纤中增益-损耗过程后的功率变化,实验采用 1 km 单模光纤(SMF)作为传感光纤,探测脉冲宽度设为 50 ns,脉冲峰值功率为 300 mW。采集脉冲在 $\Omega_{RF} = 10.86$ GHz 即布里渊中心频率处的透射信号。如图 7 所示,当脉冲信号包含两个频率分量时,脉冲形状经过 1 km 光纤并没有发生太大变化,而当滤掉低频分量时,系统等效于传统增益型的布里渊光时域分析(BOTDA)传感系统,此时脉冲功率损耗大于 50%且形状发生改变。可见,在增益-损耗机制中,脉冲低频分量的存在抑制了抽运消耗,理论上可以获得更大的传感距离。

图 5(a)和(b)所示。随着脉冲宽度的增加,中心吸收峰的线宽减小,中心频率向右移动。当脉冲宽度增加到 50 ns 时,频率固定在约 10.86 GHz。中心吸收峰的深度随脉冲峰值功率的增加而增加,如图 6 (a)和(b)。这意味着增益谱中间的吸收峰更容易在稳态下发生,此时脉冲宽度远大于声子寿命。当脉冲功率增加到约 600 mW 时,所测到的频谱功率出现波动,这是由高功率引起的调制不稳定所致。

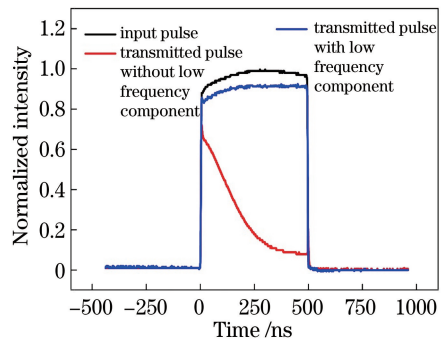


图 7 经过 1 km 单模光纤透射抽运的脉冲功率变化

Fig. 7 Pumped pulse power after a 1-km SMF

4 分布式温度测量

实验中,将保偏光纤中的 10 m 放入水浴箱中使用图 3 的系统进行温度分布式测量,并同时与传统 BOTDA 系统温度分布式测量进行对比,在两种

方案中均进行扫频测量,使用相同的扫频间隔,测量时间也相近。水浴箱的温度从 62 °C 升高到 70 °C,升温间隔 2 °C。图 8 是光纤的频谱分布,图 9(a)显示了在室温(25 °C)和水浴箱(62 °C)中的频谱,可见,频谱形状对温度的依赖性很小,且频率偏移与温度成正比。与传统的 BOTDA 技术相比,本方法的吸收峰线宽更窄,频移更容易获得高精度检测,如图 9(b)所示。图 10 显示了布里渊增益-损耗谱频移和传统布里渊增益谱频移随温度的变化,增益-损耗谱温度系数为 1.11 MHz/°C,传统 BOTDA 技术获得的系数为 1.04 MHz/°C。

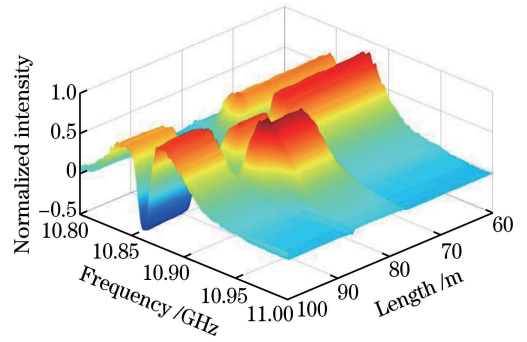


图 8 光纤的频谱分布

Fig. 8 Spectral distribution in the fiber

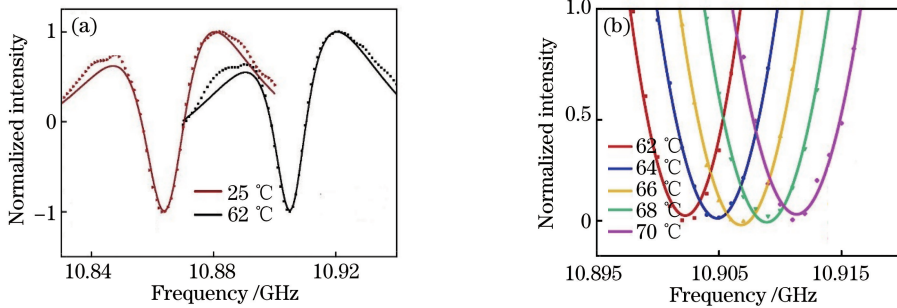


图 9 布里渊增益-损耗谱与温度的关系。(a)不同温度下布里渊增益-损耗谱;(b)布里渊增益-损耗谱吸收峰频率随温度的变化

Fig. 9 Relationship between the Brillouin gain-loss spectrum and temperature. (a) Measured Brillouin gain-loss spectra at different temperatures; (b) measured absorption peak frequencies of Brillouin gain-loss spectra at different temperatures

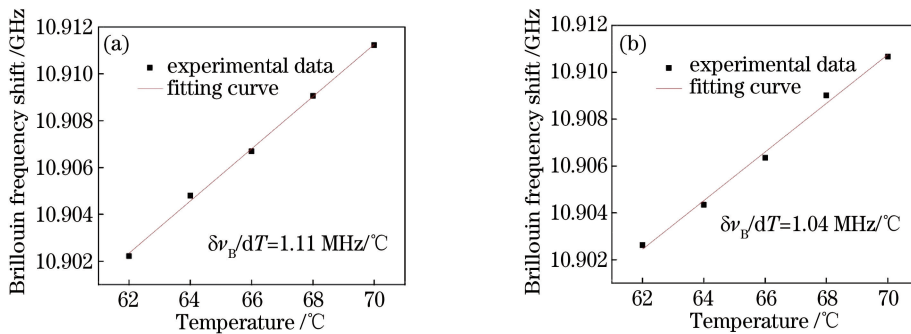


图 10 温度与布里渊增益-损耗谱吸收峰频移和传统布里渊增益谱吸收峰频移的关系。

(a)布里渊增益-损耗谱;(b)传统布里渊增益谱

Fig. 10 Temperature dependence of the Brillouin frequency shifts of the absorption peaks in the Brillouin gain-loss spectrum and the conventional Brillouin gain spectrum. (a) Brillouin gain-loss spectrum; (b) conventional Brillouin gain spectrum

布里渊频率测量精度 $\delta\nu_B$ 由布里渊频谱 FWHM(Γ_B)和信噪比 R_{SN} 共同决定^[9],表示为

$$\delta\nu_B = \Gamma_B / (\sqrt{2} R_{SN}^{1/4}). \quad (5)$$

根据(5)式,较小的 FWHM 会有更高的频率测量精度。实验中获得频率不确定度为 ± 0.47 MHz,对应的温度精度为 ± 0.4 °C。而传统 BOTDA 技术的频率不确定度为 ± 0.9 MHz,对应的温度精度为 ± 0.9 °C。与通过传统 BOTDA 技术获得的布里渊增益谱相比,新方案获得的频率测量精度提高了两

倍。根据(5)式,如果 R_{SN} 保持不变,频率测量精度应提高 5 倍。但是,由于连续光的增益较低,该频谱具有相对较低的 R_{SN} ,因此,实验中频率测量精度的提高程度并不像预期的那么大。通过增加连续光和脉冲光功率或平均次数可以进一步提高测量精度。

5 结 论

利用布里渊增益和损耗的相互作用,提出了一种在布里渊增益谱中间产生窄线宽吸收峰的方法,

在此基础上进行了高精度温度测量。实验中,在布里渊增益谱的谐振频率范围内,观察到一个线宽小于 10 MHz 的吸收峰。通过 100 m 保偏光纤实验计算得到频率测量精度为 ± 0.47 MHz,对应的温度分辨率为 ± 0.4 °C,这是传统的 BOTDA 法的 2 倍多,为高精度分布式温度测量提供了一种新方法。

参 考 文 献

- [1] Cao Y L, Ye Q, Cai H W. On-line temperature monitoring in railway existing fiber cable based on Brillouin optical time-domain reflectometry[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 080612.
曹玉龙, 叶青, 蔡海文. 基于布里渊光时域反射计的铁路既有光缆在线温度监测[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(8): 080612.
- [2] Li Y Q, Zhang L X, Li X J, *et al.* Performance improvement method of Rayleigh Brillouin optical time domain analysis system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106001.
李永倩, 张立欣, 李晓娟, 等. 瑞利布里渊光时域分析系统传感性能的提升方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106001.
- [3] 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.
张旭苹, 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.
- [4] Zhang L X, Li Y Q, An Q, *et al.* Temperature sensing technology based on Rayleigh Brillouin optical time domain analysis with pulse coding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1106004.
张立欣, 李永倩, 安琪, 等. 脉冲编码瑞利布里渊光时域分析温度传感技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1106004.
- [5] Niklès M, Thévenaz L, Robert P A. Simple distributed fiber sensor based on Brillouin gain spectrum analysis[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(10): 758-760.
- [6] Nikles M, Thevenaz L, Robert P A. Brillouin gain spectrum characterization in single-mode optical fibers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(10): 1842-1851.
- [7] Bao X Y, DeMerchant M, Brown A, *et al.* Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, 19(11): 1698-1704.
- [8] Zou L F, Bao X Y, Afshar V S, *et al.* Dependence of the Brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber [J]. *Optics Letters*, 2004, 29(13): 1485-1487.
- [9] Horiguchi T, Shimizu K, Kurashima T, *et al.* Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [10] 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.
- [11] Zou W W, He Z Y, Hotate K. Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 1248-1255.
- [12] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [13] Mizuno Y, Zou W W, He Z Y, *et al.* Proposal of Brillouin optical correlation-domain reflectometry (BOCDR) [J]. *Optics Express*, 2008, 16(16): 12148-12153.
- [14] Naruse H, Tateda M. Trade-off between the spatial and the frequency resolutions in measuring the power spectrum of the Brillouin backscattered light in an optical fiber [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(31): 6516-6521.
- [15] Gaeta A L, Boyd R W. Stochastic dynamics of stimulated Brillouin scattering in an optical fiber[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(5): 3205-3209.
- [16] Takushima Y, Kikuchi K. Spectral gain hole burning and modulation instability in a Brillouin fiber amplifier[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(1): 34-36.
- [17] Li Y, Bao X Y, Dong Y K, *et al.* A novel distributed Brillouin sensor based on optical differential parametric amplification [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2621-2626.
- [18] Boyd R W. *Nonlinear optics* [M]. Salt Lake City: Academic Press, 2003.
- [19] Li W, Bao X, Li Y, *et al.* Differential pulse-width pair BOTDA for high spatial resolution sensing [J]. *Optics Express*, 2008, 16(26): 21616-21625.
- [20] Boyd R W, Rzaewski K, Narum P. Noise initiation of stimulated Brillouin scattering[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1990, 42(9): 5514-5521.