

【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

单端混沌BDG分布式温度与应变得耦合测量

金柯志¹, 张建忠^{1,2}, 马喆^{1,2}, 赵亮¹, 丁伟轩¹, 李睿哲¹, 张婉莹¹, 张明江^{1,2}

1) 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西太原 030600; 2) 太原理工大学物理与光电工程学院, 山西太原 030600

摘要: 针对传统布里渊动态光栅(Brillouin dynamic grating, BDG)分布式光纤传感技术所使用的双端结构, 在实际工程中易出现布线繁琐、数据提取困难以及光纤断裂无法传感的局限性, 提出一种基于单端结构的混沌BDG分布式光纤传感系统. 将两束具有一定频率差的混沌泵浦光由保偏光纤的同一端注入至慢轴中进行相互作用激发混沌BDG, 并沿保偏光纤的快轴注入探测信号, 通过解调布里渊频移与双折射频移, 提取温度与应变信息. 产生的混沌BDG具有单一、稳定和可控的性质, 其光栅长度由混沌激光的自身低相干长度决定. 单端系统仅需在光纤的一端进行操作, 在保持高空间分辨率的同时, 实现BDG的产生与探测相互独立, 完成温度与应变得耦合测量. 实验结果表明, 在50 m传感光纤中达到2.0 cm的空间分辨率, 0.6 °C的温度精度, 14 $\mu\epsilon$ 的应变精度.

关键词: 光纤传感; 单端结构; 混沌激光; 布里渊动态光栅; 温度与应变传感; 解耦耦合测量; 高空间分辨率

中图分类号: TP212.1; TN241

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2026.02215

Single-ended chaotic Brillouin dynamic grating based distributed decoupled measurement of temperature and strain

JIN Kezhi¹, ZHANG Jianzhong^{1,2}, MA Zhe^{1,2}, ZHAO Liang¹, DING Weixuan¹,
LI Ruizhe¹, ZHANG Wanying¹, and ZHANG Mingjiang^{1,2}

1) Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, Shanxi Province, P. R. China

2) College of Physics and Optoelectronic Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030600, Shanxi Province, P. R. China

Abstract: To address the practical limitations of conventional double-ended Brillouin dynamic grating (BDG) distributed fiber sensing systems, such as complex cabling, difficult data extraction, and loss of sensing upon fiber breakage, a single-ended chaotic BDG distributed fiber sensing system is proposed. In this system, two chaotic pump beams with a frequency difference are co-injected from the same end into the slow axis of a polarization-maintaining

Received: 2025-11-26; **Accepted:** 2026-01-12; **Online (CNKI):** 2026-01-16

Foundation: National Key Research and Development Program of China (2023YFF0715700); National Natural Science Foundation of China (62075153, 62205237); Key Project of Joint Funding from Basic Research Program of Shanxi Province (Lu'an) (202403011241001); Central Government-Guided Local Science and Technology Development Foundation of Shanxi Province (YDZJSX20231A019); Jointly Funded Project of Shanxi Provincial Basic Research Program (Jiaokong) (202303011222005); Patent Transformation Special Program Foundation of Shanxi Province (202405010)

Corresponding author: Professor ZHANG Jianzhong (zhangjianzhong@tyut.edu.cn)

Citation: JIN Kezhi, ZHANG Jianzhong, MA Zhe, et al. Single-ended chaotic Brillouin dynamic grating based distributed decoupled measurement of temperature and strain [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(2): 215-222. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



<http://journal.szu.edu.cn>

fiber (PMF) to interact and excite a chaotic BDG. A probe signal is simultaneously launched into the fast axis of the PMF, and both the temperature and the strain information are obtained by demodulating the Brillouin frequency shift (BFS) and birefringence frequency shift (bireFS). The generated chaotic BDG exhibits a single, stable and controllable profile, whose grating length is determined by the inherently short coherence length of the chaotic laser. Since all operations are performed from one fiber end, this proposed single-ended configuration enables independent generation and detection of the BDG while maintaining high spatial resolution, thereby achieving decoupled distributed measurements of temperature and strain. Experimental results demonstrate a spatial resolution of 2.0 cm over a 50 m sensing fiber, with temperature and strain measurement accuracies of 0.6 °C and 14 $\mu\epsilon$, respectively.

Key words: fiber optic sensing; single-ended configuration; chaotic laser; Brillouin dynamic grating; temperature and strain sensing; decoupled measurement; high spatial resolution

布里渊分布式光纤传感技术因在温度、应变测量方面具备高灵敏度、抗干扰能力强以及高空间分辨率等特点^[1-2], 在智能电网^[3-4]、边坡隧道^[5]及管线状态监测^[6]等领域展现出巨大的应用前景。然而, 传统布里渊分布式光纤传感技术存在温度与应变之间的交叉敏感问题, 即单一布里渊频移测量无法区分两种物理量的变化, 限制了其实际应用。基于布里渊动态光栅(Brillouin dynamic grating, BDG)的分布式光纤传感技术能够解决这一问题, 其本质是通过受激布里渊散射效应在光纤中激发BDG, 利用对BDG反射谱的测量以提取与温度或应变呈现线性关系的双折射频移, 并与布里渊频移构成双参量, 实现温度与应变的解耦合测量^[7]。

目前基于BDG的分布式光纤传感技术可分为时域系统与相关域系统两类。时域系统通过从保偏光纤慢轴两端注入泵浦脉冲激发BDG, 从快轴注入探测脉冲, 实现泵浦脉冲与探测脉冲的同步传播, 获取局域布里渊增益谱或反射谱实现温度与应变的分布式传感^[8-9], 但受限于声子寿命(10 ns), 时域系统的空间分辨率难以突破1 m。相比于时域系统, 相关域系统从光纤两端注入, 采用频率受正弦调制, 或相位受伪随机序列或Golomb码调制的连续光作为泵浦信号激发BDG, 能够在空间分辨率方面实现突破^[10-11], 但该类系统因泵浦信号的周期性会产生多个光栅, 从而导致传感距离模糊的问题。为解决该问题, WANG等^[12]提出从传感光纤两端注入混沌激光, 利用混沌激光信号自相关曲线具有单个相关峰的特性, 可以在传感光纤中稳定产生单个BDG, 在保持高空间分辨率的同时, 实现温度与应变解耦合测量, 解决了相关域系统测量中的传感距离模糊难题, 将传感距离进行扩展^[13-16]。

通过双端注入泵浦产生BDG的分布式光纤传感系统, 在实际工程应用中会出现布线繁琐和数据

采集困难的问题, 且当传感光纤发生断裂时无法进行温度与应变测量, 为此, SONG等^[17]提出基于单端结构的BDG分布式光纤传感系统, 从光纤的一端采用较长的泵浦脉冲与较短的探测脉冲通过正交偏振方式实现同步传播, 泵浦脉冲的放大自发布里渊散射产生BDG, 探测脉冲则用于分析这些声波的局域频谱特征, 但空间分辨率仍受限于声子寿命。SONG等^[18-19]也将受频率调制的泵浦连续光与探测连续光从光纤的同一端注入, 通过光纤远端反射的泵浦光与向前传输的探测光相遇发生受激布里渊散射产生BDG, 实现温度与应变分布式测量, 但会出现传感路径重叠的问题。

本研究提出单端混沌BDG分布式光纤传感系统, 利用混沌光的低相干性并结合单端结构, 能在保持厘米级高空间分辨率的同时, 避免传感路径重叠并体现工程实用性, 为在空间受限且精度要求高的应用场景提供重要手段。

1 实验装置及原理

单端混沌BDG分布式光纤传感的实验装置如图1。实验所使用混沌激光中心波长为1550 nm, 3 dB带宽为0.050 nm, 通过90:10耦合器将混沌激光分为泵浦光1和泵浦光2两部分。利用微波信号源(microwave signal generator, MWG)对单边调制器(single-sideband modulator, SSBM)进行扫频设置, 将泵浦光1调制为与泵浦光2具有一定频率差的单边带泵浦光, 之后进入掺铒光纤放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)1进行放大, 放大之后的泵浦光1功率为20 mW。将泵浦光2利用声光调制器(acousto-optic modulator, AOM)1配合任意波形发生器(arbitrary waveform generator, AWG)进行脉冲调制后进入EDFA2放大, 此时的泵浦光2

功率为 250 mW, 脉宽 40 μ s. 通过可调光延迟线 (variable optical delay line, VODL) 调整泵浦光 1 与泵浦光 2 的光程差, 控制混沌 BDG 在光纤中的产生位置. 调制完成的两路泵浦光通过 50:50 耦合器由同方向经过偏振分束器 (polarizing beam splitter, PBS) 入射到保偏光纤 (polarization-maintaining fiber, PMF) 的慢轴中, 利用光纤尾端的保偏光纤反射镜 (polarization-maintaining fiber reflector module, PM-FRM) 反射泵浦光 1, 以保证泵浦光 1 与泵浦光 2 仅在光程相等处产生混沌 BDG. 探测时使用可调谐激光器进行扫频设置, 混沌 BDG 对于不同频率的探测光具有不同反射率, 反射后的探测光经过 PBS 及 OC 进入 PD 转化为电信号, 由 LIA 采集实现反射谱测量. 在传感光纤上设置温变区与应变区, 实现温度与应变的解耦合测量, 如图 1 红色框.

的反射光通过 PBS 及 OC 进入光电探测器 (photodetector, PD) 转化为电信号, 由锁相放大器 (lock-in amplifier, LIA) 采集实现增益谱的测量. 在反射谱测量中, 将泵浦光 1 调制为与泵浦光 2 相差布里渊频移的单边带泵浦光, 保证混沌 BDG 产生强度最大. 将泵浦光 2 利用 AOM1 配合 AWG 进行脉冲调制后进入 EDFA2 放大, 通过 VODL 调整泵浦光 1 与泵浦光 2 的光程差. 调制完成的两束泵浦光由同方向入射到 PMF 慢轴. 探测时使用可调谐激光器进行扫频设置, 混沌 BDG 对于不同频率的探测光具有不同反射率, 反射后的探测光经过 PBS 及 OC 进入 PD 转化为电信号, 由 LIA 采集实现反射谱测量. 在传感光纤上设置温变区与应变区, 实现温度与应变的解耦合测量, 如图 1 红色框.

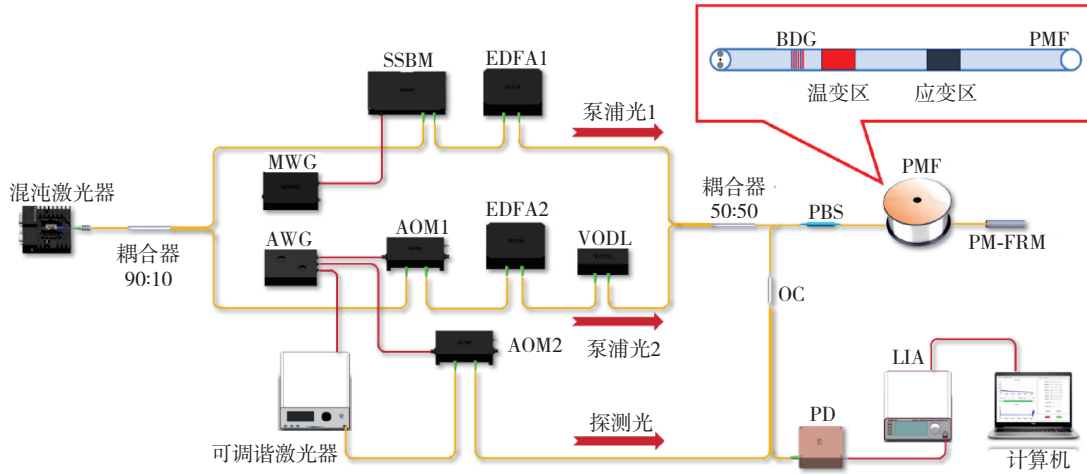


图1 单端混沌BDG分布式光纤传感实验装置

Fig. 1 Single-ended chaotic BDG distributed optical fiber sensing experimental equipment.

混沌激光作为一类低相干光源, 其特性可通过 Lang-Kobayashi 速率方程进行建模^[20]. 这类光源的自相关特性表现为 δ 函数形式, 其在光纤中形成的混沌 BDG 具有单光栅且稳定的结构. 在单端混沌 BDG 传感系统中, BDG 的生成依赖于两束混沌泵浦光在保偏光纤慢轴上的相互作用, 而其探测则通过注入快轴的探测光实现. 利用 BDG 反射率理论模型^[21], 并结合混沌光的低相干特性, 对系统传感机理进行建模.

两束频率分别为 f_{pump1} 与 f_{pump2} 的混沌泵浦光满足相位匹配条件, 即 $\Delta\nu = f_{\text{pump2}} - f_{\text{pump1}} = \nu_B$, 其中, $\Delta\nu$ 为两束泵浦光的频率差; ν_B 为布里渊频移 (Brillouin frequency shift, BFS). 此时, 在受激布里渊散射 (stimulated Brillouin scattering, SBS) 作用下, 光纤中激发声波场进而形成 BDG, 该过程可通过耦合

方程表示为

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_{\text{probe}}}{\partial z} &= \frac{i}{2} g_2 E_{\text{probeR}} \rho e^{-i\Delta k z} \\ \frac{\partial E_{\text{probeR}}}{\partial z} &= -\frac{i}{2} g_2 E_{\text{probe}} \rho e^{i\Delta k z} \\ \rho &= \frac{i}{\Gamma_A} g_1 E_{\text{pump1}} E_{\text{pump2}}^* \end{aligned} \quad (1)$$

其中, E_{probe} 与 E_{probeR} 分别是探测光及其反射光的电场慢变包络; ρ 为声波场幅度; g_1 与 g_2 分别为电致伸缩系数与弹光耦合系数; z 为传播方向; $\Gamma_A = i(\nu_B^2 - \nu^2 - i\nu\Gamma_B)/2\Delta\nu$ 为声波失谐因子, 当 $\Delta\nu = \nu_B = 2n_S V_A/\lambda$ 时, 声波场强度最大, n_S 为光纤慢轴折射率, V_A 为光纤中的声速, λ 为入射光波长, Γ_B 为布里渊线宽; $\Delta k = 2n\Delta\nu_{\text{bire}}/c$ 为探测光的相位失谐量, 当 Δk 为 0 时, BDG 反射率最大, $\Delta\nu_{\text{bire}} = f_{\text{probe}} - f_{\text{pump2}} - \nu_{\text{bire}}$ 为探测光频率与相位匹配条件的

偏差, $\nu_{\text{bire}} = f_{\text{pump2}}(n_s - n_f)/n$ 为双折射频移(birefringent frequency shift, bireFS), n_f 为光纤快轴折射率, n 为平均折射率; E_{pump1} 和 E_{pump2} 分别为泵浦光 1 与泵浦光 2 的电场慢变包络; * 表示取共轭.

基于单端注入产生混沌 BDG 的过程如图 2(a). 将两束泵浦光从保偏光纤慢轴的同一端注入, 通过调制使二者满足相位匹配条件. 由于混沌激光的自相关特性, 两束泵浦光在光程相等处相遇并发生 SBS, 在泵浦光 2 路径中引入 VODL, 同时利用光纤尾端的 PM-FRM 将泵浦光 1 反射回光纤. 泵浦光 1 率先通过尾端进行反射, 其反射光与泵浦光 2 相遇发生 SBS 并最终激发混沌 BDG.

对于长度为 L 的 BDG, 其反射率 R 可表示为

$$R \approx R_0 R_B \Delta\nu_B R_{\text{bire}} \Delta\nu_{\text{bire}} \quad (2)$$

$$R_0 = \frac{1}{4} g_B^2 I_{\text{pump1}} I_{\text{pump2}} L^2 \quad (3)$$

$$R_B \Delta\nu_B = \frac{(\Gamma_B/2)^2}{\Delta\Omega_B^2 + (\Gamma_B/2)^2} \quad (4)$$

$$R_{\text{bire}} \Delta\nu_{\text{bire}} = \text{sinc}^2\left(\frac{\Delta\nu_{\text{bire}} nL}{c}\right) \quad (5)$$

其中, R_0 为泵浦光干涉强度; $R_B \Delta\nu_B$ 为增益谱谱形函数; $\Delta\Omega_B^2 = \Delta\nu - \nu_B$ 为产生声波场的相位失谐量; $R_{\text{bire}} \Delta\nu_{\text{bire}}$ 为反射谱谱形函数; $L = c/(2n\Delta f)$ 为混沌 BDG 长度, Δf 为混沌光 3 dB 光谱宽度. BDG 反射率由 R_0 、 $R_B \Delta\nu_B$ 及 $R_{\text{bire}} \Delta\nu_{\text{bire}}$ 共同决定.

当光纤受到温度变化 ΔT 或应变 $\Delta \varepsilon$ 作用时, ν_B 与 ν_{bire} 会发生变化, 通过双参量同时解调温度与应变变为

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta\nu_{\text{bire}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_T^B & C_\varepsilon^B \\ C_T^{\text{bire}} & C_\varepsilon^{\text{bire}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, C_T^B 、 C_ε^B 与 C_T^{bire} 、 $C_\varepsilon^{\text{bire}}$ 分别为 BFS 与 bireFS 对应的温度系数、应变系数.

增益谱和反射谱共同决定 BDG 反射率, 如图 2(b). 其中, 振幅- ν_B 平面展现了当固定泵浦光 1 与泵浦光 2 的扫频区间时, 产生的混沌 BDG 对不同波长探测光具有不同反射率, 探测光的反射包络峰值强度不同, 峰值所对应的中心频率为 BFS; 振幅- ν_{bire} 平面展现的是当泵浦光 1 与泵浦光 2 满足相位匹配条件时, 设置探测光的扫频区间, 并把每次频率步进所激发的瞬态反射信号峰值记录为离散包络点, 当探测光与泵浦光 2 满足相位匹配条件时, 离散包络点的峰值强度最大, 峰值所对应的中心频率即为 bireFS. 因此, 当泵浦光 1 与泵浦光 2、探测光与泵浦光 2 均满足相位匹配条件时, 振幅- ν_B 剖面即为实测的增益谱, 振幅- ν_{bire} 剖面为实测反射谱, 此时混沌 BDG 反射率最大. 实际采集过程中保持扫频与触发信号同步锁定, 从而确保数据严格对齐. 当环境温度变化或施加应变时, 光纤中的声速及折射率会发生改变并对 BDG 产生影响, 进而可以提取 BFS 及 bireFS 的变化, 解调出温度与应变信息.

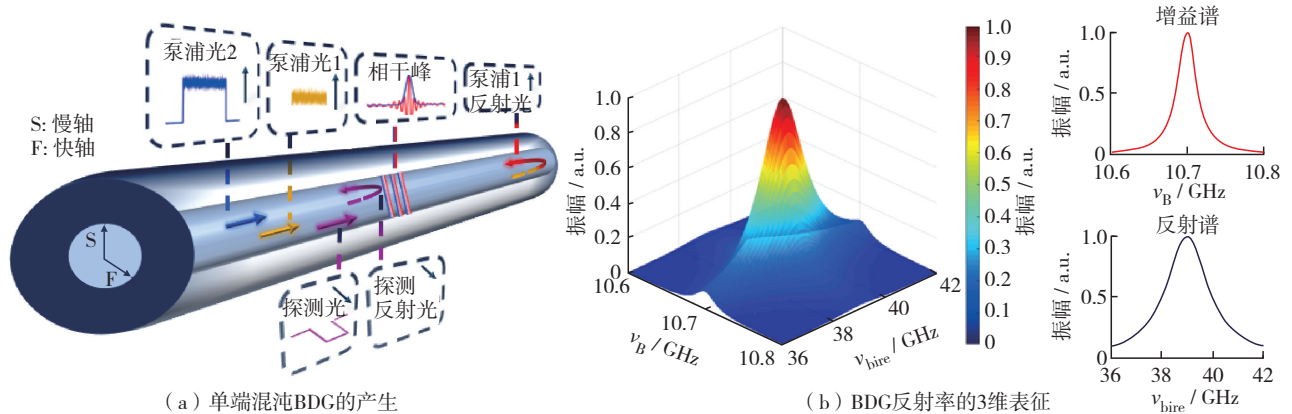


图 2 单端混沌 BDG 的产生及其反射率的 3 维表征

Fig. 2 (a) Single-ended chaotic BDG generation and (b) its three-dimensional characterization of reflectivity.

2 实验结果与分析

在传感光纤上设置温变区与应变区, 实验测量 BFS 与温度、应变的关系. 设置温变区温度由 20 °C 上升至 60 °C, 升温步长为 10 °C, 采集到高斯拟合

后的增益谱随温度的变化曲线如图 3(a); 图 3(b) 为 BFS 随温度的变化曲线, 可得温度系数为 1.7 MHz/°C. 通过设置应变区, 应变由 0 ~ 800 $\mu\varepsilon$, 应变步长为 200 $\mu\varepsilon$, 采集到高斯拟合后的增益谱随应变的变化曲线, 如图 4(a); 图 4(b) 为 BFS 随应变的变化曲线, 得到应变系数为 0.052 MHz/ $\mu\varepsilon$.

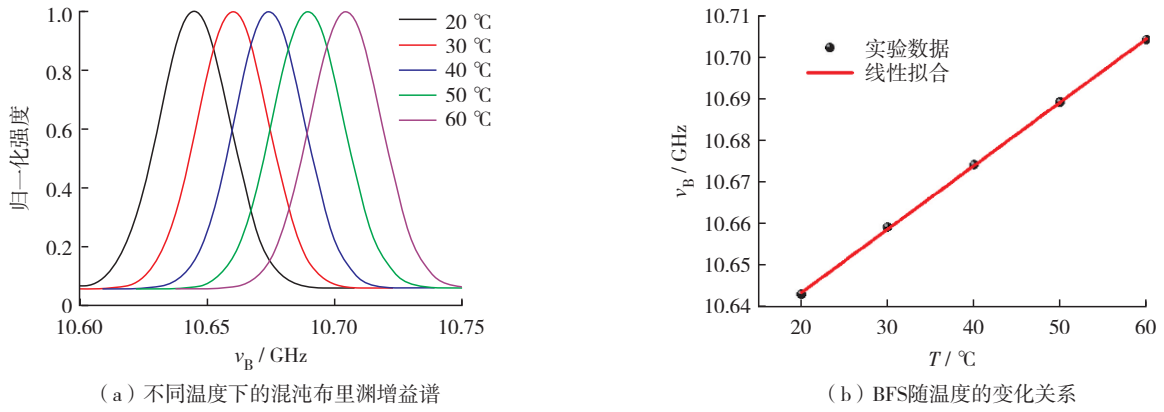


图3 不同温度下的混沌布里渊增益谱及BFS随温度的变化关系

Fig. 3 (a) Chaotic Brillouin gain spectrum measurement at different heating temperature and (b) the variation of BFS with temperature.

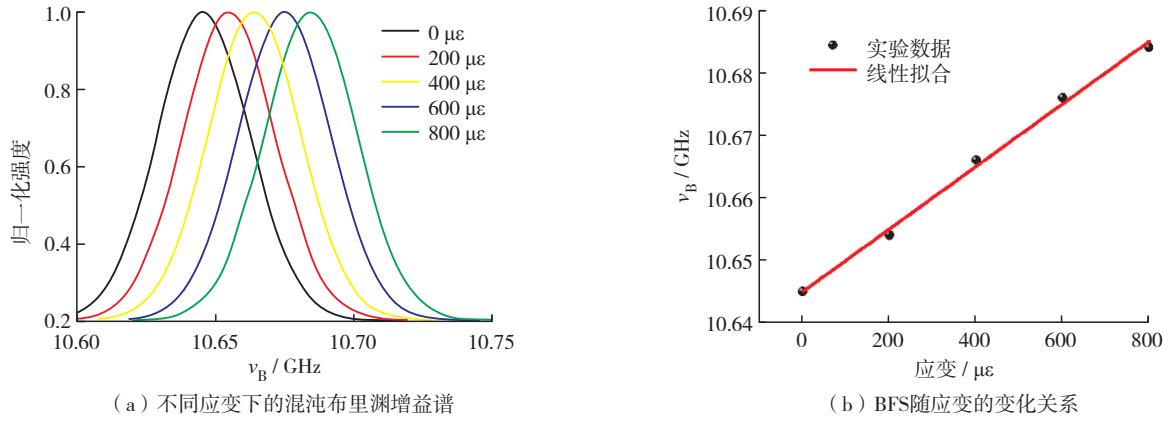


图4 不同应变下的混沌布里渊增益谱及BFS随应变的变化关系

Fig. 4 (a) Chaotic Brillouin gain spectrum measurement under different strain and (b) the variation of BFS with strain.

以同样方式测量 bireFS 随温度与应变的变化曲线, 如图 5 和图 6. 由图 5(b) 可得温度系数为 $-60.1 \text{ MHz}/^{\circ}\text{C}$, 可见, bireFS 与温度呈现负相关关系, 这与 BFS 对温度的依赖关系相反, 符合理论结

果^[22]. 由图 6(b) 可得, 应变系数为 $1.3 \text{ MHz}/\mu\epsilon$.

实验所得 BFS 和 bireFS 对应的温度与应变系数, 能够满足式(6)系数矩阵求解要求, 由此可以同时解调出实验中温变区与应变区的实际数值.

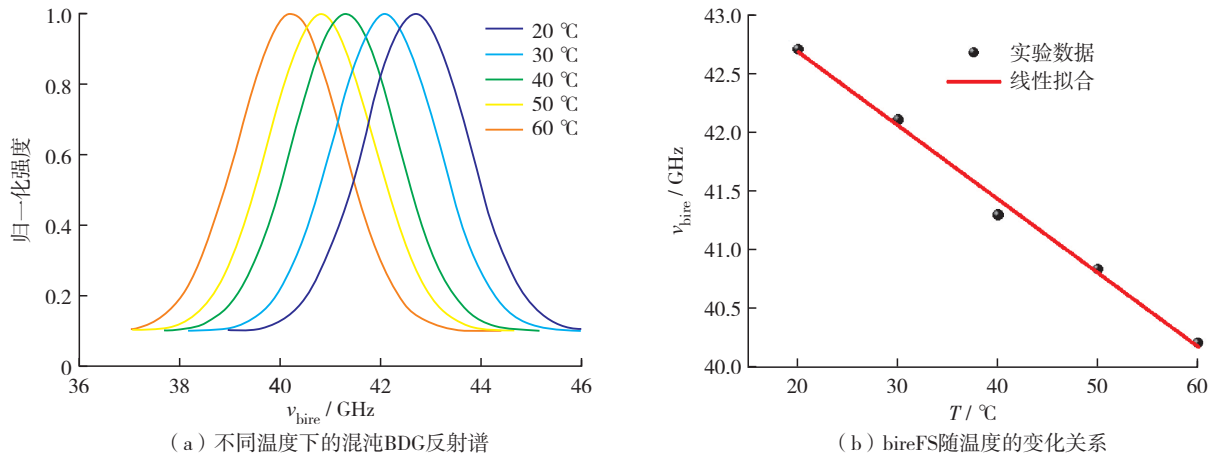


图5 不同温度下的混沌BDG反射谱及bireFS随温度的变化关系

Fig. 5 (a) Chaotic BDG reflection spectrum measurement at different heating temperature and (b) the variation of bireFS with temperature.

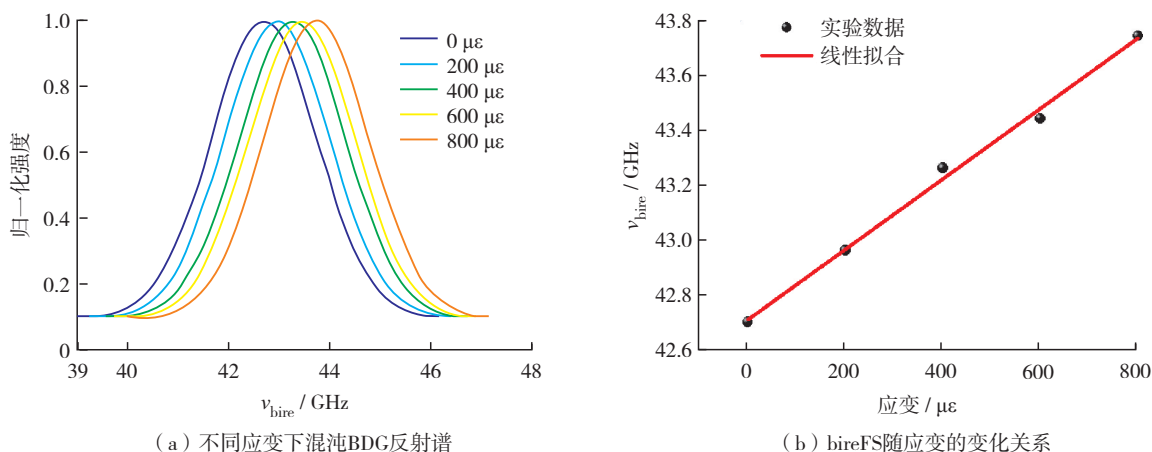


图6 不同应变下混沌BDG反射谱及bireFS随应变的变化关系

Fig. 6 (a) Chaotic BDG reflection spectrum measurement under different strain and (b) the variation of bireFS with strain.

为测量系统的空间分辨率, 设置两个 8 cm 实验区, 两者相隔 20 cm, 实验区分别进行加温和加应变, 利用 VODL 实现分布式传感. 其中, 温变区和应变区的最大设置分别为 60 °C 和 800 $\mu\epsilon$. 图 7 展示了 BDG 通过两个实验区的 BFS 变化过程, 其中, 图 7(a) 是 BFS 的温度测量结果, 上升沿和下降沿分别为 2.2 cm 和 2.1 cm; 图 7(b) 是 BFS 的应变测量结果, 上升沿和下降沿分别为 1.8 cm 和 2.0 cm. 图 8 为 BDG 通过两个实验区的 bireFS 变化过程, 其中, 图 8(a) 是 bireFS 的温度测量结果, 上升沿和下降沿分别为 2.0 cm 和 2.3 cm; 图 8(b) 是 bireFS 的应变测量结果, 上升沿和下降沿分别为 1.8 cm 和 1.9 cm. 单端混沌 BDG 传感系统的空间分辨率由光栅长度决定, 实验中所使用混沌光的 3 dB 线宽为

0.050 nm, 理论上可以产生 1.7 cm 的光栅. 将上升沿和下降沿的平均值作为实际混沌 BDG 长度, 对比可得实测光栅长度大于理论光栅长度, 其原因主要是在温度与应变传感过程中存在过渡区, 从而导致实验误差. 当混沌 BDG 到达温变或应变区边缘时, 增益谱与反射谱仍会出现频移, 导致在定位边缘时引入测量误差. 通过移动光延迟线, 以 1 mm 的步长扫描 BDG 通过温变或应变区边缘的过程, 发现 BFS 与 bireFS 的变化呈现约 2.0 cm 宽的阶梯曲线, 这主要是由于温变区存在热扩散区, 以及应变区也并非将应力绝对集中在固定区域, 即温度与应变并非均匀分布所导致. 由以上结果可得, 当光栅长度为 1.7 cm 时, 单端混沌 BDG 传感系统在实验中实现了 2.0 cm 的空间分辨率.

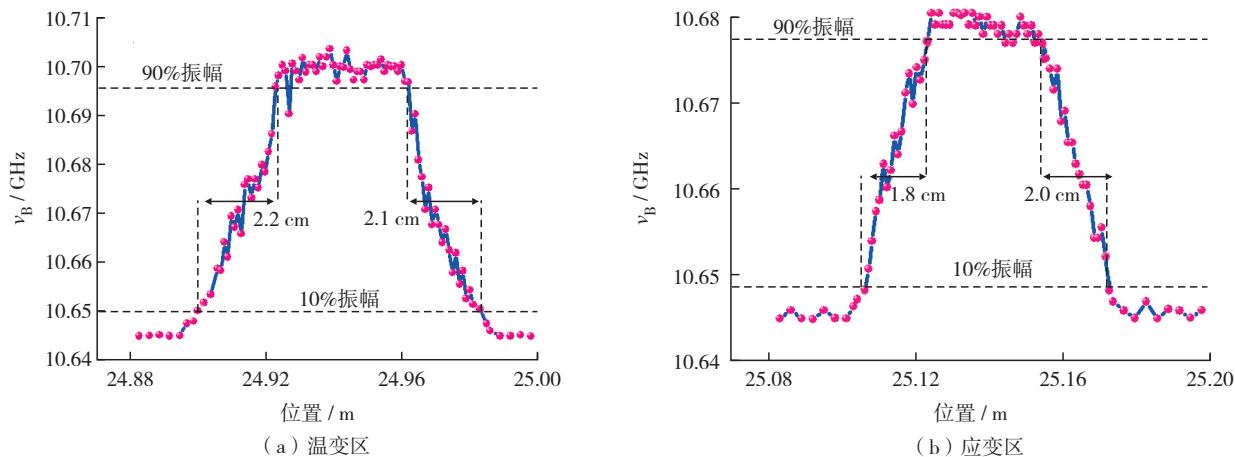


图7 BDG通过温变区与应变区时引起的BFS变化

Fig. 7 Changes in BFS as a BDG propagates through (a) temperature and (b) strain regions.

实验还测量了系统 BFS 与 bireFS 对应的温度与应变精度. 根据上述 BFS 与 bireFS 所对应的温变区

与应变区的频移量, 以及通过加温实验与应变实验得到的温度系数与应变系数, 可以解调出 BFS 与

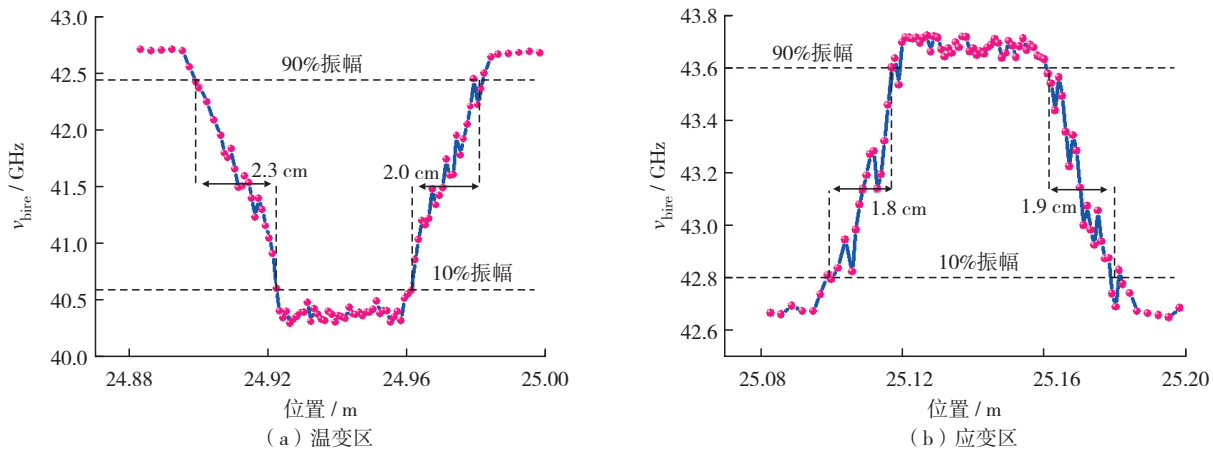


图8 BDG通过温变区与应变区时引起的bireFS变化

Fig. 8 Changes in bireFS as a BDG propagates through (a) temperature and (b) strain regions.

bireFS对应的温变区与应变区的具体数值, 结果见图9. 将解调结果与实际温变区、应变区进行对比可得, 解调的温变区差值为 39.4°C , 由于实验中室温与温变区差值为 40.0°C , 因此可以得到温度误差为 0.6°C ; 由于实验中传感光纤处于松弛状态(无应变), 且应变区大小为 $800\mu\epsilon$, 解调出的应变区差值为 $786\mu\epsilon$, 因此可以得到应变误差为 $14\mu\epsilon$. 以上结果表明, 系统的温度精度为 0.6°C , 应变精度为 $14\mu\epsilon$. 与此同时, 可以解调出温变区与应变区的位置与实际设置位置相符, 表明单端混沌BDG传感系统能够实现高空间分辨率温度与应变的解耦合测量.

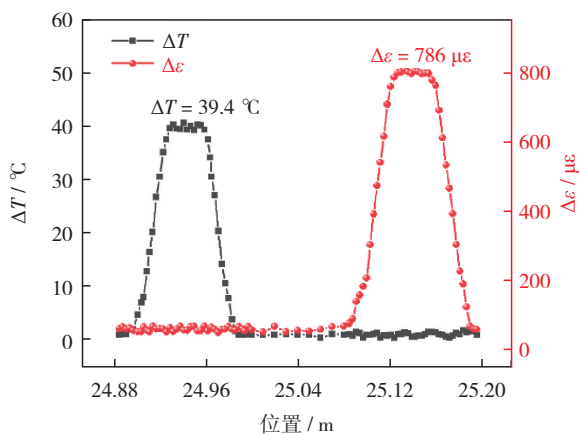


图9 温度与应变解耦合测量结果

Fig. 9 Decoupled measurement results of temperature and strain.

实验中对光源稳定性进行了时长为10 h的测试, 混沌光参数并未发生漂移, 能够满足长时间BDG实验的需求. 通过多次重复实验, 发现环境温

度变化及机械振动对实验结果造成的影响很小, 表明实验系统稳定性较高.

结 语

提出单端混沌BDG传感系统, 将两束混沌泵浦光由光纤同一端注入传感光纤, 并通过光纤尾端反射镜反射1束泵浦光与另外1束向前传输的泵浦光相遇产生混沌BDG, 利用混沌BDG对探测光进行反射, 从而提取布里渊增益谱和BDG反射谱, 分别获得与温度和应变成线性相关的BFS与bireFS, 在保持高空间分辨率的同时完成了温度与应变的解耦合测量. 实验中在50 m传感光纤内, 实现了2.0 cm的空间分辨率, 温度与应变的测量精度分别可达 0.6°C 与 $14\mu\epsilon$. 单端混沌BDG传感系统的提出, 为实际油气钻探、管道探测及桥梁曲度监测等领域提供一种重要监测手段.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2023YFF0715700); 国家自然科学基金资助项目(62075153, 62205237); 山西省基础研究计划(潞安)联合重点基金资助项目(202403011241001); 山西省中央引导地方科技发展基金资助项目(YDZJSX20231A019); 山西省基础研究计划(联控)联合基金资助项目(202303011222005); 山西省专利转化专项计划资助项目(202405010)

作者简介: 金柯志(jkz559@163.com), 太原理工大学硕士研究生. 研究方向: 混沌激光与光纤传感.

引 文: 金柯志, 张建忠, 马喆, 等. 单端混沌BDG分布式温度与应变解耦合测量[J]. 深圳大学学报理工版, 2026, 43(2): 215-222.

参考文献 / References:

- [1] BAO Xiaoyi, CHEN Liang. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.

- [2] BAI Qing, WANG Qinglin, WANG Dong, et al. Recent advances in Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Sensors*, 2019, 19(8): 1862.
- [3] HAO Yunqi, LIU Nannan, KUN Yang, et al. Online ice-coating monitoring research on overhead transmission lines with Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Optical Fiber Technology*, 2020, 60: 102339.
- [4] HAO Yunqi, CAO Yulong, YE Qing, et al. On-line temperature monitoring in power transmission lines based on Brillouin optical time domain reflectometry [J]. *Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 126(19): 2180-2183.
- [5] MINARDO A, CATALANO E, COSCETTA A, et al. Long-term monitoring of a tunnel in a landslide prone area by Brillouin-based distributed optical fiber sensors [J]. *Sensors*, 2021, 21(21): 7032.
- [6] LI Minghao, FENG Xin, HAN Yang. Brillouin fiber optic sensors and mobile augmented reality-based digital twins for quantitative safety assessment of underground pipelines [J]. *Automation in Construction*, 2022, 144: 104617.
- [7] ZOU Weiwen, HE Zuyuan, 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.
- [8] SONG K Y, ZOU Weiwen, HE Zuyuan, et al. Optical time-domain measurement of Brillouin dynamic grating spectrum in a polarization-maintaining fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(9): 1381-1383.
- [9] SONG K Y, YOON H J. High-resolution Brillouin optical time domain analysis based on Brillouin dynamic grating [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(1): 52-54.
- [10] ZOU Weiwen, HE Zuyuan, SONG K Y, et al. Correlation-based distributed measurement of a dynamic grating spectrum generated in stimulated Brillouin scattering in a polarization-maintaining optical fiber [J]. *Optics Letters*, 2009, 34(7): 1126-1128.
- [11] ANTMAN Y, YARON L, LANGER T, et al. Experimental demonstration of localized Brillouin gratings with low off-peak reflectivity established by perfect Golomb codes [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22): 4701-4704.
- [12] WANG Kangbo, MA Zhe, ZHANG Jianzhong, et al. High spatial resolution sensing of temperature and strain without cross sensitivity based on chaotic Brillouin dynamic grating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(9): 9317-9322.
- [13] ZHANG Jianzhong, LI Zhuping, ZHANG Mingjiang, et al. Characterization of Brillouin dynamic grating based on chaotic laser [J]. *Optics Communications*, 2017, 396: 210-215.
- [14] ZHANG Jianzhong, LI Zhuping, WU Yuan, et al. Optimized chaotic Brillouin dynamic grating with filtered optical feedback [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 827.
- [15] LI Mengwen, WU Xingliang, ZHANG Jianzhong, et al. Suppression of fluctuant sidelobes around chaotic Brillouin dynamic grating based on optical switch [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(12): 701-704.
- [16] ZHU Yicheng, WU Xingliang, WANG Kangbo, et al. Experimental observation of chaotic Brillouin dynamic grating [J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5814-5817.
- [17] SONG K Y. High-sensitivity optical time-domain reflectometry based on Brillouin dynamic gratings in polarization maintaining fibers [J]. *Optics Express*, 2012, 20(25): 27377-27383.
- [18] SONG K Y, HOTATE K. Brillouin optical correlation domain analysis in linear configuration [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(24): 2150-2152.
- [19] ZOU Weiwen, HE Zuyuan, HOTATE K. Single-end-access correlation-domain distributed fiber-optic sensor based on stimulated Brillouin scattering [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2736-2742.
- [20] LANG R, KOBAYASHI K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties [J]. *Journal of Quantum Electronics*, 1980, 16(3): 347-355.
- [21] BERGMAN A, YARON L, LANGER T, et al. Dynamic and distributed slope-assisted fiber strain sensing based on optical time-domain analysis of Brillouin dynamic gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2015, 33(12): 2611-2616.
- [22] ZOU Weiwen, HE Zuyuan, HOTATE K. Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(8): 526-528.

【中文责编：方圆；英文责编：溯心】