光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023081901

基于少模光纤的单端 BOTDA 温度传感研究

张立欣[1,2,3]，田　敏[1*]，李永倩[1,2,3]，刘紫娟[1]，王健健[1,2]，耿豪键[1]

（华北电力大学 1. 电子与通信工程系；2. 河北省电力物联网技术重点实验室；
3. 保定市光纤传感与光通信技术重点实验室，河北 保定 071003）

摘　要： 提出了一种基于少模光纤的分布式温度传感系统，理论分析了少模光纤的布里渊散射谱和温度传感特性，将光纤末端产生的菲涅尔反射光作为探测光，搭建单端结构的布里渊光时域分析（BOTDA）系统，实现阶跃折射率两模光纤的温度传感测量。实验结果表明，阶跃两模光纤的布里渊频移与温度呈良好的线性关系，并在 1 km 长光纤上实现了 4.5 m 的空间分辨率、6.29 ℃的温度测量精度。

关键词： 布里渊光时域分析；少模光纤；温度传感；单端结构

中图分类号： TN212；TP212　**文章编号：** 1001－5868(2023)06－0938－04

Research on Single-Ended BOTDA Temperature Sensing System Based on Few-Mode Fiber

ZHANG Lixin[1,2,3], TIAN Min[1], LI Yongqian[1,2,3], LIU Zijuan[1], WANG Jianjian[1,2], GENG Haojian[1]

(1. Dept. of Electronic and Communication Engineering; 2. Hebei Key Lab. of Power Internet of Things Technol.; 3. Baoding Key Lab. of Optical Fiber Sensing and Optical Commun. Technol., North China Electric Power University, Baoding 071003, CHN)

Abstract: A distributed temperature sensing system based on few-mode fiber is proposed. The Brillouin scattering spectrum and temperature sensing characteristics of few-mode fiber were theoretically analyzed. A single-ended Brillouin optical time-domain analysis system was constructed by taking the Fresnel reflected light generated at the end of the fiber as the probe light, and the temperature sensing measurement of step index two-mode fiber were realized. The experimental results show that the Brillouin frequency shift of step index two-mode fiber has a good linear relationship with temperature. And a spatial resolution of 4.5 m and a temperature measurement accuracy of 6.29 ℃ are achieved on a 1 km fiber.

Key words: Brillouin optical time domain analysis; few-mode fiber; temperature sensing; single-ended structure

0　引言

基于布里渊散射的分布式温度传感系统多将单模光纤作为传感光纤，但由于单模光纤只允许单个模式传播，芯径小、受单端受激布里渊散射（Stimulated Brillouin Scattering，SBS）效应的限制，使得光纤的入纤功率较低，进而导致系统的信噪比低、传感距离有限。随着光纤传感技术的快速发展，少模光纤（Few-Mode Fiber，FMF）作为一种区别于普通单模光纤的新型光纤被应用于分布式温度测量中。由于少模光纤可以传输有限个正交模式，可以实现温度、应变、弯曲等传感测量，并可以克服多参数交叉敏感问题，具有多参量同时测量的潜力[1-2]，从而受到了国内外研究人员的广泛关注[3-5]。

收稿日期：2023－08－19.

基金项目：河北省自然科学基金项目（F2019502112）；国家自然科学基金项目（52177141，52205105）；中央高校基本科研业务费专项基金项目（2022MS079）；河北省省级科技计划项目（SZX2020034）.

* **通信作者：**田　敏　**E-mail：**1533613235@qq.com

双端型和单端型为布里渊散射光纤传感技术的两种主要结构。其中，双端型传感测量技术主要有双端型布里渊光时域分析[6]（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）和布里渊光相干域分析[7]等；单端型结构主要有布里渊光时域反射和单端 BOTDA[8]等。双端 BOTDA 需从传感光纤一端入射探测光，另一端入射泵浦光，在实际工程应用中，因其系统结构复杂、施工困难而应用不方便。相较于双端 BOTDA，单端结构的 BOTDA 在光纤发生断裂时仍具有检测能力，其单端工作方式的特点在实际工程中应用更为方便[9]。

本文提出一种基于阶跃折射率两模光纤的单端 BOTDA 温度传感系统，探索基于少模光纤的温度传感特性，在 1 km 长传感光纤上实现了空间分辨率为 4.5 m、测量精度为 6.29 ℃的温度传感。

1　基于少模光纤的布里渊散射特性

1.1　布里渊散射谱

少模光纤芯径大、阈值高、传输有限个模式，易于控制，因此也常用于分布式测量。当光波耦合进入 FMF 中时，不同模式下的光波信号会形成不同的布里渊散射谱，而不同散射谱对测量参数的变化也不相同。对于 FMF 而言，由于不同模式下的散射角不同，不同模式下 FMF 中布里渊频移 F_B 可表示为：

$$F_B=\frac{2n_fV_A}{\lambda_p}\cos(\theta_f/2) \tag{1}$$

式中，n_f 是各个模式下的有效折射率，θ_f 是各个模式下的散射角。

当频率为布里渊频移时，FMF 的布里渊散射谱达到峰值，此时有：

$$g_{0(f)}=\frac{2\pi^2n_f^2p_{12}^2}{c\lambda_p^2\rho V_A\Delta\Gamma_B} \tag{2}$$

式中，$\Delta\Gamma_B$ 表示的是 FMF 中布里渊增益谱（Brillouin Gain Spectrum，BGS）的谱宽，其表达式可以表示为：

$$\Delta\Gamma_B=\frac{16\pi^2n_f^2\eta}{\lambda_p^2\rho} \tag{3}$$

式中，η 表示 FMF 中介质材料的粘滞系数。

通过对少模光纤与单模光纤的布里渊散射谱进行仿真，可以获得如图 1 所示的布里渊散射谱。相较于单模光纤，由于 FMF 中不同模式下光入射角不同，且多种模式之间相互作用，因此其 BGS 会出现展宽。

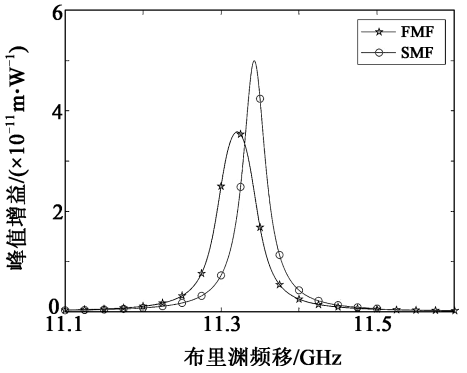


图 1　少模光纤与单模光纤的布里渊散射谱

1.2　温度传感特性

由于光纤材料的热光效应和弹光效应，FMF 中布里渊散射的频移以及强度也会因此产生变化。温度和应变变化会引起光纤折射率的变化，并影响光纤材料的泊松比、杨氏模量及材料密度等参量，进而影响光纤中的声速。

假设 FMF 处于自然松弛的状态，即应变为 0，FMF 的布里渊频移与温度的关系式可表示为：

$$F_B(T)=\frac{2n_f(T)}{\lambda_p}\sin(\theta_f/2)\cdot\sqrt{\frac{[1-k(T)]\cdot E(T)}{[1+k(T)][1-2k(T)]\rho(T)}} \tag{4}$$

式中，k 为光纤泊松比，E 为光纤杨氏模量，ρ 为光纤材料的密度。

进一步地，可将 FMF 的 BFS 与温度 T 的关系简化为：

$$F_B(T)=F_{B0}+C_{\nu T}(T-T_0) \tag{5}$$

由式(5)可知，只要温度系数 $C_{\nu T}$ 确定，就可以测得待测光纤任意位置的温度变化。

2　基于两模光纤的单端 BOTDA 温度传感系统

2.1　实验系统搭建

采用如图 2 所示的单端 BOTDA 温度传感实验系统对阶跃两模光纤进行温度特性测试。实验系统选用线宽为 10.3 kHz 的窄线宽激光器，输出的光信号在经过分光比为 50∶50 的保偏耦合器（PMC）后被分为上下两个支路，上支路光信号进入由任意波形函数发生器（AFG）驱动的电光调制器（EOM1）进行脉冲调制，后经掺铒光纤放大器（EDFA1）进行放大，并由光纤布拉格光栅（FBG1）来滤除自发辐射噪

声;下支路由微波源(MG)驱动 EOM2 生成抑制载波的双边带信号,经 EDFA2 放大后由 FBG2 滤除自发辐射噪声和反斯托克斯光。两路光信号经耦合器合成后并经扰偏器(PS)降低偏振衰落噪声后进入阶跃两模光纤(SI-2-FMF)。将微波调制连续光在光纤尾端产生的菲涅尔反射光作为探测光与脉冲泵浦光在 SI-2-FMF中发生 SBS作用,然后经可调滤波器(TOF)滤波后连接光电探测器(PD),PD 对携带 SBS 作用的光信号直接检测并由示波器(OSC)进行采集和显示。

实验中,传感脉冲宽度为 50 ns、周期为 12 μs,传感光纤分别由约 650,50,300 m 的三段 SI-2-FMF 构成,总长度为 1 km,其中 50 m 光纤置于水浴锅中进行温度控制。

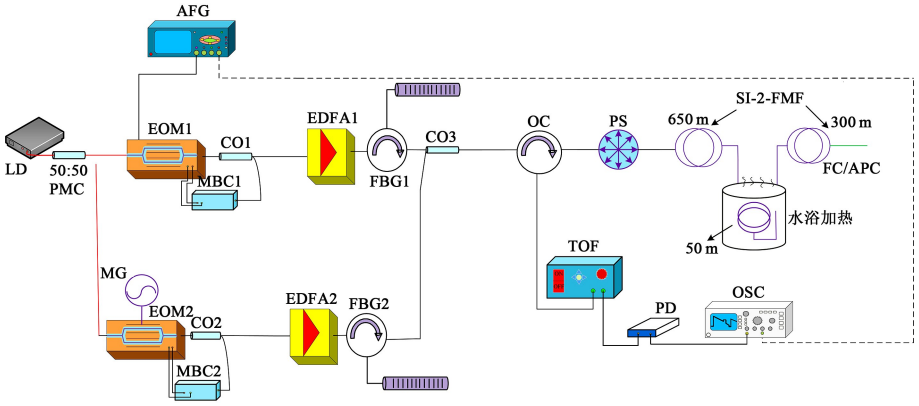


图 2 基于阶跃两模光纤的单端 BOTDA 温度传感实验系统

2.2 实验结果分析

实验采用的传感光纤为 SI-2-FMF,标准长度为 1 km,光纤中可以稳定传输 LP_{01},LP_{11a},LP_{11b} 三种模式,在本实验系统中,将待测两模光纤与单模环形器利用法兰盘拼接。采用入纤脉冲峰值为 400 mW,入纤连续光 2 mW,将微波源频率从 10.73 GHz 扫描到 10.90 GHz,扫描步长为 5 MHz。将 SI-2-FMF 呈自然松散状态置于室温中,室温恒定在 20.3 ℃;将其中 50 m 长 SI-2-FMF 放入恒温水浴锅中进行加热,在 30 ~70 ℃范围内进行温度测量,以 10 ℃为步进对 BGS 进行测量。为了保证待测 SI-2-FMF 均匀受热,当温度达到预设值并稳定 20 min 后再进行温度测量,每次测量都进行 10 000 次叠加平均,重复三次实验内容,并对三次测量的实验数据做平均处理,对相关参数值进行分析,得到待测 SI-2-FMF 的温度特性。

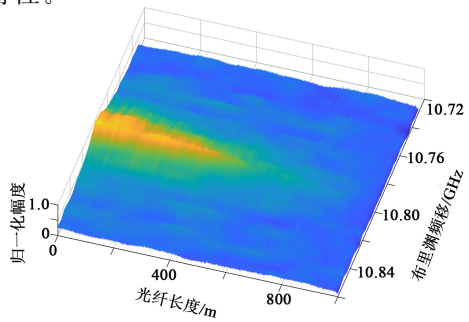


图 3 室温下 SI-2-FMF 三维布里渊散射谱

在室温 20.3 ℃下测得 SI-2-FMF 的三维布里渊散射谱分布,如图 3 所示,对数据做洛伦兹拟合,可得到如图 4 所示的布里渊散射增益。由图 4 可知,拟合得到 SI-2-FMF 的 BFS 约为 10.795 GHz。

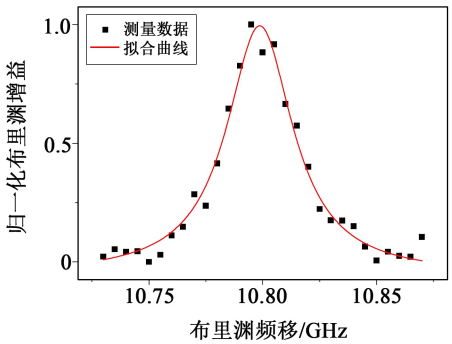


图 4 室温下 SI-2-FMF 的布里渊增益

对 70 ℃温度下的时域信号进行数据处理,得到如图 5 所示的 SI-2-FMF 三维布里渊散射谱和图 6 所示的加温段 680 m 位置处的布里渊增益。由图 5 和

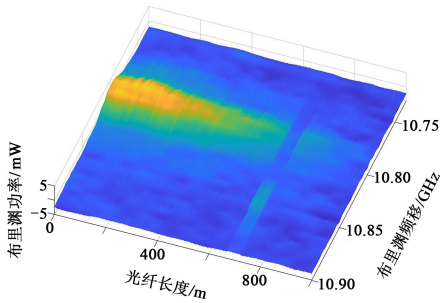


图 5 70 ℃下 SI-2-FMF 三维布里渊散射谱

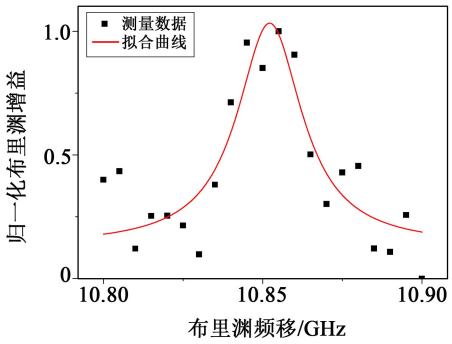


图 6　680 m 位置处 SI-2-FMF 的布里渊增益

图 6 可知，在加温至 70 ℃时，SI-2-FMF 的布里渊频移明显增加，拟合得到的 BFS 约为 10.853 GHz。对光纤加温段位置处的布里渊功率进行数据拟合，均方根误差为 $\sigma^2=0.005\,63$，由此求得信噪比为 22.49 dB。

取 70 ℃温度下频率为 10.86 GHz 的时域信号进行分析，可以获得系统的空间分辨率约为 4.5 m，如图 7 所示。在温度为 30～70 ℃范围内，对不同温度下的 BFS 进行线性拟合，拟合曲线如图 8 所示。由图 8 可知，随着温度不断增高，SI-2-FMF 的布里渊频移也不断增大，并与温度呈线性关系，拟合得到 SI-2-FMF 的温度系数为 1.2 MHz/℃。根据布里渊频移测量精度公式，计算得到 $\Delta\nu_B$ 约为 7.55 MHz，进一步求得温度测量精度 ΔT 约为 6.29 ℃。

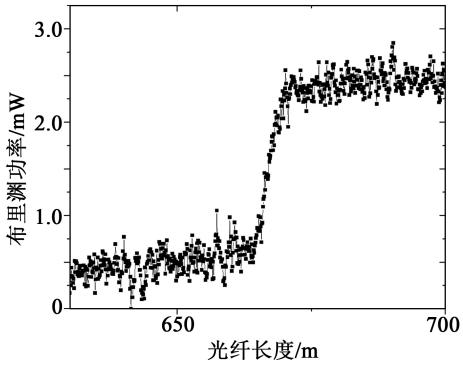


图 7　系统空间分辨率

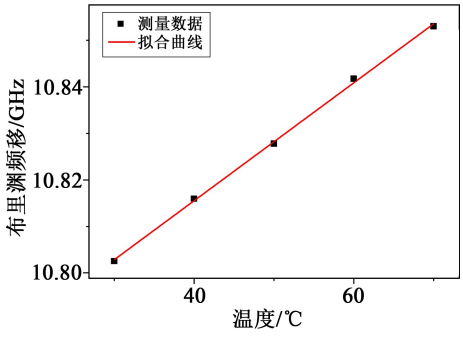


图 8　温度系数拟合曲线

3　结论

本文提出了一种基于单端结构的布里渊光时域分析系统，实现了阶跃两模光纤的温度传感测量。通过在阶跃两模光纤末端产生的菲涅尔反射光与脉冲泵浦光的 SBS 作用，获得了两模光纤的温度传感特性。实验结果表明，阶跃两模光纤布里渊频移的温度系数为 1.2 MHz/℃，并在 1 km 长光纤上实现了 4.5 m 空间分辨率、6.29 ℃测量精度的温度传感。本文的研究成果为后续基于少模光纤实现多参量传感提供了理论和实验依据。

参考文献：

[1] Wu H, Tang M, Wang M, et al. Few-mode optical fiber based simultaneously distributed curvature and temperature sensing[J]. Opt. Express, 2017, 25(11): 12722-12732.

[2] Li A, Wang Y F, Fang J, et al. Few-mode fiber multi-parameter sensor with distributed temperature and strain discrimination[J]. Opt. Lett., 2015, 40(7): 1488-1491.

[3] Zhang Y J, Gao H L, Fu X H, et al. Characterization of Brillouin scattering in a few-mode fiber[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(2): 024207.

[4] Kim Y H, Song K Y. Recent progress in distributed Brillouin sensors based on few-mode optical fibers[J]. Sensors, 2021, 21(6): 2168.

[5] Li L, Jiang C, Hu C J, et al. Highly sensitive strain sensor based on tapered few-mode fiber[J]. Rev. of Scientific Instruments, 2023, 94(7): 075006.

[6] Li Z L, Zhou Y, Hua Z X, et al. Balanced detection for performance enhancement in a pulse-coded Brillouin optical time domain analyzer[J]. IEEE Sensors J., 2023, 23(2): 1166-1171.

[7] Zhou Y, Yan L S, Li Z L, et al. Long-range high-spatial-resolution distributed Brillouin sensing enabled by correlation-domain encoding[J]. Opt. Lett., 2023, 48(12): 3143-3146.

[8] Cui Q S, Pamukcu S, Lin A X, et al. Distributed temperature sensing system based on Rayleigh scattering BOTDA[J]. IEEE Sensors J., 2011, 11(2): 399-403.

[9] Hu J, Zhang X, Zhang Y. A hybrid single-end-access BOTDA and COTDR sensing system using heterodyne detection[J]. J. Lightwave Technol., 2013, 31(12): 1954-1959.

作者简介：

张立欣(1989—)，女，河北省石家庄市人，工学博士，讲师，主要从事分布式光纤传感及其在电力系统中应用方向的研究。