

# 激光与光电子学进展

## BOTDA 系统温度应变双参量传感技术研究进展

刘靖阳<sup>1</sup>, 王涛<sup>1</sup>, 张倩<sup>2</sup>, 赵婕茹<sup>2</sup>, 张明江<sup>1,2\*</sup>, 张建忠<sup>1,2</sup>, 乔丽君<sup>1</sup>, 高少华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>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 030024;

<sup>2</sup>太原理工大学物理与光电工程学院, 山西 太原 030024

**摘要** 基于布里渊光时域分析(BOTDA)的分布式光纤传感系统可以实现温度、应变等参量的测量,同时具有超长传感距离、高空间分辨率和高精度等优势,已广泛应用于基础设施、航天工程等领域中的结构健康监测。然而,BOTDA 传感系统存在温度和应变交叉敏感问题,导致温度和应变的变化在测量过程中难以区分,严重制约了系统传感监测能力。针对该问题,分别介绍了基于参考光纤、光栅辅助、多参数辅助、特种光纤、双波长传感、拉曼/瑞利散射辅助以及神经网络共 7 种方法,并对其进行分析比较,旨在为光纤传感领域中解决交叉敏感的研究与应用提供参考。

**关键词** 光纤光学; 光纤传感器; 分布式光纤传感; 布里渊散射; 布里渊光时域分析; 双参量测量

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1306021

## Research Progress on Temperature-Strain Dual-Parameter Sensing in BOTDA System

Liu Jingyang<sup>1</sup>, Wang Tao<sup>1</sup>, Zhang Qian<sup>2</sup>, Zhao Jieru<sup>2</sup>, Zhang Mingjiang<sup>1,2\*</sup>,  
Zhang Jianzhong<sup>1,2</sup>, Qiao Lijun<sup>1</sup>, Gao Shaohua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Advanced Transducers and Intelligent Control System, Ministry of

Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China;

<sup>2</sup>College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China

**Abstract** Distributed optical fiber sensing based on Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA) allows the simultaneous measurement of parameters such as temperature and strain. In addition, it provides an ultralong sensing distance, high spatial resolution, and high precision, and is widely used in structural health monitoring in areas such as infrastructure and aerospace engineering. However, the BOTDA sensing system exhibits cross-sensitivity between temperature and strain, hindering the discrimination of the influencing factors during measurement and severely restricting the sensing and monitoring capabilities. To address these problems, this article introduces, analyzes, and compares seven methods based on reference fiber, grating assistance, multiparameter assistance, special fiber, dual-wavelength sensing, Raman/Rayleigh scattering assistance, and neural networks to provide a reference for research and application of cross-sensitivity in optical fiber sensing.

**Key words** fiber optics; optical fiber sensors; distributed fiber sensing; Brillouin scattering; Brillouin optical time-domain analysis (BOTDA); dual-parameter measurement

**OCIS codes** 060.2370; 060.2310; 290.5830; 290.5900; 190.5890

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-10-20; 录用日期: 2020-11-05

基金项目: 国家自然科学基金(61527819, 61875146)、山西省重点研发计划(高新领域)项目(201903D121177, 201803D121064)、山西省“三晋学者”特聘教授(专家)支持计划(201617)、山西省高等学校科技创新项目(2019L0290)

通信作者: \*zhangmingjiang@tyut.edu.cn

## 1 引言

与传统电学传感器相比,分布式光纤传感器集信息传感与传输为一体,具有传感距离长、测量精度高、抗电磁干扰等优势,在过去几十年被大量研究<sup>[1]</sup>。分布式光纤传感器可以通过感知外界环境中众多物理、化学参量来监测基础设施的结构健康状况,被广泛应用于桥梁、边坡、输油管道<sup>[2]</sup>以及输电线路<sup>[3]</sup>等设施的安全监测<sup>[4-5]</sup>。

布里渊光时域分析(BOTDA)技术,具有长距离、高精度和高信噪比等鲜明特征,自1989年提出后得到了快速发展。传统BOTDA传感器只能对单一参量进行测量,而在某些特殊应用场景下需同时测量温度和应变两个参量。然而光纤对温度和应变的交叉敏感使得信息难以同时解调,限制其传感应用。随着特种光纤以及基于其他散射机理传感等技术的发展,双参量同时传感的难题得到了很好解决。目前,基于BOTDA的温度应变双参量同时传感技术主要包括基于参考光纤<sup>[6]</sup>、光栅辅助<sup>[7-8]</sup>、多参数辅助<sup>[9]</sup>、特种光纤<sup>[10-14]</sup>、双波长传

感<sup>[15]</sup>、拉曼/瑞利散射辅助<sup>[16-17]</sup>以及神经网络<sup>[18-19]</sup>共7种方法,本文将对上述方法进行对比分析总结,旨在为基于BOTDA双参量同时传感的研究提供参考。

## 2 BOTDA系统传感原理

BOTDA技术是由日本NTT(Nippon Telegraph and Telephone)公司Horiguchi等<sup>[20]</sup>将其作为一种非破坏性的光纤损耗测量技术来提出的,之后逐渐发展为一种高性能分布式光纤传感技术。

BOTDA原理示意图如图1所示,在传感光纤的两端分别注入连续探测光和泵浦脉冲光,当两束光之间的频差在传感光纤的布里渊谱范围内时,二者之间就会发生能量转移<sup>[21]</sup>,即发生受激布里渊散射(SBS)效应,然后通过扫描两束入射光的频差即可获得布里渊散射谱,再根据光时域反射原理确定布里渊频移(BFS)在传感光纤中的位置。当两路光的频差等于光纤BFS时,SBS效应达到最强,利用BFS与温度或应变之间的线性关系<sup>[22]</sup>,即可解调出监测环境中的温度或应变信息。

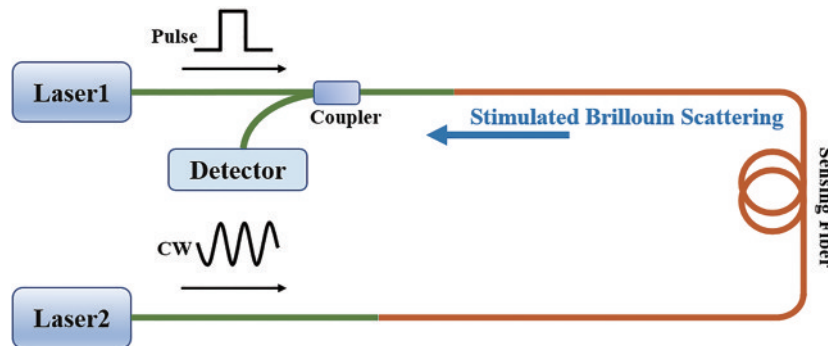


图1 BOTDA原理图<sup>[21]</sup>

Fig. 1 Schematic of BOTDA<sup>[21]</sup>

在BOTDA分布式传感技术中,受激布里渊散射是由入射光场与介质中声学声子相互作用引起的一种非弹性光散射现象<sup>[23]</sup>。当外界温度和应变等参量发生改变时,传感光纤中相应位置的介质密

度、折射率等物理量也会发生变化,从而影响该位置处的布里渊频移。根据光纤折射率、杨氏模量、介质密度及泊松比与温度和应变的关系,光纤的布里渊频移 $\nu_B$ 可表示为<sup>[24]</sup>

$$\nu_B(T, \epsilon) = \frac{2n(T, \epsilon)}{\lambda_0} \sqrt{\frac{[1 - k(T, \epsilon)]E(T, \epsilon)}{[1 - k(T, \epsilon)][1 - 2k(T, \epsilon)\rho(T, \epsilon)]}} \quad (1)$$

式中 $\nu_B$ 为布里渊频移, $n$ 为折射率, $T$ 和 $\epsilon$ 分别为温度和应变, $\lambda_0$ 为入射光波长, $E$ 为介质的杨氏模量, $\rho$ 为介质密度, $k$ 为泊松比。由(1)式可知,布里渊频移同时受 $T$ 和 $\epsilon$ 两个参量的影响,故会导致BOTDA系统在进行双参量同时传感时存在交叉敏感问题。下文将详细介绍BOTDA系统中解决温度应变交

叉敏感的典型技术方案。

## 3 温度和应变同时测量的技术方案

### 3.1 参考光纤法

最早利用BOTDA系统进行温度应变双参量传感的方案是1993年渥太华大学鲍晓毅课题组提

出的参考光纤法<sup>[6]</sup>。该方法在 22 km 传感距离上实现了 5 m 空间分辨率的测量,且温度和应变的分辨率分别为 2 °C 和 20 με。实验装置如图 2 所示,在实验箱中放置有测量光纤(受温度和应变影响)和参考光纤(仅受温度影响),然后将参考光纤获取的 BFS 信息从测量光纤中去掉,即可实现温度和应变的同时测量。装置中使用 Nd:YAG 激光器作为光源,激光器 1 发射出的光经过声光晶体调制器产

生泵浦脉冲信号;激光器 2 发射出的光作为探测光信号,通过对激光器谐振腔调谐实现扫频;采用频谱分析仪监测两路光信号的拍频信息,并给出相应的频移量。通过光电探测器 D2,观察示波器采集到的衰减曲线,并调整激光器 2 的波长,使得频差分别与不同温度、应变下的布里渊频移一致,然后根据测得的布里渊频移量解调出温度和应变信息。

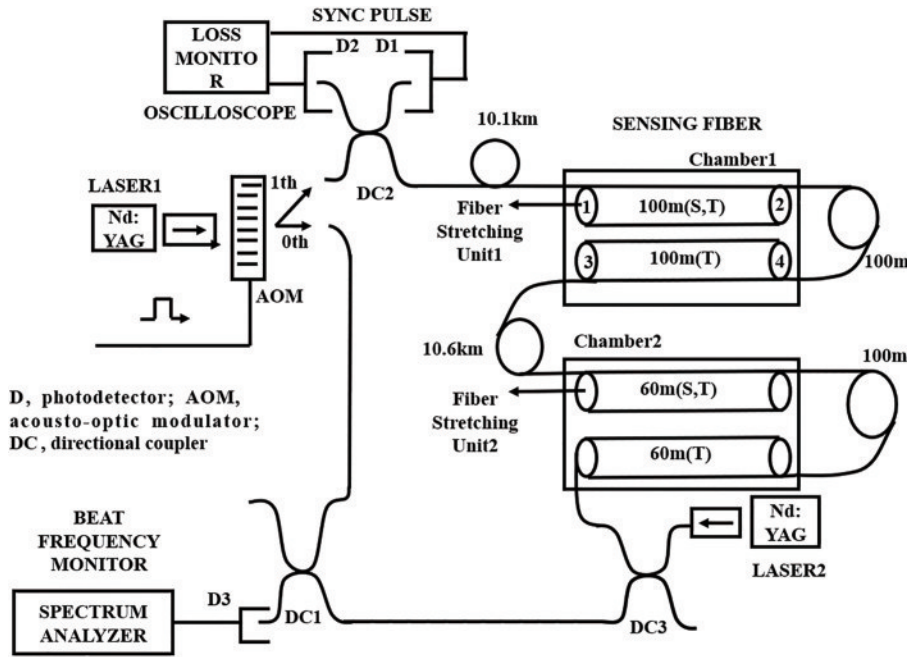


图 2 基于参考光纤法的 BOTDA 实验装置图<sup>[6]</sup>

Fig. 2 BOTDA experimental setup based on reference fiber method<sup>[6]</sup>

参考光纤法首次实现了温度应变双参量传感,但在现实的工程应用中存在以下不足:1)测量过程中需要耗费成倍的光纤长度和测量时间,测量效率低;2)参考光纤需紧邻测量光纤铺设,如果两者所处的环境差异较大,则难以保证参考光纤受到同一温度变量的影响,导致测量精度降低;3)两条光纤的长度差异也会在传感位置处引起测量误差。所以,铺设参考光纤的方案在很多实际情形下难以应用。

### 3.2 光栅辅助解调法

1996 年美国海军研究室光学系 Davis 等<sup>[7]</sup>提出 BOTDA 系统和光纤布拉格光栅(FBG)点式传感系统相结合的方案,在 20 m 的传感光纤上实现了温度和应变分辨率分别为 1.9 °C 和 22 με 的测量。实验装置如图 3 所示,两个 Nd:YAG 激光源分别作为泵浦和探测光信号,脉冲发生器驱动集成光学芯片产生 100 ns 的泵浦脉冲光信号,通过对发射泵浦信号

的激光器进行调制实现扫频,并采用马赫-曾德尔干涉仪(MZI)确定泵浦光信号相对探测光信号的频差,使两路光信号在传感光纤中达到发生 SBS 效应的条件,同时在 FBG 传感系统中利用光谱分析仪获取从 FBG 反射回来的波长信息。最后通过 BOTDA-FBG 系统获取的布里渊频移和波长信息来定标温度和应变系数,相应的温度和应变信息可通过其系数矩阵和变化量来解调。温度和应变的系数矩阵为

$$K = \begin{pmatrix} K_{B,T} & K_{B,\epsilon} \\ K_{G,T} & K_{G,\epsilon} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

所测温度和应力的变化量矩阵为

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta \epsilon \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{B,T} & K_{B,\epsilon} \\ K_{G,T} & K_{G,\epsilon} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \nu_B \\ \Delta \lambda_G \end{pmatrix} = K^{-1} \begin{pmatrix} \Delta \nu_B \\ \Delta \lambda_G \end{pmatrix}, \quad (3)$$

式中 ΔT 和 Δε 分别是所测温度和应力的变化量, Δν<sub>B</sub> 和 Δλ<sub>G</sub> 分别是系统测得的布里渊频移量和反射波长变化量。

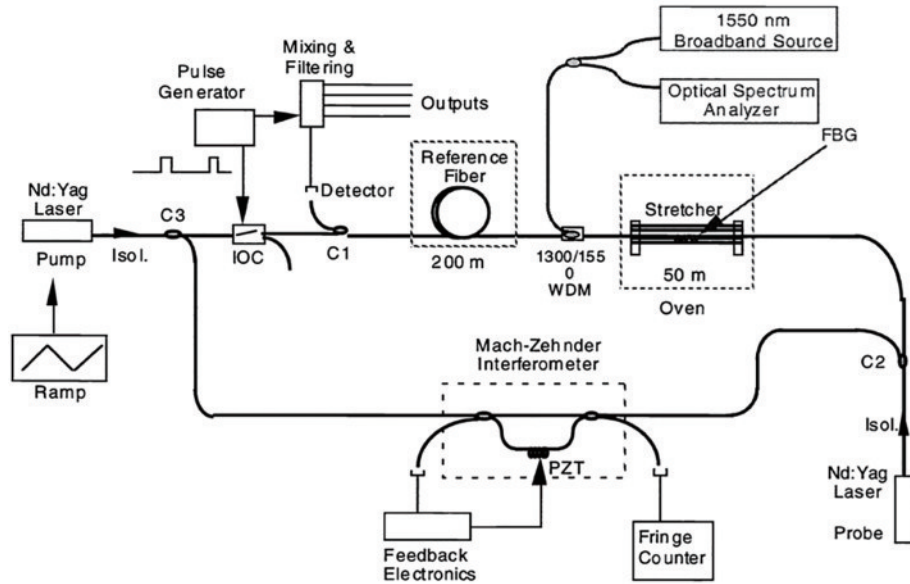


图 3 基于 FBG 辅助法的 BOTDA 实验装置图<sup>[7]</sup>

Fig. 3 BOTDA experimental setup based on FBG auxiliary method<sup>[7]</sup>

同一时期, Posey 等<sup>[8]</sup>在 Davis 提出的实验系统的基础上实现了八通道温度和应变同时测量, 且温度和应变的分辨率分别为 1.5 °C 和 20 με, 这种多通道传感方案在大型建筑结构的健康监测中具有很好的应用前景。2019 年, 突尼斯埃尔马纳尔大学 Zrelli<sup>[25]</sup>利用 BOTDA-FBG 传感器完成了对温度、压力和应变的同时监测, 在 1 s 的测量时间内获取到全部的监测信息, 可实现自然灾害(火灾、山体滑坡等)的实时监测。然而由于点式 FBG 传感系统的限制, 它无法实现对整条传感光纤沿线温度和应变的同时且连续解调<sup>[26-27]</sup>。

### 3.3 多参数解调法

传统 BOTDA 系统一般是通过提取布里渊频移信息实现单参数的解调, 无法满足温度和应变的同时传感。已有研究证实, 除了布里渊频移随外界温度和应力的变化外, 根据布里渊散射谱的谱宽以及功率等参数的变化也可以解调出待测光纤所处环境的温度和应变信息<sup>[28]</sup>。

1997 年, 伦敦国王学院 Parker 等<sup>[29]</sup>提出温度和应力的变化不仅会影响布里渊谱的频移, 也会对其峰值功率产生影响。实验证实, 布里渊谱峰值功率  $P_B$  与温度  $T$  呈正相关, 与应变  $\epsilon$  呈负相关, 具体表达式为

$$\begin{cases} \delta\nu_B = C_{ev}\delta\epsilon + C_{Tv}\delta T \\ \frac{\delta P_B}{P_B} = C_{ep}\delta\epsilon + C_{Tp}\delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\delta\nu_B$  为布里渊频移变化量,  $\frac{\delta P_B}{P_B}$  为布里渊谱峰

值功率的相对变化量,  $\delta T$ 、 $\delta\epsilon$  分别为温度和应力变化量,  $C_{Tv}$ 、 $C_{Tp}$  ( $C_{ev}$ 、 $C_{ep}$ ) 分别是与布里渊频移和功率相对应的温度(应力)变化系数, 当上述系数满足  $C_{ev}C_{Tp}/C_{Tv}C_{ep} \neq 1$  时, 方可解调出温度和应变信息。

1999 年, 纽布伦斯威克大学 Smith 等<sup>[9]</sup>在 BOTDA 系统中利用布里渊谱的频移和峰值功率同时解调温度和应变信息, 在 50 m 的保偏光纤 (PMF) 上实现了 3.5 m 空间分辨率的测量, 且温度和应变分辨率分别为 3.9 °C 和 178 με, 实验装置如图 4 所示。

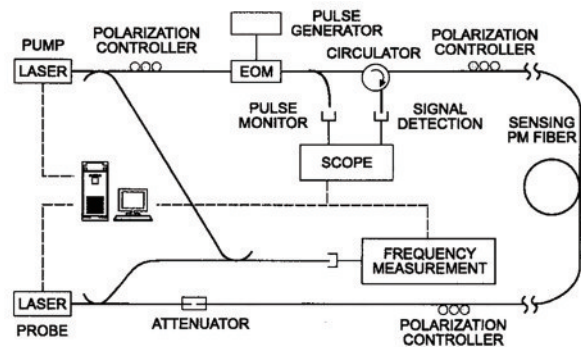


图 4 基于多参数解调法的 BOTDA 实验装置图<sup>[9]</sup>

Fig. 4 BOTDA experimental setup based on multi-parameter demodulation method<sup>[9]</sup>

多参数解调方案利用布里渊谱的频移和峰值功率实现了待测光纤沿线分布式温度和应变的同时测量, 然而在实际应用中, 光纤的弯曲以及连接耦合等因素会造成布里渊谱峰值功率不稳定; 此外, 激光

器、泵浦脉冲信号以及探测信号的功率波动也会引起布里渊谱峰值波动,使系统的测量精度受限。

### 3.4 特种光纤法

随着光纤制造业的发展,研究学者们对光纤的波导结构、掺杂机理等进行深入研究,并致力制备具有专有特性的光纤以满足不同的传感需求<sup>[30]</sup>,其中用于解决BOTDA传感器中交叉敏感问题的特种光纤主要包括光子晶体光纤(PCF)、保偏光纤(PMF)、大有效面积光纤(LEAF)、少模光纤(FMF)和多芯光纤(MCF)等。该方案的基本原理是利用特种光纤的特有性质,如LEAF的多峰频移特性、FMF的多光波模式特性或MCF的空分复用特性等,分别定标温度与应变系数,再通过线性矩阵方程组求解得到温度和应变信息。线性矩阵方程组为

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \end{pmatrix} = \mathbf{H} \cdot \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{pmatrix} \\ \mathbf{H} = \begin{pmatrix} C_T^{(1)} & C_\epsilon^{(1)} \\ C_T^{(2)} & C_\epsilon^{(2)} \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{pmatrix} = \frac{1}{\det(\mathbf{H})} \begin{pmatrix} C_\epsilon^{(2)} & -C_\epsilon^{(1)} \\ -C_T^{(2)} & C_T^{(1)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\alpha \\ \Delta\beta \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\Delta\alpha$ 、 $\Delta\beta$ 是实验中利用不同特种光纤所测得的变化量(如利用PCF测得多峰布里渊频移量、LEAF测得布里渊谱的频移和线宽变化量等); $C_T^{(1)}$ 、 $C_T^{(2)}$ ( $C_\epsilon^{(1)}$ 、 $C_\epsilon^{(2)}$ )为温度(应力)变化系数; $\mathbf{H}$ 为系数矩阵; $\Delta T$ 和 $\Delta\epsilon$ 分别为温度和应力变化信息。

2004年,鲍晓毅课题组基于BOTDA系统,将掺锗PCF作为传感光纤在2 m长的传感距离内实现了温度和应变同时测量<sup>[10]</sup>,且空间分辨率为15 cm,温度、应变的最大测量误差分别为3.9 °C、83  $\mu\epsilon$ ,可以满足应变监测对厘米量级空间分辨率的要求<sup>[31]</sup>。相较于单模光纤,掺锗PCF因声波的波导传播和反波导传播而具有多峰布里渊谱,且单个峰对外界温度和应变的灵敏度具有差异,因此为解决交叉敏感问题提供了可能性<sup>[32-34]</sup>。该课题组选取多峰布里渊谱中不同峰的BFS定标温度和应变系数。图5(a)为在室温24 °C和松弛状态下测得PCF的布里渊损耗谱;图5(b)和图5(c)为峰a和c处布里渊频移量随应力和温度的线性变化曲线,最后根据系数矩阵可计算出温度和应变信息。

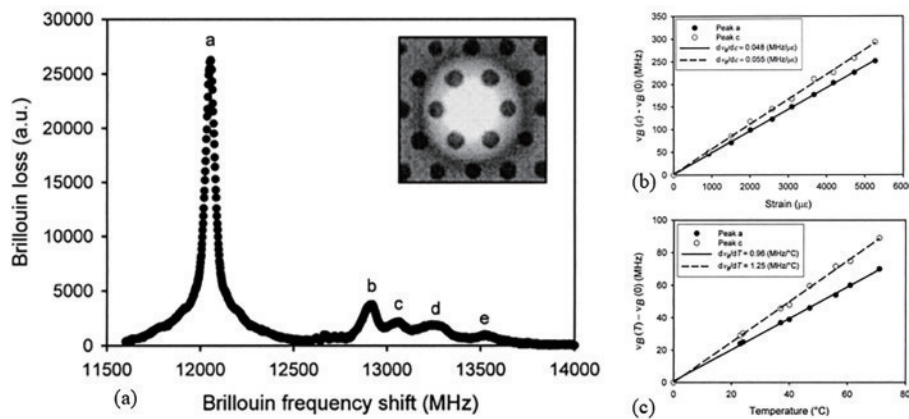


图5 PCF作为传感光纤的测量结果<sup>[10]</sup>。(a)在24 °C和松弛状态下测得的掺锗PCF布里渊损耗谱;(b)峰a和峰c处布里渊频移量随应变的变化关系图;(c)峰a和峰c处布里渊频移量随温度的变化关系图

Fig. 5 Measurement results of the PCF as a sensing fiber<sup>[10]</sup>. (a) Brillouin loss spectrum of PCF with a partially Ge-doped core measured at 24 °C and in a loose state; (b) Brillouin frequency shift of peaks a and c as function of strain; (c) Brillouin frequency shift of peaks a and c as function of temperature

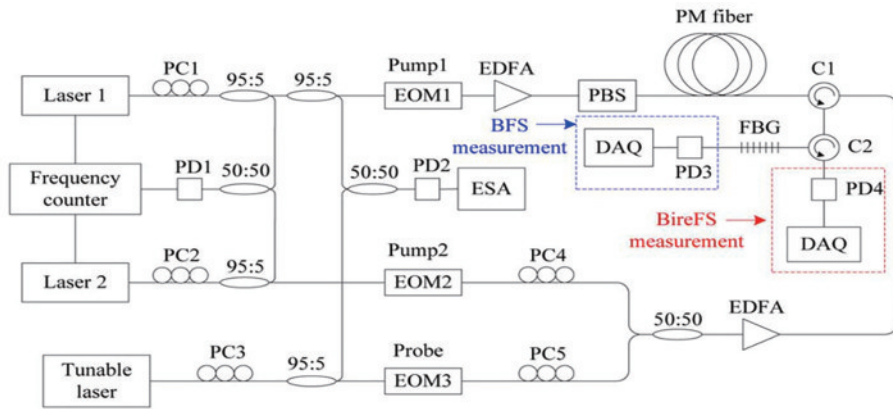
在利用PCF多峰频移性质解决交叉敏感问题的方案中,频率间隔较近的次峰之间难以分离且容易发生布里渊增益串扰,限制了温度和应变的测量范围<sup>[35]</sup>。西南交通大学闫连山课题组<sup>[36]</sup>比较了PCF、色散位移光纤(DSF)和色散补偿光纤(DCF)相邻BGP的频率间隔(在室温和零应变状态下相邻BGP的频率间隔分别小于100 MHz、200 MHz

和516 MHz),最终采用DCF实现更大范围的温度和应变测量。

2009年,日本东京大学Hotate课题组<sup>[37]</sup>首次利用熊猫型保偏光纤实现了温度和应变的同时测量,测量精度分别为0.4 °C和8  $\mu\epsilon$ 。该课题组基于受激布里渊散射和动态光栅机理,通过测量光纤中BFS和双折射频移(BireFS)两个参数完成了温度和应

变系数的定标。2010年,哈尔滨工业大学董永康课题组在基于差分脉冲对技术<sup>[38-39]</sup>的BOTDA(DPP-BOTDA)系统中对保偏光纤中BFS和BireFS进行测量<sup>[11]</sup>,在长为6 m的PMF上实现了空间分辨率为20 cm的双参量同时测量,温度和应变精度分别为0.4 °C和9 με,且测量范围高达700 °C和14 mε。实验装置如图6所示:激光器1提供的连续泵浦光信号和激光器2提供的探测光信号发生SBS效应,基于此获取BFS信息;Pump1和Pump2信号(满足 $v_{Pump1} - v_{Pump2} = v_B$ , $v_B$ 为保偏光纤的布里渊频移)沿着保偏光纤的慢轴(x偏振)分别从两端同时注入保偏光纤,发生SBS效应,产生布里渊动态光栅

(BDG),然后将Probe信号( $v_{Probe} - v_{Pump2}$ 满足相位匹配条件)沿保偏光纤的快轴(y偏振)注入保偏光纤,被BDG反射并形成反射光,最后通过可调节滤波器滤出,并解调得到BireFS。该方案中BFS与温度、应变呈正相关,BireFS与温度呈负相关而与应变呈正相关,相差较大的温度和应变系数使得分辨率也随之提高。此外,值得一提的是,BireFS的温度和应变系数分别是BFS的50倍和20倍<sup>[40]</sup>,因此其具有更高的传感灵敏度。显而易见,基于熊猫型保偏光纤作为传感光纤进行双参量同时测量的方案使测量系统略显复杂。



PC: polarization controller; EOM: electrooptic modulator; PBS: polarization beam splitter; C: circulator; PD: photodetector; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; ESA: electrical spectrum analyzer; FBG: fiber Bragg grating; DAQ: data acquisition

图6 PMF 光纤作为传感光纤的BOTDA实验装置图<sup>[11]</sup>

Fig. 6 BOTDA experimental setup with PMF fiber as a sensing fiber<sup>[11]</sup>

2012年,在文献[10]所述BOTDA系统的基础上,鲍晓毅课题组将LEAF作为传感光纤实现了双参量同时测量<sup>[12]</sup>。图7给出在室温和松弛状态下LEAF光纤的布里渊增益谱(BGS)。该课题组研究

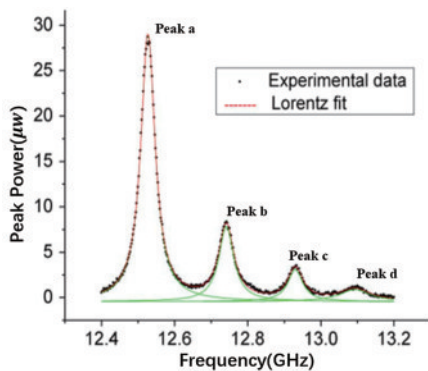


图7 在室温和松弛状态下LEAF的BGS<sup>[12]</sup>

Fig. 7 BGS of LEAF at room temperature and relaxed state<sup>[12]</sup>

了LEAF四个布里渊峰的频移、线宽和峰值功率随温度和应力的变化关系,当温度升高时,四个峰的峰值功率与温度呈非线性关系,所以不适合作为判断依据。最终,利用前两个峰(Peak a, Peak b)的布里渊频移和线宽作为解调依据,在112 m长传感距离上实现了空间分辨率为4 m的双参量同时测量,且温度、应变的测量误差分别为1.8 °C和37 με,大大提高了测量精度。然而,采用LEAF与文献[10]中提及的PCF类似,均存在相邻BGP间隔较小的问题,其温度和应变的分辨能力较差<sup>[41]</sup>。

近年来,FMF引起了研究者的关注<sup>[42-45]</sup>,由于其存在多个独立空间光波模式(LP<sub>01</sub>、LP<sub>11</sub>、LP<sub>02</sub>等),且各光波模式对外界环境参量的灵敏度具有差异性,通过标定不同空间光波模式下各参量变化的系数传输矩阵,即可实现双参量的同时测量。2015年,美国墨尔本大学的Li课题组在BOTDA系

统中利用 3 km 的 FMF 实现了温度与应变的同时测量<sup>[13]</sup>,其空间分辨率为 2.5 m,温度和应变的精度分别为 1.2 °C 和 21.9  $\mu\epsilon$ 。与标准单模光纤不同的是,FMF 在任意空间模式或模式对中都可以发生布里渊散射(模内布里渊散射和模间布里渊散射)<sup>[42-43]</sup>。图 8 给出模式发射器(ML)装置图及其调制得到的

相位模式和对应的空间模式;图 9 给出该方案的实验装置,ML1 和 ML2 将光信号的模式调制为不同空间模式,并使调制信号从 FMF 的两端同时注入,然后通过相干检测和 DSP 算法分别解调出  $L_{01}$  和  $L_{11}$  模式下的 BFS,并对温度和应变系数进行定标,最终计算出温度和应变信息。

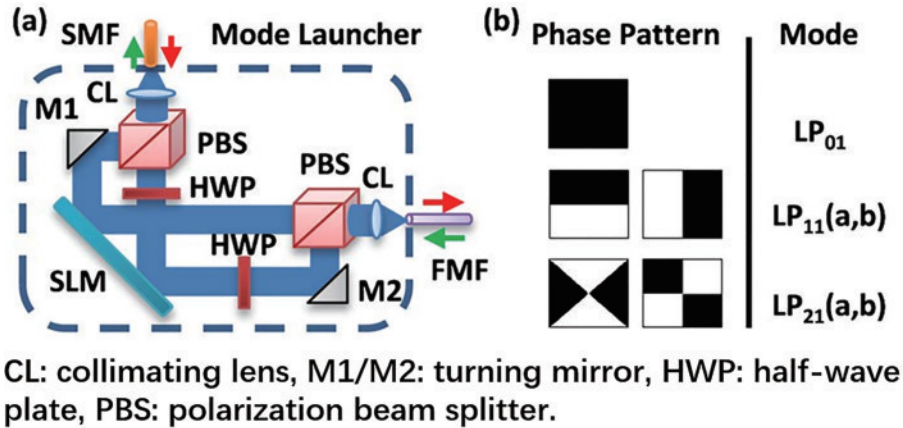


图 8 模式发射器工作原理图<sup>[13]</sup>。(a)自由空间模式发射器示意图; (b) SLM 相位模式及其对应的空间模式  
Fig. 8 Principle diagrams of mode launchers<sup>[13]</sup>. (a) Schematic diagram of a free-space mode launcher; (b) SLM phase patterns and the corresponding spatial modes

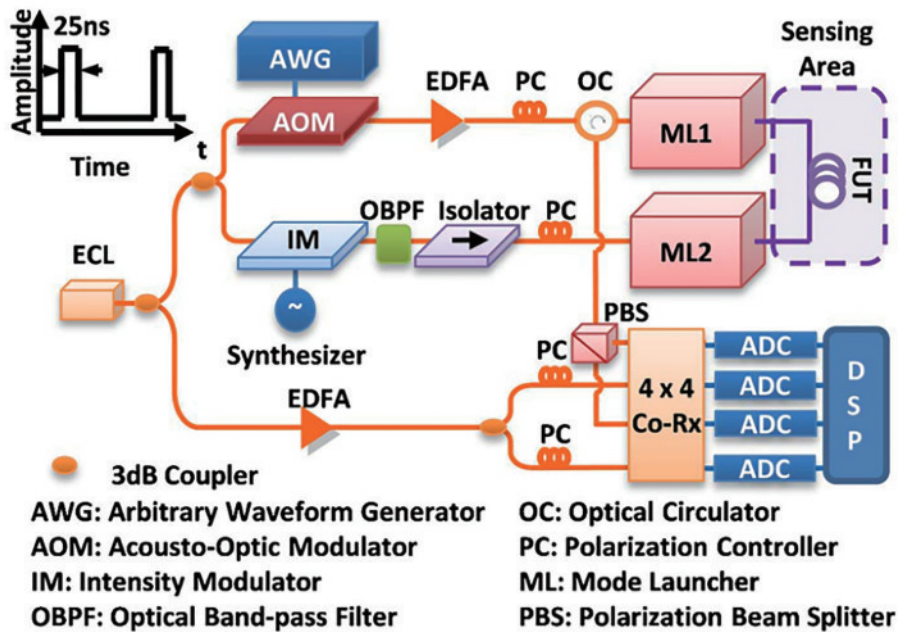


图 9 基于 BOTDA 技术的 FMF 多参数传感器实验装置图<sup>[13]</sup>  
Fig. 9 Experimental setup for the FMF multi-parameter sensor based on BOTDA technique<sup>[13]</sup>

尽管利用 FMF 的多种空间光波模式解决交叉敏感问题,可以避免 BGP 之间的相互串扰,且增加了温度和应变的测量范围,但是不同的空间模式在同一纤芯中传输,会使得温度、应变系数区分度较小,影响其测量分辨率。相比于单模光纤,FMF 基

模的模场面积大得多,所以弯曲造成的布里渊频移会更加明显,从而导致测量误差增大<sup>[46]</sup>。

东京工业大学 Mizuno 课题组<sup>[47]</sup>提出利用 MCF 来实现双参量的同时测量,该光纤在同一包层中有多个独立纤芯,通过不同的纤芯可以进行多路光信

号的同时传输,提高了信息的传输效率。MCF 中纤芯之间是相互分离的,且每个纤芯的传输特性可以与标准单模光纤相媲美<sup>[48-49]</sup>,通过测量不同纤芯的 BFS 定标温度和应变系数,系数之间较大的差异有效提升了双参量测量的分辨能力。2018 年匹兹堡大学 Zaghoul 等<sup>[14]</sup>在 BOTDA 系统中利用双芯光纤在 20 m 的传感距离上实现了 1 m 空间分辨率的测量,且温度、应变的平均误差分别为 0.24% 和

3.7%。图 10 给出双芯光纤的横截面图以及不同纤芯所测的 BGS。2020 年,加拿大渥太华大学 Wang 等<sup>[50]</sup>利用纤芯直径为 2 μm,长为 50 cm 的锥形双芯 As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>-PMMA 光纤进行双参量测量实验。该光纤结构的不对称性,使得在两个主偏振轴上所测得的温度和应变系数存在差异,因此可以对二者进行区分,最终所测温度和应变的最大误差为 1 °C 和 33 με。

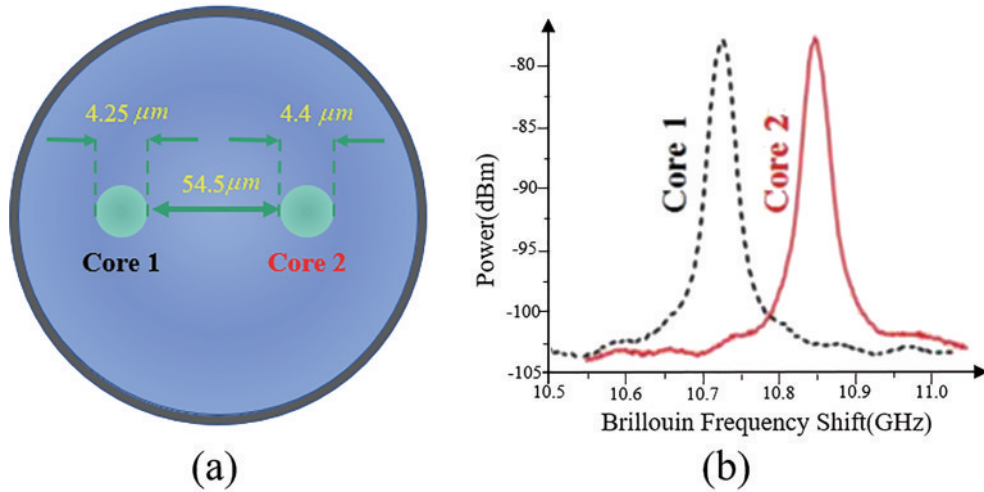


图 10 双芯光纤的横截面图和频移特性<sup>[14]</sup>。(a)双芯光纤的横截面图; (b)所测芯 1 和芯 2 的频移  
Fig. 10 Cross-section of dual-core optical fiber and frequency shifts of cores 1 and 2<sup>[14]</sup>. (a) Cross-section of dual-core optical fiber; (b) measured frequency shifts of cores 1 and 2

然而 MCF 光纤中纤芯的不对称性结构会导致其 BFS 对光纤的弯曲更加敏感<sup>[51]</sup>,为此 Zhao 等<sup>[52-54]</sup>对两个非中心对称纤芯的 BFS 进行平均处理,以消除因弯曲引起的 BFS 偏移所带来的影响。

本节基于 BOTDA 传感技术,主要阐述了利用 5 种特种光纤即 PCF、PMF、LEAF、FMF 和 MCF 解决交叉敏感问题的方法。该技术利用特种光纤特有的折射率和结构分布等特点,通过标定不同参量变化下温度和应变的系数传输矩阵解调温度、应变信息。特种光纤对于交叉敏感问题的解决尤为重要,并且特种光纤的应用正向着功能多样化方向发展,为分布式光纤传感领域的发展提供了更多途径。然而特种光纤前期的研究和制备成本较高,且连接耦合较为困难,因此特种光纤在实际应用中较难普及。

### 3.5 双波长传感解调法

2017 年,坎帕尼亚大学 Minardo 等<sup>[15]</sup>在低弯曲损耗石英传感光纤中,利用两种工作波长(1550 nm、850 nm)进行双参量同时传感。与工作波长为 1550 nm 的 BOTDA 系统相比,工作波

长为 850 nm 的系统因其传感光纤中光波模式的有效面积较小,其布里渊增益较高,对温度和应变的敏感度也随之增加<sup>[55]</sup>。该方案的原理是在不同的工作波长下对传感光纤进行测量,由于两个波长下 BFS 的灵敏度具有差异性,因此可以有效地区分温度和应变信息。BFS 与温度和应变的关系可表示为

$$\begin{cases} \nu_{\text{BFS}, 1550}^{0^\circ\text{C}} = \nu_{\text{BFS}, 1550}^{0^\circ\text{C}} + C_{1550}^T T + C_{1550}^\epsilon \epsilon \\ \nu_{\text{BFS}, 850}^{0\mu\epsilon} = \nu_{\text{BFS}, 850}^{0\mu\epsilon} + C_{850}^T T + C_{850}^\epsilon \epsilon \end{cases}, \quad (7)$$

式中  $C_{1550}^T$ 、 $C_{850}^T$  ( $C_{1550}^\epsilon$ 、 $C_{850}^\epsilon$ ) 为不同工作波长下的温度(应力)变化系数,  $\nu_{\text{BFS}, 1550}^{0^\circ\text{C}}$ 、 $\nu_{\text{BFS}, 850}^{0\mu\epsilon}$  分别为不同工作波长在 0 °C 和 0 με 状态下的频移量。

该方案的实验装置如图 11(a)所示,装置中使用两个 850 nm/1550 nm 波分复用器(WDM)将两套独立的 BOTDA 系统与传感光纤进行连接;图 11(b)清晰地呈现了温度和应变信息的测量结果。实验中使用长度为 100 m 的光纤验证了方案的可行性,实现了空间分辨率为 1 m,测量精度分别为 4.4 °C 和 99 με 的分布式双参量测量。在该方案中



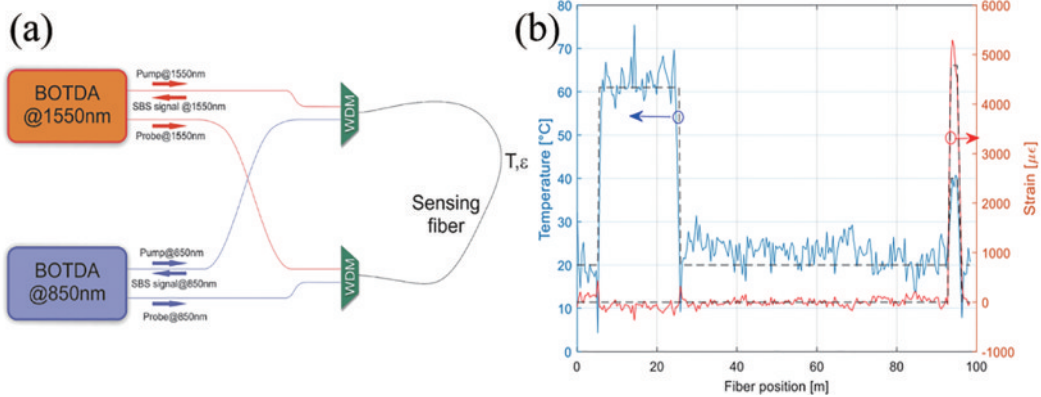


图 11 基于双波长传感解调法的实验装置和结果<sup>[15]</sup>。(a) 双波长 BOTDA 测量实验装置图；(b) 温度 (蓝线) 和应变 (红线) 测量结果图

Fig. 11 Experimental set-up and results based on dual wavelength sensing demodulation method<sup>[15]</sup>. (a) Experimental set-up used for dual wavelength BOTDA measurements; (b) temperature (blue line) and strain (red line) profile reconstructions

850 nm 工作波长下的光纤损耗较大, 导致系统的信噪比较低, 进而限制了光纤的传感距离。通过以下两种方案可以提高测量精度: 1) 提高 850 nm 工作模式下的注入光功率以补偿传播过程中的损耗; 2) 使用 BFS 对监测环境变化更加敏感的特种光纤。

### 3.6 拉曼/瑞利散射辅助解调法

2006 年, 加拿大纽布伦斯威克大学的 Brown 等<sup>[56]</sup>首次结合布里渊时域分析技术和自发拉曼散射技术完成双参量同时传感, 由于后者对应变不敏感而对温度敏感, 因此先通过分布式拉曼传感器获取温度信息, 然后再结合分布式布里渊传感器解调应变信息。实验中在 280 m 的传感光纤上实现了 1.5 m 空间分辨率的测量, 且温度和应变精度分别

为 1 °C 和 50 με。与文献[57]中所述方法相比, 虽然该方案提高了测量精度, 但是使用两套单独的测量系统增加了测量时间成本, 提高了装置复杂度。

近年来, 脉冲编码技术的发展克服了单脉冲拉曼分布式温度传感系统和布里渊时域分析系统中传感距离与测量精度之间的相互限制, 以及两个系统之间由于光源差异带来的制约, 并且提高了拉曼反斯托克斯信号和 BFS 测量的精度。2013 年, 意大利 Taki 等<sup>[16]</sup>首次提出循环脉冲编码和单脉冲混合拉曼/布里渊光时域分析分布式光纤传感器的方案, 在 10 km 长的传感光纤上实现了米量级空间分辨率的双参量同时传感, 且温度和应变的测量分辨率分别为 3.4 °C 和 80 με。其实验装置如图 12 所示,

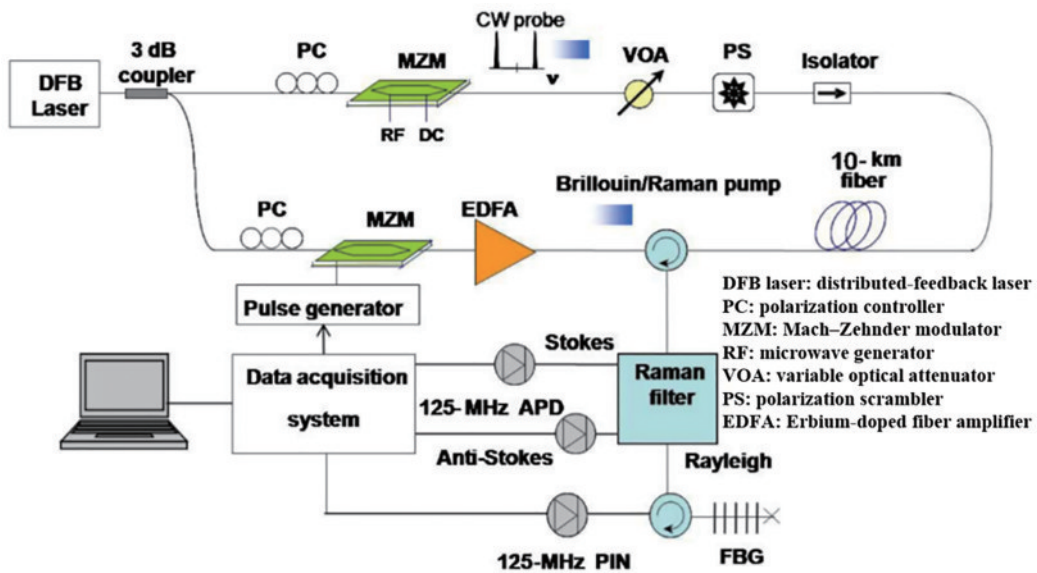
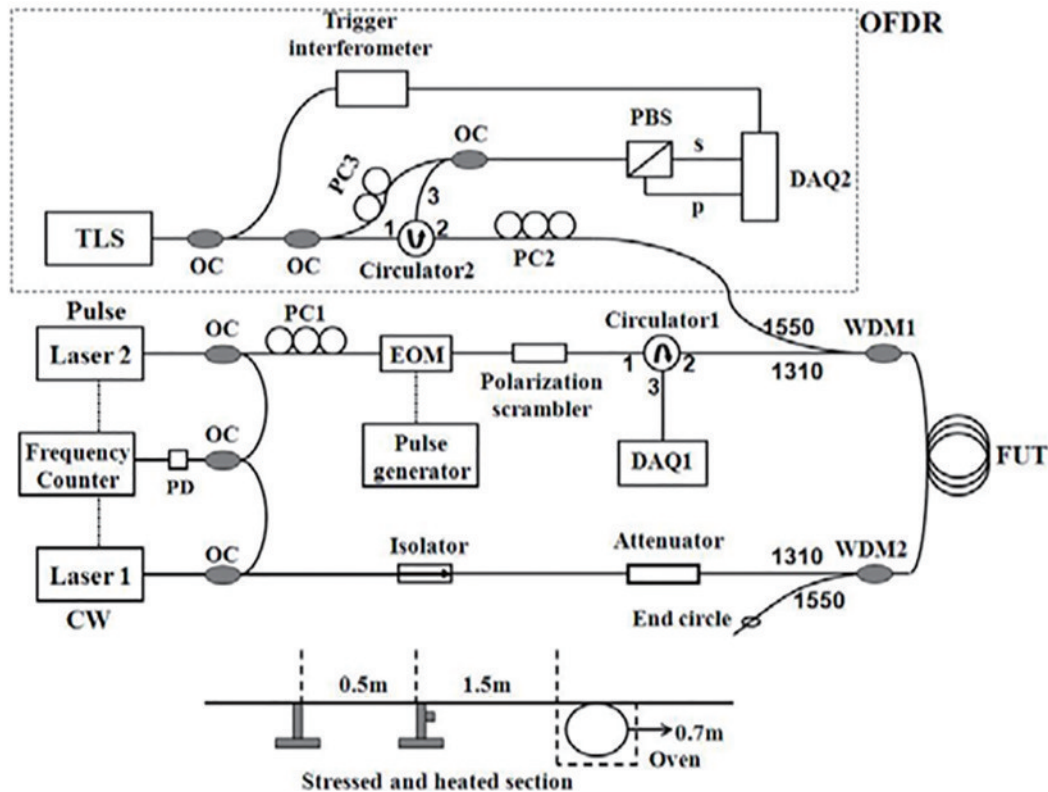


图 12 拉曼/布里渊混合光时域分析分布式光纤传感装置图<sup>[16]</sup>

Fig. 12 Experimental setup of hybrid Raman/Brillouin optical time domain analysis distributed optical fiber sensors<sup>[16]</sup>

使用窄线宽激光源同时产生了布里渊泵浦信号、拉曼泵浦信号以及布里渊探测信号。图中使用光耦合器将窄线宽激光源的输出分为两个分支。在下分支(拉曼/布里渊泵浦信号)中,使用可编程波形发生器(WFG)控制马赫-曾德尔调制器,用于产生 511 bit 循环单工码,并将该码作为拉曼/布里渊泵浦信号入射到传感光纤中。在上分支(布里渊探测信号)中,利用 MZM 调制生成双边带探测信号,并通过频率扫描与泵浦信号相互作用获取 BGS。在图 12 所示的信号采集部分,信号通过拉曼滤波器将拉曼斯托克斯、拉曼反斯托克斯以及瑞利信号分离,然后利用光纤光栅滤出布里渊斯托克斯信号。最终,对拉曼斯托克斯/反斯托克斯信号、布里渊增益谱进行解调分别获取温度和应变信息。该方案中脉冲编码技术为温度和应变同时传感提供了高度集成的解决方案。

2013 年,大连理工大学 Zhou 等<sup>[17]</sup>结合受激布里渊散射和瑞利散射技术,在 92 m 的传感距离上实现了空间分辨率为 50 cm,温度和应变的测量精度分别为 1.2 °C 和 15 με 的双参量测量。该方案的实验装置如图 13 所示,将差分脉冲对布里渊光学时域分析(DPP-BOTDA)系统<sup>[38-39]</sup>和光频域反射(OFDR)系统利用 1310 nm/1550 nm 波分复用器结合在一起,测量过程中,先利用 DPP-BOTDA 系统完成 BFS 的测量,然后通过 OFDR 系统进行瑞利背向散射光谱频移量(RBSS)的测量<sup>[58-62]</sup>。最终,通过定标温度和应变的系数矩阵解调温度和应变信息。在 OFDR 系统中,由于瑞利散射信号的偏振态在光纤沿线不断变化,因此采用偏振分集接收的技术可以消除其对测量结果的影响<sup>[60]</sup>。该方案利用 OFDR 技术可以获得较高的空间分辨率且测量时间较快,但其测量距离有限。



OFDR: optical frequency-domain reflectometry; TLS: tunable laser source; DAQ: data acquisition; EOM: electro-optic modulator; OC: optical coupler; PC: polarization controller; PD: photodetector; PBS: polarization beam splitter; WDM: wavelength division multiplexer; FUT: fiber under test. Bottom inset shows the sensing fiber section, where a 0.5 m long fiber could be applied axial strain by attaching the fiber on the translation stage, and a 0.7 m section is placed in the oven for varying temperature; the two sections are separated by about 1.5 m.

图 13 瑞利/布里渊混合分布式光纤传感装置图<sup>[17]</sup>

Fig. 13 Experimental setup of Rayleigh/Brillouin hybrid distributed optical fiber sensing<sup>[17]</sup>

### 3.7 神经网络解调算法

目前,人工智能的发展为复杂的数据运算和信息处理提供了强大的工具。神经网络在光纤传感领域中也得到了广泛的应用<sup>[63-64]</sup>,在不增加硬件成本的前提下,有效提高了光纤传感的测量精度和监测效率。2016年,香港理工大学 Azad 等<sup>[65]</sup>利用人工神经网络(ANN)从被测光纤沿线的BGS中提取温度信息,并将ANN与洛伦兹曲线拟合和互相关法进行了性能比较,结果表明利用ANN处理光纤传感中的数据具有更高的测量精度和监测效率。

2018年,西班牙坎塔布里亚大学 Ruiz-Lombera 等<sup>[18]</sup>在BOTDA系统中使用ANN进行数据处理和信息识别,在单模光纤上实现了分布式温度和应变的同时测量。首先,对获取的BGS信息进行归一化处理,并且利用空间滤波进行数据处理来提高BFS的精度;然后通过洛伦兹-高斯拟合、主要成分分析(PCA)技术提高系统性能。图14给出该方案的两个处理阶段,图14(a)是在离线状态下进行预处理和ANN参数的定义及设置,即训练阶段;训练步骤完成后,将进行如图14(b)所示的双参量实时测

试,即进入测试阶段。虽然利用神经网络解决交叉敏感的方案获得的温度和应变分辨率较低,但是实验证明了该方案的可行性。

2018年,香港理工大学 Wang 等<sup>[19,66]</sup>提出了使用深度神经网络(DNN)技术同时测量温度和应变的方案,与传统解调方式不同的是其没有通过曲线拟合来获取布里渊谱的BFS,而是利用DNN来解调LEAF的布里渊双峰与温度和应变的关系。在24 km长的LEAF中实现了2 m空间分辨率的测量,且测得温度/应变的均方根误差(RMSE)和标准偏差(SD)分别提高到4.2 °C/134.2 με和2.4 °C/66.2 με。

如图15所示,DNN模型中包含输入层(I)、隐藏层(H1和H2)以及输出层(O)。图中输入层中包含226个元素组成的双峰BGS数据输入向量 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{226})$ , $\mathbf{X}$ 中元素个数等于BOTDA系统中扫描的频率数量。输出层中包含两个元素( $y_1, y_2$ ),分别对应温度和应变信息。DNN的应用主要分为两个阶段:训练阶段和测试阶段。由于LEAF双峰

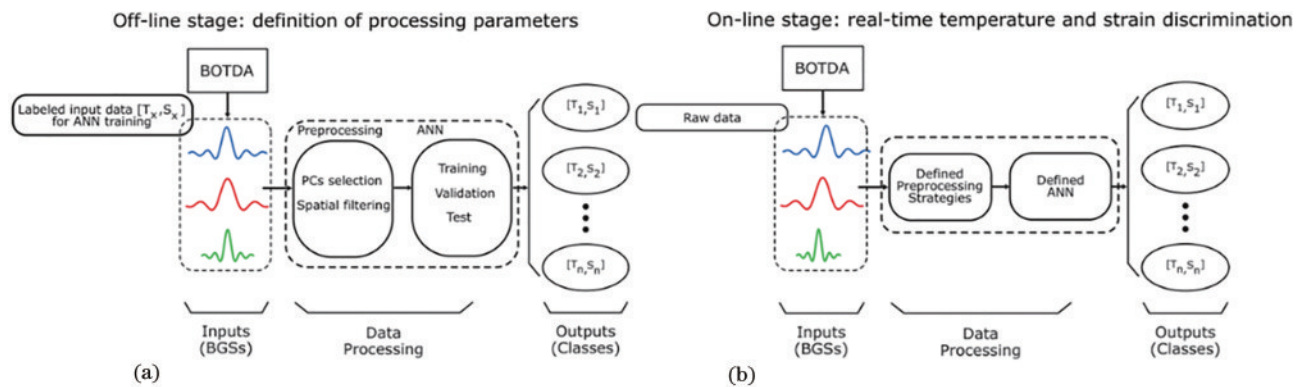


图14 基于神经网络解调算法的方案原理图<sup>[18]</sup>。(a)离线阶段:预处理、ANN参数以及结构的定义过程;(b)在线阶段:实时温度和应变信息的判别

Fig. 14 Schematic diagram of the proposed solution based on ANN<sup>[18]</sup>. (a) Off-line stage: definition of pre-processing and ANN parameters and architecture; (b) online stage: real-time temperature-strain discrimination

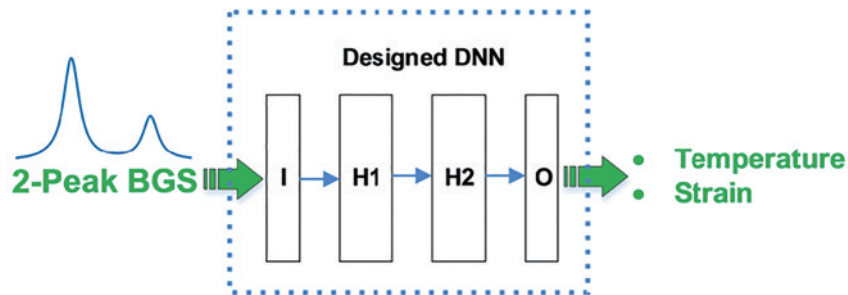


图15 基于DNN从LEAF的双峰BGS中同时测量温度和应变原理图<sup>[19]</sup>

Fig. 15 Principle of using DNN for simultaneous temperature and strain measurement from double-peak BGS in LEAF<sup>[19]</sup>

布里渊增益谱的 BFSs 与温度和应变呈不同的线性关系,经过训练阶段,DNN 可以直接从输入的双峰 BGS 中提取温度和应变信息。图 16 给出实验测量结果和 BFS- $T$  或 BFS- $\epsilon$  关系曲线。实验结果证明,相较于传统的解调方法,基于 DNN 方法的测量精

度至少提高了 5 倍,处理时间缩短了 3 个数量级。虽然利用神经网络进行数据处理的实时效率较高,但是在测量前期不仅需要制作大量的仿真和实验数据集,还需对其进行训练。

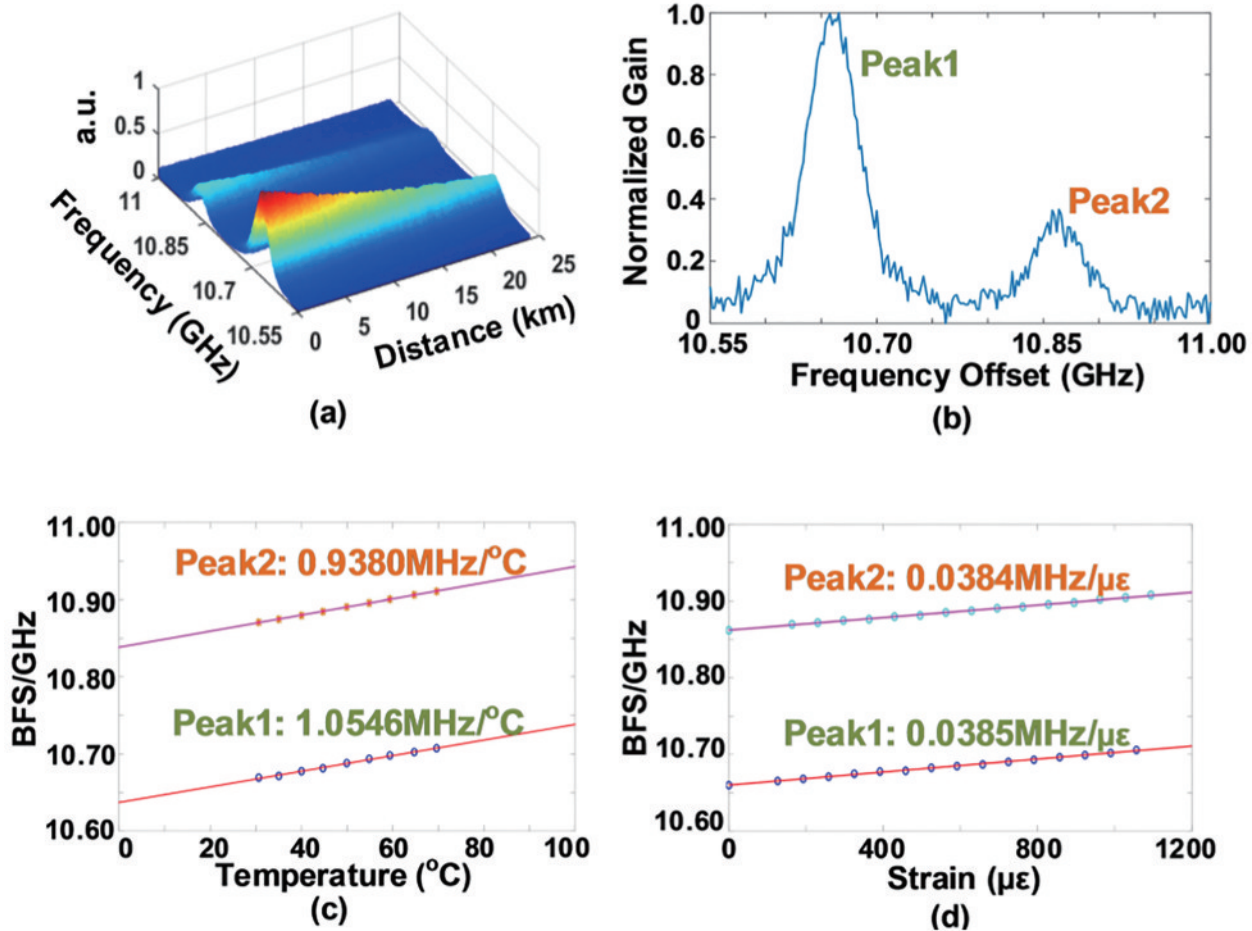


图 16 基于深度神经网络算法的实验结果<sup>[19]</sup>。(a)沿 LEAF 传感光纤测得的 BGS 图;(b)在室温 23.5 °C 和 0  $\mu\epsilon$  下 LEAF 双峰 BGS;(c)峰 1 和峰 2 的 BFS 与温度线性关系图;(d)峰 1 和峰 2 的 BFS 与应变线性关系图

Fig. 16 Experimental results based on deep neural network algorithm<sup>[19]</sup>. (a) Measured BGS distributed along LEAF sensing fiber; (b) measured double-peak BGS of LEAF under room temperature of 23.5 °C and stain of 0  $\mu\epsilon$ ; (c) measured BFS-temperature relations for Peak1 and Peak2; (d) measured BFS-strain relations for Peak1 and Peak2

#### 4 发展历程总结

解决基于 BOTDA 的分布式光纤传感器的温度和应变交叉敏感问题的技术是光纤传感实用化的关键技术之一。首次解决 BOTDA 交叉敏感问题的方法是放置参考光纤,但该方法受环境因素的影响较大,且需耗费成倍长度的光纤。随着光纤制造业的发展,特种光纤由于具有特有的性质被用于解决双参量交叉敏感问题。虽然通过双芯光纤、少模光纤以及保偏光纤等特种光纤在不改变 BOTDA

装置的前提下较好地实现了温度和应变的同时测量,但是特种光纤因其较高的制备成本,在工程应用中不能广泛应用。此外,将 BOTDA 系统与 FBG、R-DTS 和 OFDR 等其他光纤传感技术结合来解调温度和应变变化时,系统测量耗时较长。目前随着人工智能的发展,人工神经网络等算法用于 BOTDA 双参量测量时,前期大量数据的训练,使得系统在不增加硬件成本的同时,有效提高了光纤传感的测量精度和监测效率。表 1 显示了各方案的测量原理、测量结果以及优势与不足。

表 1 各方案原理与性能特点

Table 1 Principles and performance characteristics of each program

Principle of demodulation scheme		Advantage	Disadvantage
Remove the BFS of the reference fiber from the measured fiber <sup>[6]</sup>		Firstly realize the $T$ and $\epsilon$ dual-parameter measurement	1) Extra fiber length and measured time; 2) Measurement errors caused by differences of the fiber length and environments
Combine BOTDA and FBG <sup>[7]</sup>		Reduce experiment costs and raise measurement efficiency	Cannot realize DFOS*
Use BFS and power value of BGS for demodulation <sup>[9]</sup>		Only use BOTDA system to measure a single fiber	BGS peak power fluctuation reduces measurement accuracy
Special fiber	(PCF) Use multi-peak BGS frequency shift <sup>[10]</sup>	Use the BFS of different peaks to obtain $T$ and $\epsilon$ factor	Adjacent BGPs crosstalk limits the measurement range
	(PMF) Combine BOTDA and BDG to obtain BFS and BireFS <sup>[11]</sup>	Improved resolution and sensing sensitivity	Complex system
	(LEAF) Use the linewidth and peak power of multi-peak BGS <sup>[12]</sup>	Higher measurement accuracy than PCF fiber	Adjacent BGPs crosstalk limits the measurement range
	(FMF) Measure BFS in different spatial modes <sup>[13]</sup>	Avoid crosstalk of BGPs; increase the measurement range	1) Sensitive to fiber bending; 2) Lower measurement resolution
	(MCF) Measure the BFS of different cores <sup>[14]</sup>	Multiple distributed sensing; higher measurement	Sensitive to fiber bending
Measure BFS of different working wavelengths <sup>[15]</sup>		Base on operating wavelength differences	Larger loss in 850 nm working mode
Raman/ Rayleigh scattering assisted	Hybrid BOTDA/R-DTS scheme <sup>[16]</sup> based on coding technology	Eliminate the constraints caused by different light sources between the two systems	Complex system
	Combine BOTDA and OFDR to obtain BFS and RBSS <sup>[17]</sup>	Higher spatial resolution and measurement efficiency of OFDR	High cost and low efficiency of the system
Use DNN technology for demodulation <sup>[19]</sup>		Higher measurement accuracy and faster demodulation speed	Large amounts of the experiment and simulation data before testing

\*DFOS: Distributed optical fiber sensing.

## 5 结 论

近年来,基于 BOTDA 系统的温度应变同时传感的研究已成为光纤传感领域的研究热点,也是分布式光纤传感技术中最具潜力的发展方向之一。对基于 BOTDA 系统的温度和应变同时传感的多种方案进行了深入分析比较与总结,各研究团队进行了大量的理论论证和实验研究,研究结果表明:早期参考光纤法和多参量解调法由于其测量精度较低已逐渐被淘汰;基于其他光纤传感技术辅助的 BOTDA 系统在解决交叉敏感问题时,传感系统较为复杂,检测成本较高;随着光纤制造业的发展,利用特种光纤(LEAF、PCF、MCF 等)的独有特性进

行解调的方案逐渐丰富;目前人工智能得到快速发展,神经网络逐步用于解决交叉敏感问题,这将是光纤传感技术领域中解决交叉敏感问题的一个重要研究和发展方向。综上所述,随着各种技术的不断突破,基于 BOTDA 系统温度应变双参量传感技术将向着实用化、工程化发展,在现代化工业领域的健康监测中有着广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] Adachi S. Distributed optical fiber sensors and their applications[C]//2008 SICE Annual Conference, August 20-22, 2008, Chofu, Japan. New York: IEEE Press, 2008: 329-333.

- [2] Ren L, Jiang T, Jia Z G, et al. Pipeline corrosion and leakage monitoring based on the distributed optical fiber sensing technology[J]. *Measurement*, 2018, 122: 57-65.
- [3] Zhang X P, Wu J L, Shan Y Y, et al. On-line monitoring of power transmission lines in smart grid based on distributed optical fiber sensing technology [J]. *Optoelectronic Technology*, 2017, 37(4): 221-229. 张旭苹, 武剑灵, 单媛媛, 等. 基于分布式光纤传感技术的智能电网输电线路在线监测[J]. *光电子技术*, 2017, 37(4): 221-229.
- [4] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing[J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 78: 81-103.
- [5] Barrias A, Casas J R, Villalba S. A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications[J]. *Sensors*, 2016, 16(5): E748.
- [6] Bao X, Webb D J, Jackson D A. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(2): 141-143.
- [7] Davis M A, Kersey A D. Simultaneous measurement of temperature and strain using fiber Bragg gratings and Brillouin scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 1996, 2838: 114-123.
- [8] Posey R, Vohra S T. An eight-channel fiber-optic Bragg grating and stimulated Brillouin sensor system for simultaneous temperature and strain measurements [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1999, 11 (12): 1641-1643.
- [9] Smith J, Brown A, DeMerchant M, et al. Simultaneous distributed strain and temperature measurement[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(25): 5372-5377.
- [10] Zou L F, Bao X Y, Shahaam A V, 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.
- [11] Dong Y K, Chen L, Bao X Y. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(18): 1364-1366.
- [12] Liu X, Bao X Y. Brillouin spectrum in LEAF and simultaneous temperature and strain measurement[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1053-1059.
- [13] Li A, Wang Y, Fang J, et al. Few-mode fiber multi-parameter sensor with distributed temperature and strain discrimination[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7): 1488-1491.
- [14] Zaghloul M A S, Wang M H, Milione G, et al. Discrimination of temperature and strain in Brillouin optical time domain analysis using a multicore optical fiber[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): E1176.
- [15] Minardo A, Coscetta A, Catalano E, et al. Simultaneous strain and temperature measurements by dual wavelength Brillouin sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(12): 3714-3719.
- [16] Taki M, Signorini A, Oton C J, et al. Hybrid Raman/Brillouin-optical-time-domain-analysis-distributed optical fiber sensors based on cyclic pulse coding[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(20): 4162-4165.
- [17] Zhou D P, Li W, Chen L, et al. Distributed temperature and strain discrimination with stimulated Brillouin scattering and Rayleigh backscatter in an optical fiber[J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 1836-1845.
- [18] Ruiz-Lombera R, Fuentes A, Rodriguez-Cobo L, et al. Simultaneous temperature and strain discrimination in a conventional BOTDA via artificial neural networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(11): 2114-2121.
- [19] Wang B W, Wang L, Yu C Y, et al. Simultaneous temperature and strain measurement using deep neural networks for BOTDA sensing system[C]// *Optical Fiber Communication Conference 2018*, March 11-15, 2018, San Diego, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2018: Th2A.66.
- [20] 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.
- [21] Boyd R W. *Nonlinear optics*[M]. New York: Academic Press, 2007.
- [22] 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.
- [23] Agrawal G P. *Nonlinear fiber optics*[M]//Christiansen P L, Sørensen M P, Scott A C. *Nonlinear science at the dawn of the 21st century*. Heidelberg: Springer, 2000: 195-211.
- [24] Zhang X P. Fully distributed optical fiber sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2013: 224-227. 张旭苹. 全分布式光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版

- 社, 2013: 224-227.
- [25] Zrelli A. Simultaneous monitoring of temperature, pressure, and strain through Brillouin sensors and a hybrid BOTDA/FBG for disasters detection systems [J]. *IET Communications*, 2019, 13(18): 3012-3019.
- [26] Ding P, Dong X P, Ye X W. Research on measurement of fiber Bragg grating considering the cross-sensitivity of temperature and strain[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(2): 020605.  
丁朋, 董小鹏, 叶肖伟. 考虑温度和应变交叉敏感的光纤布拉格光栅测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(2): 020605.
- [27] Sun S Q, Chu F H, Lu J Y. Progress in cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040006.  
孙诗晴, 初凤红, 卢家焱. 光纤布拉格光栅传感器交叉敏感问题的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(4): 040006.
- [28] Bao X Y, Smith J, Brown A W. Temperature and strain measurements using the power, line-width, shape, and frequency shift of the Brillouin loss spectrum[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4920: 311-322.
- [29] Parker T R, Farhadiroushan M, Handerek V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1997, 22(11): 787-789.
- [30] Wang T Y. Special optical fiber and optical fiber communication[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2016: 2-9.  
王廷云. 特种光纤与光纤通信[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2016: 2-9.
- [31] Zeng X D, Bao X Y, Chhoa C Y, et al. Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(24): 5105-5114.
- [32] Russell P. Photonic crystal fibers[J]. *Science*, 2003, 299(5605): 358-362.
- [33] Zou L F, Bao X Y, Chen L. Brillouin scattering spectrum in photonic crystal fiber with a partially germanium-doped core[J]. *Optics Letters*, 2003, 28(21): 2022-2024.
- [34] Zou L F, Bao X Y, Chen L. Distributed Brillouin temperature sensing in photonic crystal fiber[J]. *Smart Materials and Structures*, 2005, 14(3): S8-S11.
- [35] Li J H, Pei L, Wang J S, et al. Temperature and magnetic field sensor based on photonic crystal fiber and surface plasmon resonance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(2): 0210002.  
李佳欢, 裴丽, 王建帅, 等. 基于光子晶体光纤表面等离子体共振的温度和磁场双参量传感器[J]. *中国激光*, 2019, 46(2): 0210002.
- [36] Li Z L, Yan L S, Zhang X P, et al. Temperature and strain discrimination in BOTDA fiber sensor by utilizing dispersion compensating fiber[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(17): 7100-7105.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] Dong Y K, Bao X Y, Li W H. Differential Brillouin gain for improving the temperature accuracy and spatial resolution in a long-distance distributed fiber sensor[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(22): 4297-4301.
- [40] Dong Y K, Zhou D W, Teng L, et al. Principle of Brillouin dynamic grating and its applications in optical fiber sensing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(7): 075201.  
董永康, 周登望, 滕雷, 等. 布里渊动态光栅原理及其在光纤传感中的应用[J]. *物理学报*, 2017, 66(7): 075201.
- [41] Xu Y P, Ren M Q, Lu Y, et al. Multi-parameter sensor based on stimulated Brillouin scattering in inverse-parabolic graded-index fiber[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(6): 1138-1141.
- [42] Song K Y, Kim Y H, Kim B Y. Intermodal stimulated Brillouin scattering in two-mode fibers[J]. *Optics Letters*, 2013, 38(11): 1805-1807.
- [43] Li A, Hu Q, Shieh W. Characterization of stimulated Brillouin scattering in a circular-core two-mode fiber using optical time-domain analysis[J]. *Optics Express*, 2013, 21(26): 31894-31906.
- [44] Tong Z R, Wang X, Wang Y, et al. Dual-parameter optical fiber sensor based on few-mode fiber and spherical structure[J]. *Optics Communications*, 2017, 405: 60-65.
- [45] Li A, Hu Q, Chen X, et al. Characterization of distributed modal birefringence in a few-mode fiber based on Brillouin dynamic grating[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3153-3156.

- [46] Wu H, Wang R X, Liu D M, et al. Few-mode fiber based distributed curvature sensor through quasi-single-mode Brillouin frequency shift[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1514-1517.
- [47] Mizuno Y, Hayashi N, Tanaka H, et al. Brillouin scattering in multi-core optical fibers for sensing applications[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 11388.
- [48] Li M J, Li S P, Derick J A, et al. Dual core optical fiber for distributed Brillouin fiber sensors[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2014, November 11-14, 2014, Shanghai, China. Washington, D.C.: OSA, 2014: AW4I.3.
- [49] Chen K P, Zaghoul M, Wang M H, et al. Dual-core fiber characterizations for distributed simultaneous temperature and strain measurements using Brillouin optical time domain analysis[C]//Asia Pacific Optical Sensors Conference, Shanghai. Washington, D. C.: OSA, 2016: W4A. 32.
- [50] Wang H Y, Gao S, Baker C, et al. Stimulated Brillouin scattering in a tapered dual-core  $As_2Se_3$ -PMMA fiber for simultaneous temperature and strain sensing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(12): 3301-3304.
- [51] Zhao Z Y, Soto M A, Tang M, et al. Distributed shape sensing using Brillouin scattering in multi-core fibers[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25211-25223.
- [52] Zhao Z Y, Dang Y L, Tang M, et al. Spatial-division multiplexed Brillouin distributed sensing based on a heterogeneous multicore fiber[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(1): 171-174.
- [53] Yuan L B. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17): 170612.  
苑立波. 多芯光纤特性及其传感应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17): 170612.
- [54] Xu X N, Chen Y J. Curvature sensing measurement based on seven-core fiber and few-mode fiber splicing structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0306001.  
许西宁, 陈雍君. 基于七芯光纤和少模光纤拼接结构的曲率传感测量[J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0306001.
- [55] Minardo A, Coscetta A, Bernini R, et al. Brillouin optical time domain analysis in silica fibers at 850-nm wavelength[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(22): 2577-2580.
- [56] Brown K A, Brown A W, Colpitts B G. Combined Raman and Brillouin scattering sensor for simultaneous high-resolution measurement of temperature and strain[J]. *Proceedings of SPIE*, 2006, 6167: 616716.
- [57] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. Simultaneous distributed measurements of temperature and strain using spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5502: 488-491.
- [58] Glombitza U, Brinkmeyer E. Coherent frequency-domain reflectometry for characterization of single-mode integrated-optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1993, 11(8): 1377-1384.
- [59] Froggatt M, Moore J. High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1735-1740.
- [60] Soller B J, Wolfe M, Froggatt M E. Polarization resolved measurement of Rayleigh backscatter in fiber-optic components[C]//National Fiber Optic Engineers Conference 2005, March 6, 2005, Anaheim, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2005: NWD3.
- [61] Soller B J, Gifford D K, Wolfe M S, et al. High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies[J]. *Optics Express*, 2005, 13(2): 666-674.
- [62] Froggatt M E, Gifford D K, Kreger S, et al. Characterization of polarization-maintaining fiber using high-sensitivity optical-frequency-domain reflectometry [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, 24(11): 4149-4154.
- [63] Liu Y Z, Jiang Z Q, Ma F, et al. Hyperspectral image classification based on hypergraph and convolutional neural network[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(11): 111007.  
刘玉珍, 蒋政权, 马飞, 等. 基于超图和卷积神经网络的高光谱图像分类[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(11): 111007.
- [64] Kong F Q, Zhou Y B, Shen Q, et al. End-to-end multispectral image compression using convolutional neural network[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(10): 1009001.  
孔繁镛, 周永波, 沈秋, 等. 基于卷积神经网络的端到端多光谱图像压缩方法[J]. *中国激光*, 2019, 46(10): 1009001.
- [65] Azad A K, Wang L, Guo N, et al. Signal processing using artificial neural network for BOTDA sensor system[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): 6769-6782.
- [66] Wang B, Wang L, Guo N, et al. Deep neural networks assisted BOTDA for simultaneous temperature and strain measurement with enhanced accuracy[J]. *Optics Express*, 2019, 27(3): 2530-2543.