动态综述

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021.03.001

# 布里渊散射交叉敏感解决方法综述

李永倩[1,2,3]，范海军[1,2,3*]，张立欣[1,2]，王健健[1,2]，王　磊[1,2,3]，刘紫娟[1,2,3]

（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：** 光纤布里渊传感中，本征存在的由温度和应变交叉引起的判断模糊问题，一直是光纤分布式传感领域的研究热点。针对这一问题，总结了四类解决方法：铺设参考光纤、双参量矩阵方程测量、双物理效应结合及特种光纤判别。对每一类解决方法的原理、系统、传感性能及特点进行了分析，并对各种方法进行了讨论、对比与评价。最后总结并展望了解决交叉敏感问题的研究方向。

**关键词：** 光纤传感；布里渊散射；交叉敏感；温度；应变

**中图分类号：** TN253　**文章编号：** 1001－5868(2021)03－0301－07

## Review of Solutions to Cross-Sensitivity of Brillouin Scattering

LI Yongqian[1,2,3], FAN Haijun[1,2,3], ZHANG Lixin[1,2], WANG Jianjian[1,2], WANG Lei[1,2,3], LIU Zijuan[1,2,3]

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

**Abstract:** In fiber Brillouin sensing, the problem of ambiguous judgment caused by intrinsic cross between the temperature and the strain has always been a research hot topic in the field of distributed optical fiber sensing. In response to this problem, four types of solutions are introduced in detail, which are laying reference fiber, two-parameter matrix equation measurement, combination of two physical effects and special fiber discrimination. The principles, system, sensing performance and characteristics of each specific solution are analyzed, and these methods are discussed, compared and evaluated. Finally, it summarizes and looks forward to the research direction of solving cross-sensitivity issues.

**Key words:** optical fiber sensing; Brillouin scattering; cross-sensitivity; temperature; strain

## 0　引言

石英光纤损耗技术的突破，不仅引发了光纤通信领域的革命[1]，也为光纤传感开辟了道路。石英光纤以其损耗小、质量轻、易敷设、价格低、耐腐蚀及抗电磁干扰等优点而备受青睐[2-4]，其传、感一体的特性在传感领域更是独树一帜，因此，在时代潮流的推动下，一系列基于光纤的传感器应际而生。其中，布里渊光纤传感器以其高可靠性、高灵敏度的优点而在土木基础设施的无损检测和结构健康监测中被广泛研究和应用[2-7]。然而，单模光纤(Single Mode Fiber，SMF)的布里渊分布式传感中存在的温度、应变交叉敏感严重影响了传感的精度与判断[8-26]。

本文首先对解决光纤布里渊传感中的交叉敏感问题的研究进展进行综述，并根据不同的机理将研究方案分为四类：铺设参考光纤[8]、双参量矩阵方程

**收稿日期：**2021－01－15.

**基金项目：**国家自然科学基金项目(61775057，51607066)；河北省自然科学基金项目(F2019502112，F2019502177)；中央高校基本科研业务费专项基金项目(2019MS086).

* **通信作者：**范海军

测量[9-19]、双物理效应结合[20-36]、特种光纤判别[37-51]。最后对各类方案进行了讨论、对比及评价。

## 1 铺设参考光纤

1994 年，Bao 等[8]率先提出解决交叉敏感的方案：在待测场并行铺设两段光纤，其中检测段同时受温度和应变影响，而参考段屏蔽应变的影响。根据 SMF 布里渊散射谱中心频率 $\nu_B$ 对温度和应变的线性依赖关系，以获得的参考段温度为依托，解析出检测段的应变情况，从而获得待测场的温度应变信息。该研究以 22 km 的 SMF 作传感光纤，利用损耗型双端布里渊光时域分析（Brillouin Optical Time Domain Analysis，BOTDA）系统获得的应变分辨率为 20 με，温度分辨率为 2 ℃，空间分辨率达 5 m。尽管该方案为解决交叉敏感问题提供了思路，但是并行铺设参考光纤在实际应用中故障风险和安装难度较高。

## 2 双参量矩阵方程测量

1997 年，Davis 等[9]在分布式布里渊传感中引入准点式传感布拉格光栅（Fiber Bragg Grating，FBG），在不同的波长工作区（泵浦光和探测光工作在 1 319 nm，FBG 工作在 1 550 nm），根据布里渊频移（Brillouin Frequency Shift，BFS）$\Delta\nu_B$ 和布拉格光栅波长 $\lambda_G$ 对温度和应变不同的依赖关系，建立并解析 $\Delta\nu_B$ 和 $\lambda_G$ 对温度和应变的矩阵方程，从而实现温度与应变的测量。该方法获得了 1.9 ℃的温度误差和 22 με 的应变误差，且解决了双光纤分段铺设测量存在的实用性与可靠性问题，但是系统比较复杂。

1997 年，伦敦大学的 Parker 等[10]首次测量了 SMF 中的自发布里渊散射（Spontaneous Brillouin Scattering，SpBS）光功率的应变依赖性，将 SpBS 光功率和 BFS 结合，利用双参量对温度和应变不同的依赖关系，提出了解决交叉敏感问题的新设想，并在 SpBS 系统中加以验证。采用 Landau-Placzek 比值法补偿光纤接头和弯曲损耗，消除了输入功率波动的影响[11]，在 1.2 km 长的 SMF-28 光纤上，得到 100 με 的应变分辨率、4 ℃的温度分辨率和 40 m 的空间分辨率。以相同的原理，南安普顿大学的 Kee 等[12]将级联的马赫-曾德干涉仪滤波器运用到 SpBS 系统中，在 15 km 长的光纤上，将空间分辨率提升到 10 m。尽管空间分辨率有了较大提升，但由于 SpBS 信号较弱，获得的空间分辨率仍然无法满足现代工业监测的需求。

针对前述问题，Smith 等[13]于 1999 年利用双端 BOTDA 系统对保偏光纤（Polarization Maintaining Fiber，PMF）的布里渊损耗峰值功率进行研究，对布里渊功率进行归一化处理，确定了工作条件下的线性归一化功率关系。PMF 可消除 SMF 中各种损耗、功率波动及偏振态对布里渊光功率测量的影响。结合 BFS 与温度和应变的关系，实现了 ±178 με 的应变分辨率，±3.9 ℃的温度分辨率和 3.5 m 的空间分辨率，进一步提升了系统性能。相比斯托克斯（Stokes）和反斯托克斯（Anti-Stokes）功率结合法[10]，布里渊损耗机制能够提供更高的信号功率，因此，空间分辨率获得大幅度提高。

2004 年，Bao 等[14]首次测量出三种 PMF（熊猫型、领结型和老虎型）的布里渊散射频移、功率和带宽的温度、应变系数，并将三种布里渊参数两两组合后进行误差分析，通过比较发现，利用熊猫型 PMF 的布里渊频移与带宽的组合能获得较小的不确定性，并且空间分辨率达到厘米量级。2009 年，东京大学的 Zou 等对熊猫型 PMF 中两个独立的光学参数 BFS 和双折射进行评估，测量了光纤的受激布里渊散射谱和动态声栅的衍射谱，分别得到了应变和温度的独立响应。布里渊频移 $\Delta\nu_B$ 与双折射确定的频差 $f_{yx}$ 对应变和温度变化都具有线性依赖性，且 BFS 和双折射对温度的依赖性相反，这使得温度与应变更加容易区别[15]。在 31 m 的 PMF 上，将应变和温度分辨精度提高至 3 με 和 0.8 ℃。之后，该研究组将空间分辨率提高到 10 cm[16-17]。利用同样的原理，哈尔滨工业大学的董永康等[18-19]用差分脉冲取代矩形脉冲，达到了 0.36 ℃与 8.3 με 的温度和应变分辨精度。但是，PMF 的偏振校准是一大难题，而且该系统相对复杂，PMF 衰减系数较大，无法实现长距离传感。

基于单根光纤的双参量矩阵法，解决了双纤并行铺设固有的实用性及可靠性问题，降低了实施难度。BFS 不仅容易精确获得，而且与温度和应变都有着极好的线性依赖关系，这使其成为光纤布里渊传感中判定温度与应变的一个极其重要的参量，而 FBG 波长 $\lambda_G$ 与 BFS 结合增加了系统的复杂性。由于非本地效应和各种噪声对布里渊强度的影响，测量精度大打折扣。利用 PMF 中的双折射效应可获

得较高的精度，但是偏振校准困难，各种保偏器件造价昂贵，系统成本高，不利于长距离传感。

## 3　双物理效应结合

### 3.1　布里渊传感与瑞利传感结合

2006 年，Yahei 等在相干光时域反射（Coherent Optical Time Domain Reflectometer，COTDR）系统中，利用窄线宽激光脉冲在 SMF 中的瑞利散射受温度和应变调制的特性，实现了连续空间分布式高分辨率测量[20-21]。当光纤局部受到的温度和应变发生波动时，局部折射率会发生变化，进而改变该区域瑞利散射光的干涉图样，最终导致背向散射瑞利光功率改变[22-23]。具有强相干性的瑞利散射光引起的散射曲线可再生、可恢复，通过光频率变化与温度、应变变化分别对瑞利散射图样的影响关系即可得到光纤链路上的待测信息。在 8 km 的 SMF 上，温度分辨率达到 0.01 ℃，应变分辨率达到 89 nε，空间分辨率为 1 m。相比于布里渊散射，瑞利散射功率更高，这使得瑞利信号更容易被获取，利用 COTDR 技术可实现远高于 BOTDA 技术的测量精度。

### 3.2　布里渊传感与拉曼传感结合

1985 年，Hartog 等[24]利用 Anti-Stokes 拉曼信号强度的温敏特性实现了分布式温度传感。在此基础上，Alahbabi 等[25]将布里渊传感与拉曼传感相结合，利用 Anti-Stokes 拉曼强度和布里渊频移进行温度与应变的测量。首先，利用 Anti-Stokes 拉曼强度只对温度敏感的特性获得温度信息；其次，刨除温度对 BFS 的影响，获得应变信息，从而实现温度、应变的测量。在 23 km 的 SMF 上，获得了 6 ℃的温度分辨率、150 με 的应变分辨率和 10 m 的空间分辨率。尽管该系统将瑞利光时域反射（Raman OTDR，ROTDR）和布里渊光时域反射（Brillouin OTDR，BOTDR）相结合，但在 SMF 中 ROTDR 和 BOTDR 所需的输入泵浦功率无法兼容，需要分步测量。

受文献[26]启发，Soto 等首次将含多纵模的法布里-珀罗（Fabry-Perot，FP）激光器与脉冲 Simplex 编码技术运用到 BOTDR 中，并与单纵模的 DFB（Distributed Feedback）激光器进行对比。当发生 SpBS 时，$M$ 个纵模的泵浦光对应产生 $M$ 个纵模的布里渊散射光，且散射光各纵模分量相位之间随机分布，这使得系统有较高的阈值[27-29]，同时信噪比、测量精度和传感距离也进一步提高[30-31]，从而改善传感器的传感性能。之后，在拉曼传感与布里渊传感系统中采用 FP 激光器[32]和光脉冲编码技术[33-35]，传感性能获得进一步提升，但是输入功率不兼容的问题依然存在。

利用相同的原理，2016 年，华中科技大学的唐明课题组[36]在七芯光纤中实现了 ROTDR 和 BOTDR 的结合。七芯光纤的偏芯 BFS 不仅对温度和应变敏感，还对弯曲敏感，而中芯位于光纤几何中性轴，BFS 对弯曲并不敏感，中间芯进行布里渊传感，任一外芯进行拉曼传感，由弯曲引起的 BFS 的不确定性得以充分抑制，严格保证了温度和应变之间的定量区分。此外，多芯光纤（Multicore Fiber，MCF）不同的纤芯 ROTDR 和 BOTDR 的输入功率允许独立控制，SMF 中泵浦功率不兼容的问题得以解决，实现了拉曼和布里渊散射信号的同时测量。在 6 km 的传感范围内，温度和应变分辨率分别为 2.2 ℃和 40 με，空间分辨率为 3 m。

拉曼传感的引入，得益于 Anti-Stokes 拉曼强度对温度的极高灵敏性，而 Stokes 拉曼信号恰恰相反——对温度并不敏感，利用两者的光强之比消除了光纤损耗和不均匀性带来的影响，保证了较高的温度测量精度与稳定性[2]。然而拉曼信号强度很弱，对光源功率要求较高，而激发布里渊散射所需的功率很小，这种功率的不兼容使得 ROTDR 和 BOTDR 在 SMF 中无法同时测量，然而具有独特结构的 MCF 完美地解决了这种问题。此外，拉曼传感对信号获取、处理能力也有很高的要求，这在一定程度上限制了性能的提升。

## 4　特种光纤判别

### 4.1　特种光纤多峰测量

在 30 km 的传感光纤上，99.7%的温度误差和 94%的应变误差是由强度测量产生的误差造成的[37]。2001 年，Lee 等[38]首次提出利用色散位移光纤（Dispersion Shifted Fiber，DSF）的多峰效应同时测量温度和应变的想法，并以 LEAF（Large-Effective-Area Fiber）作传感光纤在 BOTDR 中进行实验验证，开创了多峰测量温度和应变的先例。LEAF 纤芯中含有的多种混合物导致存在多峰布里渊频谱且每个峰的 BFS 对温度和应变的依赖性不同，利用 LEAF 的第一和第二布里渊峰频移的温度

和应变依赖关系解析双频移矩阵方程组，同时得到温度与应变值。双峰 BFS 测量有效避免了功率测量带来的误差，在传感长度为 3.682 km 的 LEAF 上实现了 5 ℃的温度分辨率、60 με 的应变分辨率和 2 m 的空间分辨率。之后，Alahbabi[39] 将传感光纤长度延长到 22 km 以上，并与传统的 SMF 中单个布里渊峰强度和频移技术的性能进行比较。由于 LEAF 前两个峰值的差分频率变化较小（约为 190 kHz/℃），这对频率测量的分辨率提出了很高的要求，且 BOTDR 系统中 Stokes 信号较弱，很难实现千赫兹量级的频率分辨率。2006 年，国内学者张旭苹课题组利用 0.9 mm 直径的 LEAF 不同峰间的布里渊功率差与温度、应变的依赖关系，并结合 BFS，实现了温度和应变的同时测量[40]。利用不同峰间的布里渊功率差在一定程度上降低了光纤链路非待测量引发的误差，但由于各峰的温度、应变灵敏度差较小，系统获得的指标并不高。2012 年，Bao 等[41] 对 LEAF 的频移、峰值功率和线宽与温度、应变关系展开研究，并利用前两峰的频移与线宽实现温度与应变的解析，获得的温度和应变误差分别为 1.8 ℃和 37 με。

2004 年，Zou[42] 利用锗（Ge）掺杂芯的光子晶体光纤（Photonic Crystal Fiber，PCF）实现了较高精度的温度与应变同时测量。纵向声波在纤芯掺 Ge 区和纯硅（Si）区发生散射，产生中心频率对温度与应变有不同依赖性的布里渊双峰。相比于 LEAF，PCF 芯径较小，功率密度较高，有更高的布里渊增益和信噪比，这使得它能够实现比 LEAF[38] 更高的测量精度。在 2 m 的光纤上，温度和应变误差分别为 3.9 ℃和 83 με，空间分辨率达到 15 cm。但是，PCF 的布里渊增益谱中存在多个频率间隔相近的子峰，使得它们很难分离。

2007 年，Zou 等在双端 BOTDA 系统中采用具有四峰的纤芯高掺锗（Ge）、内包层掺氟（F）的光纤（High-delta Optical Fiber with F-doped Depressed Inner Cladding，F-HDF），验证了 F-HDF 区分应变响应和温度响应的可行性。相比于普通 HDF，F-HDF 的布里渊增益谱的声模更少，相邻模之间的频率间隔更大，且四个声模的谐振频率与温度和应变存在依赖关系[43]。以一阶散射峰（参考）与高阶（四阶）散射峰结合，在 4.74 m 的传感长度上获得了 1.8 ℃的温度误差、44 με 的应变误差。然而，高阶声模的布里渊增益较低，且各峰频率都与温度和应变依赖关系相似，故仍然无法实现准确的识别。

2015 年，Li 等[44] 通过监测少模光纤（Few-mode Fiber，FMF）不同光模式（$LP_{01}$，$LP_{11}$）下的布里渊频移，并对 FMF 的 BFS 的温度和应变系数进行标定，成功地实现了温度效应和应变效应的区分。在外差双端 BOTDA 系统 3 km 长的五模光纤上，温度和应变分辨率分别达到了 1.2 ℃和 21.9 με，空间分辨率为 2.5 m。FMF 突破了 SMF 的容量限制，且布里渊散射可以发生在任意模或模对中，但不同光模式的布里渊频率范围相近，使得整个系统非常复杂。2016 年，Xu 等[45] 对反抛物线渐变光纤进行研究。该光纤拥有独特的折射率剖面，这使得光纤中存在多个稳定激励的声模，通过声光模的相互作用，产生多个布里渊散射峰[46]，通过多峰 BFS 与温度应变的关系，实现温度和应变的同时测量，并通过仿真与实验验证其可行性，获得了 0.85 ℃和 17.4 με 的测量精度。相比于文献[44]，不仅获得了更高的精度，也使得系统结构大大简化。

2018 年，Pan 等[47] 第一次利用具有布里渊双峰的色散补偿光纤（Dispersion Compensating Fiber，DCF）确立双频移矩阵解决布里渊传感中的交叉敏感问题。相比于 PCF[41]，DSF[38] 和 F-HDF[43]，DCF 的两个布里渊增益峰之间的间隔更宽（516 MHz），可确保更宽的温度和应变传感范围。但由于双峰的温度、应变系数接近，矩阵条件数值较大，在双端 BOTDA 系统中，1 km 的 DCF 上获得的温度、应变分辨率分别为 2.6 ℃和 64.6 με。

利用特种光纤的多峰效应判别温度和应变，是近年来比较流行的方法。它大多是根据特种光纤独特的纤芯掺杂或结构引起的布里渊多峰特性，利用多峰的 BFS 与温度和应变的不同依赖关系，建立双频移矩阵方程，从而解出待测量。基于单根特种光纤多峰测量的方法将操作简单化，且避开了光强度测量引入的误差，但由于不同峰对应的 BFS 在应变和温度的依赖性方面表现出相似的行为，使得辨别精度不够。另外，譬如 PCF，F-HDF 和渐变型少模光纤需要特殊设计，长距离传感存在成本问题。

### 4.2 特种光纤其他方法测量

2014 年，Ding 等[48] 将掺铒光纤（Erbium-doped Fiber，EDF）中的 BFS 和荧光强度比（Fluorescence Intensity Ratio，FIR）结合来区分应变和温度。不同波长（1 530 和 1 565 nm）下的荧光强度确定的 FIR 对温度存在线性依赖性，对应变不敏感，通过解

算 BFS 与 FIR 对温度、应变的矩阵方程，获得光纤的温度、应变情况。然而，系统中 FIR 是采用具有相对低采样速率的光谱仪针对透射光来测量的，且 FIR 与 BFS 的测量并不同步，这增加了测量误差。此外，EDF 大的传输损耗(18 dB/m)也限制了其在长距离传感中的应用。

2017 年，赵志勇[49]提出了基于空分复用异质 MCF 的布里渊分布式传感技术，并通过平均两个对称外芯的 BFS 变化消除了由弯曲诱导的 BFS 不确定性。根据 MCF 中异质纤芯的布里渊频移的温度、应变灵敏度不同，将不同芯的 BFS 联立方程，获得光纤链路的温度和应变情况，但异质芯间小的灵敏度差异导致较高的不确定性。相比于并行铺设双路 SMF 的方案，MCF 更能保证相同位置的每个纤芯经历的纵向应变和温度严格相同，但是作为“后起之秀”的多芯光纤仍存在光放大、功率合束器、低损耗耦合技术等一系列问题[50]，并且其制备工艺难度和造价高。

2019 年，Flavien 等[51]将 40 bar 的二氧化碳($CO_2$)填充到空心光子晶体光纤(Gas-filled Hollow-core PCF，HC-PCF)中，使其获得了比 SMF 更高的布里渊增益和更窄的线宽。当温度变化时，HC-PCF 中声速受到显著影响而致使布里渊频移改变，但应变的变化对纤芯气压和光纤有效折射率的影响微乎其微，因此，HC-PCF 可以实现温度的单一分布式测量。另外，纤芯中没有气体对流，$CO_2$ 导热系数低，这也为 HC-PCF 高分辨率分布式温度传感创造了有利条件。在 50 m 长的光纤上，获得了 1 cm 的空间分辨率和 0.3 ℃的温度分辨率。尽管该方案获得的指标较高，但无法进行温度应变的同时测量。

特种光纤的特殊判别方法也是利用其本身的独特性和特殊参量对温度应变的依赖性来获取待测量，但是在测量精度、距离及造价方面都存在问题。

## 5　结束语

本文对国内外光纤布里渊传感中交叉敏感问题的各种解决方案进行了综述、归类、比较及评价。总体而言，铺设参考光纤、双参量矩阵方程测量、双物理效应结合、特种光纤判别这四类解决方法各有千秋，但本质上都是通过布里渊频移及另一参量对温度和应变的依赖关系建立并解析双参量矩阵方程，从而解出待测量。BFS 对温度和应变都有着较好的敏感性和线性依赖性，且方便准确获取；其他参量由于信噪比、响应灵敏度及差分频率分辨率等原因在精确获取方面存在一定的困难，这也直接影响了测量的可靠性。

尽管对利用光纤的布里渊散射进行传感的研究已经延续了几十年，期间也取得了一系列的进展与突破，但其固有的交叉敏感问题一直难以得到有效解决。迄今，基于 SMF 的布里渊散射谱的 BFS 与强度结合的双参量矩阵方程测量仍然是交叉敏感问题的主要解决方案，利用现已铺设的 SMF 也符合当今资源再利用的可持续发展战略，但其功率易受环境干扰，弊端也很明显。因此，在现已铺设的单模光纤通信网基础上，继续改进测量系统，进一步提高测量指标是非常值得深入研究的。

**参考文献：**


[1] Agrawal G P. Nonlinear Fiber Optics, Third Edition & Applications of Nonlinear Fiber Optics [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002: 4-10.

[2] 李晓娟. BOTDR 传感系统性能提高方法的理论与实验研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.
Li Xiaojuan. Theoretical and experimental research on methods for performance improvement of BOTDR sensing system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[3] 张立欣. 单端 BOTDA 关键技术的理论和实验研究[D]. 北京：华北电力大学，2018.
Zhang Lixin. Theoretical and experimental research on the key technologies of single-ended DOTDA system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.

[4] 安　琪. 矢量受激布里渊散射特性及其应用的理论与实验研究[D]. 北京：华北电力大学，2017.
An Qi. Theoretical and experimental research on the characteristics and application of vector stimulated Brillouin scattering[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.

[5] Xu Zhiniu, Zhao Lijuan. Accurate and ultra-fast estimation of Brillouin frequency shift for distributed fiber sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2020, 303: 111822.

[6] 徐志钮，胡宇航，赵丽娟，等. 基于改进二次多项式拟合的布里渊频移快速高精度提取算法[J]. 光谱学与光谱分析，2020，40(3)：842-848.
Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Fast and highly accurate Brillouin frequency shift extracted algorithm based on modified quadratic polynomial fit[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(3): 842-848.

[7] 徐志钮，胡宇航，赵丽娟，等. 基于单斜坡法的光电复合海缆温度、应变快速测量方法[J]. 电力自动化设备，2020，40(5)：202-209.

Xu Zhiniu, Hu Yuhang, Zhao Lijuan, et al. Rapid temperature and strain measurement method for optic-electric composite submarine cable based on slope-assisted method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 202-209.

[8] Bao X, Webb D J, Jackson D A. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber[J]. Opt. Lett., 1994, 19(2): 141-143.

[9] Kersey A D, Davis M A. Simultaneous measurement of temperature and strain using fibre Bragg gratings and Brillouin scattering[J]. IEEE Proc. Optoelectronics, 1997, 144(3): 151-155.

[10] Parker T R, Rogers A J, Handerek V A, et al. Temperature and strain dependence of the power level and frequency of spontaneous Brillouin scattering in optical fibers [J]. Opt. Lett., 1997, 22(11): 787-789.

[11] Wait P C, Newson T P. Landau Placzek ratio applied to distributed fibre sensing[J]. Opt. Commun., 1996, 122(4): 141-146.

[12] Lees G P, Kee H H, Newson T P. All-fiber system for simultaneous interrogation of distributed strain and temperature sensing by spontaneous Brillouin scattering[J]. Opt. Lett., 2000, 25(10): 695-697.

[13] Smith J, Brown A, DeMerchant M, et al. Simultaneous distributed strain and temperature measurement[J]. Appl. Opt., 1999, 38(25): 5372-5377.

[14] Bao X, Yu Qinrong, Chen Liang. Simultaneous strain and temperature measurements with polarization-maintaining fibers and their error analysis by use of a distributed Brillouin loss system[J]. Opt. Lett., 2004, 29(12): 1342-1344.

[15] Zou Weiwen, He Zuyuan, Hotate K. Complete discrimination of strain and temperature using Brillouin frequency shift and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. Opt. Express, 2009, 17(3): 1248-1255.

[16] 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]. Opt. Lett., 2009, 34(7): 1126-1128.

[17] Zou Weiwen, He Zuyuan, Hotate K. Demonstration of Brillouin distributed discrimination of strain and temperature using a polarization-maintaining optical fiber [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 22(8): 526-528.

[18] Bao X, Chen Liang, Dong Yongkang. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using Brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2010, 22(18): 1364-1366.

[19] Chen Liang, Bao X, Dong Yongkang. Truly distributed birefringence measurement of polarization-maintaining fibers based on transient Brillouin grating[J]. Opt. Lett., 2010, 35(2): 193-195.

[20] Shinki N, Yousuke E, Souichi H, et al. Novel fiber-optic distributed strain and temperature sensor with very high resolution[J]. IEICE Trans. on Commun., 2006, e89-b(5): 1722-1725.

[21] Yahei K, Mutsumi I, Kenya K, et al. Fiber-optic distributed strain and temperature sensing with very high measure and resolution over long range using coherent OTDR[J]. J. of Lightwave Technol., 2009, 27(9): 1142-1146.

[22] 李荣伟, 李永倩, 杨 志, 等. 基于相干光时域反射计的光纤温度传感测量[J]. 光子学报, 2010, 39(11): 1988-1992.
Li Rongwei, Li Yongqian, Yang Zhi, et al. Measurement of optical fiber temperature sensing based on coherent optical time domain reflectometer[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(11): 1988-1992.

[23] Yang Zhi, Shi Pengxiang, Li Yongqian. Research on COTDR for measuring distributed temperature and strain [C]// Proc. of 2011 Second International Conf. on Mechanic Automation and Control Engin., 2011: 590-593.

[24] Hartog A H, Leach A P, Gold M P. Distributed temperature sensing in solid-core fibres[J]. Electron. Lett., 1985, 21(23): 1061-1062.

[25] Alahbabi M N, Cho Y T, Newson T P. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. Opt. Lett., 2005, 30(11): 1276-1278.

[26] Bolognini G, Park N, Park J, et al. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2006, 18(17): 1879-1881.

[27] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D. Fabry-Perot lasers in simultaneous strain and temperature Brillouin-based distributed sensing[C]// Proc. of 2009 35th European Conf. on Optical Commun. (ECOC 2009), 2009: 290-291.

[28] Soto M A, Bolognini G, Pasquale F D. Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding[J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2009, 21(7): 450-452.

[29] Pasquale F D, Bolognini G, Soto M A, et al. Brillouin-based distributed temperature sensor employing pulse coding[J]. IEEE Sensors J., 2008, 8(3): 225-226.

[30] Duckey L, Hosung Y, Na Y K, et al. Analysis and experimental demonstration of simplex coding technique for SNR enhancement of OTDR [C]// Proc. of Lightwave Technologies in Instrumentation and Measurement Conf., 2004: 118-122.

[31] 李永倩, 曹翠新, 李晓娟, 等. 一种多模 FP 激光器 BOTDR 系统的建模分析[J]. 光子学报, 2016, 45(5): 127-133.
Li Yongqian, Cao Cuixin, Li Xiaojuan, et al. Modeling analysis and calculation of a Brillouin optical time domain reflectometer system using multi longitudinal mode FP laser [J]. Acta

Photonica Sinica，2016，45(5)：127-133.

[32] Soto M A，Bolognini G，Pasquale F D. Fiber-optic distributed sensor based on hybrid Raman and Brillouin scattering employing multiwavelength Fabry-Perot lasers[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2009，21(20)：1523-1525.

[33] Bolognini G，Soto M A. Optical pulse coding in hybrid distributed sensing based on Raman and Brillouin scattering employing Fabry-Perot lasers[J]. Opt. Express，2010，18(8)：8459-8465.

[34] 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]. Opt. Lett.，2013，38(20)：4162-4165.

[35] Mohammad T，Yonas S M，Lacopo T，et al. Optimized hybrid Raman/Fast-BOTDA sensor for temperature and strain measurements in large infrastructures [J]. IEEE Sensors J.，2014，14(12)：4297-4304.

[36] Zhao Zhiyong，Dang Yunli，Tang Ming，et al. Spatial-division multiplexed hybrid Raman and Brillouin optical time-domain reflectometry based on multi-core fiber[J]. Opt. Express，2016，24(22)：25111-25118.

[37] Newson T P，Kee H H，Maughan S M. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter[J]. Measurement Science & Technol.，2001，12(7)：834-842.

[38] Lee C C，Chiang P W，Chi S. Utilization of a dispersion-shifted fiber for simultaneous measurement of distributed strain and temperature through Brillouin frequency shift[J]. IEEE Photon. Technol. Lett.，2001，13(10)：1094-1096.

[39] Alahbabi M，Cho Y T，Newson T P. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensor [J]. Opt. Lett.，2004，29(1)：26-28.

[40] 董玉明，张旭苹，路元刚，等. 布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J]. 光学学报，2007，27(2)：197-201.
Dong Yuming，Zhang Xuping，Lu Yuangang，et al. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor[J]. Acta Optica Sinica，2007，27(2)：197-201.

[41] Liu Xuan，Bao X. Simultaneous temperature and strain measurement with bandwidth and peak of the Brillouin spectrum in LEAF fiber[J]. Optical Fibre Sensors，2011，7753：1053-1059.

[42] Zou Lufan，Bao X，Afshar V S，et al. Dependence of the brillouin frequency shift on strain and temperature in a photonic crystal fiber[J]. Opt. Lett.，2004，29(13)：1485-1487.

[43] Zou Weiwen，He Zuyuan，Kishi M，et al. Stimulated Brillouin scattering and its dependences on strain and temperature in a high-delta optical fiber with F-doped depressed inner cladding[J]. Opt. Lett.，2007，32(6)：600-602.

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

[45] Xu Yanping，Ren Meiqi，Lu Yang，et al. Multi-parameter sensor based on stimulated Brillouin scattering in inverse-parabolic graded-index fiber[J]. Opt. Lett.，2016，41(6)：1138-1141.

[46] 周　欣. 基于光纤中声模与光模互作用的温度应变同时测量技术研究[D]. 武汉：华中科技大学，2017.
Zhou Xin. Simultaneous temperature and strain sensing utilizing interaction between acoustic and optical modes in fibers [D]. Wuhan：Huazhong University of Science & Technology，2017.

[47] Pan Wei，Yan Lianshan，Zhang Xinpu，et al. Temperature and strain discrimination in BOTDA fiber sensor by utilizing dispersion compensating fiber[J]. IEEE Sensors J.，2018，18(17)：7100-7105.

[48] Ding Mingjie，Mizuno Y，Nakamura K. Discriminative strain and temperature measurement using Brillouin scattering and fluorescence in erbium-doped optical fiber[J]. Opt. Express，2014，22(20)：24706-24712.

[49] Zhao Zhiyong，Dang Yunli，Tang Ming，et al. Spatial-division multiplexed Brillouin distributed sensing based on a heterogeneous multicore fiber[J]. Opt. Lett.，2017，42(1)：171-174.

[50] 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)：171-195.
Yuan Libo. Multi-core fiber characteristics and its sensing applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress，2019，56(17)：171-195.

[51] Flavien G，Fan Yang，Luc T. High spatial resolution and intrinsically strain-insensitive distributed temperature sensing based on stimulated Brillouin scattering in gas [C]// European Workshop on Optical Fibre Sensors，2019：11199.

## 作者简介：

**李永倩**(1958—)，男，河北定州人，教授，博士生导师，主要研究方向为光通信与光传感技术；

**范海军**(1994—)，男，山西晋中人，博士研究生，主要研究方向为光通信与光传感技术。