

文章编号: 0258-7025(2010)06-1426-04

# 50 km 长距离布里渊光时域分析分布式光纤传感器

宋牟平 励志成 裘超

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

**摘要** 普通单模光纤的布里渊散射光,其频移是温度或应变的函数,因此通过检测布里渊频移可得到沿光纤分布的温度或应变。长距离布里渊散射分布式光纤传感器有光时域分析和光时域反射计两种结构,虽然布里渊光时域反射计具有单端光信号处理的优点,但其传感长度受限于微弱的自发布里渊散射。而布里渊光时域分析采用的是较强的受激布里渊散射,更具有长距离传感能力。实现布里渊光时域分析的一个关键是产生传感所需的频移探测光。采用线宽小于 1 MHz 的光纤激光器作为单一光源,基于微波电光调制产生频移探测光,并采用正交偏振控制来抑制偏振相关信号衰弱。实现了 50 km 普通单模光纤的布里渊光时域分析,在 10 m 空间分辨率下达到约 2 °C 的温度分辨率。

**关键词** 传感器;布里渊光时域分析;电光调制;正交偏振控制

中图分类号 TN247;TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1426

## A 50 km Distributed Optical Fiber Sensor Based on Brillouin Optical Time-Domain Analyzer

Song Muping Li Zhicheng Qiu Chao

(Department of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

**Abstract** For the standard single-mode optical fiber, the frequency shift of Brillouin scattering light is the function of the temperature or strain. The temperature or strain of the optical fiber can be obtained when Brillouin frequency shift is able to be detected. Long-distance sensing Brillouin scattering distributed optical fiber sensor (DOFS) has two structures of optical time-domain analyzer (OTDA) and optical time-domain reflectometer (OTDR). Although Brillouin OTDR only process single end of the optical fiber, it suffers short sensing distance because of weak spontaneous Brillouin scattering. Brillouin OTDA possesses the merit of long-distance sensing for the relatively strong stimulated Brillouin scattering. One key point of achieving Brillouin OTDA is to produce the frequency-shifted probe light. Here, an optical fiber laser with linewidth less than 1 MHz is employed as the single optical source, a microwave electro-optical modulator is used to produce the frequency-shifted probe light, and a method of orthogonal polarization control is adopted to reduce the effect of the optical-polarization-related problem. A laboratorial system of 50 km distributed optical sensor is achieved with 2 °C in temperature resolution, and 10 m in spatial resolution.

**Key words** sensors; Brillouin optical time-domain analyzer; electro-optical modulation; orthogonal polarization control

## 1 引 言

分布式光纤传感器(DOFS)<sup>[1~3]</sup>不仅具有一般光纤传感器<sup>[4,5]</sup>的优点,如无辐射干扰性、抗电磁干扰性好和化学稳定性好等,而且可以沿光纤同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息。目前长距离 DOFS 有拉曼散射 DOFS<sup>[2,3]</sup>和布里渊散射

DOFS 等。拉曼散射只对温度敏感,难以用于地质、建筑结构等的健康监测,而光纤的布里渊散射对温度和应变都敏感。通过检测来自传感光纤的布里渊散射光<sup>[6~8]</sup>的频移和强度,布里渊散射 DOFS<sup>[9,10]</sup>可得到沿光纤分布的温度或应变信息,且工作于 1.55 μm 波长附近的布里渊散射 DOFS,光信号受到

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-16

作者简介: 宋牟平(1971—),男,博士,副教授,主要从事新型光子器件、光纤通信/传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

的衰减和色散较小,从而使得布里渊散射 DOFS 适合于长距离(大于几十千米)分布式传感。

布里渊散射 DOFS 有布里渊光时域反射计(BOTDR)<sup>[9]</sup>和布里渊光时域分析(BOTDA)<sup>[10]</sup>两种。基于自发布里渊散射的 BOTDR,拥有单端光信号处理的优点,但由于自发布里渊散射光较微弱,传感器的传感距离受到很大的制约。而基于受激布里渊散射的 BOTDA,具有检测信号较强的优点,传感距离可得到有效的改善。但 BOTDA 一般需要两个锁频的激光器用于受激布里渊散射,另外受激布里渊散射是偏振相关的。本文采用单一的光纤激光器作为光源,应用微波电光调制(EOM)<sup>[11,12]</sup>来产生激励光和频移探测光,并基于正交偏振控制技术<sup>[13,14]</sup>来抑制布里渊 DOFS 的偏振相关信号衰弱,实现了 50 km 普通单模光纤的长距离 BOTDA。

## 2 原理和系统

### 2.1 传感原理

布里渊散射 DOFS 利用的是光纤的布里渊散射<sup>[15]</sup>,在普通石英单模光纤中,布里渊散射光的频移与光纤的有效折射率和超声声速有关。而温度和应力都能改变光纤的折射率和超声声速,只要检测光纤中布里渊频移的变化,就可以得到温度或应力在光纤上的分布。布里渊频移  $\nu_B$  和温度  $T$ ,应力  $\epsilon$  的关系为<sup>[7,8]</sup>

$$\nu_B(\epsilon) = \nu_B(0)[1 + C_\epsilon \epsilon], \quad (1)$$

$$\nu_B(T) = \nu_B(T_r)[1 + C_T(T - T_r)], \quad (2)$$

式中  $T_r$  为参考温度,  $C_\epsilon = 4.6$ ,  $C_T = 9.4 \times 10^{-5}/K$  分别为应力和温度的比例系数。对于  $T = 300 K$ , 光波长工作在  $\lambda = 1.55 \mu m$  附近的普通单模光纤,布里渊频移变化为

$$\delta \nu_B = C_{\nu\epsilon} \delta \epsilon + C_{\nu T} \delta T, \quad (3)$$

式中  $C_{\nu\epsilon} = (0.0483 \pm 0.0004) \text{ MHz}/\mu\epsilon$  为应变频移系数,  $C_{\nu T} = (1.10 \pm 0.02) \text{ MHz}/K$  为温度频移系数。

从(1)~(3)式可看出,温度和应变对布里渊散射光的频移作用是一样的。在以下实验中,从实验的难易角度出发,温度被用作实验变化的传感参量,结果可同样适用于应变传感。

### 2.2 传感系统方案

如图 1 所示, BOTDA 通过光时域分析方式<sup>[11,13]</sup>,即两束相向传输的脉冲激励光(pump light, 频率为  $\nu_{\text{pump}}$ )和直流探测光(probe light, 频率为  $\nu_{\text{probe}}$ )之间的受激布里渊散射,激励光强  $I_{\text{pump}}$  和探测光强  $I_{\text{probe}}$  之间的作用可由耦合方程<sup>[15]</sup>描述,

$$\frac{d}{dz} I_{\text{pump}} = -g_B I_{\text{pump}} I_{\text{probe}} - \alpha I_{\text{pump}}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dz} I_{\text{probe}} = -g_B I_{\text{pump}} I_{\text{probe}} + \alpha I_{\text{probe}}, \quad (5)$$

式中  $g_B$  为布里渊增益系数,其取决于材料、布里渊频移( $\nu_B$ )和光频差( $\nu_{\text{pump}} - \nu_{\text{probe}}$ );  $\alpha$  为光损耗系数。对于光纤中激励光和探测光的受激布里渊作用,当激励光和探测光之间的频差与布里渊频移一致时,受激布里渊散射作用最强,探测光功率变化最大。因此通过扫描光频差,检测和激励光作用后的探测光,就可得到传感光纤各处的布里渊散射增益谱,最后根据频移和传感量的关系[(1)~(3)式]计算得到沿光纤的温度或应变分布。

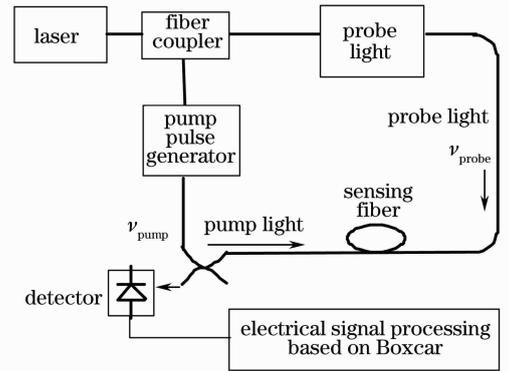


图 1 布里渊光时域分析分布式光纤传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the BOTDA-based DOFS

## 3 实验结果

图 2 是基于 BOTDA 的布里渊 DOFS 的具体实验方案。采用线宽小于 1 MHz 的光纤激光器作为单一光源,经耦合器(FC1)分成两路光。一路光被声光调制器(AOM)用于产生脉宽为 100 ns 的激励光脉冲,再被掺铒光纤放大器(EDFA)放大,从

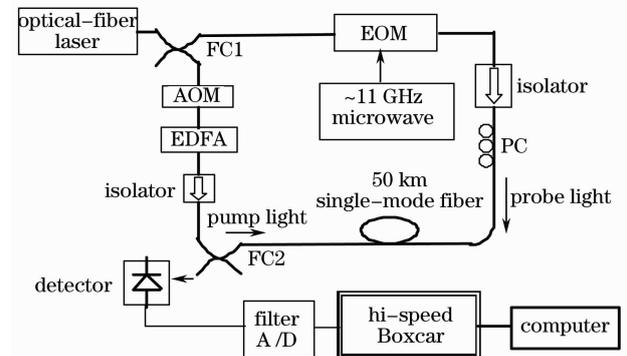


图 2 基于 BOTDA 的 50 km 布里渊散射 DOFS 实验系统

Fig. 2 Experimental setup of a 50 km DOFS based on BOTDA

50 km 传感光纤(由两段 25 km 光纤熔接而成)的一个端口入纤;另一路光由微波电光调制器来产生约 11 GHz 频移的探测光,探测光从传感光纤的另一端口入纤,和脉冲激励光产生受激布里渊散射作用,探测光再经耦合器(FC2)后被光电探测器接收,光电信号被放大、滤波和模/数(A/D)转换后,经 Boxcar 的累加平均,最后由计算机进行布里渊散射光频移信息的提取和传感信号的计算。另外,考虑到受激布里渊散射的偏振相关性,在实验中系统采用光偏振控制器(PC)进行正交偏振控制<sup>[11,12]</sup>来抑制布里渊传感信号的偏振相关性。一般 BOTDA 的偏振控制采用扰偏器使得光的偏振状态均匀分布,需要较高速的偏振控制器。考虑到检测信号周期性的特点,本文采用正交偏振控制来降低对偏振控制器的要求<sup>[11,12]</sup>。

直接用示波器观察检测信号,图 3 是放大后的传感器的检测光电信号。可看出是包含许多噪声的幅度调制基带信号,其信号幅度大小对应于此时间点(某段传感光纤)的受激布里渊散射作用的大小。图 3 显示的是 3 个多周期的探测光信号,并且可看出在每周周期信号中,由 2 段光纤组成。对于单次的光电检测信号,由于信号微弱,包含着许多噪声,需要对电信号做进一步的处理,以得到信噪比改善的检测信号,用以提取布里渊频移信息和计算传感量。

在对信号放大、滤波和 80 MHz 采样后,再采用累加平均技术来提高信噪比。图 4 是传感信号经累

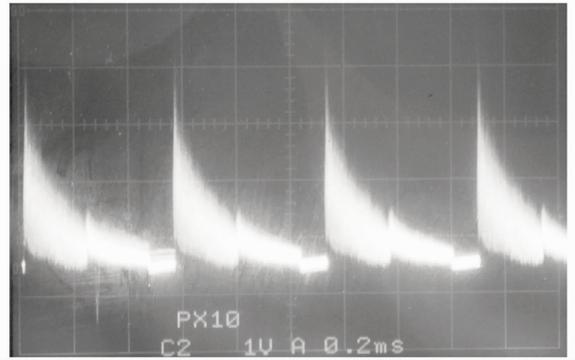


图 3 光电检测信号波形

加平均 4000 次后的结果。可看出信号的信噪比得到很大的提高,并可明显看出整段 50 km 光纤是由两端光纤熔接而成,而且这两段光纤的固有布里渊频移是不一样的。通过改变图 2 中微波源的频率,以 12 MHz 频间隔从 10.780 GHz 扫描到 10.888 GHz,得到了 50 km 光纤的完整布里渊散射频谱,如图 4 所示,从中可以提取出布里渊频移。图 4(a)的插图是某一段传感光纤对应的布里渊散射频谱。另外,50 km 传感光纤内信号的“波动”主要是受激布里渊散射的偏振相关性引起的,是否采用偏振控制,对检测信号的质量影响很大。图 4(a)是采取了偏振控制后的结果,信号的“波动”较小;而图 4(b)是未采取偏振控制下的检测结果,信号的“波动”很大,这对后续的布里渊频移的判断很不利。因此为了有效地实现 BOTDA 检测,需要合适的偏振控制。

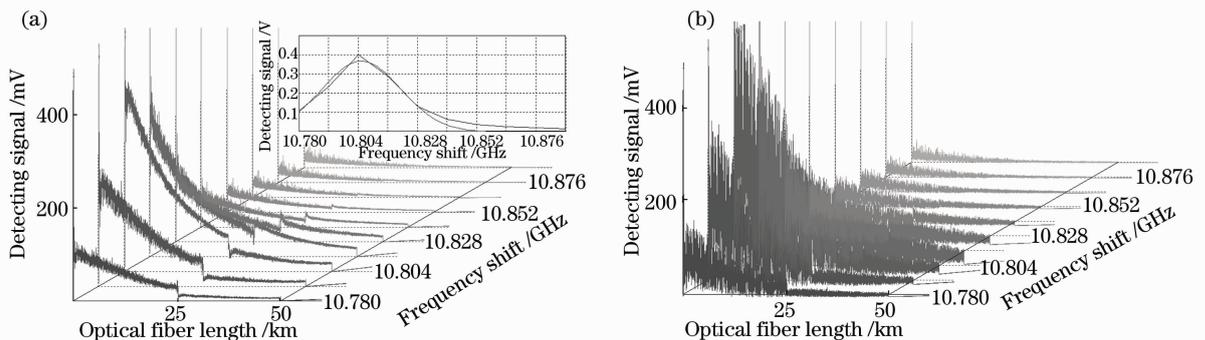


图 4 分别在有偏振控制(a)和没有偏振控制(b)情况下不同频移时传感光纤各处的探测光信号

Fig. 4 “Panorama” of the probe signal, with PC control (a) and without PC control (b)

对检测数据(如图 4 所示)进行频谱分析,可得到传感光纤各处的布里渊频移,再根据(1)~(3)式,可计算得到传感光纤各处的温度。在温度测试实验过程中,大部分光纤处于 17 °C 的室温中,只有在 50 km 光纤末端附近有两段光纤(第 1 段为 10 m,第 2 段为 20 m,两者间隔 10 m)被放到 75 °C 的热水中。图 5 是实验得到的温度曲线。在温度的计算过

程中,采用未加温度变化的测试光纤布里渊频移为频率基准,从而消除了两段光纤的频差区别和光纤各处的固有频差波动,最后得到如图 5 所示的较“平整”温度测试曲线。图 5 中的小图表示 50 km 光纤末端附近有两段光纤温度为 75 °C。从温度测试曲线的“波动”可看出传感器的温度分辨率为 2 °C。传感器的分辨率还可通过增加 Boxcar 的累加平均次

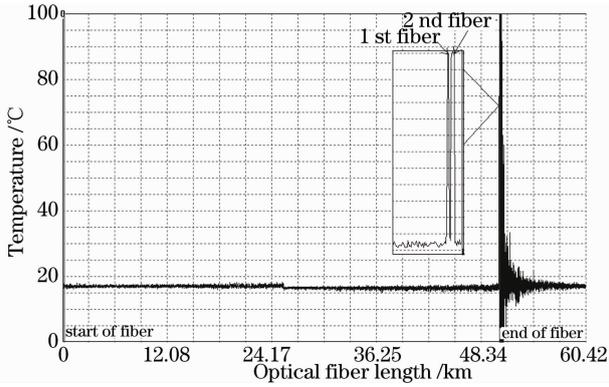


图 5 BOTDA 实验系统检测得到的传感光纤各处温度  
Fig. 5 Temperature distribution of the sensing fiber detected by the BOTDA experimental system

数得到进一步的提高。

对第 2 段 25 km 传感光纤末端附近的一段 10 m 光纤,进行温度分辨率测试。把传感光纤末端附近的 10 m 光纤放在热水中,同时由一温度计进行测试温度对比,实验结果如图 6 所示。可看出基于 BOTDA 的分布式光纤传感器具有较好线性的温度响应,温度分辨率约为 2 °C。

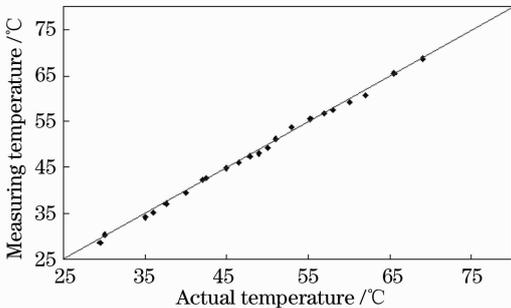


图 6 传感得到的温度与实际温度的对比  
Fig. 6 Comparison between the detected temperature and the actual temperature

### 4 结 论

基于较强的受激布里渊散射,布里渊光时域分析分布式光纤传感器可以实现较大的传感距离。采用单一的光纤激光器为光源,应用微波光电调制产生频移探测光,并基于正交偏振控制来抑制偏振相关信号衰弱,实现了 50 km 普通单模光纤的布里渊光时域分析分布式传感器。在 10 m 空间分辨率下,BOTDA 可达到 2 °C 的温度分辨率。预计增加累加平均器的累加次数和系统优化后可进一步提高传感器的分辨率,还可采用合适的光放大和编码调制等来提高传感系统性能。

### 参 考 文 献

- 1 Hang Lijun, He Cunfu, Wu Bin *et al.*. Research on novel distributed optical fiber pipeline leakage detection technology and location method [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 123~127  
杭利军, 何存富, 吴斌等. 新型分布式光纤管道泄漏检测技术及定位方法研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 123~127
- 2 Liu Jiansheng, Li Zheng. Physical essentials and design considerations of temperature calibration for distributed optic fiber Raman temperature sensing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1168~1171  
刘建胜, 李铮. 光纤拉曼测温系统的温度标定及设计考虑[J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1168~1171
- 3 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental research of 30 km long distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 613~616  
张在宣, 王剑锋, 刘红林等. 30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统的实验研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 613~616
- 4 Xiao Hao, Li Fang, Wang Yongjie *et al.*. High-resolution fiber laser sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 87~91  
肖浩, 李芳, 王永杰等. 高分辨率光纤激光传感系统[J]. *中国激光*, 2008, **35**(1): 87~91
- 5 Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958  
徐平, 庞拂飞, 陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1955~1958
- 6 Shen Yichun, Song Muping, Zhang Xianmin *et al.*. Analysis and measurement of stimulated Brillouin scattering threshold in single mode fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 497~500  
沈一春, 宋牟平, 章献民等. 单模光纤中受激布里渊散射阈值研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 497~500
- 7 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, OFS 2002*, 15th, Portland, OR, USA, 2002, **1**: 309~312
- 8 T. Kurashima, T. Horiguchi, H. Ohno *et al.*. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques [C]. *ECOC'98, Madrid, Spain*, 1998, 149~150
- 9 T. Kurashima, M. Tateda, T. Horiguchi *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 10 X. Bao, J. Dhlwayo, N. Heron *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7): 1340~1348
- 11 Song Muping. The technique of Brillouin scattering distributed optical fiber sensing based on microwave electric optical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114  
宋牟平. 微波光电调制的布里渊散射分布式光纤传感技术[J]. *光学学报*, 2004, **24**(8): 1111~1114
- 12 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical timedomain analysis distributed optic-fiber sensor based on microwave electric optical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1053~1056  
宋牟平, 赵斌, 章献民. 基于微波光电调制的布里渊光时域分析传感器[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1053~1056
- 13 Muping Song, Bin Zhao, Xianmin Zhang. Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 271~274
- 14 Song Muping, Zhuang Baiyun. Study on polarization-induced fading eliminated technique in Brillouin optical time-domain analysis sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4): 711~715  
宋牟平, 庄白云. 布里渊光时域分析传感器的消偏振衰落技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4): 711~715
- 15 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics*[M]. Jia Dongfang *et al.* Transl.. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2002. 223~240  
G. P. Agrawal. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方等译. 北京:电子工业出版社, 2002. 223~240