

文章编号: 0253-2239(2010)03-0650-05

结合布里渊光时域分析和光时域反射计的 分布式光纤传感器

宋牟平 鲍 翀 裘 超 叶险峰

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 对于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。但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,两者具有不同的性能特点和使用场合,在实际传感应用中需要加以选择,用以实现有效的长距离光纤传感。如何在一个系统中融合这两种分布式光纤传感技术,其关键是产生传感所需的频移参考光或探测光。采用光纤激光器作为单一光源,基于微波光电调制产生频移参考光或探测光,并应用正交偏振控制来抑制偏振相关信号衰弱。在同一系统中实现了 25 km 普通单模光纤的布里渊光时域分析和光反射计,在 5 m 空间分辨率下达到 3 °C 的温度分辨率。

关键词 传感器; 布里渊光时域分析; 布里渊光反射计; 光电调制; 正交偏振控制

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103003.0650

A Distributed Optical-Fiber Sensor Combined Brillouin Optical Time-Domain Analyzer with Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer

Song Muping Bao Chong Qiu Chao Ye Xianfeng

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

Abstract For standard single-mode optical-fiber Brillouin scattering light, its frequency shift is a function of temperature or strain. So, the temperature or strain of the optical-fiber can be obtained via detecting Brillouin frequency shift. However, Brillouin scattering distributed optical-fiber sensor (DOFS) has two structures of optical time-domain analyzer and optical time-domain reflectometer. These two DOFS structures have their respective performance and application. It is necessary to select either optical time-domain analyzer or optical time-domain reflectometer for the real application, in order to achieve effective distributed sensing. As for the combination of these two structures in one sensing system by using the same optical devices, the key point is to produce the frequency-shifted reference or probe light. A fiber laser is employed as one optical source, a microwave electro-optical modulator is used to produce the frequency-shifted reference or probe light, and a method named with the orthogonal polarization control is adopted to reduce the effect of the optical-polarization-related problem. A laboratorial system of 25 km distributed optical sensor is realized by combining these two structures, with 3 °C in temperature resolution, and 5 m in spatial resolution.

Key words sensors; Brillouin optical time-domain analyzer (BOTDA); Brillouin optical time-domain reflectometer (BOTDR); electro-optical modulation; orthogonal polarization control

1 引 言

光纤传感器^[1~3]具有无辐射干扰性、抗电磁干扰性好和化学稳定性好等优点。其中分布式光纤传感器(DOFS)^[3,4]不仅具有一般光纤传感器的优点,而且同时把普通光纤作为光传输通道和传感敏感元

件,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。现有长距离 DOFS 主要有:拉曼(Raman)散射 DOFS 和布里渊(Brillouin)散射 DOFS 等。拉曼散射 DOFS^[4]利用的是光纤中的自发拉曼散射光,信号微弱,较自发布里渊散射信号约

收稿日期: 2009-08-02; 收到修改稿日期: 2009-10-02

基金项目: 国家自然科学基金(60507002)资助课题。

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/传感方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

低一个数量级,因此传感性能较低且难以实现几十公里以上的长距离传感;另外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^[5-7]的频移和强度,布里渊散射 DOFS^[8,9]得到沿光纤分布的温度或应变信息;并且工作于 1.55 μm 波长附近的布里渊散射 DOFS,光信号受到的衰减和色散较小,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)^[8]和布里渊光时域分析(BOTDA)^[9]两种,由于具有不同的光信号处理结构和布里渊散射作用机制,因此两者具有不同的性能特点和使用场合。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,传感器的分辨率和响应时间受到很大的制约。而基于受激布里渊散射的 BOTDA,具有检测信号较强的优点,相对于 BOTDR,传感器的分辨率和响应时间可得到有效的改善,但 BOTDA 一般需对传感光纤的两端进行光信号处理,使用场合受到一定的制约。在实用中,需要对 BOTDA 和 BOTDR 加以选择以实现有效的长距离传感。本文在以前研究的 BOTDR^[10]和 BOTDA 技术^[11]的基础上,采用单一光源和微波光电调制来产生激励光和频移探测光(BOTDA)或参考光(BOTDR),并应用正交偏振控制技术^[12,13]来抑制布里渊 DOFS 的偏振相关信号衰弱,搭建了一个结合 BOTDA 和 BOTDR 的传感实验系统,实现了 25 km 普通单模光纤的长距离传感。

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^[14],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,所以只要检测光纤中布里渊频移的变化,就可得到温度或应力在光纤上的分布。布里渊频移 ν_B 和温度 T ,应力 ϵ 有如下关系^[6,7]:

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

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

式中 T_r 是参考温度, $C_\epsilon = 4.6$, $C_T = 9.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 分别是应力和温度的比例系数。对于 $T = 300 \text{ K}$ 、光波长工作在 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 附近的普通单模光纤,布

里渊频移变化为

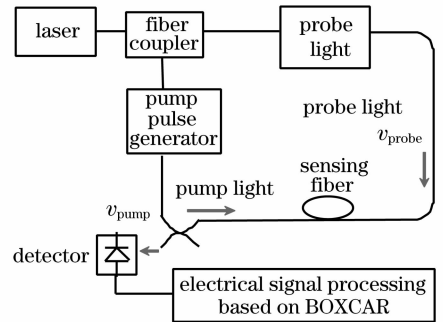
$$\delta\nu_B = C_{\nu\epsilon}\delta\epsilon + C_{\nu T}\delta T, \quad (3)$$

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。

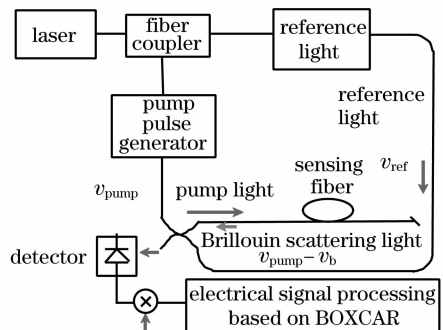
从(1)~(3)式可看出,温度和应变对布里渊散射光的频移作用是一样的,在下面的实验中,从实验的难易角度出发,温度被用作实验变化的传感参量,结果同样适用于应变传感。

2.2 传感系统方案

在布里渊分布式光纤传感器中,需要合适的光信号处理方式检测光纤的布里渊散射光频移。对于长距离传感,主要有 BOTDR 和 BOTDA 两种方案。如图 1(a)所示, BOTDA 通过光时域分析方式^[9,11],即两束相向传输的脉冲激励光(频率为 ν_{pump})和直流探测光(频率为 ν_{probe})之间的受激布里渊散射,检测探测光可得到传感光纤的布里渊散射增益。传感光纤中的布里渊散射增益取决于激励光与探测光之间的频差($\nu_{\text{pump}} - \nu_{\text{probe}}$)和光纤的布里渊频移(ν_B),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。和激励光作用后的探测光由光电检测器探测,再由基于累加平均器(BOXCAR)的电处理系统进



(a)



(b)

图 1 布里渊散射分布式光纤传感器。

(a) BOTDA; (b) BOTDR

Fig. 1 Schematic diagram of two kinds of Brillouin DOFS. (a) BOTDA; (b) BOTDR

行信号处理,可得到传感光纤的布里渊频移,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。

对于基于自发布里渊散射的 BOTDR,由于自发布里渊散射光较弱,且自发布里渊散射光和瑞利散射光的频移只有 11 GHz 左右,需使用合适的检测机制来得到自发布里渊散射光信号。光相干检测方法^[8,10]一方面可通过光相干来直接放大检测信号,另一方面可使用电滤波来区分自发布里渊散射光和瑞利散射光,是一种较为有效的信号处理方法。如图 1(b)所示,激励光的频率为 ν_{pump} ,其在传感光纤中产生的布里渊散射光频率为 $\nu_{\text{pump}} - \nu_{\text{B}}$,瑞利散射光频率为 ν_{pump} ;参考光的频率为 ν_{ref} ,为了相干信号电子处理方便,其大小一般和 $\nu_{\text{pump}} - \nu_{\text{B}}$ 相近;散射光和参考光相干接收后产生的光电信号中,由布里渊散射光产生的信号频率为 $\nu_{\text{PH-B}} = (\nu_{\text{pump}} - \nu_{\text{B}}) - \nu_{\text{ref}}$,一般为几十兆赫兹到几百兆赫兹的较低频率,而由瑞利散射光产生的信号频率为 $\nu_{\text{PH-R}} = \nu_{\text{pump}} - \nu_{\text{ref}} \approx \nu_{\text{B}}$,为 11 GHz 左右的微波频率。两信号频率差异很大,因此容易从总的光电信号中取出布里渊散射光信号。相干光电信号再由基于 BOXCAR 的电处理系统进行信号处理,得到自发布里渊散射光频移,从而可计算得到沿光纤的温度或应变分布,LO 为电本振信号。

在图 1 中, BOTDA 和基于相干检测的 BOTDR,两者在光路和电路结构上具有很好的相似性。在光路方面, BOTDA 和基于相干检测的 BOTDR 都需要一定频差的激励光和探测光(或参考光,对于 BOTDR)。不同之处只是在于光入纤的方式:在 BOTDA 中,激励光和探测光分别从传感光纤的两端入纤,而在 BOTDR 中,只有激励光从传感光纤的一端入纤,参考光通过耦合器和后向的自发布里渊散射光进行相干检测。在电路方面,都是采用基于 BOXCAR 的电处理系统进行信号处理,不同之处在于相干检测 BOTDR 需要电混频器把光相干通带信号转为基带信号^[10]。因此可在一个传感系统中结合 BOTDA 和相干检测 BOTDR,再根据应用的需要来选择 BOTDA 或 BOTDR 功能。图 2 所示的就是 BOTDA 和 BOTDR 结合的传感系统,在光路结构方面,只增加了一个光开关来实施功能的切换。当光开关打到“1”端时,和图 1(a)比较可看出,此时系统即是 BOTDA;当光开关打到“2”端时,和图 1(b)比较可看出,此时系统即是 BOTDR。在图 2 的电路中,电本振信号的混频用于 BOTDR。

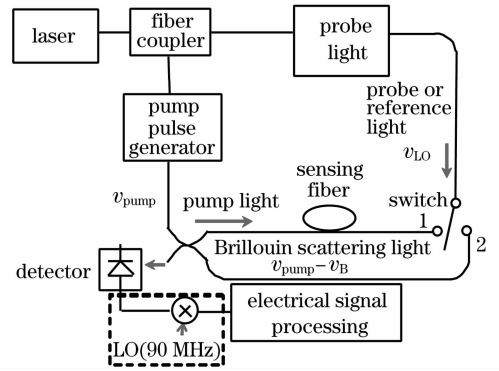


图 2 结合 BOTDA 和 BOTDR 的布里渊散射分布式光纤传感器

Fig. 2 Schematic diagram of the Brillouin DOFS combined BOTDA with BOTDR

3 实验结果

图 3 是结合 BOTDA 和 BOTDR 的布里渊分布式光纤传感器的具体实验方案。采用线宽小于 1 MHz 的光纤激光器作为单一光源,经耦合器分成两路光。一路光用于产生脉宽为 50 ns、峰值功率为 25 dBm 的激励光脉冲,从传感光纤的一个端口入纤。另一路光由微波电光调制来产生约 11 GHz 频移的探测光或参考光。一个 1×2 光开关用于 BOTDA 和 BOTDR 的功能切换。当光开关打到“1”时,实现的是 BOTDA,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 2(FC2)被光电探测器接收,光电信号被放大、滤波和 A/D 转换后,经 BOXCAR 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。当光开关打到“2”时,参考光经耦合器 2 和脉冲激励光产生的自发布里渊散射光合在一起,进行光相干检测,光电信号先进行

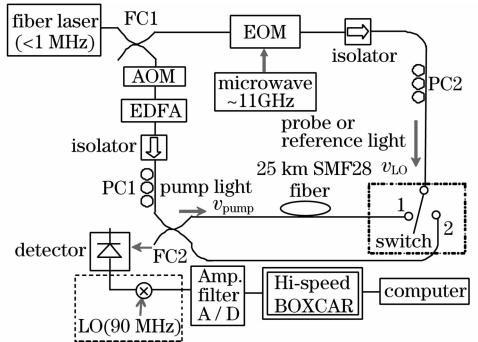


图 3 结合 BOTDA 和 BOTDR 的布里渊散射分布式光纤传感器实验系统

Fig. 3 Experimental setup of the Brillouin DOFS combined BOTDA with BOTDR

混频把外差频带信号转换为基带信号,再被放大、滤波和 A/D 转换后,经 BOXCAR 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,在实验中系统采用正交偏振控制^[12,13]来抑制布里渊传感信号的偏振相关性,由图 3 的偏振控制器(PC1 和 PC2)来完成偏振控制。

直接用示波器观察检测信号,图 4(a)是传感器工作于 BOTDA 时得到的原始光电信号,是包含许多噪声的幅度调制基带信号,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 4(b)是传感器工作于 BOTDR 时得到的原始光电信号,是包含许多噪声的幅度调制带通信号,幅度大小对应于此时间点(某段传感光纤)的自发布里渊散射光的大小。图 4 表明,传感器无论工作于 BOTDA 还是 BOTDR 状态,所需的布里渊散射信号都可得到有效的接收,但由于信号微弱、包含着许多噪声,因此需要对电信号作进一步的处理。

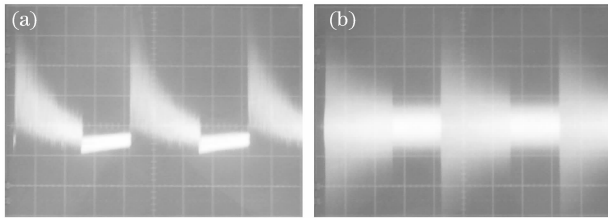


图 4 光电检测信号原始波形。(a) BOTDA; (b) BOTDR

Fig. 4 Original wave form of detecting photoelectric signal. (a) BOTDA; (b) BOTDR

在对信号放大、滤波和 80 MHz 采样后,再采用在分布式光纤传感器中常用的累加平均技术来提高信噪比。图 5 是传感信号经累加平均 4000 次后的结果。可看出信号的信噪比得到了很大的提高。在图 5 中,通过扫描图 3 的微波频率,得到了比较完整的布里渊散射频谱。对比图 4(a)和图 4(b),特别是 25 km 传感光纤后段的信号,可看出在同样的系统和累加次数下,BOTDA 的检测信号信噪比大于 BOTDR。这是由于 BOTDA 采用的是较大光信号之间的受激布里渊散射;而 BOTDR 检测的是微弱的自发布里渊散射光,需要较大的系统信号放大倍数,从而使得信噪比较差。另外,25 km 传感光纤内信号的波动来自于布里渊传感信号的偏振相关性。

对检测数据进行频谱分析,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应变或温度。图 6 是检测得到的温度曲线,其中的小图表示出光纤末端附近有一段光纤被放到热水中。图 6(a)是 BOTDA 的检测结果,

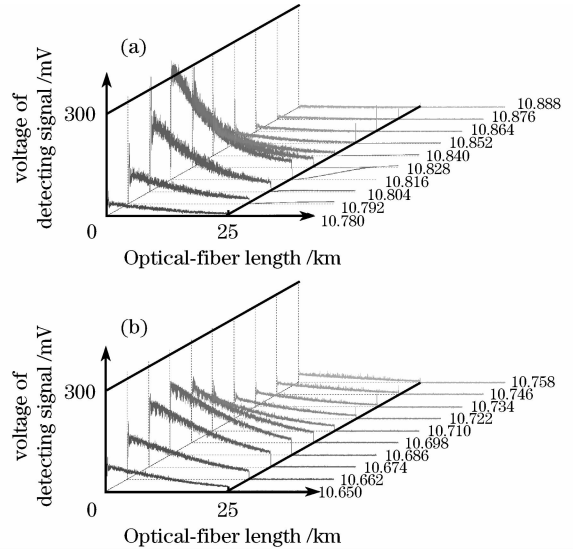


图 5 不同频移下传感光纤各处的探测光信号。

(a) BOTDA; (b) BOTDR

Fig. 5 Panorama of the probe signal.

(a) BOTDA; (b) BOTDR

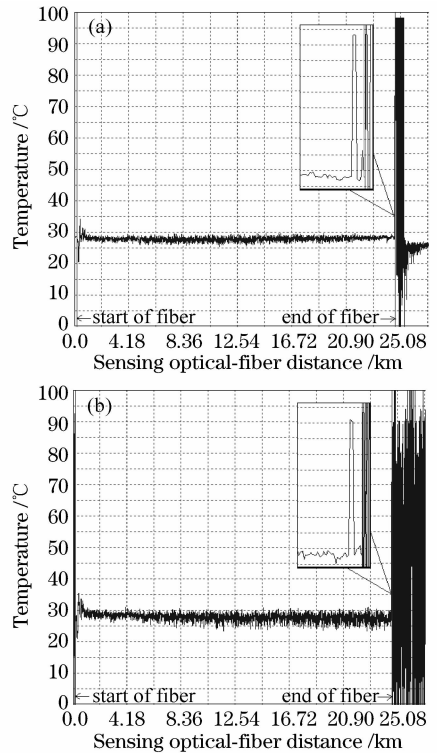


图 6 检测得到的传感光纤各处温度。

(a) BOTDA; (b) BOTDR

Fig. 6 Temperature distribution of the sensing fiber.

(a) BOTDA; (b) BOTDR

图 6(b)是 BOTDR 的检测结果,可看出 BOTDA 具有更好的检测分辨率,这和图 5 显示出 BOTDA 具有较好的信噪比是一致的。

对 25 km 传感光纤末端附近的一段 5 m 光纤,进行温度分辨率测试。把传感光纤末端附近的 5 m

光纤放在热水中,同时有一温度计进行测试温度对比。实验结果如图 7 所示,可看出布里渊分布式传感器的温度响应具有较好的线性,工作在 BOTDR 时温度分辨率约为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$,而工作在 BOTDA 时温度分辨率约为 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。传感器的分辨率还可通过增加 BOXCAR 的累加平均次数,得到进一步的提高。

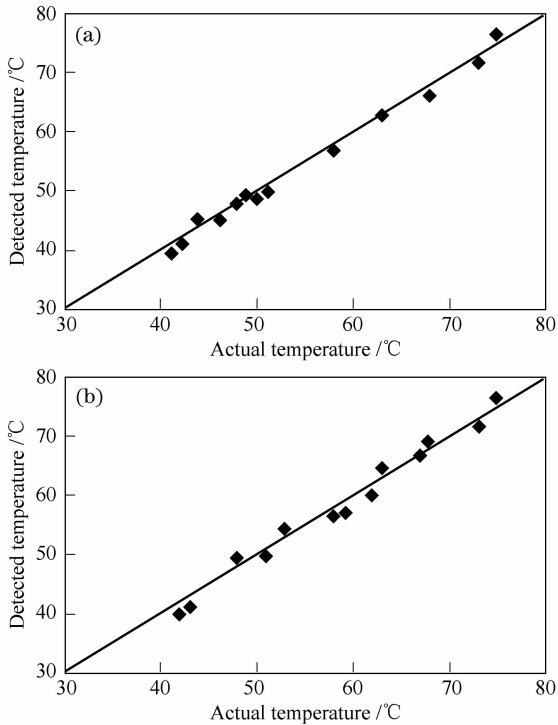


图 7 传感得到的温度与实际温度的对比。

(a) BOTDA; (b) BOTDR

Fig. 7 Comparison between the detected temperature and the actual temperature. (a) BOTDA; (b) BOTDR

4 结 论

布里渊光时域分析和相干检测的布里渊光时域反射计分别具有不同的性能和应用特点,在实际应用中需要加以选择。考虑到两传感器具有相似的光路和电路结构,采用微波电光调制产生关键的可频移探测光或参考光,并应用基于正交偏振控制来抑制偏振相关信号衰弱,实现了 25 km 普通单模光纤的光时域分析与光时域反射结合的布里渊分布式传感器。在 5 m 空间分辨率下, BOTDA 可达到 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度分辨率, BOTDR 可达到 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度分辨率。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。

参 考 文 献

1 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

2 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

3 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

4 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

5 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

6 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, California, OFS 2002, 2002, **1**: 309~312

7 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

8 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

9 X. Bao, J. Dhliwayo, 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

10 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. 微波电光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

11 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Brillouin optical time-domain 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. 基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器[J]. 光学学报, 2005, **25**(8): 1053~1056

12 Song Muping, Zhao Bin, Zhang Xianmin. Optical coherent detection Brillouin distributed optical fiber sensor based on orthogonal polarization diversity reception[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(5): 271~274

13 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

14 G. P. Agrawal. *Nonlinear Fiber Optics & Applications of Nonlinear Fiber Optics* [M]. Jia Dongfang, Yu Zhenhong, Tan Bin *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,余震虹,谈斌等译. 北京:电子工业出版社, 2002: 223~240