

文章编号: 0253-2239(2005)08-1053-4

基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器^{*}

宋牟平 赵斌 章献民

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要: 针对布里渊光时域分析分布式传感原理和受激布里渊散射的特点,应用微波电光调制分布反馈式半导体激光器产生频移可调的探测光,和传感光纤中相反方向传输的脉冲激励光进行受激布里渊散射作用,当探测光和激励光的频率差在布里渊频移附近时,频移探测光和激励光产生受激布里渊散射,通过改变探测光的频移值,检测探测光功率信号,可得到沿光纤各处的布里渊频移,再利用布里渊频移和应变(或温度)的关系,计算得到沿光纤分布的传感量。设计了基于微波电光调制的布里渊光时域分析传感器实验系统,实现了25 km的分布式温度传感,达到5 m的空间分辨力和3 °C的温度分辨力。

关键词: 光学测量; 分布式光纤传感; 布里渊光时域分析; 布里渊散射; 电光调制

中图分类号: TN247 文献标识码: A

Brillouin Optical Time Domain Analysis Distributed Optic-Fiber Sensor Based on Microwave Electrooptic Modulation

Song Muping Zhao Bin Zhang Xianmin

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

Abstract: The technique of Brillouin optical time domain analysis distributed optical fiber sensing has been presented and demonstrated experimentally, which is based on electrooptic modulation. Microwave electrooptic modulation is adopted to produce frequency-adjustable probe light, which is interacted with pulsed pump light via stimulated Brillouin scattering, when the optical frequency difference between probe and pump light is near the fiber's Brillouin frequency shift. The detecting signal of probe light is processed by digital BOXCAR and computer, then the fiber's Brillouin frequency shift could be obtained, and the distributing temperature or stress of the fiber could be calculated. The experimental procedures and results are presented. A laboratory system of 25 km distributed Brillouin optical time domain analysis temperature sensor is achieved, with 3 °C in temperature resolution, and 5 m in spatial resolution.

Key words: optical measurement; distributed optical fiber sensing; Brillouin optical time domain analysis; Brillouin scattering; electrooptic modulation

1 引 言

分布式光纤传感器(DOFS)具有光纤光栅阵列传感器所没有的优点^[1~3]:可以在沿光纤路径上同时得到被测量场在时间和空间上的连续分布信息。在民用和国防等许多场合有独特应用前景,因此受到越来越多的重视。在目前各种分布式光纤传感器中,除了拉曼散射分布式光纤传感器^[1]外,布里渊散射分布式光纤传感器是最具实际应用前景的一种。

布里渊散射分布式光纤传感器可分为两类:频域分析和时域分析。频域分析^[4]虽具有较高的空间分辨力,但传感距离较短(几千米以内);而时域分析布里渊散射分布式光纤传感器可达几十千米以上。时域分析布里渊散射分布式光纤传感器有布里渊光时域分析(BOTDA)和布里渊光时域反射(BOTDR)两种结构,布里渊光时域反射^[5,6]结构的布里渊散射分布式光纤传感器接收的是自发布里渊散射光,光功率

^{*} 国家 863 计划(2001AA602022-1)和浙江省自然科学基金(M603127)资助课题。

作者简介: 宋牟平(1971~),男,浙江临海人,浙江大学副教授,主要从事光纤电子学的研究。E-mail: songmp@zju.edu.cn

收稿日期: 2004-08-13; 收到修改稿日期: 2005-01-27

较弱,难以实现高精度长距离的分布式传感。而布里渊光时域分析^[7~9]利用的是直流探测光和脉冲激励光之间的受激布里渊散射,接收的是较强的直流探测光,较易实现高精度长距离的分布式传感。

本文在以前的布里渊光时域反射结构布里渊散射分布式光纤传感器研究基础上^[6],采用微波电光调制产生频移可控的直流探测光,和脉冲激励光进行受激布里渊散射作用,实现了 25 km 的布里渊光时域分析分布式光纤传感器。

2 原 理

布里渊光时域分析结构的布里渊散射分布式光纤传感器利用的是光纤中的受激布里渊散射,受激布里渊散射是激励光和探测光通过声波进行的非线性相互作用^[9],其作用表现为光纤的布里渊散射增益,布里渊散射增益取决于激励光与探测光之间的频差和光纤的布里渊频移^[9],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。

布里渊频移 ν_B 是温度和应变的函数,和温度 (T)、应力 (ϵ) 有如下关系^[9~11]:

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

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

式中 T_r 为参考温度, $C_\epsilon = 4.6$, $C_T = 9.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ 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

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

$C_\epsilon = 0.0483 \pm 0.0004 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 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;

因此,在布里渊光时域分析分布式光纤传感器中,通过光时域分析方式^[7~9]检测探测光,得到激励光与探测光之间的特定光频差下的探测光功率信号,由探测光功率信号得到传感光纤的布里渊散射增益,再由布里渊散射增益大小的分布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计算得到沿光纤分布的温度或应变。

在布里渊光时域分析结构的布里渊散射分布式光纤传感器中,关键是如何得到可控光频差的直流探测光和脉冲激励光,而且受布里渊散射的制约,两激光必须是窄带光源。目前一般采用温控 Nd:YAG 激光器产生所需的频移光^[7,8],但 Nd:YAG 激光器的光频移难以快速调节且体积较大,不易成为实用的传感器,这里采用单一的分布反馈式半导体激光器作为光

源,其光频率为 ν_p ,应用微波电光调制产生可控光频移的直流探测光。

图 1 是基于微波电光调制的布里渊光时域分析结构布里渊散射分布式光纤传感器实验系统。各部分光信号如下:声光调制(AOM)产生的脉冲激励光(Pump light),其光频率为 $\nu_p + \nu_A$ (ν_A 为声光调制器的多普勒频移);探测光(Probe light)由于微波电光调制产生频移 ν_{LO} ,其光频率为 $\nu_p - \nu_{LO}$ (利用下边带);两束光在传感光纤中相向传输,当探测光和激励光之间的频差 ($\nu_{LO} + \nu_A$) 与某处光纤的布里渊频移 ν_B 一致时,激励光与探测光的受激布里渊散射作用最大,探测光会受到最大的放大或衰减。再通过变化频移 ν_{LO} 和检测探测光功率信号,可得到传感光纤各处的布里渊散射频谱(即探测光功率随光频差的分布),从而得到布里渊频移,由布里渊频移与温度或应变的关系 [(1)式~(3)式]可计算出分布传感量。

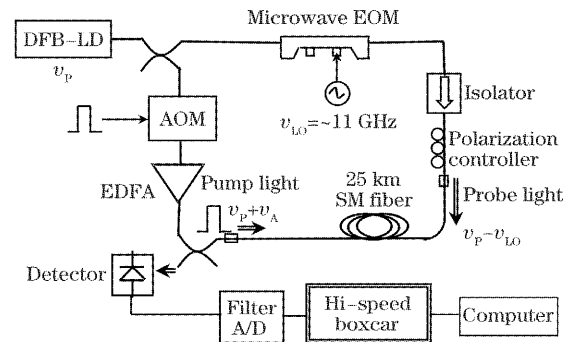


图 1 基于微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感器实验系统

Fig. 1 Experimental arrangement of Brillouin optical time domain analysis distributed optical fiber sensor based on microwave electrooptical modulation

3 实 验

在图 1 所示的布里渊散射分布式光纤传感器实验系统中,采用线宽小于 1 MHz 的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)作为光源;通过光纤耦合器进行光功率分配,一路光作为激励光,首先由声光调制器形成脉宽 50 ns(因此本传感器的空间分辨力为 5 m)、重复频率为 2 kHz 的光脉冲,再经掺铒光纤放大器(EDFA)和耦合器输入到 25 km 普通单模光纤的一端;另一路光作为探测光,经微波电光调制器(Microwave EOM)调制后产生 11 GHz 左右的上下边带频移,再经隔离器和偏振控制器输入到该 25 km 普通单模传感光纤的另一端,隔离器的作用是减少激励光对调制器和光源的影响,偏振控制器是为了控制探

测光的偏振状态,以适应布里渊散射的偏振相关性^[5]。

在图 1 的传感器中,脉冲激励光和直流探测光分别从 25 km 单模光纤的两端入纤,当激励光和频移探测光的频率差($\nu_{LO} + \nu_A$)刚好和某处光纤的布里渊频移一致时,由于受激布里渊散射的作用,高功率的脉冲激励光会把一部分能量传给探测光,即探测光经过此处时被放大。通过与脉冲激励光同步地接收探测光,可得到特定光频率差下探测光在光纤各处受到的布里渊散射。再通过改变微波调制频率,即改变激励光和探测光的光频率差,从而得到传感光纤各处的布里渊散射频谱。图 2 是示波器显示的在光频差为 10.87 GHz 时探测光的光电信号原始波形,这是包含丰富噪声的周期信号,需做进一步的信号处理。

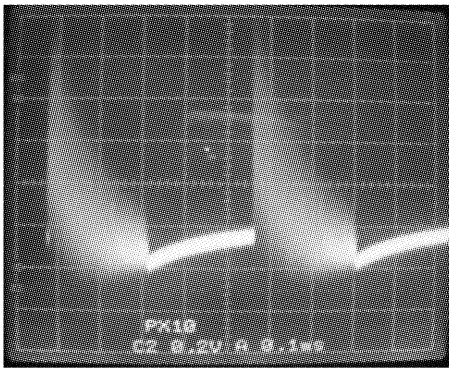


图 2 光电检测信号原始波形

Fig. 2 The original wave of photoelectric signal of probe light

采用数字累加平均器(BOXCAR)进行累加处理来提高信噪比,最后把信号送到计算机进行存储、显示。图 3 是计算机得到的探测光传感信号波形(叠加次数为 2000 次),实验中通过改变微波调制(即探测光)的频率,得到整个布里渊散射频谱的曲线,频谱中心点位于 10.87 GHz 附近。图中散射曲线的不规则起伏是由于受激布里渊散射的偏振相关性引起的,因为这里使用的是机械驱动的光纤环式偏振控制器,响应速度为几十毫秒,难以达到理想的偏振控制,预计采用高速偏振控制器可得到更好的曲线。在图 3 的右上方小图中,显示的是传感光纤某处的布里渊散射频谱,一条是原始数据曲线,另一条是高斯拟合曲线,用于判断布里渊散射中心频移。光纤的布里渊频移受温度和应变的影响是相似的,考虑到实验的复杂性,在实验中进行了分布式温度测试,25 km 传感光纤末端附近有两段光纤放在 50 °C 温水中(5 m 和 15 m 光纤,中间相隔有 10 m

光纤处于室温 25 °C)。

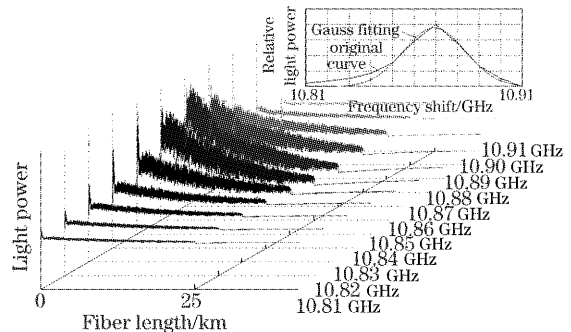


图 3 传感光纤各处的布里渊散射光谱

Fig. 3 The 'panorama' of the Brillouin scattering signal

分析图 3 的布里渊散射信号数据,计算出最大散射信号频率点,可得到传感光纤各处的布里渊频移,再根据前面的布里渊频移和温度的关系[(2)式],计算得到如图 4 所示的温度曲线。在图 4 中的小图中,显示的是光纤末端附近的测试温度分布,可看出 5 m 光纤段为 51 °C 左右,15 m 光纤段为 49 °C 左右,其余光纤约为 25 °C,这和实际实验温度在一定误差范围内相符合。图 4 的温度测试曲线在整体上有大范围起伏,特别在光纤的起始段有明显的起伏,这是由于光纤盘绕产生的固有应力引起的。图 4 中曲线的'本底噪声'(取决于传感光纤的固有应力起伏、系统噪声和偏振干扰等,难以用具体公式表示)决定了温度测量精度约为 3 °C。预计增加数字累加平均器的叠加次数可改善传感信号和测量精度,但会增加累加处理时间使传感器丧失实用性。

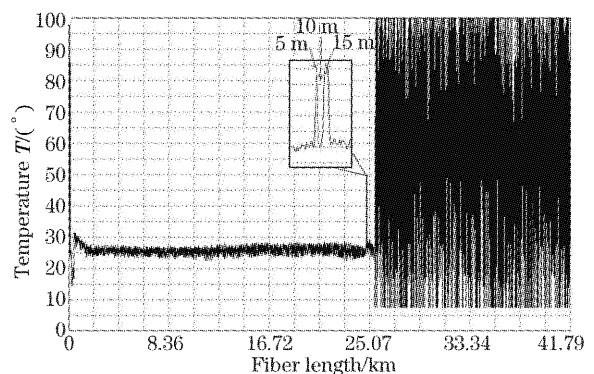


图 4 通过分析图 3 的数据得到的温度曲线

Fig. 4 The temperature curve after analyzing the data of Fig. 3

4 结 论

采用分布反馈式激光器作为单一光源,应用微波光电调制产生可控频移的直流探测光,和脉冲激励光形成受激布里渊散射,构成布里渊光时域分析

分布式光纤传感器。实验中得到光纤的布里渊散射光谱,根据布里渊频移和温度的关系,实现了 25 km 光纤的分布式温度传感。但传感器存在分辨力较低、偏振相关干扰等缺陷,整个传感系统将在以后的工作中得到完善。

参考文献

- 1 Liu Jiasheng, 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 (in Chinese)
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
- 2 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Dong Xiaoyi *et al.*. Theoretical and experimental study of fiber grating multi-point sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 330~336 (in Chinese)
张伟刚,开桂云,董孝义等. 光纤光栅多点传感的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 330~336
- 3 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental research of 30 km long distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(5): 613~616 (in Chinese)
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): 613~1616
- 4 Romeo Bernini, Lorenzo Crocco, Aldo Minardo *et al.*. All frequency domain distributed fiber-optic Brillouin sensing [J]. *IEEE Sensors J.*, 2003, **3**(1): 36~43
- 5 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
- 6 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 (in Chinese)
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
- 7 A. W. Brown, M. D. DeMerchant, X. Bao *et al.*. Spatial resolution enhancement of a Brillouin-distributed sensor using a novel signal processing method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(7): 1179~1183
- 8 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
- 9 R. Bernini, A. Minardo, L. Zeni. A reconstruction technique for stimulated Brillouin scattering fiber-optic sensors for simultaneous measurement of temperature and strain[C]. *Sensors 2002. Proceedings of IEEE*, 2002, **2**(12~14): 1006~1011
- 10 H. Naruse, M. Tateda, H. Ohno *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum [C]. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, IEEE*, 2002, **2**: 309~312
- 11 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