

文章编号: 0253-2239(2004)08-1111-4

# 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术\*

宋牟平

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘要:** 在分析布里渊散射分布式光纤传感器检测原理的基础上, 针对布里渊散射光信号比较微弱且和瑞利散射光之间存在频移的特点, 采用微波电光调制产生频率可调的参考光, 和后向布里渊散射光进行相干检测, 得到放大的布里渊散射光信号, 再用高速模拟数字转换和存储叠加进行时序信号处理, 最后得到分布式传感信号。给出了各部分实验过程和结果, 得出与理论分析一致的布里渊散射光频谱和光强随温度升高而产生变化。实现了 25 km 的分布式温度传感, 初步实验结果证明了方案的可行性。

**关键词:** 光纤传感; 布里渊散射分布式光纤传感器; 电光调制; 光相干检测

中图分类号: TN247 文献标识码: A

## The Technique of Brillouin Scattering-Distributed Optical Fiber Sensing Based on Microwave Electrooptical Modulation

Song Muping

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

(Received 11 June 2003; revised 3 September 2003)

**Abstract:** The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing has been presented and demonstrated experimentally. Brillouin scattering light is very weak, has frequency shift with the Rayleigh scattering light. So microwave electric optical modulation is adopted to produce frequency-adjustable reference light, which is heterodyne detected with Brillouin back-scattering light. The detecting photoelectric signal is first converted into digital signal by hi-speed analog-digital converter, then the digital signal is stored and added, at last the distributed sensing signal with better signal-to-noise ratio is gained. The experimental procedures and results are presented. The results show that the frequency and light intensity of Brillouin scattering light vary with the change of temperature. The 25 km distributed sensing of temperature is achieved, and the primary results confirm that the configuration is feasible.

**Key words:** optic-fiber sensing; Brillouin scattering-distributed optical fiber sensor; electrooptical modulation; optical coherent detection

## 1 引 言

光纤传感器具有无辐射干扰性、抗电磁干扰性好、化学稳定性好等优点, 目前受到越来越多的重视<sup>[1~4]</sup>。其中分布式光纤传感器(DOFS)<sup>[3,4]</sup>不仅具有一般光纤传感器的优点, 而且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分布信息,

显示出十分独特的应用前景。

现有分布式光纤传感器主要有<sup>[3,4]</sup>: 拉曼散射分布式光纤传感器和布里渊(Brillouin)散射分布式光纤传感器等。拉曼散射分布式光纤传感器利用光纤中的自发拉曼散射光是温度的函数。布里渊散射分布式光纤传感器<sup>[5,6]</sup>分析从传感光纤来的布里渊散射光的频移和强度, 得到沿光纤分布的温度和应变。由于布里渊散射光信号受到的衰减和色散较小, 使得布里渊散射分布式光纤传感器适合于长距离(>20 km)分布式传感, 是目前各种分布式光纤

\* 国家 863 计划(2001AA602022-1)资助课题。

E-mail: songmp@zju.edu.cn

收稿日期: 2003-06-11; 收到修改稿日期: 2003-09-03

传感器中最具实际应用前景的一种。本文研究应用于长距离传感的布里渊散射分布式光纤传感器。

## 2 原 理

基于微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术,属于上述的布里渊散射分布式光纤传感器。光纤中布里渊散射光的频移和强度是温度和应变的函数<sup>[5,6]</sup>。其中布里渊频移  $\nu_B$  和温度  $T$ 、应力  $\epsilon$  有如下关系:

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

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

式中  $T_r$  是参考温度,  $C_\epsilon = 4.5$ ,  $C_T = 9.4 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  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  $\lambda = 1553.8 \text{ nm}$  的普通单模光纤,有

$$\delta\nu_B = C_{\nu_\epsilon}\delta\epsilon + C_{\nu_T}\delta T,$$

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

$$C_{\nu_T} = 1.10 \pm 0.02 \text{ MHz/K},$$

布里渊散射光功率  $P_B$  和温度  $T$ 、应力  $\epsilon$  有如下关系:

$$P_B = \frac{k_1 P_R}{k_2(1 + 5.75\epsilon) - 1}, \quad P_B = \frac{AT}{\nu_B^2},$$

式中  $P_R$  是瑞利(Rayleigh)散射系数,其他系数都是和应力、温度无关的因子。对于  $T = 300 \text{ K}$ 、光波长工作在  $\lambda = 1553.8 \text{ nm}$  的普通单模光纤,有

$$\frac{100\delta P_B}{P_B(\epsilon, t)} C_{P_\epsilon} \delta\epsilon + C_{P_T} \delta T,$$

$$C_{P_\epsilon} = -9.0 \times 10^{-6} \mu\epsilon,$$

$$C_{P_T} = 3.2 \times 10^{-3} \text{ K},$$

布里渊散射频移和光功率都是应力和温度的函数,因此通过检测传感光纤的布里渊散射频移和光功率,可得沿光纤一维分布的应力或温度。

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<sup>[7]</sup>通过检测布里渊散射光的响应函数的频谱分布得到传感信息,其结构较复杂,虽具有较高的空间分辨率,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时域分析(BOTDA)和布里渊时域反射(BOTDR)。其中,布里渊时域分析<sup>[8]</sup>需要对传感光纤的两端进行光信号处理,且需光频率精确可变的窄带激光器,光路结构复杂、成本高。

布里渊时域反射<sup>[9,10]</sup>结构的布里渊散射分布式光纤传感器接收的光功率较弱,需要合适的检测方

法,本文采用微波电光调制的光相干检测技术。即由微波电光调制产生频移的参考光,和布里渊散射光进行相干检测,得到放大的检测信号。由于采用了微波调制光相干检测和相应的电信号处理技术,不需要目前普遍使用的光频率精确可调的窄带激光器和声光调制器,技术成本较低且工作稳定。

## 3 实 验

本文采用光相干方法来检测布里渊散射分布式光纤传感器中的散射光信号,如图 1 所示,应用微波电光调制(EOM)技术产生具有可调频差的本地参考光,再和后向布里渊散射光进行光相干检测。

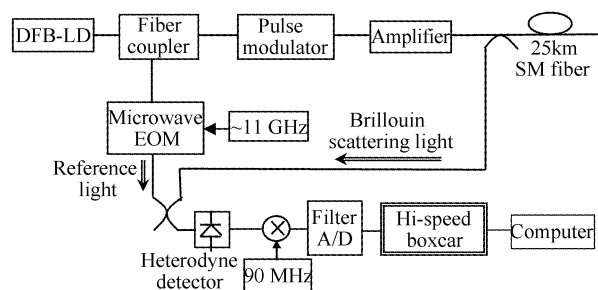


Fig. 1 Experimental arrangement of Brillouin scattering optical fiber sensor based on microwave EOM

在图 1 中,采用频宽小于 1 MHz 的分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)作为光源;通过保偏光纤耦合器(Fiber coupler)进行光功率分配,一路光作为激励光,首先由脉冲调制(Pulse modulator)形成脉宽 200 ns(因此本传感器的空间分辨力为 20 m)、重复频率为 2 kHz 的光脉冲,再经掺铒光纤放大器(EDFA)、耦合器输入到 25 km 的普通单模传感光纤。

另一路本地参考光经微波电光调制器(Microwave EOM)调制后产生如图 2 所示的光频谱。由于我们使用的光谱仪最小分辨波长宽度为 0.07 nm(稳定度为 0.02 nm),图 2 的曲线并不能精细反映实际频谱,但很清楚地看出上下各频移约

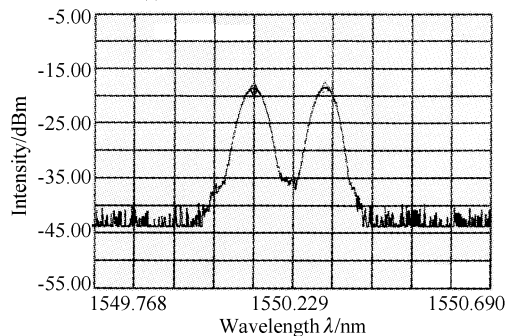


Fig. 2 Reference light spectra after microwave EOM

0.08 nm的频移光,这和我们使用约10.7 GHz的微波调制相吻合,原位于两频移光中间的激励光(1550.224 nm)已受到抑制。

为了观察到布里渊频移,我们先不进行脉冲调制,通过光谱仪直接观察直流激励光从传感光纤返回的布里渊散射光。图3所示的是后向散射光谱,位于1550.224 nm附近的“峰”是瑞利散射光谱线,右边相距约0.08 nm的“峰”是后向布里渊散射光的谱线。

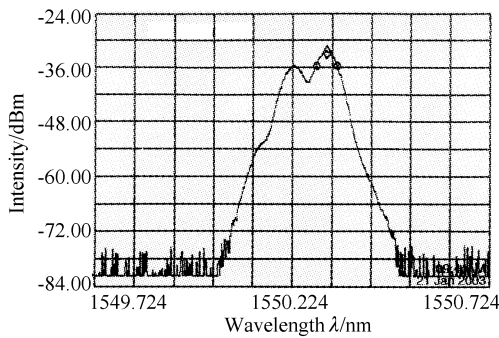


Fig. 3 The backscattering light spectra including Rayleigh scattering and Brillouin scattering

下面我们使用图1所示的完整系统来检测分布式布里渊传感信号,把脉冲调制抽运光从传感光纤返回的布里渊散射光,和通过微波电光调制产生的参考光进行光相干检测,得到如图4所示的原始时域波形。在图4中有两条波形,下面的波形是激励光的脉冲监测波形,由于是200 ns的窄脉冲,图中只是隐约的“直线”。上面的波形是布里渊散射光和本地频移光相干产生的光电信号波形,可看出得到的原始光电信号是一带通的幅度调制信号,并包含有“丰富”的噪声。

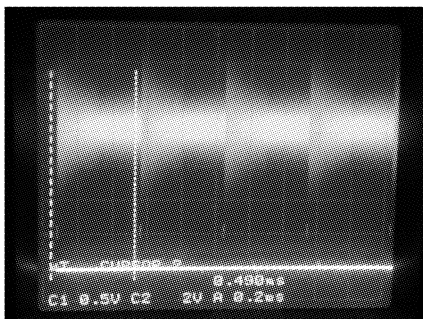


Fig. 4 The original wave of heterodyne detecting photoelectric signal

再把光电信号与本地90 MHz射频信号相加,进行混频,通过滤波器得到低频的幅度基带信号。对基带信号进行高速模-数转换(60 MHz),采用数字采样叠加平均器(Boxcar)进行叠加处理来提高信

噪比,最后把信号送到计算机进行存储、显示。由前面分析可知温度和应变对布里渊散射光的影响是相似的,本文采用改变温度来实验。图5是计算机得到的布里渊散射光传感信号波形(叠加次数为1000次,测量时间为6 s),通过改变微波调制(即参考光)的频率,图中得到整个布里渊散射频谱的曲线,频谱中心点位于10.87 MHz,其中有一段20 m长、位于光纤末端附近的光纤放在温水中(温度为53 °C,室温约25 °C),可看出此段光纤不仅频谱产生移动(移到10.90 MHz附近),而且散射光功率变强了。

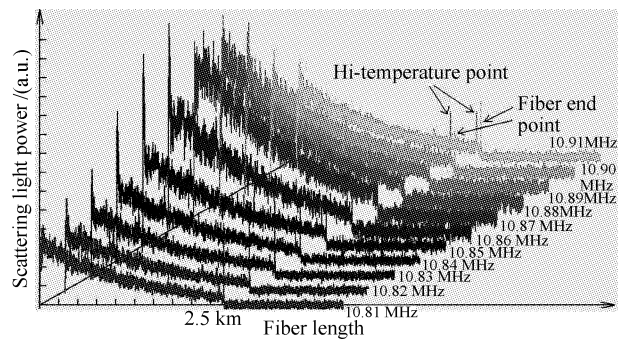


Fig. 5 The sensing curve after processing, the hi-temperature point is near the fiber end

图6根据前面的原理分析图5的数据得到的温度曲线,可看出除了高温段光纤为53 °C左右,其余光纤的温约为25 °C,这和前面的分析相符合。另外从图6中“本底噪声”的大小可得到温度测量精度为3 °C。预计增加采样叠加平均器的叠加次数可改善传感信号和测量精度。

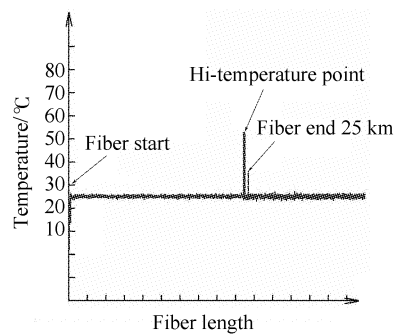


Fig. 6 The temperature curve after analyzing the data of Fig. 5

**结论** 将微波电光调制技术应用于布里渊散射分布式光纤传感器,用于产生频移本地光,和布里渊散射光进行光相干检测,得到检测光电信号,再进行电信号处理得到包含传感信息的基带信号,经高速数字采样叠加平均器的采样叠加处理,得到信噪比较好的传感信号。初步实验结果论证了方案的可行性,

但存在分辨率较低的缺陷,将在以后工作中完善整个传感系统。

### 参 考 文 献

- 1 Zhang Weigang, Kai Guiyun, Zhao Qiang *et al.*. Novel sensing device of fiber Bragg grating with temperature active compensation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8): 999~1003 (in Chinese)
- 2 Wang Xiaodong. Separation and linearization of outputs of polarization-modulated fiber-optic sensor for two-parameter simultaneous measurement. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(4): 485~490 (in Chinese)
- 3 Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1999, **19**(1):100~105 (in Chinese)
- 4 Rogers A J. Distributed optical-fibre sensing: A review. *J. Measurement Science and Technology*, 1999, **10**(8): 75~99
- 5 Naruse H, Tateda M, Ohno H *et al.*. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum. *Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, 2002. OFS 2002, 15th, 2002, 1: 305~308
- 6 Kurashima T, Horiguchi T, Ohno H *et al.*. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques. ECOC '98, Madrid, Spain, 1998. 149~150
- 7 Romeo Bernini, Lorenzo Crocco, Aldo Minardo *et al.*. All frequency domain distributed fiber-optic Brillouin sensing. *IEEE Sensors J.*, 2003, **3**(1): 36~43
- 8 Bao X, Dhliwayo J, Heron N *et al.*. Experimental and theoretical studies on a distributed temperature sensor based on Brillouin scattering. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(7):1340~1348
- 9 Kurashima T, Tateda M, Horiguchi T *et al.*. Performance improvement of a combined OTDR for distributed strain and loss measurement by randomizing the reference light polarization state. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, **9**(3): 360~362
- 10 Maughan S M, Kee H H, Newson T P. A calibrated 27-km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection of spontaneous Brillouin backscattered power. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(5): 511~513