

基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究*

宋牟平 范胜利 陈好 章献民 叶险峰

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

摘要 对布里渊散射分布式光纤传感器(DOFS)检测原理进行了分析,针对布里渊散射光信号的特点,应用光相干和外差技术来检测布里渊散射光信号.具体采用微波电光调制产生频率可调的参考光,和布里渊散射光进行相干检测,根据布里渊频移特性取出布里渊散射光信号,从而得到分布式传感信号.分别实现了 25 km 光纤的分布式温度和应变传感,达到 3℃ 的温度分辨率、100 με 的应变分辨率和 10 m 的空间分辨率.

关键词 分布式光纤传感;布里渊散射;光相干;外差检测

中图分类号 TN212 **文献标识码** A

0 引言

分布式光纤传感器(DOFS)^[1]以其可对被测量场的连续空间进行传感而成为光纤传感器中引人注目的一项技术.现有 DOFS 主要有^[1]:喇曼(Raman)散射 DOFS、布里渊(Brillouin)散射 DOFS 和利用高双折射光纤模式耦合的 DOFS 等.目前最为成熟的 DOFS 是喇曼散射 DOFS^[2],它是利用光纤中的自发喇曼散射光是温度的函数来实现分布式温度传感.但喇曼散射只对温度敏感,并且受其分辨率和传感长度等性能的限制,它不能满足许多应用场合特别是应变传感的需要(如长距离管线的监测).

近几年,布里渊散射 DOFS^[3~9]得到广泛的关注,其利用光纤中布里渊散射光的频移(布里渊散射光和激励泵浦光的频率之差)和强度是温度和应变的函数,通过分析传感光纤的布里渊散射光频移和强度,可得到沿光纤分布的温度和应变.由于布里渊散射 DOFS 一般工作在 1.55 或 1.3 μm 的单模光纤,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 DOFS 适合于长距离(>20 km)分布式传感,是目前各种 DOFS 中最具实际应用前景的一种.

在布里渊散射 DOFS 技术中,关键是如何检测布里渊散射信号,这是由于布里渊散射光和瑞利散射光之间的频移只有约 11 GHz(在 1.55 μm 附近),而瑞利散射光比布里渊散射光强 20 dB 左右,因此两者难以区分开.根据对布里渊散射光的不同处理方法,存在频域分析和时域分析.频域分析^[5]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,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^[6~9]布里渊散射 DOFS 可达几十千米以上.对于长距离的时域分析布里渊 DOFS,光路处理结构有:布里渊时域分析(BOTDA)和布里渊时域反射(BOTDR).BOTDA^[6]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;而 BOTDR^[7~9]只需在光纤的一端进行激光入纤和光信号处理,光路结构较简单.特别在长距离管道或大型建筑的监测中,传感光纤的一端光信号处理是必要的.

本文研究采用光相干和外差检测技术来检测布里渊 DOFS 中的散射光信号,分别实现了温度和应变的传感.

1 原理

1.1 传感机理

光纤中布里渊散射光的频移 ν_B 是温度(T)和应变(ϵ)的函数^[3,4]

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

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

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

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

$$C_{\nu\epsilon} = 0.0483 \pm 0.0004 \text{ MHz}/\mu\epsilon \quad (4)$$

$$C_{\nu T} = 1.10 \pm 0.02 \text{ MHz}/K \quad (5)$$

由以上公式可知,布里渊散射光频移是应变和温度的函数,因此通过检测传感光纤的布里渊散射频移,可得沿光纤一维分布的应变或温度.

1.2 检测技术

BOTDR 结构的布里渊散射 DOFS 接收的光功率较弱,需要合适的检测方法.光学滤光检测^[6]采用高精度的光纤光栅、F-P 干涉仪或反射型马赫-泽德干涉仪^[10]对从传感光纤来的散射光进行滤光,取出有用的自发布里渊散射光,从中得到应力或温度

*国家“863”计划项目(2001AA602022-1),浙江省自然科学基金(M603127)资助

Tel.:0571-87951699 Email:songmp@zju.edu.cn

收稿日期:2003-12-15

传感信息. 由于布里渊频移只有约 11 GHz(波长在 1.55 μm), 所以很难在复杂环境下调整光纤光栅、干涉仪而得到稳定的输出. 光相干检测方法^[8,9]是先获得具有一定频差的两激光: 激励光和参考光, 然后, 激励光入射到单模传感光纤中, 产生的散射光(包括布里渊散射光和瑞利散射光)和参考光一起进行光相干检测. 由于布里渊散射光和瑞利散射光之间存在布里渊频移, 通过电路处理可取出布里渊散射光产生的光电流信号. 在光相干检测方法中关键是如何产生两相干激光, 可采用声光调制^[8]产生, 也可直接利用同一光源^[9], 这里采用微波电光调制产生.

我们采用如图 1 所示的光相干检测法来检测布里渊散射 DOFS 中的散射光信号. 激励光(Pump light)的频率为 ν_p , 产生的布里渊散射光频率为 $\nu_p - \nu_B$, 瑞利散射光频率为 ν_p ; 本地参考光(Reference light)的频率为 $\nu_p - \nu_{LO}$, ν_{LO} 为参考光相对于激励光的频移, 为了电子信号处理方便, 其大小一般和 ν_p 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 $\nu_{PH-B} = \nu_{LO} - \nu_B$, 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 $\nu_{PH-R} = \nu_{LO}$, 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.

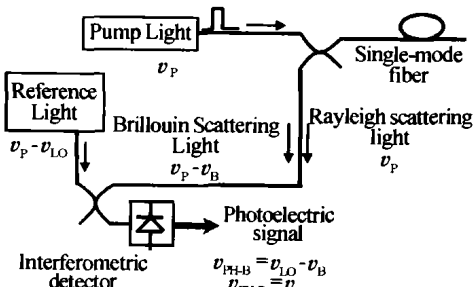


图 1 布里渊散射 DOFS 的光相干检测原理图
Fig. 1 The optical interferometric detection method for Brillouin scattering DOFS

2 实验

具体采用如图 2 所示的光相干外差检测的布里

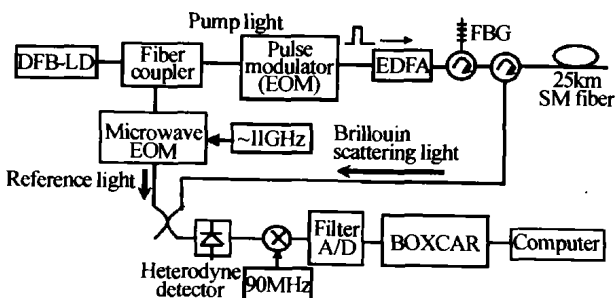


图 2 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 实验系统图
Fig. 2 Experimental arrangement of Brillouin scattering optical fiber sensor based on optical interferometric heterodyne detection

渊散射 DOFS 实验系统, 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外差检测.

在图 2 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; 通过光纤耦合器(Fiber coupler)进行光功率分配, 一路光作为激励光用于脉冲调制, 另一路光作为本地参考光. 对于激励光, 先由脉冲调制(Pulse modulator)形成脉宽 100 ns、重复频率为 2 kHz 的光脉冲, 经掺铒光纤放大器(EDFA)进行光放大, 再通过光纤光栅和环形器进行滤波, 滤掉 EDFA 产生的 ASE 噪声, 最后由环形器输入到 25 km 的普通单模光纤. 本地参考光由微波电光调制器(Microwave EOM)调制后产生, 调制后产生的上下边带频移取决于微波频率.

把从环形器出来的传感光纤布里渊散射光, 和通过微波电光调制产生的本地频移参考光进行光相干检测, 得到如图 3 所示的原始信号波形. 采用外差检测技术, 通过调整微波频率(= 10.740 GHz)使得布里渊散射光和本地频移光的频率差为 90 MHz, 即图中的光电信号波形的中心频率为 90 MHz. 由图中可看出, 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.

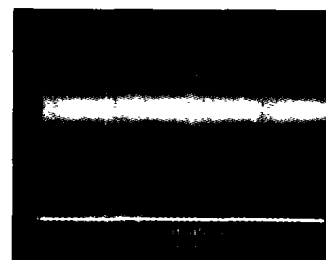


图 3 光相干检测产生的光电信号原始波形
Fig. 3 The original wave of heterodyne detecting photoelectric signal

再把光电信号与本地 90 MHz 射频信号相乘, 进行混频, 通过滤波器(Filter)得到低频的幅度基带信号. 对基带信号进行高速(80 MHz) A/D 转换, 采用数字采样累加平均器(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. 通过改变微波调制频率(即完成一次频率扫描), 得到如图 4 所示的频移位于 10.81-10.91 GHz 之间的

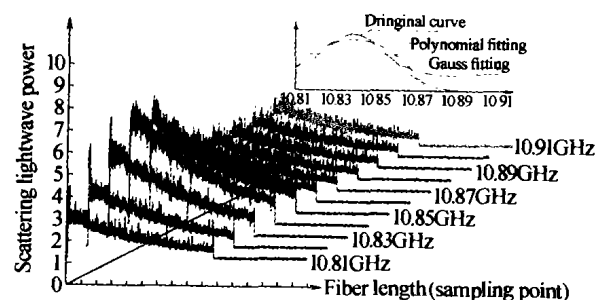


图 4 传感光纤各处的布里渊散射光谱
Fig. 4 The ‘panorama’ of the Brillouin scattering signal

布里渊散射信号. 由图 4 可看出具有洛伦兹曲线形状的布里渊散射频谱, 图中右上方的小图是光纤上一处的布里渊散射光频谱, 其中折线是实际数据所描绘的, 其他两条曲线分别是采用高斯函数和多项式进行拟合得到的曲线, 目的是得到传感光纤上各处的频谱移动, 从而得到传感的温度或应变信息.

利用布里渊散射光的频移与温度的关系式(1, 4), 得到如图 5 所示的 25 km 传感光纤的温度分布曲线, 测试时环境温度约为 20℃. 位于传感光纤末端附近的两段光纤放在温水中, 如图 5 中的放大图所示, 其中的 10 m 段光纤放在 35℃ 温水中, 20 m 段光纤放在 45℃ 温水中, 中间的 15 m 光纤处于室温中. 从测试结果可看出, 大部分光纤处于 20℃ 左右, 测试处的 3 段光纤可明显区分出, 因此达到了分布式温度传感的目的. 图 5 中的温度‘波动’是由于光纤本身存在的固有应变和检测噪声引起的, 此‘波动’决定了本传感器的温度分辨率约为 3℃.

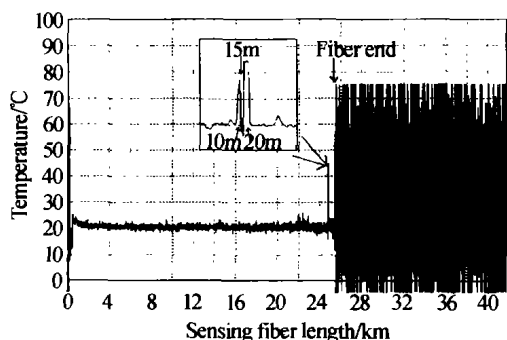


图 5 通过分析布里渊频移信号得到的 25 km 传感光纤的温度分布曲线

Fig. 5 The temperature curve of 25 km sensing fiber based on analyzing the Brillouin scattering frequency-shift signal

利用布里渊散射光的频移与应变的关系式(2, 5), 我们得到如图 6 所示的 25 km 传感光纤的应变分布曲线. 位于传感光纤末端附近的两段光纤被拉伸产生应变, 由图 6 中的放大图所示, 其中的 10 m 段光纤受到 280 微变($\mu\epsilon$), 20 m 段光纤受到 180 微应变($\mu\epsilon$), 中间的 15 m 光纤处于室温中. 从检测的结果可看出, 测试处的 3 段光纤可明显区分出, 因此达

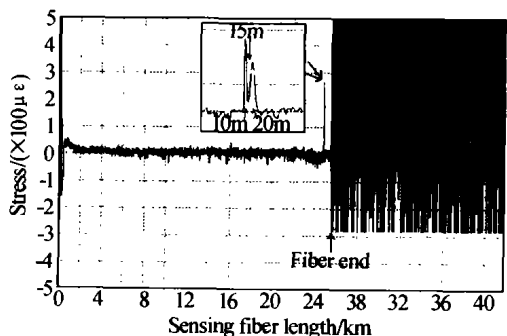


图 6 通过分析布里渊频移信号得到的 25 km 传感光纤的应变分布曲线

Fig. 6 The strain curve of 25km sensing fiber based on analyzing the Brillouin scattering frequency-shift signal

到了分布式应变传感的目的. 图 6 中的应变‘波动’也是由于光纤本身存在的固有应变和检测噪声引起的, 此‘波动’决定了本传感器的应变分辨率约为 $100 \mu\epsilon$

3 结论

本文采用光相干检测的布里渊散射分布式光纤传感技术, 用微波光电调制产生本地频移参考光, 和布里渊散射光进行光相干检测, 得到频率可控的检测光电信号, 再进行信号处理和分析得到分布式温度传感信号和分布式应变传感信号. 传感器已达到 3℃ 的温度传感精度、 $100 \mu\epsilon$ 应变传感精度、10 m 的空间分辨率, 但只能测量温度或应变, 现正研究通过同时检测频移和光功率来同时测量温度和应变.

参考文献

- 1 Rogers A J. Distributed optical-fibre sensing: A review. *Journal of Measurement Science and Technology*, 1999, 10 (8): 75 ~ 99
- 2 耿军平, 许家栋, 李焱, 等. 基于光频域喇曼散射的全分布式光纤温度传感器模型研究. *光子学报*, 2002, 31 (10): 1262 ~ 1265
Geng J P, Xu J D, Li Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(10): 1262 ~ 1265
- 3 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
- 4 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
- 5 Romeo B, Lorenzo C, Aldo M, et al. All frequency domain distributed fiber-optic Brillouin sensing. *IEEE Sensors Journal*, 2003, 3(1): 36 ~ 43
- 6 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
- 7 Wait P C, Hartog A H. Spontaneous Brillouin-based distributed temperature sensor utilizing a fiber Bragg grating notch filter for the separation of the Brillouin signal. *IEEE Photonics Tech Lett*, 2001, 13(5): 508 ~ 510
- 8 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 Tech Lett*, 1997, 9(3): 360 ~ 362
- 9 Maughan S M. A calibrated 27 km distributed fiber temperature sensor based on microwave heterodyne detection

- of spontaneous Brillouin backscattered power. *IEEE Photon Lett*, 2001, 13(5): 511 ~ 513
- 10 何玉钧, 李永倩, 杨志, 等. 全光纤 M-Z 干涉仪及其在光纤自发布里渊散射测量中的应用. *光子学报*, 2002,

31(7): 865 ~ 869

He Y J, Li Y Q, Yang Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(7): 865 ~ 869

Study on the Technique of Brillouin Scattering Distributed Optical Fiber Sensing Based on Optical Interferometric Heterodyne Detection

Song Muping, Fan Shengli, Chen Hao, Zhang Xianmin, Ye Xianfeng

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

Received date: 2003-12-15

Abstract The detecting mechanism and scattering optical signal's characters of Brillouin scattering distributed sensor are analyzed first, then a novel detecting scheme is presented and demonstrated experimentally, which adopts optical heterodyne detection to measure Brillouin scattering signal. In detail, a DFB-LD with < 1 MHz line-width is used as light source, the source is divided into two parts, one part is used as pump light which is modulated into optical pulse (100 ns); the other part acts as reference light which is modulated by microwave electric optical modulator to produce frequency-adjustable light. Then Brillouin back-scattering light is heterodyne detected with the reference light, the detecting photoelectric signal is first converted into digital signal by hi-speed A/D, then the digital signal is stored and added, and at last the distributed sensing signal with better S/N ratio is gained. The distributed detecting of temperature and strain are gotten, and a 25 km distributed sensor is achieved with 3°C in temperature resolution, 100 $\mu\epsilon$ in stress resolution and 10 m in spatial resolution.

Keywords Distributed fiber sensing; Brillouin scattering; Optical interferometer; Heterodyne detect



Song Muping was born in 1971. He received B. S. degree and Ph. D. degree in physical electronics from Zhejiang University in 1993 and 1998 respectively. Since 1998, he works as a teacher in Zhejiang University, now he is an associate professor at the Department of Information and Electronic Engineering. His current R&D areas of interest include optical fiber sensor, optical fiber communication and microwave photonics.