

# 波分复用串联的布里渊散射分布式光纤传感器\*

宋牟平 郑晓 章献民

(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

**摘要** 在一定分辨率和响应时间要求下,应用波分复用技术来串联布里渊散射分布式光纤传感器,解决了同时进行传感和通信存在的信号干扰. 具体是采用波分复用来隔离传感光信号与通信光信号,同时应用光相干外差接收来分离传感与通信之间的电信号频谱. 实现了两台布里渊散射分布式光纤传感器之间的串联,单台传感器的传感距离为 25 km,串联后达到 50 km.

**关键词** 分布式光纤传感器;布里渊散射;波分复用;光外差检测

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A

## 0 引言

光纤传感器具有无辐射干扰、抗电磁干扰、化学稳定性好等优点,其中分布式光纤传感器(DOFS)<sup>[1,2]</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. 布里渊散射 DOFS<sup>[3~9]</sup>检测从传感光纤来的布里渊散射光频移或强度,分析得到沿光纤分布的温度或应变. 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 DOFS 适合于长距离分布式传感.

但在一定的空间分辨率(如 5 m)和系统检测响应时间(如 <60 s)下,布里渊散射 DOFS 的传感距离有限(<30 km),而在有些应用场合,如长距离管道的监测,需要大于 50 km 的传感长度,这是单个布里渊散射 DOFS 难以达到的. 而且有些应用场合需要传感和通信同时在一根光纤上完成. 本文研究采用波分复用串联的布里渊散射 DOFS,基本满足了这些应用场合的要求.

## 1 原理

### 1.1 传感机理

布里渊散射 DOFS 利用的是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>[3,4]</sup>. 其中布里渊频移  $\nu_B$  和温度( $T$ )、应力( $\epsilon$ )如

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

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

式中,  $T_r$  是参考温度,  $C_\epsilon = 4.6$ ,  $C_T = 9.4 \times 10^{-5} 1/K$  分别是应力和温度的比例系数. 因此通过检测传感光纤的布里渊散射频移,可得到沿光纤一维分布的

应力或温度.

### 1.2 检测技术

长距离布里渊散射 DOFS 有布里渊时域分析 BOTDA 和布里渊时域反射 BOTDR, BOTDA<sup>[5]</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,光路结构较复杂. 而 BOTDR 只需一端光信号处理,所以本文采用的是 BOTDR 结构. BOTDR<sup>[6~9]</sup>结构布里渊散射 DOFS 接收的光功率较弱,需要合适的检测方法,可采用相干检测法<sup>[6]</sup>或直接滤波法<sup>[7]</sup>. 本文采用基于微波光电调制的光相干检测技术<sup>[8]</sup>,由微波光电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.

图 1 是采用光相干外差技术<sup>[8]</sup>来检测 BOTDR 的散射光信号. 激励光(Pump Light)的频率为  $\nu_P$ ,产生的布里渊散射光频率为  $\nu_P - \nu_B$ ;本地参考光(Reference Light)的频率为  $\nu_P - \nu_{LO}$ ,  $\nu_{LO}$ 为参考光相对于激励光的频移,为了实现电子信号的外差检测,其大小和  $\nu_B$  相异;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  $\nu_{PH-B} = \nu_{LO} - \nu_B$ ,其信号频率可由参考光频移来调整,为几十兆赫到几百兆赫的较低频率.

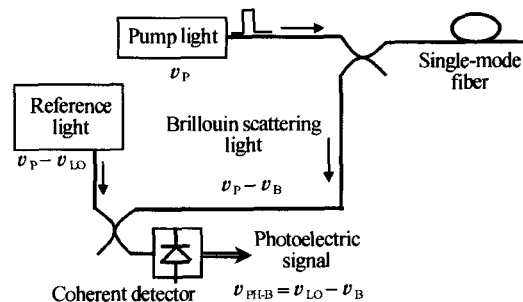


图 1 BOTDR 结构布里渊散射 DOFS 的光相干检测原理图  
Fig. 1 The optical coherent detection method for Brillouin scattering DOFS with the structure of BOTDR

### 1.3 波分复用串联布里渊散射 DOFS

在一定的分辨率和系统响应时间要求下,单个

\*国家“863”计划(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:2005-04-12

布里渊散射 DOFS 的传感距离有限,采用波分复用串联的布里渊散射 DOFS 来扩展传感距离,在一根光纤上同时完成传感和通信. 图 2 是波分复用串联的布里渊散射 DOFS, DOFS1 和 DOFS2 是两个串联的 DOFS,两传感器分别对 Fiber1 和 Fiber2 进行传感,通过波分复用器把 1.55 μm 传感光信号与 1.3 μm 通信光信号分开,以太网(Ethernet)接口完成通信功能. 在实现中需解决涉及信号干扰的两个方面问题. 一方面,由于 BOTDR 工作时采用的是高功率(>20 dBm)激励光,而光纤以太网介质转换器接收的是小于-10 dBm 的光功率,需减少高功率传感光对通信接收的影响. 另外, BOTDR 接收的是自发布里渊散射光,非常微弱,要求 WDM 器件在分离传感与通信光信号时,对 1.55 μm 传感光信号的衰减应尽可能小. 本文采用高隔离度熔融拉锥型 1.3 μm/1.55 μm 波分复用器,波长隔离度大于 40 dB,插入损耗小于 1.2 dB. 图 3 是实验研制的基于波分复用和单芯双向传输的 10 M 以太网介质转换器.

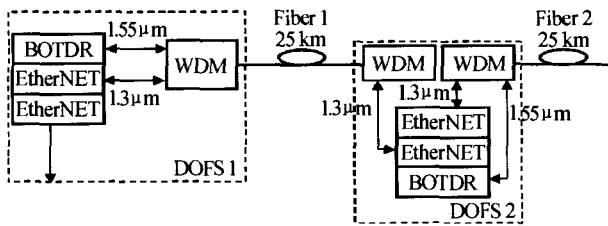


图 2 波分复用串联的布里渊 DOFS  
Fig. 2 Brillouin scattering DOFS series connected by WDM

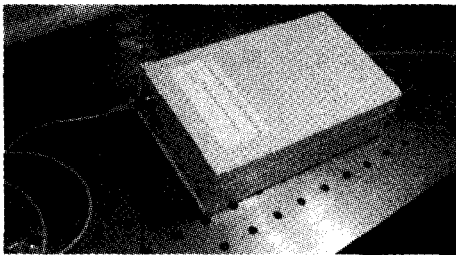


图 3 波分复用单芯双向以太网介质转换器  
Fig. 3 Ethernet converter based on WDM and single-fiber-two-direction

另一方面,光纤以太网介质转换器发送的光功率大于-10 dBm,而自发布里渊散射光功率小于 μW 数量级,需解决通信光对传感信号接收的影响. 在采用波分复用来分离传感和通信光信号的基础上,再应用光相干外差检测技术,使得布里渊散射光的光电流频率  $\nu_{PH-B} = \nu_{LO} - \nu_B$  位于 90 MHz 左右,而光纤以太网传输信号在 10 MHz 左右,从而可通过电路滤波来消除通信光对传感信号接收的影响.

## 2 实验

采用波分复用和光相干外差检测技术,设计了

波分复用串联布里渊散射 DOFS 实验系统. 图 4 是波分复用串联的单个布里渊散射 DOFS,多个这样的传感器组成如图 2 的串联系统. 在图 4 中,接头 FC 外接前后两根光纤,FC1 接本传感器的传感光纤,FC2 接串联传感器的传感光纤. 对于传感光信号,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<sup>[9]</sup>,再和后向布里渊散射光进行光相干检测;对于来自两光纤的通信光信号,通过波分复用、单芯双向以太网接口和计算机进行处理.

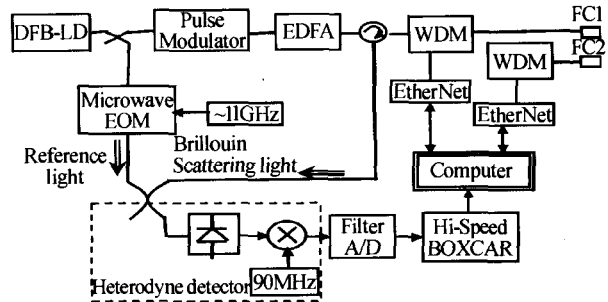


图 4 波分复用串联的单个布里渊散射 DOFS 原理图  
Fig. 4 Schematic diagram of single Brillouin scattering optical fiber sensor series connected by wavelength division multiplexing

在图 4 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;通过光纤耦合器进行光功率分配,一路光作为激励光,先调制成宽度为 50 ns(因此本传感器的空间分辨率为 5 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)调制后产生可调频移的参考光. 从传感光纤返回的布里渊散射光和参考光进行光相干外差检测,得到放大的布里渊散射光的光电流信号,通过调整微波调制频率使得传感信号和通信信号处于不同频段. 图 5 是经过滤波后的布里渊散射光的光电流信号波形(模拟示波器显示). 传感信号再经过检波、A/D 转换、BOXCAR 的累加平均和计算机处理,得到传感光纤的布里渊频移信息,再根据布里渊频移与温度或应变的关系,可计算得到温度或应变的分布传感信息.

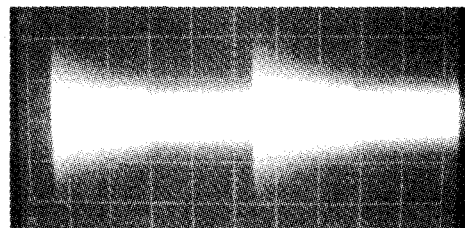


图 5 经过滤波后的布里渊散射光外差检测光电流波形  
Fig. 5 The heterodyne detecting photocurrent curve of Brillouin scattering light after filtering

图 4 的其余部分用于完成两根传感光纤的波分

复用通信功能,包括:波分复用器、以太网接口和计算机处理.波分复用器分开 1.55  $\mu\text{m}$  传感光与 1.3  $\mu\text{m}$  通信光,图 6 是经过波分复用器后通信端口的光频谱(光频谱分析仪显示),可看出 1.55  $\mu\text{m}$  传感光得到抑制.经过波分解复用后的通信光输入到以太网接口和计算机,完成通信功能.

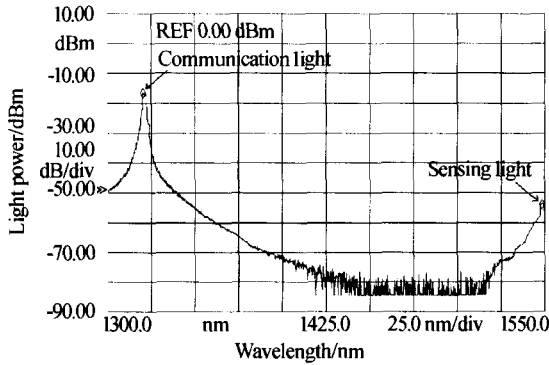


图 6 经过波分解复用后通信端口的光频谱  
Fig. 6 The optical spectrum at communication port after WDM

基于图 4 的波分复用串联的布里渊散射 DOFS,进行了图 7 的串联传感实验.布里渊散射 DOFS1(B-DOFS1)的传感光纤为 Fiber1,布里渊散射 DOFS2(B-DOFS2)的传感光纤为 Fiber2,另外一台普通计算机(作为客户端)通过网线和 B-DOFS1 相连,在客户端计算机上就可同时得到两条光纤(Fiber1 和 Fiber2)上的传感信息.

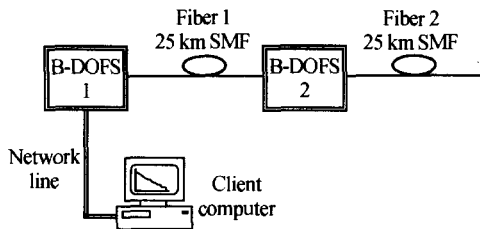


图 7 串联通信布里渊散射 DOFS 的实验系统  
Fig. 7 The experimental arrangement of series connected B-DOFS

图 8 是客户端计算机显示的 50 km 光纤的布里渊频移信息,可看出两条光纤的布里渊频移有差别,每条光纤的起始段有较大的布里渊频移起伏,这是由于光纤盘绕引起的固有应变.在实验中,考虑到温度和应变对布里渊频移的影响具有相似性,只进行了温度测试实验.位于 Fiber2 尾端的 2 段光纤(5 m 和 10 m)被放入 40 $^{\circ}\text{C}$  温水中,中间一段光纤(10 m)处于室温 15 $^{\circ}\text{C}$  左右,从图 8 的放大小图可看出,这 3 段光纤随传感距离变化的布里渊频移可明显区分开,达到了分布式温度传感.

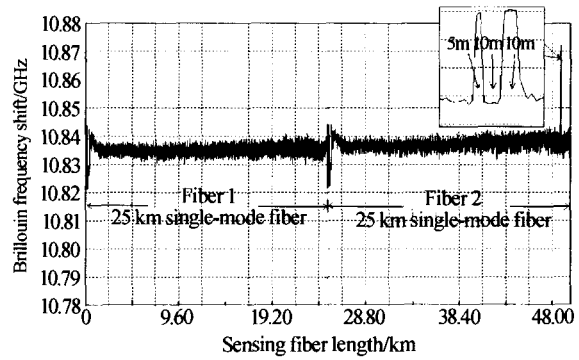


图 8 串联通信布里渊散射 DOFS 的 50 km 传感光纤布里渊频移曲线  
Fig. 8 Series connected B-DOFS's Brillouin shift curve of 50 km sensing fiber

### 3 结论

本文采用波分复用/解复用技术来分离传感光信号与通信光信号;同时利用光相干外差接收,一方面检测出布里渊散射光的频移,以判断待测物理量的大小,另一方面调整其频率使其远离通信信号所在频率.实现了两台布里渊散射分布式光纤传感器之间的串联,单台传感器的传感距离为 25 km,串联后达到 50 km.实验结果论证了方案的可行性.

### 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): 1261~1265  
Geng J P, Xu J D, Li Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2002, 31(10): 1261~1265
- 3 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, Portland, Oregon, USA, 2002, 1: 305~308
- 4 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
- 5 Bao X, Dhlwayo 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
- 6 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

- 7 杨志,李永倩,何玉钧,等. 分布式光纤布里渊散射温度传感实验系统. 光子学报, 2003, **32**(1): 14~17  
Yang Z, Li Y Q, He Y J, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(1): 14~17
- 8 宋牟平,范胜利,陈好,等. 基于光相干外差检测的布里渊散射 DOFS 的研究. 光子学报, 2005, **34**(2): 233~236  
Song M P, Fan S L, Chen H, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(2): 233~236
- 9 宋牟平. 微波电光调制的布里渊散射分布式光纤传感技术. 光学学报, 2004, **24**(8): 1111~1114  
Song M P. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114

## Brillouin Scattering Distributed Optical Fiber Sensors Series Connected by Wavelength Division Multiplexing

Song Muping, Zheng Xiao, Zhang Xianmin

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

Received date: 2005-04-12

**Abstract** For a given resolution, single Brillouin scattering distributed optical-fiber sensor can only reach a definite sensing length, and in some applications, sensing and communication should be run in a single fiber. Wavelength division multiplexing and optical heterodyne detecting were used to series connect Brillouin scattering distributed optical-fiber sensors. Wavelength division multiplexing was adopted to isolate the sensing light and the communication light. The optical heterodyne detecting was used to vary the spectrum of sensing signal from the communication signal. The series connecting between two Brillouin scattering distributed optical-fiber sensors was achieved, the sensing length of single sensor was 25 km, and the sensing length of two series connecting sensors was 50 km. The experimental results show that the configuration is feasible.

**Keywords** Distributed optical fiber sensor; Brillouin scattering; Wavelength division multiplexing; Optical heterodyne detecting



**Song Muping** was born in 1971. He received the B. S. degree and the 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.