

# 基于自发布里渊散射的双路分布式 光纤传感器设计与实现

梁 浩, 张旭苹, 路元刚

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210093)

**摘要** 利用光纤中的布里渊散射光频移与温度和应变呈线性关系的原理,提出了一种基于自发布里渊散射的双支路分布式光纤传感系统。该系统利用不同种类光纤的布里渊频移差别,同时对两条线路的应力和温度进行监测,实现对被测对象多方位的同时测量,缩短了探测时间,提高了工作效率。本文实现了两路光纤的同时监测,用6 km的光纤作为传感介质,获得了4 m的空间分辨率。得到的实验结果表明,提出的系统能准确判断40 ns脉冲光在两路传感光纤沿线产生的自发布里渊背向散射光谱的中心频率变化。

**关键词** 分布式光纤传感;光时域反射技术;布里渊散射

**中图分类号** :TN253 **文献标识码** :A

## Design and implementation of spontaneous Brillouin scattering based double-trace distributed optical fiber sensor

LIANG Hao, ZHANG Xu-ping, LU Yuan-gang

(*Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

**Abstract** : On the basis of linear dependence of Brillouin frequency shift in fiber on both strain and temperature, this paper proposes a distributed fiber sensing system based on spontaneous Brillouin back-scattering light. By the differences of Brillouin shifts from different kinds of optical fibers, this system can be used to distinguish the sensing area, and to obtain the temperature and strain information of different lines at the same time, so that the detecting time is shortened and work efficiency is improved. Proposed system realizes synchronous detection for two optical fiber lines, and obtains the 4 m resolution when a 6 km fiber is used as sensing media. Obtained experimental results show that the system can get the variety of the spontaneous Brillouin back-scattering light caused by a 40 ns pulse in the two sensing lines.

**Key words** : distributed optical sensor; time domain reflectory technology; Brillouin scattering

## 1 引言

布里渊光时域反射技术(BOTDR)利用光纤中自发布里渊散射光谱频移量与光纤温度和所受应力的线性关系来获取光纤沿线温度与应力的分布情况<sup>[1]</sup>。它使用普通的通信光纤进行分布式传感,具有传感范围大、精度高、耐久性好等特点,已用于桥梁、大坝等大型建筑结构的健康监测<sup>[2,3]</sup>。目前的 BOTDR 技术同一时间内只能监测一条光纤线路的环境变化。本文根据布里渊散射在光纤中传输的特点,提出一种采用两根光纤作为传感介质,能同时监控两条线路的布里渊分布式光纤传感器。该传感器利用不同种类光纤返回的布里渊频移差别来区分不同线路上的应变和温度变化情况,可以实现对被测对象多方位的同时测量,缩短探测时间,提高传感器的工作效率。

## 2 原理

布里渊效应可以描述为泵浦波、斯托克斯波通过声波进行的非线性作用,泵浦波通过电致伸缩产生声波,然后引起介质折射率周期性调制。泵浦引起的折射率光栅通过布拉格衍射散射泵浦光,由于多普勒位移与以声速  $v_a$  移动的光栅有关,散射光产生了频率偏移。当散射发生在背向时,布里渊散射频移  $\nu_B$  最大,即:

$$\nu_B = \frac{2nv_a}{\lambda_p} \quad (1)$$

其中  $n$  为光纤纤芯折射率,  $v_a$  为声波速度,  $\lambda_p$  为入射泵浦光波长。布里渊谱宽  $\Delta\nu_B$  很窄,这与声波的阻尼时间或是声子寿命有关。

当光纤受温度或者轴向应力影响时,布里渊频移会发生变化,如公式(2)所示:

$$\nu_B = (\Delta\varepsilon \Delta T) = \nu_B(0, \rho) + C_\varepsilon \Delta\varepsilon + C_T \Delta T \quad (2)$$

其中  $\Delta\varepsilon$  和  $\Delta T$  分别为应力和温度的变化量,  $C_\varepsilon$  和  $C_T$  分别为布里渊频移的应力和温度系数。

事实上,考虑到声波是呈指数衰减的,布里渊增益谱具有洛仑兹曲线形状,如式(3):

$$g(\nu) = g_0 \frac{(\Delta\nu_B/2)^2}{(\nu - \nu_0)^2 - (\Delta\nu_B/2)^2} \quad (3)$$

其中  $g_0$  是布里渊散射峰值增益系数,  $\Delta\nu_B$  是布里渊散射谱半峰全宽,  $\nu_0$  为布里渊增益谱的中心频率,即增益达最大时的布里渊频移<sup>[4,5]</sup>。

当短脉冲光在光纤中传播时,会向后散射布里渊信号,可以通过监测散射的布里渊信号,并根据探测到信号与脉冲光发出的时延  $t$  来进行定位,如式(4)所示。

$$x = \frac{c}{2n} t \quad (4)$$

其中  $x$  为光纤位置,  $c$  为光在真空中的传播速度,  $n$  为光纤纤芯折射率。

由于光纤掺杂或数值孔径不同,光脉冲在光纤内传播过程中散射的布里渊频移量也有差别。当两根光纤的布里渊中心频率相差超过布里渊增益 3 dB 带宽的两倍时,理论上可以利用同一采集和数据处理系统对两根光纤的布里渊散射谱进行处理,得到对应的温度和应力变化。

## 3 实验系统

实验系统框图如图 1 所示。1 550 nm 窄线宽 DFB 激光器出射连续光被 95/5 光耦合器 C1 分为两条光路:探测光路和参考光路。5% 端的输出作为探测光路,经过偏振控制器(PC),进入 11 Gb/s 的电光调制器(EOM)产生光脉冲,然后经过掺铒光纤放大器(EDFA)放大,再经过环形器 1 和光纤布拉格光栅 FBG1(中心波长为 1 550 nm, 3 dB 带宽为 0.1 nm, 反射率为 80%) 组合滤波,滤除放大后的 ASE 噪声。最后得到高功率、高消光比、低噪声的探测脉冲信号。该脉冲信号在进入探测光纤前,经过一个 95/5 的耦合器 C2,将 5% 的脉冲信号输入光示波器监控脉冲形状。探测脉冲经过光隔离器通过 50/50 的光耦合器 C3 分别进入两根传感光纤。图 1 中光纤 1 为 5 km 单模光纤;光纤 2 为 6 km 大有效面积光纤(LEAF)。返回的散射信号通过耦合器的一端进入环形器 2 和 FBG2(中心波长为 1 550.09 nm, 3 dB 带宽为 0.1 nm, 反射率为 80%),将同时反射回来的瑞利散射光和反斯托克斯光滤除,得到包含应变和温度信息的布里渊散射光。

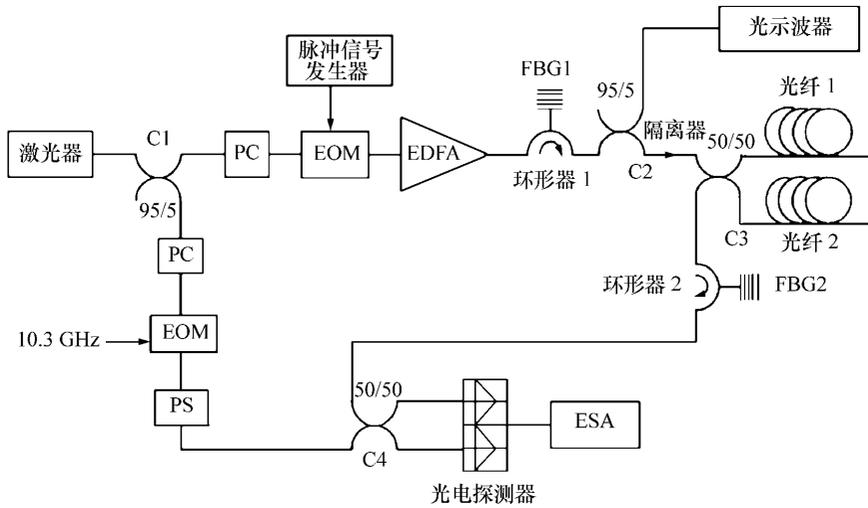


图 1 实验框图

Fig. 1 Experimental diagram

耦合器 C1 的 95% 端口输出的信号作为参考光,通过偏振控制器,进入 12.5 GHz 的电光调制器,被 10.3 GHz 的微波信号调制成两个边频信号,与返回的频移约为 11 GHz 的布里渊散射信号混频后,用探测带宽为 1 GHz 双平衡光电探测器进行探测。扰偏器(PS)的作用是消除信号的偏振噪声。

传感光纤 1 为单模光纤,长度为 5 km,光纤在 400 ~ 500 m 以及 3 900 ~ 4 000 m 受应变,在 4 150 m 处有一段长度为 29 m 的光纤分成 3 段如图 2 所示,其中长度为 15 和 10 m 的两段光纤分别放入恒温箱中加热至 35 °C,其前后以及中间 3 m 光纤处于 20 °C 的室温下。传感光纤 2 为 3 段布里渊中心频率不同的大有效面积光纤,长

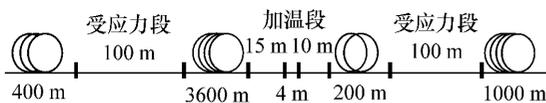


图 2 单模光纤受温度和和应力情况

Fig. 2 Strain and temperature distribution of SMF

度分别为 2 000、2 500 和 4 000 m,如图 3 所示。探测器输出的信号用 26.5 GHz 电频谱分析仪 (ESA) 采集。将 ESA 在某个频率点上设置成 Zero Span 模式可以得到相应频点上的时域信号,

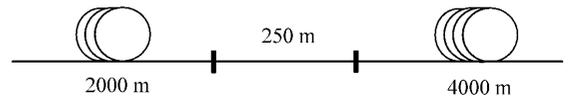


图 3 3 段大有效面积光纤的连接情况

Fig. 3 Configuration of 3 section LEAFs

即该频率的布里渊散射光功率随时间的变化。根据时间和空间的对应关系,如式(4)所示,得到光纤沿线上每一点的布里渊散射谱在该频率处对应的功率。

由于两路传感光纤的布里渊中心频移分别约为 10.46 和 10.86 GHz,考虑到受温度和应力影响以及布里渊频谱有一定宽度,实验中扫描频率范围为 10.41 ~ 10.93 GHz,间隔 10 MHz,同时获得两路光纤沿线的布里渊背散射光频谱的分布情况。根据布里渊散射谱中心频率的变化可以判断光纤受应力和温度影响的大小。

此时获得的频谱为间隔 10 MHz 的频点组成的离散信号,如图 4 中的黑点所示,需要进行数据拟合来提高系统的分辨率。已知布里渊散射光频谱符合洛仑兹曲线,可将每个时刻获得的离散频谱信号分成两个区间用高斯牛顿最小二乘法进行拟合,拟合函数如公式 3 所示。

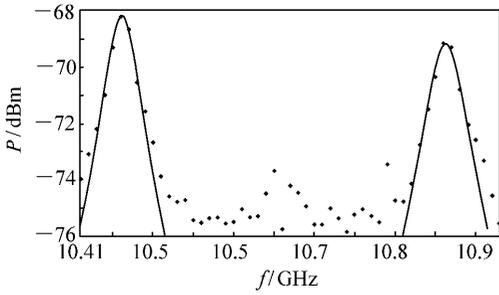


图 4 光纤某点处采集到的布里渊散射信号  
Fig.4 Brillouin back-scattered signals

### 4 实验结果

实验中经 EOM 调制后的探测脉冲宽度为 40 ns,对应空间分辨率为 4 m。EDFA 放大和光纤光栅滤波后的光脉冲峰值功率为 250 mW,经过 50/50 的耦合器,进入两根光纤的探测脉冲峰值功率均为 125 mW。光纤布里渊谱分布的扫频结果如图 5 所示。从图中可以明显区分两根光纤的布里渊频移,其中大有效面积光纤的布里渊频移约为 10.46 GHz,单模光纤的布里渊频移约为 10.86 GHz。

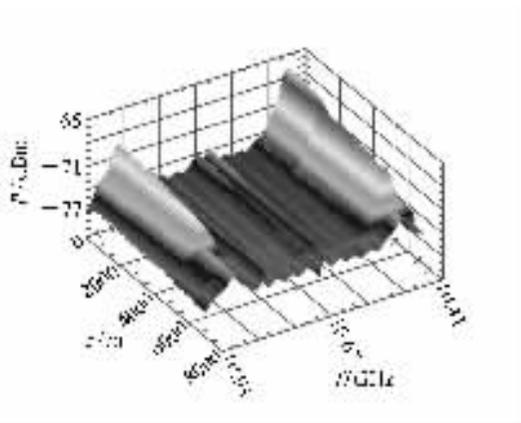


图 5 光纤布里渊散射谱扫频测量结果  
Fig.5 Brillouin spectrum along the fiber

经过拟合的单模光纤沿线布里渊频移如图 6 所示。实验结果显示,在光纤受应力和温度影响处的布里渊频移增大,其中受应力的两端光纤布里渊频率变化 10 MHz。受温度影响的两段长度分别为 15 和 10 m 的光纤布里渊频移如图 7 所示。从图中看到加热处的布里渊频移比室温条件

下的布里渊频移大 8 MHz,并且可以分辨出中间没有加温的 4 m 光纤。大有效面积光纤沿线布里渊频移如图 8 所示。该图可以明显区分出熔接的 3 段布里渊频移不同的光纤长度,与实际情况相符。

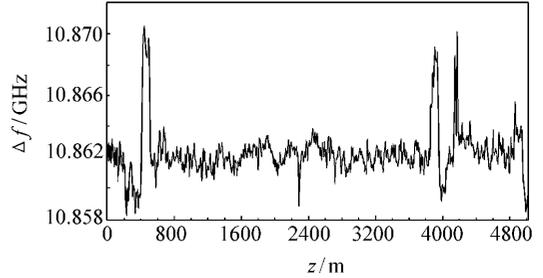


图 6 单模光纤沿线布里渊频移分布  
Fig.6 Brillouin shift along the SMF

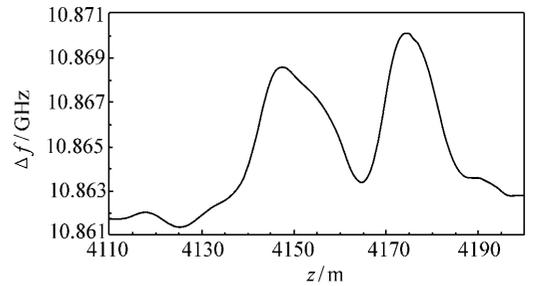


图 7 单模光纤加温段布里渊频移  
Fig.7 Brillouin shift at the position of 4 km

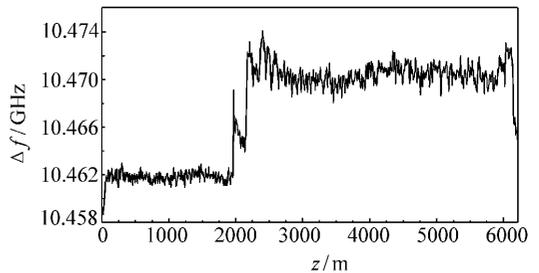


图 8 大有效面积光纤沿线布里渊频移分布  
Fig.8 Brillouin shift along the LEAF

### 5 结 论

本文实现了两路光纤的同时监测,用 6 km 的光纤作为传感介质,获得了 4 m 的空间分辨率。若用高速 A/D 进行采样,用离散傅里叶变换

(DFT)的方法对数据进行处理,可以使得探测频率范围更宽,并且可以同时处理多根光纤的布里渊散射信号,从而进一步提高传感器效率<sup>[6]</sup>。该

方法的局限性在于需要用两根布里渊频移相差较大的光纤进行传感,否则信号容易混叠,影响计算结果的准确性。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG X P, DONG Y M, LU Y G. Brillouin-scattering based fully distributed optical fiber sensing technology and its application in optical cable monitoring[C]. *Proceedings of the 5th International Conference on Optical Communications*, Wuhan, China, 2006: 408-411.
- [2] 吴智深,施斌,原田隆郎,等.可用于结构健康监测的BOTDR光纤变形检出特性试验研究[J].*土木工程学报*, 2005, 38(8): 56-60.  
WU ZH SH, SHI B, HARADA T *et al.*. An experimental study on the measuring characteristics of BOTDR for structure health monitoring[J]. *China Civ. Eng. J.* 2005, 38(8): 56~60. (in Chinese)
- [3] 施斌,徐学军,王颖,等.隧道健康诊断BOTDR分布式光纤应变监测技术研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2005, 24(15): 2622-2628.  
SHI B, XU X J, WANG D *et al.*. Study on BOTDR-based distributed optical fiber strain measurement for tunnel health diagnosis. *Chinese J. Rock Mech. Eng.* 2005, 24(15): 2622-2628. (in Chinese)
- [4] CHO S B, KIM Y G. Pulse width dependence of Brillouin frequency in single mode optical fibers[J]. *Opt. Express* 2004, 12(18): 4339-4346.
- [5] 董玉明,张旭苹,路元刚,等.布里渊散射光纤传感器的交叉敏感问题[J].*光学学报*, 2007, 27(2): 197-201.  
DONG Y M, ZHANG X P, LU Y G *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor[J]. *Acta Opt. Sinica* 2007, 27(2): 197-201. (in Chinese)
- [6] DOU R R, LU Y G, ZHANG X P *et al.*. Analysis on the signal processing of Brillouin backscattered signals in DFT-based Brillouin optical time-domain reflectometer[C]. *The 2nd International Workshop on Opto-electronic Sensor-based Monitoring in Geo-engineering*, Nanjing, China, 2007.

作者简介:梁浩(1983—),女,广西人,博士研究生,研究方向为海底光缆健康监测与数据分析。

Email: lianghao\_09@yahoo.com.cn

张旭苹(1962—),女,江苏人,教授,博士生导师,主要从事光纤通信网络的监控与故障定位、光通信系统关键器件与组件、光纤传感技术及其应用的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn