

布里渊光时域分析仪与马赫-曾德尔干涉仪共同检测传感技术

谢 杭 宋牟平 沈逸铭 董佩君 叶险峰

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 布里渊分布式光纤传感器适用于测量静态的温度/应力, 而马赫-曾德尔干涉仪分布式光纤传感器(DOFS)可测量动态的应变变化。许多应用场合需要静态和动态的传感信息, 这是单机理分布式光纤传感器难以达到的。由于布里渊光时域分析仪(BOTDA)和马赫-曾德尔干涉传感器都采用双向环路传感光纤结构, 通过共用光源和主要光器件, 将布里渊光时域分析仪和马赫-曾德尔干涉传感器相结合。利用布里渊传感测温度, 马赫-曾德尔传感器测振动, 从而可实现多机理多参量传感。搭建了 25 km 传感实验系统, 对于马赫-曾德尔振动传感, 定位精度达到 60 m, 并可计算振动频率; 对于布里渊传感, 在没有振动时传感光纤的始端和末端都为 2 °C 的测量精度, 但在振动时得到始端为 3 °C、末端为 4 °C 的测量精度。

关键词 光纤光学; 布里渊光时域分析仪; 马赫-曾德尔干涉仪; 多机理; 多参量

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s114002

Distributed Optical-Fiber Sensor Combining Brillouin Optical Time Domain Analyzer with Mach-Zehnder Interferometer

Xie Hang Song Muping Shen Yiming Dong Peijun Ye Xianfeng

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

Abstract Brillouin distributed optical fiber sensor is suitable for measuring the static temperature/strain, but Mach-Zehnder interferometer distributed optical fiber sensor (DOFS) can be used to measure the dynamic strain. Many practical applications need static and dynamic sensing information, which is beyond the capability of the single mechanism distributed optical fiber sensor. Considering optical-fiber sensors of Brillouin optical time domain analyzer (BOTDA) and optical-fiber sensors of Mach-Zehnder interferometer are both using the loop sensing fiber structures, BOTDA and Mach-Zehnder interference are combined together by sharing with the same sensing optical fiber, light source, and other optical devices. BOTDA is used to measure temperature, and Mach-Zehnder interferometer is applied to measure vibration. So, the sensor with multi-mechanism and multi-parameter can be achieved. A preliminary 25 km sensing experiment system is built for testing. For Mach-Zehnder's vibration sensing, spatial accuracy can reach to 60 m, and the vibration frequency is able to be obtained. For BOTDA's temperature testing, the beginning and end's measurement accuracy are 2 °C without vibration in existence, and the accuracy becomes 3 °C and 4 °C respectively with vibration.

Key words fiber optics; Brillouin optical time domain analyzer; Mach-Zehnder interferometer; multi-mechanism; multi-parameter

OCIS codes 060.2310; 060.2340; 060.2370

1 引言

分布式光纤传感器(DOFS)^[1]除了具有一般光

纤传感器抗电磁干扰、耐腐蚀以及电绝缘性好等优点, 还能在沿光纤路径上得到被测量场在时间和空

收稿日期: 2012-01-01; 收到修改稿日期: 2012-02-16

作者简介: 谢 杭(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事分布式光纤传感技术方面的研究。E-mail: datou@zju.edu.cn

导师简介: 宋牟平(1971—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光子器件、光纤通信/传感方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn(通信联系人)

间上的连续分布信息^[2,3]。其中的布里渊分布式光纤传感器通过分析其布里渊频移,能测量沿光纤路径的温度或应变的变化情况。常见的布里渊散射 DOFS 有布里渊光时域分析仪(BOTDA)^[4]和布里渊光时域反射计(BOTDR)两种。BOTDR 测量的自发布里渊散射光功率小,限制了测量距离和精度。BOTDA 测量的受激布里渊散射光功率大,可提高测量距离和精度。但布里渊分布式光纤传感器一般只能检测静态或缓慢变化的应变/温度,难以检测出动态应变/力信号(如振动)。

基于马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪的分布式光纤传感器^[5~7],能对动态应变/力信号进行直接检测。其传感的基本原理是光源发出的光经耦合器和传感光纤分成两路构成马赫-曾德尔干涉仪,动态应变/力对传感光纤的作用转化为两路光的相位差,分析光干涉信号可以获得外界传感量信息;再通过构建相向传输的双干涉仪来得到传感位置信息。但由于相位变化和光干涉结果的周期性,以及光偏振的干扰^[8],难以得到准确的静态应变/温度信息。

在实际应用中,有时需要同时得到静态和动态的传感信息,这是单机理(如布里渊散射和马赫-曾德尔干涉仪)分布式光纤传感器难以有效达到的。针对布里渊散射和马赫-曾德尔干涉用到的都是窄带光源,以及两者在传感光纤结构方面具有相似性,即都需要传感光纤环的双端光信号处理。本文通过共用光源、传感光纤和光器件,将布里渊和马赫-曾德尔分布式光纤传感器结合在一起,实现了多机理多参量分布式光纤传感。利用布里渊传感测量静态温度/应力,利用马赫-曾德尔传感测量动态应变/力,从而实现了静态和动态传感量的多参量测量。

2 传感原理和系统

在普通单模光纤中,布里渊散射光的频移与光纤中的有效折射率和超声声速有关,外界温度和应力的变化都能使有效折射率和超声声速产生变化,从而改变布里渊频移。通过检测布里渊散射光的频移就能得到温度或应力在光纤上的分布。布里渊频移的数学表达式^[4]为

$$v_B = 2nv_a/\lambda, \quad (1)$$

式中 v_B 为布里渊频移; n 为光纤纤芯折射率; v_a 为声速; λ 为抽运光的波长。当抽运光的波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 时,布里渊频移约为 11 GHz。布里渊频移与外界温度、应变呈线性关系:

$$\Delta v_B = C_{vT} \Delta T + C_{\epsilon} \Delta \epsilon, \quad (2)$$

式中 Δv_B 为布里渊频移的变化量; $\Delta \epsilon$ 为应变的变化量; ΔT 为温度的变化量; C_{vT} 为布里渊频移-温度系数; C_{ϵ} 为布里渊频移-应变系数; C_{vT} 、 C_{ϵ} 测量可得,在外界温度应变不变时,根据布里渊频移可测得外界应变/温度的变化。

在马赫-曾德尔分布式传感器中,光源发出的信号光经耦合器分为两路,分别进入参考臂和信号臂,信号臂用来感受外界振动。当有振动或者压力作用于光纤信号臂时,会引起信号臂光纤的尺寸或折射率等参数发生变化,导致在其中传输的光波相位产生变化。信号臂和参考臂内传输的两束光之间产生相位差,在会聚时将发生干涉,光强为

$$I = I_1 + I_2 + 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta \phi, \quad (3)$$

式中 I_1 、 I_2 分别为发生干涉两束光的光强, $\Delta \phi$ 为两束光的相位差,外界振动会造成 $\Delta \phi$ 的变化,从而造成检测光功率的变化。通过构建正反两方向的马赫-曾德尔干涉仪,从两干涉信号的波形时间差可判别光纤振动的位置。

如图 1 所示的系统框图为布里渊光时域分析仪和马赫-曾德尔干涉仪相结合的分布式光纤传感器。图 1 中,当进行布里渊光时域分析传感时,采用分布反馈式半导体激光器(DFB-LD)作为光源,计算机控制光开关断开,信号光从光源进入耦合器 1 后分为两路,一路为激励光,经脉冲调制器进行光脉冲调制后,再经掺铒光纤放大器(EDFA)和偏振控制器(PC)进入传感光纤 1 始端;另一路为探测光,经微波电光调制器(EOM)进行调制产生约 11 GHz 的频移光,进入传感光纤 3 末端。光纤 1、3 构成环路。光电检测器(PD)1 检测探测光,其信号反映在一定频移下传感光纤各处的受激布里渊散射大小。当激励光与探测光的频差与光纤中某区域的布里渊频移相等时,在该区域就会产生布里渊放大效应,两光束相互之间将发生能量转移。由于布里渊频移与温度、应变存在线性关系,因此,对激光器的频率进行连续调节的同时,通过检测从光纤一端耦合出来的连续光的功率,就可确定光纤各段区域上能量转移达到最大时所对应的频率差,从而得到温度/应变传感信息。

当进行马赫-曾德尔振动传感时,计算机控制光开关闭合,信号光经耦合器 1 分为两路信号光,一路信号光经耦合器 2 分为两路,分别注入参考臂(光纤 2)和信号臂(光纤 1),再经耦合器 3 进入返回光纤(光纤 3),由 PD2 检测干涉信号,为正向光;另一路

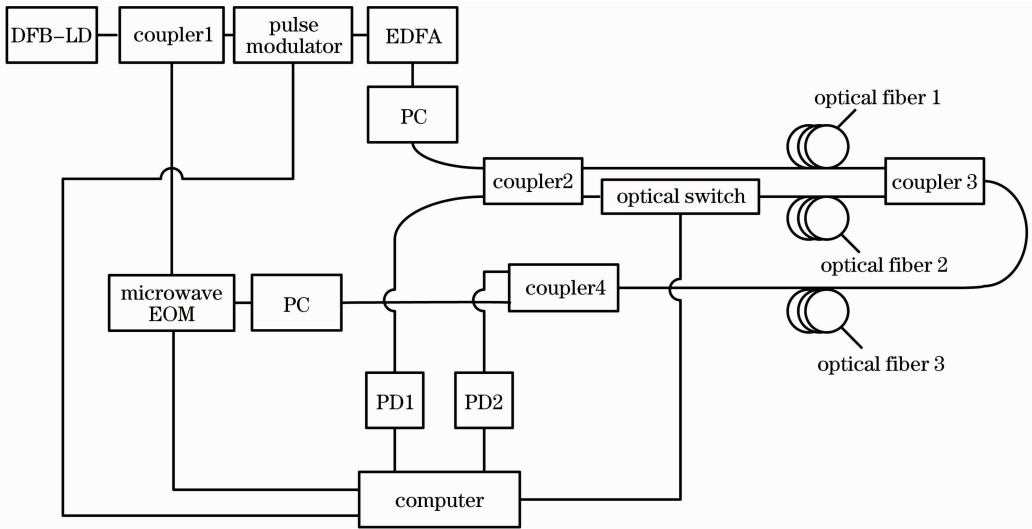


图 1 BOTDA 与马赫-曾德尔干涉仪相结合的实验系统

Fig. 1 Experimental system of DOFS combining BOTDA with Mach-Zehnder interferometer

信号光经耦合器 4 进入返回光纤(光纤 3),再经耦合器 3 进入传感光纤(包括参考臂、信号臂),由 PD1 检测干涉信号,为反向光。正反两路光,形成环路。由于是正反两束光输入,根据接收到两束光光强变化时的时间差,就可以确定发生振动的位置。设信号臂光纤在离耦合器 2 距离为 Z 处发生振动,则容易证明^[9]:

$$Z = \left(L + L_d - \Delta T \cdot \frac{c}{n} \right) / 2, \quad (4)$$

式中 L 为信号臂长度, L_d 为返回光纤长度, n 为光纤纤芯折射率, c 为真空中光速, ΔT 为两个光电检测器的检测时间差。

在图 1 的实验系统工作中,脉冲调制器和微波光电调制器的控制由计算机完成。进行布里渊散射测量时,通过脉冲调制器产生脉冲光,微波光电调制器产生大约 11 GHz 频移的光信号,与原信号一起用作受激布里渊散射作用的两路光。进行马赫-曾德尔干涉测量时,脉冲调制器进行预调制或不调制,正反方向两路直流光都直接来自光源。从而在共用光器件的情况下实现布里渊光时域分析仪和马赫-曾德尔干涉仪相结合的分布式光纤传感。

3 实验结果

图 2 为基于 BOTDA 与马赫-曾德尔干涉相结合测试实验系统。用于测量的光纤都是 G652 光纤,室温在 15 °C 左右。其中光纤 a、d 传输的是从处理系统出来的光信号,光纤 a 中的信号经耦合器分为两路,分别进入参考臂和传感臂,两臂长为 10 m (传感臂大约 6 m 的长度处于恒温箱中)经耦合器

合为一路进入 24.37 km 长光纤,最后沿光纤 c 进入信号处理系统。光纤 d 中传输的光信号沿反向传输,经耦合器后沿光纤 b 进入信号处理系统。系统通过 e 路信号对光开关进行控制。传感臂旁放置一个振子,用来模拟外界振动,振子的振动频率可调。

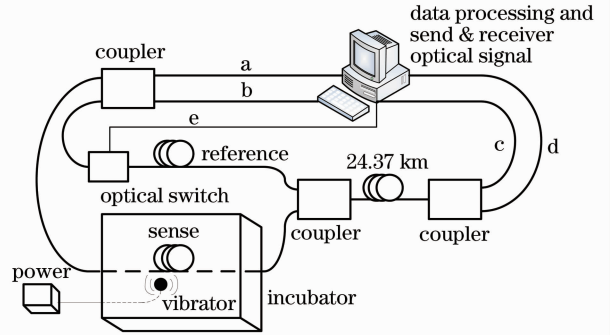


图 2 BOTDA 与马赫-曾德尔干涉仪相结合的测试系统

Fig. 2 Test system of DOFS combining BOTDA with Mach-Zehnder interferometer

进行马赫-曾德尔振动测试时,恒温箱保持室温,光开关闭合,振子产生振动。对信号分别进行 2、5、10 m/s 的速率采样,采集后的数据先进行数字滤波^[10],然后进行互相关计算^[9]以对振动定位。由于振动频率一般不大于 10 kHz,所以数字滤波器设定为通带纹波 3 dB,阻带小于 50 dB,截止频率在 10~12 kHz 的有限脉冲响应(FIR)滤波器。

图 3 采样率为 5 m/s 时的数字滤波器频谱,图 4 为 3 种采样率的定位误差统计,从中可以看出,2 m/s 采样定位误差平均为 150 m 左右,误差较大;5 m/s 采样定位误差平均为 60 m 左右,误差较小;10 m/s 采样定位误差平均为 40 m 左右,误差最小;

但在帧长相同的情况下,10 m/s 采样需要处理的数据较大,运算速度慢,所以最终采用 5 m/s 的速率进行采样。根据(4)式可知,当 n 取 1.46 时,互相关最大值位置每相差一个点,2、5、10 m/s 采样率所造成的误差分别为 50、20、10 m,图 5 为 5 m/s 采样率的信号及其数字滤波和互相关结果。

图 5(a)、(b) 分别是两路信号的原始采样值,图 5(d)、(e) 分别为这两路信号的数字滤波后的结果,可以看出高频噪声被滤除。图 5(c) 表示滤波后的两路信号互相关结果,图 5(f) 为互相关最大值点的放大图,得到最大值点为第 596 个采样点,而根据(4)式可知,5 m/s 的采样率的最大值点是第 594 点,从而此次检测的误差在 40 m 左右。而根据互相关图中主峰值与次峰值之间的间隔,可以计算外界的振动频率。图 6 为两种不同振动频率下的互相关图。图 6(a)、(b) 表示在某一振动频率下的信号采样图,图 6(d)、(e) 表示在另一振动频率下的信号采样图,图 6(c)、(f) 分别表示这两次采样的互相关结果,图 6(c) 中峰值与次峰值相差 18082 个采样点,图 6(f) 中峰值与次峰值相差 28298 个采样点,在采样频率为 5 m/s 的情况下,相差一个点周期就相

差 $0.2 \mu\text{s}$, 经计算可得第一组的振动频率约为 276 Hz,第二组的振动频率约为 177 Hz。

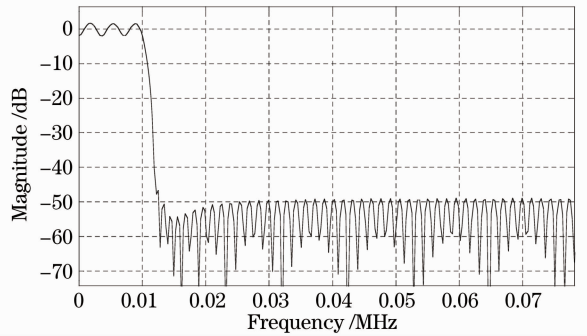


图 3 采样率 5 m/s 时的数字滤波器频谱

Fig. 3 Digital filter spectrum in 5 m/s sample rate

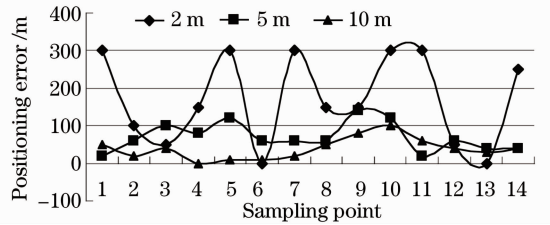


图 4 各采样率定位误差统计

Fig. 4 Positioning error statistics in different sample rates

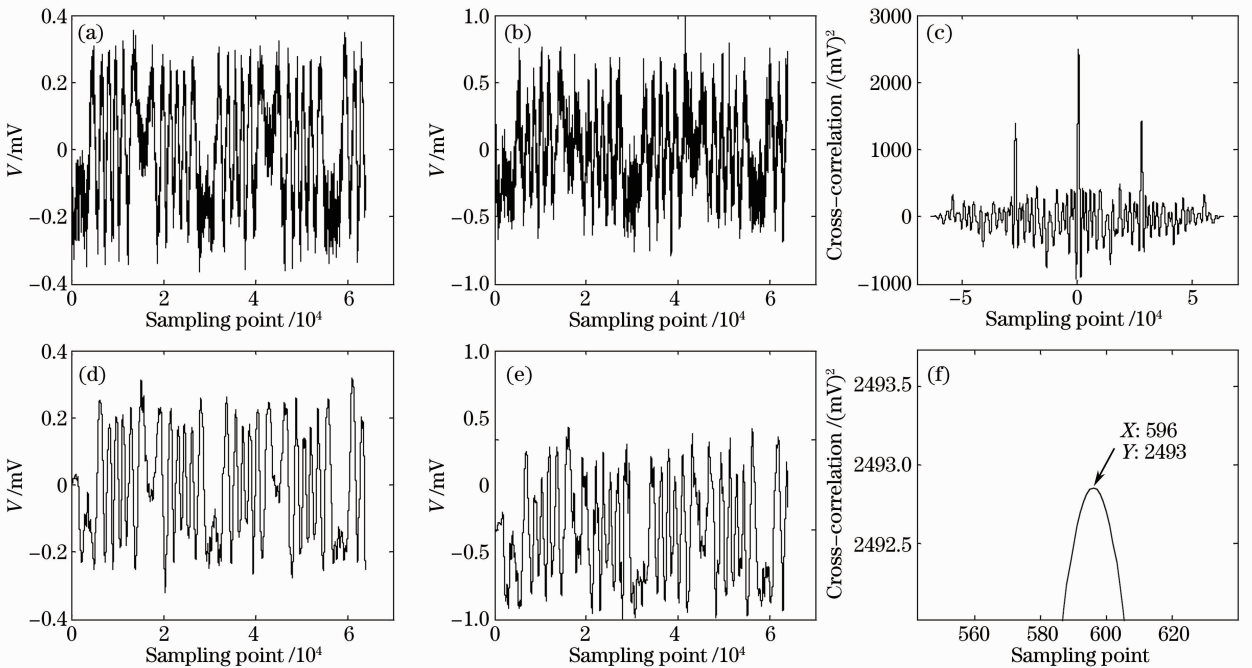


图 5 5 m/s 采样时的滤波及互相关结果

Fig. 5 Cross-correlation and filter results in 5 m/s sample rate

进行布里渊分布式光纤传感测试时,光开关断开,微波电光调制^[11,12]和光脉冲调制开始运行,整个传感系统转变为布里渊光时域分析仪。

在传感臂无振动时,分别测量传感臂(光纤前

端)和 24.37 km 长光纤末端的温度变化情况,如图 7 所示。在传感臂振动时,对光纤前端和末端的温度变化情况进行测量,所测结果如表 1 所示。

从图 7 中可以看出,该装置实现了布里渊光时

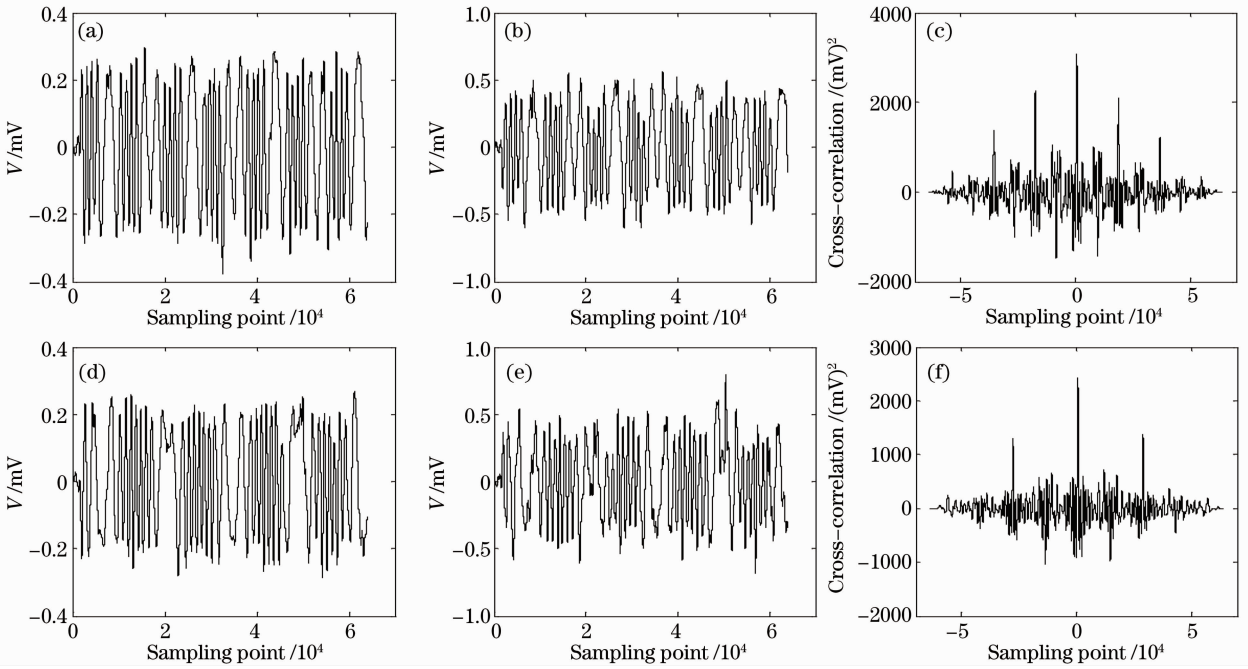


图 6 不同频率下的振动情况

Fig. 6 Vibration in different frequencies

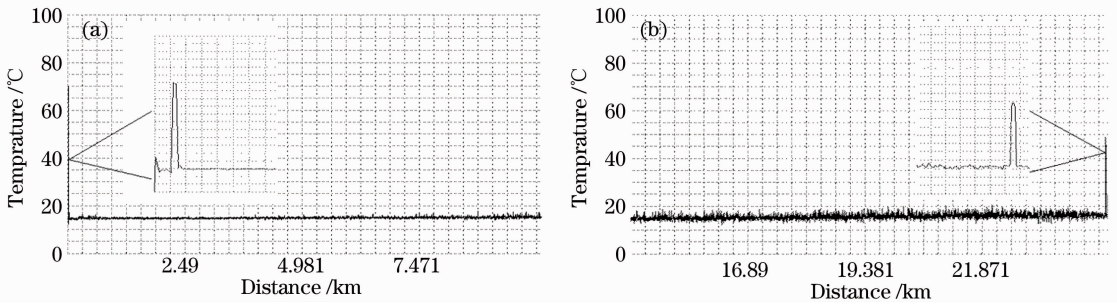


图 7 BOTDA 前端(a)和后端(b)温度测量结果

Fig. 7 Temperature testing results of beginning

(a) and end (b) of BOTDA

域分析 25 km 左右的温度测量。从表 1 可以看出，在传感臂没有振动的情况下，光纤前端和末端的温度分辨率为 2 °C；在传感臂振动的情况下，测量精度

变差，前端温度分辨率变为 3 °C，末端温度分辨率变为 4 °C。故可知传感臂的振动会对 BOTDA 的温度测量产生一定的影响。

表 1 不同情况下 BOTDA 温度测量结果

Table 1 Temperature testing results in different conditions of BOTDA

Beginning without vibration		End without vibration		Beginning with vibration		End with vibration	
Detected temperature / °C	Actual temperature / °C	Detected temperature / °C	Actual temperature / °C	Detected temperature / °C	Actual temperature / °C	Detected temperature / °C	Actual temperature / °C
47	48	46	45	46	48	47	45
49	50	48	46	48	50	49	47
50	51	50	49	49	51	50	48
51	52	51	51	50	52	51	50
53	55	53	52	51	54	55	52
54	56	53	53	54	55	58	55
57	58	55	55	56	58	60	57

Beginning without vibration		End without vibration		Beginning with vibration		End with vibration	
Detected	Actual	Detected	Actual	Detected	Actual	Detected	Actual
temperature / temperature /	temperature / temperature /	temperature / temperature /	temperature / temperature /	temperature / temperature /	temperature / temperature /	temperature / temperature /	temperature / temperature /
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
59	60	61	60	57	59	61	59
60	61	62	62	59	61	65	63
61	63	64	64	60	62	66	65
65	66	65	66	61	64	70	66
65	67	66	68	63	66	70	68
69	70	71	70	65	68	73	70
70	72	71	72	68	71	74	72
72	74	74	74	70	73	78	74
74	76	75	76	73	76	78	77

布里渊传感对温度和应变都很敏感,较大应变会影响温度的测量结果,在实际应用中通过设计合适的传感光缆和布缆方式,使传感光纤感受温度和振动的作用,降低静态应变对传感光纤的影响。马赫-曾德尔振动传感会受到光信号的偏振影响,实际应用中需要合适的光偏振控制技术。如何消除这些不利的传感影响因素需要进一步的深入研究。

4 结 论

针对共同测量静态和动态传感量,构建多机理多参量分布式光纤传感器是技术发展和实际应用的需要。利用布里渊光时域分析仪和马赫-曾德尔干涉仪在传感光纤和光学信号处理结构上的相似性,组建了共用光源、光器件和传感光纤的双机理传感检测系统。进行振动传感时,定位精度可达到 60 m,并可确定振动频率。进行布里渊光时域分析测量时,可以实现 25 km 温度传感,其中无振动时测量精度可达 2 °C,有振动时,前端精度降为 3 °C,末端为 4 °C。初步的实验结果验证了构建多机理多参量分布式光纤传感器的可能性,传感性能的提高以及不同传感量之间的干扰将在进一步的研究中得到解决。

参 考 文 献

- Xu Ping, Pang Fufei, Chen Na *et al.*. A quasi-distributed optical fiber temperature sensor based on Fresnel reflection[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(12): 1955~1958
徐平, 庞拂飞, 陈娜等. 基于菲涅耳反射的准分布式光纤温度传感器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(12): 1955~1958
- S. Adachi. Distributed Optical Fiber Sensors and Their Applications [C]. SICE Annual Conference, Tokyo, 2008. 329~333
- Song Muping, Li Zhicheng, Qiu Chao. A 50 km distributed optical fiber sensor based on Brillouin optical time-domain analyzer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1426~1429
宋牟平, 励志成, 裴超. 50 km 长距离布里渊光时域分析分布

- 式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1426~1429
- T. Horiguchi, M. Tateda. BOTDA-nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction: Theory [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, **7**(8): 1170~1176
- A. Kersey, D. Jackson, M. Corke. Single-mode fibre-optic magnetometer with DC bias field stabilization[J]. *Light Wave Technology*, 1985, **3**(4): 836~840
- Chen Weimin, Wu Jun, Tan Jing *et al.*. Locating technology for twin Mach-Zehnder distributed optical fiber sensing system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(12): 2128~2132
陈伟民, 吴俊, 谭靖等. 双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位技术[J]. *光学学报*, 2007, **27**(12): 2128~2132
- K. Krakenes, K. Blotekjaer. Comparison of fiber-optical Sagnac and Mach-Zehnder interferometers with respect to thermal processes in the fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, **13**(4): 682~686
- Wu Jun, Chen Weimin, Tan Jing *et al.*. Analysis on the influence of polarization state degradation to the performance of Mach-Zehnder distributed optical-fiber sensing system[J]. *Laser Journal*, 2008, **29**(6): 33~35
吴俊, 陈伟民, 谭靖等. 偏振态退化对双马赫-曾德尔分布式光纤传感系统定位性能的影响分析[J]. *激光杂志*, 2008, **29**(6): 33~35
- Gao Zhiyu. A Signal Processing System Design for Interferometric Fiber-Optical Sensor [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2008. 12~31
高志宇. 干涉型光纤传感器的信号处理系统[D]. 北京: 北京邮电大学, 2008. 12~31
- Zhang Cheng, Wang Jinhai, Chen Caihe *et al.*. Research and design of interferometric optical fiber sensor measuring system based on digital signal processing[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2007, **20**(1): 64~67
张诚, 王金海, 陈才和等. 基于数字信号处理的干涉型光纤传感器检测系统的研究与设计[J]. *传感技术学报*, 2007, **20**(1): 64~67
- Song Muping. The technique of Brillouin scattering-distributed optical fiber sensing based on microwave electrooptical modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(8): 1111~1114
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
- Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 757~762
宋牟平, 鲍翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的光时域分析长距离分布式光纤传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 757~762