

双光纤双参量布里渊光时域分析传感技术的研究

谢 杭 宋牟平 叶险峰

(浙江大学信息与电子工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要 对于布里渊分布式光纤传感器(DOFS),温度或应变的变化都会引起布里渊频移谱改变,因此存在交叉敏感问题。在以往对布里渊光时域反射(BOTDR)计的双参量传感研究中,采用单根光纤,通过同时检测布里渊频移和功率变化,实现双参量传感。但对于布里渊光时域分析(BOTDA),由于受激布里渊散射的偏振相关性,不能实现对受激散射光功率的准确检测,因此难以实现单光纤的双参量传感。针对这一问题采用温度和应变系数不同的双光纤进行双参量传感。先测量了几种常用光纤的温度和应变布里渊频移系数,然后选择 G652 和 G652 成缆两种光纤,通过构建系数矩阵,由两根光纤的布里渊频移计算得出温度和应力,从而实现了温度分辨率 25 °C 左右,应变分辨率约为 200 $\mu\epsilon$ 的双参量传感。

关键词 光纤光学;布里渊光时域分析;交叉敏感;双参量;系数矩阵

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.030601

Study on the Dual-Parameter Sensing Technology of Brillouin Optical Time Domain Analyzer Based on Dual-Optical-Fiber

Xie Hang Song Muping Ye Xianfeng

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

Abstract For the Brillouin-based distributed optical fiber sensor (DOFS), the change of temperature or strain can cause the alteration of Brillouin frequency shift, so there exists the cross sensitivity problem. In the previous research of dual-parameter sensing of Brillouin optical time domain refractometer (BOTDR), the frequency shift and optical power of the single fiber are detected simultaneously for dual-parameter sensing. However, for Brillouin optical time domain analyzer (BOTDA), because of the polarization-related stimulated Brillouin scattering, the power of the scattering light cannot be accurately detected and it is difficult to achieve dual-parameter sensing with a single fiber. Here two fibers with different temperature and strain coefficients are used for dual-parameter sensing. The temperature and strain coefficients of different optical fibers are obtained experimentally, based on which G652 fiber and G652 cable fiber are selected; their temperature and strain coefficients are used to construct the coefficient matrix. By simultaneously detecting these two optical fibers' Brillouin frequency shift, temperature and strain are successfully sensed. The temperature resolution is about 25 °C, and the strain resolution is about 200 $\mu\epsilon$.

Key words fiber optics; Brillouin optical time domain analyzer; cross sensitivity; dual-parameter; coefficient matrix

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间上的连续分布信息^[2,3]。其中的布里渊分布式光纤传感通过分析其布里渊频移,能测量沿光纤路径的温度或应变情况。常见的布里渊散射 DOFS 有布里渊光时域分析(BOTDA)^[4]和布里渊光时域反射(BOTDR)两种结构。BOTDR 采用单端输入,有较好的应用场合,但测量

收稿日期: 2011-07-13; **收到修改稿日期**: 2011-09-02; **网络出版日期**: 2011-12-23

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、光纤通信和传感等方面的研究。

E-mail: songmp@zju.edu.cn(通信联系人)

的自发布里渊散射光功率小,测量距离和精度受到限制。而BOTDA采用双端输入,测量的受激布里渊散射光功率大,提高了测量距离和精度。

由于光纤中布里渊频移同时受到温度和应变的影响,因此仅靠单一的布里渊频移无法分辨该频移是由温度还是应变引起的,这就造成了布里渊分布式光纤传感中的交叉敏感问题^[5,6],从而也制约了布里渊DOFS在实际中的应用。最初解决交叉敏感问题的方法是在传感光纤旁边布置处于松弛状态的参考光纤,使参考光纤对应变不敏感,从而对传感光纤进行温度补偿,达到测量双参量的目的^[7,8],但这种布置光纤的方法在实际中很难应用。目前主要的研究有:1)基于布里渊散射谱的双参量矩阵法^[9]。根据测量布里渊频移和功率变化,来实现对温度和应变的同时测量。但由于光功率的检测受各种因素的影响,很难精确,从而限制了该方法的测量精度。2)布里渊散射结合拉曼散射测量法^[10~13]。由拉曼散射只对温度敏感的特点,利用拉曼散射计算出温度,从而对布里渊散射进行温度补偿,达到同时测量温度和应变的目的。但由于拉曼散射光功率小,难以实现长距离传感。3)基于特种光纤的双频移矩阵法^[14~16]。如大有效面积非零色散位移光纤(LEAF)有多个布里渊峰值,利用其中两个布里渊散射峰不同的频移-温度系数和频移-应变系数,构成系数矩阵,从而实现温度和应变的同时测量。但该方法基于特种光纤,成本高,且无法与已铺设的光缆融合。4)基于布里渊散射结合后向瑞利散射测量法^[17]。通过测量布里渊频移和后向瑞利散射频移来实现温度和应变的同时测量。本文研究的则是双光纤双参量BOTDA分布式传感技术。

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。所以只要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。测量时利用两根具有不同频移-温度系数和频移-应变系数的光纤,构成系数矩阵,从而实现温度和应变的同时测量。相关公式为

$$\begin{bmatrix} \Delta\nu_{B1} \\ \Delta\nu_{B2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{T1} & C_{\epsilon 1} \\ C_{T2} & C_{\epsilon 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta\epsilon \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\Delta\epsilon = \frac{C_{T1} \Delta\nu_{B2} - C_{T2} \Delta\nu_{B1}}{C_{\epsilon 2} C_{T1} - C_{\epsilon 1} C_{T2}}, \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{C_{\epsilon 2} \Delta\nu_{B1} - C_{\epsilon 1} \Delta\nu_{B2}}{C_{\epsilon 2} C_{T1} - C_{\epsilon 1} C_{T2}}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\nu_{B1}$ 为布里渊频移, ΔT 和 $\Delta\epsilon$ 分别为温度和应力的变化量, C_T 和 C_ϵ 分别为频移-温度系数和频移-应变系数,下标“1”和“2”表示两根不同的光纤。

解(1)式矩阵方程可得到(2),(3)式,根据(2),(3)式可知,在频移-温度系数和频移-应变系数已知的情况下,只要分别测得两根光纤的布里渊频移,就能得到外界的温度和应变情况。为了得到合适的系数矩阵,先对裸光纤G652、G653、G655、G657以及G652成缆光纤进行相关系数的测量,结果如图1,2所示。

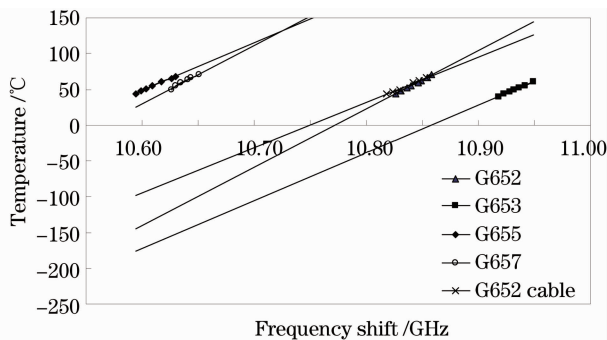


图1 温度与频移的关系

Fig. 1 Relation between temperature and frequency shift

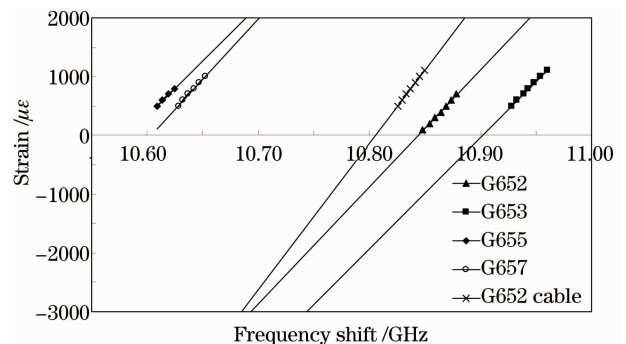


图2 应变与频移的关系

Fig. 2 Relation between strain and frequency shift

经计算得到各类光纤的频移-温度系数和频移-应变系数如表 1 所示。为减少测量误差,系数的选择应使(2),(3)式中的分母取较大值,综合考虑后选择 G652 光纤与 G652 成缆光纤构成双光纤系统进行双参量的测量。

表 1 不同光纤的温度和应变系数

Table 1 Different optical fibers' temperature and strain coefficients

| Optical fiber | G652 | G653 | G655 | G657 | G652 cable |
|--|--------|--------|--------|--------|------------|
| Temperature coefficient / (MHz/K) | 1.227 | 1.49 | 1.507 | 1.225 | 1.58 |
| Strain coefficient / (MHz/ $\mu\epsilon$) | 0.0501 | 0.0526 | 0.0531 | 0.0486 | 0.04 |

图 3 是用来实现双光纤双参量测量的 BOTDA 系统示意图。系统中采用 $1.55 \mu\text{m}$ 分布式反馈(DFB)激光器(线宽小于 1MHz),经耦合器后分为两路光。一路光为激励光,先经脉冲调制转换为光脉冲,然后经掺铒光纤放大器(EDFA)放大,最后通过光开关进入外部光纤。另一路光为探测光,先经约 11 GHz 的电光调制器(EOM)调制成频移光^[18],然后经偏振控制器^[19],最后通过光开关进入外部光纤。探测光在光纤中与激励光发生布里渊放大效应后经环形器接收,经过光电转换和模数(AD)转换,由数字累加平均器(BOXCAR)进行信号平均,然后计算得到光纤路径上的布里渊频移,最后通过计算得到温度、应变信息。

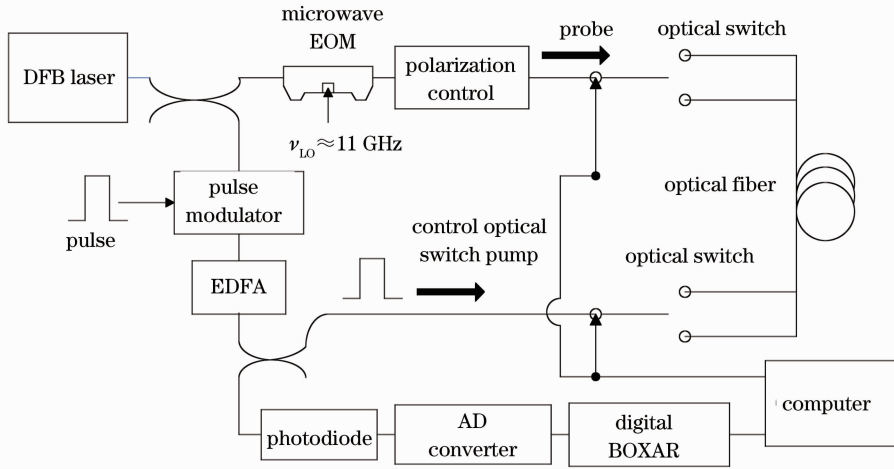


图 3 双光纤 BOTDA 实验系统

Fig. 3 Dual-optical-fiber BOTDA system

图 3 所示的利用微波电光调制的 BOTDA 系统,其传感距离最长能达到 50 km,图 4,5 为其对 25 km 长光纤温度、应变的测量结果(在光纤末端分别有单独的温度和应变变化)。为了能够实现双光纤的检测,在系统与光纤之间加入两个电控光开关。在一个测试周期内,先测完一路光纤的布里渊频移,并将数据暂时保存在

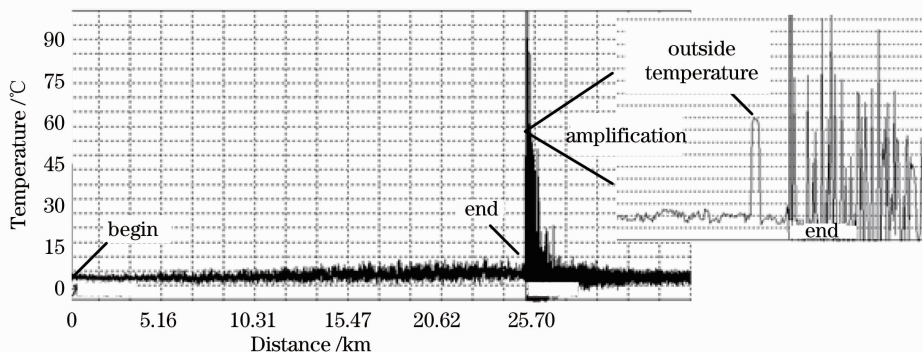


图 4 25 km 光纤温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of 25 km optical fiber

计算机中,然后通过计算机控制,切换光开关,测另一路光纤的布里渊频移,并将两次测量的数据代入(2), (3)式,经过计算得到温度和应变信息。

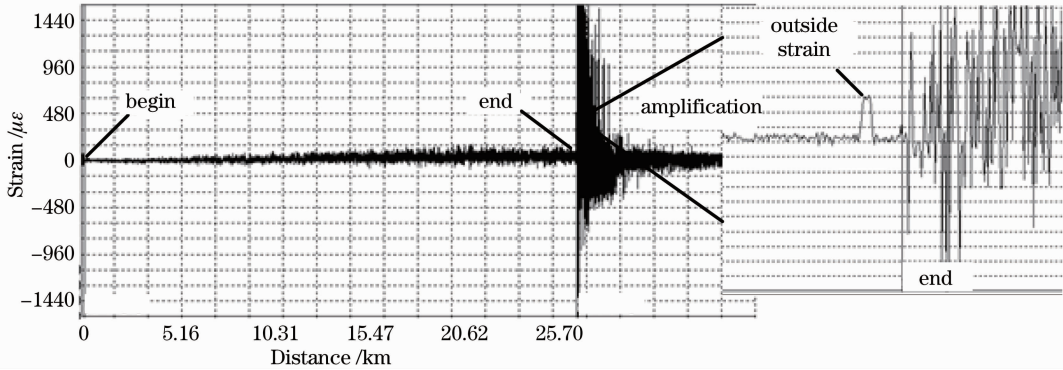


图 5 25 km 光纤应变分布

Fig. 5 Strain distribution of 25 km optical fiber

3 实验结果

图 6 为基于 BOTDA 的双光纤双参量测试实验系统。用于测量的光纤为 G652 裸光纤和 G652 成缆光纤,长度均约为 120 m,室温 25 °C。其中光纤从 BOTDA 系统出来后经过 20 m 进入应变控制装置,在里面盘绕(感受应力变化)6 m,然后再经过 6 m 进入温控装置,在温控装置中也盘绕(感受温度变化)6 m,最后输出至 BOTDA 系统另一端。值得注意的是两根光纤感受应变和温度的感应处和感应长度必须基本相等,否则会有较大误差。

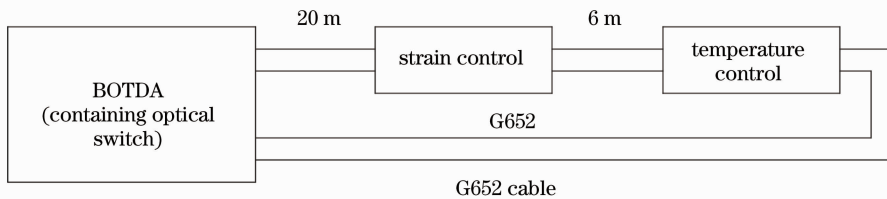


图 6 双光纤双参量测试系统

Fig. 6 Dual-parameter dual-optical-fiber test system

图 7(a)为应变控制装置的基本结构,A 为螺旋测微器,通过调节 A,使三角形滑块 D(中部有开槽,用来通过光纤)产生上下移动,从而造成两水平臂的水平移动。光纤通过固定装置 B、C 固定在水平臂上,随着滑块的下滑,左右两臂分别向左右移动,从而使光纤拉伸,产生形变。每条臂长 1 m,该实验中光纤盘绕了 3 次,从而受力光纤长度约为 6 m。该装置滑块下移距离与两臂水平移动距离比例为 10:1,因此,根据螺旋测微器上的读数就能计算光纤的拉伸长度即形变量。图 7(b)为温度控制装置,在液体容器中放入盘绕好的光

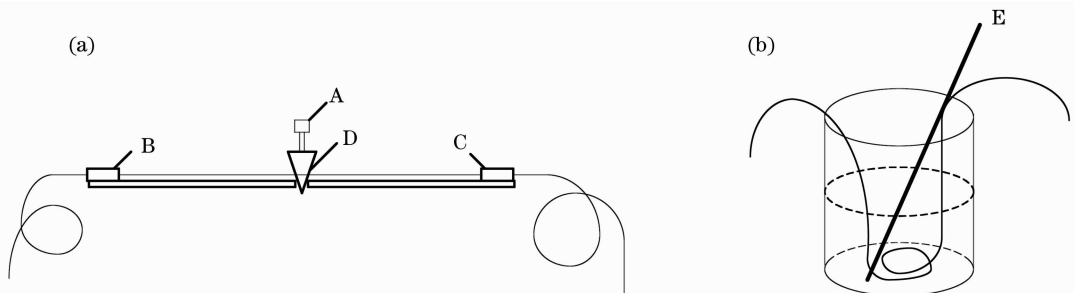


图 7 应变(a)和温度(b)控制装置

Fig. 7 Control devices of (a) strain and (b) temperature

纤,通过改变注入水的温度,使光纤温度发生变化。E为温度计,用来测量实际温度。

基于上述系统,先进行单参量测量:应变装置不产生应变,温控装置产生 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度。以往的单参量测量就会产生错误,应力在光纤相同位置显示产生了明显应变,造成误判。而经过双光纤双参量测试后,结果如图 8(a)所示,测量到的外界温度虽然下降到了 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,但相同位置的应变误判已被消除。同理,让温控装置温度降至室温,应变控制装置提供 $450\text{ }\mu\epsilon$ 应变,在以往的单参量测量中,会在光纤相同位置显示产生了明显的温度变化,造成误判。而经过双光纤双参量测试后,结果如图 8(b)所示,虽然应变扩大为 $500\text{ }\mu\epsilon$,但在光纤相同位置温度的误判已被消除。

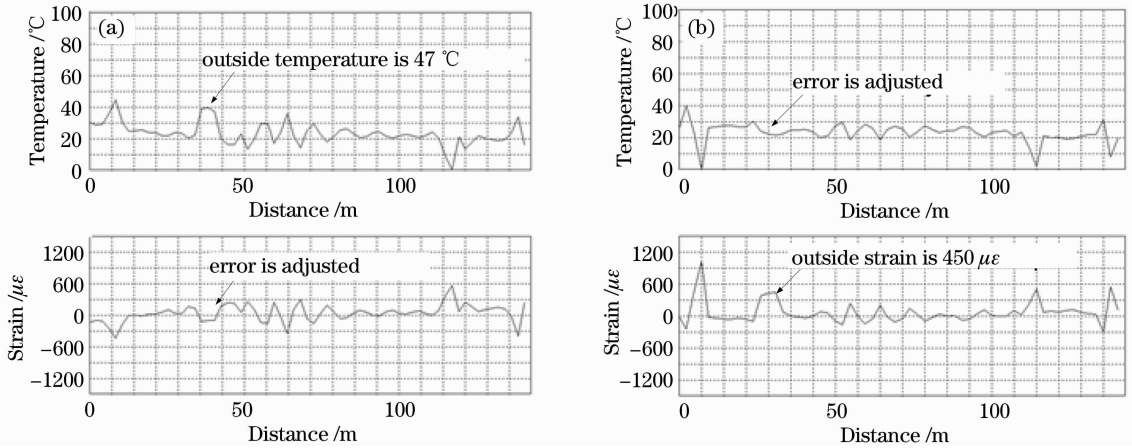


图 8 双光纤温度(a)和应变(b)的单参量测试

Fig. 8 Dual-optical-fiber single-parameter testing for (a) temperature and (b) strain

前两个测试进行了温度和应力的分别测量,通过双光纤双参量的计算,消除了原先 BOTDA 系统无法区分温度和应力变化而造成误判的情况。最后,在温度和应力同时变化的情况下,利用双光纤双参量测试来对温度、应力进行同时测量。如图 9(a)所示,应变控制装置产生 $450\text{ }\mu\epsilon$ 应变,温控装置产生 $47\text{ }^{\circ}\text{C}$ 环境,在原先的 BOTDA 系统中,在应变发生处产生了对温度的误判,在温度改变处产生了对应变的误判。而通过双光纤双参量的测量后,得到结果如图 9(b)所示,测试到的温度下降为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,应力大致仍为 $450\text{ }\mu\epsilon$,但存在的应力和温度的误判已经消除。从图中可以看出,双参量的同时测量时,测量所得信号变差,误差增加。

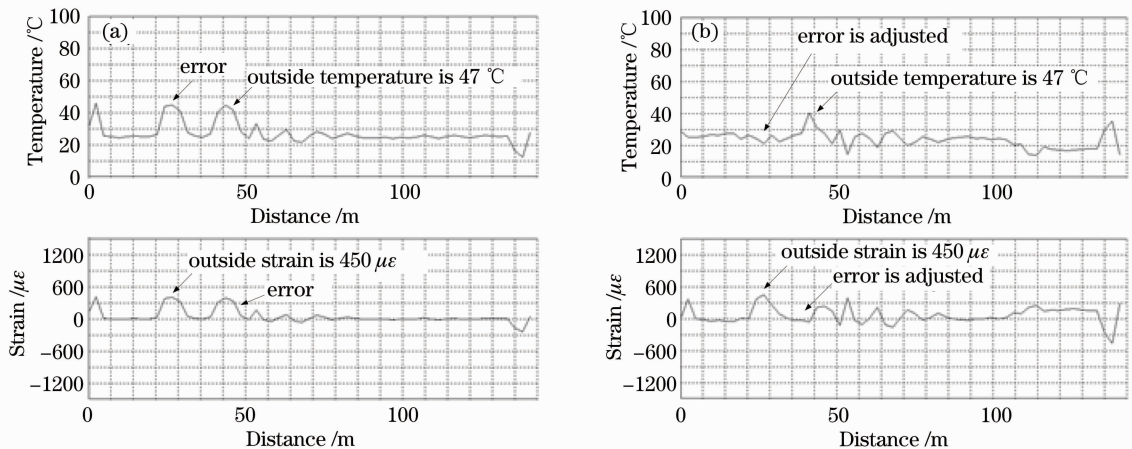


图 9 双参量同时测量。(a)误判;(b)误判消除

Fig. 9 Dual-parameter testing. (a) Error; (b) error adjusted

图 10 给出了通过双光纤双参量系统测得的温度、应变与实际温度、应变的对比曲线,其中图 10(a)和 (b)分别是在外界应力、温度一定的情况下,通过单参量测试测得的温度、应变曲线;图 10(c)和(d)分别为双参量同时测量得到的温度、应变曲线。从图中可以看出,单参量测量时温度分辨率约为 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变分辨率约为 $80\text{ }\mu\epsilon$ 。双参量测量时性能变差,温度分辨率约为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变分辨率约为 $150\text{ }\mu\epsilon$ 。频移-温度系数和频移-

应变系数测量时的误差,两根光纤发生温度变化或应变的感应位置及感应长度的不同,都会造成最终结果的较大误差。此外,也用 G653 裸光纤与 G652 成缆构成双光纤系统进行了双参量测量,图 11(a)和(b)分别是对温度、应变的单参量测试结果图。从图中可以看出,测试结果误差很大,温度分辨率约为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变分辨率约为 $450\text{ }\mu\epsilon$ 。造成该误差的主要原因是由于这组光纤的温度、应变系数造成(2),(3)式的分母很小,分子稍微变动就会造成结果的重大变化。

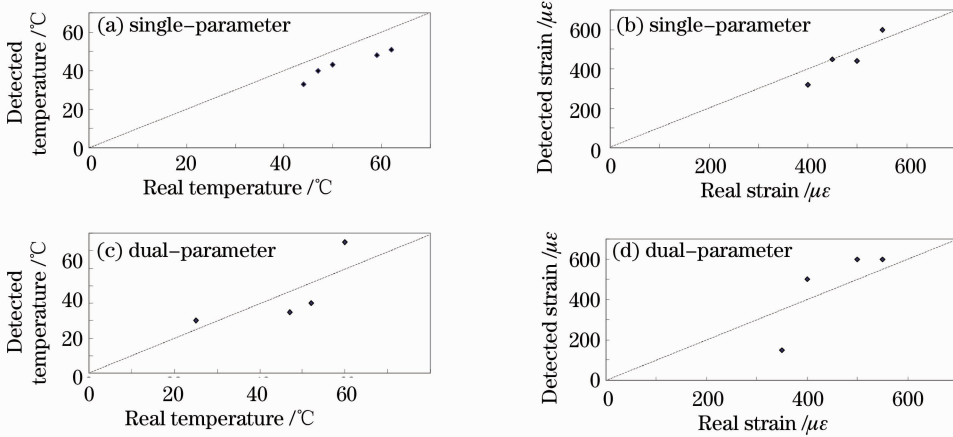


图 10 单参量和双参量测量得到的温度、应变与实际温度、应变的对比

Fig. 10 Comparison between the detected temperature, strain and the actual temperature, strain under single- and dual-parameter testing

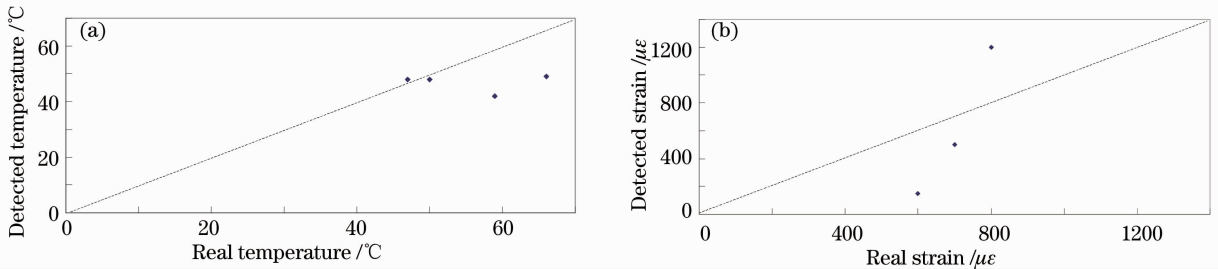


图 11 G653 光纤传感得到的(a)温度、(b)应变与实际温度、应变的对比

Fig. 11 Comparison between the detected (a) temperature, (b) strain and the actual temperature, strain for G653 fiber

4 结 论

双光纤双参量布里渊分布式光纤传感通过检测两根光纤的布里渊频谱来实现,这两根光纤要具有不同的频移-温度系数和频移-应变系数。通过测得的两根光纤的布里渊频移,可以计算得到温度和应变信息。利用 G652 裸光纤和 G652 成缆光纤,实现了双参量同时测量,温度分辨率约为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,应变分辨率约为 $200\text{ }\mu\epsilon$ 。双光纤测量时,两根光纤发生温度变化或应变的感应位置及感应长度要相同,否则会产生较大误差。而且由于不同光纤的频移系数相差比较小,如系统噪声较大,会影响双参量测量精度。预计通过引入参考曲线,通过软件计算除去光纤本身的噪声,可以提高测量精度。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Shoji Adachi. Distributed optical fiber sensors and their applications [C]. SICE Annual Conference, 2008, 329~333
- 3 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, 裘超. 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
- 4 Tsuneeo Horiguchi, Mitsuhiro Tateda. BOTDA—nondestructive measurement of single-mode optical fiber attenuation characteristics using Brillouin interaction; theory [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, **7**(8): 1170~1176
- 5 Zhang Jisheng, Li Yongqian. Study on the simultaneous distributed measurement of temperature and strain based on Brillouin scattering in optical fiber [J]. *Study on Optical Communications*, 2008, (5): 53~56
- 张吉生, 李永倩. 光纤布里渊温度和应变分布同时传感方法研究 [J]. 光通信研究, 2008, (5): 53~56
- 6 Xiaoyi Bao, Liang Chen. Recent progress in Brillouin scattering based fiber sensors [J]. *Sensors*, 2011, **11**(4): 4152~4157
- 7 Il-Bum Kwon, Chi-Yeop Kim, Seok-Beom Cho. Temperature compensation of a strain sensing signal from a fiber optic Brillouin optical time domain analysis sensor [J]. *J. Opt. Soc. Korea*, 2003, **7**(2): 106~112
- 8 X. Bao, D. J. Webb, D. A. Jackson. Combined distributed temperature and strain sensor based on Brillouin loss in an optical fiber [J]. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(2): 141~143
- 9 Song Muping, Qiu Chao. Long-distance Brillouin optical time domain reflectometer with two-parameter sensing for standard single-mode optical fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 954~958
- 宋牟平, 裘超. 普通单模光纤的长距离双参量传感布里渊光时域反射计 [J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 954~958
- 10 Kellie Brown, Anthony W. Brown, Bruce G. Colpitts. Combined Raman and Brillouin scattering sensor for simultaneous high-resolution measurement of temperature and strain [C]. *SPIE*, 2006, **6167**: 616716
- 11 M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1276~1278
- 12 Fuchang Chen, Bai Chen, Zunqi Lin. A new design for simultaneous temperature and strain measurement with spontaneous Raman and Brillouin scattering [C]. *SPIE*, 2010, **7853**: 78532A
- 13 Haiyun Xia, Hongqian Mu, Yuanhong Yang. Direct and simultaneous detection of temperature and strain using combined Brillouin and Raman backscatters in single mode fiber [C]. *SPIE*, 2007, **6830**: 683021
- 14 M. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson. Comparison of the methods for discriminating temperature and strain in spontaneous Brillouin-based distributed sensors [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(1): 26~28
- 15 Dong Yuming, Zhang Xuping, Lu Yuangang *et al.*. Cross sensitivity of Brillouin scattering distributed fiber sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 197~201
- 董玉明, 张旭苹, 陆元刚 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
- 16 C. C. Lee, P. W. Chiang, S. Chi. Utilization of a dispersion-shifted fiber for simultaneous measurement of distributed strain and temperature through Brillouin frequency shift [J]. *IEEE Photon. Lett.*, 2001, **13**(10): 1094~1096
- 17 K. Kishida, K. Nishiguchi, C.-H. Li. An important milestone of distributed fiber optical sensing technology: separate temperature and strain in single SM fiber [C]. *OECC*, 2009, 861~862
- 18 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
- 19 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布里渊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