

基于相干检测数字光频梳的快速 BOTDA 传感系统

梁梓豪, 高社成*, 冯元华, 刘伟平

暨南大学信息科学技术学院电子工程系, 广东 广州 510632

摘要 针对传统布里渊光时域分析(BOTDA)技术测量速度慢的问题, 提出并设计了一个基于相干检测数字光频梳(DOFC)的快速 BOTDA 传感系统。利用相干检测 DOFC, 在不扫频的情况下重构传感所需的布里渊增益谱(BGS)和相位谱(BPS); 结合 BGS 和 BPS, 传感光纤的布里渊频移分布可在不作任何平均处理的情况下快速获得, 极大地缩短了 BOTDA 传感系统的响应时间。实验测试可知, 传感系统在 10 km 传感光纤上的响应时间为 0.1 ms, 其温度和应变的探测精度分别达到了 1.6 °C 和 44 $\mu\epsilon$, 相应的温度和应力测量最大偏差分别为 0.3 °C 和小于 10 $\mu\epsilon$ 。实验结果表明, 基于相干检测 DOFC 的 BOTDA 传感系统可快速实现温度和应力的长距离、高精度传感。

关键词 光纤光学; 传感系统; 数字光频梳; 受激布里渊散射; 布里渊光时域分析; 快速测量

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.110602

Fast BOTDA Sensing System Based on Coherent Detecting Digital Optical Frequency Comb

Liang Zihao, Gao Shecheng*, Feng Yuanhua, Liu Weiping

Department of Electronic Engineering, College of Information Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, Guangdong 510632, China

Abstract Aiming at the slow measurement speed problem for the conventional Brillouin optical time domain analysis (BOTDA) technology, a fast BOTDA sensing system based on the coherent detecting digital optical frequency comb (DOFC) is proposed and designed. With the coherent detecting DOFC, the Brillouin gain spectrum (BGS) and the Brillouin phase spectrum (BPS) needed for sensing can be reconstructed without any frequency sweeping. Owe to the BGS and BPS, the Brillouin frequency shift distribution of the sensing fiber can be obtained without any averaging process, and thus the response time of the BOTDA sensing system can be greatly shortened. Through the experimental tests, it is can be seen that the response time of the sensing system over 10 km sensing fiber is 0.1 ms, and the detection accuracies are 1.6 °C for temperature and 44 $\mu\epsilon$ for strain, respectively. The corresponding maximum measurement deviations of this sensing system are about 0.3 °C for temperature and less than 10 $\mu\epsilon$ for strain. The experimental results show that the BOTDA sensing system based on the coherent detecting DOFC can be used to realize a fast, long distance and high accuracy sensing of temperature and strain.

Key words fiber optics; sensing system; digital optical frequency comb; stimulated Brillouin scattering; Brillouin optical time domain analysis; fast measurement

OCIS codes 060.2370; 290.5900; 190.4370

1 引言

基于布里渊光时域分析(BOTDA)的光纤传感器能在几十千米光纤上提供高精度分布式温度和应力传感, 在过去 10 年已引起了广泛的关注^[1-3]。

BOTDA 技术主要是基于受激布里渊散射(SBS)效应, 由于光纤的布里渊频移(BFS)会随着温度和应力的改变而变化, 所以通过监测光纤的 BFS 就能实现温度和应力的传感^[4-5]。传统的 BOTDA 技术为了监测 BFS, 必须对探测光进行扫频来获得相应的

收稿日期: 2018-04-25; 修回日期: 2018-05-19; 录用日期: 2018-05-29

基金项目: 国家 863 计划(2015AA015501, 20615010)、国家自然科学基金(61705088)

* E-mail: gaosc825@163.com

布里渊增益谱(BGS),然后根据 BGS 的增益最大点来确定光纤的 BFS。由于扫频十分耗时(通常是几到十几分钟),因此传统的 BOTDA 只能用于准静态测量^[6-8]。如果 BOTDA 技术可实现快速测量,这对许多监测速度需要在秒量级或更短的应用场景来说将会有重大意义,比如地震活动探测或大型结构的实时健康监测^[9]等。为了缩短 BOTDA 的测量时间,一个最主要的方法就是避免对探测光扫频,实现光纤 BFS 的快速获取。

近年来,有很多针对传统 BOTDA 技术中扫频问题的改进方案被提了出来,如斜率辅助型 BOTDA^[10-12]、基于多对探测光和抽运脉冲光的 BOTDA^[13-14]等,而其中最具有前景的是一种利用数字光频梳(DOFC)技术的免扫频 BOTDA。DOFC 是一种基于正交频分复用的多载波调制信号,在时域上它是一串连续传播的数据帧,而其频谱是由多个功率相等的频梳分量组成的。若把 DOFC 加载到探测光上,其与抽运光通过 SBS 效应而产生的变化就能被每个频梳分量所直接反映。这样一来,在接收端只要对探测光进行简单的频域变换就能直接恢复 SBS 效应后的 BGS,实现光纤 BFS 的快速获取。基于 DOFC 的 BOTDA 的优越性已被一些报道所证实^[15-17],这使其有望成为快速测量的首选技术。不过,这类 BOTDA 和其他类型的 BOTDA 一样,为了获得高信噪比的 BGS 并提高 BFS 的监测精度,相应的传感系统会多次采集数据并作平均。但这平均过程却会额外增加传感系统的测量时间,因此想要进一步缩短基于 DOFC 的 BOTDA 的测量时间,在传感系统里就必须使用能提供更高精度的 BFS 的监测方法。

最近,有研究指出在 BOTDA 传感系统中,探测光信号的相位对于 BFS 的变化十分敏感,利用布里渊相位谱(BPS)可实现光纤 BFS 的高精度监测^[18-19]。针对以上现状,并结合 BPS 的优点,本文提出并设计了一个基于相干检测 DOFC 的快速 BOTDA 传感系统。利用相干检测 DOFC,在不需扫频的情况下得到 BGS 和 BPS;基于对 BGS 和 BPS 的联合检测,传感系统能快速获取光纤的高精度 BFS 而不需要任何数据平均,其测量时间可得到进一步缩短。由于 BFS 的监测不需要扫频和平均处理,传感系统的测量时间仅仅受限于光纤的长度。所提出的快速 BOTDA 传感系统在 10 km 光纤上可获得 0.1 ms 的响应时间,这表明该传感系统具备长距离快速测试的优势,可适用于一些大型结构的

实时监测。

2 快速 BOTDA 传感系统的原理

基于相干检测 DOFC 的快速 BOTDA 传感系统的原理如图 1 所示,传感系统主要包括探测光端、抽运光端和接收端 3 部分。在探测光端,一个基带 DOFC 被用作探测信号并在 $Z=0$ 的位置输入传感光纤,以便能在不扫频的情况下快速获得 BGS 和 BPS 以及光纤的 BFS 分布。为了产生 DOFC,一串已被预处理的具有单位振幅的数据序列首先经过快速傅里叶逆变换(IFFT)变成一个数字电频梳(DEFEC),然后输入一个任意波形发生器(AWG)中。利用 AWG 的其中一个通道把 DEFEC 输出并通入一个电光调制器(EOM)里,对光载波进行强度调制后实现 DEFEC 到 DOFC 的转换,从而得到所需的 DOFC。所产生的 DOFC 的功率谱如图 2 所示,考虑到用于监测 BFS 的范围,DOFC 的功率主要是分布在约为 2 GHz 的带宽内。为了保证传感系统的探测精度,DOFC 的频率间隔(即传感系统探测点的间隔)被设定为 2 MHz。

而在抽运光端,一个脉宽和周期分别是 70 ns 和 125 μ s 的抽运脉冲是由 AWG 的另外一个通道产生,其中选择 125 μ s 是考虑到光在 10 km 光纤来回往返一次所需时间为 0.1 ms,这样可保证在单次传感测试中光纤里只有一个抽运脉冲。接着,抽运脉冲会通过一个电光调制器被调制到相应的光载波上,调制后的抽运光信号会在 $Z=L$ 的位置输入传感光纤,以激发光纤里的 SBS 效应。对于普通的单模光纤,BFS 的典型值大约是 11 GHz。为了使抽运脉冲所产生的 BFS 能落在 DOFC 的 2 GHz 带宽范围内,其频率也被设定为 11 GHz。此外,为了增强抽运脉冲所产生的 SBS 效应,以及消除由偏振噪声所带来的不利影响,在传感系统中抽运脉冲还使用了正交偏分复用技术(如图 1 所示)。关于抽运脉冲使用正交偏分复用技术可消除 SBS 效应中偏振噪声影响的原理,以及相应的实现过程,具体可参阅文献[20]。

在传感系统的接收端,DOFC 信号与抽运脉冲发生 SBS 后,输入相干接收机里进行相干解调。在发射端 DOFC 具有以下形式:

$$E = \sum_{k=1}^{k=N} \exp [j(2\pi f_k t + \theta_k)], \quad (1)$$

式中: N 为频梳分量的个数; f_k 和 θ_k 分别为第 k 个频梳分量的频率和相位。在经过 SBS 效应后 DOFC 可表示为

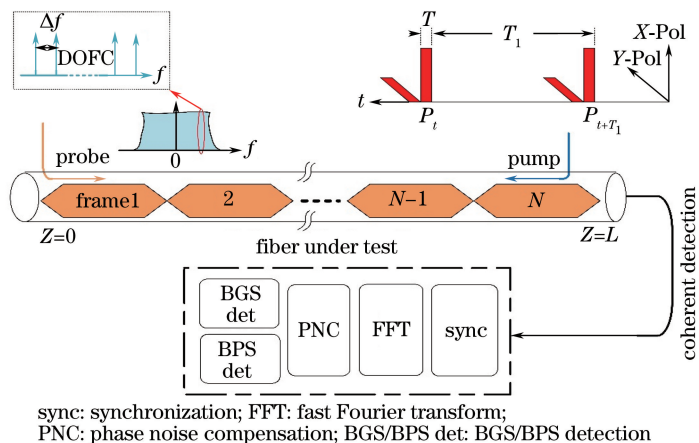


图1 快速 BOTDA 传感系统的原理示意图

Fig. 1 Schematic of fast BOTDA sensing system

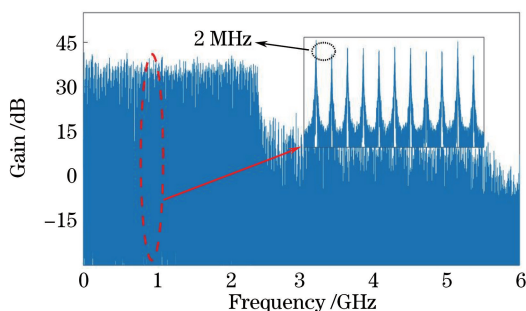


图2 DOFC 的功率谱

Fig. 2 Power spectrum of DOFC

$$E' = \sum_{k=1}^N \exp[j(2\pi f_k t + \theta_k)] H_{\text{SBS}}(f_k), \quad (2)$$

式中： $H_{\text{SBS}}(f_k)$ 为 SBS 作用的响应谱，其可表示为

$$H_{\text{SBS}}(f_k) = [1 + g(f_k)] \exp[j\varphi(f_k)], \quad (3)$$

其中 $g(f_k)$ 和 $\varphi(f_k)$ 分别为 SBS 的增益和相位响应。从(3)式可以看出，通过对 DOFC 进行相干解调并获取相应的 $H_{\text{SBS}}(f_k)$ ，就能实现 BGS 和 BPS 的重构。DOFC 解调过程包括同步、快速傅里叶变换(FFT)、相位噪声补偿以及 BGS 和 BPS 检测 4 部分。通过同步就可以定位出每个 DOFC 数据帧的起始点位置，并把它们一一分离开来。而之后利用 FFT 对 DOFC 进行频域变换，在频域上对收发端的 DOFC 进行比较就可得到 $H_{\text{SBS}}(f_k)$ ，从而实现 BGS 和 BPS 的获取。在相干解调的过程中，存在相位噪声，会导致 BPS 出现额外的相移，因此在解调时必须对信号进行相位噪声补偿来消除这种相移，从而提高 BPS 用于监测 BFS 的精度。最后，经过对 BGS 和 BPS 的检测，就能获得沿光纤分布的 BFS，从而完成快速 BOTDA 传感系统的传感过程。需要一提的是，由于 BPS 和 BGS 的获取都是基于 DOFC 的相干解调，而这两者的获取过程几乎是并

行的，因此 BGS 和 BPS 的同时使用并不会增加传感系统的复杂度。

3 快速 BOTDA 传感系统的搭建

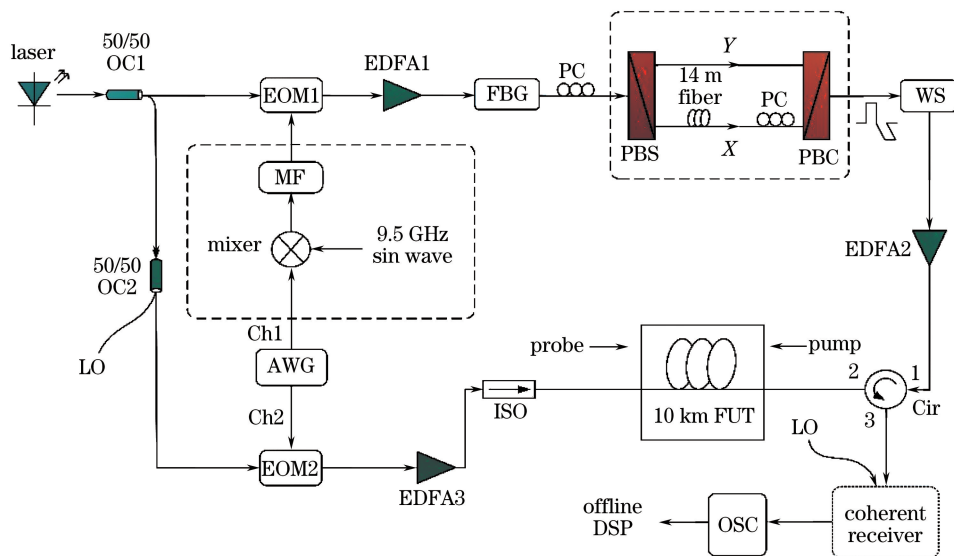
所搭建的快速 BOTDA 传感系统的结构框图如图 3 所示。一个线宽为 100 kHz 的可调谐激光器输出一束中心波长为 1550 nm 的激光，然后该激光被两个 50:50 的光耦合器分成三束，分别用作本振光、探测光和抽运光。

3.1 探测光端的实现过程

在探测光端，AWG 的通道 1 首先输出一个 DEFC 信号，接着该信号通过 EOM2 被加载到探测光上，由此产生所需的基带 DOFC 信号。在经过一个掺铒光纤放大器(EDFA3)后，DOFC 信号的平均功率被放大到 2 dBm，之后该信号输入传感光纤的头端。快速 BOTDA 传感系统所用的光纤由 10 km 标准单模光纤(SSMF)组成，DOFC 信号和抽运脉冲将在其中通过 SBS 效应发生相互作用。通过这个过程，施加在光纤上的环境变量如温度和应力等信息就会被 DOFC 信号所收集，并映射到每个 DOFC 数据帧的强度和相位变化上。之后对 DOFC 信号进行相关的检测，就能获取相应的温度和应力信息，从而实现传感系统的传感过程。

3.2 抽运光端的实现过程

在抽运光端，一个经过预处理的抽运脉冲由 AWG 的通道 2 生成。接着，抽运脉冲和一个 9.5 GHz 的射频信号进行混频，由此产生 11 GHz 的抽运频率。为了滤除混频过程中所产生的干扰频率，系统用一个带通滤波器对混频器的输出进行滤波。随后，抽运脉冲会通过一个高消光比的 EOM1 被调制到抽运激光上，实验测得所用调制



FUT: fiber under test; OC: optical coupler; EOM: electro-optic modulator; EDFA: erbium-doped fiber amplifier; FBG: fiber Bragg grating; PC: polarization controller; PBS: polarizing beam splitter; PBC: polarizing beam combiner; MF: microwave filter; WS: wave shaper; ISO: isolator; Cir: circulator; Ch: channel; LO: local oscillator; OSC: oscilloscope; DSP: digital signal

图3 基于相干检测 DOFC 的快速 BOTDA 传感系统结构框图

Fig. 3 Structural diagram of fast BOTDA sensing system based on coherent detecting DOFC

器的最大消光比超过 30 dB。之后在调制器的输出端,抽运脉冲的低频边带被一个窄带宽光纤布拉格光栅所滤除。

为了降低偏振噪声对 SBS 效应的影响,传感系统对抽运脉冲使用了正交偏分复用技术:利用一个偏振分束器(PBS)先将抽运脉冲分成两束强度相同且具有正交偏振态的偏振光 X 和 Y(在 PBS 前的偏振控制器是为了控制所输出的两束光强度相等);然后其中一束偏振光会先后经过一段 14 m 的光纤和另外一个偏振控制器,14 m 光纤是为了产生 70 ns 的延时(相当于脉宽),而偏振控制器则是为了调整其偏振态以便后面的偏振合束。之后通过一个偏振合束器将两束正交偏振光又重新合束,到此就产生了具有正交偏分复用的抽运脉冲。

而后,为了获得更高的消光比和峰值功率,具有正交偏分复用的抽运脉冲被送入一个波形整形器里作进一步滤波。接着,该抽运脉冲被一个 EDFA2 所放大,放大后其平均功率约为 1 dBm。之后这个具有高功率的抽运脉冲会通过一个光环形器输入传感光纤,以激发光纤里的 SBS 效应。

3.3 接收端的处理过程

在传感系统的接收端,与强抽运脉冲发生 SBS 作用后,DOFC 信号被传送到一个集成数字的相干接收机里,并与本振光拍频进行相干解调。而之后相干接收机的输出信号会直接被一个工作在

40 GSa/s 采样率下的实时示波器所采集。需要注意的是,为了便于示波器的数据采集,一个与抽运脉冲相同的电信号已被用于示波器进行触发采样。

由实时示波器所采集的数据会经过相应的数字信号处理(DSP)进行处理,即同步、快速傅里叶变换、相位噪声补偿以及 BGS 和 BPS 检测,以提取每个 DOFC 数据帧上的强度和相位信息。利用这些信息就能实现 BGS 和 BPS 的快速重构,获得相应的 BFS 分布,从而实现光纤温度或者应力的传感。

4 传感系统的实验验证

4.1 常态下对传感系统进行 SBS 效应测试

在快速 BOTDA 传感系统中,所用的 10 km 传感光纤实际上是两卷 5 km 的 SSMF,这两卷 SSMF 具有相同的 BFS 分布,而且在常态下其 BFS 值大约是 10.832 GHz。在没有施加任何外界因素的情况下,对整段传感光纤进行 SBS 效应测试,由光纤某一位置测量所得到的原始 BGS 和 BPS 如图 4 所示,其中红色曲线分别代表着经过洛伦兹拟合的 BGS 和经过线性拟合的 BPS。从图 4 可以得出,光纤的 BFS 对应 BGS 中的增益最大点和 BPS 中的相位变化最大点;而且由于 BPS 在 BFS 附近的区域是准线性的,其对 BFS 的变化更加敏感,因此在传感系统中 BPS 被一并使用,以实现更高精度的 BFS 监测。

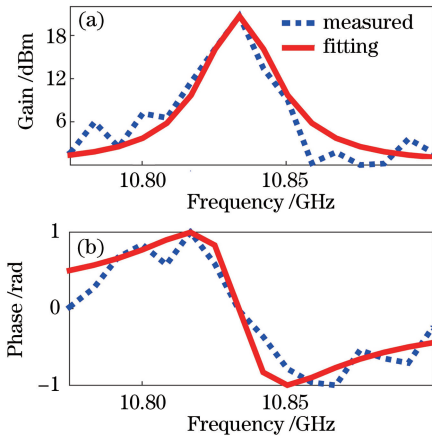


图4 在传感光纤某一位置测量所得的原始 BGS 和 BPS。

(a) BGS; (b) BPS

Fig. 4 Original BGS and BPS measured at a position of sensing fiber. (a) BGS; (b) BPS

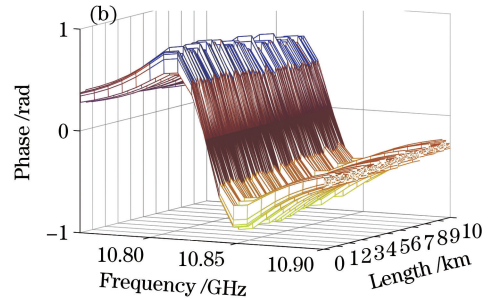
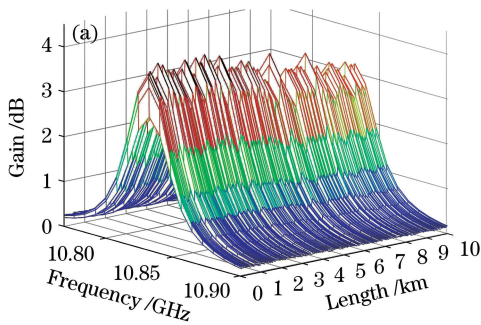


图5 沿 10 km 传感光纤的光谱分布。(a) BGS; (b) BPS

Fig. 5 Spectral distributions along 10 km sensing fiber. (a) BGS; (b) BPS

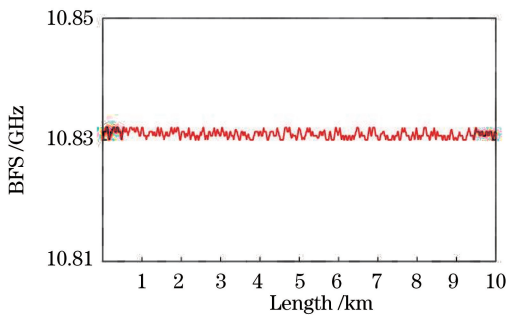


图6 传感系统测量所得的 BFS 分布

Fig. 6 BFS distribution measured by sensing system

4.3 传感系统关于温度、应力传感的测试

为了验证传感系统的性能,本研究对其分别开展了温度和应力的传感测试。在温度测试中,传感系统在 10 km 光纤的中间位置选取了一段约 15 m 的光纤,并用温控箱对其进行加热,加热范围从 30~65 °C,加热步长为 5 °C。温度测试的结果如图 7(a) 所示,通过对数据进行线性拟合,可得出传感系统关于温度测量的最大偏差约为 0.3 °C,而所用光纤的

4.2 传感系统关于分布式传感的特性

由传感系统测量所得的沿整段 10 km 光纤的 BGS 和 BPS 分布情况如图 5 所示,而通过对 BGS 和 BPS 联合检测可知,所得到的光纤 BFS 分布如图 6 所示。可以看到,传感系统的 BGS、BPS,以及 BFS 在 10 km 光纤上都有一个相对均匀的分布,若在整段光纤的某一位置上发生了温度或者应力的改变,其都能对 BGS、BPS 和 BFS 产生相应的影响并被检测出来,这表明所提出的快速 BOTDA 传感系统具备长距离分布式传感的特性。而且,基于相干检测的 DOFC,整段光纤的 BFS 分布可在不用扫频和不做平均处理的条件下获得,所以传感系统的响应时间仅仅取决于所用光纤的长度。由于所用的传感光纤长度为 10 km,因此传感系统的响应时间就等于光波在光纤里来回往返一次所需时间,即为 0.1 ms。

温度系数为 0.8 °C/MHz(拟合时拟合系数 $R^2 = 0.9998$)。而对于应力测试,传感系统在 10 km 光纤的中间位置选取了另外一段光纤(长度与温度测试时选取的长度相同),并将其一端先固定在实验平台上,然后利用一个光学位移平台把该段光纤的另一端夹住,通过移动光学平台来对光纤逐渐施加应力。在测试中应力的变化范围是 0~900 $\mu\epsilon$,应力增加的步长为 100 $\mu\epsilon$ 。图 7(b)表示了应力测试的结果,通过进行线性拟合,可以得出如下结果:传感系统关于应力测试的最大偏差小于 10 $\mu\epsilon$,而所用光纤的应力系数为 22.14 $\mu\epsilon$ /MHz(拟合时拟合系数 $R^2 = 0.9996$)。从图 7 可以看出,BFS 随温度/应力的改变呈线性变化,这与它们之间的关系^[21]

$$\delta v_B = C_T \delta T + C_\epsilon \delta \epsilon, \quad (4)$$

相符。式中: C_T 和 C_ϵ 表示光纤的温度/应力系数; δv_B 、 δT 和 $\delta \epsilon$ 分别表示 BFS、温度/应力的变化。结合温度/应力系数、DOFC 的 2 MHz 频率间隔,传感系统关于温度和应力的探测精度分别是 1.6 °C 和

44 $\mu\epsilon$, 这表明本文传感系统能够实现精度较高的温度和应力传感。

另外, 传感系统还对整段 10 km 光纤的前、中、后三个不同位置分别进行加热(加热温度均为 60 $^{\circ}\text{C}$), 以检验其关于长距离、分布式传感的特性,

测试结果如图 8 所示。从图 8 可以看出, 传感系统对 10 km 光纤的不同位置进行相同温度的加热, 所得到的 BFS 变化是一样的, 这说明本研究的快速 BOTDA 传感系统能被用于长距离、分布式的传感应用中。

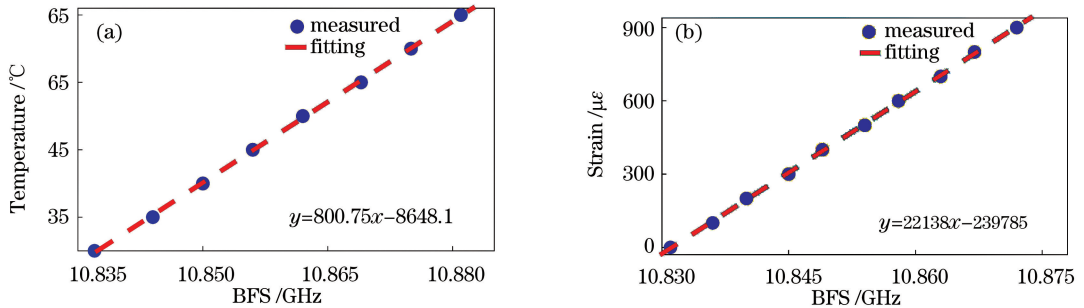


图 7 测量结果。(a) 温度; (b) 应力

Fig. 7 Measurement results. (a) Temperature; (b) strain

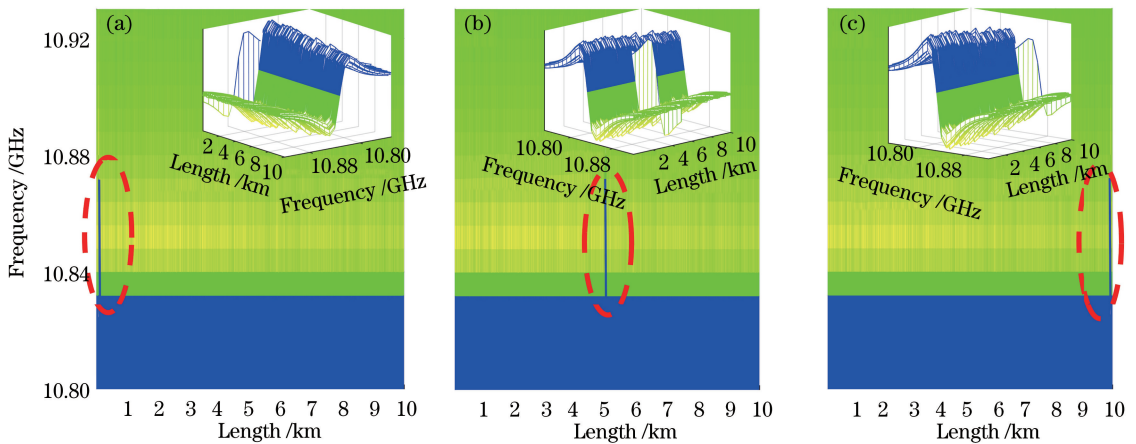


图 8 加热 10 km 光纤不同部位时的光谱图。(a) 前端; (b) 中间; (c) 后端

Fig. 8 Spectra obtained when heating different positions of 10 km fiber. (a) Front-end; (b) middle-part; (c) back-end

5 结 论

提出并设计了一个基于相干检测 DOFC 的快速 BOTDA 传感系统。针对传统 BOTDA 技术的扫频问题, 该传感系统利用了 DOFC 以及相干解调的 BGS 和 BPS, 在不作任何扫频和平均处理的情况下快速获得了整段传感光纤的 BFS 分布, 极大地缩短了 BOTDA 传感系统的测量时间。利用相关的实验验证了传感系统在 10 km 光纤上响应时间为 0.1 ms、温度/应力的探测精度为 1.6 $^{\circ}\text{C}/44 \mu\epsilon$, 并指明传感系统能被用于长距离分布式的传感应用中。同时, 由于具备快速响应的特性, 本研究所提出的基于相干检测 DOFC 的快速 BOTDA 传感系统可适用于一些大型结构的实时健康监测, 其在很多测量速度要求较高的传感应用中将具有很大的潜力。对

此, 在未来的工作里, 所提出的快速 BOTDA 传感系统将会被用于实现一些快速变化参量的传感(比如测量一定频率的振动), 其目的是以具体的实验测试结果来进一步证实 BOTDA 传感系统的快速响应特性。

参 考 文 献

- [1] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors[J]. Sensors, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [2] Motil A, Bergman A, Tur M. State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing (INVITED) [J]. Optics & Laser Technology, 2016, 78: 81-103.
- [3] Zhang L X, Li Y Q, An Q, *et al.* Temperature sensing technology based on Rayleigh Brillouin optical time domain analysis with pulse coding [J]. Acta

- Optica Sinica, 2017, 37(11): 1106004.
张立欣, 李永倩, 安琪, 等. 脉冲编码瑞利布里渊光时域分析温度传感技术[J]. 光学学报, 2017, 37(11): 1106004.
- [4] Luo Y, Yan L S, Shao L Y, *et al.* Golay-differential pulse hybrid coding technology based on Brillouin optical time domain analysis sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0806002.
罗源, 闫连山, 邵理阳, 等. 基于布里渊光时域分析传感系统的格雷-差分脉冲混合编码技术[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0806002.
- [5] Shang Q F, Hu Y T, Liu W. Feature extraction of Brillouin scattering spectrum based on cross-correlation convolution and high-order centroid calculation[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106011.
尚秋峰, 胡雨婷, 刘薇. 基于互相关卷积与高阶矩质心计算的布里渊散射谱特征提取[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106011.
- [6] Bernini R, Minardo A, Zeni L. Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Letters, 2009, 34(17): 2613-2615.
- [7] Sovran I, Motil A, Tur M. Frequency-scanning BOTDA with ultimately fast acquisition speed [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(13): 1426-1429.
- [8] Minardo A, Catalano E, Zeni L. Cost-effective method for fast Brillouin optical time-domain analysis [J]. Optics Express, 2016, 24(22): 25424-25431.
- [9] Kim Y H, Song K Y. Tailored pump compensation for Brillouin optical time-domain analysis with distributed Brillouin amplification [J]. Optics Express, 2017, 25(13): 14098-14105.
- [10] Peled Y, Motil A, Yaron L, *et al.* Slope-assisted fast distributed sensing in optical fibers with arbitrary Brillouin profile[J]. Optics Express, 2011, 19(21): 19845-19854.
- [11] Hu J H, Xia L, Yang L, *et al.* Strain-induced vibration and temperature sensing BOTDA system combined frequency sweeping and slope-assisted techniques [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 13610-13620.
- [12] Zhou D W, Dong Y K, Wang B Z, *et al.* Slope-assisted BOTDA based on vector SBS and frequency-agile technique for wide-strain-range dynamic measurements[J]. Optics Express, 2017, 25(3): 1889-1902.
- [13] Voskoboinik A, Wang J, Shamee B, *et al.* SBS-based fiber optical sensing using frequency-domain simultaneous tone interrogation [J]. Journal of Lightwave Technology, 2011, 29(11): 1729-1735.
- [14] Voskoboinik A, Yilmaz O F, Willner A W, *et al.* Sweep-free distributed Brillouin time-domain analyzer (SF-BOTDA) [J]. Optics Express, 2011, 19(26): B842-B847.
- [15] Jin C, Guo N, Feng Y H, *et al.* Scanning-free BOTDA based on ultra-fine digital optical frequency comb[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 5277-5284.
- [16] Zhao C, Tang M, Wang L, *et al.* BOTDA using channel estimation with direct-detection optical OFDM technique [J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12698-12709.
- [17] Fang J, Xu P B, Dong Y K, *et al.* Single-shot distributed Brillouin optical time domain analyzer[J]. Optics Express, 2017, 25(13): 15188-15198.
- [18] Urricelqui J, Zornoza A, Sagues M, *et al.* Dynamic BOTDA measurements based on Brillouin phase-shift and RF demodulation[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 26942-26949.
- [19] Lopez-Gil A, Soto M A, Angulo-Vinuesa X, *et al.* Evaluation of the accuracy of BOTDA systems based on the phase spectral response[J]. Optics Express, 2016, 24(15): 17200-17214.
- [20] Urricelqui J, Lopez-Fernandino F, Sagues M, *et al.* Polarization diversity scheme for BOTDA sensors based on a double orthogonal pump interaction[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12): 2633-2638.
- [21] Li Y Q, An Q, Li X J, *et al.* Optical fiber sensing technology based on loss vector Brillouin optical time domain analysis [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0906004.
李永倩, 安琪, 李晓娟, 等. 损耗型矢量布里渊光时域分析光纤传感技术[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0906004.