

基于光频域反射技术的超弱反射光纤 光栅传感技术研究

李政颖^{1,2} 孙文丰^{1,2*} 王洪海¹

¹武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070

²武汉理工大学光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室, 湖北 武汉 430070

摘要 光纤光栅传感技术近年来的快速发展对复用容量和空间分辨率提出了更高的要求。采用超弱反射光纤光栅(FBG)结合光频域反射技术(OFDR),实现了大容量、高空间分辨率的准分布式光纤光栅传感网络的解调。通过对拍频信号分离的优化和非线性矫正,利用拍频信号的频谱信息,实现了高空间分辨率的光纤光栅位置信息的提取,并进行各个光栅拍频信号时域上的分离,再结合希尔伯特变换还原光栅的反射光谱信息,实现光栅的波长解调。实现了单根光纤上200个间隔为20 mm、中心波长为1552.8 nm、反射率仅为0.1%的全同超弱反射光纤光栅的解调。实验结果表明,在-10℃~80℃的温度范围内,各个光栅的中心波长随温度变化的线性度达到99.6%以上。

关键词 传感器; 光纤传感; 准分布式传感; 超弱反射光纤光栅; 光频域反射技术

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0806003

Research on the Ultra-Weak Reflective Fiber Bragg Grating Sensing Technology Based on Optical Frequency Domain Reflection Technology

Li Zhengying^{1,2} Sun Wenfeng^{1,2} Wang Honghai¹

¹National Engineering Laboratory for Fiber Optic Sensing Technology,

Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

²Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing,

Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

Abstract The rapid development of fiber grating sensing technology in recent years puts forward higher request on the multiplexing capacity and spatial resolution. The demodulation of quasi-distributed fiber Bragg grating (FBG) sensing with high capacity and high spatial resolution is achieved by adopting ultra-weak FBGs and optical frequency domain reflection technology (OFDR). In order to achieve the grating demodulation, the optimization of beat frequency signal separation and nonlinear correction to realize the extraction of fiber grating position information with high spatial resolution as well as the separation of the grating beat signal in the time domain are used respectively. Then the grating reflection spectral information by using the Hill Hilbert transform is restored. The system multiplex 200 FBGs along a single optical fiber have the same center wavelength of 1552.8 nm, reflectivity of 0.1%, space interval of 20 mm. The experimental results shows that, in the temperature range of -10℃~80℃, the measured center wavelength of FBG has good linearity of 99.6%.

Key words sensor; fiber optical sensing; quasi-distributed sensing; ultra-weak fiber gratings; optical frequency domain reflectometer

OCIS codes 060.3735; 030.1640; 230.7405

收稿日期: 2015-01-29; 收到修改稿日期: 2015-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(61205072、61290311)

作者简介: 李政颖(1981-),男,博士,副教授,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: zhyli@whut.edu.cn

*通信联系人。E-mail: sunwenfeng@whut.edu.cn

1 引 言

光纤光栅(FBG)传感技术是一种典型的准分布式光纤传感技术,通过对 FBG 反射光谱中心波长漂移的监测即可测量外界参量的变化,其探测能力不受光源功率波动、光纤弯曲损耗、探测器老化等因素的影响,因而适合长期安全监测^[1-2]。近年来众多工程领域对大容量和高空间分辨率的需求增多^[3]。其中基于FBG的高复用容量技术是解决上述测量要求的重要关键技术。波分复用是最常见的复用技术,然而受光器件带宽的限制,单路复用容量一般不超过几十个^[4]。为了克服这一限制,相继提出了基于光时域反射(OTDR)的解调技术^[5]和基于光频域反射(OFDR)的解调技术^[6]。OTDR解调技术具有高复用、长距离的优势,然而受到激光脉冲宽度和信噪比的相互制约,难以实现高精度、高空间分辨率,一般仅能达到米的数量级^[7-8]。OFDR技术是基于光源扫频和光外差探测的测量技术,不仅理论上具有很高的复用容量,且具有极高的空间分辨率和精度,其复用容量主要受限于FBG的光谱阴影和串扰拍频^[9]。

目前,国外对于 OFDR 解调技术的研究相对比较成熟。2008年,美国 NASA Lanley 研究中心报道了基于 OFDR 技术的光纤光栅解调系统,单根传感光纤最多串接了 480 个光纤光栅,空间分辨率为 12.7 mm^[10]。2011 年,比利时蒙斯埃诺大学 Yuksel 等^[11]使用 10 个波长相同、反射率低于 10% 的光纤光栅对温度场进行测量,通过 OFDR 对串联光栅阵列进行解调,实测温度偏差小于 1.5 °C。2012 年,日本东京大学 Murayama 等^[12]通过结合 OFDR 与空分复用(SDM)技术实现了多点光纤光栅解调,单根光纤最多串接了 60 个光纤光栅,光栅间距为 100 mm。

然而,国内在这方面的研究起步较晚,目前的研究基本停留在仿真和初步实现阶段。2012 年,中国电子科技集团公司第 34 所对 20 个间隔为 5 mm 的光纤光栅构成的传感系统进行了数值研究^[13]。同年,天津大学丁振扬等^[14]使用超窄线宽激光器实现了 3 个光纤光栅的解调,空间分辨率为 50 mm。2014 年,武汉理工大学朱方东等^[15]提出了一种基于 OFDR 的总线型拓扑结构的 FBG 传感系统,实现了 3 个反射率为 90% 的光纤光栅解调。然而目前国内还未见反射率低于 1% 的弱反射 FBG-OFDR 解调系统的报道,对弱反射光栅的探测能力不足,不能实现大容量的复用,使得跟国外的研究相比,在复用率和空间分辨率等指标上还有很大的差距。针对上述不足,本文采用了反射率仅为 0.1% 的全同弱光栅,并通过对拍频信号的分离优化降低了串扰拍频对 FBG 位置信息解调的影响。同时采用参考光路和拟合修正方法对扫频非线性进行修正,提高了系统的空间分辨率。成功实现了单根光纤上 200 个全同超弱反射光栅的解调,空间分辨率达 20 mm,温度测试结果表明串联的 200 个 FBG 均具有较好的线性度。

2 测量原理

图 1 所示为基于光频域反射的超弱反射光纤光栅传感系统原理框图。激光器发出的扫频光经耦合器 C3 分为两个路径,即检测干涉通道和参考干涉通道。

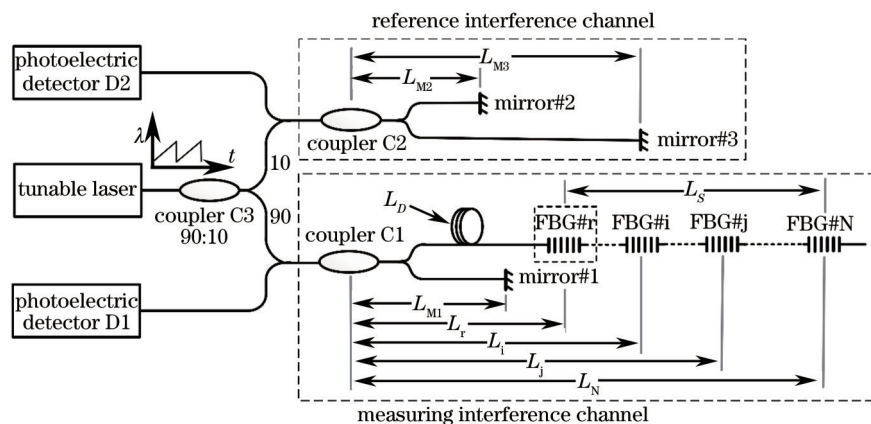


图 1 基于 OFDR 的超弱反射光纤光栅传感系统框图

Fig.1 Configuration of the OFDR system with ultra-weak fiber gratings sensing

2.1 光栅位置信息解调

检测通道由耦合器 C1、反射镜#1 和传感 FBG 阵列组成,光经过耦合器 C1 处分为两束,分别被反射镜#1

和传感FBG反射回耦合器C1,并在耦合器C1上产生拍频现象

扫频激光器输出线性频率扫描的连续光,光源发出光信号可以表示为

$$E(t) = E_0 \cos[2\pi(v_0 + \gamma_v t)t], \quad (1)$$

式中 v_0 表示起始扫频频率; γ_v 表示扫频速率。

设被反射镜#1反射到耦合器C1的本振光信号对应时延为 τ_{M1}

$$\tau_{M1} = 2L_{M1}n_{eff}/c, \quad (2)$$

式中 n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, c 为真空中的光速。则本振光可表示为

$$E(\tau_{M1}, t) = E_0 \cos[2\pi(v_0 + \gamma_v \tau_{M1})(t - \tau_{M1})], \quad (3)$$

设被FBG#i反射回耦合器的反射光信号对应的时延为 $\tau_i(\tau_i = 2L_i n_{eff}/c)$, 反射光表示为 $E(\tau_i, t)$ 。光电探测器上的探测到的光信号包括了本振光和所有FBG的反射光,则探测器上感受到的总光场可以表示为

$$E_{D1} = \sum E(\tau_i, t) + E(\tau_{M1}, t), \quad (4)$$

由于光电探测器输出的光电流与光场场强的平方成正比,则光电探测器D1检测到的交流信号可表示为

$$u(t) = \sigma E_{D1} E_{D1}^* \propto 2\sigma \sum_{m=1}^N E_0^2 r_{M1} r_{FBG} \cos[2\pi\gamma_v(\tau_i - \tau_{M1})t] + u_{noise}(t), \quad (5)$$

式中 σ 是一个常数,取决于光电探测器灵敏度, r_{M1} 、 r_{FBG} 分别代表反射镜#1和FBG的反射率, $u_{noise}(t)$ 为同波长光纤光栅之间产生的串扰拍频信号。 Σ 中每一项分别为反射镜#1与对应FBG产生的拍频信号,由(5)式可以看出,每个FBG对应的拍频信号都有一个独特的频率 $f_{bi} = \gamma_v(\tau_i - \tau_{M1})$,结合(2)式可得 $f_{bi} = 2\gamma_v(L_i - L_{M1})n_{eff}/c$ 即

$$L_i = cf_{bi}/2\gamma_v n_{eff} + L_{M1}, \quad (6)$$

式中 L_{M1} 为定值,因此拍频信号的频率可以反映FBG的位置信息,将探测器D1检测到的交流信号通过快速傅立叶变换(FFT)得到频域信息,也就得到了传感光纤上所有FBG的位置信息。

2.2 光栅光谱信息解调

如图2所示,OFDR中每个光纤光栅都对应有频率独特的拍频信号,通过选取FBG#i对应的拍频信号频率 f_{bi} 进行快速傅里叶逆变换(IFFT),可以在混叠的信号中分离出FBG#i的拍频信号。

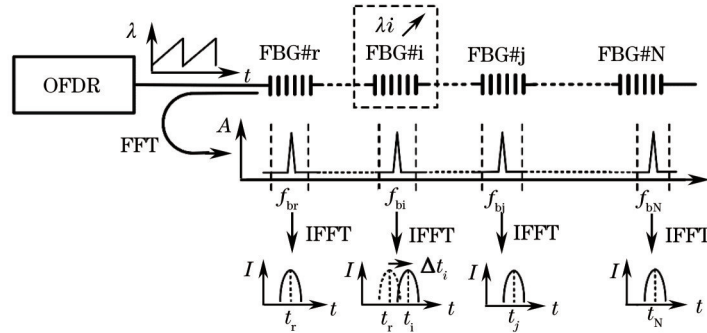


图2 光纤光栅波长解调原理

Fig.2 Schematic of FBG wavelength demodulation

拍频信号经过希尔伯特变换获取低频包络,即为FBG#i反射光强度随时间变化的曲线。再对该曲线进行高斯拟合得到曲线中心对应的时间点,该时间点激光器输出的波长即为FBG#i的布拉格波长。

设布拉格波长为 λ_r 的参考光栅FBG#r对应的的时间点为 t_r ,当传感光栅FBG#i布拉格波长变化为 λ_i 时检测到的时间点为 t_i ,则扫频激光器在时间 $\Delta t_i = t_i - t_r$ 内输出光的光频变化为

$$\Delta f = \Delta t_i \gamma_v, \quad (7)$$

而 λ_i 与 λ_r 的频率差为

$$\Delta f = c/\lambda_i - c/\lambda_r, \quad (8)$$

考虑到 $\lambda_r - \lambda_i \ll \lambda_r$, 有

$$\lambda_i = \lambda_r - \Delta t_i \gamma_v \lambda_i^2 / c \quad (9)$$

因此通过测量时间差 Δt_i , 即可实现网络中光纤光栅布拉格波长的解调。

3 测量干扰因素及抑制

3.1 光谱阴影

如图3所示,在串接式传感系统中,“下游”传感器的入射光为上一级传感器的透射光,光在经过“上游”传感器时部分波长与该传感器光谱相匹配的光被反射,因此“下游”传感器的入射光光谱会产生畸变。若“下游”传感器与“上游”传感器工作波长范围有重叠,则“下游”传感器的反射光光谱也会产生畸变,从而会影响传感FBG波长的解调。

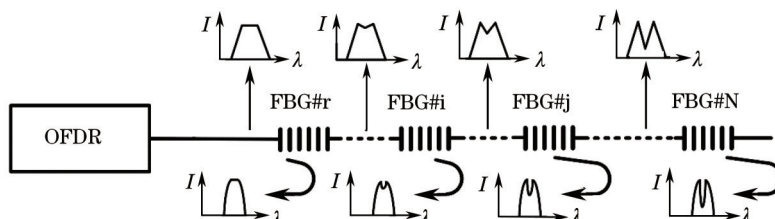


图3 光谱阴影对光谱的影响

Fig.3 Spectrum shadow effects on spectrum

光谱畸变的程度主要由单根光纤上复用FBG的数量和反射率决定,FBG反射率越低对光谱造成的畸变越小,为了增大系统的复用容量,采用了反射率仅为0.1%的光纤光栅,大大降低了“下游”传感器反射光谱的畸变。

3.2 串扰拍频

检测通道中传感FBG的反射光除了与反射镜#1的本振光产生拍频外,还与其他布拉格波长相同的FBG的反射光产生拍频。光电探测器 D_1 检测到的交流信号加入串扰拍频信号后表示为

$$u(t) \propto 2\sigma \sum_{i=1}^N E_0^2 r_{M1} r_{\text{FBG}} \cos[2\pi\gamma_v(\tau_i - \tau_{M1})t] + 2\sigma \sum E_0^2 r_{\text{FBG}}^2 \cos[2\pi\gamma_v(\tau_j - \tau_i)t], \quad (10)$$

式中 τ_i 、 τ_j 分别表示 FBG#i、FBG#j 对应的时延,由 (10) 式可以看出串扰信号也是多个频率拍频信号的叠加,为了减小或避免该信号对正常检测信号产生干扰,可以从减小信号强度和改变信号频率两个方面采取措施。由于拍频信号的强度与两反射面的反射率有关系,因此适当减小 FBG 反射率 r_{FBG} 可消弱串扰信号,但无法从根本上避免干扰,避免干扰的另一个办法是改变检测拍频信号的频率。

由(6)式可知,拍频信号频率取决于传感FBG与反射镜#1之间的光程差,同理FBG之间产生的串扰拍频信号的频率 f_{bnoise} 为

$$f_{\text{bnoise}} = 2\gamma_v(L_j - L_i)n_{\text{eff}}/c, \quad (11)$$

在传感光纤前加入一段长度为 L_D 的延迟光纤后,传感FBG#i与反射镜#1产生的拍频信号频率 f_{bi} 变为

$$f_{\text{bi}} = 2\gamma_v(L_D + L_i - L_{M1})n_{\text{eff}}/c, \quad (12)$$

而延迟光纤的加入对 f_{bnoise} 的频率无影响, f_{bnoise} 的最大值和 f_{bi} 的最小值分别为

$$f_{\text{bnoise max}} = 2\gamma_v(L_N - L_r)/c = 2\gamma_v L_s n_{\text{eff}}/c, \quad (13)$$

$$f_{\text{bi min}} = 2\gamma_v(L_D - L_{M1})n_{\text{eff}}/c, \quad (14)$$

若要使两拍频信号在频域上不交叠,则

$$f_{\text{bi min}} > f_{\text{bnoise max}} \quad \text{即} \quad L_D > L_s + L_{M1}, \quad (15)$$

延时光纤长度 L_D 需大于传感光纤长度 L_s 与反射镜#1到耦合器C1长度 L_{M1} 之和。

在没有延时光纤时,如图4(a)所示,串扰拍频信号和待检测拍频信号在频域上相互重叠,对光栅位置信息的解调带来了不良影响。加入延时光纤后,如图4(c)所示,两者完全分离。

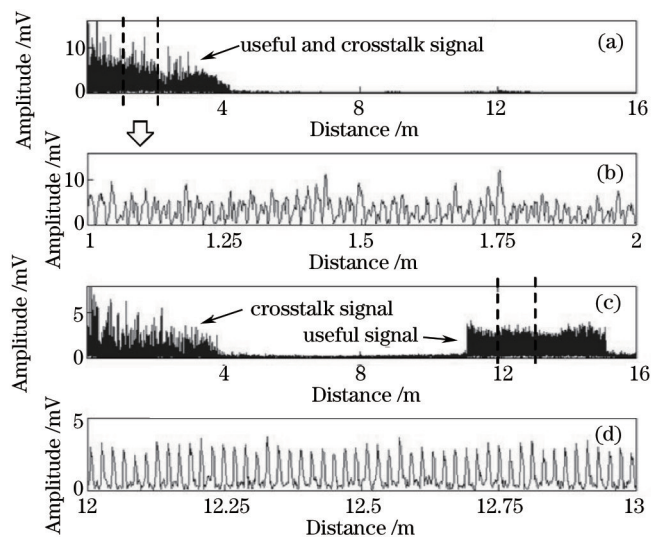


图4 拍频信号频谱图。(a)无延时光纤;(b)无延时光纤时频谱的特写;(c)有延时光纤;(d)有延时光纤时频谱的特写

Fig.4 Beat frequency signal spectrum. (a) Without buffer fiber; (b) close-up of spectrum without buffer fiber;

(c) with buffer fiber; (d) close-up of spectrum with buffer fiber

3.3 非线性扫频

由(6)式可知,拍频信号频率与激光器扫频速率 γ_v 相关,当 γ_v 为恒定值时,拍频信号频率成分单一,而扫频激光器在实际光频扫描过程中存在非线性扫频,扫频速率随时间变化为 $\gamma_v(t)$,则拍频信号频率为

$$f_{br} = 2\gamma_v(t)(L_i - L_{M1})n_{eff}/c. \quad (16)$$

非线性扫频会引起拍频信号在频谱上的展宽,空间分辨率严重恶化。系统增加参考干涉通道,以便对光源非线性扫频进行补偿,参考通道的拍频信号频率为

$$f_{br} = 2\gamma_v(t)(L_{M3} - L_{M2})n_{eff}/c. \quad (17)$$

通过检测参考干涉通道拍频信号的频率 f_{br} 可以得到 $\gamma_v(t)$,从而对测量干涉通道的拍频信号进行非线性补偿,如图5所示,未补偿前频谱展宽非常严重,非线性补偿后频谱被压缩,有效地提高了系统的空间分辨率,实现了间隔为20 mm的FBG的识别,如图5(d)所示,系统清晰地分离了间隔为20 mm的FBGs。

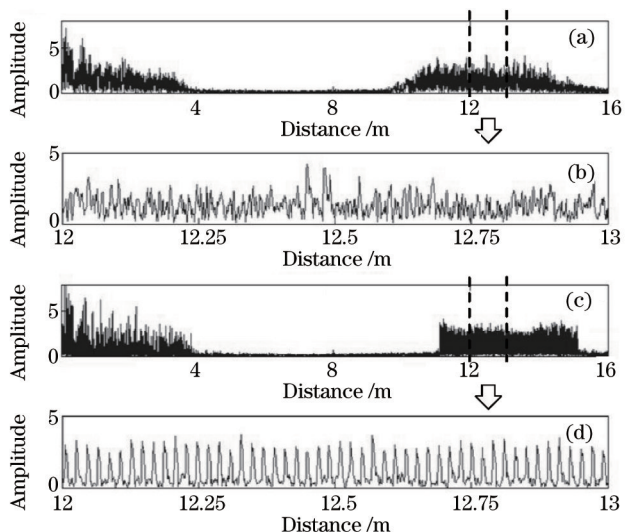


图5 非线性校准。(a)校准前信号的频谱图;(b)校准前频谱图的特写;(c)校准后信号的频谱图;(d)校准后频谱图的特写

Fig.5 Nonlinear calibration. (a) Signal spectrum before calibration; (b) close-up of spectrum before calibration;

(c) signal spectrum after calibration; (d) close-up of spectrum after calibration

3.4 反射光谱恢复

上一章对FBG反射光谱的恢复进行了原理阐述,本节将通过实验进行验证。图6(a)所示为所有FBG拍

频信号混叠在一起的时域信号,图 6(b)为相应的频域信号,利用窗口滤波器提取单个 FBG 的拍频信号进行 IFFT,如图 6(c),可分离出该 FBG 的拍频信号。利用希尔伯特变换获取拍频信号的包络曲线,由于波长随时间均匀变化,光强随时间的变化曲线即为该 FBG 的反射光谱,如图 6(d)所示。再通过高斯拟合,可求得该 FBG 中心波长对应的时间点,从而解调出中心波长,如图 6(e)所示。

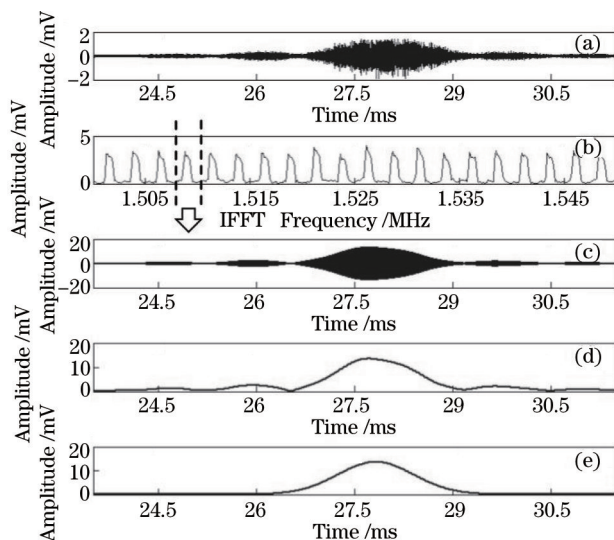


图 6 FBG 波长解调。(a)所有光栅的信号时域图;(b)所有光栅的信号频域信息;(c)单光栅信号时域图;
(d)单光栅反射光光谱;(e)反射光光谱高斯拟合曲线

Fig.6 FBG wavelength demodulation. (a) Waveform in time domain of all FBGs; (b) waveform in frequency domain of all FBGs; (c) waveform in time domain of single FBG; (d) reflection spectrum of single FBG; (e) Gaussian curve fitting of reflection spectrum

4 实验结果与分析

实验采用的扫频激光器波长调谐范围设定为 1550~1555 nm,扫描速度为 100 nm/s。单根光纤上串接了 200 个反射率为 0.1%、布拉格波长同为 1552.8 nm 的光纤光栅,相邻光栅间隔为 2 mm。数据采集器的采样率、分辨率分别为 100 MHz、8 bit。

选取其中某一个光栅放入恒温装置,设置恒温装置使其温度从 25 ℃变化为 80 ℃,其余光栅放置在室温环境。由图 7 可以看出随着温度的变化,光栅的反射光谱发生了明显的漂移。

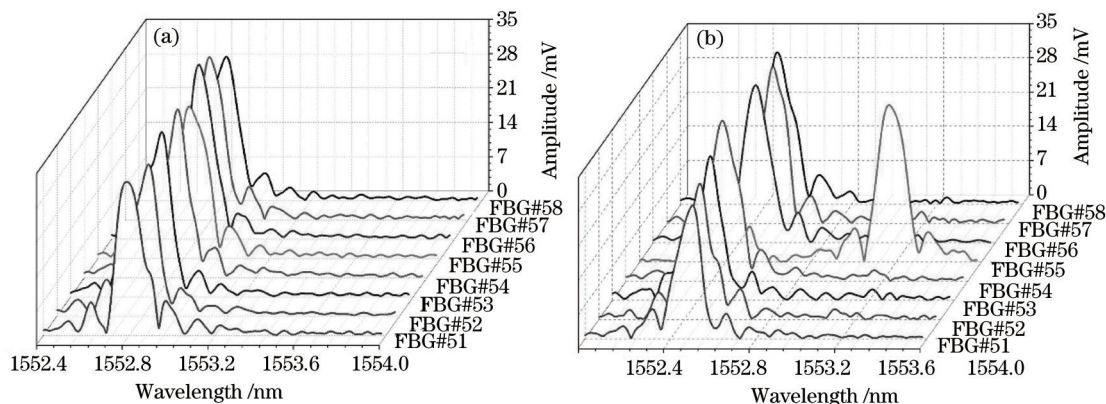


图 7 FBG 在不同温度下的反射光谱。(a) 25 ℃; (b) 80 ℃

Fig.7 FBG reflection spectrum under different temperature. (a)25 ℃; (b) 80 ℃

实验中采用恒温装置控制温度变化,将所有传感光栅放入恒温箱进行温度实验,以验证传感系统的可行性和精度。设置温度从 -10 ℃到 80 ℃,步长为 5 ℃。记录各光栅在不同温度条件下解调出的中心波长。图 8 列举了部分 FBG 温度与中心波长的拟合曲线,图 9 为 200 个 FBG 拟合曲线的拟合优度。

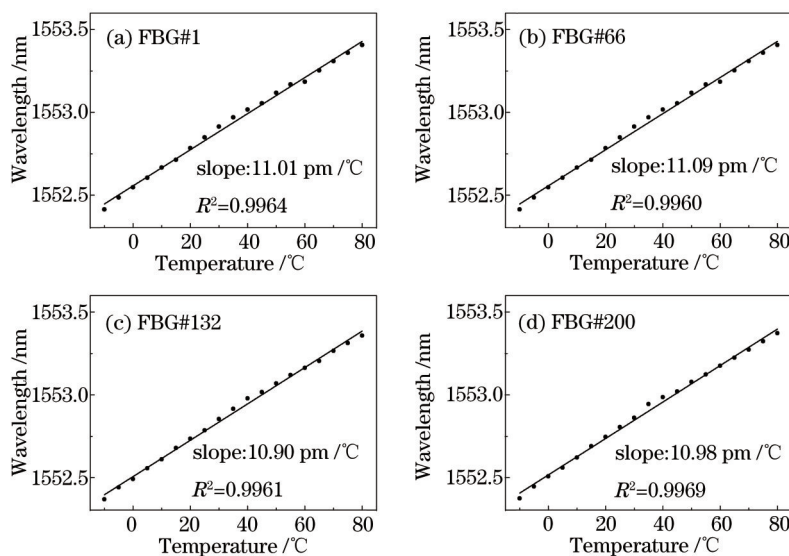


图 8 FBG 温度实验拟合曲线。(a)FBG#1;(b) FBG#66;(c) FBG#132;(d) FBG#200

Fig.8 Fitted curve in FBG temperature test. (a)FBG#1; (b) FBG#66; (c) FBG#132; (d) FBG#200

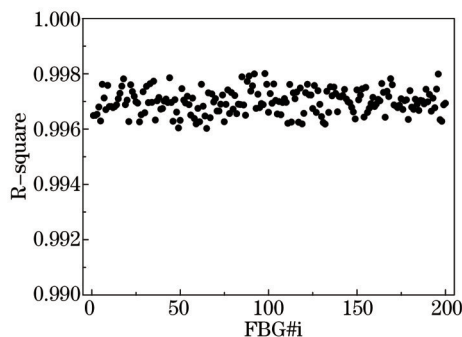


图 9 FBG 温度实验拟合曲线的拟合优度

Fig.9 R-square of the fitted curve in FBG temperature test

由图 8、图 9 可以看出,可以看出 FBG 的中心波长随温度变化呈良好的线性关系,得到拟合曲线的拟合优度均达到 99.6% 以上,光纤光栅的温度灵敏度为 11.0 pm/°C,与 1550 nm 波长窗口的 FBG 温度灵敏度 10 pm/°C 的理论值相符。

5 结 论

采用 OFDR 技术在单根光纤上实现了 200 个 FBG 的解调,在 -10~80 °C 的温度范围内,FBG 的中心波长随温度变化呈良好的线性,线性拟合优度达到 99.6% 以上,空间分辨率为 20 mm,很好地实现了准分布式温度的检测。采用反射率仅为 0.1% 的全同超弱反射光纤光栅,降低了光谱阴影对复用容量的影响。通过串接延时光纤进一步降低了串接式同波长 FBG 传感网络中存在的本质串扰对测量精度和传感容量的影响。增加参考干涉通道有效地补偿了光源非线性扫频对 FBG 位置信息解调的影响,提高了系统分辨率。

参 考 文 献

- 1 Cai Jiangjiang, Xu Guoliang, Hu Junhui, *et al.*. Remote giber Bragg grating sensors system based on self-heterodyne detection[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1214002.
蔡江江,许国良,胡君辉,等.基于自外差探测的多光纤光栅远程传感系统[J].中国激光,2012,39(12): 1214002.
- 2 Jia Ziguang, Reng liang, Li Hongnan, *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(5): 1298-1303.
贾子光,任亮,李宏男,等.应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程[J].中国激光,2010,37(5): 1298-1303.
- 3 Zhang Xiaoli, Liang Dakai, Lu Jiyun, *et al.*. A high reliable optic fiber Bragg grating sensor network design[J]. Chinese J Lasers,

- 2011, 38(1): 0105004.
张晓丽, 梁大开, 芦吉云, 等. 高可靠光纤布拉格光栅传感器网络设计[J]. 中国激光, 2011, 38(1): 0105004.
- 4 Li Zhenying, Zhou Zude, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large capacity fiber Bragg grating demodulator[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306007.
- 5 Liu Deming, Sun Qizhen. Distributed optical fiber sensing technology and its applications[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2009, 46(11): 29-33.
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J]. 激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.
- 6 Xie Weilin, Dong Yi, Zhou Qian, *et al.*. Phase noise analysis of optical frequency domain reflectometry[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(7): 0706003.
谢玮霖, 董毅, 周潜, 等. 光频域反射技术中激光相位噪声影响分析[J]. 光学学报, 2011, 31(7): 0706003.
- 7 Zhang Caixiang, Zhang Zhenwei, Zheng Wanfu, *et al.*. Study of a quasi-distributed optical fiber sensing system based on ultra-weak fiber bragg grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 41(4): 0405004.
张彩霞, 张震伟, 郑万福, 等. 超弱反射光栅准分布式光纤传感系统研究[J]. 中国激光, 2012, 41(4): 0405004.
- 8 Zhang Manliang, Sun Qizhen, Wang Zi, *et al.*. Investigation on distributed optical fiber sensor based on identical-low-reflective fiber gratings[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(8): 080604.
张满亮, 孙琪真, 王梓, 等. 基于全同弱反射光栅光纤的分布式传感研究[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(8): 080604.
- 9 Y Kivilcim, M Veronique, M Patrice, *et al.*. Complete analysis of multi-reflection and spectral-shadowing crosstalks in a quasi-distributed fiber sensor interrogated by OFDR[J]. IEEE Sensors Journal, 2012, 12(5): 988-995.
- 10 Richards L, Parker A R, Ko W L, *et al.*. Real-time In-Flight Strain and Deflection Monitoring with Fiber Optic Sensors[OL]. http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20080041514_2008039073.pdf [2015-5-22].
- 11 Y Kivilcim, M Patrice, W Marc, *et al.*. A quasi-distributed temperature sensor interrogated by optical frequency-domain reflectometer[J]. Measurement Science and Technology, 2011, 22(11): 115204.
- 12 H Murayama, K Tachibana, H Igawa, *et al.*. Strain monitoring of 6-m composite wing structure by fiber-optic distributed sensing system with FBGs[C]. European Conference on Composite Materials Venice, 2012: 84212D.
- 13 Li Zhaoyun, Li Su, Liu Zhiqiang, *et al.*. Research in optical frequency domain reflectometry fiber bragg grating distributed strain sensor[J]. Optical Communication Technology, 2012, 36(12): 33-35.
李沼云, 李苏, 刘志强, 等. 光频域反射光纤光栅分布式应变传感研究[J]. 光通信技术, 2012, 36(12): 33-35.
- 14 Ding Zhenyang, Liu Tiegeng, Liu Kun, *et al.*. Monitoring optical fiber sensor networks by optical frequency-domain reflectometry[C]. Photonics Global Conference, 2012: 6458067.
- 15 Zhu Fangdong, Zhang Dongsheng, Fan Peng, *et al.*. FBG sensing network with bus topological structure based on optical frequency domain reflectometry[J]. Optoelectronics·Laser, 2014, 24(3): 030526-030532.
朱方东, 张东生, 樊鹏, 等. 基于光频域反射的总线型拓扑结构FBG传感网络[J]. 光电子·激光, 2014, 24(3): 030526-030532.

栏目编辑: 刘丰瑞