

基于微波光子滤波器的高分辨率光纤横向负载传感器

崔益峰**, 汪弋平*, 施青云, 王鸣, 夏巍, 郝辉

南京师范大学物理科学与技术学院, 江苏省光电技术重点实验室, 江苏 南京 210023

摘要 提出了一种基于微波光子滤波器的高分辨率光纤横向负载传感器。与传统的基于光谱分析的光纤传感器不同,本传感器的信号解调是在微波域内完成的。其工作原理是利用保偏光纤光栅(PMFBG)构建偏振稳定的双波长光纤环形激光器,微波信号经电光调制器调制到激光器输出的光波上,借助长距离光纤形成的时延,形成一个两抽头的微波光子滤波器。理论和实验研究表明,该滤波器的频率响应与 PMFBG 上所受的横向压力之间存在线性关系,通过测量滤波器的微波谐振频率的变化,即可还原出待测横向压力的大小。实验获得了 $9.87 \text{ MHz} \cdot \text{N}^{-1}$ 的高灵敏度,实验结果与理论分析一致,证实了该方法的可行性。

关键词 传感器; 光纤传感; 横向压力; 微波光子滤波器; 光纤光栅

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1206004

High-Resolution Transverse Load Fiber Sensor Based on Microwave Photonic Filter

CuiYifeng**, Wang Yiping*, Shi Qingyun, Wang Ming, Xia Wei, Hao Hui

Jiangsu Key Laboratory on Opto-Electronic Technology, School of Physical Science and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210023, China

Abstract A high-resolution transverse load fiber sensor based on microwave photonic filter (MPF) is proposed. It is different from the conventional fiber sensors based on spectral analysis because the signal demodulation is finished in the microwave domain. The working principle is as follows. With the polarization-maintaining fiber Bragg grating (PMFBG), a dual-wavelength ring fiber laser with a stable polarization is constructed. The microwave signal is modulated on the laser output and a MPF with two taps are formed with the time delay introduced by the long distance fiber. The theoretical and experimental results show that there exists a linear relationship between the frequency response of this filter and the transverse force on the PMFBG. The transverse force to be measured can be retrieved by the detection of the resonance frequency shift of this filter. In addition, in the experiment, a high sensitivity of $9.87 \text{ MHz} \cdot \text{N}^{-1}$ is obtained. The consistency between the experimental and theoretical results confirms the feasibility of this method.

Key words sensors; fiber sensing; transverse force; microwave photonic filter; fiber Bragg grating

OCIS codes 060.2370; 120.5475; 070.4560; 060.3735

1 引 言

微波光子滤波器可以在光学领域中进行微波信号处理,具有大带宽、高分辨率、可调谐性和可重构性等特点^[1-3]。近年来,微波光子滤波器在战争系统、雷达、光子束控制阵列天线和通信信号处理中有着重要的应用。大部分微波光子滤波器是基于光学延迟线结构来实现的,其中两抽头的微

波光子滤波器最为简单,其本质是一种微波干涉。由于微波干涉相比光学干涉更加稳定并易于控制,所以微波光子滤波器在光纤传感领域的应用引起了研究人员的关注^[4-6]。例如,对于光纤光栅(FBG)传感器,光波长的变化可以转换为微波强度或微波频率的变化,利用成熟的电谱分析技术可以极大地提高系统的测量速度和分辨率。基于这一原理,研究人员提出了几种基于微波光子滤波

收稿日期: 2018-04-26; 修回日期: 2018-07-29; 录用日期: 2018-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(51775283)、江苏省自然科学基金(BK20161562)、江苏省高等学校自然科学研究重大项目(16KJA510001)

* E-mail: jeremy_ff@sina.com; ** E-mail: yifengcui@126.com

器的FBG应变传感器系统^[7-10]。然而,上述测量主要用于检测光纤光栅的轴向应变^[11],并且它们大多使用宽谱光源,对于长距离检测而言信噪比较低。

与此同时,在许多应用场合如复合材料的结构损伤检测、生物医学测量等,FBG需要测量横向负载^[12]。众所周知,对光纤施加横向压力会造成光纤横截面不对称,从而使FBG的反射光谱发生展宽甚至分裂。然而由于普通FBG的横向应变灵敏度有限,光栅反射峰的分裂不明显,因此通过简单的光谱分析较难检测横向负载。例如文献^[13]所提出的FBG传感器的横向压力灵敏度约为 $0.018 \text{ nm} \cdot \text{N}^{-1}$,而通常光谱分析仪(OSA)的分辨率约 0.02 nm ,测量精确度不高^[13]。与之相比,保偏光纤光栅(PMFBG)由于具有固有双折射,波长间隔较大,因而在横向负载测量领域倍受青睐。在文献^[14]中,PMFBG传感器的横向压力灵敏度约为 $-23 \text{ dB}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$ 。但是,基于PMFBG的横向负载传感仍然受到OSA的测量分辨率和速度的限制^[14]。因此,针对如何提高FBG的横向负载传感分辨率这一问题,需要进一步的研究。

本文提出了一种新型的FBG横向负载传感器系统,主要利用微波光子滤波器来解决上述问题。该系统首先由PMFBG构建双波长光纤环形激光器,由于PMFBG增强了偏振烧孔(PHB)效应,极大地减小了不同模式的竞争,因此该激光器输出稳定^[15]。需要指出的是,多波长激光器在波分复用系统、微波信号的产生和光纤传感等方面应用广泛^[16]。随后,该双波长光纤环形激光器经过微波信号调制后,结合色散器件,形成了一个双抽头的微波光子滤波器。该系统的传感理论是将PMFBG的谐振波长变化转化为微波光子滤波器的频率变化。当施加在PMFBG上的横向负载发生变化时,双波长激光器的波长会随之变化,微波光子滤波器的频率响应也会相应地改变。通过跟踪滤波器谐振频率的偏移,可以测量出相应的横向负载的大小。由于微波光子滤波器的谐振频率测量是在微波域内进行的,且电谱分析仪器具有超高分辨率,再加上光波长的微小变化会引起微波频率的巨大变化,所以横向负载传感器分辨率可以得到显著提高。此外,由于微波光子滤波器的频移仅仅依赖于激光器中由横向负载导致的两个反射峰波长间距的变化,因此本文提出的PMFBG横向压力传感器对温度变化和轴向应变不敏感。

2 理论分析

图1为基于微波光子滤波器的PMFBG横向负载传感器的结构示意图。双波长光纤环形激光器由掺铒光纤放大器(EDFA)、隔离器(ISO)、3-dB耦合器(OC)、偏振控制器1(PC1)和PMFBG组成。由于保偏光纤在慢轴和快轴上的有效折射率不同,因此PMFBG具有两个反射峰,分别对应于两个不同的偏振态。由环形激光器的工作原理可知,该双波长光纤激光器的波长是由PMFBG的谐振波长决定的,当横向负载作用于PMFBG上时,保偏光纤的双折射将会发生改变,引起的额外双折射将使PMFBG的反射光谱发生新的分离。PMFBG波长间距变化与所施加的力之间的关系表示为^[17]

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{n_0^2}{2} (p_{12} - p_{11})(1 + \nu)\epsilon_f, \quad (1)$$

式中: ϵ_f 为沿着应变方向的应力大小,与压力呈线性关系; λ_0 为PMFBG的平均中心波长; n_0 为光纤纤芯的有效折射率; ν 为泊松比; p_{11} 和 p_{12} 为弹光系数。从(1)式可以看出,当横向负载施加在PMFBG上时,PMFBG的反射峰的间隔会发生变化,从而双波长激光器的输出波长也会发生变化。通常,通过检测谐振波长的间距变化就可以实现横向压力的测量。然而,由于PMFBG的横向负载灵敏度较低,并且传统的光谱分析仪分辨率也比较低,因此难以实现波长间距的精确测量。然而,在本研究提出的方法当中,双波长激光器波长的变化将会转换为微波光子滤波器的谐振频率的变化,由于光域内的波长的微小变化会引起微波频率发生较大变化,且电谱分析技术具有更高的分辨率,因此可以显著提高横

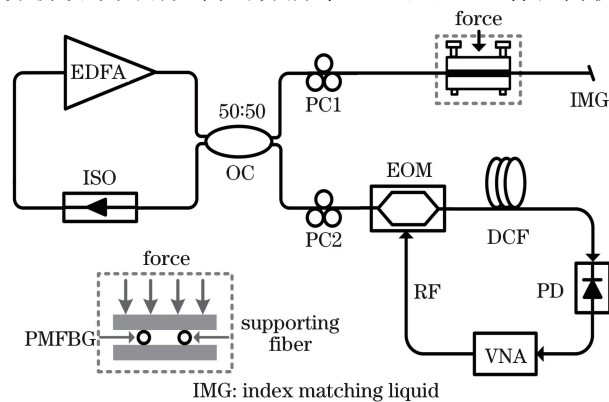


图1 基于微波光子滤波器的PMFBG横向负载传感器结构的示意图

Fig. 1 Structural diagram of PMFBG transverse load sensor based on microwave photonic filter

向负载测量的分辨率。图 2 是两抽头的微波光子滤波器的原理图,通过将射频(RF)信号调制到不同波长的光波上,借助光纤及相关器件实现对信号的采样、延迟、加权和相加等处理过程,就可以实现微波光子滤波器。并且,一旦光载波之间的波长差发生改变,微波光子滤波器的谐振频率就会发生调谐。两抽头的微波光子滤波器的频率响应 $H(\Omega)$ 可以表示为^[18]

$$H(\Omega) = a_0 + a_1 \exp(-j\Omega \Delta\tau_d), \quad (2)$$

式中: a_0 和 a_1 为滤波器的抽头系数,与双波长激光器的功率相关; $\Delta\tau_d$ 为微波信号的时延差(TDD), Ω 为微波频率。图 3 显示了在不同的时延差下微波光子滤波器的频率响应。从图 3 中可以观察到,当 TDD 增大时,滤波器的自由光谱范围(FSR)将变小,滤波器的陷波频率变小。

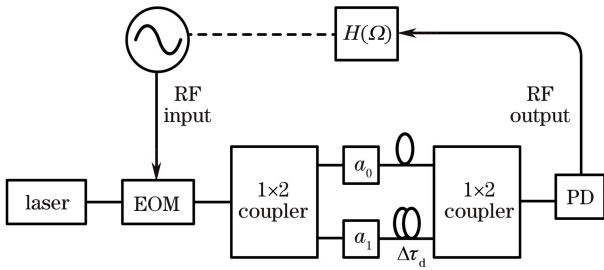


图 2 两抽头微波光子滤波器原理图

Fig. 2 Schematic of microwave photonic filter with two taps

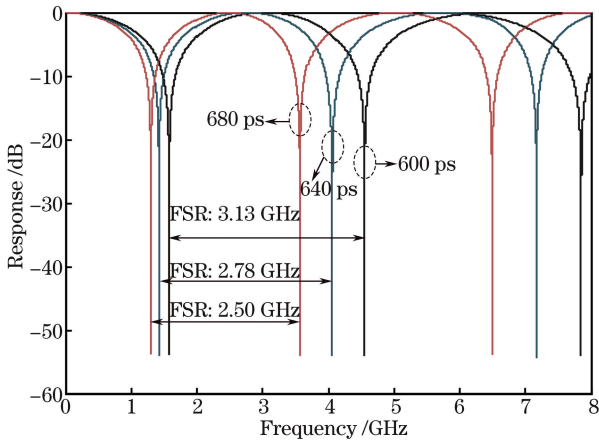


图 3 不同 TDD 微波光子滤波器频率响应的仿真图

Fig. 3 Simulated frequency responses of MPF at different TDDs

微波光子滤波器的陷波频率可以表示为^[19]

$$f_{\text{notch}} = \left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{1}{\Delta\tau_d}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau_d$ 等于滤波器 FSR 的倒数; k 为滤波器的第 k 个陷波。可以看出,在本测量系统当中,总的时延差可以由两个部分组成:一个是由 PMFBG 最初的波长间距引起的 TDD,另一个是由施加的负载引起

波长间距变化而引入的 TDD。因此, $\Delta\tau_d$ 可以表示为

$$\Delta\tau_d = \Delta\tau_0 + \Delta\tau_{\Delta\lambda} = \Delta\tau_0 + D \cdot L \cdot \Delta\lambda, \quad (4)$$

式中: $\Delta\tau_0$ 为 PMFBG 和色散补偿光纤(DCF)初始波长间距引起的固定 TDD; $\Delta\tau_{\Delta\lambda}$ 为应力所引起的 TDD; D 为长光纤的色散参数; L 为长光纤的长度,这里所使用的是 DCF 模块,色散系数为 $660 \text{ nm} \cdot \text{ps}^{-1}$ 。将(4)式代入(3)式,可以得到滤波器陷波的频移与两波长分离间距之间的关系。由于施加横向负载引起的波长间隔增量通常比初始波长的间隔要小得多,因此当压力不是很大时,可调谐的 TDD 可以被当作一个微扰量。因此,微波光子滤波器的谐振频率的频移与 PMFBG 上受到的横向压力呈线性关系。并且,根据(3)式可以看出,该横向负载传感器系统的一个重要特性是选择较高的谐振频率,可以很容易地提高灵敏度。同时还应注意到,环境温度的改变或者轴向应变的变化将导致 PMFBG 的双峰发生相同的变化,因此,本文提出的系统对温度和轴向应变不敏感。

3 实验分析

PMFBG 作为激光谐振腔中的波长选择器件, PMFBG 的两个反射峰的峰值分别为 1563.86 nm 和 1564.41 nm , 它们的 3 dB 带宽约为 0.03 nm , 图 4(a)为 PMFBG 的反射谱。图 4(b)则显示了双波长激光的输出光谱图,双波长激光器的两波长分别为 1563.86 nm 和 1564.41 nm , 与 PMFBG 的峰值波长相一致。并且,调节 PC1 还可以精确地控制两个激光模式的增益大小,从而使双波长激光的输出功率相一致。随后,将双波长激光器的输出耦合到电光调制器(EOM)上,然后将 EOM 输出的光信号入射到 DCF,经过光电探测器(PD)探测,最后使用矢量网络分析仪(VNA)对正向传输系数进行测量。

图 5 显示了 PMFBG 在没有施加压力的情况下,两抽头微波光子滤波器的频率响应。VNA 的扫频范围从 0 GHz 到 12 GHz , 采样点的总数是 16000。如图 5 所示,滤波器的最大陷波深度大于 25 dB 。滤波器的实测 FSR 约为 2.738 GHz , 与 2.752 GHz 的理论值大体一致。

本文的横向负载测量主要是通过追踪滤波器第三个陷波的频移来进行测量的,实验中第三个陷波的频率位于 6.845 GHz 附近。施加横向压力的装置如图 1 所示,PMFBG 与平衡光纤放置在两个透明玻璃板之间,受压的光纤长度为 12 mm 。在实验

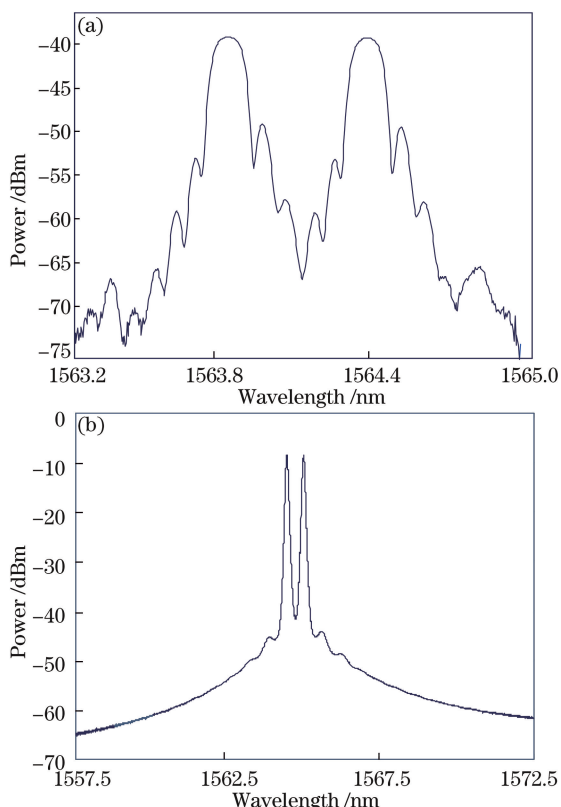


图 4 双波长激光器输出图。(a) PMFBG 的反射谱；
(b) 双波长激光器的输出光谱图

Fig. 4 Dual-wavelength laser output. (a) Reflection spectrum of PMFBG; (b) output spectrum of dual-wavelength laser

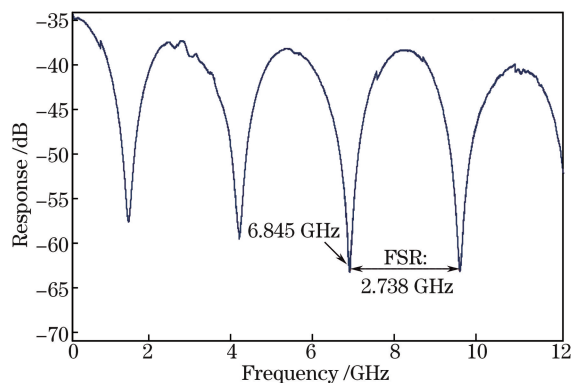


图 5 两抽头微波光子滤波器的频率响应

Fig. 5 Frequency response of the MPF with two taps

中,负载大小从 0 N 逐渐增加到 40 N。随着 PMFBG 上负载的增加,第三个陷波的频率也随之改变,图 6 为滤波器第三个陷波频率响应的放大图。可以很明显地观察到,当负载增加时,陷波的频率减小。该结果表明,随着负载的增加,TDD 增加,滤波器的 FSR 减少,从而滤波器陷波的频率减小。

图 7 显示了用于负载测量的滤波器第三级陷波频率与横向负载关系的拟合图。图 7 的结果表明,陷波的频移与施加在 PMFBG 上的横向负载有良好

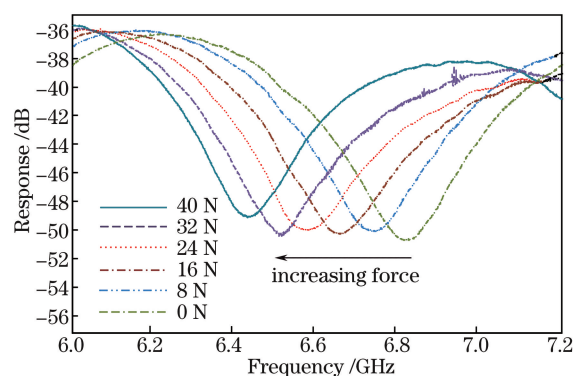


图 6 不同横向压力下微波光子滤波器第三个陷波的频率响应
Fig. 6 Frequency responses of third notch at different transverse forces

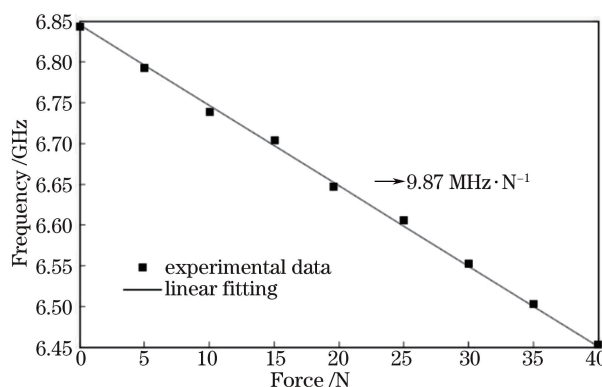


图 7 滤波器第三个陷波的频率与横向压力之间关系的拟合图
Fig. 7 Fitted relationship between frequency of third notch of filter and transverse force

的线性关系。通过计算输出曲线的斜率,当受压的光纤长度为 12 mm 时,该传感器的灵敏度达到了 $9.87 \text{ MHz} \cdot \text{N}^{-1}$,由于 VNA 的分辨率最高可达 1 Hz,因此,传感器的灵敏度和测量精确度得到了显著提高。

最后,为了评估该传感系统的交叉敏感问题,对 PMFBG 进行了水浴加热和轴向应变实验。图 8(a) 为滤波器陷波频率随温度变化的曲线,温度从 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 逐渐增加到 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 8(b) 为陷波频率随轴向应变变化的曲线,应变大小从 $0 \text{ } \mu\epsilon$ 逐渐增加到 $400 \text{ } \mu\epsilon$ 。可以看出,无论温度还是轴向应变作用在 PMFBG 上,陷波频率的变化均在 10 kHz 以内,相对于横向压力可以忽略。原因在于,温度或轴向应变对 PMFBG 的两个谐振波长影响几乎相同,不会改变两者的间距,因此本传感系统对温度和轴向应变不敏感。

4 结 论

提出了一种基于两抽头微波光子滤波器的高分

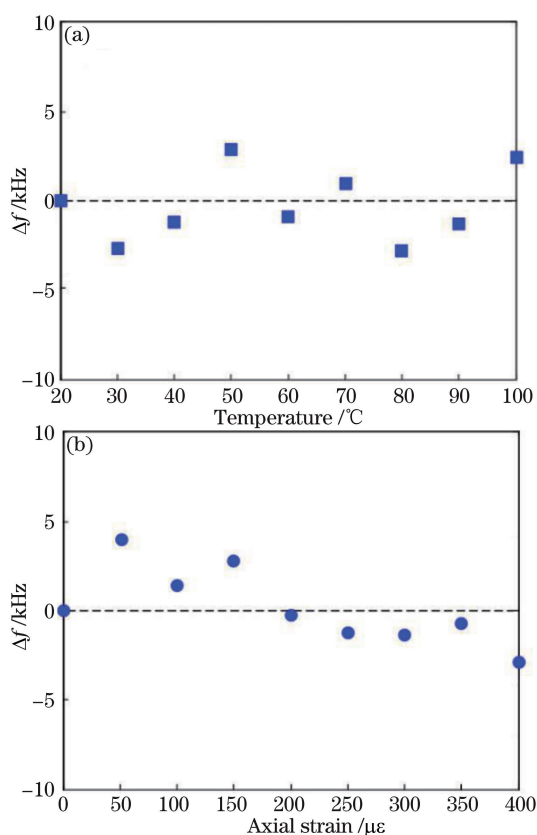


图 8 稳定性测试结果图。(a)陷波频率随温度变化曲线；
(b)陷波频率随轴向应变变化曲线

Fig. 8 Test results of stability. (a) Notch frequency versus temperature; (b) notch frequency versus axial strain

辨率横向负载传感器,并进行了实验验证。通过使用一段 DCF,将 PMFBG 波长的变化转换为微波光子滤波器陷波频率的变化。在实验中获得了 $9.87 \text{ MHz} \cdot \text{N}^{-1}$ 的高灵敏度。此外,该横向负载传感器的准确性不受温度或轴向应变的影响,同时可以通过控制施加在 PMFBG 上的横向负载来实现连续的可调谐。

参 考 文 献

[1] Yao J P. Microwave photonics[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
 [2] He G, Qu P F, Sun L J. Application status and trend of microwave photonic technology[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(5): 627-632.
 何刚, 瞿鹏飞, 孙力军. 微波光子技术应用现状及趋势[J]. 半导体光电, 2017, 38(5): 627-632.
 [3] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds[J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
 [4] Wei T, Huang J, Lan X W, *et al.* Optical fiber sensor based on a radio frequency Mach-Zehnder

interferometer[J]. Optics Letters, 2012, 37(4): 647-649.

- [5] Hervás J, Ricchiuti A L, Li W, *et al.* Microwave photonics for optical sensors[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(2): 327-339.
 [6] Ricchiuti A L, Barrera D, Sales S, *et al.* Long fiber Bragg grating sensor interrogation using discrete-time microwave photonic filtering techniques[J]. Optics Express, 2013, 21(23): 28175-28181.
 [7] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.
 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.
 [8] Zhang X P, Zhang Y X, Wang F, *et al.* Ultra-long fully distributed optical fiber sensor based on Rayleigh scattering effect[J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(7): 0700002.
 张旭莘, 张益昕, 王峰, 等. 基于瑞利散射的超长距离分布式光纤传感技术[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0700002.
 [9] Jiang J F, He P, Liu T G, *et al.* Research of temperature-stable fiber Bragg grating sensing demodulation based on composite wavelength references[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10): 1006005.
 江俊峰, 何盼, 刘铁根, 等. 基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究[J]. 光学学报, 2015, 35(10): 1006005.
 [10] Chen Z W, Tan Z W. High resolution demodulation for fiber grating sensors based on virtually-imaged phased array[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0422003.
 陈志伟, 谭中伟. 基于虚像相位阵列的高分辨率光纤光栅传感解调[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422003.
 [11] Wagreich R B, Atia W A, Singh H, *et al.* Effects of diametric load on fibre Bragg gratings fabricated in low birefringent fibre[J]. Electronics Letters, 1996, 32(13): 1223-1224.
 [12] Wang Y P, Wang M, Huang X Q. High-sensitivity fiber Bragg grating transverse force sensor based on centroid measurement of polarization-dependent loss[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(6): 065304.
 [13] Wu F, Li L X, Li Z Q. Theoretical analysis of fiber Bragg grating characterization by applying transverse force[J]. Chinese Journal of Lasers, 2006, 33(4): 472-476.
 吴飞, 李立新, 李志全. 均匀光纤布拉格光栅横向受

- 力特性的理论分析[J]. 中国激光, 2006, 33(4): 472-476.
- [14] Rong Q Z, Qiao X G, Yang H Z, *et al.* Orthogonal polarization coupling for transverse strain measurement using a polarimetric mirror[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(7): 729-732.
- [15] Feng S C, Xu O, Lu S H, *et al.* Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser based on one polarization-maintaining fiber Bragg grating incorporating saturable absorber and feedback fiber loop[J]. Optics Communications, 2009, 282(11): 2165-2168.
- [16] Yin B, Wang M G, Wu S H, *et al.* Fiber ring laser based on MMF-PMFBG-MMF filter for three parameters sensing[J]. Optics Express, 2017, 25(25): 30946-30955.
- [17] Zhao J X, Zhang X, Huang Y Q, *et al.* Experimental analysis of birefringence effects on fiber Bragg gratings induced by lateral compression[J]. Optics Communications, 2004, 229: 203-207.
- [18] Minasian R A. Photonic signal processing of microwave signals[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2006, 54(2): 832-846.
- [19] Zhang W, Williams J A R, Bennion I. A novel topology of tuneable optical radio frequency notch filter using a chirped fibre grating[C] // International Topical Meeting on Microwave Photonics, October 12-14, 1998, Princeton, NJ, USA. New York: IEEE, 1998: 203-206.