

基于双相移光纤光栅的光电多频振荡生成及 温度不敏感传感解调方法

许鸥*, 符瑕珊

广东工业大学信息工程学院, 广东 广州 510006

摘要 提出了一种基于双相移光纤光栅和光电振荡器的传感解调方法。该方法融合了光纤光栅传感技术与微波光子技术,其中光纤光栅同时作为传感探头及光电振荡器中的微波光子滤波器组成单元,当外界待测量改变光栅特性时,光电振荡器产生的微波频率也将随之改变,且环境温度变化并不会对微波频率造成影响,有效避免了交叉敏感。同时,阐述了通过光电振荡结构将光栅波长变化转换到微波域进行解调的方案及优点,进而得到了实验搭建的基于此光栅的双通带微波光子滤波器测试结果,构造了基于双通带微波光子滤波器的光电振荡环,实验结果表明,该系统的传感解调灵敏度约为 $36 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 。所提方法为光纤光栅传感的高速、高分辨率解调提供了新思路,推动了光纤传感的实用化进展。

关键词 光纤光学; 微波光子滤波器; 光电振荡; 传感解调; 频-时域映像

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.150601

Temperature-Insensitive Method for Interrogating Fiber Grating Sensor Using Dual Phase-Shifted Fiber Grating and Optoelectronic Oscillator

Xu Ou*, Fu Xiashan

School of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006, China

Abstract Herein, we propose a method for interrogating a fiber grating sensor using a dual-phase-shifted fiber grating and an optoelectronic oscillator (OEO). Combining the advantages of fiber grating sensing technology and microwave photonic technology, fiber gratings in a system serve both as sensing probes and as filtering units in a microwave photonic filter of the OEO. When the measurand changes the features of the sensing fiber grating, the frequency produced by the OEO also changes. This is not influenced by varying environmental temperatures, thus avoiding the cross-sensitivity problem of fiber grating sensors. Through the OEO, the wavelength change of the grating is reflected as a corresponding change in the microwave frequency. Furthermore, we experimentally demonstrate such a dual-passband microwave photonic filter using the phase-shifted fiber grating and construct an OEO ring based on the filter. Our experimental results show that the proposed system can provide an interrogation sensitivity of about $36 \text{ MHz}/\mu\epsilon$. The implementation of this device holds promise for the development of a novel method of interrogating fiber grating sensors to achieve high-resolution and high-speed measurements. The proposed method can also help promote further developments in practical applications of optical fiber sensing technology.

Key words fiber optics; microwave photonic filter; optoelectronic oscillator; interrogation; frequency-time domain mapping

OCIS codes 060.2370; 060.3735; 230.4910; 350.4010

1 引言

光纤光栅作为光纤传感技术中的重要光学器

件,一直是研究学者们关注的热点。光纤光栅型传感器对传感信息具有波长编码特性,也称为波长调制特性。这类波长编码型传感器对光源功率波动、

收稿日期: 2018-12-10; 修回日期: 2018-12-24; 录用日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(6157010584)、广东省自然科学基金(2017A030310071)

* E-mail: xuou@gdut.edu.cn

光纤弯曲损耗,以及连接损耗引起的光强变化不敏感,且具有很高的稳定性与可靠性,可复用性强,易于波分、时分复用,可实现准分布式测量。但是,光学解调设备昂贵的价格限制了此类传感器的广泛应用,也在一定程度上增加了解调难度。

目前常用的光纤光栅波长解调技术按照解调系统的工作机理主要分为两类:干涉法和滤波法^[1]。干涉法利用的是光波的相干性,即将信息波长编码转化为相位编码,其在实际中的应用主要有非平衡马赫曾德尔或迈克耳孙干涉结构。尽管该类方法的解调分辨率高,但易受外界干扰,对解调的工作环境要求严苛,且干涉仪的相位变化 2π 也限制了系统的测量范围。另外,由于采用压电陶瓷作为扫描元件,其解调速度通常最多只能达到 kHz 量级^[2]。而滤波法则是将波长变化转化为强度变化,主要包括匹配光栅法、可调谐法布里-珀罗滤波法、边沿滤波法、电荷耦合器阵列法,以及可调光源解调法/扫描激光器解调法等。这类方法主要是通过测量光功率输出来实现波长解调,其中边缘滤波法的解调速度可达到 kHz 以上^[3],但光强扰动将会严重影响测量分辨率。上述两类解调系统主要针对 kHz 以内的传感待测量进行解调,但在一些特殊领域,例如结构健康监测中的超声波探测^[4]和航空发动机等旋转设备检测^[5],需要对几十 kHz 甚至 MHz 的高速变化信号进行测量,且要同时满足一定的解调分辨率。

为了满足不同应用领域的传感需求,进一步提升测量分辨率及速度,近年来,研究人员提出了一些新的解调思路^[6-12],特别是随着微波光子学的发展,微波信号的光子学产生与处理变得愈加方便、高效,因此国内外多家研究机构对基于微波光子技术的光纤传感解调方法开展了研究,将光域传感信息转换到微波域,利用其快速的信号处理能力实现高分辨率、高速的传感解调。其研究主要集中在以下几个方面:基于光纤光栅激光器的双波长或双偏振外差型传感解调^[6-7]、基于色散延迟单元的传感解调^[8]、基于光谱整形及频-时域映像的传感解调^[9-10]、基于微波光子滤波器及光电振荡结构的传感解调^[11]。从最终待测量的角度可将上述方法分为两类:一类将光纤光栅波长变化转换为微波信号频率变化,另一类则转换为强度变化。相比较而言,以微波频率作为最终测量量的方法能够达到较高的传感分辨率,且可靠性较高,解调速度更快^[12]。

作为一种优质的微波信号源,光电振荡器(OEO)能够产生超低相位噪声的微波信号。基于

OEO 产生的微波信号具有高 Q 值、频谱纯度高、输出稳定等优点,因此利用 OEO 结构将传感待测量转换为所生成的微波信号频率改变,有利于提升解调系统的分辨率及解调速度^[13-14]。近期,本课题组搭建了基于两个光纤光栅的双频光电振荡器结构^[15],可初步实现频率可调的微波信号输出,其能将光纤光栅传感信息通过 OEO 转换为微波频率变化,同时可消除环境温度的影响,但由于该系统采用两个可调激光器作为光源,故而系统结构较为复杂,成本也较高。基于此,本文提出了一种基于单个双相移光纤光栅的高分辨率高速微波光子辅助传感解调方案。该方案融合了光纤光栅传感技术与微波光子学技术,系统只需采用单个激光器作为光源,其中的双相移光纤光栅同时作为传感元件及 OEO 中的滤波单元,当外界待测物理量改变光栅波长时,OEO 产生的微波频率也将随之改变,而外界环境温度变化却不会对该微波频率产生影响,从而解决了测量中的交叉敏感问题。

2 原 理

图 1 为基于双相移光纤光栅的传感解调系统结构示意图。可调激光器(TLS)作为光源,输出可调频率载波,通过偏振控制器(PC)进入一相位调制器(PM)。相位调制后的信号进入环行器(Cir),被包含两个相移(PS)点的相移光栅(PSFBG)反射后,经光放大器(EDFA)放大,到达光电检测器(PD)。该检测器的输出电信号继续经由功率放大器(PA)进行放大,再作为调制信号进入相位调制器,从而形成一个 OEO 闭环结构。输出的微波信号可用电谱仪(ESA)进行观测,也可以利用数字信号处理设备进一步处理。实际上,图 1 中虚线框内的器件构

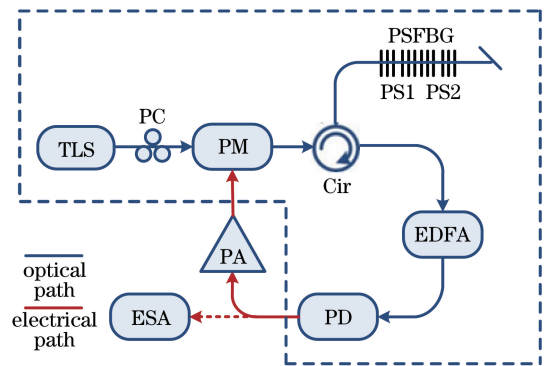


图 1 基于双相移光纤光栅的传感解调系统结构示意图

Fig. 1 Schematic of interrogation system based on dual-phase-shifted fiber grating

成了一个双通带微波光子滤波器,由于相移光栅能够利用其反射谱中的透射峰,将相位调制后得到的双边带信号之中的一个边带滤除,从而可将相位调制信号转换为强度调制信号^[16]。

所使用的双相移光纤光栅有两处相移,因此能够在反射谱中的两个不同的波长处生成两个窄带透射峰,反射谱示意图如图 2(a)所示。图中 f_c 为可调激光器发出的载波频率, f_1 、 f_2 分别为相移光栅中的两透射峰的中心频率,两透射峰之间的带宽为 B_2 ,反射谱中相移峰两侧的带宽分别为 B_1 、 B_3 。在满足(1)式的情况下,基于此相移光栅的微波光子滤波器能够得到如图 2(b)所示的响应谱^[17]。

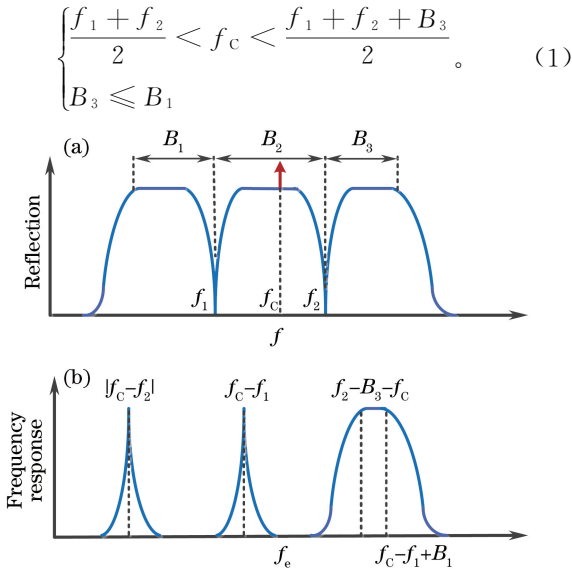


图 2 基于双相移光栅的微波光子滤波器原理。(a)双相移光纤光栅反射谱示意图;(b)基于相移光栅的双通带微波光子滤波器功率谱示意图

Fig. 2 Principle of microwave photonic filter based on dual-phase-shifted fiber grating. (a) Reflection spectrum of fiber grating with two phase shifts; (b) power spectrum of microwave photonic filter based on phase-shifted fiber grating

图 2(b)中的横轴 f 为微波频率。高频区域形成的第 3 个较宽通带,通常由于光电监测器的带宽限制,不会在闭环中起振。该双通带微波光子滤波器可以用于传感应用中,如常用双相移光栅中频率为 f_2 的一处相移位置感受外界物理量(如应力)的作用,则双通滤波器相应通带的中心频率将改变为 $f_2 + \Delta f_s + \Delta f_T$,其中 Δf_s 为应力引起的频率改变, Δf_T 为温度引起的频率改变。同时,另一处相移位置只能感受到周围环境温度的变化,对应通道的中心频率改变为 $f_1 + \Delta f_T$ 。通过数学上的简单处理,

可以得到应力引起的频率变化量,虽然去除了环境温度的影响,但是,由于该滤波器的通带带宽取决于相移光栅的透射峰带宽,通常在几十到几百 MHz,因此利用监测滤波通带中心频率变化的传感解调方案的测量精度有限。

利用图 1 所示的光电振荡结构进行传感解调的原理如图 3 所示。图 3(a)~(d)中, $R(f)$ 为相移光栅反射谱, $P(f)$ 为 OEO 生成的微波频率谱, f 为频率, f_c 为载波频率, f_{p1} 、 f_{p2} 分别为相移光栅中两个透射峰的中心频率。图 3(a)给出了光栅未受到外界作用时的反射谱及 OEO 产生的微波信号频谱,其中 f_{e1} 、 f_{e2} 为对应微波光子滤波器两个通带产生的微波信号的中心频率, $f_{e1} = f_{p1} - f_c$, $f_{e2} = f_{p2} - f_c$ 。同时,由于振荡环中的非线性效应,上述两个频率的信号拍频后产生了第 3 个频率 f_b ,而此频率正是本方案需要监测的微波信号频率。当一处相移区域受到应力作用时,如图 3(b)所示,原先中心频率位于 f_{p2} 的相移透射峰向高频区域移动了 Δf ,导致其对应生成的微波频率 f_{e2} 也增大了 Δf ,但由于另一处相移区域未受到应力作用,因此仍保持原位置不变,而拍频 f_b 增大为 $f_b + \Delta f$,通过测量该拍频信号的频率变化,即可推测出外界应力的大小。当环境温度改变时,如图 3(c)所示,假设此时相移光栅的反射谱整体向高频区域移动了 Δf_T ,由于产生的两个微波信号频率的增加量相同,拍频 f_b 并未发生改变,因此该结构可以有效避免周围环境温度变化对测量带来的交叉敏感影响。当载波频率发生抖动时,如图 3(d)所示,由于两个微波频率的变化情况一致,拍频同样不会发生改变,因此可以保障系统不会受到激光器输出频率抖动的影。

3 实验结果及讨论

实验中使用的双相移光纤光栅透射谱测试结果如图 4(a)所示,由于两处相移的作用,在光栅反射带内出现了两个窄带透射峰。图中显示的相移光栅的反射带宽约为 0.5 nm,两个透射峰的 3 dB 带宽约为 100 MHz 及 30 MHz。实验利用矢量网络分析仪测量了基于此双相移光栅的微波光子滤波器谱响应,扫描频率范围为 45 MHz~10 GHz,频率上限取决于所使用的相位调制器带宽,并且将可调波长激光器输出的光载波频率设置在两个透射峰中心频率之间。当满足(1)式时,可测得双通带微波光子滤波器谱响应如图 4(b)所示。

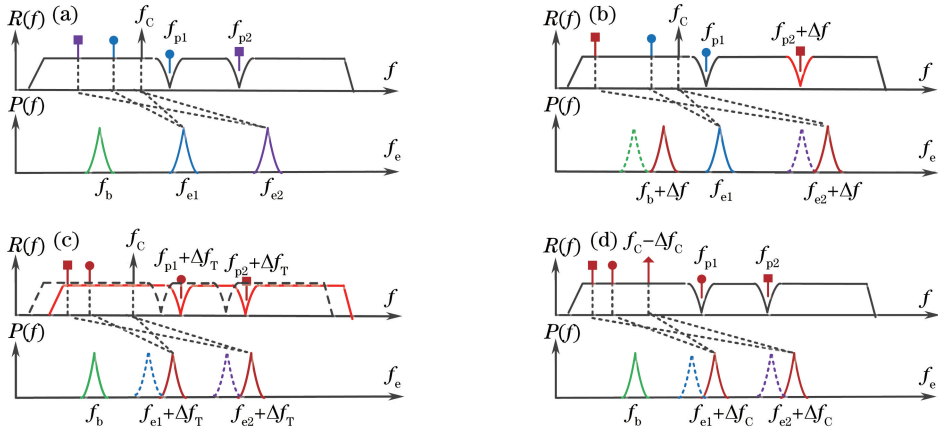


图 3 传感解调系统工作原理示意图。(a)初始状态;(b)中心频率为 f_{p2} 处相移位置感受到待测量变化;(c)仅外界环境温度变化;(d)当载波频率发生抖动

Fig. 3 Operating principle of proposed interrogation system. (a) Original states; (b) when measurand changes are experienced by phase shift at central frequency of f_{p2} ; (c) when only ambient temperature changes; (d) when carrier frequency fluctuates

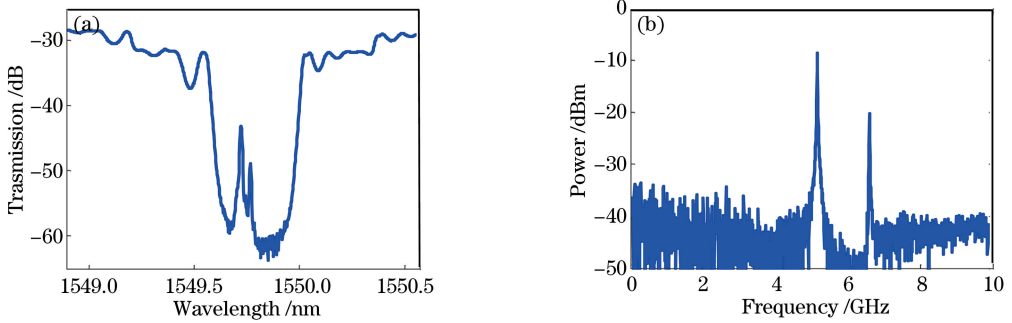


图 4 测量结果。(a)测量得到的双相移光纤光栅透射谱;(b)测量得到的双通带微波光子滤波器谱响应

Fig. 4 Measured results. (a) Measured transmission spectrum of phase-shifted fiber grating; (b) measured frequency response of dual-passband microwave photonic filter

当光电振荡环闭合后,由电谱仪获得的频谱如图 5 所示,在两个通带中心频率的对应位置生成了两个微波信号,同时,在约 2.4 GHz 处(椭圆圈内)得到了两个频率的差频信号,即待检测信号。

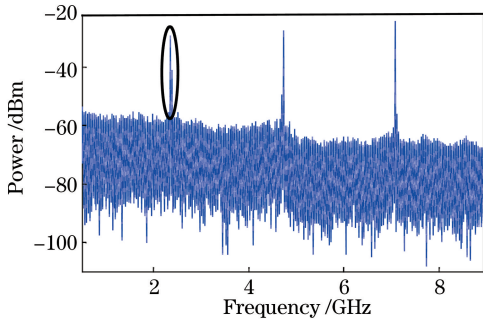


图 5 OEO 闭合后产生的微波信号

Fig. 5 Microwave signals produced after OEO is closed

图 6 的测量结果进一步验证了在双相移光栅的单处相移位置感受到外部应力变化的条件下,光电

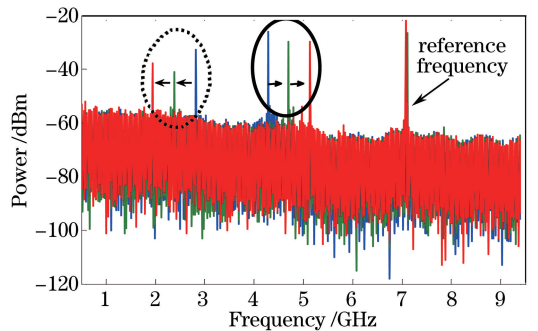


图 6 双相移光栅中单处相移位置施加应力时光电振荡器输出微波频率的变化

Fig. 6 Measured output microwave frequency change of OEO when different strains are applied on one of two phase shifts in the dual-phase-shifted fiber grating

振荡产生微波频谱的变化情况。由图 6 可知,随着施加应力的增大,对应产生的微波信号频率逐渐增大(黑色实线椭圆圈内),而另一处相移位置对应的

频率却未发生改变(如图中参考频率位置),从而导致差频信号频率逐渐减小(黑色虚线椭圆圈内)。如果环境温度发生改变,两个微波频率将同时改变,且由于变化量相同,故差频信号保持不变。差频信号频率随施加应力而改变的关系如图7所示,图中的小方块为实测数据,实线为线性拟合结果,由图7可知,随着施加应力的增大,差频频率呈现出线性减小的变化趋势,该拟合结果显示系统的传感解调灵敏度约为 $36 \text{ MHz}/\mu\epsilon$,其中 ϵ 为应变。

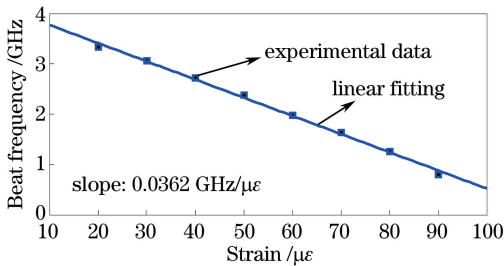


图7 实验测试得到的施加应力与差频信号频率变化的对应关系

Fig. 7 Applied strain as a function of beat frequency measured in experiment (small blue squares represent experimental results and blue solid line represents linear fitting result)

在本方案中,光电振荡环结构要想获得双频率微波信号,激光器发出的载波频率需要位于(1)式所满足的条件范围内,因此本方案可测量的应力范围主要取决于光栅中两个相移所产生的两个透射峰之间的频率间隔。在上述实验中,由于使用的相移光纤光栅的带宽较窄,故而导致所检测的差频频率变化范围仅约为 3 GHz ,但若使用啾啾相移光纤光栅,则采用本方案时的可测量应力范围会大幅增加。此外,文献[15]中得到的结果(即传感解调灵敏度)为 $110 \text{ MHz}/\mu\epsilon$,与本文得到的结果不同,主要原因可参考文献[15]中的(3)式,该公式表明微波频率随应力的变化值与所采用的载波波长以及相移峰中心波长有关,因此采用不同的载波及相移峰波长都将导致不同的微波频率变化量。

4 结 论

将光纤光栅传感与微波光子学技术相结合,提出了一种高分辨率、高速传感解调新方法:将双相移光纤光栅融入光电振荡环结构中,并作为微波光子滤波器和传感单元,利用光电振荡器将光波长编码的传感信息转换至微波域进行解调,提出了基于光电振荡器的微波频率检测新方案,实验结果表明,该

系统的传感解调灵敏度约为 $36 \text{ MHz}/\mu\epsilon$ 。且该方案中的待测微波频率不受温度变化及载波抖动的影响,有效地避免了光栅测量中的交叉敏感。相较于现有的常规波长解调技术,本方案充分发挥了光电振荡器生成的微波信号测量分辨率高的优势,同时,由于待测信号为微波信号,可在电域上进行快速信息提取与处理,能够实现高分辨率、高速传感解调。

参 考 文 献

- [1] Kinet D, Mègret P, Goossen K W, *et al.* Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: challenges and solutions[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [2] Mei J W, Xiao X S, Yang C X. Delay compensated FBG demodulation system based on Fourier domain mode-locked lasers[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(15): 1585-1588.
- [3] Qiao X G, Ding F, Jia Z A, *et al.* High-accuracy quasi-distributed optical fiber Bragg grating seismic demodulation system[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(7): 074221.
乔学光, 丁锋, 贾振安, 等. 高精度准分布式光纤光栅地震检波解调系统的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(7): 074221.
- [4] Wu Q, Okabe Y, Sun J Q. Investigation of dynamic properties of erbium fiber laser for ultrasonic sensing[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 8405-8419.
- [5] Jiang X X. Rotating blade's dynamic strain distributed measurement and vibration estimation research based on FBG [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014: 15-19.
蒋熙馨. 旋转叶片动应变FBG分布式检测及振动估计研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014: 15-19.
- [6] Guan B O, Jin L, Zhang Y, *et al.* Polarimetric heterodyning fiber grating laser sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(8): 1097-1112.
- [7] Gao L, Liu S C, Yin Z W, *et al.* Fiber-optic vibration sensor based on beat frequency and frequency-modulation demodulation techniques[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(1): 18-20.
- [8] Wang Y P, Zhang J J, Coutinho O, *et al.* Interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor with high resolution using a linearly chirped optical waveform[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4923-4926.
- [9] Wang C, Yao J P. Ultrafast and ultrahigh-resolution

- interrogation of a fiber Bragg grating sensor based on interferometric temporal spectroscopy[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(19): 2927-2933.
- [10] Liu W L, Li M, Wang C, *et al.* Real-time interrogation of a linearly chirped fiber Bragg grating sensor based on chirped pulse compression with improved resolution and signal-to-noise ratio [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(9): 1239-1247.
- [11] Fu H Y, Zhang W, Mou C B, *et al.* High-frequency fiber Bragg grating sensing interrogation system using Sagnac-loop-based microwave photonic filtering [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2009, 21(8): 519-521.
- [12] Yao J P. Microwave photonics for high resolution and high speed interrogation of fiber Bragg grating sensors [J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2015, 34(4): 204-216.
- [13] Yao J P. Optoelectronic oscillators for high speed and high resolution optical sensing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(16): 3489-3497.
- [14] Bao W Q, Yu J L, Wang W R. High-rate optical sampling based on optoelectronic oscillator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 060701.
- 包文强, 于晋龙, 王文睿. 基于光电振荡器的高速率光采样技术 [J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 060701.
- [15] Xu O, Zhang J J, Deng H, *et al.* Dual-frequency optoelectronic oscillator for thermal-insensitive interrogation of a FBG strain sensor [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(4): 357-360.
- [16] Li W Z, Li M, Yao J P. A narrow-passband and frequency-tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(5): 1287-1296.
- [17] Xu O, Han Y S, Lu S H. A reconfigurable microwave photonic filter based on a phase-shifted FBG of two phase shifts [C] // 2017 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP), October 23-26, 2017, Beijing, China. New York: IEEE, 2017: 17398271.