

基于光纤 Sagnac 环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调技术

王巨锋 庄琳玲 刘士伟 胡奕彬 庄其仁

(华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要 光纤 Sagnac 环滤波器用于光纤布拉格光栅(FBG)传感器波长解调时受环境温度影响很大,为此提出一种可消除温度影响的高稳定解调新方法,介绍了系统光路和解调器的工作原理。将带有一段保偏光纤的 Sagnac 环作为边缘滤波器,分布反馈(DFB)激光器的单波长激光作为参考光,对 FBG 波长信号和参考光信号同时进行滤波。在同一时间探测经 Sagnac 环滤波器输出的透射光强度和反射光强度,进行光强信号归一化处理并采用差动检测方法分析。理论分析和实验结果表明,该解调方法基本消除了 Sagnac 环滤波器的温度效应,提高了解调系统的稳定性。在 1302~1318 nm 波长范围内,解调装置的温度漂移为 2.4×10^{-4} nm/°C,是未封装补偿无参考光的 Sagnac 环滤波器透射谱温度漂移的 1.8×10^{-4} 倍。

关键词 光纤光学;保偏光纤;Sagnac 环滤波器;光纤布拉格光栅;波长解调

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0905004

Fiber Bragg Grating Sensor Demodulation Technology with High Stability by Using Sagnac Loop Filter

Wang Jufeng Zhuang Linling Liu Shiwei Hu Yibin Zhuang Qiren

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China)

Abstract The fiber Sagnac loop filter for wavelength demodulation of fiber Bragg grating (FBG) sensor is greatly influenced by environmental temperature. A new stable demodulation method is proposed to eliminate the influence of temperature. The principle of wavelength demodulation is introduced, and the optical configurations are presented. Using a polarization maintaining fiber Sagnac loop as the edge filter and a distributed feedback (DFB) single wavelength laser as a reference light, FBG signal and reference lights are demodulated. Optical intensities of the transmission and reflection outputs from Sagnac loop filter are detected simultaneously, which are normalized and analyzed by the differential detection method. Theoretical analysis and experimental results show that using this technology, the temperature influence on the Sagnac loop filter is sufficiently eliminated, and the stability of the demodulator is improved. When the Bragg wavelengths range from 1302 nm to 1318 nm, the wavelength shift of the demodulator due to temperature is small as 2.4×10^{-4} nm/°C, which is as 1.8×10^{-4} times as that of an uncompensated Sagnac loop filter without the DFB reference light.

Key words fiber optics; polarization-maintaining fiber; Sagnac loop filter; fiber Bragg grating; wavelength demodulator

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.2420; 060.3735

收稿日期: 2014-01-09; 收到修改稿日期: 2014-04-20

基金项目: 福建省自然科学基金(2011J01353)、福建省科技计划重点项目(2012H0029)

作者简介: 王巨锋(1989—),男,硕士研究生,主要从事光电检测和光纤传感技术等方面的研究。

E-mail: wangjufeng2012@163.com

导师简介: 庄其仁(1960—),男,教授,主要从事光电检测与光纤传感技术以及半导体照明技术等方面的研究工作。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: 3620260)

1 引 言

光纤光栅传感技术在各行业已经得到广泛应用,其解调技术一直是人们关注的重点。降低解调成本,提高解调精度和稳定性,是这一研究的热点和难点。国内外学者已提出多种解调方法,除了早期提出的非平衡马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪法^[1]、可调谐法布里-珀罗(F-P)滤波器法^[2]、匹配光栅法^[3]等解调方法外,近年来,研究者们又提出了一些新的解调方法,如Yan等^[4]提出了一种使用分布反馈(DFB)光纤激光器解调光纤布拉格光栅(FBG)信号的方法,Li等^[5]提出用阵列波导光栅实现多个FBG信号的同时解调,李政颖等^[6]在传统的F-P滤波器上做了进一步改进,并设计出一种高速大容量光纤光栅解调仪,梅佳伟等^[7]提出了基于色散调谐宽带扫频光纤激光器的光纤光栅解调方法。这些解调方法各有优点,但一般都带有机械移动部分,且解调成本较高。

边缘滤波法^[8]是将布拉格波长偏移量转化为光强变化量的解调方法,采用光电探测器进行探测,使解调系统变得简单廉价,同时避免了一般解调装置的机械移动部分,系统更稳定。保偏双折射光纤^[9]Sagnac环滤波元件具有灵活的滤波特性,制作成本低廉。Chung等^[10]利用双折射光纤Sagnac环的滤波特性,成功将其应用到光纤传感滤波解调中。最近,郝文良等^[11]报道了基于高双折射光子晶体光纤(PCF)的双折射Sagnac环高分辨率FBG解调系统,静、动态应变分辨率分别达到了 $0.33 \mu\epsilon$ 、 $0.47 \text{ n}\epsilon/\sqrt{\text{Hz}}$ 。然而双折射Sagnac环滤波器对环境温度很敏感,未进行封装的双折射Sagnac环滤波器的温度漂移可达 $1.47 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,这严重影响了这一滤波器的实用化,因此如何消除温度影响已成为这一解调方法急待解决的问题。

本文采用保偏光纤(PMF)Sagnac环作为边缘滤波器^[12],DFB激光器输出单波长激光作为参考光,将FBG传感器反射光和DFB参考光同时经过封装后的Sagnac环滤波器,通过测量滤波器的反射输出光强度和透射输出光强度,利用归一化差动函数实现对FBG反射布拉格波长的解调,解调系统对温度不敏感,相比于传统的解调装置,具有更好的稳定性。

2 原 理

2.1 Sagnac 环滤波器透射谱(反射谱)的温度漂移

带有保偏光纤的Sagnac干涉仪(滤波器)结构如图1所示,它由一个3 dB耦合器、普通单模光纤、

偏振控制器和一段保偏光纤组成。

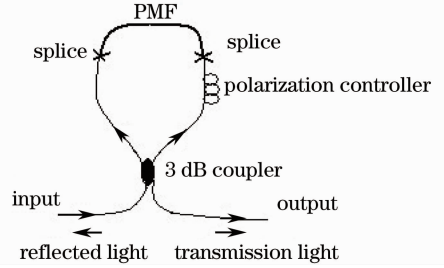


图 1 保偏光纤 Sagnac 干涉仪

Fig. 1 Sagnac interferometer with a section of PMF

入射光经3 dB耦合器被分为两束反向传输的光,两束光经过保偏光纤后产生一个固定的相位延迟,当它们再次进入3 dB耦合器时发生干涉。通过耦合器后,一束光经输出端输出为透射光,光强 I_t ;另一束光经输入端返回为反射光,光强 I_r 。

透射光强 I_t 可用透射率 $|t|^2$ 表示为 $I_t = |t|^2 I_0$,这里 I_0 是入射光强。Sagnac环滤波器透射率 $|t|^2$ 与波长的关系(透射谱)表达式为^[13]

$$|t|^2 = I_t/I_0 = \left(\cos \frac{\pi L \Delta n}{\lambda} \sin \theta \right)^2, \quad (1)$$

式中 L 为保偏光纤的长度, $\Delta n = |n_{\text{fast}} - n_{\text{slow}}|$ 为保偏光纤快轴和慢轴的折射率差, λ 为光波长, θ 为偏振控制器控制的保偏光纤所转过的角度。反射率(反射谱)表达式为^[14]

$$|r|^2 = I_r/I_0 = 1 - |t|^2. \quad (2)$$

由(1)、(2)式可知,Sagnac环滤波器的透射谱和反射谱与保偏光纤长度 L 、折射率差 Δn 以及旋转角度 θ [可通过偏振控制器(PC)调节 θ 值]有关。

当温度变化时,保偏光纤折射率差 Δn 和光纤长度 L 也随之发生变化,其关系为 $\delta(L\Delta n) = \Delta n \cdot \frac{dL}{dT} \cdot \delta T + L \cdot \frac{d(\Delta n)}{dT} \delta T = (\Delta n \cdot \alpha + \Delta\beta)L \cdot \delta T$,其

中 $\alpha = \frac{dL}{LdT}$ 为光纤的线膨胀系数(约 $10^{-7} \sim 10^{-6}$ 量级), $\Delta\beta = \frac{d(\Delta n)}{dT}$ 为双折射率温度系数差(与 α 同数量级)。

根据文献^[15]实验结果可知 $\Delta n \cdot \alpha + \Delta\beta = 4.6 \times 10^{-7}$,由此可得 $\delta(L\Delta n) = 4.6 \times 10^{-7} L \cdot \delta T$,根据这个式子和(1)、(2)式可计算不同温度下的传输谱,例如设工作波长为1310 nm的保偏光纤在 30°C 时的拍长 $L_p = 3.0 \text{ mm}$,则保偏光纤的折射率差为 $\Delta n = \lambda/L_p = 4.667 \times 10^{-4}$,若取保偏光纤长度 $L = 96 \text{ mm}$,代入(1)、(2)式可得到Sagnac环滤波器在 30°C 时的透射谱和反射谱。再根据 $(L\Delta n)_{40^\circ\text{C}} = 4.6 \times 10^{-7} L \cdot \delta T + (L\Delta n)_{30^\circ\text{C}}$ 和(1)、

(2)式可得 40 °C 时滤波器的透射谱和反射谱,如图 2 所示。从图中透射谱和反射谱的位置漂移可见温度对没有经过封装的 Sagnac 环滤波器的传输特性

有很大影响,在上述参数下温度变化 10 °C 透射谱曲线平移 13 nm,即波长温度漂移约为 1.3 nm/°C。

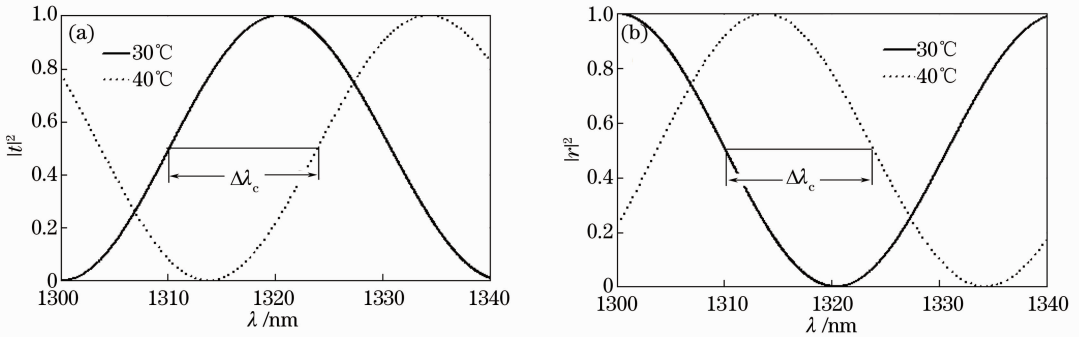


图 2 Sagnac 环滤波器(a)透射谱和(b)反射谱随温度的变化示意图

Fig. 2 Transmission spectra and reflection spectra of a Sagnac loop filter change with temperature

2.2 分布反馈参考光 Sagnac 环滤波器波长解调装置

图 3 为采用单波长 DFB 激光作为参考光的温度补偿 FBG 波长解调器的原理图,图中 PD 为光电探测器,IMG 为折射率匹配液。宽带光源(BBS)输出光经过 3 dB 耦合器 1 进入 FBG 传感器,FBG 传感器反射的布拉格波长信号光经过 3 dB 耦合器 2、

3,被 3 dB 耦合器 3 均分后以两个相反方向传输进入 Sagnac 环滤波器,Sagnac 环输出的透射光经过一个 10 dB 耦合器和一个布拉格光栅滤波器(FBGF),到达探测器 PD1;Sagnac 环反射光经过一个 3 dB 耦合器、一个 10 dB 耦合器以及一个 FBGF 后,到达探测器 PD2。

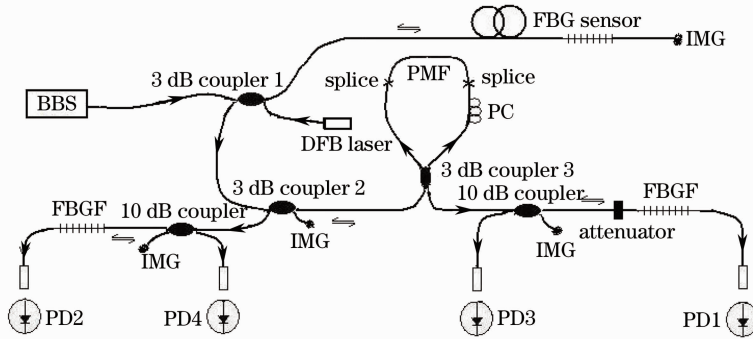


图 3 DFB 激光作为参考光的 FBG 波长解调装置原理图

Fig. 3 Schematic diagram of FBG wavelength demodulator with DFB laser as reference light

另一路参考光的传输路径为:DFB 激光器发出的单波长激光经过 3 dB 耦合器 1、2 和 3,同样被均分后以两个相反方向传输进入 Sagnac 环滤波器,Sagnac 环输出的透射光经过一个 10 dB 耦合器和一个 FBGF 后,反射到达探测器 PD3;Sagnac 环输出的反射光经过一个 3 dB 耦合器、一个 10 dB 耦合器以及一个 FBGF 后,反射到达探测器 PD4。其中 FBGF 的反射波长与 DFB 激光器的波长完全相同。

信号光在 Sagnac 环滤波器中具有相同的路径,并且波长很接近,所以它们受温度的影响可以认为是相同的,因此 DFB 参考光与 FBG 信号光因温度影响的波长解调漂移量也相同,将两者相减就可消除温度的影响。信号处理方法是:将探测器 PD1 探测的 FBG 信号光强度和 PD3 探测的 DFB 参考光强度进行滤波器透射光强归一化后再相减得到差值,再采用边缘滤波法就可消除温度的影响。为了提高系统的解调灵敏度,对 PD2 和 PD4 探测的光强度也做相同处理,得到滤波器反射光强归一化差值,由于 Sagnac 环滤波器透射谱和反射谱的边缘斜率符号相反,将上述透射光强归一化差值和反射光强归一化差值相减(差动检测),可使解调灵敏度提高 1 倍。由于采用归一化差动检测,DFB 参考光强度变化不

由于温度变化时,Sagnac 环滤波器的透射谱和反射谱均发生漂移(见图 2),因此 FBG 信号光通过 Sagnac 环滤波器的透射光强度和反射光强度均会随温度变化而变化,如果直接采用 Sagnac 环滤波器边缘滤波法进行 FBG 信号波长解调,波长解调结果将受温度变化的影响。但由于 DFB 参考光与 FBG

影响其相对值,因此实验装置对于 FBGF 反射的 DFB 激光可能进入 Sagnac 环滤波器产生的影响同样可以被消除。

2.3 归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 波长解调原理

图 3 中探测器 PD1 上探测到的光强度可表示为 FBG 传感器反射光谱与 Sagnac 环滤波器的透射谱(透射率函数)的卷积:

$$I_t(\lambda_B) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda_B - \lambda') \left(\cos \frac{\pi L \Delta n}{\lambda'} \sin \theta \right)^2 d\lambda', \quad (3)$$

式中 $P(\lambda_B)$ 为 FBG 的反射光功率谱密度函数。

同样探测器 PD2 检测到的 Sagnac 环滤波器的反射光强度可表示为

$$I_r(\lambda_B) = \int_{-\infty}^{+\infty} P(\lambda_B - \lambda') \left[1 - \left(\cos \frac{\pi L \Delta n}{\lambda'} \sin \theta \right)^2 \right] d\lambda'. \quad (4)$$

由于光纤光栅反射谱线宽度一般小于 1 nm,其功率谱密度可以近似为 δ 函数。当用 PC 将 θ 调整为 90° 时,(3)式和(4)式可写为

$$I_t(\lambda_B) = I_B A \left(\cos \frac{\pi L \Delta n}{\lambda_B} \right)^2, \quad (5)$$

$$I_r(\lambda_B) = I_B B \left[1 - \left(\cos \frac{\pi L \Delta n}{\lambda_B} \right)^2 \right] = I_B B \left(\sin \frac{\pi L \Delta n}{\lambda_B} \right)^2, \quad (6)$$

式中 I_B 为 FBG 的反射光强度, A 和 B 分别为 Sagnac 环滤波器透射光和反射光的光路损耗系数。

同理,DFB 激光光源发出的单波长激光到达探测器 PD3 的光强度可写为

$$I_t(\lambda_0) = I_0 C \left(\cos \frac{\pi L \Delta n}{\lambda_0} \right)^2, \quad (7)$$

到达探测器 PD4 的光强度为

$$I_r(\lambda_0) = I_0 D \left(\sin \frac{\pi L \Delta n}{\lambda_0} \right)^2, \quad (8)$$

式中 I_0 为 DFB 激光器的输出光强度, C 和 D 分别为 Sagnac 环滤波器透射光和反射光的光路损耗系

数, λ_0 为 DFB 激光波长。

将 4 个探测器测得的信号进行数据处理,定义归一化差动函数:

$$M(\lambda_B) = \frac{I_t(\lambda_B) - I_r(\lambda_B)}{I_t(\lambda_B) + I_r(\lambda_B)} - \frac{I_t(\lambda_0) - I_r(\lambda_0)}{I_t(\lambda_0) + I_r(\lambda_0)}. \quad (9)$$

通过光路或计算处理使 $A = B, C = D$, 则由(5)~(9)式可得

$$M(\lambda_B) = \cos \frac{2\pi L \Delta n}{\lambda_B} - \cos \frac{2\pi L \Delta n}{\lambda_0}. \quad (10)$$

(10)式表明 $M(\lambda_B)$ 只与保偏光纤的长度和折射率差以及 FBG 传感器的布拉格波长有关,而与光源和线路损耗无关,具有很好的抗干扰能力。

通过选择合适的保偏光纤长度 L 可以使(10)式中所有 λ_B 与 λ_0 都落在滤波器传输谱的同一线性区域内。将(10)式在 $\lambda_B = \frac{4L\Delta n}{(1+4m)}$ 处作泰勒展开,其中 m 为正整数,代表保偏光纤长度 L 包含的拍长个数。定义 $\frac{4L\Delta n}{(1+4m)} = \lambda_c$, 展开式只保留线性项,得

$$M(\lambda_B) = M(\lambda_c) + M'(\lambda_c)(\lambda_B - \lambda_c) = \cos \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2m\pi \right) \frac{\lambda_c}{\lambda_0} \right] + \frac{(1+4m)\pi}{2\lambda_c} (\lambda_B - \lambda_c). \quad (11)$$

若选择 $\lambda_c = \lambda_0$, 则(11)式可简化为

$$M(\lambda_B) = \frac{(1+4m)\pi}{2\lambda_0} (\lambda_B - \lambda_0). \quad (12)$$

(12)式表明, $M(\lambda_B)$ 与 λ_B 呈线性关系,斜率为 $\frac{(1+4m)\pi}{2\lambda_0}$ 。根据光强度测量值由(9)式计算得到 $M(\lambda_B)$ 值,再由(12)式计算得到 λ_B , 这就是采用 $M(\lambda_B)$ 作为输出量的波长解调原理。

2.4 $M(\lambda_B)$ 消除温度效应原理

温度变化时, $L\Delta n$ 随之发生变化, λ_c 将产生相应位移变为 $\lambda_c + \Delta\lambda_c$, 由此引起 $M(\lambda_B)$ 的增量 $\Delta M(\lambda_B)$ 可由(11)式求得:

$$\Delta M(\lambda_B) = \left\{ \sin \left[\left(\frac{\pi}{2} + 2m\pi \right) \frac{\lambda_c}{\lambda_0} \right] \frac{(1+4m)\pi}{2\lambda_0} - \frac{(1+4m)\pi\lambda_B}{2\lambda_c^2} \right\} \Delta\lambda_c, \quad (13)$$

式中 $\lambda_c = \lambda_0$ 为定值,所以有

$$\Delta M(\lambda_B) = \left[\frac{(1+4m)\pi}{2\lambda_0} - \frac{(1+4m)\pi\lambda_B}{2\lambda_0^2} \right] \Delta\lambda_c = \frac{(1+4m)\pi}{2} \left(\frac{\lambda_0 - \lambda_B}{\lambda_0} \right) \frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_0}. \quad (14)$$

又由于 λ_B 与 λ_0 相差很小,所以 $\left(\frac{\lambda_0 - \lambda_B}{\lambda_0} \right)$ 和 $\frac{\Delta\lambda_c}{\lambda_0}$ 均为

小量,因此温度变化引起的归一化差动函数变化量

$\Delta M(\lambda_B)$ 为二阶小量,即温度变化对 $M(\lambda_B)$ 的影响很小,因而采用归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 作为 FBG 波长解调器的输出量可基本消除 Sagnac 环滤波器的温度效应。

3 实验与结果分析

3.1 参数选择

按图 3 所示的 Sagnac 环滤波器波长解调原理图进行光路搭建。采用单波长 DFB 激光模块作为激光光源,输出波长为 $\lambda_0 = 1310.0$ nm,激光模块带有光隔离器,具有良好的稳定性。图 3 中两个波长滤波器 FBGF 的布拉格波长与激光器波长一致,也选用 1310.0 nm,并进行封装固定使温度和应力等外界因素对它们的影响降到最低。

选择工作波长为 1310.0 nm,拍长 $L_p = 3$ mm 的保偏光纤,保偏光纤长度由下式计算:

$$L = \frac{(1+4m)\lambda_0}{4\Delta n} = \frac{(1+4m)L_p}{4} \quad (15)$$

m 的取值应使 λ_B 变化范围全部落在 Sagnac 环滤波器的同一个 $1/2$ 周期内,由(10)式可知此条件为

$$\left| \frac{L\Delta n}{\lambda_{Bmin}} - \frac{L\Delta n}{\lambda_{Bmax}} \right| \leq \frac{1}{2}, \quad \text{即} \quad m \leq \frac{\lambda_{Bmin}\lambda_{Bmax}/\lambda_0}{2(\lambda_{Bmax} - \lambda_{Bmin})} - \frac{1}{8} \quad (16)$$

取 $\lambda_{Bmin} = 1300$ nm、 $\lambda_{Bmax} = 1320$ nm,将数据代入(16)式计算得 $m \leq 32$ 。由(12)式可知 m 值越大,Sagnac 环滤波器检测灵敏度(斜率)越高,所以取最大值 $m = 32$,代入(15)式得保偏光纤长度 $L =$

96.75 mm。截取相应长度保偏光纤熔接后,将保偏光纤 Sagnac 环粘贴在聚甲基丙烯酸甲酯的材料上,用以降低 Sagnac 环自身的温度漂移^[16]。

3.2 封装对传输谱温度漂移的改善

为了测试封装好的 Sagnac 环的传输谱和温度对传输谱的影响,将 Sagnac 环分别置于 20 °C, 30 °C, 40 °C 温控箱中,测试经过标定的 FBG 反射布拉格波长 λ_B 和 DFB 激光波长 λ_0 通过 Sagnac 环滤波器的透射光强度 $I_t(\lambda_B)$, $I_t(\lambda_0)$ 和反射光强度 $I_r(\lambda_B)$, $I_r(\lambda_0)$ 。实验过程中通过改变施加于 FBG 传感器的应力来改变其反射布拉格波长 λ_B , 布拉格波长 λ_{Bi} ($i = 1 \sim 8$) 的取值分别为 1302, 1304, 1306, 1308, 1312, 1314, 1316, 1318 nm。另外还有一个取值是 $\lambda_{B0} = 1310$ nm,与参考激光波长相同,因此可以直接用 DFB 激光波长 λ_0 。对测量的透射光强度值和反射光强度值进行归一化处理(除以输入光强度值)后得到的 Sagnac 环滤波器传输谱实验数据的线性拟合曲线如图 4 所示。根据拟合直线随温度变化的平移量计算,温度变化 10 °C 时滤波曲线平移 $\Delta\lambda_c \approx 1$ nm,可得封装后的 Sagnac 环滤波器的传输谱曲线温度漂移约为 0.1 nm/°C,即 $\Delta\lambda_c/\Delta T \approx 0.1$ nm/°C。而未经封装的相同保偏光纤 ($L = 96$ mm, $\Delta n = 4.667 \times 10^{-4}$) Sagnac 环的透射谱温度漂移约为 1.3 nm/°C,明显高于封装后的 Sagnac 环滤波器的传输谱曲线温度漂移值,说明封装后的 Sagnac 环受温度影响已得到很大改善。

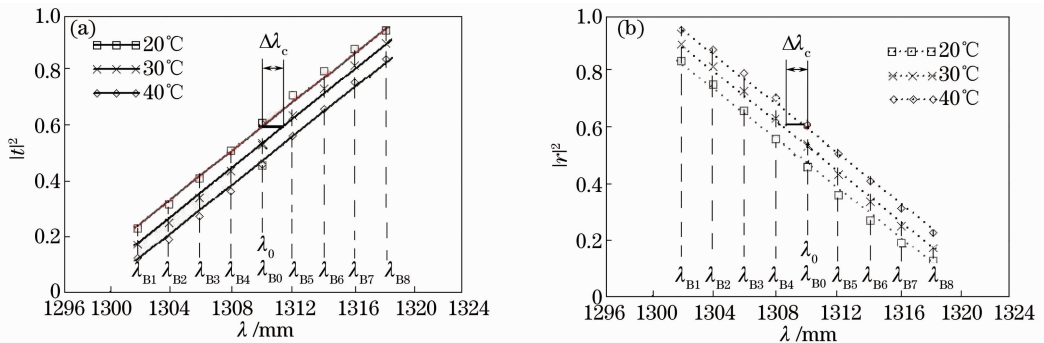


图 4 不同温度下 Sagnac 环滤波器的(a)透射谱和(b)反射谱的实验测试曲线

Fig. 4 Experimental curves of (a) transmission spectra and (b) reflection spectra of Sagnac loop filter at different temperatures

3.3 $M(\lambda_B)$ 波长解调消除温度影响的分析

根据图 4 所示实验数据,由(9)式计算温度为 20 °C, 30 °C, 40 °C 时各个 λ_B 所对应的 $M(\lambda_B)$, 得到 $M_1(\lambda_B)$ 、 $M_2(\lambda_B)$ 、 $M_3(\lambda_B)$ 结果如图 5 所示,可见实验所得到的归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 具有良好的线性

响应特性,在 1302~1318 nm 波长范围内线性拟合度均达到 0.98,且图中三条直线基本重叠。波长解调时,根据输出量 $M(\lambda_B)$ 值就可得到 λ_B 的值。 $M_1(\lambda_B)$ 、 $M_2(\lambda_B)$ 和 $M_3(\lambda_B)$ 的线性拟合表达式分别为

$$M_1(\lambda_B) = 0.15225\lambda_B - 199.44746, \quad (17)$$

$$M_2(\lambda_B) = 0.15225\lambda_B - 199.44783, \quad (18)$$

$$M_3(\lambda_B) = 0.15225\lambda_B - 199.44805. \quad (19)$$

图 5 中相邻 2 条直线(温度相差 10 °C)的最大截距差为 $\Delta M = M_2 - M_1 = 0.00037$, 由(16)式换算为 λ_B 的温度漂移约为 $0.00037 / (0.15225 \times 10) = 2.4 \times 10^{-4} \text{ (nm/}^\circ\text{C)}$, 大约是未封装的 Sagnac 环透射谱温度漂移的 1.8×10^{-4} 倍, 可见采用封装的 Sagnac 环滤波器和归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 作为输出量进行 FBG 传感器波长解调, 其受温度影响基本被消除。

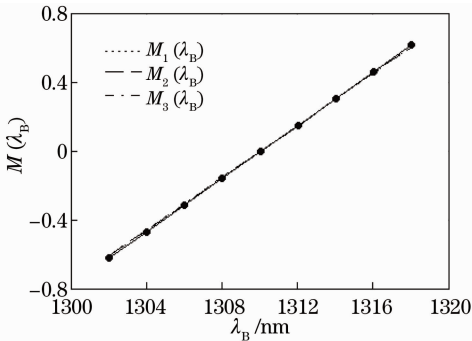


图 5 归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 相对布拉格波长 λ_B 的输出响应实验曲线

Fig. 5 Experimental curve of response of $M(\lambda_B)$ to λ_B

4 结 论

采用封装的 Sagnac 环滤波器, 引入一个单波长 DFB 激光作为参考光, 对 FBG 信号光和 DFB 参考光进行差动信号处理, 并将归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 作为输出量, 可基本消除环境温度对 Sagnac 环滤波器波长解调稳定性的影响。理论分析和实验结果表明, 当 Sagnac 环滤波器工作波长为 1310 nm, 保偏光纤的拍长 $L_p = 3.0 \text{ mm}$, 长度 $L = 96 \text{ mm}$ 时, 未封装的 Sagnac 环的透射谱波长温度漂移约为 $1.3 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, 封装后的 Sagnac 环的透射谱波长温度漂移约为 $0.1 \text{ nm/}^\circ\text{C}$, 采用归一化差动函数 $M(\lambda_B)$ 作为输出量的波长温度漂移约为 $2.4 \times 10^{-4} \text{ nm/}^\circ\text{C}$, 约是未经封装的 Sagnac 环透射谱温度漂移的 1.8×10^{-4} 倍, 是封装后的 Sagnac 环的透射谱波长温度漂移的 2.4×10^{-3} 倍。这种 Sagnac 环滤波器波长解调方法具有高温稳定特性, 可直接应用于 FBG 传感器的布拉格波长解调。

参 考 文 献

1 C R Liao, Ying Wang, D N Wang, *et al.*. Fiber in-line Mach-Zehnder interferometer embedded in FBG for simultaneous

refractive index and temperature measurement [J]. IEEE Photonic Technol Lett, 2010, 2(22): 1686-1688.
 2 Fan Liuqing, Ma Li, Han Daofu, *et al.*. Fiber Bragg grating temperature sensor based on dynamic Fabry-Pérot cavity [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(10): 1005003.
 范刘静, 马力, 韩道福, 等. 基于动态法布里-珀罗腔的光纤光栅温度传感[J]. 中国激光, 2012, 39(10): 1005003.
 3 Hongbo Zou. Dynamic strain measurement using two wavelength-matched fiber Bragg grating sensors interrogated by a cascaded long-period fiber grating [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(2): 199-203.
 4 Lianshan Yan, Anlin Yi, Wei Pan. A simple demodulation method for FBG temperature sensors using a narrow band wavelength tunable DFB laser [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2010, 22(18): 1391-1393.
 5 Hongqiang Li, Yang Li, Enbang Li, *et al.*. Temperature-insensitive arrayed waveguide grating demodulation technique for fiber Bragg grating sensors [J]. Opt and Laser Technol, 2013, 51: 77-81.
 6 Li Zhengying, 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.
 7 Mei Jiawei, Xiao Xiaosheng, Xu Mingrui, *et al.*. Wavelength-swept fiber laser based on dispersion tuning and its application on the demodulation of fiber Bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1114003.
 梅佳伟, 肖晓晟, 许明睿, 等. 基于色散调谐宽带扫描光纤激光器及其在光纤光栅解调中的应用 [J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1114003.
 8 Zhu Zhu, Liang Dakai, Sun Hongbing. Double-edged filter wavelength demodulation system for fiber Bragg gratings based on long period fiber grating [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305001.
 朱 珠, 梁大开, 孙红兵. 基于双长周期光纤光栅边缘滤波的光纤布拉格光栅解调系统 [J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305001.
 9 Jiang Nuan, Li Zhizhong, Yang Huayong, *et al.*. Birefringence analysis of polarization maintaining fiber and research on characteristic of all-fiber beat-length experimental systems [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0706003.
 姜 暖, 李智忠, 杨华勇, 等. 保偏光纤双折射分析及全光纤拍长测试方法对比研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0706003.
 10 S Chung, J Kim, B A Yu, *et al.*. A fiber Bragg grating sensor demodulation technique using a polarization maintaining fiber loop mirror [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2001, 13(12): 1343.
 11 Hao Wenliang, Peng Jun, Yu Benli. High-resolution FBG demodulation system with two Sagnac loops based on high birefringence PCF [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2011, 22(10): 1443-1446.
 郝文良, 彭 军, 俞本立. 基于高双折射 PCF 的双 Sagnac 环高分辨率 FBG 解调系统 [J]. 光电子 • 激光, 2011, 22(10): 1443-1446.
 12 Iman Aryanfar, Kok-Sing Lim, Wu-Yi Chong. Add-drop filter based on microfiber Mach-Zehnder/Sagnac interferometer [J]. IEEE J Quantum Elect, 2010, 48(11): 1411-1414.
 13 Liu Lihui, Zhao Qida, Zhou Guang, *et al.*. Study on characteristics of two high-birefringence fiber loops mirror filter [J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(9): 1185-1188.
 刘丽辉, 赵启大, 周 广, 等. 双折射光纤环形镜滤波器特性研究 [J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1185-1188.
 14 T A Birks, P Morkel. Jones calculus analysis of single-mode fiber Sagnac reflector [J]. Appl Optics, 2010, 27(15): 3107-3113.
 15 Yang Yuanhong, Xu Chunjiao, Yang Mingwei, *et al.*. Temperature sensing technology based on mode interference in

polarization maintaining fiber [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, (1): 91-96.

杨远洪, 徐春娇, 杨明伟, 等. 基于保偏光纤模式干涉的温度传感技术[J]. 红外与激光工程, 2010, (1): 91-96.

16 Liu Lihui, Chen Shaohua, Zhao Qida, *et al.*. Study on the

automatic compensation of a sagnac loop filter [J]. Chinese J Semiconductors, 2006, 27(9): 1663-1665.

刘丽辉, 陈少华, 赵启大, 等. Sagnac 滤波器的自动补偿[J]. 半导体学报, 2006, 27(9): 1663-1665.

栏目编辑: 王晓琰