

混合 Sagnac 干涉仪高分辨率相位解调算法

刘 硕¹ 杨远洪^{1,2} 陈宇轩¹

¹北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191

²北京航空航天大学惯性技术国防科技重点实验室, 北京 100191

摘要 为实现混合 Sagnac 干涉仪中偏振非互易相移的检测, 提出了一种高分辨率的相位解调算法。该算法中, 利用波数代替波长作为输出光谱的自变量, 使输出光谱转化为标准的余弦函数, 进行傅里叶变换和傅里叶逆变换, 计算出干涉谱的频率、干涉级次和相对相位, 实现了 Sagnac 干涉仪中偏振非互易相移的大范围、高分辨率解调。搭建了基于混合 Sagnac 干涉仪的保偏光纤温度传感器, 进行了实验和相位解调研究, 实验结果表明该算法可实现优于 0.1 °C 的温度分辨率, 并能实现室温到 900 °C 范围温度的线性测量。

关键词 光纤光学; 传感器; Sagnac 干涉仪; 傅里叶变换; 绝对相位解调

中图分类号 TB133 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.1005006

Phase Interrogation Algorithm with High Resolution for Hybrid Sagnac Interferometers

Liu Shuo¹ Yang Yuanhong^{1,2} Chen Yuxuan¹

¹Key Laboratory on Opto-Mechatronics Technology of Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China

²National Key Laboratory on Inertial Technology, Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract A phase interrogation algorithm with high resolution for the measurement of the polarization nonreciprocal phase-shift of hybrid Sagnac interferometers is proposed. Taking wavenumber instead of wavelength as the function variable, the output spectrum is a standard cosine spectrum function. The frequency, interference order and relative phase of this spectrum function can be obtained after Fourier transform and inverse Fourier transform. And then the measurement of the polarization nonreciprocal phase-shift of hybrid Sagnac interferometers can be realized with high resolution and a large rangement. A typical hybrid Sagnac interferometer based polarization maintaining fiber(PMF) temperature sensor is built and the absolute phase is determined with proposed algorithm. Experiments show that less than 0.1 °C temperature resolution is realized and the temperatures from room temperature to 900 °C can be measured with a good linearity.

Key words fiber optics; sensors; Sagnac interferometers; Fourier transform; absolute phase interrogation

OCIS codes 060.2370; 120.5790; 070.4790; 120.5050

1 引 言

将一段保偏光纤(PMF)接入单模光纤耦合器,可形成一种混合型 Sagnac 干涉仪。基于此类干涉仪的传感器具有制作简单、光学结构简易、插入损耗低以及对输入光偏振态不敏感等诸多优点,具有重要的实用价值,可实现压力^[1]、温度^[2-3]、光纤双折射^[4]、电流^[5]、气体浓度^[6]等物理量的测量。传统的混合 Sagnac 干涉仪传感器一般使用波长解调方案,即通过跟踪干涉谱峰值波长的移动来解调偏振非互易相移(或光程差)的变化^[6]。

收稿日期: 2015-04-04; 收到修改稿日期: 2015-06-25

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ04081504)、创新团队发展计划(IRT 1203)

作者简介: 刘 硕(1992—),男,硕士研究生,主要从事光纤传感技术方面研究。E-mail:1146592629@qq.com

导师简介: 杨远洪(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤传感技术及激光技术等方面的研究。

E-mail: yhyang@buaa.edu.cn(通信联系人)(中国光学学会会员号: S040420656S)

该方案实施简单,灵敏度较高,但是存在不同峰值灵敏度不同、测量动态范围受光源谱宽限制^[7]、只能实现相对测量和不易实现自动测量等缺点。在此基础上,Rosa等^[8]提出了测量波长平均周期变化的解调方案,实现了对温度的绝对测量。Childs等^[9]基于傅里叶变换,分别在波长域和波数域进行变换,对一个包含有一段保偏光子晶体光纤的Sagnac干涉仪中,双折射以及双折射的分布随压力的变化进行了传感测量。Cho等^[7]将光谱进行傅里叶变换得到光波长频率,通过检测该频率来测量静压力,解决了波长解调测量范围受光源谱宽限制的问题,实现了大动态范围的测量。但这类基于频率解调的方法,都存在分辨率难以提高的问题^[10]。

针对以上解调方案存在的缺点,本文提出了一种基于傅里叶变换的混合Sagnac干涉仪偏振非互易高分辨率相位解调方案,在波数域内通过傅里叶分析得到干涉谱的相对相位分布,进而实现非互易相位的绝对测量。该算法结合了频率解调及相对相位解调的优点,同时具有测量范围大和分辨率高的优点。通过搭建温度传感系统,实现了高分辨率和大测量范围的温度测量。

2 相位解调原理

图1为典型的基于混合Sagnac干涉仪的保偏光纤传感器示意图。该系统由宽谱光源(BBS)、光谱分析仪(OSA)、单模耦合器(DC)和一段长为 L 的保偏光纤构成。DC和PMF形成了典型的混合Sagnac干涉仪。图2为典型的输出干涉谱,图中已用波数 k 取代波长 λ 作为横坐标,输出光谱为余弦波形^[9],其干涉公式可描述为^[11-12]

$$I = 1 - \cos\left(2\pi \cdot \frac{BL}{\lambda}\right) = 1 - \cos(2\pi BL \cdot k) = 1 - \cos(2\pi f_k \cdot k), \quad (1)$$

式中 B 是PMF的双折射, L 是PMF的长度, λ 是工作波长, $k=1/\lambda$ 是波数。 B 和 L 的乘积是保偏光纤中2个偏振模式之间的光程差(OPD),其对应的相位差即为Sagnac干涉中的偏振非互易相位。 B 与 L 的乘积可以被定义为特征频率 f_k ,即该余弦函数随自变量 k 变化的频率。理论上,通过傅里叶变换可以计算得到 f_k ,进而得到OPD,但是由于光源谱宽有限,相当于对余弦信号引入了1个滤波窗口,这种截断效应将会严重降低 f_k 的分辨率。为了提高解调分辨率,结合了干涉级次和相对相位信息,将(1)式重写为如下形式:

$$I = 1 - \cos(2\pi m + \varphi_k), \quad (2)$$

$$m = \text{floor}(BL \cdot k) = \text{floor}(f_k \cdot k), \quad (3)$$

式中 $\text{floor}()$ 是向下取整函数, φ_k 定义为 2π 范围内的相对相位值, m 定义为Sagnac干涉仪干涉光谱中某一点在波数域的干涉级次。利用快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)可以计算出 m 和 φ_k ,进而确定总相位 $2\pi m + \varphi_k$ 。这相当于用干涉级次 m 作粗刻度、用相对相位 φ_k 作细刻度,实现绝对非互易总相位的高分辨率测量。计算总相位的流程图如图3所示。

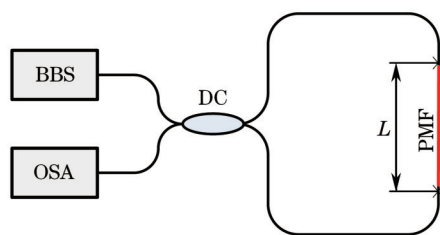


图1 基于混合Sagnac干涉仪的PMF传感器

Fig.1 Schematic of a hybrid Sagnac interferometer based PMF sensor

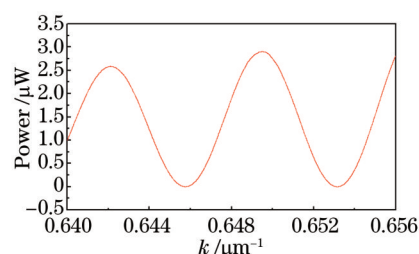


图2 典型的输出干涉谱

Fig.2 Typical output interference spectrum

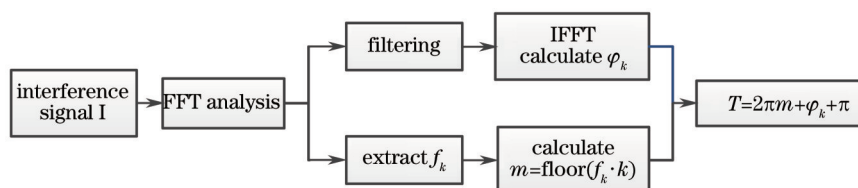


图3 解调算法的流程图

Fig.3 Flowchart of the interrogation process

对干涉信号进行FFT变换,可以得到其幅频曲线[如图4(a)所示],进而可以提取峰值频率 f_k 。用矩形窗口

选取 FFT 频谱中主频 f_k 附近区域的数据,进行 IFFT,由其虚部可以获得相对相位 φ_k ,如图 4(b)所示, φ_k 被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 的范围内^[13]。由于(3)式中的每一个 m 值都对应图 4(b)曲线的一个极值位置,为方便计算,可认为极值位置处的初始相对相位为 0,因此以某一干涉级次 m 所在极值位置为起点的相对相位表示为: $\varphi_k + \pi$ 。当选定某一波数值 k_m 作为测量点时,通过(3)式可以计算出干涉级次 m 。结合相对相位,干涉谱在 k_m 处总的绝对相位 ϕ_r 可表示为

$$\phi_r = 2\pi BLk_m = 2\pi m + \varphi_k(m) + \pi. \quad (4)$$

通过以上步骤可以实现对干涉谱光程差,即 B 与 L 乘积值的绝对测量。由于利用了分辨率更高的相位信息,能实现高分辨率的测量。

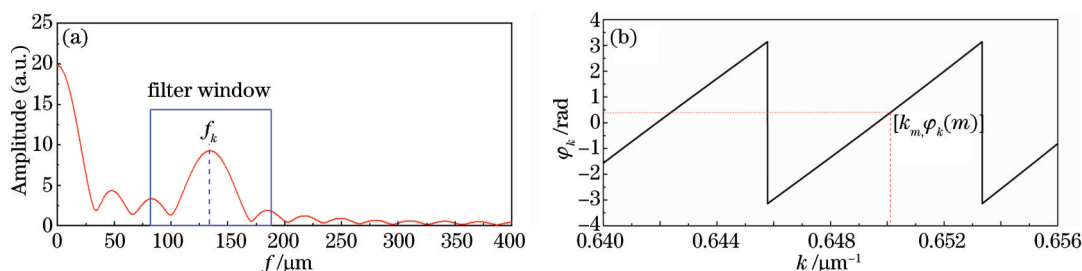


图 4 (a) FFT 频谱; (b) 相对相位 φ_k
Fig.4 (a) FFT spectrum; (b) relative phase φ_k

3 温度测量实验研究

基于图 1 所示结构,搭建了图 5(a)所示温度实验系统。该实验系统由光谱解调仪(MICRON OPTICS SM125,更新率为 2 Hz 时波长分辨率为 5 pm)、2×2 单模耦合器、PMF 传感光纤和隔离器(ISO)构成。从 SM125 的 Ch1 通道发出的扫描激光经 DC 后分成 2 路分别沿顺时针和逆时针方向绕光纤环传输并在 DC 处会合,发生干涉。ISO 用于消除 Ch2 通道的输出扫描激光的影响,输出干涉光经过 ISO 后进入 Ch2 通道被 SM125 检测。用作温度传感的保偏光纤放置于温箱中,通过数字温度计对温箱中的温度进行监测。输出的干涉谱和温度值被传输到电脑,进行数据处理。

基于该装置进行了频率解调和高分辨率相位解调方案的分辨率对比研究。选取一段长约 20 cm 的熊猫型保偏光纤作为传感光纤,并将其放置在稳定的水浴温箱中(温度 T 波动小于 0.05 °C)。在 20 °C~30 °C 范围内,每隔 1 °C 进行一次光谱测试。干涉光谱范围为 1510~1590 nm,光谱采样点数为 16001 点。

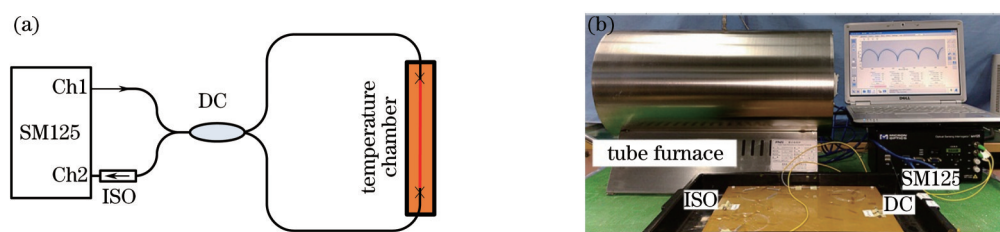


图 5 (a) 实验系统示意图; (b) 高温实验装置实物照片

Fig.5 (a) Schematic of the experimental setup; (b) photograph of the high temperature experimental setup

首先将干涉谱从波长域转换到波数域,利用 2 种解调方法对光程差进行解调。

第 1 种方法是基于(1)式的频率解调,即 FFT 变换之后只提取主频率 f_k 。图 6(a)为解算所得主频率 f_k 随温度变化的曲线。从图中可以看到,该方法分辨率很低,几乎不能分辨出温度变化,其原因可能是光源谱宽有限导致的窗口效应。

第 2 种解调方法是基于本文所述的相位解调方法。图 6(b)为解算所得的总相位 ϕ_r 随温度变化的曲线。图中可以看到二者具有良好的线性关系,线性度 R 为 0.9998,其灵敏度为 $-0.51 \text{ rad}/^\circ\text{C}$ 。

分析该算法的温度分辨率:为保证光谱测量的实时性,选取了 2 Hz 的测量更新率,SM125 解调仪的波长分辨率为 5 pm。实验系统记录的光谱相邻峰值间距约为 10.2 nm。在基于峰值波长跟踪的解调算法中^[14],一

个光谱周期对应的相对相位为 2π , 因此 5 μm 的波长误差理论上对应的相对相位误差为 0.0031 rad, 对应的温度分辨率约为 0.01 $^{\circ}\text{C}$, 考虑实际情况下其他因素的影响, 可认为温度分辨率优于 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 。

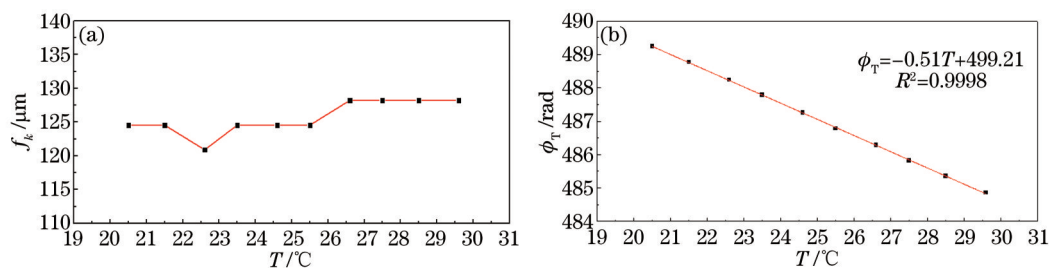


图 6 实验解调结果。(a) f_k 随温度变化关系; (b) 总相位随温度变化关系

Fig.6 Experimental results. (a) f_k as a function of temperature; (b) total phase as a function of temperature

为了验证大测量范围的解调能力, 进行了室温到高温的测量实验。将长度约为 40 cm 的熊猫型保偏光纤段放置于高温炉中, 与炉外 DC 熔接形成混合 Sagnac 干涉仪, 实验系统照片如图 5(b) 所示。炉温由常温升到 900 $^{\circ}\text{C}$, 每隔 100 $^{\circ}\text{C}$ 保温 10 min, 并记录光谱和温度数据, 温度值为高温炉自带温度传感器的显示值。图 7 为高温实验的解调结果, 包括升温 and 降温 2 个过程。可以看到在室温到 900 $^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内, 绝对相位与温度具有较好的线性关系, 但与图 6(b) 相比, 其线性度变差。引起误差的原因可能是高温炉温度传感器存在误差和光纤材料本身在高温下的非线性。实验结果表明, 基于傅里叶变换的绝对相位解调算法具有很大的动态测量范围, 可以实现大范围的温度测量。

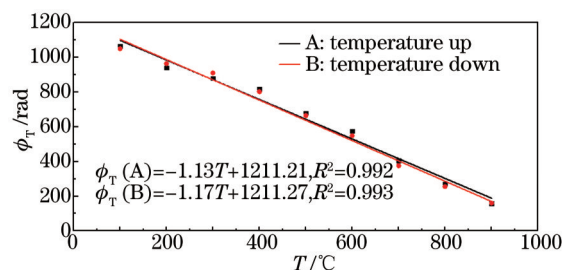


图 7 总相位解调结果

Fig.7 Interrogated results with total absolute phase calculated

4 结 论

基于混合 Sagnac 干涉光谱的周期性特点, 利用傅里叶变换技术, 结合绝对干涉级次和相对相位信息, 实现了混合 Sagnac 干涉仪偏振非互易相移的大范围、高分辨率绝对测量。搭建了基于混合 Sagnac 干涉仪的温度传感系统, 对传感器的分辨率和动态测量范围进行了实验和解调研究, 实验结果表明, 采用该解调方案可实现优于 0.1 $^{\circ}\text{C}$ 的温度分辨率, 并且在室温到 900 $^{\circ}\text{C}$ 的范围内实现了线性测量。

参 考 文 献

- 1 Kim D H, Kang J. Sagnac loop interferometer based on polarization maintaining photonic crystal fiber with reduced temperature sensitivity[J]. Opt Express 2004, 12(19): 4490-4495.
- 2 Kim B H, Lee S H, Lin A, et al.. Large temperature sensitivity of Sagnac loop interferometer based on the birefringent holey fiber filled with metal indium[J]. Opt Express, 2009, 17(3): 1789-1794.
- 3 Wu Tiesheng, Wang Li, Wang Zhe, et al.. A photonic crystal fiber temperature sensor based on Sagnac interferometer structure[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1114002.
伍铁生, 王 丽, 王 哲, 等. 一种 Sagnac 干涉仪结构的光子晶体光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(11): 1114002.
- 4 Chen Yuxuan, Yang Yuanhong, Yang Mingwei. Redressing effect of arc discharging on polarization mode phase retardation of polarization maintaining fiber and application in waveplate fabrication[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(4): 0405006.
陈宇轩, 杨远洪, 杨明伟. 保偏光纤偏振模间延迟的放电调整及波片制作[J]. 中国激光, 2015, 42(4): 0405006.
- 5 Ouyang Kang, Hong Xiaobin, Wu Jian, et al.. A novel method on modulation and demodulation of all fiber optical current

- transformer[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(1): 0105004.
- 欧阳康, 洪小斌, 伍 剑, 等. 全光纤电流互感器的新型调制解调方案研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0105004.
- 6 Yang Yuanhong, Wang Huan, Yang Fuling, *et al.*. Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on Sagnac interferometer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0806004.
- 杨远洪, 王 欢, 杨福铃, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0806004.
- 7 Cho L H, Wu C, Lu C, *et al.*. A highly sensitive and low-cost Sagnac loop based pressure sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(8): 3073-3078.
- 8 De la Rosa E, Zenteno L A, Starodumov A N, *et al.*. All-fiber absolute temperature sensor using an unbalanced high-birefringence Sagnac loop[J]. Opt Lett, 1997, 22(7): 481-483.
- 9 Childs P, Wong A C L, Fu H Y, *et al.*. Fourier analysis for hydrostatic pressure sensing in a polarization-maintaining photonic crystal fiber[J]. Appl Opt, 2010, 49(36): 6861-6867.
- 10 Jiang Yi. Progress in fiber optic white-light interferometer[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(6): 1413-1420.
- 江 毅. 光纤白光干涉测量术新进展[J]. 中国激光, 2010, 37(6): 1413-1420.
- 11 Zhou Guang, Zhao Qida, Liu Yange, *et al.*. Filtering characteristics of fiber loop mirror filter composed of multi-stage high birefringent fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(3): 341-345.
- 周 广, 赵启大, 刘艳格, 等. 多段双折射光纤构成环镜滤波器的滤波特性[J]. 光学学报, 2004, 24(3): 341-345.
- 12 Xu Chunjiao, Yang Yuanhong, Duan Weiqian, *et al.*. Technology of measuring the beat-length of polarization maintain optical fiber based on Sagnac interferometer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(6): 753-756.
- 徐春娇, 杨远洪, 段玮倩, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光纤拍长测试技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(6): 753-756.
- 13 Wang Zhen, Jiang Yi. Wavenumber scanning-based Fourier transform white-light interferometry[J]. Appl Opt, 2012, 51(22): 5512-5516.
- 14 Yang Yuanhong, Yang Fuling, Wang Huan, *et al.*. Optical fiber hydrogen sensor based on polarization-maintaining photonic crystal fiber[C]. OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors, International Society for Optics and Photonics, 2014: 91578Q.

栏目编辑: 王晓琰