

文章编号:1004-4213(2010)s1-0067-5

基于 M-Z 干涉仪的正交信号处理法波长解调系统

金钟燮, 崔海军

(重庆大学 光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘 要:设计并制作了全光纤非平衡马赫-曾德干涉仪,并分析了几种典型的波长解调技术.采取了一种新的正交信号获取方法,并通过相位补偿实现了对波长偏移量的测量.波长变化引起的相位信息可以通过数字反正切函数和相位展开来提取.与传统的正交采样方法相比,其采样数据量大幅度增加,对快速变化的波长信息可以实现精确测量,并通过实验验证了该解调方法的可行性.实验结果表明,该系统可以对波长实现很好的解调.

关键词:非平衡马赫-曾德干涉仪;光纤光栅;正交采样;波长解调

中图分类号:TN2

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb201039s1.0067

0 引言

光纤传感技术是伴随着光纤通信技术而迅速发展起来的一种以光为载体、光纤为媒介,可以感知外界被测量的新型传感技术.光纤布喇格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)是作为敏感原件的功能型光纤传感器,可以直接传感温度、应变以及实现温度和应变等许多物理量的间接测量. FBG 除具有普通光纤传感器的重量轻、体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点外,还有其他一些独特的优点^[1]:探头结构简单,易于和光纤耦合且耦合损耗小.

FBG 传感器是波长编码的,即被测物理量经 FBG 传感器调制后变为 FBG 中心波长的变化,通过检测中心波长的偏移量就可以测量出外界被测物理量的大小.因此,精确测量波长的偏移量成为光纤光栅传感的关键.测量波长的方法很多,比如直接使用光谱仪(Optical Spectrum Analyzer, OSA)进行测量^[2],但是 OSA 较为昂贵,且较长的扫描周期导致测量时间较长,不适合动态测量;也有采用边缘滤波器法^[3]进行波长解调的方案,但由于滤波器波长范围有限,且测量结果容易受到光源稳定性的影响,因此测量精度和测量范围均有所限制;采用匹配光栅法^[4]进行波长解调的方案其本质与边缘滤波器法类似,测量范围受到光栅反射谱宽的限制,并容易受到光栅反射谱温度漂移的影响;使用法布里-珀罗(Fabry-Perot filter, F-P)可调谐滤波器法^[5]进行解调的波长扫描法的方案中,滤波器调谐过程中的非线性响应对测量精度影响较大,且调谐的频率通常

不会太高,影响动态测量范围.

本文采用基于非平衡马赫-曾德(Mach-Zehnder, M-Z)干涉仪的正交信号处理法对波长进行解调.通过对 M-Z 干涉仪的输出信号进行处理,从中获取两组相互正交的强度信号,并通过数字反正切运算及相位打开技术,获取与波长信息相关的相位信息.

1 正交信号解调技术

正交信号处理法在光纤光栅传感中有其独特的优点,它可以把布喇格中心波长的变化转换为与之对应的光强变化^[6].对绝大多数干涉仪而言,线性的波长变化会产生周期性的正弦光强输出,同时导致了信号的褪色及方向的不可知性.采用正交信号处理法,可以得到与输入波长成线性关系的相位信息.

正交信号处理法可以分为两个步骤:相互正交的两组强度信号的获取和实时相位的展开.在获得相互正交的强度信号后,与波长相关的相位信息便可以通过数字反正切来提取.产生正交信号的方案有两种:被动波导法^[7]在干涉仪中没有机械或光学电路,可用于无电力环境下;F-P 干涉仪法^[8],通过设置路径差来产生正交相差.然而,由于这些方法中没有使用外部调制,需要去除信号中的直流成分,同时限制了在静态和低频传感中的应用.另外,当干涉仪受环境扰动时,他们的正交相位条件以及相对的强度差很容易受影响,从而导致测量误差. Dandridge 提出的 Phase generated carrier 法^[9]可应用于准静态和动态传感,但该方案要求高频的相位

基金项目:中央高校基本科研业务费科研专项自然科学类项目(No. CDJZR10120011)资助

第一作者:金钟燮(1970-),男,讲师,主要研究方向为光纤传感器及信号处理. Email: jinzhongxie@cqu.edu.cn

收稿日期:2010-10-26; **修回日期:**2010-12-23

调制或需要高阶低通滤波来分开信号的谐波,使得系统较为复杂,不够灵活.时间延迟采样法^[10]由于结构简单,运算量少,比较适合计算机接口的测量系统.但是由于该方案在每个调制周期只产生一对正交信号,即只有一个采样点,因此要求调制信号的频率非常高,导致信号质量下降.本文提出一种新的正交信号获取技术,与传统的正交采样法不同,通过对正交信号进行时间序列上的顺延,并对相应的信号序列进行相位补偿,大幅度增加了正交信号的采样点数,提高了动态测量范围.

传统的正交采样如图 1. 图 1(a)为传统的原理框图,图 1(b)为正交采样信号关系图. M-Z 干涉仪的一臂缠在圆筒形的压电陶瓷 (Piezoelectric Ceramics, PZT) 上,采用锯齿波信号 (曲线 b) 调制. 当锯齿波产生一个 2π 相移的调制信号时,干涉仪输出的交流成分可以表示为: $I_{AC} = k \cos(\omega t + \varphi_i)$, 其中 k 为可见度, ω 为锯齿波的调制频率, φ_i 为波长变化及环境扰动等导致的随机相位. 干涉仪输出在一个调制周期被采样两次. 为了确保每个周期的第一个采样点在同一位置,使用一个 $0 \sim 5$ V 的同步时钟信号作为触发信号. 第一个采样点位于时钟信号的上升沿瞬间,第二个采样点在延迟 t 之后. 当 t 满足 $\omega \Delta t = \pi/2$ 时就得到了一对正交数据. 由于一个采样周期只能给出一个相位信息,所以该方案的信号采样率为锯齿波的调制频率.

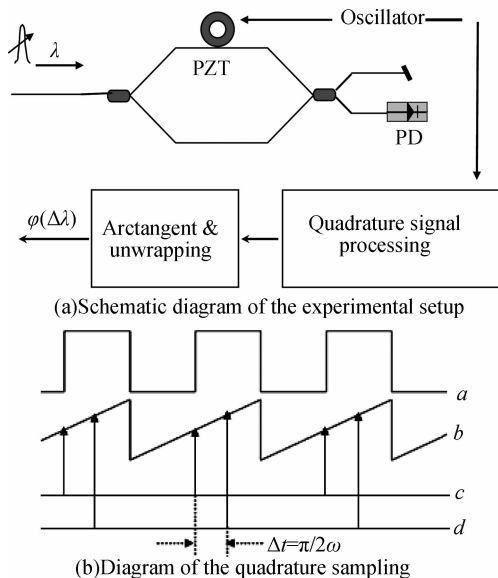


图 1 正交信号处理原理图

Fig. 1 Schematic diagram of the quadrature sampling

为了提高信号采样频率,本文提出了一种新的方法:第一组的正交信号的获取采取 TTL 时钟信号上升沿触发时采集信号,并在一定间隔后采集与之正交的信号;而第二组不等待第二个时钟信号,而是直接按照干涉信号的采样间隔顺延来获取第二组

正交信号. 由于采样时间的顺延会带来干涉信号相位的变化,因此在解调结果中需进行补偿. 本方案的采样点数与锯齿波的调制信号无关,而与干涉信号的采样速率几乎相等,因此极大地增大了采样点数.

2 实验方案及结果

构建的光纤光栅解调系统如图 2. 宽带光源经过一个 3 dB 耦合器进入传感光栅,在 FBG 光纤光栅只反射特定波长的光. 反射光经耦合器进入非平衡 M-Z 干涉仪,干涉仪一臂绕有被锯齿波调制的 PZT. 干涉信号输出经光电探测器 (Photodiode, PD) 进行光电转换,并经低通滤波器后由数据采集卡采集,进入电脑进行信号处理. 光源波长变化导致的附加相位漂移为 $\Delta\psi(\Delta\lambda) = -2\pi nd\Delta\lambda/\lambda^2$, 其中 nd 为两臂光程差. 由式中可以看出,波长变化 $\Delta\lambda$ 与相位变化 $\Delta\psi$ 成正比关系,解调出波长导致的相位漂移即可解调出与外界物理量相关的布喇格波长.

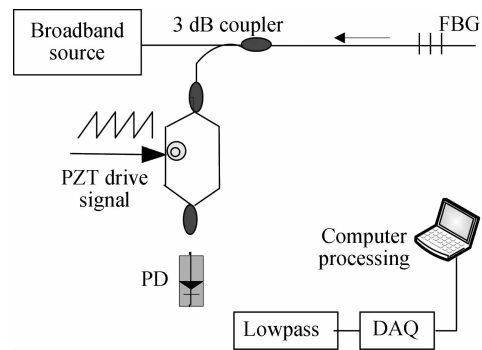


图 2 实验系统结构图

Fig. 2 The experimental setup

系统采用的传感光栅为普通的紫外写入的光纤光栅,其频谱如图 3. 由于实验中采用的压电陶瓷的共振频率在 300 Hz 左右,所以不能进行较高频率的锯齿波调制,本实验中,当锯齿波调制频率为 9 Hz,调制电压为 4.2 V 时,产生的正弦干涉信号的输出较为平稳,如图 4. 数据卡采用 NI 公司的 6024E 系列数据采集卡,设置采集速率为 10K Sam/S.

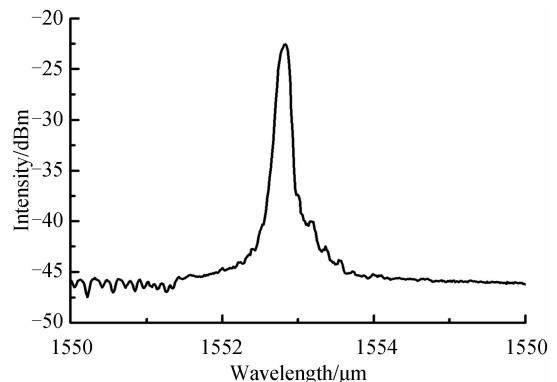


图 3 光纤光栅的反射频谱

Fig. 3 The reflectivity spectrum of FBG

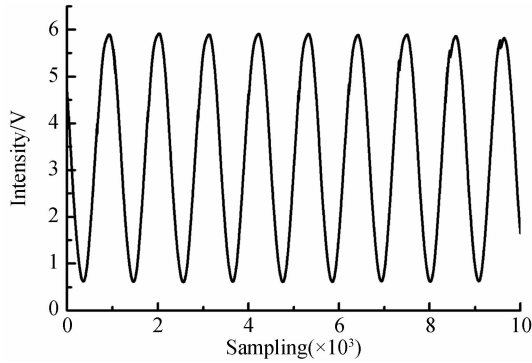


图 4 光栅在室温下未施加应变的干涉图
Fig. 4 The interference figure of Bragg grating at room temperature

从干涉信号中提取正交信号的步骤为:第一个信号取自时钟信号上升沿,其正交信号取自后延 N 个采样点之后;第二个采样点紧邻第一个采样点,其正交信号顺延后为时钟信号后第 $N+1$ 个点;如此循环.由于采得各点相位并不相同,需要在相位提取之后进行相应的相位补偿.判断信号是否正交,通常采用李萨图法:取两组采得的信号分别作为 X 轴和 Y 轴画图,如果李萨图结果为圆,则表明两组信号相位差为 90° ,即这两组信号正交^[11].本实验中 N 取 278 时,李萨图显示为一个圆,如图 5.图 6 为采得的两组正交信号.

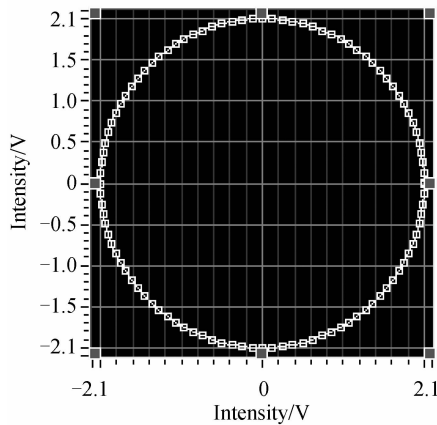


图 5 通过李萨图得到的正交采样点
Fig. 5 Lissajous plot indicate that the quadrature phase condition is satisfied

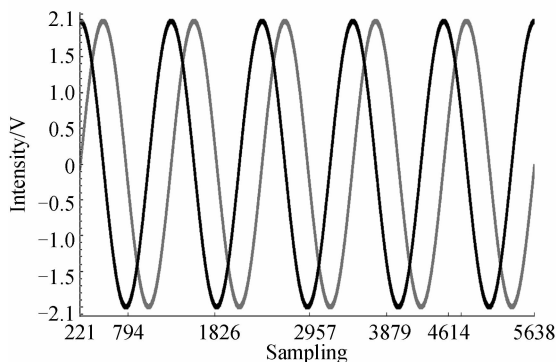


图 6 采样得到的两组正交采样信号
Fig. 6 Sampled two data array that have $\pi/2$ phase difference

获取两组正交信号后,通过将两组互相正交的信号相除可以得到正切数据,再通过反正切函数来提取相位.由于反正切函数的周期性,提取的相位会在正负 $\pi/2$ 之间震荡,所以对提取的相位进行了相位展开.即当累积相位突然有一个正负 π 跳跃时,可以在提取的相位中加上一个相应的正 π 或负 π .图 7 为未施加任何应变时,通过正交信号处理法提取的干涉信号相位.实线和虚线分别为进行相位补偿前后的结果.图中的解调信号并不平坦,可以理解为随机的实验室温度对干涉信号相位的影响.

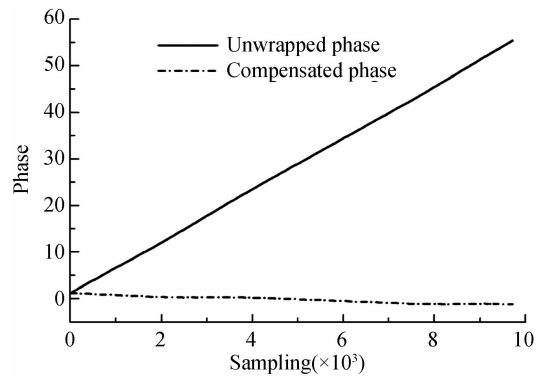


图 7 相位展开与相位补偿后得到的相位图
Fig. 7 Phase unwrapping and compensation signals

将光纤光栅固定在微应变台上,施加应变以改变布喇格波长.微应变台的移动步长为 $10 \mu\text{m}$,测得的结果如图 8(a).传统的正交采样法测得的结果见图 8(b).对比两种解调方案可以得知,传统的方案

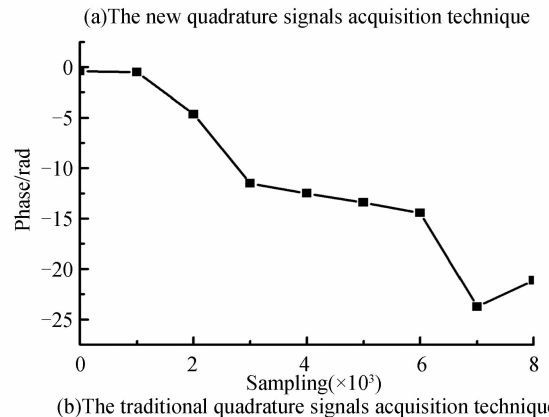
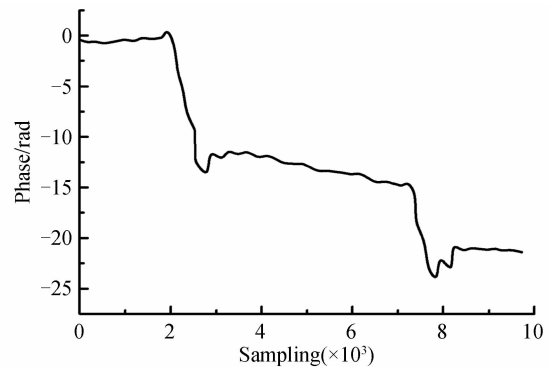


图 8 施加一定应变后的相位变化图形
Fig. 8 Relationship between phase shifts and applied strain

由于采样点较少,失去了很多的细节信息.而本文提出的方案则具有明显的优势,由于采样点数足够多,对于快速的相位变化也可以正确解调.实验结果图中的台阶不够平坦,系手动调节微应变台时的抖动以及温漂的影响所致.温漂的影响可以通过采用参考光栅^[12]来去除,在高速的测量中也可以通过数字滤波器来滤除^[13].

3 结论

本文在了解国内外光纤光栅解调技术及发展现状的基础上开展了光纤光栅波长高速解调的研究工作.基于 M-Z 干涉仪的解调技术和原理,设计了一种新型的正交信号采集系统.由于所采用的正交信号处理法与传统的正交采样方法相比,采样数据量大幅度增加,使波长的解调速度相应增快,因此对快速变化的波长信息仍然可以精确测量.就本实验构建的系统而言,根据奈奎斯特定理最高可以保留 5 KHz 的高频相位变化信息,相对于传统的 4.5 Hz 的测量范围,提高了 1000 倍以上.通过实验对两种解调方案的数据进行对比分析,论证了该方案的可行性及其解调速度的优势.本论文的研究内容和结果具有一定的应用价值,对光纤光栅传感解调技术的发展可以起到一定的促进作用.

参考文献

- [1] ZHAN Ya-ge, LU Qing, XIANG Shi-qing. Study on the optimization of matched grating interrogation of fiber grating sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(6):758-762.
詹亚歌,陆青,向世清,等.优化光纤光栅传感器匹配光栅解调方法的研究[J]. *光子学报*, 2004, **33**(6):758-762.
- [2] ZHAN Ya-ge, WU Hua, PEI Jin-cheng, et al. Study on high accuracy quasi-distributed fiber grating sensor system [J]. *Journal of Optoelectronic · Laser*, 2008, **19**(6):758-762.
詹亚歌,吴华,裴金诚,等.高精度准分布式光纤光栅传感系统的研究[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(6):758-762.
- [3] LIU Bo, TONG Zhen-grong, ZENG Jian. A demodulation method based on chirp grating reflective filter in fiber Bragg grating sensing system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(1):57-60.
刘波,童峥嵘,曾剑.一种利用啁啾光栅反射滤波的光纤光栅传感解调方法[J]. *光子学报*, 2004, **33**(1):57-60.
- [4] ZHAO Li-min, LI Wen-qiang. Review of demodulation method for fiber Bragg grating sensor [J]. *Transducer and Micro System Technologies*, 2007, **26**(3):17-23.
赵利民,李文强.光纤 Bragg 光栅传感器的解调方法概述[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(3):17-23.
- [5] LIU Xiao-hui, WANG Chang, LIU Tong-yu. Fiber Grating Water Pressure Sensor and System for Mine [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(1):112-114.
刘小会,王昌,刘统玉,等.矿井下用光纤光栅水压传感器及系统[J]. *光子学报*, 2009, **38**(1):112-114.
- [6] JIN Zhong-xie, Song Min-ho. Fiber grating sensor array interrogation with time-delayed sampling of a wavelength scanned fiber laser [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2004, **16**(8):1924-1926.
- [7] LIANG You-cheng, JIANG Shao-ji. Fiber Bragg grating sensor demodulation technique based on asymmetric F-P filter [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(6):906-909.
梁有程,江绍基,余志强,等.基于非对称 F-P 滤波器的光纤光栅解调技术[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(6):906-909.
- [8] ZHANG Ting, ZHANG Ke-shu. Research in demodulation technologies for fiber Bragg sensing system [J]. *Optical Communication Technology*, 2009, **33**(4):29-32.
张婷,张珂殊.光纤 Bragg 光栅传感器信号解调技术研究. *光通信技术* [J]. 2009, **33**(4):29-32.
- [9] JIA Hong-zhi, LI Yu-lin, Hu Man-li. Measuring the fiber grating wavelength by tunable Fabry-Perot cavity [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(2):58-61.
贾宏志,李育林,忽满利.可调谐法布里-珀罗腔测量光纤光栅波长[J]. *激光杂志*, 2000, **21**(2):58-61.
- [10] SONG Min-ho, YIN Shi-zhuo, RUFFIN P B. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach - Zehnder interferometer [J]. *Applied Optics*, 2000, **39**(7):1106-1111.
- [11] ZHANG Ling, WANG Jin-yu, SUI Qing-mei. Application of Labview on fiber Bragg grating demodulation system [J]. *Information Technology*, 2007(6):36-39.
张玲,王金玉,隋青美. Labview 在光纤 Bragg 光栅解调系统中的应用[J]. *信息技术*, 2007(6):36-39.
- [12] FAN Dian, JIANG De-sheng, MEI Jia-chun. High-speed double-edged wavelength interrogation technology for fiber Bragg grating [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1):118-121.
范典,姜德生,梅加纯.高速双边缘光纤光栅波长解调技术[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1):118-121.
- [13] WANG Mu-guang, LI Tang-jun, ZHUO Feng. Research on cross - sensitivity of fiber grating sensor about strain and temperature [J]. *Study on Optical Communication*, 2001(6):50-53.
王目光,唐军,卓锋,等.光纤光栅传感器应变和温度交叉敏感问题分析[J]. *光通信研究*, 2001(6):50-53.

Mach-Zehnder Interferometer Based Wavelength Demodulation System by Using Quadrature Signal Processing

JIN Zhong-xie, CUI Hai-jun

(Key Laboratory for Optoelectronic Technology & System, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: An all-fiber unbalanced Mach-Zehnder interferometer was designed and several demodulation methods were discussed. A new quadrature signals acquisition technique and phase compensation method were used to calculate wavelength drift. The wavelength-dependent phase information was extracted by application of digital arctangent function and phase unwrapping to the quadrature signals. The sampling ratio was greatly enhanced therefore high frequency wavelength measurement was possible. An efficient wavelength demodulation was experimentally demonstrated.

Key words: Unbalanced Mach-Zehnder interferometer; Fiber Bragg Gating (FBG); Quadrature sampling; Wavelength demodulation