

文章编号:1004-4213(2011)02-0251-4

基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器

林巧,陈柳华,李书,吴兴坤

(浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:设计并研制了一种新型的基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器. 该光纤弯曲传感器由两根光纤组成的光纤带固定于弹性弯曲结构上来产生迈克尔逊干涉信号, 用光纤折射率匹配液填充微型腔, 并施加音频振荡信号对相位干涉信号实现低频调制. 采用相位生成载波技术对相位干涉信号进行调制和解调, 实现了对曲率变化高精度度的检测. 实验测试了该光纤弯曲传感器的相位干涉信号与光纤带弯曲曲率的关系, 并与理论分析对比. 结果表明该光纤弯曲传感器具有 43.96 rad/m^{-1} 的灵敏度及 0.004 m^{-1} 的高分辨率.

关键词:光纤弯曲传感器; 迈克尔逊干涉; 相位生成载波技术; 折射率匹配液

中图分类号: TP212.1; TN253

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20114002.0251

0 引言

光纤弯曲传感器作为一种新型的弯曲传感器技术, 由于其具有抗电磁干扰能力强、防水防潮、耐腐蚀、质量轻与体积小等优点, 在近年来引起了人们极大的兴趣^[1]. 目前, 在国内外已经提出了几种即可以表面粘贴又可以埋入结构内部的光纤弯曲传感器中, 四芯光纤传感器, 光纤布喇格光栅 (Fiber Bragg Grating, FBG) 传感器与长周期光纤光栅 (Long Period Fiber Grating, LPFG) 传感器等虽然都达到了一定的灵敏度与分辨率, 但上述结构的传感器需要较复杂的图像处理过程或者昂贵的光谱分析装置来获得测量结果^[2-4].

本文介绍了一种基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器. 采用相位生成载波技术 (Phase Generated Carrier, PGC), 通过对曲率变化引起的相位干涉信号的调制和解调, 实现了对结构弯曲曲率的精确检测. 与上述的同类型光纤弯曲传感器相比, 其利用光纤折射率匹配液动态腔, 在较简单的结构下实现了高达 43.96 rad/m^{-1} 的灵敏度及 0.004 m^{-1} 的高分辨率的弯曲传感.

1 传感原理

如图 1, 分布式反馈激光器 (Distributed Feedback Lasers, DFB) 发出波长为 1550 nm 的光束经光纤 1 到达 3dB 光纤耦合器, 光纤耦合器将光

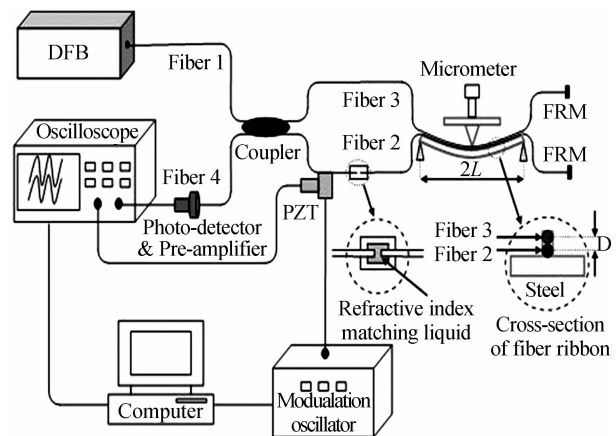


图 1 实验系统原理

Fig. 1 Schematic of experimental system

束均等的耦合到光纤 2 和 3, 光经过光纤 2 和 3 后, 被其端面处的法拉第旋转镜 (Faraday Rotator Mirror, FRM) 反射回光纤 2 与 3 分别形成参考光与信号光, 该两束光在光纤耦合器里形成干涉光, 干涉光经光纤 4 后到达光电探测器, 最后由示波器接收并显示干涉信号. 光纤 2 在 A 处插入一个微型腔体, 并用光纤折射率匹配液填充, 形成与光纤折射率基本相同的动态腔, 用于调制光程差; 压电陶瓷 (Piezoelectric Oscillator) 在音频信号驱动下带动一个光纤末端沿光纤轴向振动, 改变匹配液腔的长度, 由此产生相位 (光程差) 调制信号. 与已往常见的采用顺变柱体产生调制信号的方法相比, 本文利用了一个体积很小的折射率匹配液腔体来调制干涉信

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60577025) 资助

第一作者: 林巧 (1984-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为光纤传感器. Email: linqiao@yahoo.com.cn

导师: 吴兴坤 (1961-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为现代传感器及微光学器件制作. Email: xingkunwu@163.com

收稿日期: 2010-08-07; 修回日期: 2010-11-02

号,简化了调制结构;而与改变反射镜和光纤端面距离的调制方法相比,该方法利用了光纤折射率匹配液与光纤折射率一致的特性,使参考光经过匹配液腔时仍能基本不损耗地通过,大大降低了被调制信号出现光强大幅减弱的可能性^[5-6].

当光在单模光纤中传输时,受温度或者弯曲、压力等作用下,经过干涉仪两臂的光的偏振态变化各不相同,导致两路光因偏振方向不同无法产生完全干涉.国内外已经提出了一系列消除偏振影响的方案,包括采用保偏光纤、偏振漂移自动跟踪和校正、采用法拉第旋转镜对偏振光的往返补偿等技术^[7-11].其中采用法拉第旋转镜消除偏振影响的方法最为简单实用且价格相对低廉.法拉第旋转镜由一个反射镜和一个基于法拉第磁光效应的法拉第圆筒组成.法拉第圆筒对偏振光的旋转角度为 $\pi/4$,偏振光被反射镜反射后再次经过法拉第圆筒,最终使偏振光旋转 $\pi/2$ 的角度.因此,经干涉仪两臂后进入耦合器的光的偏振态都与输入光的偏振态正交,即发生干涉的两路光的偏振方向相同,条纹可见度最大.所以本文采用了在两路光纤末端添加法拉第旋转镜的方法来消除偏振带来的不完全干涉.

参考光与信号光产生干涉的原理公式如下所述.假设未加调制信号前,即将发生干涉的两束光信号 E_1 和 E_2 可表示为

$$E_1 = E_{dc} + E_{ac} \cos(\omega t + \varphi_1) \quad (1)$$

$$E_2 = E_{dc} + E_{ac} \cos(\omega t + \varphi_2) \quad (2)$$

式(1)和(2)中, E_{dc} 为直流分量幅值, E_{ac} 为交流分量幅值, ω 为光束的角频率, φ_1 和 φ_2 分别为两信号的初始相位.当压电陶瓷振动片引入相位调制信号 $M \sin(\omega_0 t + \varphi_0)$,产生的干涉光信号受到调制,其能量表达式如式(3)

$$I = 2I_{dc} + 2I_{ac} \cos[\varphi + M \sin(\omega_0 t + \varphi_0)] = 2I_{dc} + 2I_{ac} \cos(\varphi) \cos[M \sin(\omega_0 t + \varphi_0)] - 2I_{ac} \sin(\varphi) \sin[M \sin(\omega_0 t + \varphi_0)] \quad (3)$$

式(3)中,干涉光的相位差 $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, ω_0 为相位调制信号的交变振荡频率, φ_0 为相位调制信号的初始相位, M 为相位调制信号的调制深度.利用PGC技术,在一个调制周期内取得十二个等间隔的干涉信号值,标记为 $S_0, S_1, S_2 \dots S_{11}$.根据该十二点的特性,得到两个等式 $(S_7 - S_1) + (S_{11} - S_5) = 8I_{ac} \sin(\varphi)$ 和 $(S_0 + S_6) - (S_3 + S_9) = 8I_{ac} \cos(\varphi)$.最后,小于 2π 的相位差 φ 的值可由 $8I_{ac} \sin(\varphi)$ 与 $8I_{ac} \cos(\varphi)$ 的正负值以及它们的比值求得^[12].

光纤2与3形成的光纤带用环氧树脂粘在弹性很好的不锈钢钢尺上,钢尺置于距离为 $2L$ 的两个支架上,如图1.螺旋测微器在钢尺中心施加压力使

钢尺逐渐弯曲,光纤带的弯曲曲率 C 随之改变,其数值可表达为

$$C = 2d/(d^2 + L^2) \quad (4)$$

式(4)中, d 为弯曲钢尺中心与未产生弯曲时钢尺中心的垂直距离.光纤带中两条光纤的长度差与曲率的关系如式(5).

$$l_1 - l_2 = 2l_0 CD \quad (5)$$

l_0 为光纤带未弯曲时的半长度, D 为光纤带中两光纤的中心距离.

当光纤带弯曲曲率改变时,它不仅改变了轴向光纤的长度 l ,同时由于光弹效应改变了光纤纤芯的折射率 n .式(6)为任一路光相位的相对改变量表达式.

$$\Delta\Phi/\Phi = \Delta l/l + \Delta n/n \quad (6)$$

根据光弹效应的作用机理,纤芯折射率的变化量如式(7)^[13].

$$\Delta n = -(\epsilon n^3/2)[(1-\mu)p_{12} - \mu p_{11}]\Delta l/l \quad (7)$$

式(7)中 ϵ 为光纤的轴向压力, μ 为光纤的泊松比系数, P_{11} 与 P_{12} 为光纤的普克耳斯系数(Pockels Coefficient).因此,任一路光的相位改变量与长度变化关系可用下面的表达式表示^[14]

$$\Delta\Phi = (\Delta l/l + \Delta n/n)2nl(2\pi/\lambda) = (0.79)2n(2\pi/\lambda)(\Delta l) \quad (8)$$

式(8)中, λ 为光波的波长.由式(8)可知,产生干涉两路光的相位差改变量的表达式为

$$\Delta\varphi = \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2 = (0.79)2n(2\pi/\lambda)\Delta(l_1 - l_2) = 3.16nL_0D(2\pi/\lambda)\Delta C \quad (9)$$

因此,该光纤弯曲传感器的灵敏度 S 可表达为

$$S = \Delta\varphi/\Delta C = 3.16nl_0D(2\pi/\lambda) \quad (10)$$

由式(10)可知,该传感器的灵敏度主要由光纤的折射率,钢尺的长度(即光纤带的长度),光纤带中两平行光纤的距离和激光的波长决定.在本实验装置中, $n=1.46$, $l_0=20$ mm, $D=125$ μ m, $\lambda=1550$ nm,由此可求得该传感器的理论灵敏度值为46.76 rad/ m^{-1} .由以上分析可知,在应用中增加传感光纤带的长度可大大提高该传感器的灵敏度,但同时也增加了该传感器的尺寸.

2 实验及结果分析

为了增加光纤折射率匹配液腔的可靠性和密封性,使用0.8 μ m步长的精密雕刻机制作了铝块腔体,将光纤折射率匹配液灌满整个腔体,用耐油性硅酮密封腔体各结合处,并用流动型密封剂涂满轴向振动光纤与腔体的粘合处以防止调制时匹配液流出腔体,保证光纤在PZT驱动下有位移时腔内的匹配液始终填充光纤断开处,使被调制的参考光的光强

基本上不产生变化,而在腔体外的光纤未处于绷紧状态且 PZT 的振幅最大只到微米量级,因此光纤在被 PZT 带动时不会受到应力而拉长,保证了光纤的长度和折射率不会因调制而产生变化。

实验中,首先记录下弯曲曲率为零时的信号波形,再用螺旋测微器调节光纤带曲率,并由示波器存储下不同 C 值下的干涉信号波形,如图 2。

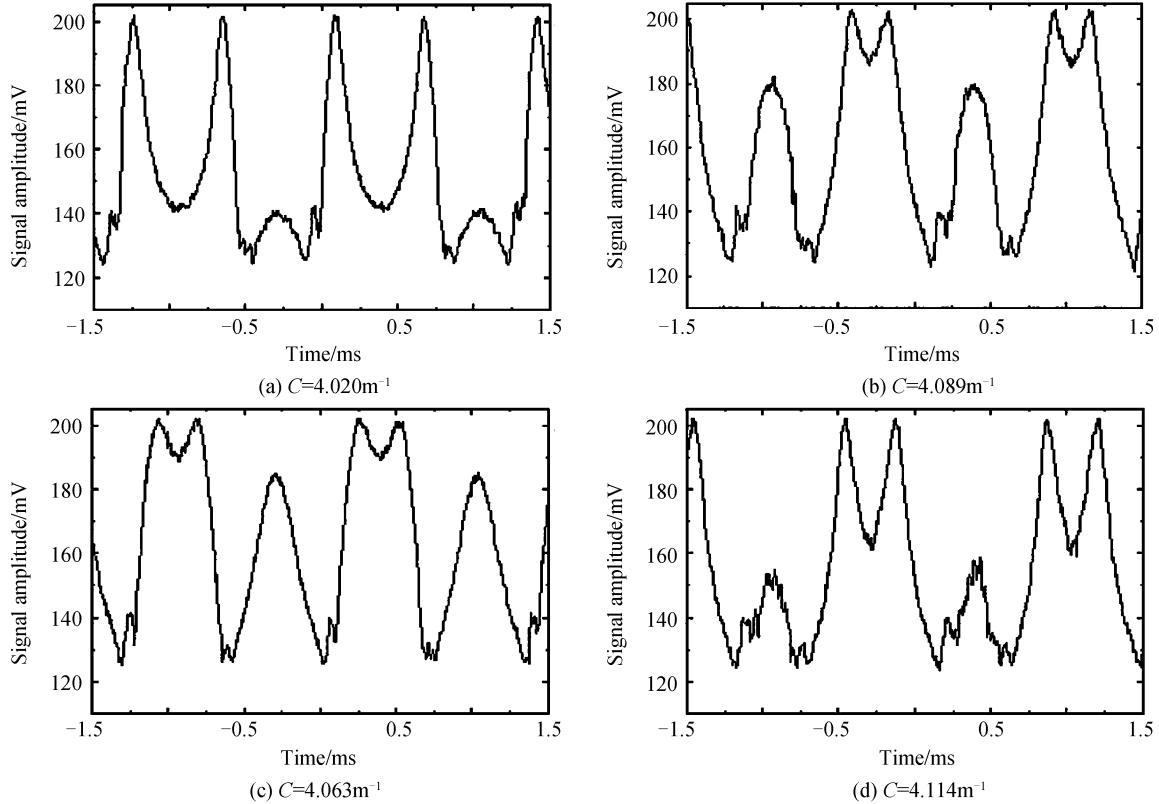


图 2 干涉信号实验曲线

Fig. 2 Experimental curve of interference signal

图 2 中的四组干涉信号曲线对应的曲率分别为: 4.020 m^{-1} 、 4.063 m^{-1} 、 4.089 m^{-1} 、 4.114 m^{-1} 。利用 Matlab 软件计算出这些信号的噪音约为 1.8 mV , 可得相应的信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 为 86。因而, 可知该传感器可探测的最小曲率为 0.004 m^{-1} , 相对与文献 [15] 报道的 0.036 m^{-1} 有较大的提高。通过观察示波器记录的信号波形的变化, 并通过计算可得干涉信号曲线以 $\Delta C = 0.134 \text{ m}^{-1}$ 为步长作周期变化, 每改变一个周期对其计数并用正负符号记录下改变的方向。

实验测试结果表明该光纤弯曲传感器具有很高的灵敏度, 微小的曲率改变都可以使干涉信号改变很多个周期。图 3 为曲率改变与干涉信号改变周期数 (即干涉条纹变化的数目) 的关系。由图 3 可求得该传感器实际灵敏度约为 43.96 rad/m^{-1} 。比较理论与实验所得的干涉信号改变周期数与光纤带弯曲曲率的关系, 两者基本吻合。但当曲率增加, 也即曲率半径减小时, 理论与实验存在一定的偏差。分析所存在偏差原因: 当曲率半径变得很小时, 光纤开始产生弯曲损耗, 且折射率与弯曲曲率的关系更接近于

文献 [16] 中提出的模型, 此时折射率与弯曲曲率不再是线性关系; 此外实验中光纤带所依附的钢带的半径变化与光纤带变化不完全一致及装配偏差也会导致误差 [17]。

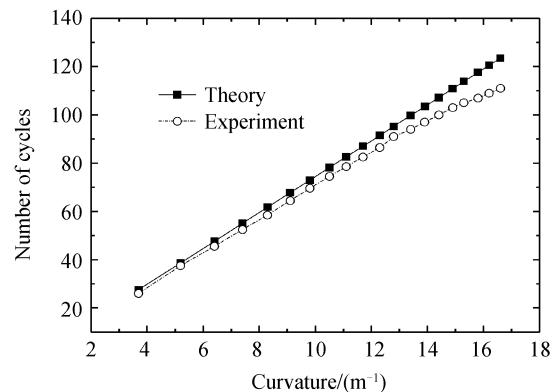


图 3 干涉信号改变周期数与光纤带弯曲曲率的关系

Fig. 3 The relationship between phase (one cycle is 2π radians) and the bending curvature

3 结论

本文研制了一种基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器。介绍了其传感原理和机械结构设计, 并根据

设计制作了实验平台. 实验测试结果表面, 该基于迈克尔逊干涉的光纤弯曲传感器灵敏度达 43.96 rad/m^{-1} , 分辨率为 0.004 m^{-1} . 总之, 该光纤弯曲传感器具有结构简单, 体积小, 重量轻及分辨率高的特点, 具有一定实际应用前景.

参考文献

- [1] SUI Hai-bo, SHI Bin, ZHANG Dan, *et al.* Review on fiber optic sensor Based monitoring techniques for geological and geotechnical engineering [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2008, **16**(1): 135-143.
隋海波, 施斌, 张丹, 等. 地质和岩土工程光纤传感监测技术综述[J]. *工程地质学报*, 2008, **16**(1): 135-143.
- [2] ZHAO Shi-gang, WANG Xue, YUAN Li-bo. Four core fiber based bending sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1001-1006.
赵士刚, 王雪, 苑立波. 四芯光纤弯曲传感器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1001-1006.
- [3] ZHAO Xiao-yun, GU Zheng-xian. Comparisons and applications of fiber Bragg grating and long period fiber grating [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2007, **26**(2): 0011-0014.
赵晓云, 顾铮先. 光纤 Bragg 光栅与长周期光纤光栅比较及传感应用[J]. *传感器与微系统*, 2007, **26**(2): 0011-0014.
- [4] ZHAO Hong-xia, BAO Ji-long, CHEN Ying. Bending sensing rules for long-period fiber gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1681-1685.
赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 长周期光纤光栅弯曲传感特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1681-1685.
- [5] DING Gui-lan, LIU Zhen-fu, CUI Yu-ming, *et al.* An all fiber optic accelerometer based on compliant cylinder[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(3): 340-343.
丁桂兰, 刘振富, 崔宇明, 等. 顺变柱体型全光纤加速度检波器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(3): 340-343.
- [6] YUAN An-juan, CHAI Chang. A study of optical fiber sensor based on the Michelson interference principle[J]. *Journal of Shanxi Datong University*, 2008, **24**(1): 29-31.
原安娟, 柴常. 基于迈克尔逊干涉原理的光纤传感器的研究[J]. *山西大同大学学报*, 2008, **24**(1): 29-31.
- [7] WEI Shi-hong, WANG Ming-qi. Research and design of optical fiber stress sensor using polarization maintaining fiber [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2006, **27**(6): 784-787.
韦世红, 王敏琦. 基于保偏光纤的光纤应力传感器研究与设计[J]. *光电技术应用*, 2006, **27**(6): 784-787.
- [8] LEI Yong-qing, LI Ya-juan, XU Xiao-feng, *et al.* A novel method to realize wider passband filter based on sampled FBGs Inscribed in PMF[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2434-2438.
雷永庆, 李亚娟, 徐晓峰, 等. 基于保偏光纤取样光栅的宽频带滤波方法[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2434-2438.
- [9] MENG Zhou, HU Yong-ming, CHEN Zhe, *et al.* The automatic measure instrument for the polarization parameters of 1 300 nm fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(11): 1002-1005.
孟洲, 胡永明, 陈哲, 等. 1 300 nm 波长光纤偏振参量自动测试仪[J]. *光子学报*, 1999, **28**(11): 1002-1005.
- [10] SUN Jian-hu, MA Teng-yun, WANG Xiao-bo, *et al.* Polarization compensation characteristics of the single photons transmission with Faraday Rotator Mirror[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(3): 528-531.
孙建虎, 马腾云, 王晓波, 等. 法拉第旋转镜用于补偿单光子偏振漂移的实验研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(3): 528-531.
- [11] KEYSEA A D, MARRONE M J, DAVIS M A. Polarisation-insensitive fibre optic Michelson interferometer [J]. *Electronics Letters*, 1991, **27**(6): 518-520.
- [12] CEKORICH A. Demodulator for interferometric sensors[C]. *SPIE*, 1999, **3860**: 338-347.
- [13] UTTERC D B, HOCKER G B. Fiber optic strain gauge[J]. *Applied Optics*, 1978, **17**(18): 2867-2869.
- [14] CRANCH G A, NASH P J. High-responsivity fiber-optic flexural disk accelerometers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2001, **18**(9): 1233-1243.
- [15] DONG Xin-yong, ZHAO Chun-Liu, NING Ding, *et al.* Temperature-independent bend sensor using chirp effect of fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2001, **30**(4): 425-428.
董新永, 赵春柳, 宁鼎, 等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的弯曲传感[J]. *光子学报*, 2001, **30**(4): 425-428.
- [16] WANG Xue-zhen, BIAN Bao-min, JI Yun-jing, *et al.* Theoretical model modify of bending loss of mono-mode fiber [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6): 819-823.
王学珍, 卞保民, 纪运景, 等. 单模光纤弯曲损耗理论模型的修正[J]. *光子学报*, 2006, **35**(6): 819-823.
- [17] DONG Xin-yong, ZHAO Ying, GUAN Bai-ou, *et al.* Experimental research of fiber grating circum flexion sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(9): 807-809.
董新永, 张颖, 关柏鸥, 等. 光纤光栅曲率传感的实验研究[J]. *光子学报*, 2000, **29**(9): 807-809.

Optical Fiber Bending Sensor Based on Michelson Interferometer

LIN Qiao, CHEN Liu-hua, LI Shu, WU Xing-kun

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel high sensitivity fiber optic bending sensor based on Michelson interferometry was developed. The sensing probe utilizes a fiber ribbon affixed onto an elastic structure to generate interference signals as a function of curvature. Further a micro-cavity filled with refractive index matching liquid was added to the optical path length and modulated in audio frequency to modify interference signal, which was demodulated using phase generated signal carrier technology to obtain a highly sensitive detection of curvature change. Experimental measurement of prototype shows that the fiber optic bending sensor can achieve a sensitivity of 43.96 rad/m^{-1} and a high resolution of 0.004 m^{-1} .

Key words: Optical fiber bending sensor; Michelson interferometry; Phase Generated Carrier (PGC); Refractive index matching liquid