

基于涡旋光的光纤干涉型应力传感器

常会敏, 傅海威*, 王帅, 尤涌涛, 雍振, 李晓莉

(西安石油大学 理学院, 西安 710065)

摘要: 为了进一步增大光纤应力传感的测量范围, 设计了一种基于涡旋光束与平面波光束干涉的光纤马赫-曾德尔干涉型(MZI)应力传感器, 提出一种新型应力解调模型。利用主成分分析法提取了叉状干涉图样集的主要特征, 得到两光束间相位差与其对应干涉图样对于主要特征的相关系数之间的关系, 并根据应力-相位差关系, 进而得出了应力与相关系数之间的关系; 搭建了基于涡旋光束与平面波光束干涉的应力传感实验系统, 研究了系统的应力传感响应特性。实验结果表明: 该传感器的应力响应灵敏度为 0.25694 rad/MPa , 最大应力测量量程为 $3392 \mu\epsilon$ 。

关键词: 涡旋光束; 平面波光束; 叉形图; 主成分分析法; 马赫-曾德尔干涉

中图分类号: TH744 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2022)02-0071-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.02.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Optical fiber interferometric stress sensor based on vortex light

CHANG Huimin, FU Haiwei*, WANG Shuai, YOU Yongtao, YONG Zhen, LI Xiaoli

(School of Science, Xi'an Shiyu University, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to further increase the measurement range of optical fiber stress sensor, an optical fiber Mach-Zehnder interference (MZI) stress sensor based on the interference of vortex beam and plane wave beam is designed, and a new stress demodulation model is proposed. The principal component analysis method is used to extract the main features of the fork interference pattern set, and the relationship between the phase difference between the two beams and the correlation coefficient of the corresponding interference pattern for the main features is obtained. According to the stress phase difference relationship, the relationship between the stress and the correlation coefficient is obtained, a stress sensing experimental system based on the interference between vortex beam and plane wave beam is built, and the stress sensing response characteristics of the system are studied. The experimental results show that the stress response sensitivity of the sensor is 0.25694 rad/MPa , and the maximum stress measurement range is $3392 \mu\epsilon$.

Key words: vortex beam, plane wave beam, fork graph, principal component analysis, Mach-Zehnder interferometer

0 引言

光纤传感器具有质量轻、体积小、灵敏度高和易于复用形成分布式测量等优点, 广泛应用于桥梁建筑、管道泄漏和深水隔水管等工程项目中测量应力、应变等物理量^[1-3]。研究人员提出了多种类型的光纤应

力传感器^[4-11], 如武汉理工大学王洪海等人^[10]提出一种基于单模-多模-单模拉锥结构的光纤布喇格光栅传感器, 该传感器对应变的测量范围为 $0 \sim 960 \mu\epsilon$; MARTA S 等人^[11]提出一种基于法布里-珀罗的应变传感器, 腔体由在 2 段标准的单模光纤之间拼接 1 个新的高级硅管而形成, 该传感器测量的最大应变量程为 $2500 \mu\epsilon$ 。但是, 这些传感器通常采用普通高斯光源, 并且受结构本身的限制, 无法测量很大的应变。

近年来, 随着涡旋光的不断发展, 有学者提出了基于涡旋光的光纤传感器。研究人员根据涡旋光与高斯光干涉图样的螺旋特征和叉状特征, 提出了几种不同类型的干涉型光纤传感器。CHEN L X 等人^[12]提出了一种基于涡旋光与高斯球面波干涉的新型应变传感方法, 通过数字图像处理技术识别由应变引起的螺

收稿日期: 2021-10-28。

基金项目: 陕西省科学技术项目(No.2019GY-176)资助; 西安石油大学研究生创新与实践能力的培养项目(No.YCS20212132)资助。

作者简介: 常会敏(1996—), 女, 陕西延安人, 西安石油大学硕士研究生, 主要研究方向为光纤涡旋光场调控分析、基于涡旋光的光纤干涉型应力传感器、涡旋光在光纤 SPR 传感中的性能分析等, 参加了西部光子学会议及陕西省科研项目。

* 通信作者: 傅海威(1966—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为光电子学及光纤传感技术。



旋图像的旋转角度,理论上可实现高分辨率的应变测量,但没有开展实验研究。LV R 等人^[13]提出了一种基于涡旋光束与平面波光束干涉的光纤应力传感器,采用主成分分析(PCA)法提取了干涉图样集的 2 个主要特征,并根据不同相位差对应的干涉图样相关系数组的变化规律,实现解调过程,但该解调过程复杂,且应力测量量程小。本文在理论分析的基础上提出一种基于涡旋光束与平面波光束干涉的光纤马赫-曾德尔干涉型(MZI)应力传感系统,并设计一种新型的应力解调模型,在减少计算量的同时进一步增大测量量程。

1 传感系统结构

基于涡旋光束与平面波光束干涉的应力传感系统设计如图 1 所示。光源选择波长为 632.8 nm 的氦氖激光器,经 1:1 分束镜后,准直激光分为参考光路和传感光路:参考光路经焦距为 240 mm 的透镜耦合进入长为 3 m 的单模光纤,经光纤准直镜(74UV-FC)出射,之后经过偏振器、1/4 波片和涡旋波片(VR1-633)得到一阶涡旋光;传感光路经焦距为 240 mm 的透镜耦合进入长为 3 m 的单模光纤,单模光纤固定于拉力测试台,经光纤准直镜(74UV-FC)出射后,通过偏振器得到平面波光束。最后,参考光与传感光经合束镜干涉,电荷耦合元件(CCD)采集干涉图样。

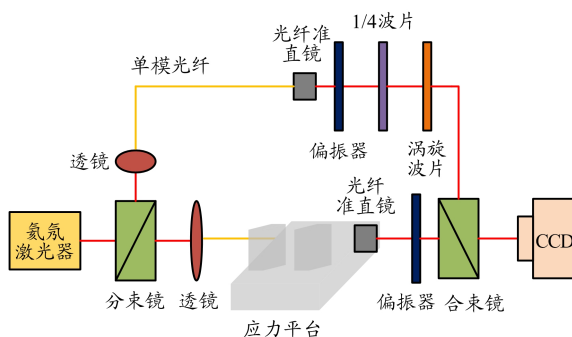


图 1 基于涡旋光束与平面波光束干涉的应力传感系统

系统中,涡旋波片是该实验中的关键光学器件,由具有双折射特性的液晶聚合物制作,是一种特殊的半波片,它具有一致的延迟量,但快轴方向围绕圆心连续变化。将入射的高斯光束转变成环形光束后生成矢量偏振光束和涡旋光束这 2 种特殊光束,只有当入射的光为圆偏振光时,涡旋波片才会将入射的平面波转换为涡旋波。本文实验将采用波长为 633 nm、拓扑荷为 1 的涡旋半波片来产生一阶涡旋光。

2 传感系统原理

2.1 涡旋光与平面波的干涉

涡旋光是一种具有螺旋相位波前的特殊光场,相位分布中含有 $\exp(i l \theta)$ 项, θ 为旋转方位角, l 为拓扑荷数。当涡旋光沿 Z 轴正方向传播时,其电场复振幅 E_1 在 $Z=0$ 的观测面^[14]可表示为

$$E_1(X, Y) = E_0 \exp(i l \theta + i \varphi) \quad (1)$$

其中, E_0 为光束振幅, φ 为附加的相位差。

当带有倾斜波前的平面波沿 Z 轴方向传播时,其电场复振幅 E_2 在 $Z=0$ 的观测面^[14]可表示为

$$E_2(X, Y) = E_0 \exp(i k X \sin \alpha) \quad (2)$$

其中, X 为直角坐标系分量, k 为波数, α 为 k 与 Z 轴正方向的夹角。

若 2 束光在 $Z=0$ 的平面上发生干涉,根据 $E = E_1 + E_2$,则干涉后的电场 E 表达式为

$$E = E_0 \exp(i l \theta + i \varphi) + E_0 \exp(i k X \sin \alpha) \quad (3)$$

根据 $I = E E^*$,则干涉后的光强分布 I 为

$$I = 2 + 2 \cos(l \theta + \varphi - k X \sin \alpha) \quad (4)$$

2.2 图像处理及解调原理

基于涡旋光与平面波干涉图样的特殊性,本文理论分析了相位差 φ 从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、间隔 20° 的 19 张叉形干涉图,列举了其中的 8 张如图 2 所示。可以看出,随着相位差的改变,叉状干涉图在分叉点附近发生变化。本文采用 PCA 图像处理技术^[15]提取叉状干涉图样的变化特征。

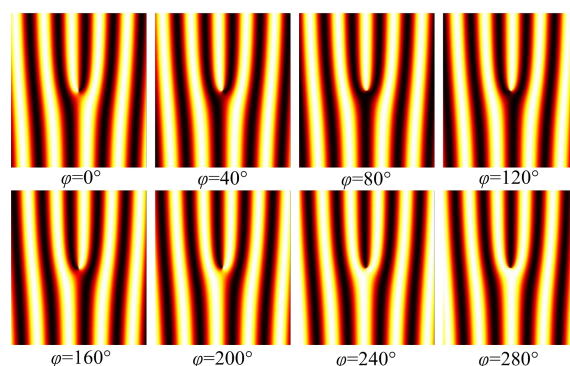


图 2 不同相位差对应的干涉图样

PCA 图像处理技术流程如下:首先,根据式(1)计算出从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、间隔 20° 的 19 张叉形干涉图的灰度值($n \times n$ 的矩阵),将每张干涉图样的灰度值按列逐次排序方式,转换为具有 $n^2 \times 1$ 维的列向量;其次,将得到的 19 个列向量看作一个模式集,表示为 $\Phi_{n^2 \times m} = [\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \dots, \Phi_m]$,其中 $m=19$ 是模式总数;再次,计算出模式集 Φ 的协方差矩阵 $C_{m \times m}$ 的特征值 W 和特征向量

$V_{m \times 1}$,按特征值的大小将对应的特征向量降序排列。由于其中2个特征向量(V_1 和 V_2)对应的特征值比其它特征值大几个数量级,可以认为这2个特征向量包含了确定干涉图样主要特征的全部信息。模式集的2个主要特征模式(U_1 、 U_2)可以通过式(5)、式(6)来定义。

$$U_1 = \Phi V_1 \quad (5)$$

$$U_2 = \Phi V_2 \quad (6)$$

将这2个主要特征数据升维输出为二维图像,如图3所示,这2种图样可以认为是模式集的主要特征图样。

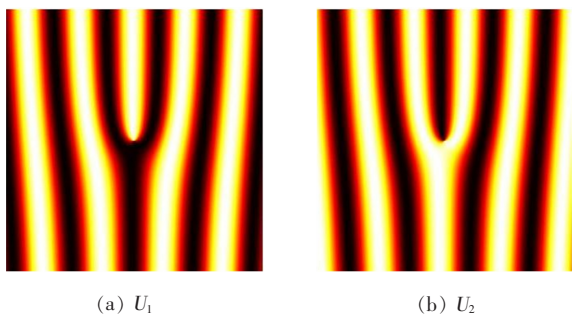


图3 主要特征的图像表示

最后,通过式(7)可以分析具有任意相位差 φ 的叉状干涉图样 Φ_o 与2个主要特征的相关系数 Ω_o 。

$$\Omega_o = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1^T & U_2^T \end{bmatrix} \Phi_o \quad (7)$$

其中, o 是图样序号, ω_1 和 ω_2 分别为干涉图样与 U_1 、 U_2 对应的相关系数。

模式集中19个干涉图样经PCA处理后,将 Ω_o 绘制在 ω_1 - ω_2 平面上,如图4所示。随着相位差的等幅度增加, Ω_o 点的位置围绕 ω_1 - ω_2 平面的原点按顺时针方向等幅度旋转,据此理论分析出 U_1 对应的 ω_1 与相位差呈三角函数关系,结果如图5所示。因此,当 ω_1 的周期及所在区间的单调性确定时,可推断

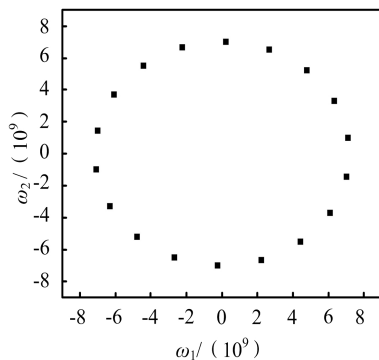


图4 主要特征的相关系数之间的关系

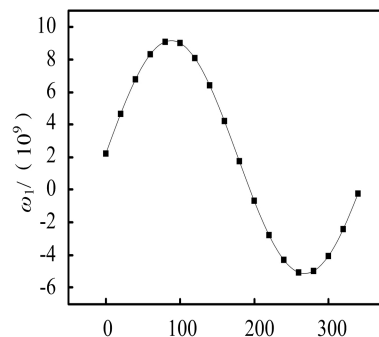


图5 相关系数 ω_1 与相位差的关系

出传感光路与参考光路之间的相位差。

当在光纤上施加应力时,会使得传输光的相位发生延迟,相位延迟表示为

$$\Delta\varphi = n \frac{2\pi}{\lambda} L \{ 1 - 0.5n^2 [(1-\theta)P_{12} - \theta P_{11}] \} \frac{\sigma}{E} \quad (8)$$

其中, λ 是光源的波长, L 是应变下光纤的长度, n 是光纤模式的有效折射率, P_{11} 和 P_{12} 是光纤的弹性光学系数, θ 是泊松比, E 是弹性模量, σ 是应力。由式(8)可知,相位延迟与应力之间存在线性关系,即应力与相关系数 ω_1 呈周期性的三角函数分布。

3 实验研究

本文搭建传感系统(图1)研究应力传感响应特性。传感光路中的光纤被固定于拉力平台,从10.18 MPa施加应力,以步长4.07 MPa增加到50.88 MPa,即应变测量的最大值为3392 $\mu\epsilon$,CCD采集不同应力对应的11张干涉图。实验中采集到的相关图像如图6所示。

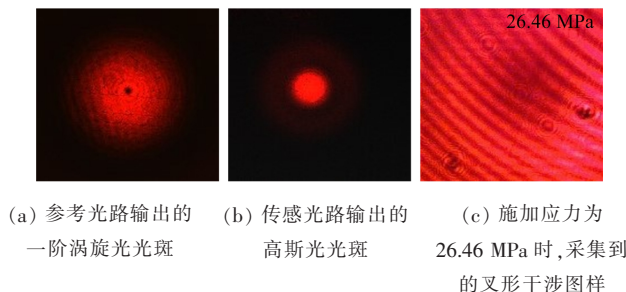


图6 实验中采集到的相关图像

本文根据2.2节中的分析过程处理实验中采集的分叉干涉图,将采集到的11张干涉图看作一个模式集,计算得到该模式集的主要特征,根据式(5)得出每张干涉图片对于主要特征的相关系数 ω_1 ,得到叉形图相关系数 ω_1 与应力之间的关系如图7所示。可以看出,应力与相关系数 ω_1 之间呈周期性的三角函数分布,通过三角函数曲线拟合,拟合度 R^2 为0.9469。为获得高质量图像从而提高拟合效果,可使用更高精度的CCD设备采集干涉图样。

拟合得到的解调模型的数学表达式为

$$y = y_0 + A \sin(\pi \frac{x - x_c}{\omega}) \quad (9)$$

其中, y 为拟合之后叉形图像主要特征的相关系数, x 为应力, y_0 、 A 、 ω 、 x_c 均为已知常数, $y_0 \approx 0.39813$, $A \approx 7.03067$, $\omega \approx 12.23598$, $x_c \approx -4.09683$ 。本文定义:

$$(y - y_0) / A = \beta \quad (10)$$

$$\sin(\pi \frac{x - x_c}{\omega}) = \sin \alpha \quad (11)$$

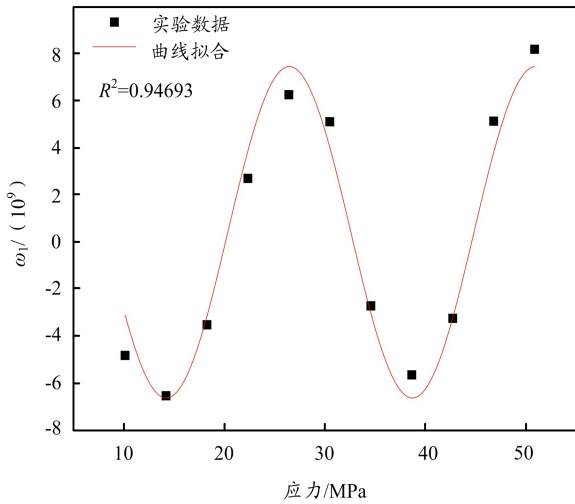


图7 实验中相关系数 ω_l 与不同应力的关系

根据式(10)、式(11)可求得

$$\beta = \sin \alpha \quad (12)$$

根据三角函数的性质,已知 β 的值及 β - α 曲线的形状,则 α 的值可以表示为

$$\begin{cases} \alpha = 2k\pi + \arcsin \beta, -\frac{\pi}{2} + 2k\pi \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} + 2k\pi (\text{递增区间}) \\ \alpha = (2k+1)\pi - \arcsin \beta, \frac{\pi}{2} + 2k\pi < \alpha < \frac{3}{2}\pi + 2k\pi (\text{递减区间}) \end{cases} \quad (13)$$

其中, k 为整数,即从 $\alpha=0$ 开始经过的周期数。

根据图7判断出任意位置处 α 的周期及所在的单调区间,代入式(13)即可计算出各点的 α 值,得出 α 与应力之间呈线性关系,如图8所示,拟合曲线可表示为

$$\alpha = 7.21344 + 0.25694x \quad (14)$$

拟合结果表明,采用该相位解调法,可实现对应力测量的灵敏度为 0.257 rad/MPa。

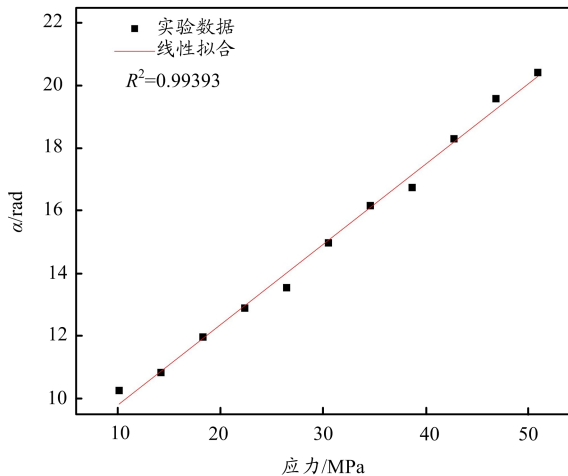


图8 α 与不同应力之间的关系

4 结束语

本文设计了一种基于涡旋光束与平面波光束干涉的应力传感系统,并提出了一种新型的应力解调模型,通过仿真和实验验证了该传感器实现大量程监测的可行性。实验中搭建了基于涡旋光的干涉型传感系统,采集不同应力对应的叉状干涉图,采用 PCA 法提取叉状干涉图像的主要特征,分析得到了应力与图像的相关系数呈周期性的三角函数分布;通过进一步的解调计算,又得到与应力相关的线性关系。实验结果表明:该传感系统的灵敏度为 0.257 rad/MPa,最大测量量程为 3392 $\mu\epsilon$;除了应力/应变外,其它能够改变 MZI 中相位延迟参数的物理量也可以用此方法测量。

参考文献:

- [1] 林金海,潘锋,李茂东,等. 光纤传感器研究[J]. 自动化仪表,2020,41(1):37-41.
- [2] 王庆波,宾超. 光纤传感器的发展综述[J]. 科技视界,2016(27):470-471.
- [3] 陈郁芝. 新型结构的光纤表面等离子体共振传感器及其生化应用研究[D]. 深圳:深圳大学,2017:10-23.
- [4] 廖延彪,黎敏. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [5] FABIO M, FILIPPO B, GALATI N, et al. Distrited strain measurement in steel bridge with fiber optic sensors: validation through diagnostic load test[J]. Journal Perform Constr FAC, 2008, 22: 264-273.
- [6] LIU S P, SHI B, GU K, et al. Fiber-optic wireless sensor network using ultra-weak fiber Bragg gratings for vertical subsurface deformation monitoring [J]. Natural Hazards, 2021, 109(3): 1-17.
- [7] 徐健. 应用于深水隔水管应力监测的光纤传感技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2018.
- [8] ZHOU J, WANG Y, LIAO C, et al. Intensity-modulated strain based on fiber in-line mach-zehnder interferometer [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(5): 508-511.
- [9] SUN H, YANG S, ZHANG X, et al. Simultaneous measurement of temperature and strain or temperature and curvature based on an optic fiber Mach-Zehnder interferometer[J]. 2015, 340: 39-43.
- [10] 王洪海,彭思敏,桂鑫,等. 基于单模-多模-单模拉锥结构的高灵敏度光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 激光与光电子学进展,2019,56(13):132802-132806.
- [11] MARTA S, PAULO R, BIERLICH J, et al. Fabry-Perot cavity based on silica sensing at high temperature[J]. Optics Express, 2015, 23(13): 16064-16070.
- [12] CHEN L X, LI Y. Application of optical fiber sensor based on optical vortex to high resolution strain measurement [C]//SPIE. Advanced Sensor Systems&Applications VI. Bellingham: SPIE, 2014: 9240-9243.
- [13] LV R, QIU L, HU H, et al. The phase interrogation method for optical fiber sensor by analyzing the fork interference pattern [J]. Applied Physics B, 2018, 124(2): 2-6.
- [14] 李诺伦. 基于涡旋光的外差干涉微位移测量研究[D]. 山西:中北大学,2021.
- [15] 高宏斌,侯杰,李瑞光. 基于核主成分分析的数据流降维研究[J]. 计算机工程与应用,2013,49(11):105-109.