

轨道角动量模间干涉的少模光纤温度传感研究

肖悦娱*, 汤莹, 朱朝晖

上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200444

摘要 提出了一种基于图像探测的轨道角动量(OAM)模间干涉型少模光纤温度传感器,研究了基于OAM模间干涉的少模光纤传感器的传感机理和解调原理,并对传感器的传感性能和抗干扰能力进行了分析。结果表明,利用OAM模式携带的相位信息,可直接通过处理光纤输出端的干涉图像获得温度变化,且解调结果和模间相位差的关系是线性的。同时传感器的温度灵敏度独立于光纤模式自身的强度变化,不易受到外界光噪声的影响,具有比基于线偏振模的模间干涉传感器更好的稳定性和可靠性。

关键词 光纤光学; 少模光纤; 轨道角动量; 模间干涉; 温度传感

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0906003

Few-Mode Fiber Temperature Sensors Based on Modal Interference Between Orbital Angular Momentum Modes

Xiao Yueyu*, Tang Ying, Zhu Zhaohui

Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200444, China

Abstract A temperature sensor based on orbital angular momentum (OAM) modal interference is proposed, which demodulates the information using the image detection method. The sensing mechanism and demodulation principle of the sensor are studied, and the sensing performance and immunity to light-noise are analyzed. The simulation results show that the temperature can be demodulated by a single image using the phase information carried by the OAM modes. Moreover, the demodulated result is linearly dependent on the modal phase difference. The temperature sensitivity of the sensor is immune to the fluctuation of the modal intensity and external light-noise. The proposed OAM modal interference sensor has better stability and reliability than conventional modal interference sensor based on LP modes.

Key words fiber optics; few-mode fiber; orbital angular momentum; modal interference; temperature sensing

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 280.4788

1 引言

少模光纤(FMFs)可以传导几个相互独立的正交模式,每个模式都能作为一个信道,因此基于少模光纤的模式复用(MDM)技术有望提升下一代光

纤通信系统的传输容量^[1-6]。FMFs除了可以用于高速光通信,在光纤传感器方面也有独特的优势。FMFs传导的模式较少,可以得到更为均匀整齐的干涉光谱。2001年,印度理工学院的Kumar等^[7]利用圆芯四模光纤中的LP₀₁和LP₀₂模式干涉搭建了

收稿日期: 2020-08-12; 修回日期: 2020-09-18; 录用日期: 2020-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(61107075)

*E-mail: yyx@staff.shu.edu.cn

偏振不敏应力传感器。2014 年,新加坡学者 Huang 等^[8]利用 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的模式,提出了一种基于高掺锗 FMF 的温度传感器。同年,天津大学的张玉龙等^[9]提出了一种利用七芯 FMF 作为传感单元的位移传感器,其灵敏度为 -61.17 pm/μm。厦门大学的陆晨旭等^[10]提出了一种具有特征波长的少模光纤传感器,能对应变、温度、弯曲等进行高灵敏度、多参量的测量。

对少模光纤传感器的解调方法通常是在少模光纤的出射端熔接一段单模光纤,通过分析单模光纤的干涉谱,获得外界物理量的变化。光谱扫描法实验设备价格昂贵,只适合在实验室进行。另一类检测方法是图像探测法,不同模式在光纤中的传播常数不同,导致出射光能量空间分布不同,因此通过对输出光场能量分布变化的分析,也可获得外界物理量的变化^[11]。传统的 LP 模间干涉图像比较容易受到光纤自身光强变化和外界光照的影响,同时干涉光强与模间相位差之间的关系是非线性的,测量范围有限。

轨道角动量模式,因其携带相位因子 $\exp(jl\theta)$, 在高灵敏度传感和高精度测量中具有潜在应用价值,近年来吸引了科学家们浓厚的兴趣^[12-13], 其中 l 为拓扑荷数, θ 为相位。基于光纤集成链路产生 OAM 光束的方法包括光纤耦合转换法^[14]、光纤光栅转换法^[15] 和光波导器件转换法^[16] 等。本文提出一种基于图像探测的轨道角动量(OAM)模间干涉型少模光纤温度传感器。通过研究基于 OAM 模间干涉的少模光纤传感器的传感机理和解调原理,分析了传感器的传感性能和抗干扰能力。结果表明,基于 OAM 模间干涉的传感器具有比线偏振模模间干涉传感器更好的稳定性和更强的抗干扰能力。

2 基于 OAM 模间干涉的少模光纤传感器原理

对于弱导结构的圆芯少模光纤(以 y 偏振为例), LP₁₁ 和 LP₂₁ 模的电场在柱坐标系下可表示为

$$\begin{cases} \psi_{11}^{\text{even}}(r, \theta, z) = f_{11}(r) \cos \theta \exp(-j\beta_{11}z) \\ \psi_{11}^{\text{odd}}(r, \theta, z) = f_{11}(r) \sin \theta \exp(-j\beta_{11}z) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{21}^{\text{even}}(r, \theta, z) = f_{21}(r) \cos 2\theta \exp(-j\beta_{21}z) \\ \psi_{21}^{\text{odd}}(r, \theta, z) = f_{21}(r) \sin 2\theta \exp(-j\beta_{21}z) \end{cases}, \quad (2)$$

式中: $f(r)$ 为沿 r 方向的光场分布; β_{11} 和 β_{21} 分别为两模式的传播常数(对于弱导光纤,奇模和偶模是简并的)。 β_{11} 和 β_{21} 可通过特征方程求得。

$$\frac{U_{x1} J_{x+1}(U_{x1})}{J_x(U_{x1})} = \frac{W_{x1} K_{x+1}(W_{x1})}{K_x(W_{x1})}, \quad x=1, 2, \quad (3)$$

式中: $J(\cdot)$ 为第一类柱贝塞尔函数; $K(\cdot)$ 为修正的柱贝塞尔函数; U_{x1} 和 W_{x1} 分别为 LP₁₁ 和 LP₂₁ 模在纤芯中和在包层中的横向传播常数,表达式为

$$U_{x1} = a \sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta_{x1}^2}, \quad (4)$$

$$W_{x1} = a \sqrt{\beta_{x1}^2 - k_0^2 n_2^2}, \quad (5)$$

其中 a 为光纤纤芯的半径, k_0 为自由空间波数, n_1 和 n_2 分别为纤芯和包层的折射率。从(1)式和(2)式可知,根据欧拉公式,如果在 LP₁₁ 模和 LP₂₁ 的奇模和偶模之间引入 $\pi/2$ 的相位差,则能产生拓扑荷数为 1 或 2 的轨道角动量模式 OAM₁ 和 OAM₂, 可表示为

$$\psi_{+1} = \psi_{11}^{\text{even}} + j\psi_{11}^{\text{odd}} = f_{11}(r) \exp(j\theta) \exp(-j\beta_{11}z), \quad (6)$$

$$\psi_{+2} = \psi_{21}^{\text{even}} + j\psi_{21}^{\text{odd}} = f_{21}(r) \exp(j2\theta) \exp(-j\beta_{21}z), \quad (7)$$

其幅度和相位分布如图 1 所示。

当在少模光纤入射端同时激起 OAM₁ 和 OAM₂ 时,光纤出射端光强的空间分布为

$$I(r, \theta) = (A_1 \psi_1 + A_2 \psi_2)(A_1 \psi_1 + A_2 \psi_2)^* = |A_1|^2 f_{11}^2(r) + |A_2|^2 f_{21}^2(r) + 2A_1 A_2 f_{11}(r) f_{21}(r) \cos(\theta + \Delta\beta L), \quad (8)$$

其中 A_1 和 A_2 是 OAM₁ 和 OAM₂ 两模式的幅度, $\Delta\beta = \beta_{11} - \beta_{21}$ 是两模式的相位差, L 为少模光纤的长度。(8)式由两部分组成,一部分是中心对称的,另一部分与方位角 θ 相关,且出射端光强的角向分布与两模式的相位差 $\Delta\beta L$ 有关。设 $A_0 = A_1 = 1$, $n_1 = 1.45$, $n_2 = 1.44$, $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $a = 7.5 \text{ μm}$, 模拟 $\Delta\beta L$ 分别取 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 时光纤输出端的干涉强度分布,如图 2 所示。从图中可以看出,当 $\Delta\beta L$ 变化时,出

射端光强的分布是围绕圆心(即 OAM 模式的奇点)旋转的,且旋转的角度和 $\Delta\beta L$ 的关系是线性的。

3 基于图像检测的传感器解调

从图 2 中可以看出,由于 OAM 模式的中心为奇点,因此很容易确定干涉光强分布的中心 O 。利用图像检测法获得的图像,任取以 O 为圆心,半径为 $r=r_0$ 的圆弧上的光强,与一个确定函数 $\cos(\theta+\varphi_0)$ 进行积分可得

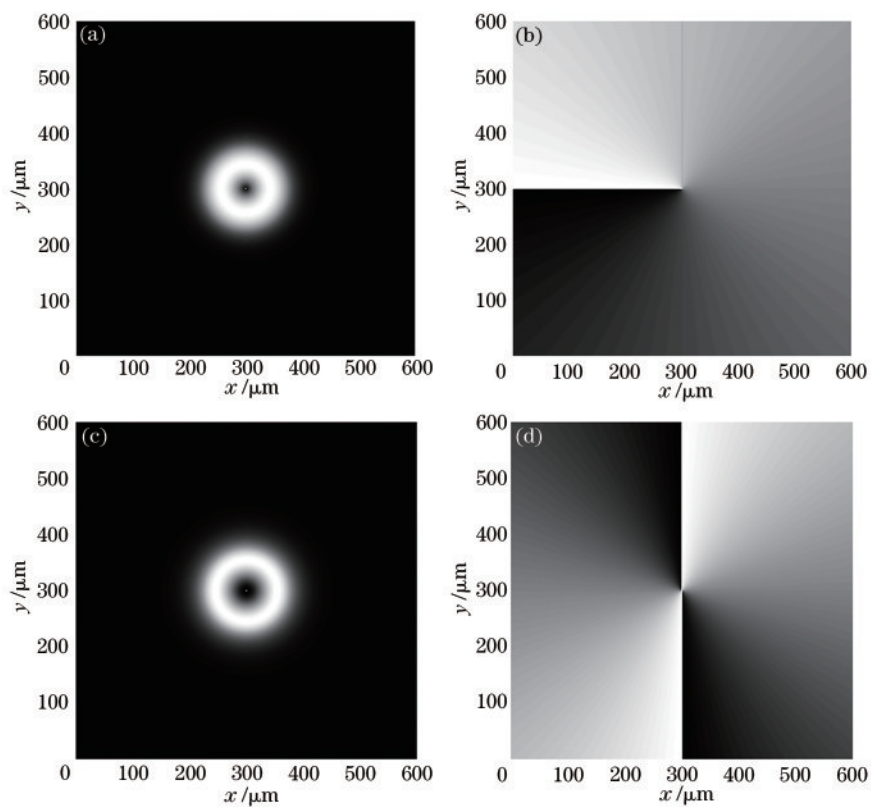


图1 OAM₁和OAM₂的幅度和相位分布。(a) OAM₁的幅度;(b) OAM₁的相位;(c) OAM₂的幅度;(d) OAM₂的相位
 Fig. 1 Amplitude and phase distributions of the OAM₁ and OAM₂ modes. (a) Amplitude of OAM₁; (b) phase of OAM₁; (c) amplitude of OAM₂; (d) phase of OAM₂

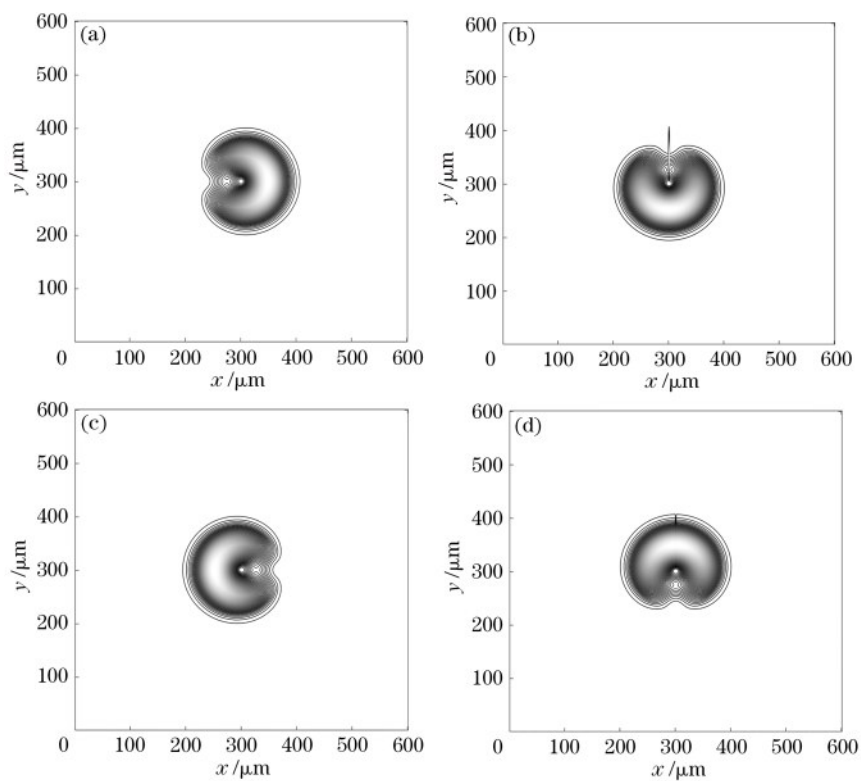


图2 不同相位差时光纤输出端的干涉强度分布。(a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°
 Fig. 2 Intensity distributions of the output of the fiber with different phase differences. (a) 0°; (b) 90°; (c) 180°; (d) 270°

$$F(r_0) = \int_0^{2\pi} I(r_0, \theta) \cos(\theta + \varphi_0) d\theta = \int_0^{2\pi} \left[|A_1|^2 f_{11}^2(r_0) + |A_2|^2 f_{21}^2(r_0) \right] \cos(\theta + \varphi_0) d\theta + \int_0^{2\pi} 2A_1 A_2 f_{11}(r_0) f_{21}(r_0) \cos(\theta + \Delta\beta L) \cos(\theta + \varphi_0) d\theta = 2\pi A_1 A_2 f_{11}(r_0) f_{21}(r_0) \cos(\Delta\beta L - \varphi_0), \quad (9)$$

当 $\varphi_0 = \Delta\beta L$ 时, $F(r_0)$ 具有最大值, 即

$$F(r_0)_{\max} = 2\pi A_1 A_2 f_{11}(r_0) f_{21}(r_0). \quad (10)$$

当温度发生变化时, 由于光纤材料的热膨胀效应, 光纤的长度 L 会发生变化, 同时, 光纤存在热光效应, 因此模式的有效折射率也会发生变化。二氧化硅光纤的热膨胀系数是 $5.6 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1[17]}$, 热光系数是 $8.0 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1[18]}$ 。热光系数比热膨胀系数大一个数量级, 因此可忽略热膨胀系数。

根据热光效应, 当光纤所处温度从 T_0 变为 T 时, 折射率的变化可表示为

$$n(T) = n(T_0) \left[1 + \eta(T - T_0) \right], \quad (11)$$

其中 η 为热光系数。利用模式求解的数值工具, 可以计算出不同温度时, OAM₁ 和 OAM₂ 的有效折射率值 n_{eff} 和相位差, 如表 1 所示 ($\lambda = 1550 \text{ nm}$, $L = 10 \text{ cm}$)。

表 1 OAM₁ 和 OAM₂ 的模间相位差与温度的关系

Table 1 Relationship between the phase differences of OAM₁ and OAM₂ and temperatures

Temperature / $^\circ\text{C}$	$n_{\text{eff}1}$	$n_{\text{eff}2}$	Phase difference / π
20	1.446238	1.443376	1.2156
40	1.446398	1.443537	1.1857
60	1.446558	1.443697	1.1558
80	1.446719	1.443858	1.1259
100	1.446878	1.444018	1.0960

从表 1 中可以看出, 随着温度的升高, OAM₁ 和 OAM₂ 的有效折射率都会增加, 但是 OAM₂ 的增加

量更大, 因此 $\Delta\beta L$ 随着温度的增加而减少。

图 3 为用 (9) 式和 (10) 式的解调方法解调得到的相位差和温度的关系。数值仿真表明, 只要通过图像检测法检测出光纤出射端光强分布的变化, 就能解调出相位差, 从而测量出外界温度相应的变化。测量的精度取决于图像的分辨率。

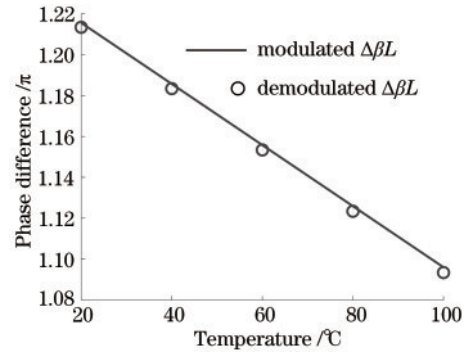


图 3 解调相位差与温度的关系

Fig. 3 Relationship between the demodulated phase difference and the temperature

4 OAM 模式干涉的少模光纤温度传感器性能分析

4.1 灵敏度和动态范围分析

常用的基于图像检测法的光纤模间干涉型传感器一般采用 LP₀₁ 和 LP₁₁ 的干涉, 或者 LP₀₁ 和 LP₀₂ 的干涉。以 LP₀₁ 和 LP₀₂ 的模间干涉为例, 光纤输出端的干涉光强为

$$I(r, \theta) = (A_1 \psi_1 + A_2 \psi_2)(A_1 \psi_1 + A_2 \psi_2)^* = |A_1|^2 f_{01}^2(r) + |A_2|^2 f_{02}^2(r) + 2A_1 A_2 f_{01}(r) f_{02}(r) \cos(\Delta\beta L), \quad (12)$$

从 (12) 式可以看出, 两模式相位差的变化将改变输出端任意点的光强。设 $r = 0$, 其温度灵敏度为

$$S = \left. \frac{dI}{dT} \right|_{r=0} = -2A_1 A_2 f_{01}(0) f_{02}(0) \sin(\Delta\beta L) L \cdot \frac{d\Delta\beta}{dT}. \quad (13)$$

从 (13) 式可知, 温度灵敏度与两个模式的幅度、选取的监测点以及初始的模间相位差有关。对于给定的传感器长度而言, 初始相位差与初始温度有关, 因此不同的温度范围, 传感器具有不同的灵敏度。当初始的模间相位差 $\Delta\beta L = n\pi$ 时, 传感器的温度灵敏度为 0。此外, 光纤中模式的强度很难保持稳定, 会影响传感器灵敏度的稳定性。

对于角动量模式干涉的模间干涉传感器, 相位差是通过 (9) 式和 (10) 式进行解调的, 其温度灵敏度为

$$S = L \cdot \frac{d\Delta\beta}{dT}, \quad (14)$$

由此可知温度灵敏度和光强、初始相位差均无关系。

由于灵敏度和初始相位差无关, 基于 OAM 模间干涉的传感器有更大的线性响应范围, 图 4 给出

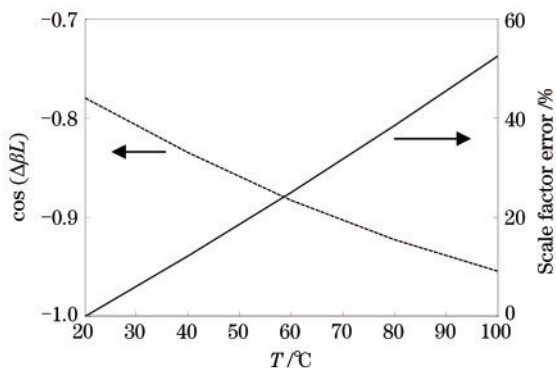


图 4 LP 模间干涉传感器的输出和灵敏度误差与温度的关系
Fig. 4 Outputs and scale factor errors of the LP modal interference sensor versus temperatures

根据(13)式求得的灵敏度误差与表 1 所列温度的关系。从图中可以看出,在这个温度范围内,灵敏度误差可达 50%。而基于(9)式和(10)式进行解调的 OAM 模间干涉的传感器响应在此温度范围内是线性的(如图 3 所示),并且线性响应的范围理论上可以达到 $[0, 2\pi]$ 。

4.2 抗干扰性能分析

对于图像检测法解调的传感器而言,受到的干扰主要源于环境光照。图 5 给出环境噪声为 -15 dB 的均匀分布的正态噪声时光纤输出端的光强分布 ($\Delta\beta L = 1.2156\pi$)。和图 2 相比,光场的可见度大幅降低。

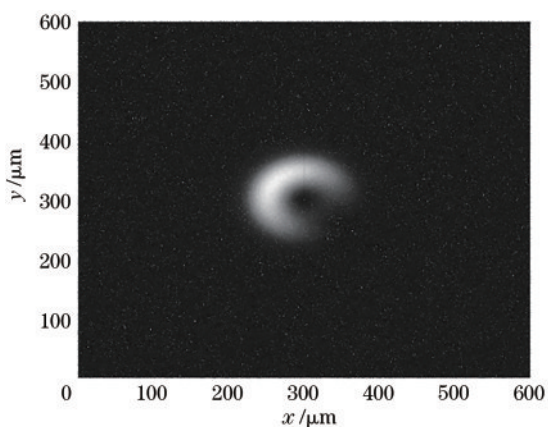


图 5 均匀噪声下的光场分布
Fig. 5 Field distribution in the presence of normally distributed noise

取 20 次随机产生的均匀噪声进行实验,图 6(a) 给出在环境噪声污染下 $r = a$ 处的光强分布。被用于解调的信号[如图 6(b)所示]被完全淹没在噪声中,但是由于噪声和解调信号 $\cos(\theta + \varphi_0)$ 没有相关性,因此噪声不会影响解调的输出,如图 7 所示。

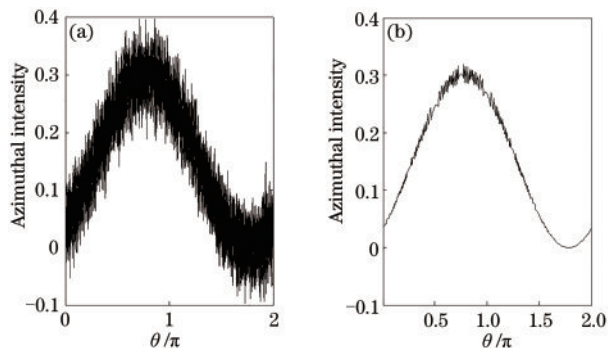


图 6 均匀噪声下的被解调信号。(a)添加均匀噪声;
(b)未添加噪声
Fig. 6 Demodulated signal in the presence of normally distributed noise. (a) With normally distributed noise; (b) without noise

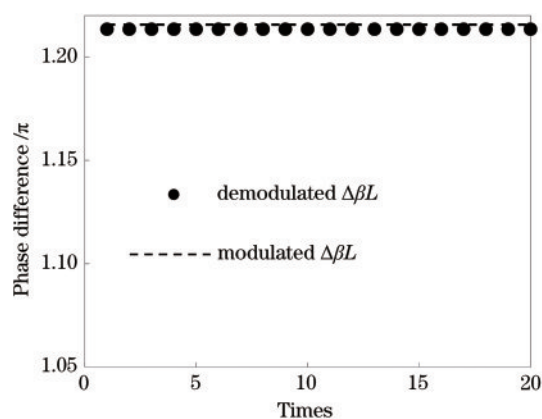


图 7 均匀噪声下解调的相位差
Fig. 7 Phase differences demodulated in the presence of distributed noise

另一种外界光照的影响来自其他光源的光斑。图 8 给出叠加了强度为 -10 dB 的高斯光斑的光场分布,高斯光斑的模场半径为 $W = 2a$ 。将高斯光斑置于 20 个不同位置进行实验,图 9(a)为叠加了高

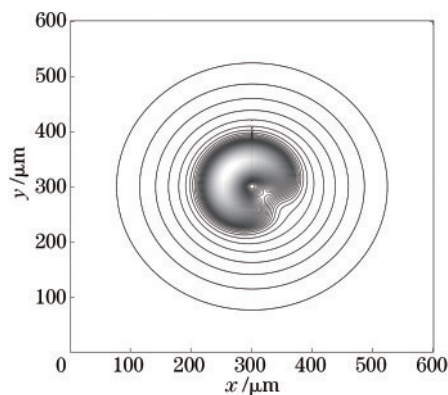


图 8 叠加了高斯光斑的光场分布
Fig. 8 Field distribution in the presence of a Gaussian spot noise

斯光斑在不同位置时 $r = a$ 处的光强分布。图 10 为了解调信号 $\cos(\theta + \varphi_0)$ 解调出的相位差, 解调结果不受高斯光斑的影响。数值仿真结果表明, 基于 OAM 模间干涉的光纤传感器具有很强的抗干扰能力。

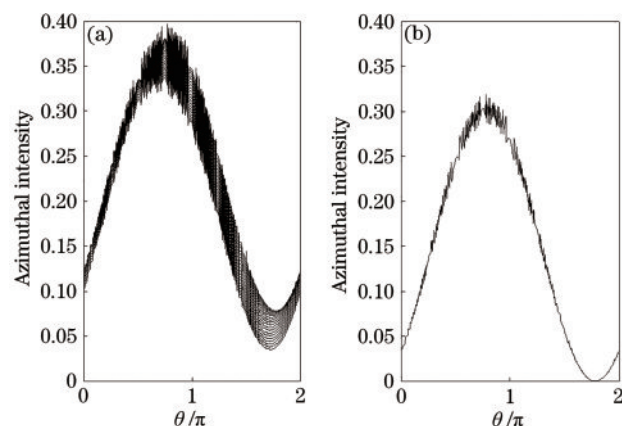


图 9 高斯光斑噪声下的被解调信号。(a)添加高斯光斑噪声; (b)未添加噪声

Fig. 9 Demodulated signal in the presence of Gaussian spot noise. (a) With Gaussian spot noise; (b) without noise

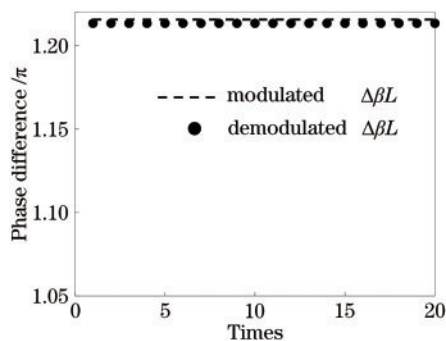


图 10 高斯光斑噪声下解调的相位差

Fig. 10 Demodulated phase differences in the presence of Gaussian spot noise

4 结 论

提出了一种基于图像探测的 OAM 模间干涉的少模光纤温度传感器。研究了基于 OAM 模间干涉的少模光纤传感器的传感机理和解调原理, 并对传感器的传感性能和抗干扰能力进行了分析。该传感器将光纤中的轨道角动量模式的相位变化作为一种载波, 因此可直接通过光纤输出端的干涉图像获得温度的变化信息, 无须采用价格昂贵的可调谐激光器或光谱仪, 且解调结果与模间相位差之间的关系是线性的。同时 OAM 模式的相位分布独立于光纤中模式光强, 且和外界光照的场分布基本不存

在相关性, 因此 OAM 模间传感器具有更强的抗干扰能力。

参 考 文 献

- [1] Matsuo S, Takenaga K, Sasaki Y, et al. High-spatial-multiplicity multicore fibers for future dense space-division-multiplexing systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(6): 1464-1475.
- [2] Ryf R, Randel S, Gnauck A H, et al. Mode-division multiplexing over 96 km of few-mode fiber using coherent 6×6 MIMO processing [J]. Journal of Lightwave Technology, 2012, 30(4): 521-531.
- [3] Pei L, Wang J S, Zheng J J, et al. Research on specialty and application of space-division-multiplexing fiber [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(10): 1002001.
裴丽, 王建帅, 郑晶晶, 等. 空分复用光纤的特性及其应用研究 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 1002001.
- [4] Zhang Q, Guo Y B, Chen J K, et al. A communication experiment using mode division multiplexing with phase modulation-coherent detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(3): 0306001.
张强, 郭玉彬, 陈嘉轲, 等. 基于相位调制-相干检测的模分复用通信实验 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0306001.
- [5] Wang Y H, Wu B J, Wan F, et al. Analysis of compensation for inter-mode nonlinear phase modulation in few-mode optical fiber communication systems [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1206006.
王瑜浩, 武保剑, 万峰, 等. 少模光纤通信系统中模间非线性相位调制的补偿分析 [J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1206006.
- [6] Yao S C, Fu S N, Zhang M M, et al. Demodulation and multi-input multi-output equalization for mode division multiplexing system using a novel few-mode fiber [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(14): 144215.
姚殊畅, 付松年, 张敏明, 等. 基于少模光纤的模分复用系统多输入多输出均衡与解调 [J]. 物理学报, 2013, 62(14): 144215.
- [7] Kumar A, Goel N K, Varshney R K, et al. Studies on a few-mode fiber-optic strain sensor based on LP_{01} - LP_{02} mode interference [J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(3): 358-362.
- [8] Huang T Y, Shao X G, Wu Z F, et al. A sensitivity enhanced temperature sensor based on highly Germania-doped few-mode fiber [J]. Optics

- Communications, 2014, 324: 53-57.
- [9] Zhang Y L, Jia D G, Li S, et al. Study of displacement sensor based on few-mode multi-core fiber[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(9): 0905006.
张玉龙, 贾大功, 李帅, 等. 基于多芯少模光纤位移传感器的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(9): 0905006.
- [10] Lu C X, Dong X P, Su J, et al. Characteristics and sensing applications of few-mode fiber with critical wavelength[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(17): 170620.
陆晨旭, 董小鹏, 苏娟, 等. 具有特征波长的少模光纤特性及传感应用[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(17): 170620.
- [11] Xu Y, Ren G B, Liu Y, et al. All fiber torsion and displacement sensor based on image detection [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2017, 268: 46-51.
- [12] Chen L X, Zhang Y Y. Research progress on preparation, manipulation, and remote sensing applications of high-order orbital angular momentum of photons[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(16): 164210.
陈理想, 张远颖. 光子高阶轨道角动量制备、调控及传感应用研究进展[J]. 物理学报, 2015, 64(16): 164210.
- [13] Zhang H K, Zhang B, Liu Q, et al. OAM-basis transmission matrix in optics: a novel approach to manipulate light propagation through scattering media[J]. Optics Express, 2020, 28(10): 15006-15015.
- [14] Yan Y, Wang J, Zhang L, et al. Fiber coupler for generating orbital angular momentum modes [J]. Optics Letters, 2011, 36(21): 4269-4271.
- [15] Li S H, Mo Q, Hu X, et al. Controllable all-fiber orbital angular momentum mode converter [J]. Optics Letters, 2015, 40(18): 4376-4379.
- [16] Guan B B, Scott R P, Qin C, et al. Free-space coherent optical communication with orbital angular momentum multiplexing/demultiplexing using a hybrid 3D photonic integrated circuit [J]. Optics Express, 2014, 22(1): 145-156.
- [17] Yu B, Pickrell G P, Wang A B, et al. Thermally tunable extrinsic Fabry-Perot filter[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(10): 2296-2298.
- [18] Shibata N, Shibata S, Eda Hiro T, et al. Refractive index dispersion of lightguide glasses at high temperature [J]. Electronics Letters, 1981, 17(8): 310-311.