

多模光纤光斑图样在传感领域的应用与发展

穆 鸽, 刘 艳*, 秦 齐, 胡耀华

(北京交通大学 光波技术研究所, 北京 100044)

摘要: 随着光斑检测技术和图像处理技术的不断发展与进步, 基于多模光纤光斑的传感技术日益成熟, 利用多模光纤输出光斑图样携带的光纤空间状态信息可得到光纤的受干扰信息及其受干扰程度, 具有重要的应用价值。从各个应用领域出发, 详细介绍了多模光纤光斑图样的应用与发展。层出不穷的研究成果和丰富的应用场景都体现出光纤光斑传感技术有着巨大的发展潜力。最后, 展望了未来多模光纤光斑图样在传感领域的研究方向。

关键词: 多模光纤; 光纤传感; 光斑图样

中图分类号: TN247 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2020)12-0037-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.12.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Application and development of multi-mode fiber specklegram in the field of sensing

MU Ge, LIU Yan*, QIN Qi, HU Yaohua

(Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 10044, China)

Abstract: With the continuous development and progress of optical fiber specklegram detection technology and image processing technology, the sensing technology based on multi-mode fiber specklegram is becoming more and more mature. Using the optical fiber space status information carried by the multi-mode fiber output specklegram, the interference information and the degree of interference of the fiber can be obtained, which has important application value. Starting from various application fields, the application and development of the multimode fiber specklegram are introduced in detail. The endless research results and rich application scenarios show that the fiber speckle pattern sensing technique has strong vitality. Finally, the paper looks forward to the future research directions of multimode fiber speckle patterns in the field of sensing.

Key words: multi-mode fiber; optical fiber sensing; specklegram

0 引言

光纤光斑传感器(FSS)^[1]是一种基于多模干涉效应的光纤传感器。当相干光注入到多模光纤(MMF)时, 光纤内激发的多个传输模式之间的干涉会在光纤输出端面处形成明暗相间的斑点, 这些斑点的集合称为光斑图样。由于光纤端面处光斑图样的空间和时间特性易受导光条件的影响, 该散斑场对外部环境的变

化和扰动极其敏感, 因此可被广泛应用于位移、液体的化学性质、温度等参数的测量, 且具有系统结构和处理方法简单、易于安装等优点。

本文结合 MMF 的性能对 MMF 光斑图样传感技术的发展展开调研, 全面介绍 MMF 光斑图样传感技术在位移、液体分析、温度、人机交互、监测生命体征和其它领域内的应用与发展情况。

1 在位移传感领域的应用

1993 年, Francis T. S. Yu 等人^[2]提出了一种使用散斑图案的归一化强度内积处理(NIPC)算法的光纤传感器(灵敏度为 $0.1 \mu\text{m}$, 动态范围为 $20 \mu\text{m}$), 并将其应用在亚微米位移传感领域。该传感器获得光斑的 NIPC 值随位移的变化呈现出了良好的线性变化特性, 这表明可以通过对光斑 NIPC 值的分析来感知位移变

收稿日期: 2020-03-03。

基金项目: 国家自然科学基金(61975009)资助。

作者简介: 穆鸽(1995—), 女, 河北石家庄人, 硕士生, 现就读于北京交通大学电子信息工程学院电子科学与技术专业, 主要从事光纤通信、光纤传感方面的研究工作。在校期间, 先后获得北京交通大学一等学业奖学金和“三好研究生”称号。

* 通信作者: 刘艳(E-mail: yanliu@bjtu.edu.cn)。



化,从而实现亚微米位移传感。

1994 年,Kun Pan 等人^[1]在文献[2]基础上提出了检测平均绝对光斑强度变化(MSV)的光纤光斑传感技术,用于位移和温度的测量,位移灵敏度、温度灵敏度分别为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 、 0.1°C 。与联合变换光学相关器技术相比,MSV 技术具有更高的灵敏度和更好的动态范围。

2013 年,西班牙坎塔布里亚大学的 M.Lomer 和 L. Rodriguez-Cobo 等人^[4]通过利用光纤中散斑图案相关性进行毫米范围内的位移测量,同时研究了光纤中传播的模式数量对灵敏度和测量范围的影响。由于塑料光纤(POF)具有易于操作、坚固耐用且机械强度好的特性,该实验使用 3 种芯径不同的 POF,通过观察光纤输出端散斑图案变化提取与位移有关的信息,证明该实验具有良好的可重复性。

2017 年,巴西坎皮纳斯州立大学的 Eric Fujiwara 等人^[5]提出了一种基于光纤散斑图的多点位移传感器,实验装置如图 1 所示。该传感器通过沿着单根光纤安装的微弯换能器对多个线性位移进行监测,随后,通过人工神经网络(ANN)处理获得实验数据,并计算位移的大小。对于大量连接的设备,虽然散斑图灵敏度降低了,但是该方法可以应用于小型传感器阵列监测,为基于时间和波长的复用方案提供了可靠的替代方案。

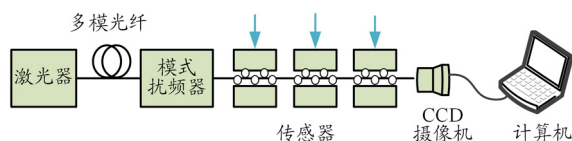


图 1 基于光纤散斑图的多点位移传感器的实验装置图

2018 年,本课题组^[6]从光纤输出光斑的统计特性出发,对单模光纤-多模光纤(SMF-MMF)结构因偏芯对接引入的微位移展开了研究,同时提出了一种新型的基于二维傅里叶变换和灰度共生矩阵(GLCM)的光纤光斑图样处理算法。实验表明光斑图样的 GLCM 值随 SMF 和 MMF 之间的横向位移的变化成近似线性关系,因此可以通过对散斑图的 GLCM 的分析来进行微位移的测量,且该方法具有比 NIPC 算法更好的性能。但是,GLCM 更适用于分析参数可以引起传输模式数变化较大的情况。

2 在液体化学性质传感领域的应用

当周围环境折射率改变时,模式的激发和能量分布会发生变化,导致输出光斑图样也会产生相应波

动。因此,可以通过改变外部环境折射率,增强其环境敏感性,然后通过输出光斑图样的变化来分析光纤周围环境折射率的变化。

2003 年,Wang B 等人^[7]研究了一种基于多模-单模-多模(MSM)的异质核结构的光斑传感器,即通过改变 SMF 部分的环境折射率来改变传输模式数,实现了比强度调制更高的灵敏度。使用 NIPC 算法将光纤散斑场进行分析,实验表明光纤散斑图传感器对化学环境变化非常敏感。

2012 年,文献[8]提出了通过将振动传感器放置在装有液体的容器中(实验装置如图 2 所示),获得了散斑图的频率响应与液体性质的关系,然后使用 ANN 处理散斑图案的 NIPC 值,将该系统应用于水和乙醇样品的质量和粘度测量。该传感器在测量质量和粘度时显示的绝对误差分别低于 0.5 g 和 $0.1\text{ mPa}\cdot\text{s}$,在测定液体混合物浓度方面具有潜在的应用前景。同年 9 月,M. Lomer 课题组^[9]为了获得更高的传感器灵敏度,实验时将光纤弯曲成 U 形并浸入液体中,通过 CCD 摄像机捕获耦合到光纤输出端的强度散斑场,用 Matlab 程序处理,证明了液体折射率对 MMF 输出端散斑图案的影响。

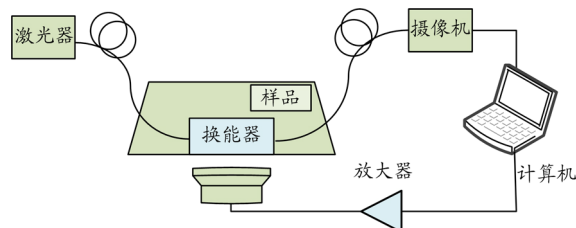


图 2 基于光纤散斑图的液体传感器实验装置图

2019 年,Eric Fujiwara 课题组^[10-11]报道了一种基于级联多模-无芯-多模(MNCM)结构的光纤散斑图化学传感器,通过改变 MNCM 周围部分液体的折射率后处理获得的输出散斑场,从而实现折射率传感。光斑处理时采用零均值归一化互相关系数(ZNCC),而非经典的 NIPC 算法,所提出的结构具有结构简单、成本低和易实现等优点。该传感器的折射率灵敏度为 18.7 RIU^{-1} ,分辨率为 6.1×10^{-4} 。此外,传感器的可重复性较好。

3 在温度传感领域的应用

基于干涉方式的光纤传感器在特定情况下表现出很好的灵敏度。据报道,Fabry-Perot、Michelson 和 Mach-Zehnde 干涉仪^[12]等干涉测量技术可以确定高温下材料的热性能。当在固体样品上进行测试时,这些

经典的干涉测量技术显示出很高的精度和动态范围,但是,它们通常需要具有极高精度的光学器件,并且在许多情况下测量结果准确度不高。在这种情形下,可以使用 FSS 来克服经典干涉测量方法的某些局限性,且 FSS 的灵敏度可以根据光纤和光源的参数进行控制。

2014 年,文献[13]介绍了一种基于激光的非接触式的远程温度传感器,适用于高温和低温测量。它可以作为医学诊断小型传感器用于人体温度的远程测量,也可以用在商用拉伸试验机以监测电炉温度。

2015 年,南京大学的 Wang Jiaojiao 等人^[14]通过观察不同温度下的散斑图变化,提出一种基于光纤散斑的温度传感器。该系统通过将 MMF 拼接到具有纤芯偏移的 SMF 来激发高阶模,显示了对温度变化的线性响应特性。此外,还就不同参数对传感器性能的影响进行了研究。与广泛研究的温度传感器相比,这种光纤散斑图传感器更紧凑、轻便且成本更低。

2017 年,RODRIGUEZ-COBO L 等人^[15]研究了 FSS 对高温的敏感性,在低于 800 °C 时,温度与 FSS 的灵敏度呈现出明显的线性关系。图 3 为该温度传感器实验装置图,所获得的结果为采用干涉测量技术测量极高温提供了参考,通过实验证实了 FSS 的优越性。同年 4 月,上海理工大学的肖辽等人^[16]设计了一种基于光斑旋转角度调制的温度传感器,通过监测温度变化与出射光斑旋转角度的关系,达到对温度间接测量的目的。

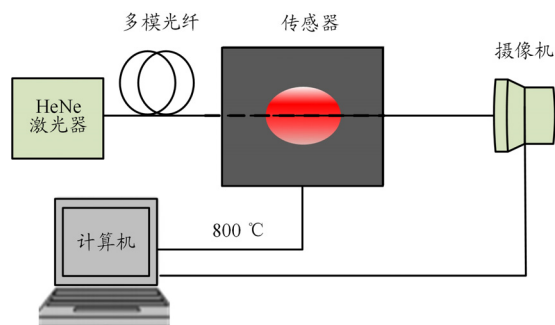


图 3 基于光纤散斑图的温度传感器实验装置图

4 在人机交互领域的应用

Eric Fujiwara 课题组^[17-21]也研究了光纤光斑在人机交互中的实际应用。2013 年,他们研究了一种测量手指运动的 FSS,该系统在检测手指关节移动方面显示了良好的响应,适合于远程手术和基于手势的机器人人机交互。2015 年,该课题组利用基于力肌成像

(FMG)的 FSS 来识别手势,通过 ANN 对散斑图 NIPC 和手部姿势的相关性进行训练,总体准确性为 91.3%。2016 年,该课题组开发了基于光纤散斑图分析的触觉传感器,由于微弯产生的光强变化与纵向位移相关,位移灵敏度达 1.9 mm^{-1} ,该传感器可以设计用于用户系统交互中的触觉界面。同年,该课题组开发了基于 FMG 的微弯传感器。该系统对 11 种静态手势进行评估,通过 ANN 处理获取的光学数据估算出实际的手形,平均精度达到了 89.9%。2018 年 3 月,该课题组在之前的基础上提出了低成本的力肌传感器,在 20 N 范围内灵敏度为 0.05 N^{-1} ,为研究人机交互方向奠定了基础。

5 在其它领域的应用

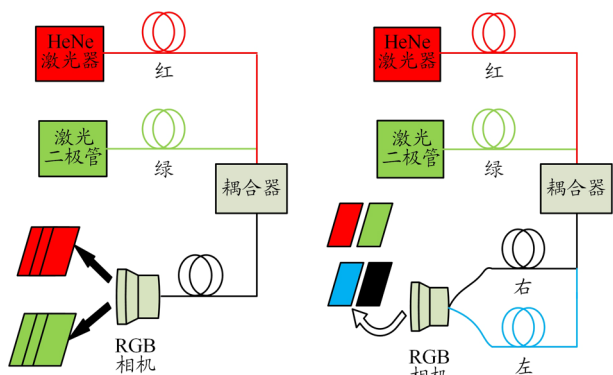
其它领域的应用主要包括以下几方面:

①在生命体征检测领域。2014 年,Eric Fujiwara 课题组^[22]将 FSS 研究应用在医用系统领域,提出了一种低成本的测量患者呼吸的替代方案。同年,M. Lomer 等人^[23]使用 FSS 成功测量了动脉搏动和呼吸频率。结合光纤散斑图传感器的高灵敏度,此传感器可以提供有关监测生命体征的更多信息。2017 年,Eric Fujiwara 课题组^[24]提出基于散斑图技术的行人检测系统,该系统由光纤、相干光和光电探测器组成,并将其放置在地毯下面来监测行人的步数。经证实,在某些情况下该系统准确率高达 97%,在生命体征检测领域有很大的实用价值。

②在振动传感领域。2012 年,L. Rodriguez-Cobo 等人^[25]研究了一种利用在多模 POF 输出端散斑图的空间强度分布的变化来感测振动的方法。该方法可用于测量发动机或建筑物中的振动。2017 年 4 月,该课题组^[26]使用 2 种不同的基于散斑技术的方法进行无接触的振动测量,结果表明使用 MMF 投影的光斑显示了更丰富的区域信息。

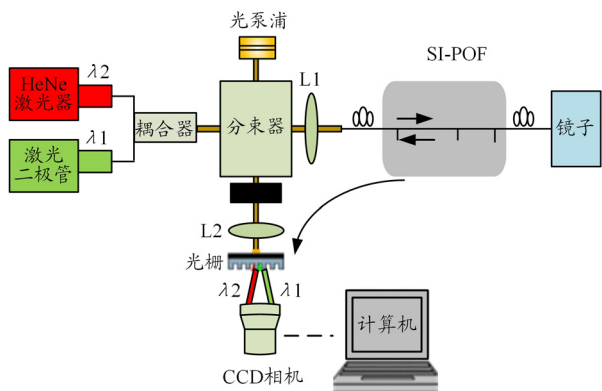
③在复用方案领域。2014 年 6 月,L. Rodriguez-Cobo 课题组^[27]首次提出 FSS 的复用方案(FSMS)概念,设计了一种基于波分复用(WDM)的新型 FSS,结构如图 4(a)所示。该 WDM 系统由 2 个不同波长的激光入射到 2 根 POF 中,经 50:50 耦合器后用 RGB 摄像机进行接收,通过分析斑点序列的颜色可以获得 2 种独立信号。2015 年 6 月,在之前研究的基础上,该课题组^[28]结合了空分复用(SDM)技术和 WDM 技术,使用单个电荷耦合器件(CCD)相机作为检测器来增加感应区域的数量,以实现光纤散斑图多路复用传感器,实验结

构如图 4(b)所示,该研究对提高多点传感系统性能具有重要意义。2016 年,Pinzón P J 等人^[29]提出了基于反射配置的双波长散斑的传感技术,可以用于远程监测微振动。该技术可以检测低损耗阶跃型塑料光纤(SI-POF)输出散斑图的空间分布的周期性变化,系统结构如图 4(c)所示,经过 50:50 耦合器的 2 个光信号被分束器(BS)分为两部分,50%光强度进入传感光纤 SI-POF,位于 SI-POF 最远端的镜子将光线反射回 SI-POF,经过 BS 后,50%反射光强到达 CCD 相机。这种系统允许分析在同一时刻记录 2 个独立散斑图案,使模式噪声最小化。



(a) 基于 WDM 的 FSS

(b) 基于 SDM 和 WDM 的 FSS



(c) 基于双波长散斑的 SI-POF 传感器

图 4 FSMS 结构图

MMF 光斑的应用和研究还有很多,如 Redding 等人^[30]在 L. Rodriguez-Cobo 组研究的基础上将光斑应用于光纤光斑光谱仪,使得光纤光谱仪带宽有了很大提升;北京交通大学研究团队^[31-33]不仅将光斑应用在微位移传感、弯曲传感,也对光纤光谱仪进行了改进;在压缩感知领域,光斑图样主要用于信号恢复以及二维成像^[34-36];英国学者^[37]研究了光斑的大小、传输波长和数值孔径等参数对 FSS 的影响。

6 结束语

本文从位移、液体的性质、温度、人机交互、监测生命体征和振动等应用领域对 MMF 光斑图样的应用与发展进行了介绍和总结。由于光斑图样中蕴含着丰富的待测参量信息,所以在光纤传感领域具有重要的应用价值。虽然光斑传感所应用的模式耦合理论仍然不是十分完善,在光纤中产生微扰的因素繁多且更有随机性,但是应用 MMF 光斑进行传感的方式对工艺要求不高,即使外界对光纤产生微扰,也不会影响观察光斑整体的变化。FSS 具有干涉仪型传感器的灵敏度,同时在系统结构和制备工艺以及尺寸体积上具有明显优势。

参考文献:

- [1] EFENDIOGLU H S. A review of fiber-optic modal modulated sensors: specklegram and modal power distribution sensing [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17(7): 2055-2064.
- [2] YU F T S, WEN M, YIN S, UANG C M. Submicrometer displacement sensing using inner-product multimode fiber speckle fields[J]. Applied Optics, 1993, 32: 4685-4689.
- [3] PAN K, UANG C M, CHENG F, et al. Multimode fiber sensing by using mean-absolute speckle-intensity variation [J]. Applied Optics, 1994, 33(10): 2095-2098.
- [4] LOMER M, ABASCAL J, CASTRELLON-URIBE J, et al. Measurement of displacement in the micrometer range using speckle pattern correlation in multimode fibers [C]//Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, May 19, 2013, Krakow, Poland. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2013: 8794-1-8794-45.
- [5] FUJRIWARA E, DO SANTOS M F M, SUZUKI C K. Measurement of multi-point displacements by optical fiber specklegram sensor [C]//2017 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), August 27-30, 2017, Ahmedabad, India. Piscataway: IEEE, 2017: 1-5.
- [6] LIU Y, QIN Q, LIU H, et al. Investigation of an image processing method of step-index multimode fiber specklegram and its application on lateral displacement sensing[J]. Optical Fiber Technology, 2018, 46: 48-53.
- [7] WANG B, HUANG C, GUO R, et al. A novel fiber chemical sensor using inner-product multimode fiber speckle fields [J]. International Society for Optics and Photonics, 2003, 5206: 299-304.
- [8] FUJRIWARA E, WU Y T, SUZUKI C K. Vibration-based specklegram fiber sensor for measurement of properties of liquids [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(12): 1726-1730.
- [9] GALINDEZ C, LOMER M, RODRIGUEZ-COBO L, et al. Influence of the refractive index of liquids in the speckle pattern of multimode fibers[J]. International Society for Optics and Photonics, 2012, 8413 (22): 2098-2103.
- [10] FUJRIWARA E, DA SILVA L E, DE FREITAS H E, et al. Optical fiber chemical sensor based on the analysis of fiber specklegrams character-

- istics [C]//SBFoton International Optics and Photonics Conference, Oct. 8–10, 2018, Campinas, Brazil. Piscataway: IEEE, 2018: 1–5.
- [11] FUJRIWARA E, DA SILVA L E, CABRAL T D, et al. Optical fiber specklegram chemical sensor based on a concatenated multimode fiber structure[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(19): 5041–5047.
- [12] HARIHARAN P. *Optical interferometry* [M]. San Diego: Academic press, 2003.
- [13] TRIVEDI V, MAHAJAN S, CHHANIWAL V, et al. Optical temperature sensor using speckle field[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 216: 312–317.
- [14] WANG J J, YAN S, XU F. Speckle-based fiber sensor for temperature measurement [C]//16th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), August 7–10, 2017, Wuzhen, China. Piscataway: IEEE, 2017: 1–3.
- [15] RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, LOPEZ-HIGUERA J M. Fiber specklegram sensors sensitivities at high temperatures[C]//24th International Conference on Optical Fibre Sensors April 24–28, 2017, Jeju, Korea. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2015. DOI: 10.1117/12.2194288.
- [16] 肖辽, 顾杰, 马军山. 基于螺旋式光纤环输出光斑旋转的温度传感器[J]. *光学仪器*, 2017, 39(2): 34–38.
- [17] FUJRIWARA E, MIYATAKE D Y, DOS SANTOS M F M, et al. Development of a glove-based optical fiber sensor for applications in human-robot interaction[C]//8th ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI), March 3–6, 2013, Tokyo, Japan. Piscataway: IEEE, 2013: 123–124.
- [18] FUJRIWARA E, WU Y T, SANTOS M F M, et al. Identification of hand postures by force myography using an optical fiber specklegram sensor[C]//International Conference on Optical Fibre Sensors, International Society for Optics and Photonics, September 28, 2015, Curitiba, Brazil. Piscataway: IEEE, 2015: 96343Z-1–96343Z-4.
- [19] FUJRIWARA E, PAULA F D, WU Y T, et al. Optical fiber tactile sensor for user interfaces [C]//IEEE International Symposium on Consumer Electronics (ISCE), September 28–30, 2016, Sao Paulo, Brazil. Piscataway: IEEE, 2016: 11–12.
- [20] FUJRIWARA E, WU Y T, SANTOS M F M, et al. Optical fiber specklegram sensor for measurement of force myography signals [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 17(4): 951–958.
- [21] FUJRIWARA E, SUZUKI C K. Optical fiber force myography sensor for identification of hand postures [J]. *Journal of Sensors*, 2018. DOI: 10.1155/2018/8940373.
- [22] LOMER M, RODRIGUEZ-COBO L, LANDERAS V, et al. Plastic optical fiber sensor for measuring of respiration based on changes speckle pattern [C]//23rd Int. Conference on Plastic Optical Fibers (ICPOF), June 2, 2014, Santander, Spain. Santander: SPIE, 2014: 211–214.
- [23] LOMER M, RODRIGUEZ-COBO L, REVILLA P, et al. Speckle POF sensor for detecting vital signs of patients[J]. *Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering*, June 2, 2014, Santander, Spain. Santander: SPIE, 2014. DOI: 10.1117/12.2059747.
- [24] RODRIGUEZ-CUEVAS A, RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, et al. Safe and private pedestrian detection by a low-cost fiber optic specklegram [C]//25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), April 24–28, 2017, Jeju, South Korea. Piscataway: IEEE, 2017: 103236-1–103236-4.
- [25] RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, GALINDEZ C, et al. POF vibration sensor based on speckle pattern changes [C]//22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, October 14, 2012, Beijing, China. Bellingham: International Society for Optics and Photonics, 2012. DOI: 10.1117/12.970625.
- [26] ROBLES-URQUIJO I, LOMER M, RODRIGUEZ-COBO L, et al. Non-contact vibration analysis using speckle-based techniques [C]// 25th Optical Fiber Sensors Conference (OFS), April 24–28, 2017, Jeju, South Korea. Piscataway: IEEE, 2017: 103237-1–103237-4.
- [27] RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, COBO A, et al. Wavelength domain multiplexed fiber specklegram sensor [C]//23rd International Conference on Optical Fibre Sensors, June 2, 2014, Santander, Spain. Rosten: International Society for Optics and Photonics, 2014. DOI: 10.1117/12.2059553.
- [28] RODRIGUEZ-COBO L, LOMER M, LOPEZ-HIGUERA J M. Fiber specklegram-multiplexed sensor [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 33(12): 2591–2597.
- [29] PINZON P J, MONTERO D S, TAPETADO A, et al. Dual-wavelength speckle-based SI-POF sensor for cost-effective detection of microvibrations [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2016, 23(2): 217–222.
- [30] LIEW S F, REDDING B, CHOMA M A, et al. Broadband multimode fiber spectrometer[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2029–2032.
- [31] 秦齐. 多模光纤输出光斑纹理特性及其应用的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [32] 刘欢欢. 基于多模光纤光斑检测的模式分析和光谱分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [33] 朱开强. 基于多模光纤光斑检测的传感技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [34] SHIN J, BOSWORTH B T, FOSTER M A. Single-pixel imaging using compressed sensing and wavelength-dependent scattering[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(5): 886–889.
- [35] VALLEY G C, SEFLER G A, SHAW T J. Multimode waveguide speckle patterns for compressive sensing [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2529–2532.
- [36] SEFLER G A, SHAW T J, VALLEY G C. Demonstration of speckle-based compressive sensing system for recovering RF signals [J]. *Optics Express*, 2018, 26(17): 21390–21402.
- [37] ARISTIZABAL V H, HOYOS A, RUEDA E, et al. Effect of wavelength on metrological characteristics of non-holographic fiber specklegram sensor[J]. *Photonic Sensors*, 2015, 5(1): 1–5.