

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413176

光纤光栅光谱分光解调与接入光纤芯径相关性分析*

邢宇航¹, 李红^{1,2}, 孙广开^{1,2}, 胡林聪², 祝连庆^{1,2,3}

(1. 北京信息科技大学仪器科学与光电工程学院光电测试技术及仪器教育部重点实验室 北京 100016;

2. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100016; 3. 广州南沙光子感知技术研究院 广州 511462)

摘要:面向细芯光纤光栅传感应用,针对接入光纤芯径不匹配所引起的光学成像分辨率较低、光能损失较大、成像质量较差的问题,本文以双光栅二次色散解调光学系统为模型,对比分析了常规单模光纤与不同规格芯径细芯光纤分别接入分光光谱解调模块时对成像和解调精度的影响,模拟了系统成像光斑分辨率、光束发散角、接收面辐照度和MTF曲线在截止频率处取值的变化情况。计算结果表明,当光纤芯径从8 μm 减小至2 μm 时,分辨率从0.8 nm提升到0.1 nm。接收面辐照度随芯径值缩小逐渐提升,芯径小于4.8 μm 后接收面光能利用率达到极限74.98%,曝光时间缩减为常规状态下0.36倍。MTF曲线在截止频率处取值与芯径值呈抛物线相关,芯径取4.2 μm 时图像接近衍射极限。本文提出并验证了光纤芯径与分光光谱解调成像指标的相关关系,为不同芯径光纤光栅传感的解调技术提供了参考和借鉴。

关键词: 光纤光栅传感;解调光谱仪;解调;细芯光纤

中图分类号: TH74 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Fiber grating spectral spectral demodulation and access fiber core diameter correlation analysis

Xing Yuhang¹, Li Hong^{1,2}, Sun Guangkai^{1,2}, Hu Lincong², Zhu Lianqing^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology and Instrumentation, Ministry of Education, Beijing University of Information Science and Technology, Beijing 100016, China; 2. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Guangzhou Nansha Intelligent Photonic Sensing Research Institute, Guangzhou 511462, China)

Abstract: This paper investigates the impact of fiber core diameter on thin-core fiber grating sensing applications, addressing challenges such as low optical imaging resolution, high light energy loss, and poor imaging quality caused by core diameter mismatches in access fibers. Using a dual-grating quadratic dispersion demodulation optical system as a model, a comparative analysis was conducted between conventional single-mode fibers and thin-core fibers with varying core diameters. The study examined the effects on imaging and demodulation accuracy by simulating changes in imaging spot resolution, beam divergence angle, receiving surface irradiance, and the modulation transfer function (MTF) curve at the cutoff frequency. The computational results reveal that reducing the fiber core diameter from 8 μm to 2 μm improves resolution from 0.8 nm to 0.1 nm and increases irradiance on the receiving surface. The optical energy utilization on the receiving surface reaches its maximum of 74.98% when the core diameter is below 4.8 μm , and the exposure time decreases to 36% of the conventional state. Additionally, the MTF curves at the cutoff frequency show a parabolic correlation with core diameter, with images approaching the diffraction limit when the core diameter is 4.2 μm . This study establishes and validates the correlation between fiber core diameter and spectral demodulation imaging indices, offering valuable insights and references for fiber grating sensing demodulation technologies with different core diameters.

Keywords: fiber grating sensing; demodulation spectrometer; demodulation; thin-core fibers

0 引言

光纤光栅传感技术作为一种发展相对快速的主要监测外界环境物理量变化的新型传感技术,其具有高精度、高效率、对待测物影响小、实时性高等优势^[1-5]。细芯光纤(thin core fiber, TCF)具有较小的纤芯直径、纤芯掺杂量高于普通单模光纤的特点,因此光纤的收光能力更高,对外界环境参数的变化也更加敏感^[6-10]。因此,在高精度探测要求下,对于细芯光纤光栅作为传感器携带待测信息的光信号的精确解调就显得尤为重要。

细芯光纤光栅在高灵敏度需求的外界环境监测场景下具有独特优势,在某些特定的应用场景中使用其做传感器时具有更高的精确度和更好的实时性。例如沿海结构环境和耐久性监测^[11]、高衰减重叠条件下的温度和应变监测^[12]、降低非监测目标的串扰影响监测等。光谱仪解调法具备关键结构简单、核心解调模块稳定等特质,且可以通过优化提升上位机光谱处理算法性能的方式来提高解调仪的性能^[13-14],在高速实时解调方面具有一定优势。由于常用光谱解调模块多适配于常规光纤光栅,光纤接口作为光阑时多使用常规口径光纤作为接入端,而面向细芯光纤光栅传感系统时细芯纤芯作为光阑接入光谱解调模块的分析与验证还未做过系统的研究^[15-16]。因此深入探究解调光谱仪光路结构对提升细芯光纤光栅传感解调效率和精度显得尤为重要。

基于双光栅光谱分光谱解调系统结构,详细研究单模光纤接入光路系统作为光阑时纤芯直径对光谱分光性能的影响,分析芯径与光斑采集性能评价函数的相关关系,在同时考虑光斑分辨率、接收面辐照度、图像质量要求的情况下,探究接入解调光路光纤芯径的参

数范围,为细芯光纤光栅传感信号分光光谱解调优化提供参考依据。

1 分光光谱解调原理

光纤光栅传感分光光谱解调系统如图1(a)所示。宽带光源发出的光经过耦合器之后进入光纤光栅传感器,当外界环境温度变化或者产生轴向应变时,光纤布拉格光栅(fiber Bragg gratings, FBG)的有效折射率 n_{eff} 及周期 Λ 将发生相应变化,相应关系为:

$$\lambda = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中: λ 为光源波长,本文光谱分光谱解调系统工作波段为1 525~1 570 nm。

光纤光栅有效折射率与周期的变化将导致光栅中心波长产生微小漂移,通过定量监测该微小漂移量进而反演出目标参数的变化^[17]。

解调光谱仪按照衍射光栅类型分类可分为透射式与反射式两种类型^[18-19]。为了避免二次衍射和结构交叉,同时达到缩小体积、不损失精度的目的,采用全息透射式衍射光栅进行设计,构造基于双光栅和柱透镜的透射式光谱分光谱解调模块的光路部分,其中使用的两块体相位全息透射式衍射光栅各参数相同,并使用单模光纤作为光学系统光阑。经过调制的宽谱光束经过耦合器传入光谱分光谱解调系统,进入准直透镜后经过准直作用出射为一复合平行光束。为了达到衍射光栅衍射效率最大状态,衍射波长与入射角需要满足布拉格定律^[20]:

$$2d\sin\varphi = m\lambda \quad (2)$$

式中: d 为光栅间距; φ 为入射角; m 为衍射级次。

复色光通过多缝衍射原理发生色散,不同波长的谱线将在经过成像镜聚焦后在探测器的不同位置出现从而形成光谱^[21],如图1(b)所示。

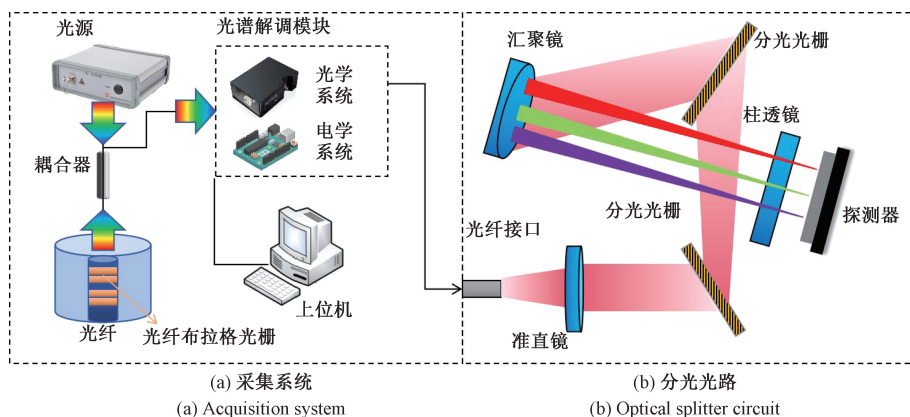


图1 光纤光栅传感分光光谱解调原理

Fig. 1 Fiber grating sensing spectral demodulation principle

2 光纤芯径与 CCD 光谱成像映射规律

在分光光谱解调系统中,最终决定解调性能的直接因素为在电荷耦合器件(charge coupled device, CCD)上输出的光斑情况,即由输出光斑经过处理后得到的输出光谱。如图 2 所示,芯径的大小将直接影响出光的能量大小、端面发散角、成像质量等。光束经过准直镜、分光光栅、汇聚镜和柱透镜之后最终在探测器上呈现椭圆形光斑,由于探测器为线阵探测器,因此主要考虑光斑中心处的成像质量参数。由后文中分析可以看出随着接入光纤芯径值的减小,发散角呈增大趋势,而光斑半径呈减小趋势。对于椭圆形光斑来说,即落在探测器上的短轴方向上的光斑长度减小。但光斑半径减小带来的影响大于发散角增大带来的影响,在二者共同作用下,最终成像光斑分辨率提高。光阑孔径越小,最终成像光斑半径将相应减小,同时由于光源输出功率不变,更小的芯径将进一步降低光能的流失,光源输出光更多的耦合进入光学系统。

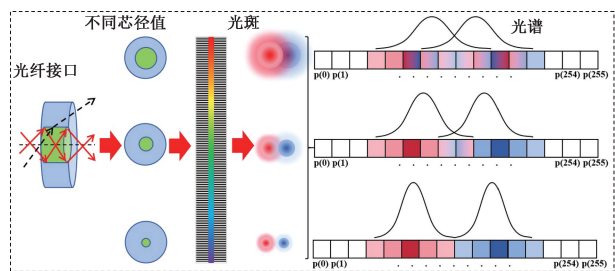


图 2 光纤芯径与光谱成像映射规律

Fig. 2 Fiber core diameter and spectral imaging mapping laws

通过色散原理将光信号投射至线阵光电探测器上后,由于在不同像元上光信号强度的不同,探测器将接收到一系列不同强度的光强数值,这些光强值代表对应光谱波长的幅值,再通过标定拟合寻峰后得到每一个谱段的传感光栅中心波长强度值。

3 讨论与分析

3.1 建立分光光路模型

在建立分光光路模型过程中,将单模光纤端面作为光学系统的光阑,模型中两块衍射光栅均采用宽度为 10 mm、900 刻线/mm 的体相位全息透射式衍射光栅。为了获得清晰可分辨的聚焦光斑,经过二次色散和会聚作用之后,光束经过柱透镜受到单向压缩像斑作用后,聚焦在位于厚度为 3 mm 柱透镜后表面 6.5 mm 位置处的光电探测器上。由于只需提取光谱一维信号,同时为了满

足光谱响应范围要求,选择 CCD 线阵探测器,其光谱响应范围 950~1 700 nm,像素尺寸为 25 μm×500 μm,像素间距为 25 μm,共 256 个像素。该光谱分光解调模块特征参量如表 1 所示。

表 1 光谱分光解调模块特征参量

Table 1 Demodulation spectrometer characterization parameters

光学元件	参数	取值
准直镜	焦距	15 mm
	通光孔径	8 mm
	衍射级别	1
分光光栅	刻线	900/mm
	宽度	10 mm
汇聚镜	焦距	58.71 mm
	通光孔径	9.2 mm
柱透镜	曲率半径	54.595 mm

对于该光纤光栅解调系统来说,系统分辨率、探测器接收到的光强信号和图像成像质量是直接衡量系统性能的主要指标。主要针对以单模光纤端面作为系统光阑时,光纤端面直径与系统分辨率、探测器接受面接收光强值、调制传递函数曲线和各关键光学平面处光束发散角的相关关系分析。

3.2 孔径值影响分析

常规单模光纤芯径为 8~10 μm 左右。为了推导出孔径值与输出光谱的映射规律,通过 ZEMAX 仿真软件得出结果,并经过 origin 进行图像优化。以 8 μm 芯径的光纤端面作为光学系统光阑,在柱透镜作用下,中心波段所成光斑能够正好不重合可分辨开所对应的波长间隔为 0.8 nm。两端边缘波段附近光斑有少量重合,由于在实际应用时主要使用中心波段范围进行传感监测,故认为光斑分辨率为 0.8 nm,其点列图如图 3 所示。

对于光谱分光解调模块来说除分辨率之外还需要着重分析探测器上所能接收到的光强,通过每个像元上的光强值才能进一步绘制出准确的光谱图。为了便于分析,仿真设定光源总功率为 1 W。辐照度表征了受辐射能照射的表面上,单位面积单位时间内接收的辐射能的多少,即受照面上的辐射通量密度,即光通量与辐射面积的比值。

$$I = \frac{d\phi}{ds}$$

(3)

式中: φ 为光通量;s 为面积。

以 5 nm 为波长间隔步长记录本文对应谱段在像面 Y 轴方向上的辐照度变化。如图 4(a) 所示为不同波长

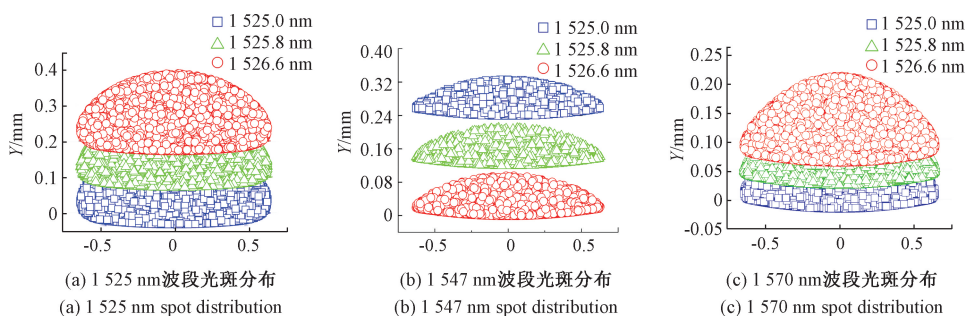


图 3 芯径为 8 μm 时光斑分布

Fig. 3 Spot distribution when the core diameter is 8 μm

对应的辐照度曲线,由于噪声存在,辐照度曲线波峰处数值难以确定,对数据进行 FFT 低通滤波处理后得到平滑的辐照度曲线如图 4(b)所示。

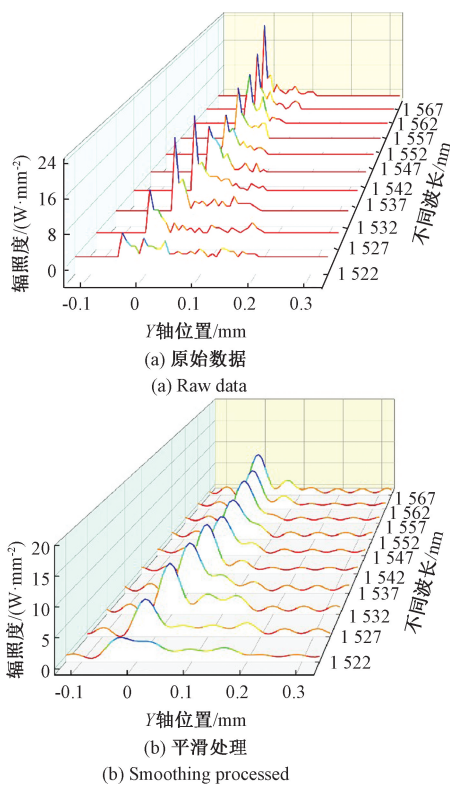


图 4 不同波长接收面辐照度分布曲线

Fig. 4 Irradiance distribution curves at the receiving surface for different wavelengths

由于系统使用一维线阵探测器进行接收,同时考虑像面接受能量和光束在像面 Y 方向上的能量集中情况,由图 4 可以看出越靠近中心波段范围的辐照度曲线在上述两方面表现情况越好。

除了考虑光斑分辨率和探测器接收面上的辐照度之外,像面上所成像的清晰程度也是该光学系统需要重点关注的评价指标,光斑图像的分辨率代表了光学系统传

递细节的能力,光斑对比度代表区分明暗区域的能力。调制传递函数(modulation transfer function, MTF)是一种衡量使用空间频率将样本对比度传递到图像的能力一种评价指标。为了确定截止频率 f ,由奈奎斯特采样定理计算得到:

$$f = \frac{1}{2 \times a} \quad (4)$$

式中: a 为像素尺寸,得到 $f=20$ lp/mm。光学系统中心波段对应 MTF 图如图 5 所示,在子午方向上的截止频率 20 lp/mm 处 MTF 值为 0.27,图像未能达到衍射极限,像质较低。

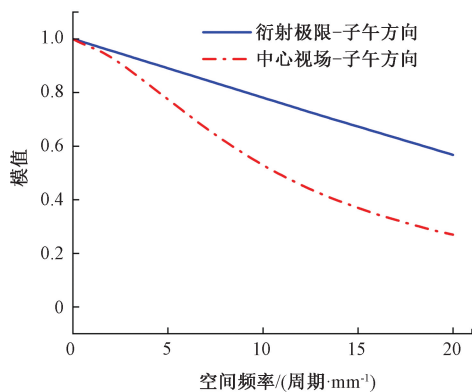


图 5 8 μm 芯径时 MTF 曲线与衍射极限

Fig. 5 MTF curve and diffraction limit at 8 μm core diameter

提出通过缩小接入光学系统的单模光纤纤芯直径的方法来提升光谱分解调系统的分辨率。但是当光纤芯径缩小时,光束的发散角会相应增大。为了更精确的得到芯径大小对分辨率的影响,同时模拟了芯径大小与光学系统中中心波长光束在各个关键光学平面处的光斑图像和发散角情况。为了得到各光学平面处的光束发散角,采用 ZEMAX 中近轴高斯光束模拟方法。发散角计算公式为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega_0}{z_r} \quad (5)$$

式中： ω_0 为光束束腰； z_r 为瑞利长度，计算公式为：

$$z_r = \frac{\pi \omega_0^2}{\lambda}$$

(6)

式中： λ 为对应光束的波长。

如表 2 为不同芯径下各个关键光学平面处的光束束腰,进而由式(5)和(6)计算可以得到每个关键光学平面处的发散角数值。

表 2 不同芯径光纤接入时各关键光学平面光束束腰

Table 2 Beam waist at each critical optical plane for fiber access with varying core diameters (mm)

芯径大小/ μm	出光端面	准直镜	分光后	柱透镜	像面
8	0.004 0	1.846 6	1.846 6	0.018 69	0.018 69
7	0.003 5	2.110 4	2.110 4	0.016 36	0.016 36
6	0.003 0	2.462 1	2.462 1	0.014 02	0.014 02
5	0.002 5	2.954 6	2.954 6	0.011 69	0.011 69
4	0.002 0	3.693 2	3.693 2	0.009 35	0.009 35
3	0.001 5	4.924 3	4.924 3	0.007 01	0.007 01
2	0.001 0	7.386 3	7.386 3	0.004 67	0.004 67

如图 6 所示为不同芯径下各个关键光学平面上的光束发散角变化规律图。由图 6(a)可以看出,随着芯径值的减小,光纤端面出光口的光束发散角呈逐渐增大的趋势。芯径值为 8 μm 时光束发散角为 0.122 49 rad。而当芯径减小到 2 μm 时,光束发散角增大到 0.457 57 rad。由图 6(b)可以看出,经过准直镜准直效果后光束发散角急剧减小且随芯径值减小呈下降趋势。由图 6(c),光束经过光栅分光和在系统中传播之后光束发散角又有较大幅度提高。由图 6(d)看出,经过柱透镜作用之后光束发散角再次减小,最终在成像面上的光束发散角与芯径值关系如图 6(e)所示。可以得出虽然光学系统成像面上的光束发散角随着光纤芯径值的减小呈增大趋势,但经过准直作用和柱透镜作用之后变化幅度极小,对成像光斑分辨率影响较低。

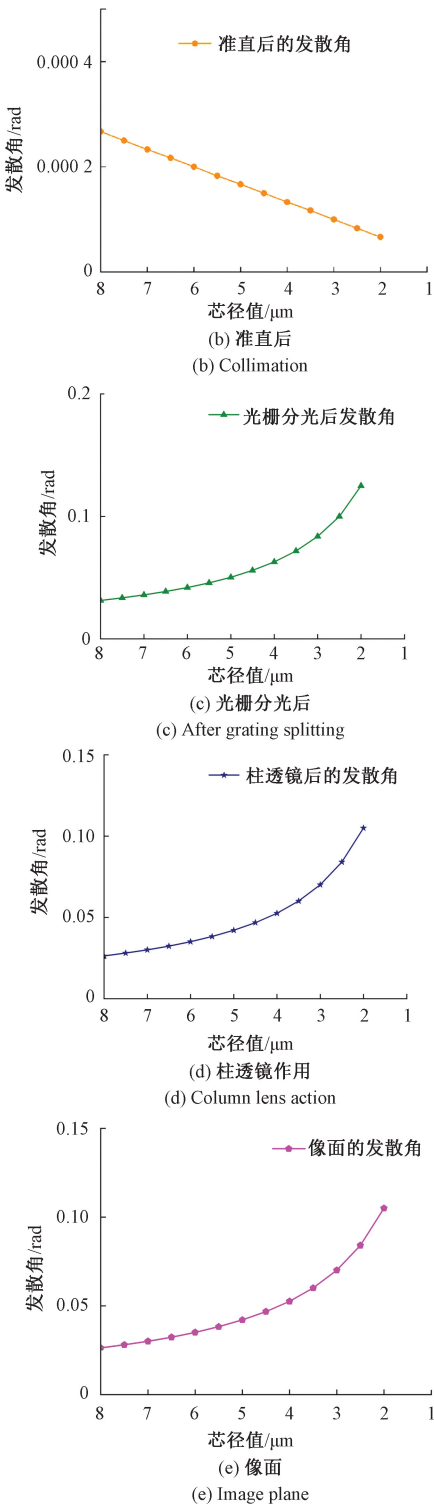
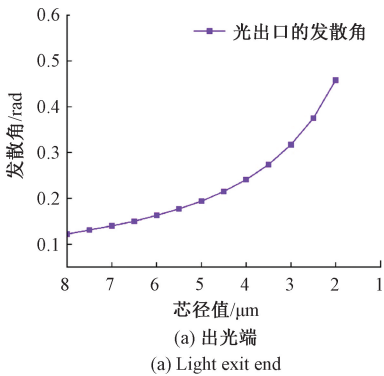
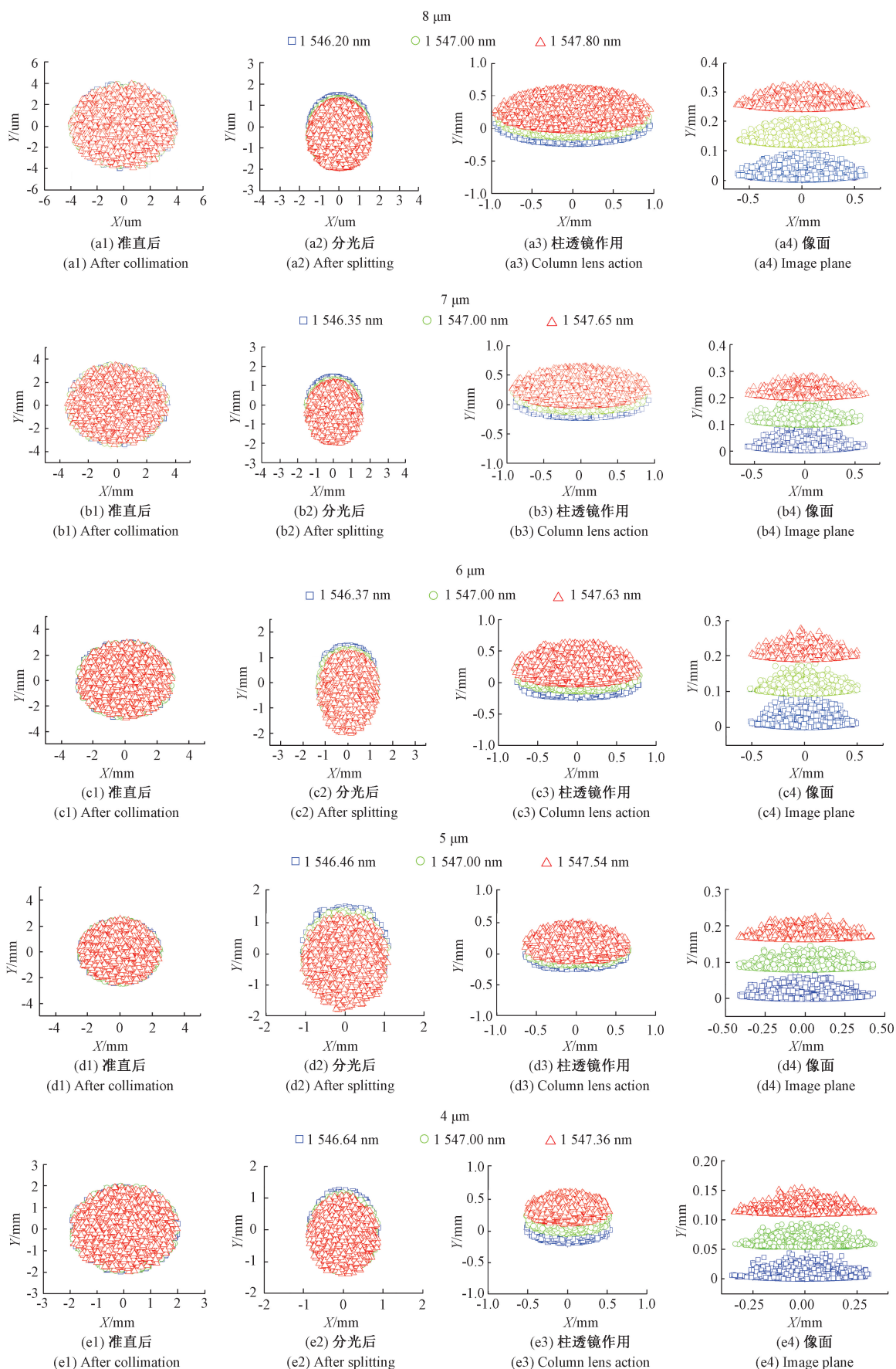


图 6 不同芯径值与各个关键平面光束发散角关系

Fig. 6 Graph of beam divergence angle versus core diameter values at each critical optical plane

如图 7 所示为不同芯径下各个关键光学平面上的成像光斑图。图中横向分别为准直后、光栅分光后、柱透镜作用后和像面上的成像光斑仿真图。纵向为取芯径值递



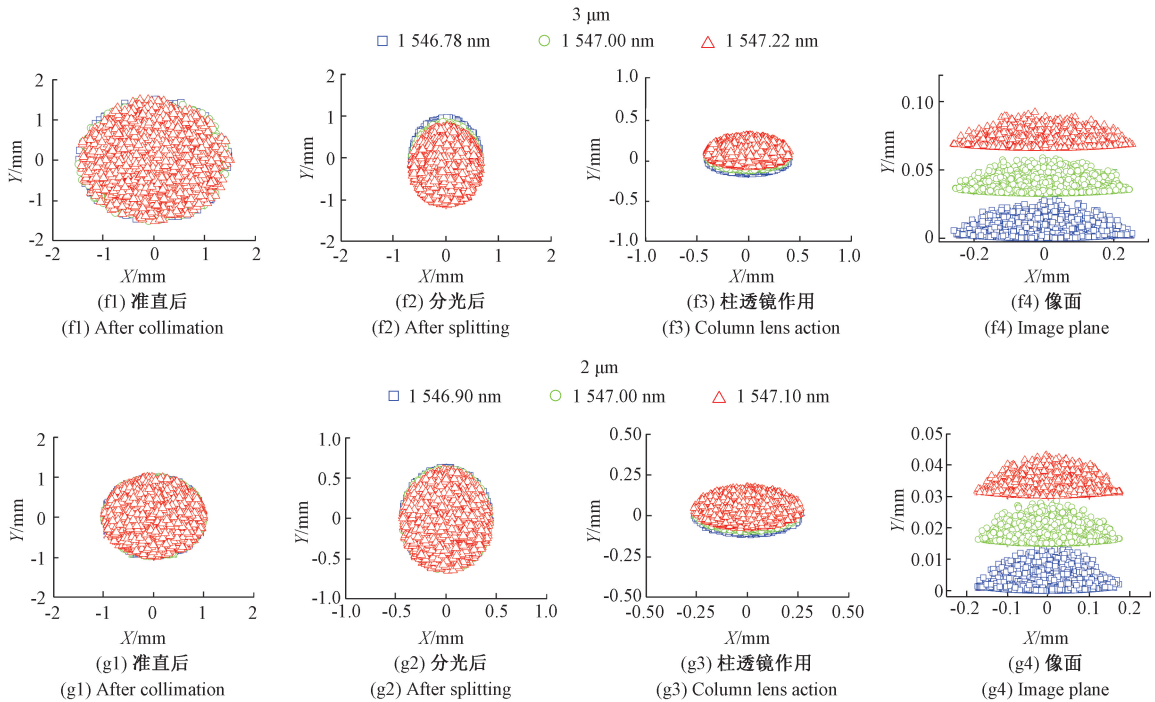


图 7 不同芯径值与各个关键平面成像光斑关系

Fig. 7 Graphs of imaging spot size versus core diameter values at each critical optical plane

减变化步长为 $1\text{ }\mu\text{m}$,由 $8\text{ }\mu\text{m}$ 到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时对应的成像光斑。可以看出复合光束在经过光栅分光、柱透镜作用和光路中传播之后,最终在像面上呈现为没有重合可以完全区分开的光斑图。当对应波长光斑完全分开没有重合时可以认为两段波长形成光斑可以被分辨,形成分开的谱型信号,并以此定义可以区分开的最大波长间隔为光斑分辨率。

根据以上分析,以步长为 $0.5\text{ }\mu\text{m}$ 减少纤芯直径时,系统中心波段分辨率与芯径关系如图 8 所示。可以看出随着光纤端面纤芯直径的减小,分辨率也在逐步提高。当芯径取到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时,分辨率达到 0.1 nm ,相比于常规 $8\text{ }\mu\text{m}$ 芯径的单模光纤作为光阑时,光学系统分辨率提升 8 倍左右。

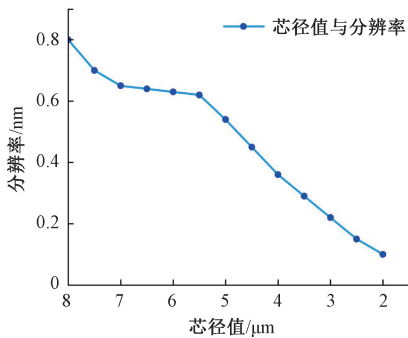


图 8 系统中心波段分辨率与芯径关系

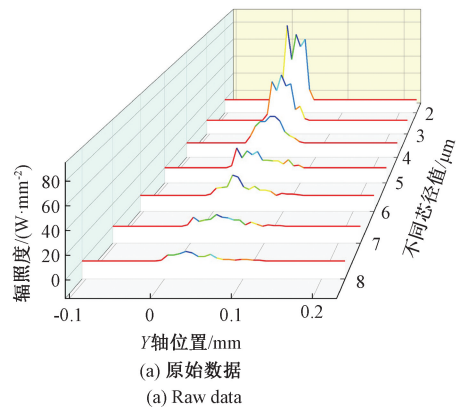
Fig. 8 Resolution of the system's central wavelength versus core diameter

为了研究光纤芯径值对于光学系统光能利用率的影响,模拟分析了芯径值变化与中心波段波长对应像面上的辐照度的相关性。如图 9 所示为取芯径值递减变化步长为 $1\text{ }\mu\text{m}$,由 $8\text{ }\mu\text{m}$ 到 $2\text{ }\mu\text{m}$ 时对应的光学系统像面辐照度曲线图。图 9(a) 为原始数据,图 9(b) 为对数据进行 FFT 低通滤波处理后得到平滑的辐照度曲线分布。

由图 9 可以看出更小的光纤端面可以使得更多的光能耦合进入光学系统,提高了探测器接受面上的辐照度,降低了系统对于探测器的性能要求。

在光学系统中利用效率定义为:

$$\%E = \frac{\sum w_i}{\sum w_j} \quad (7)$$



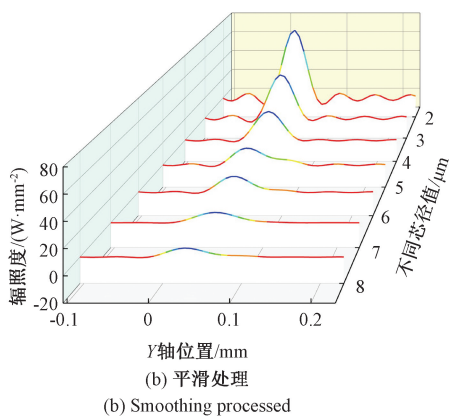


图 9 不同芯径值与像面辐照度关系

Fig. 9 Plot of different core diameter values versus image irradiance

其中, $\sum W_i$ 的为所有未被遮挡光线能量的总和, $\sum W_j$ 的为所有已发射光线的能量总和。使用偏振模式下仿真, 效率计算时兼顾了渐变、光源分布、波长权重以及光学系统中的反射和透射损耗等。

由于光学系统中反射透射等不可忽略的损耗, 当芯径 $< 4.8 \mu\text{m}$ 后光能利用效率为 74.98%, 达到极限值。在芯径缩小到该值之前, 接收面辐照度波动幅度较小, 超过极限值之后辐照度显著提升。关于光纤芯径大小的探测器接收面辐照度曲线如图 10 所示。

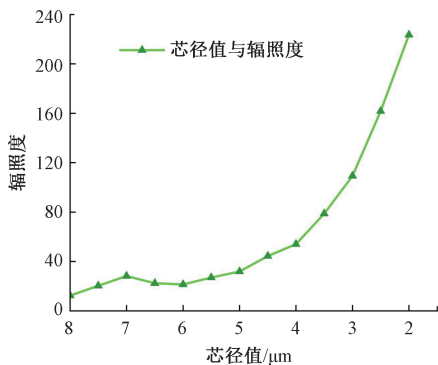


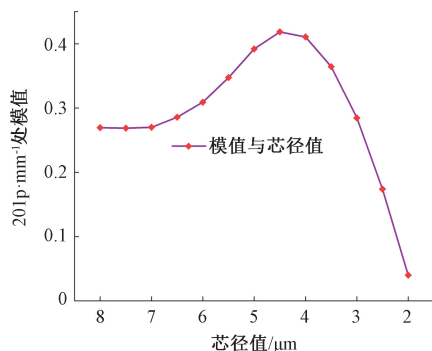
图 10 中心波长接收面辐照度与芯径关系

Fig. 10 Center wavelength receiving surface irradiance versus core diameter

由图 10 可以看出, 随着芯径的减小, 探测器接收面的辐照度显著提升, 更多的光能被耦合进入光路系统, 提升了光能利用率。当芯径为 $2 \mu\text{m}$ 时, 探测器接收面中心波长辐照度达到 223.5 W/mm^2 , 相比于常规 $8 \mu\text{m}$ 芯径的单模光纤作为光阑时, 辐照度有了大幅度提升。

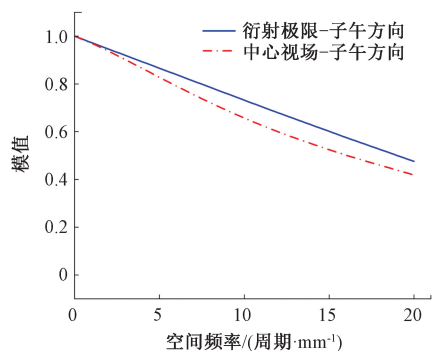
而光学系统传递图像对比度的能力与对光能的利用率并非单纯的单向相关关系, 纤芯芯径过大或过小时不但会影响 MTF 函数在截止频率处的取值大小, 还与 MTF

曲线相对于衍射极限曲线的趋近程度相关。图 11(a) 为不同芯径下通过 ZEMAX 软件仿真得出, origin 优化呈现效果的 MTF 函数在空间频率取 20 lp/mm 时子午方向上的变化规律曲线, 图 11(b) 为所成图像最接近衍射极限时的 MTF 函数图。



(a) 截止频率处 OTF 值与芯径关系

(a) OTF value versus core diameter at cutoff frequency



(b) 图像接近衍射极限时 MTF 图

(b) MTF plot as the image approaches the diffraction limit

图 11 MTF 曲线与芯径值

Fig. 11 MTF curve with core diameter value

由图 11(a) 可以看出, 光路结构确定之后, 芯径大小与 MTF 在截止频率处取值呈抛物线相关, 纤芯直径取 $4.2 \mu\text{m}$ 时成像接近衍射极限如图 11(b) 所示, 成像质量相对于 $8 \mu\text{m}$ 芯径为光阑时显著提升, 在截止频率处 OTF 模值高于 0.4。

3.3 解调分辨率与实时性分析

在解调系统中, 最终光斑成像由接入光纤出光情况直接决定, 较小的光纤芯径能够提供更高的光束密度和更低的传输损耗, 同时也有更高的耦合效率。在柱透镜作用下圆形光斑拉伸为椭圆型, 该光斑短轴方向上的光落在探测器上, 接收面接收后形成光强值不同的一系列像素点上的光点, 进而得到不同的传感光栅的光谱。更小的芯径意味着形成半径更小的光斑, 在同等探测器条件下使用更少的像素数就能得到相同波段范围的光栅谱型特征。图 12 对比了芯径为 8 和 $4.2 \mu\text{m}$ 情况下的成像光斑特征和在探测器上所占用的像素数情况。可以看出

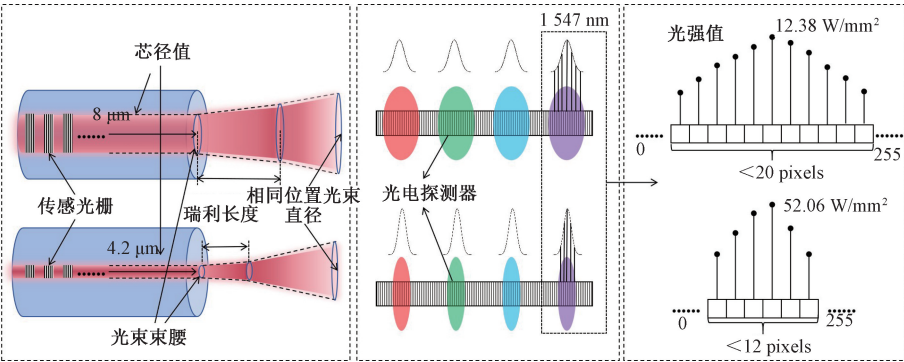


图 12 不同芯径解调对应成像光斑对比

Fig. 12 Comparison of the imaging spots corresponding to the demodulation of different core diameters

使用 4.2 μm 芯径光纤接入解调模块时相比 8 μm 芯径光纤相同波段范围情况下成像光斑占用像素数显著降低,提升了光斑分辨率。

针对如短时间内温度变化、管道流量、结构应变等监测需求来说,细芯光纤光栅解调的实时性即能否在短时间间隔内收集到传感光栅的调制信号至关重要。而涉及这一指标的关键因素之一为光电探测器收集传感光信号的曝光时间长短。当使用光源强度较低或光路中光能损失较大时,探测器接收面光通量低,导致需要更多的曝光时间来满足探测器光信号提取绘制光谱图的要求,从而导致传感系统实时性较差。相应的,在探测器接收面接收到光能满足要求的情况下,缩短曝光时间就能进一步提高传感解调系统实时性,达到更精确监测待测目标参量的目的。文章对比了芯径为 8 和 4.8 μm 情况下的系统曝光时间如表 3 所示。

表 3 不同芯径解调曝光时间对比

Table 3 Comparison of exposure times for demodulation across varying core diameters

芯径值/ μm	光能利用 率/%	辐照度/ ($\text{W} \cdot \text{mm}^{-2}$)	像素数/ pixel	曝光时间
8	43.33	12.38	256	t
4.8	74.98	44.85	256	0.36 t

通过 ZEMAX 仿真,光源作为一个均匀的射线辐射器,考虑渐晕、光源分布、波长权重以及光学系统中的反射和透射损耗,由式(7)可以得到当使用芯径为 4.8 μm 的单模光纤作为解调模块输入时,探测器接受面上未被遮挡光线能量总和与已发射光线能量总和的比值即光能利用率达到 74.98%,整体光路光能损失极低,在光源强度相同情况下辐照度达到 44.85 W/mm^2 。而当接入光纤芯径为 4.8 μm 时光能利用率仅有 43.33%。针对 256 pixels 的线阵光电探测器来说,使用 4.8 μm 芯径时,探测器曝光时间要求为相同条件下 8 μm 芯径要求的

0.36 倍。可以得出在特定应用场景下,针对细芯光纤接入的光谱解调模块能更好的满足监测需求。

4 实验验证

为了验证仿真结果,使用同一光源输入分别将芯径值为 5.3 和 8 μm 的单模光纤作为光谱解调模块的接入光纤进行测试。

为了保证实验中除光纤芯径值以外的参量一致,在显微镜下将两根不同芯径的光纤作粘合处理,使两根光纤的出光端面位于同一平面,保证使用该光纤组作为光谱解调模块光源接入时,两出光端面与分光光栅之间的距离相同。将光纤组固定在三维位移台直角件上,通过调整三维位移台控制光纤组的出光端面,使光纤出光直接经过分光光栅和汇聚镜之后由 CCD 探测器接收。进而分析使用不同芯径时最终的光谱特点,验证分析结果。实验系统如图 13 所示。

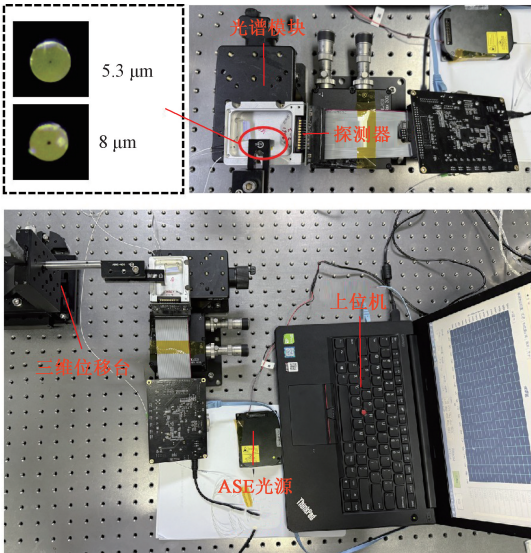


图 13 实验系统

Fig. 13 Experimental system diagram

在光纤端面直接出光导致的发散作用下,解调仪上呈现出一个光源全谱段的上凸型光谱,越接近中央波段处光强值越高。将两不同芯径光纤接入时产生的原始光谱数据进行高斯拟合,得到使用不同芯径参数光纤接入产生的高斯曲线,如图14所示。

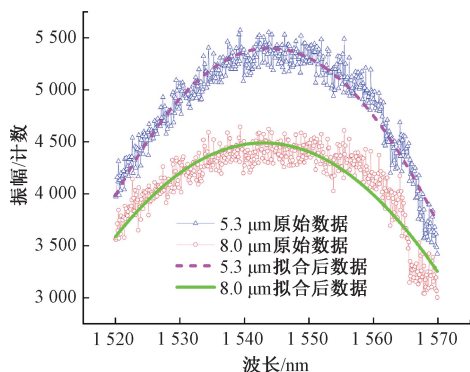


图14 不同芯径接入光谱对比

Fig. 14 Spectral comparison at different core diameter access

拟合曲线方程如式(8)所示。

$$y = y_0 + \frac{A}{w \sqrt{\pi/2}} e^{-2 \frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (8)$$

其中, y_0 为纵向偏移, x_c 为图形中心, w 为图形宽度, A 为图像面积。 $5.3 \mu\text{m}$ 芯径所成光谱曲线 w 值为186.04, A 为 $1.019\,99 \times 10^7$,则曲线高度为43 745.84。 $8 \mu\text{m}$ 芯径所成光谱曲线 w 值为212.25, A 为 $1.037\,47 \times 10^7$,则曲线高度为38 999.66。可以看出在使用细芯径光纤接入光谱解调模块时,最终成像光谱的宽度相较于常规芯径光纤情况下减小,而光谱强度则相应提高。细芯径光纤接入光谱模块时最终在探测器上所成光斑半径更小,而使用更大芯径光纤接入光谱模块时,光斑半径更大,图像更易重叠,分辨率有所降低。并且在使用相同功率光源入射的情况下,细芯径光纤接入光谱模块时光路的光能利用率更高。

5 结 论

本文分析了单模光纤接入光谱分光解调模块时,光纤端面作为光阑情况下纤芯直径大小对于光学系统成像的影响。由于面向细芯光纤光栅的传感解调,文中做了纤芯直径递减实验分析,总结了主要成像指标随芯径值变化的相关规律。系统光斑分辨率与接收面辐照度都随着芯径的减小逐渐提升。当芯径小于 $4.8 \mu\text{m}$ 后接收面光能利用率达到74.98%,到达极限值。芯径减小至 $2 \mu\text{m}$ 时分辨率达到0.1 nm。由于系统成像质量与芯径值并非单向相关关系,因此同时分析了MTF函数曲线在

截止频率处的取值与芯径大小的变化关系,两者呈抛物线相关。在面向实际应用时,考虑传感解调分辨率和实时性要求,对比了不同芯径相同波段所成的光斑在探测器上所占像素数差距,大芯径值对应成像光斑所占像素数明显高于小芯径值对应成像光斑所占像素数。同时总结了不同芯径对曝光时间的影响性分析,当系统光能利用率达到极限时,曝光时间缩减为原来0.36倍。经过实验验证,ASE光源通过不同芯径光纤接入光谱解调模块时,所得光谱结果与仿真结果相对应,印证了上述结论。

在综合考虑生产成本、分辨率要求、探测器灵敏度、成像质量等限制条件下,选用芯径为 $4.2 \sim 4.8 \mu\text{m}$ 的光纤接入光谱分光系统时,分辨率达到0.6 nm,光能利用率达到最高值,成像接近衍射极限。本文研究分析的光纤芯径大小与成像质量关系对小芯径光纤光栅光谱分光解调模块的制作具有实际指导意义。在实际解调应用中,解调模块与传感光栅的性能匹配、关键元件的选择都对成像具有较大的影响,因此如何在满足实际需求的情况下更好的选择和制作传感解调系统值得进一步研究。

参考文献

- [1] 朱云鸿,张旭,娄小平,等. 一种基于光纤光栅传感器的机械手远程操控手套[J]. 仪器仪表学报,2024,45(7):148-155.
ZHU Y H, ZHANG X, LOU X P, et al. An FBG sensor-based glove for remote operation of manipulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(7): 148-155.
- [2] 张俊,陈光辉,倪国新,等. FBG传感技术在飞机机翼动态形变监测中的应用[J]. 仪器仪表学报,2023,44(11):252-260.
ZHANG J, CHEN G H, NI G X, et al. Application of FBG sensing technology in dynamic deformation monitoring of aircraft wings[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(11):252-260.
- [3] YUAN L L, WANG Q, ZHAO Y. A wavelength-time division multiplexing sensor network with failure detection using fiber Bragg grating[J]. Optical Fiber Technology, 2024, 88:103818.
- [4] GUO R Q, GU Y ZH, ZHOU Y B, et al. On-line cure monitoring of phenol formaldehyde resin using embedded fiber Bragg grating sensor[J]. Materials Today Communications, 2024, 39:109114.
- [5] STATHOPOULOS A N, LAZAKIS C, SIMONS I, et al. Evaluation of an erbium-doped fiber ring laser as an edge filtering device for fiber Bragg grating sensor interrogation[J]. Photonics, 2024, 11(5):407.
- [6] SU L, QIU X, GUO R, et al. Long-period grating with asymmetrical modulation for curvature sensing[J].

- Applied Sciences, 2024, 14(5): 1895.
- [7] PENG M, LU ZH Q, TANG Y, et al. Femtosecond laser direct writing of long period fiber grating sensor with high refractive index sensitivity[J]. Optical Fiber Technology, 2023, 81: 103511.
- [8] CHEN F D, HONG G, LUO B B, et al. Bio-chemical sensors based on excessively tilted fiber grating [J]. Photonic Sensors, 2024, 14(3): 240307.
- [9] 杨玉强, 张钰颖, 高佳乐, 等. 一阶光学游标效应的全光纤温度传感器[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(4): 234-240.
- YANG Y Q, ZHANG Y Y, GAO J L, et al. All-fiber temperature sensor based on first-order optical vernier effect[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(4): 234-240.
- [10] 钱牧云, 张姣姣, 魏新园. 光纤光栅柔性触觉传感器的材质识别功能研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 206-212.
- QIAN M Y, ZHANG J J, WEI X Y, et al. Research on material recognition function of fiber bragg grating flexible tactile sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 206-212.
- [11] SHILAR A F, GANACHARI V S, PATIL B V, et al. Exploring the potential of promising sensor technologies for concrete structural health monitoring[J]. Materials, 2024, 17(10): 2410.
- [12] 周龙, 宋树祥, 杨军, 等. 基于 VMD-SVD 的拉曼分布式光纤测温系统降噪方法[J]. 电子测量技术, 2023, 46(12): 172-177.
- ZHOU L, SONG SH X, YANG J, et al. Noise reduction method of Raman distributed optical fiber temperature measurement system based on VMD-SVD[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(12): 172-177.
- [13] 吴婧仪, 周哲海, 赵爽, 等. 基于双光栅和柱透镜的高分辨率近红外微型光谱仪[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(4): 1144-1150.
- WU J Y, ZHOU ZH H, ZHAO SH, et al. High-resolution near-infrared micro-spectrometer with dual gratings and a cylindrical lens [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(4): 1144-1150.
- [14] JIAO D, REN J N, XIA J B, et al. Wavelength demodulation technique for serial WDM fiber Bragg grating sensors based on light gated recurrent unit neural network and CCD interrogator[J]. Optical Engineering, 2024, 63(3): 038101.
- [15] PANG Y J, YAO M L, LIU S. Grating multiplexing structure based high-resolution infrared spectrometer[J]. Infrared Physics and Technology, 2020, 104: 103148.
- [16] ABBAS M, JAHROMI K, NEMATOLLAHI M, et al. Fourier transform spectrometer based on high-repetition-rate mid-infrared supercontinuum sources for trace gas detection[J]. Optics Express, 2021, 29(14): 22315-22330.
- [17] JACEK P, KAMIL B, NATALIA K, et al. Optical strain sensor with dual fibre Bragg grating topology[J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 55(5): 453.
- [18] CHEN J, LI X T, CHU Q H, et al. An ultrahigh-resolution spectrometer using parallel double gratings[J]. Results in Physics, 2023, 45: 106258.
- [19] GUO X, YU D F, PAN Q F, et al. The correction of keystone distortion in czerny-turner spectrometer using freeform surface[J]. Photonics, 2024, 11(8): 750.
- [20] EGOROVA O N, ZHURAVLEV S G, MEDVEDKOV O I, et al. Spectrally multiplexed bragg gratings in a multicore optical fiber with seven different cores for directional curvature measurements[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 73: 103031.
- [21] WEN SH, XUE X Y, WANG SH, et al. Metasurface array for single-shot spectroscopic ellipsometry[J]. Light: Science & Applications, 2024, 13(1): 88.

作者简介



邢宇航, 2022 年于沈阳航空航天大学获得学士学位, 现为北京信息科技大学在读研究生, 主要研究方向为光纤传感器和光电系统。
E-mail: chrisxyh@hotmail.com

Xing Yuhang received his B.Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2022.

He is currently a graduate student at the Beijing University of Information Science and Technology. His main research interests include optical fiber sensor and optoelectronic systems.



李红 (通信作者), 2009 年于河北工业大学获得学士学位, 2012 年于北京信息科技大学获得硕士学位, 2016 年于合肥工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为光纤传感技术、仪器科学与精密测量等。

E-mail: lihong@bistu.edu.cn

Li Hong (Corresponding author) received her B.Sc. degree in 2009 from Hebei University of Technology, received her M.Sc. degree in 2012 from Beijing Information Science and Technology University, and received her Ph.D. degree from Hefei University of Technology in 2016. Now she is an associate professor in Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include optical fiber sensing technology, instrument science and precision measurement