

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.03.09

基于傅里叶频谱的光纤扰模性能评价方法

逢昱宸^{1,2,3}, 彭子夫^{1,2,3}, 耿涛^{1,2,4}, 孙伟民^{1,2,4}, 严云翔^{1,2,3,4}

(1. 哈尔滨工程大学 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工程大学 海洋光子材料与器件物理工业和信息化部重点实验室, 哈尔滨 150001; 3. 哈尔滨工程大学 青岛创新发展中心, 青岛 266000; 4. 哈尔滨工程大学 物理与光电工程学院 先端光子学研究所, 哈尔滨 150001)

摘要: 光纤扰模技术用于高分辨率光谱观测可以有效提高视向速度测量精度, 为搜寻类地行星等前沿科学问题的研究提供了有利工具。当前光纤传输产生的模式噪声对高分辨率光谱仪的影响已不可忽视, 如何通过出射光场的模式散斑图直接分析光纤扰模效果成为重要课题。针对此问题, 构建了一种基于傅里叶频谱的光纤扰模性能评价方法, 通过二维傅里叶频谱分析和图像对比度及可见度的计算, 对不同光纤的出射散斑图进行了对比分析。结果证实该方法更加普适、统一、无差别化, 为评价光纤扰模效果的准确性和有效性提供了重要的方法支持。

关键词: 光谱仪; 望远镜; 成像; 视向速度; 图像处理

中图分类号: P111.4 **文献标识码:** A

1 引言

在现代天文探测中, 通过搜寻位于宜居带中的类地行星并研究其大气成分, 以搜寻地外生命, 是目前天文学研究的热门话题。近年来, 使用基于多普勒频移原理的视向速度测量法发现的行星数量仅次于凌星法。目前视向速度的短期 (101 min) 测量精度达到了 1 cm/s 量级^[1], 相比于围绕类日恒星、位于宜居带内的类地行星引起的约 9 cm/s^[2] 的视向速度信号, 锁模激光器天文光梳系统的测量精度可以达到要求, 但无法保持一年以上的测量时间。而且, 如此高精度的天文光梳系统, 由于其制造的复杂性, 目前只有德国门罗系统公司对外出售, 并且该光梳用于不同的光谱仪所达到的实际测量精度也不同, 于是非常有必要提高光谱仪测量精度以提升视向速度测量精度。

为了提高光谱测量的准确性, 以保证视向速度的测量精度, 光纤被用于天文光谱仪中, 对望远镜收集到的光进行传输。但是, 在使用多模光纤传导相干光时, 由于不同模式间的

收稿日期: 2024-09-08; 修回日期: 2024-10-22

资助项目: 国家自然科学基金 (12103015)

通讯作者: 严云翔, yxyan@nao.cas.cn

相互干涉, 光纤出射近场图中会出现明暗相间的激光散斑图案^[3, 4]。我们在实验过程中还发现, 在非相干的白光照射下, 光纤的近场图中也会出现类散斑图案^[5], 并同样表现出光纤长度依赖性。光纤扰模技术可以有效抑制以上两种散斑图案的产生, 提高视向速度测量精度。由于单根圆形光纤的扰模性能有限, Chazelas 等人^[6]在 2010 年测试了一种多边形截面的光纤, 两年之后 Spronck 等人^[7]和 Feger 等人^[8]也进行了多边形光纤和圆形光纤远近场的光强分布对比实验, 证明了多边形光纤具有更优越的扰模特性。

一般情况下, 我们会从光纤的近场和远场两方面综合衡量光纤的扰模效果, 其中, 近场评价扰模性能的方法大概可以分为以下三种。第一种方法是扰模增益系数 (scrambling gain, SG) 近场扰模性能的经典度量方法, 其最初定义是检测器输入处的星光横向位移与光谱仪中点扩散函数 (point spread function, PSF) 的位移之比^[9], $SG=(d/D)/(f/F)$ (d 是星光的位移, D 是光纤的直径, f 是 PSF 的位移, F 是 PSF 的半高全宽)。然而现实观测中的入射位移 d 是不断变化的, 所以研究者们认为一系列连续变化的结果应该比一个数值 SG 更具有说服力, 于是会同时提供质心漂移图来一起评价扰模效果^[6, 10, 11]。第二种常见方法是绘制强度分布曲线, 即根据过图片质心的单像素切片做出一维强度分布曲线图^[12, 13], 通过分析曲线图的平滑程度和波动情况来评价扰模效果。最后一种是新兴的方法, 基于傅里叶功率谱的图像分析法, 即通过对出射近场光斑图进行二维傅里叶变换得到图片的功率谱密度, 过图片中心点画出径向平均功率谱来分析评价扰模效果^[14, 15]。

然而, 在使用上述方法验证异形光纤扰模性能的实验中, 我们发现了扰模增益和质心偏移的不对称性。于是受第三种方法的启发, 本文提出了一种基于傅里叶频谱的光纤扰模性能评价方法。通过对出射近场光斑图进行二维傅里叶变换, 再旋转平均得到归一化频谱图; 然后分析比较不同光纤之间的频谱曲线, 同时计算经低通滤波处理后的图像对比度及可见度, 并进行量化评价。相较于之前的方法, 本文所提出的方法对图像的处理更加统一化和综合化, 可以有效避免偶然性, 保证了光纤扰模效果评价的准确性和有效性。

2 实 验

异形光纤扰模法^[16-19]通过改变光纤纤芯形状, 打乱纤芯内光线的传播路径来实现模态的重新分布, 从而达到扰模的效果。为了验证异形光纤的扰模提升效果, 本文搭建了一套扰模测试光学系统, 既可以模拟和检测入射光斑在光纤端面的不同位置进入以模拟望远镜系统的入射偏移, 同时也可以对光纤出射近场的光斑图进行采集。

2.1 测试光纤

实验测试了三种形状的光纤, 即圆形、方形和八边形光纤, 其参数如下。

(1) 圆形阶跃多模光纤 (circular-core step-index multimode fiber, 下文使用 SI 代表) 的纤芯直径为 105 μm , 包层直径为 125 μm , 数值孔径 (numerical aperture, NA) 为 0.22。

(2) 方形阶跃多模光纤 (square-core step-index multimode fiber, 下文使用 SQ 代表) 的纤芯尺寸为 100 $\mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$, 包层尺寸为 330 $\mu\text{m} \times 330 \mu\text{m}$, NA 为 0.22。

(3) 八边形阶跃多模光纤 (octagonal-core step-index multimode fiber, 下文使用 OCT 代表) 的纤芯直径为 $200\text{ }\mu\text{m}$, 包层直径为 $660\text{ }\mu\text{m}$, NA 为 0.22。

2.2 测试平台

为测试不同类型的光纤扰模效果, 我们设计搭建了扰模测试光学系统, 其光路如图 1 所示。该系统可采用不同种类激光或 LED 光源作为入射源模拟星光信号, 入射光斑经测量光纤端面反射后, 通过分束立方体进入端面观测成像系统, 以实时监测入射光斑的偏移情况。近场检测装置由可调倍率远心镜头和高精度相机 (4024×3036) 组成, 用来采集出射近场的光斑图像。

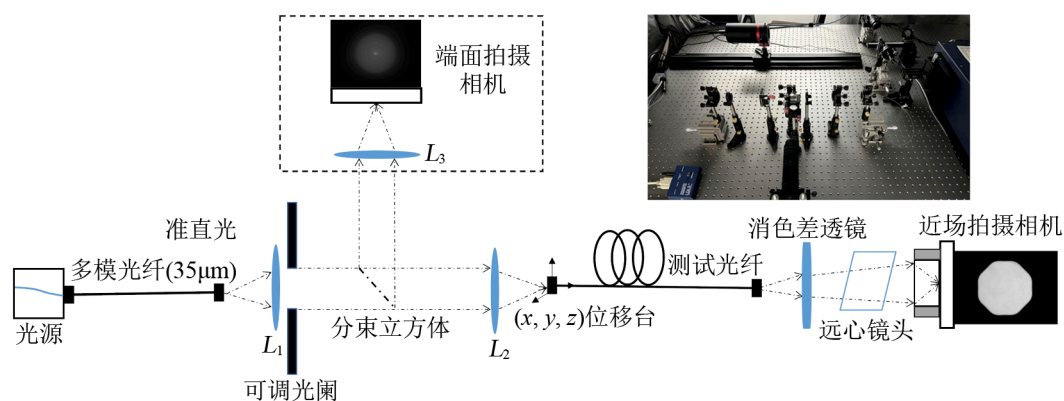


图 1 实验测试光路图

2.3 实验结果

我们采用的光路系统如图 1 所示, 利用波长为 650 nm 的红色激光和非相干 LED 光源, 分别得到了两种光斑图。图 2 为 650 nm 的激光光源得到的出射光斑图, 图 3 为非相干 LED 光源入射时得到的光斑图, 两图仅展示了光源在光纤中心入射时的结果。每张图中从上到下分别为圆形、方形和八边形光纤, 从左到右依次为 0.5 m 、 1 m 、 2 m 、 5 m 的光纤长度。

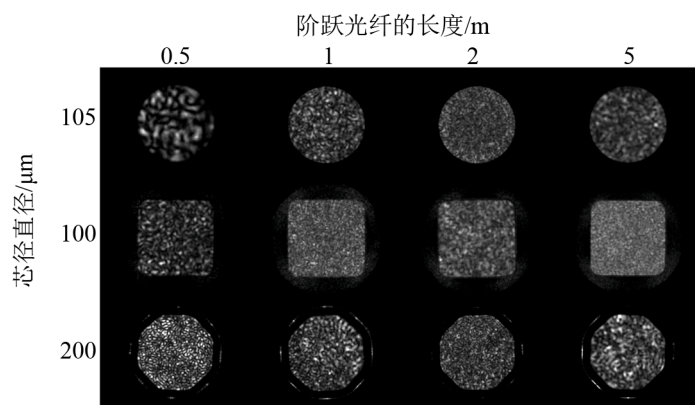


图 2 650 nm 激光入射下的光纤近场图

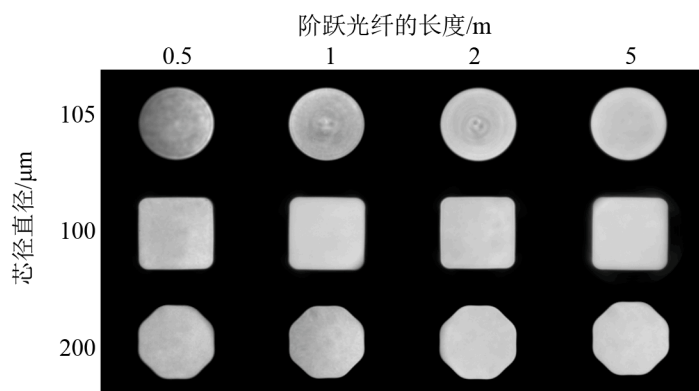


图3 LED光源入射下的光纤近场图

从图2中可以看到非常明显的激光散斑模式噪声的存在,散斑的大小和强度随光纤长度的增加有所减小,并且多边形光纤的散斑更小也更微弱。

图3是在非相干LED光源的入射下发现的新现象,由于类似激光散斑模式噪声,故称之为“模式图案”^[5],可以看到这种现象也有类似的光纤长度依赖性。至于图3中1 m和2 m的圆形光纤中心区域的特殊图案,我们将其归因于光纤端面的抛光处理过程。

2.4 数据处理

2.4.1 质心偏移

为模拟星光信号的偏移效应,我们在光纤入射端采用多维位移台,使入射光斑在光纤端面上实现 x 轴和 y 轴两个方向位移控制。移动步长为光纤直径的10%,每次移动7个位置(包含原点),同时采集光纤的出射近场图。由于位移台由人工调节,所以每次移动存在微小的手动误差。为降低随机噪声,我们在每个位置连续采集10幅图片进行叠加,在保持同一个人位置固定的情况下,在每个方向重复进行3次独立测量,以提高结果的准确性。

首先,我们使用最经典的分析方法——质心漂移图和扰模增益计算来处理实验所得的近场光斑图。结果分别如图4和图5所示,其中每张图片上方3个子图为沿 x 轴偏移所得结果,下方3个子图为沿 y 轴偏移所得结果。横坐标统一为相对入射偏移,代表光源入射偏移量与测试光纤直径的比值,图4纵坐标表示光纤近场出射图的质心偏移量,图5纵坐标表示扰模增益系数SG,误差棒为3次重复测量结果之间的误差。

从折线图4中可以明显看出,出射近场的质心偏移量与相对入射偏移量并不是线性关系,即SG相对于原点分布是不对称的,如图5所示。实际上,早在2010年,Avila等人^[20]在实验中就发现出射图分布是不完全对称的,并在2022年^[21]更加明确提出SG相对于原点入射情况下分布不对称,以及近场光斑图沿入射偏移方向会有不同的改变且与光纤路径的形状有关。叶慧琪等人^[16]也在测量过程中发现,出射近场的质心漂移量与入射位置的偏移量并不是线性关系。更早的研究^[22]将其归因于慧差的产生,并提出了入射光源角度的影响大于偏移位置的影响等结论。基于以上学者们的发现以及我们的实验结果,可以确认:使用质心漂移图和扰模增益系数SG的经典评价方法会导致测量结果的不对称性以及不确定性。

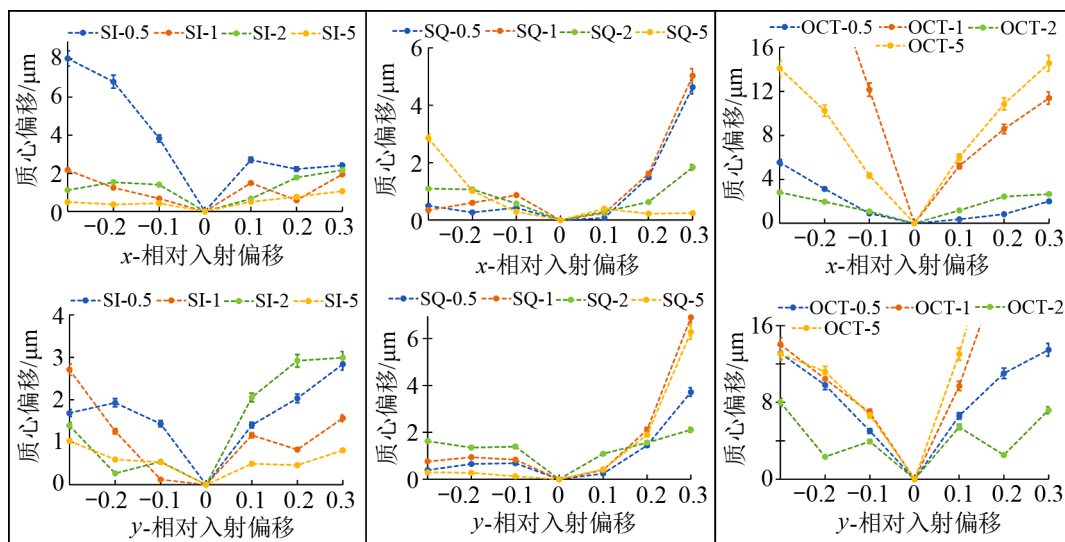


图4 3种光纤的质心漂移图

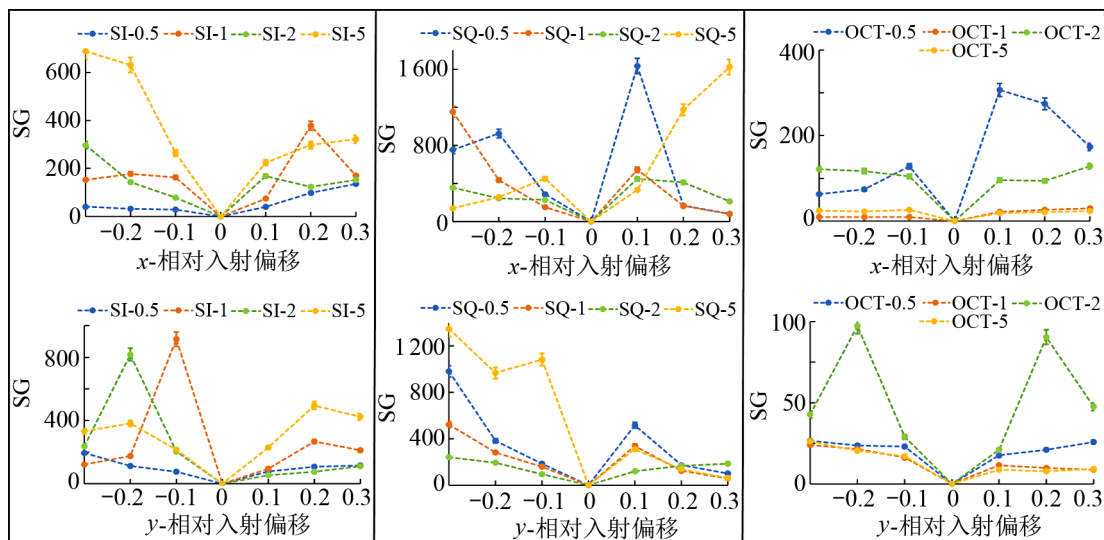


图5 3种光纤的SG散点图

这种结果会直接影响光纤近场与光谱线成像关系的光谱仪。

在具有长期稳定性和高视向速度测量精度的高分辨率光谱仪中, 光纤本身的扰模特性可以在传输过程中将光谱仪与望远镜所处外界环境的多种变化条件(如温度、压力和望远镜位置等)进行解耦, 并同时保证光谱仪输入光源的稳定性和均匀化。光纤光谱仪将传输光纤的输出端直接成像到检测器上, 光纤输出的微小变化即为像平面的微小变化, 从而表现为光谱线的位移或形状的变化。因此, 当光源在光纤的入射端进行方向相反、距离相同的对称

偏移时, 光纤输出端图像理论上应该产生有相似对称性的质心偏移, 并得到几乎相同的扰模增益系数。但我们通过验证实验却得到了并不对称的结果, 这会使光谱线出现不同程度的位移和形变, 导致在光谱定标时不同区域的光谱信号产生的误差程度不一, 使得定标工作困难, 或者导致光谱测量结果在不同次测量中难以重复, 增加了测量的不稳定性等问题。

除去结果不对称的问题以外, 我们从计算结果中还发现, 与圆形光纤的质心偏移相比, 多边形光纤的扰模性能似乎并没有明显的提高, 这样的计算结果与图片的直接形貌学特征并不相符。我们推测这可能是光纤表面的不均匀性和拍摄相机灵敏度的不均匀性导致, 因此, 仅仅通过质心偏移和扰模增益 SG 来评价光纤的扰模效果, 以及由其导致的光谱仪中谱线的偏移和变形, 并不全面。

2.4.2 可见度分析

为了减少多次处理产生的误差叠加, 我们对收集到的光斑图直接处理分析, 于是提出了另一种扰模效果的量化方式——计算对比度和可见度。考虑到我们的研究重点集中在大面积的模式图案上, 为避免端面抛光处理过程所导致的中心处特殊图案对计算结果的影响, 我们在整个光斑分布的子集中计算了对比度和可见度, 取样方法如图 6a) 所示。在图 6b) 中, C 代表对比度, V 代表可见度。对比度是图像灰度值数据的标准差与平均值之比, 可见度是图像中灰度值的最大值与最小值的差和之比; 两者都可表现一幅图片的明暗差异, 差异范围越小代表光斑图的亮暗对比越小, 模态散斑越弱, 光纤扰模效果越好。

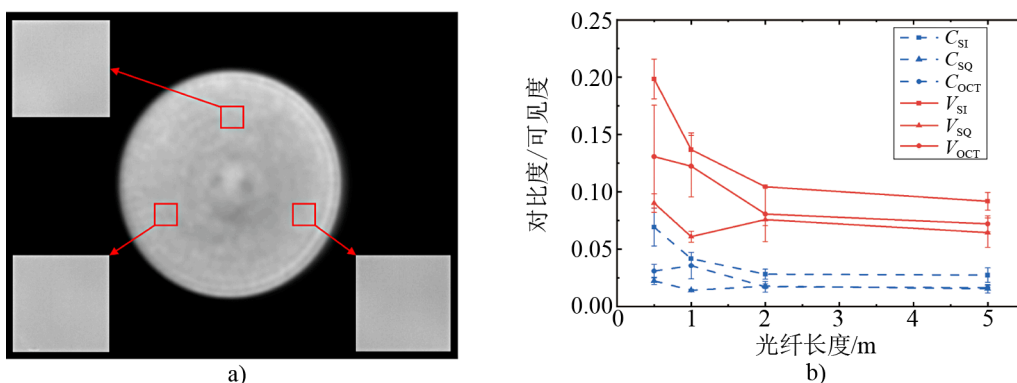


图 6 a) 光斑图子集的取样方法; b) 图 3 中光斑图的对比度和可见度

图 6b) 展示了 3 种不同光纤的对比度和可见度的计算结果, 可以看到多边形光纤的对比度和可见度均小于圆形光纤, 证明多边形光纤的模态散斑更少, 扰模效果更好。并且随着光纤长度的增加, 对比度和可见度均有所下降, 再次证明了模式图案的长度依赖性。但是, 图中的误差棒在某些点处较大, 说明这种人工随机取样的方法依旧存在一定的偶然性。

3 基于傅里叶频谱的散斑分析方法

第2章中使用的两种扰模评价方法都存在较大的随机性和偶然性, 我们想要找到一种更加普适的处理方法并且集中于模态变化的分析。于是, 我们首先结合二维图像傅里叶变换的空间频率谱线进行定性分析, 再使用对比度和可见度进行定量计算。

3.1 傅里叶频谱分析

首先我们将实验图进行强度归一化处理, 以保证每张图在时间域上具有相同的能量; 然后进行二维傅里叶快速变换 (2D fast Fourier transformation, 2D FFT)。变换后得到的二维频谱图将能量强度分解为来自二维不同空间频率的单独贡献^[23], 其中明暗不一的亮点表示原图中某像素点与相邻点灰度值差异的程度 (灰度值梯度的大小), 即该点空间频率的大小。为了将不同光纤的频谱图差异更为清晰直观地表现出来, 我们将二维空间频率图像旋转平均, 以在一维空间频率图上得到归一化频率。我们使用双线性插值的方法, 将每张频谱图旋转 1° , 一共旋转 179 次 (频谱图为轴对称, 所以只需旋转 180° 即可覆盖所有空间频率); 再将这 180 张图片进行叠加后, 取任一方向的数据绘制成一维频谱图。图7展示了3种光纤在4种不同长度下的一维频谱图, 其中纵轴是归一化频率, 横轴是一维空间频率, 实验中用于采集近场图像的高精度相机的像素为 $1.85 \mu\text{m}$, 因此空间频率简单地以 μm^{-1} 为单位, 并且绘制到奈奎斯特频率 ($270 \mu\text{m}^{-1}$) 截止。

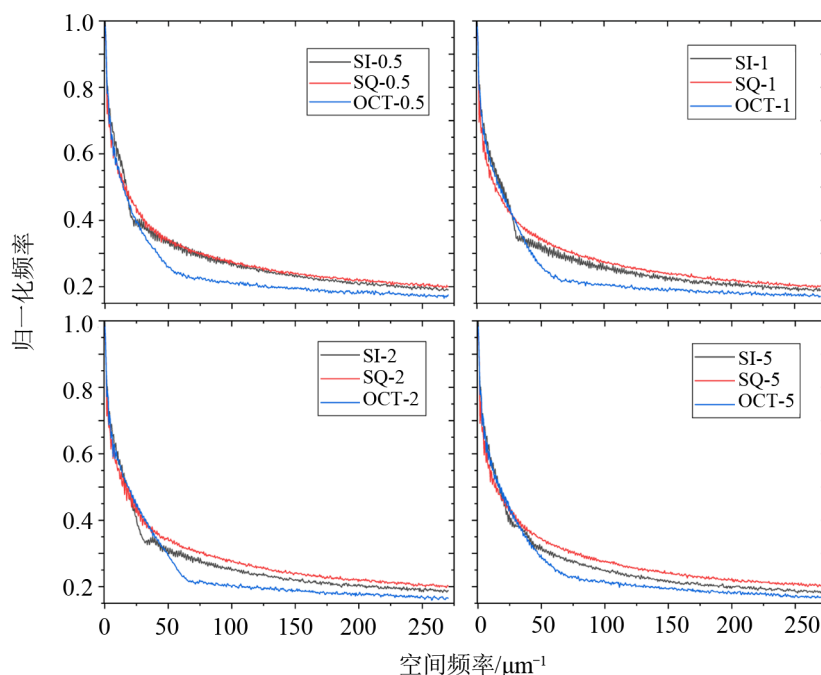


图7 3种光纤在4种不同长度下的一维频谱

在傅里叶频谱图中, 高频成分表征图片灰度值变化剧烈的区域, 高频成分对应的强度表征散斑的强度; 低频成分即为灰度值缓慢变化的区域, 占比越大则代表模式图案越少, 光纤扰模效果越好。各光纤在 4 种长度下的不同频率强度占比如图 8 所示。

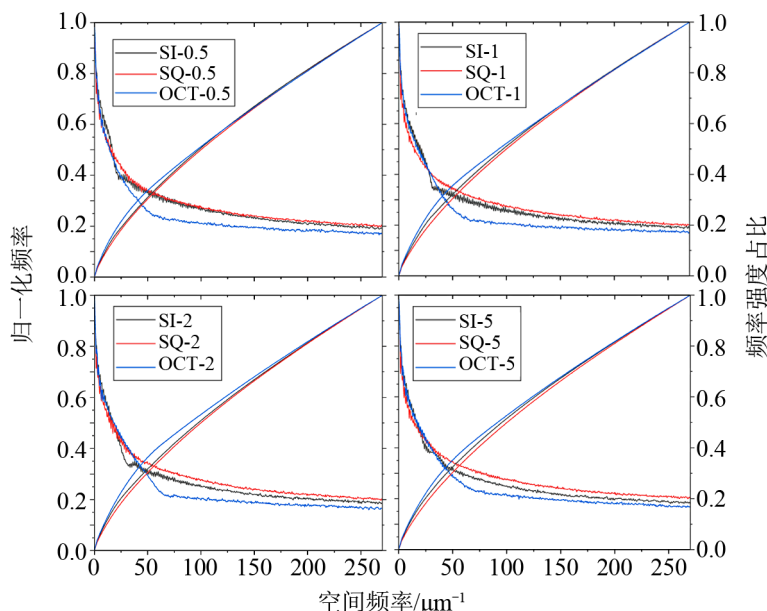


图 8 3 种光纤在 4 种不同长度下的归一化频率谱及各空间频率对应下的强度占比

由图 8 可知, 在空间频率小于 $10 \mu\text{m}^{-1}$ 的区域内各曲线基本重合, 表明不同种类和不同长度的光斑尺寸基本稳定。八边形光纤的低频成分占比明显大于其他两种光纤, 更多的功率强度分布在更低的空间频率上, 说明八边形光纤散斑花样较少, 具有优越的扰模性能。至于曲线后方趋于平缓的部分, 我们可以将其看作高频噪声, 3 种光纤噪声频率的差异我们猜测是由于曝光时间的微小差异导致的。

接下来我们使用相同的图像处理方法, 对 2.4.1 节中入射偏移后得到的实验图进行处理。图 9 以光纤长度为 5 m 的处理结果为例, 从上到下分别为圆形光纤 (SI)、方形光纤 (SQ) 和八边形光纤 (OCT)。每张图中的左侧纵轴表示二维傅里叶频谱旋转平均后的归一化频率, 右侧纵轴表示各空间频率的强度占比。左侧 3 幅图为入射光斑沿 x 轴偏移所得, 右侧 3 幅图为沿 y 轴入射偏移所得, 图例中的百分数代表入射偏移距离占测试光纤直径的比值。

由图 9 可知, 偏移入射曲线与中心入射曲线是不完全重合的, 为了更准确地比较各光纤之间的曲线弥散度差异, 我们计算了曲线之间的均方根 (root mean square, RMS)。将图 9 中每种光纤每个偏移方向的曲线与中心曲线做 RMS 计算, 各偏移方向的 RMS 平均值如表 1 所示, 其中 RMS 与归一化频率一样为无量纲数值。

表 1 中的数据非常清晰地表明圆形光纤的两曲线差异更大, 即入射偏移对圆形光纤的傅里叶频谱曲线影响更大, 而多边形光纤则可以保持较为稳定的状态, 再次验证了其优于

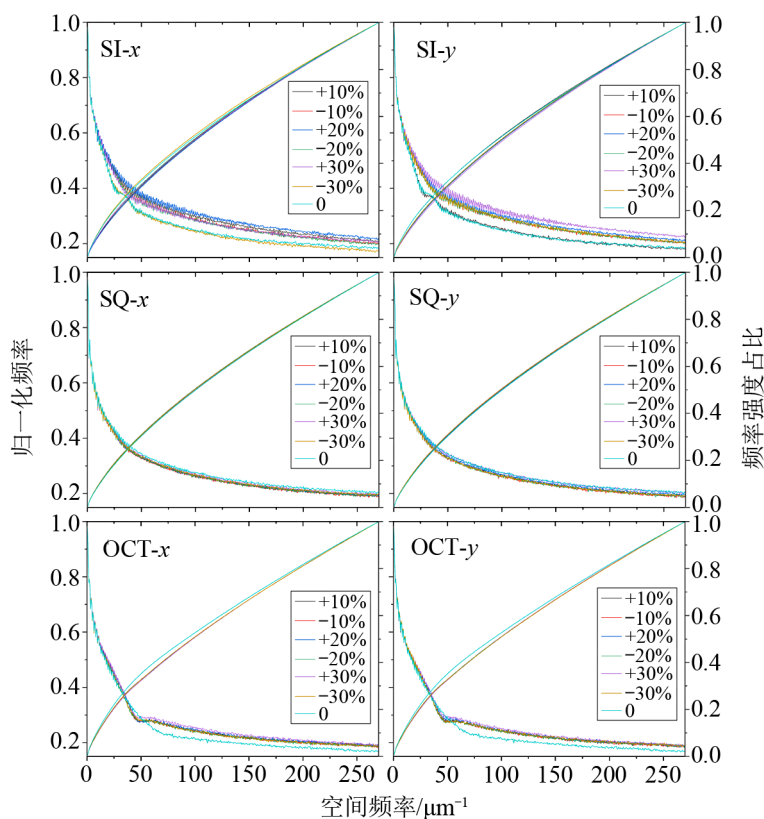


图9 入射偏移下3种光纤的归一化频率谱及各空间频率对应下的强度占比

表1 3种光纤入射偏移曲线与中心曲线的RMS均值

偏移方向	RMS 均值		
	SI	SQ	OCT
x	0.043 9	0.012 5	0.027 5
y	0.049 9	0.012 9	0.025 6

圆形光纤的扰模特性。

3.2 对比度和可见度

频谱图对扰模效果的定性分析具有重要价值。然而，傅里叶频谱图更适用于散斑数目较多和强度起伏较大的场^[23]，而本实验用的LED光源入射产生的模式图案相对较少，导致3种光纤的曲线差异较小。为此，后续将引入对比度和可见度的计算来进行量化分析。在此之前，考虑到图3中某些光纤中心区域由抛光过程产生的特殊图案，我们需要找到一种图像处理的办法将该图案去除或减弱，这样就无需避开中心图案人工提取子集区域进行分析，直接计算整个纤芯部分即可，避免了2.4.2节中3次取样的随机性。

为了滤除光纤中心处的高频特殊图案，我们在3种低通滤波器中，选择了介于滤波尖

锐的理想低通滤波器和滤波平滑的高斯低通滤波器之间的巴特沃斯低通滤波器^[24]。该滤波器有两个可调变量: 截止频率 D_0 和阶数 n ^[25]; 对于二维图像, D_0 是某频域点到中心点的距离, n 越大则滤波器的形状越陡峭, 即振铃现象越明显。我们将相同长度下 3 种光纤强度占比差值最大处的频率作为低通滤波器的截止频率 D_0 , 然后对比我们的傅里叶频谱曲线与巴特沃斯低通滤波器不同阶数的函数曲线, 发现可取阶数为 1~5。于是我们以 0.2 为间隔, 使用不同阶数的低通滤波器对实验图进行重复处理, 最终发现 $n=2.2$ 时的滤波器在保证图片依旧清晰的同时滤波效果最好。接下来使用该巴特沃斯低通滤波器对所有中心入射的实验图进行滤波处理, 计算出的各种光纤的对比度和可见度结果如图 10 所示。滤波之前在光斑图中心处取一个 1 000 pixel×1 000 pixel 的区域, 然后进行计算并得到对比度和可见度, 结果如图 10a) 所示; 图 10b) 给出滤波之后光斑图的对比度和可见度; 图 10c) 给出滤波处理对两数据的优化程度。图例中的 C 代表对比度, V 代表可见度。

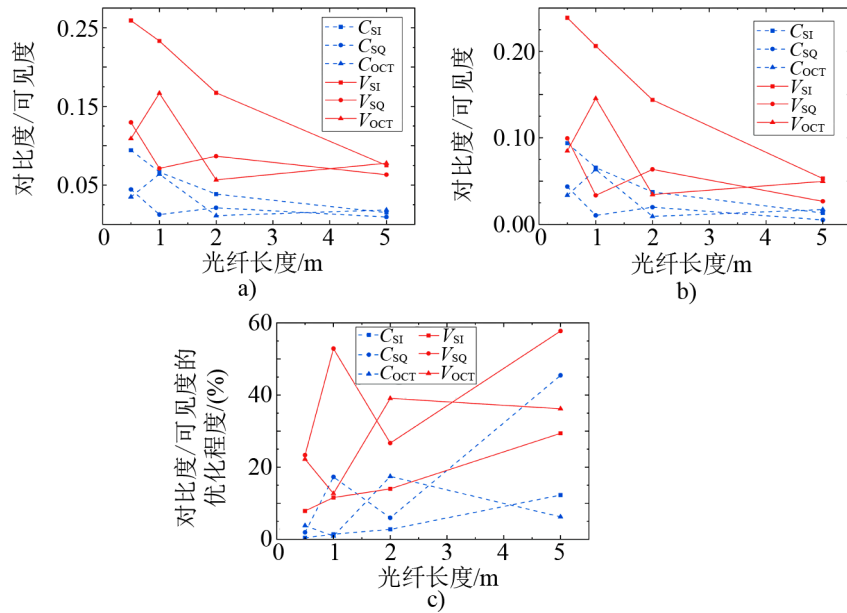


图 10 滤波前后光斑图的对比度和可见度

由图 10 可知, 多边形光纤的对比度和可见度均小于圆形光纤, 长光纤的对比度和可见度均小于短光纤, 并且滤波处理对多边形光纤的提升最明显。各方结果均可证明: 多边形光纤的扰模性能明显优于圆形光纤。使用同样的方法对 2.4.1 节中入射偏移实验的结果进行计算, 图 11 为对比度统计图, 图 12 为可见度统计图, 其中横坐标统一为相对入射偏移, 纵坐标均为无量纲比值。

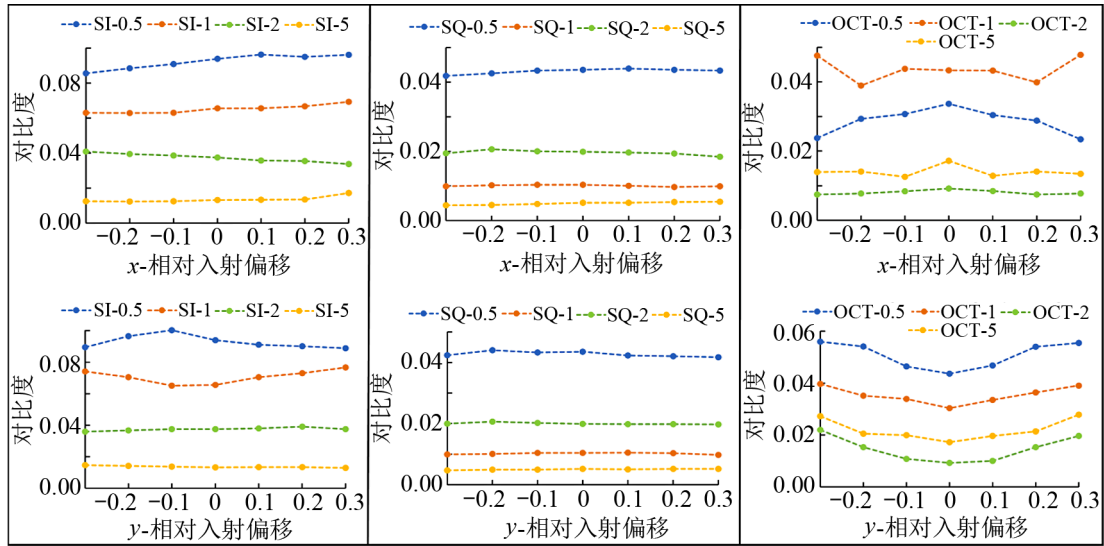


图 11 3 种光纤在 4 种不同长度及不同偏移下的对比度统计

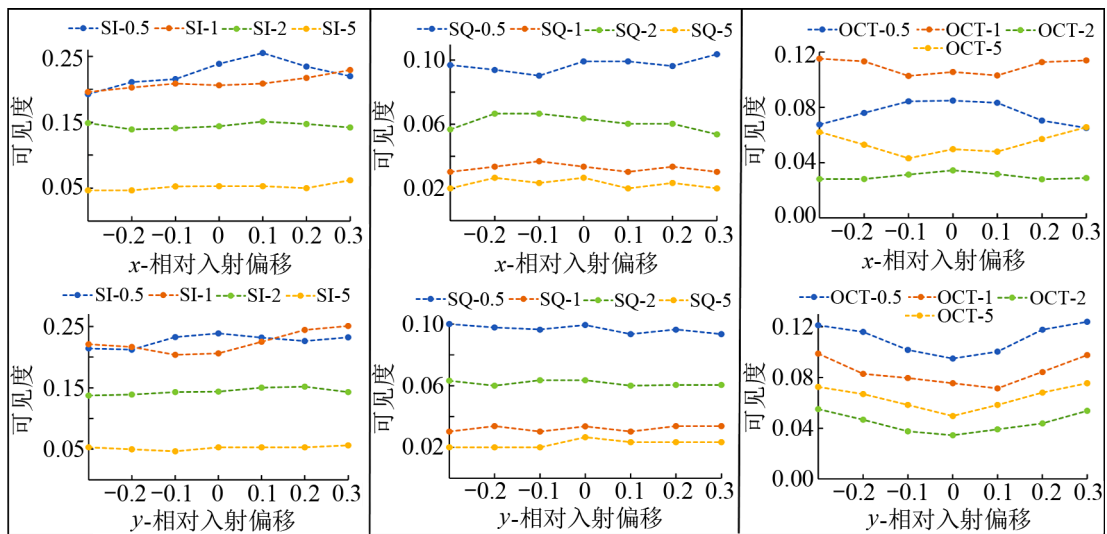


图 12 3 种光纤在 4 种不同长度及不同偏移下的可见度统计

综合图 11 和 12 结果来看, 多边形光纤的对比度和可见度的整体数值明显小于圆形光纤, 多边形光纤的不同长度之间数值差异更小, 从而再次印证了多边形光纤扰模性能更好。此外, 相比于之前的质心漂移(图 4)和扰模增益(图 5), 对比度和可见度具有更好的对称性, 与我们的实验偏移结果更为贴切, 也更具说服力。

由上述实验可知, 无论是傅里叶频谱图的定性分析结果, 还是对比度和可见度的定量计算结果, 都可以较为准确地体现出实际的光场变化和扰模效果差异, 使扰模效果的评价

更为准确和合理, 验证了本文方法的可行性。Stürmer 等人^[10]提到, 近场测量方法与视向速度误差并没有直接关系, 仅对不同光纤或扰模方式之间的比较起作用; 即该方法只能用于不同光纤或不同扰模方式之间的扰模性能的比较, 并不能代替质心偏移和扰模增益系数 SG 而与视向速度误差产生直接联系, 也无法直接提高视向速度测量的精度。我们提出将该方法应用于光谱数据处理前的辅助质心偏移的计算, 通过淘汰由于外界影响 (例如光纤表面均匀性、光学元件的照明依赖性、探测器灵敏度等) 导致光谱线失真和偏移的图片, 最终挑选出最适用于光谱分析及定标的图片。这些图片既可保证稳定的质心偏移和较高的扰模增益系数, 也可以保证较低的对比度和可见度, 同时具备较好的对称性和均匀性。这种在大量数据处理前进行的筛选, 可以减少处理那些外界影响导致的光谱异常图片, 保证被处理数据的质量和结果的可靠性, 有效提高光谱处理效率。

4 总 结

光纤扰模是提升视向速度测量精度的重要技术手段。针对 SG 单性能指标评价中的不对称性和不确定性问题, 本文提出一种基于傅里叶频谱的光纤扰模性能综合评价方法, 同时结合对比度和可见度分析。该方法综合了光纤近场质心偏移的 SG 测量、频谱分析、近场对称性和均匀性等特征对光纤扰模性能进行综合分析评价, 弥补了 SG 测量作为单性能指标评价的稳定性不足, 可以有效避免光纤近场扰模分析中的人为选择偶然性误差, 降低外界环境对扰模性能评价产生的干扰, 实现更加普适、统一、无差别化的扰模性能综合评价, 提升不同扰模方法之间的综合扰模性能对比的可靠性, 为用于高分辨率光谱分析的高性能光纤扰模技术研发提供支撑。

参考文献:

- [1] Probst R A, Milaković D, Toledo-Paón B, et al. NatAs, 2020, 4(6): 603
- [2] Wilken T, Lovis C, Manescau A, et al. MNRAS: Letters, 2010, 405(1): L16
- [3] Frensch Y G C, Bouchy F, Blind N, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX. Canada: SPIE, 2022, 12184: 1634
- [4] 朱玉晗, 贺锋涛, 彭小龙. 激光技术, 2016, 40(01): 122
- [5] Ma Z, Pang Y, Sun K, et al. Optoelectronic Devices and Integration XII. China: SPIE, 2023, 12764: 45
- [6] Chazelas B, Pepe F, Wildi F, et al. Modern Technologies in Space- and Ground-based Telescopes and Instrumentation. United States: SPIE, 2010, 7739: 1458
- [7] Spronck J F P, Kaplan Z A, Fischer D A, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Netherlands: SPIE, 2012, 8446: 1210
- [8] Feger T, Brucalassi A, Grupp F U, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Netherlands: SPIE, 2012, 8446: 1278
- [9] Avila G, Singh P. Advanced optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation. France: SPIE, 2008, 7018: 1636
- [10] Stürmer J, Stahl O, Schwab C, et al. Advances in optical and mechanical technologies for telescopes and instrumentation. Canada: SPIE, 2014, 9151: 1717
- [11] 韩建, 肖东. 光学学报, 2016, 36(04): 81
- [12] Avila G. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV. Netherlands: SPIE, 2012, 8446: 1437

- [13] Osterman S N, Ycas G G, Donaldson C, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy V. Canada: SPIE, 2014, 9147: 1741
- [14] Sirk M M, Wishnow E H, Weisfeiler M, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy VII. United States: SPIE, 2018, 10702: 1948
- [15] 王嘉琦, 许良, 常亮. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 201
- [16] 叶慧琪, 黄凯, 肖东, 等. 光学学报, 2020, 40(6): 0606001
- [17] Han J, Xiao D. AcOpS, 2016, 36: 0406003
- [18] 韩建, 肖东, 叶慧琪等. AcOpS, 2016, 36(11): 1106002
- [19] Bouchy F, Díaz R F, Hébrard G, et al. A&AC, 2013, 549: A49
- [20] Avila G, Singh P, Chazelas B. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III. United States: SPIE, 2010, 7735: 2948
- [21] Avila G, Raskin G, Schwab C, et al. Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IX. Canada: SPIE, 2022, 12184: 1471
- [22] Hunter T R, Ramsey L W. PASP, 1992, 104: 1244
- [23] Hernandez E, Roth M M, Petermann K, et al. JOSA B, 2021, 38(7): A36
- [24] Butterworth S. Wireless Engineer, 1930, 7(6): 536
- [25] Shouran M, Elgamli E. IJRSET, 2020, 9(9): 7975

Scrambling Performance Evaluation Method Based on Fourier Spectrum

PANG Yuchen^{1,2,3}, PENG Zifu^{1,2,3}, GENG Tao^{1,2,4}, SUN Weimin^{1,2,4}, YAN Yunxiang^{1,2,3,4}

(1. Key Lab of In-fibre Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. Key Laboratory of Photonic Materials and Devices Physics for Oceanic Applications, Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 3. Qingdao Innovation and Development Center of Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China; 4. Advanced Photonics Institute, College of Physics and Optoelectronic Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The application of optical fiber scrambling technology in high-resolution spectral observation can effectively improve the accuracy of radial velocity measurement, and provide a favorable tool for cutting-edge scientific problems such as searching for terrestrial planets. At present, the influence of mode noise generated by optical fiber transmission on high-resolution spectrometers is becoming more and more prominent, and how to directly analyze the scrambling effect of optical fiber through the output speckle field has become an important topic. In order to solve this problem, a scrambling performance evaluation method based on Fourier spectrum is constructed, and the output speckle field of different fibers are compared and analyzed by combining 2D Fourier spectrum analysis and calculation of image contrast and visibility. This more universal, unified and non-differentiated method provides an important method support for evaluating the accuracy and effectiveness of optical fiber scrambling effect.

Key words: spectrograph; telescope; imaging; radial velocity; image processing