

# 光纤扰模技术实验研究

叶慧琪<sup>1,2\*</sup>, 黄凯<sup>3</sup>, 肖东<sup>1,2</sup>, 张凯<sup>1,2</sup>, 陈平<sup>3</sup>, 魏儒义<sup>4</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所, 江苏 南京 210042;

<sup>2</sup>中国科学院天文光学技术重点实验室(南京天文光学技术研究所), 江苏 南京 210042;

<sup>3</sup>南开大学电子信息与光学工程学院现代光学研究所, 天津 300350;

<sup>4</sup>中国科学院西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119

**摘要** 照明的不稳定性会引起视向速度测量误差,从而严重限制仪器精度的提高。光纤扰模是提高仪器照明稳定性的有效途径之一。为了给现有高精度色散光谱仪升级及新型高精度视向速度仪器设计提供可靠的实验参考,对单根圆形光纤、单根八边形光纤、圆形-八边形-圆形光纤串接系统、双圆形光纤扰模系统、圆形-八边形混合双光纤扰模系统和双八边形光纤扰模系统的近场和远场扰模性能进行详细的实验研究。实验结果显示:单根八边形光纤较单根圆形光纤具有更好的近场扰模性能,双光纤扰模技术可以有效改善近场和远场扰模性能,双八边形光纤扰模系统能同时具有良好的近场和远场扰模性能。实验研究了球透镜和双透镜两种双光纤扰模系统,球透镜系统通光效率约为 55%,双透镜系统通光效率约为 80%。

**关键词** 光纤光学; 视向速度; 扰模性能; 高色散光谱仪; 照明稳定性

中图分类号 P111

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0606001

## Experimental Investigation of Fiber Scrambling

Ye Huiqi<sup>1,2\*</sup>, Huang Kai<sup>3</sup>, Xiao Dong<sup>1,2</sup>, Zhang Kai<sup>1,2</sup>, Chen Ping<sup>3</sup>, Wei Ruyi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Nanjing, Jiangsu 210042, China;

<sup>3</sup>Institute of Modern Optics, College of Electronic Information and Optical Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;

<sup>4</sup>Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

**Abstract** Radial velocity measurements errors caused by lighting instabilities severely limit the precision improvement in instruments; however, fiber scrambling is an effective method to enhance the stability of instrumental illumination. To provide a reliable experimental reference for the operation of a high resolution spectrograph upgrade and a new high precision radial velocity instrument design, the near field and far field scrambling properties of a single circular fiber, single octagonal fiber, circular-octagonal-circular fiber cascade connection system, double circular fiber scrambler, circular-octagonal hybrid double-fiber scrambler, and double octagonal fiber scrambler were studied in detail. The results showed that the octagonal fiber improved the near field scrambling compared to single circular fiber, the double-fiber scrambler could improve both near field and far field scrambling, and the double octagonal fiber scrambler optimally performed for both near field and far field. Furthermore, the prototypes of the double-fiber scramblers, including ball lens system and twin lens system, were also assessed herein. The throughput was observed to be 55% and 80%, respectively.

**Key words** fiber optics; radial velocity; scrambling performances; high resolution spectrograph; illumination stability

收稿日期: 2019-09-03; 修回日期: 2019-11-12; 录用日期: 2019-11-12

基金项目: 国家自然科学基金(11773044, 11773047)、国家重大科研仪器研制项目(11727806)、中科院国际合作局国际伙伴计划对外重点合作项目(114A32KYSB20160049)、天津市科技计划项目(19YFZCSY00250)

\* E-mail: hqye@niaot.ac.cn

## 1 引 言

天文学家正在努力通过视向速度法来搜索研究地球质量大小的太阳系外行星,然而探测信号的可靠性和行星最小质量的获得取决于视向速度仪器的测量精度。类地球行星在类太阳恒星宜居带内运行可引起视向速度约为 9 cm/s 的信号,这远高于当前视向速度仪器所能达到的精度。然而,照明稳定性引起的测量误差无法通过定标进行校正,这是限制视向速度仪器精度提高的一个重要原因。引起照明不稳定的原因主要有:大气湍流、大气色散、导向误差、孔径遮挡和光学像差<sup>[1]</sup>。

为了解决照明稳定性问题,Heacock<sup>[2-3]</sup>最早提出将光纤用于天文光谱仪中可以提高光谱测量质量的结论。然而,单根圆形光纤扰模性能有限,尤其是远场的扰模性能并不令人满意。之后 Hunter 和 Ramsey<sup>[4]</sup>提出将光纤分成两段,采用一个无焦光学系统,将前一段光纤的远、近场交换后,耦合入后一段光纤,该方法可以解决单根光纤远场扰模性能不佳的问题,但代价是会损失一定量的光,此系统被称作双光纤扰模器(Double-fiber scrambler 或 Double scrambler)。为了满足极端精度(10 cm/s)视向速度的测量要求,在 2010 年左右科学家们提出了一种多边形截面的多模光纤<sup>[5]</sup>,经大量实验测试证明多边形光纤尤其是八边形光纤具有非常优越的近场扰模性能。因此,国际上各视向速度仪器,如 SOPHIE<sup>[6]</sup>、HARPS<sup>[7]</sup>、ESPRESSO<sup>[8]</sup>和 KPF<sup>[9]</sup>等都开始采用或计划采用多边形光纤。文献[7]中提到 HARPS 在 2015 年完成了光纤系统的升级,使用双八边形光纤扰模系统有效地减小了照明不稳定引起的测量误差( $\sim 3$  m/s),配合激光频率梳定标有望长期实现高于 50 cm/s 的视向速度精度。

国内天文学家对大芯径多模光纤的传输特性也进行了一系列研究,中国科学技术大学王森等<sup>[10]</sup>对光纤的焦比退化特性进行了研究,哈尔滨工程大学王静等<sup>[11]</sup>针对光纤环形出射斑的形成机制进行了实验研究,中国科学院云南天文台许良等<sup>[12]</sup>提出一种利用变形镜和摆镜改善光纤输出激光散斑的装置。中国科学院国家天文台南京天文光学技术研究所也一直在发展光纤扰模技术。实验上穆丹丹等<sup>[13]</sup>研究了机械挤压扰模技术,韩建等<sup>[14-15]</sup>对比了圆形、正方形、长方形、八边形光纤和不同截面光纤

串接系统的扰模性能。理论上,叶慧琪等<sup>[16]</sup>分析了入射偏移对圆形光纤环形出射场的影响,并与南开大学合作<sup>[17]</sup>模拟分析了双光纤扰模器的扰模性能,揭示了双光纤扰模器的工作原理。

然而国内光纤扰模目前的研究状况还不足以满足 $<1$  m/s 视向速度精度的要求。为了给现有高色散光谱仪光纤系统升级(如兴隆 2.16 m 望远镜高色散光纤光谱仪(216HRS),现已实现约 6 m/s 视向速度的测量,期望将精度提高到 1 m/s 左右)和新的精度( $<1$  m/s)视向速度仪器光纤系统设计(如中国科学院西安光学精密机械研究所正在研制的基于新型相干色散技术的系外行星探测系统、“十三五”规划的 12 m 光学/红外望远镜的高色散光谱仪和正在推进的西班牙 10.4 m 望远镜 GTC 高分辨率光谱仪)提供可靠的实验参考,本文研究了单根圆形光纤、单根八边形光纤、圆形-八边形-圆形光纤串接系统、双圆形光纤扰模系统、圆形-八边形混合双光纤扰模系统和双八边形光纤扰模系统。获得了不同光纤系统在入射位置偏移和入射孔径遮挡情况下出射的近场质心偏移和远场光强起伏的实验数据,旨在为不同的工程应用提供参考。

## 2 光纤扰模测试系统和光纤扰模系统设计

光纤扰模测试系统如图 1 所示,通过位移台调节入射位置,分别记录出射近场和远场图片,以供后续近场质心分析和远场光强分布分析。光纤扰模测试详细情况参见文献[14]。本研究为了更加全面地分析光纤扰模性能,增加了孔径遮挡测试。为了消除机械漂移和随机噪声影响,提高测试系统自身稳定性,对测试系统和分析方法进行了改进:1)将近场测试和远场测试分离,采用一体化结构,光纤适配器、光学放大系统和测试相机通过光学套筒连接;2)一次采集多帧图片,叠加降低随机噪声,多次重复测试,确保测试结果重复可靠。

研究用的 6 种光纤扰模系统,如图 2 所示,分别是 1)单根圆形光纤(single cir-fiber)、2)单根八边形光纤(single oct-fiber)、3)圆形-八边形-圆形光纤串接系统(cir-oct-cir fiber)、4)双圆形光纤扰模系统(double cir-fiber scrambler)、5)圆形-八边形混合双光纤扰模系统(cir & oct double fiber scrambler)和 6)双八边形光纤扰模系统(double oct-fiber

scrambler)。其中圆形光纤芯径  $100\ \mu\text{m}$ ，是 216HRS 使用的光纤，从 Polymicro 公司采购。八边形光纤内切圆直径为  $100\ \mu\text{m}$ ，从 Ceramoptec 公司采购。

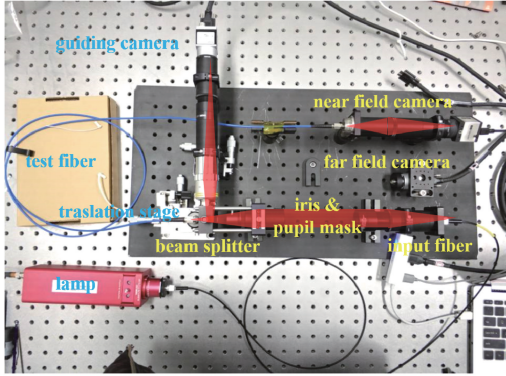


图 1 光纤扰模测试系统

Fig. 1 Setup of fiber scrambling test

圆形-八边形-圆形光纤是将一段八边形光纤插入到圆形光纤中间，圆形-八边形光纤端面理论几何失配约 6%。

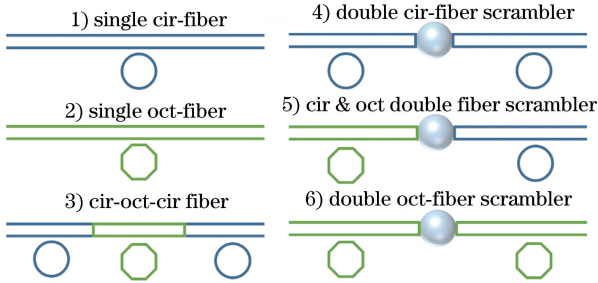


图 2 光纤扰模系统示意图。1) 单根圆形光纤；2) 单根八边形光纤；3) 圆形-八边形-圆形光纤串接系统；4) 双圆形光纤扰模系统；5) 圆形-八边形混合双光纤扰模系统；6) 双八边形光纤扰模系统

Fig. 2 Schematic of fiber scrambling system. 1) Single cir-fiber; 2) single oct-fiber; 3) cir-oct-cir fiber; 4) double cir-fiber scrambler; 5) cir & oct double fiber scrambler; 6) double oct-fiber scrambler

双光纤扰模系统中可以采用不同的光学设计实现远、近场交换的目的，由于球透镜系统具有系统简单易实现、结构紧凑稳定和通光效率高等优点<sup>[18]</sup>，因此选择球透镜系统作为实验系统。球透镜双光纤扰模系统如图 3 所示， $d$  表示入射光纤直径（出射光纤直径与入射光纤一致）， $D$  表示球透镜直径， $f_{\text{EFL}}$  表示球透镜有效焦距（EFL）， $f_{\text{BFL}}$  表示球透镜后焦距（BFL）。为满足交换远、近场的条件，将两段光纤放置在球透镜前、后焦面。根据球透镜公式，可得

$$f_{\text{EFL}} = \frac{nD}{4(n-1)}, f_{\text{BFL}} = f_{\text{EFL}} - \frac{D}{2}, \quad (1)$$

$$D = \frac{2d(n-1)}{n} \sqrt{\frac{1}{NA^2} - 1} \approx \frac{2d(n-1)}{n \times NA}, \quad (2)$$

式中： $n$  为材料折射率； $NA$  为光纤的数值孔径。当材料折射率  $n=2$  时， $f_{\text{BFL}}=0$ ，光纤端面刚好与球面接触时为理想装配。为了不引起额外的焦比退化和耦合损耗，球透镜直径  $D$  满足(2)式。本研究参考 216HRS 光纤参数：入射焦比  $F/4$ ，光纤直径  $d=100\ \mu\text{m}$ ，理想球透镜直径  $D \approx 0.8\ \text{mm}$ 。

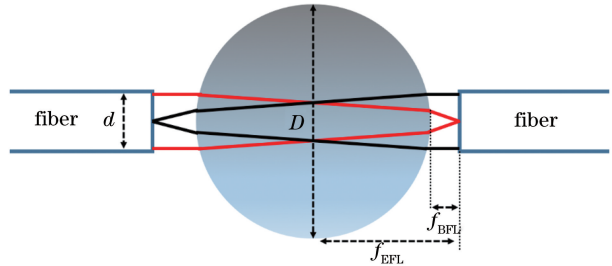


图 3 球透镜双光纤扰模系统示意图

Fig. 3 Schematic of ball lens double scrambler

### 3 扰模性能测试

光纤扰模性能测试可分为近场测试和远场测试，近场测试着重分析近场光斑质心漂移，远场测试着重分析远场光斑强度分布变化。细分为：1) 入射位置变化引起的近场变化即近场扰模增益 (SG) 测试，2) 入射位置变化引起的远场变化，3) 入射孔径遮挡引起的近场变化，和 4) 入射孔径遮挡引起的远场变化。

入射位置变化引起的近场变化最受大家关注，原因是视向速度测量时星像的抖动和望远镜跟踪误差会直观地引起入射位置移动，而光纤出射近场与探测器上光斑存在物像关系，近场质心变化直接引起光谱漂移。近场扰模性能通常可以用扰模增益

$g_{\text{SG}} = \frac{d_{\text{input}}/D_{\text{input}}}{d_{\text{output}}/D_{\text{output}}}$  来表征，其中  $d_{\text{input}}$  是入射位置偏移， $D_{\text{input}}$  是光纤直径， $d_{\text{output}}$  是出射近场质心改变， $D_{\text{output}}$  是出射近场直径（测试的近场直径与系统放大系数有关，也可将近场直径转化成光纤直径进行计算）。SG 越大说明光纤近场扰模性能越好，出射近场越稳定。入射位置变化同样会引起远场分布改变，越来越多的研究表明，光纤远场变化的影响也不容忽视。

实际的望远镜系统也存在各种不同的孔径遮挡，如次镜及支架的遮挡。孔径的遮挡会引起入射光角度分布的改变，同样也会引起光纤出射近场和远场的改变。

实际的望远镜系统也存在各种不同的孔径遮挡，如次镜及支架的遮挡。孔径的遮挡会引起入射光角度分布的改变，同样也会引起光纤出射近场和远场的改变。



### 3.1 入射位置变化的影响

如图 4 所示,通过位移台使入射光斑在光纤端面移动,移动步长为  $10\ \mu\text{m}$ ,每次移动 7 个位置,同时采集光纤出射场图片。每个位置连续采集 20 幅图片进行叠加以降低随机噪声,重复 3 次测量即可确保结果的准确性。

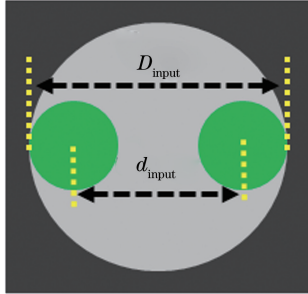


图 4 入射位置移动

Fig. 4 Input position translation

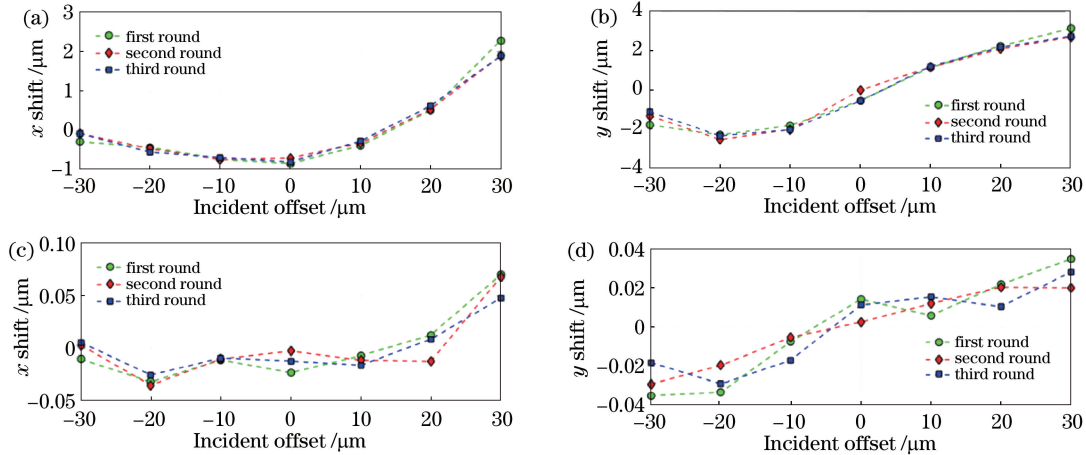


图 5 入射位置移动引起的近场质心偏移。(a)(b)单根圆形光纤;(c)(d)双八边形光纤扰模系统

Fig. 5 Near-field centroid shift induced by input position translation. (a)(b) Single cir-fiber; (c)(d) double oct-fiber scrambler

移量。此时测得的扰模增益反映的是最坏情况下的扰模性能。

图 6 展示了单根圆形光纤和双八边形光纤扰模系统远场分布情况,(a)(c)是远场图片横切线划过的强度分布,这里选取了 3 个典型入射位置(左边缘:入射偏移  $-30\ \mu\text{m}$ ;中间:入射偏移  $0$ ;右边缘:入射偏移  $30\ \mu\text{m}$ )进行对比。(b)(d)表示两个不同入射位置远场强度分布的差  $\Delta I$ ,分别是中间-左边缘、中间-右边缘、右边缘-左边缘。单根圆形光纤的远场分布改变量超过  $5\%$ [见图 6(b)],双八边形光纤扰模系统的远场分布改变量在  $2\%$ 以内[见图 6(d)]。

表 1 总结了入射位置改变对 6 种光纤扰模系统近场和远场的影响。单根圆形光纤的 SG 最小,单根八边形光纤的 SG 有所增加,圆形-八边形-圆形光

首先通过加权平均法计算出图片质心漂移量  $d_{\text{output}}$ 、光斑尺寸  $D_{\text{output}}$ 。图 5 展示了单根圆形光纤和双八边形光纤扰模系统质心漂移在水平( $x$ )和竖直( $y$ )两个方向的分量,单根圆形光纤近场质心  $x$  和  $y$  方向的漂移量都可达到几个微米,而双八边形光纤扰模系统近场质心  $x$  和  $y$  方向的漂移量均小于  $0.1\ \mu\text{m}$ 。然后根据 SG 定义计算出  $x$  方向分量  $g_{\text{SG}x}$ , $y$  方向分量  $g_{\text{SG}y}$  和总的  $g_{\text{SG}}$ 。然而,在测量过程中发现,出射近场质心漂移量与入射位置偏移量并不是线性关系,如图 5 所示。为了更加准确地反映光纤扰模性能,这里参照了文献[19]中扰模增益的计算方式:

$$g_{\text{SG}} = \frac{\max(d_{\text{input}}/D_{\text{input}})}{\max(d_{\text{output}}/D_{\text{output}})}, \quad (3)$$

式中:  $\max(d_{\text{input}}/D_{\text{input}})$  表示最大的入射相对偏移量;  $\max(d_{\text{output}}/D_{\text{output}})$  表示最大的出射质心相对漂

纤串接系统进一步增加,双光纤扰模系统的 SG 显著提高。单根八边形光纤和圆形-八边形-圆形光纤串接系统对远场改变没有改善,双光纤扰模系统可以显著降低远场改变量。双八边形光纤扰模系统的 SG 最高,远场改变量也最小。

### 3.2 入射孔径变化的影响

如图 7 所示,通过遮挡改变入射光孔径:(a)无遮挡,圆形孔径;(b)中心遮挡,环形孔径;(c)半圆遮挡,半圆孔径;同时采集光纤出射场图片。孔径遮挡由于改变了入射光角度分布,同样会影响光纤出射近场和远场分布。通过质心均方误差(MSE)描述近场变化的大小,MSE 越小表明质心分布越集中、近场变化越小,反之变化越大。远场变化还是通过横切线划过的强度分布差来表征。

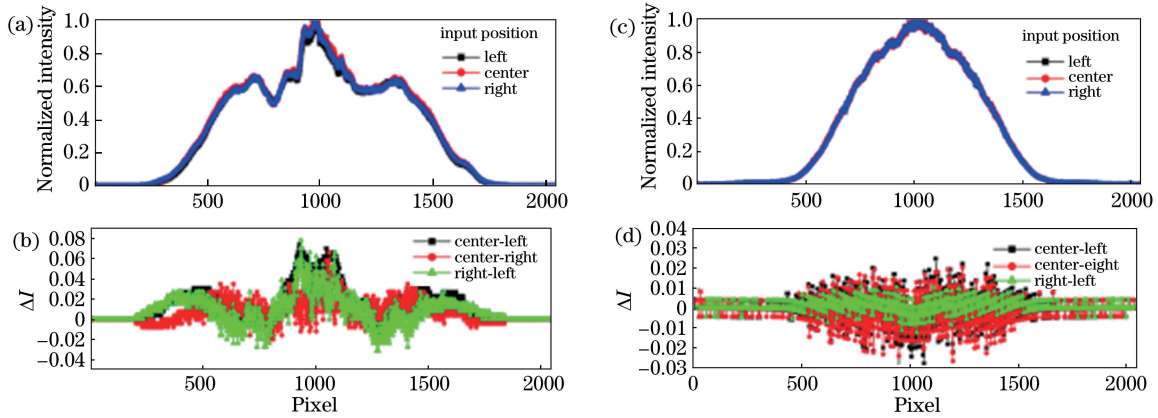


图 6 入射位置移动引起的远场分布改变。(a)(b)单根圆形光纤;(c)(d)双八边形光纤扰模系统

Fig. 6 Far field distribution induced by input position translation. (a)(b) Single cir-fiber;  
(c)(d) double oct-fiber scrambler

表 1 入射位置变化对光纤扰模系统出射近场和远场的影响

Table 1 Influence of input position translation on near field and far field of fiber scrambling system

Number	Fiber scrambling system	$g_{SGx}$	$g_{SGy}$	$g_{SG}$	Far field variation
1	Single cir-fiber	958	514	452	>5%
2	Single oct-fiber	1609	1229	976	>5%
3	Cir-oct-cir fiber	1310	4924	1266	~10%
4	Double cir-fiber scrambler	2261	7987	2176	<2%
5	Cir & oct double fiber scrambler	8351	4074	3361	<3%
6	Double oct-fiber scrambler	29074	49111	25018	<2%

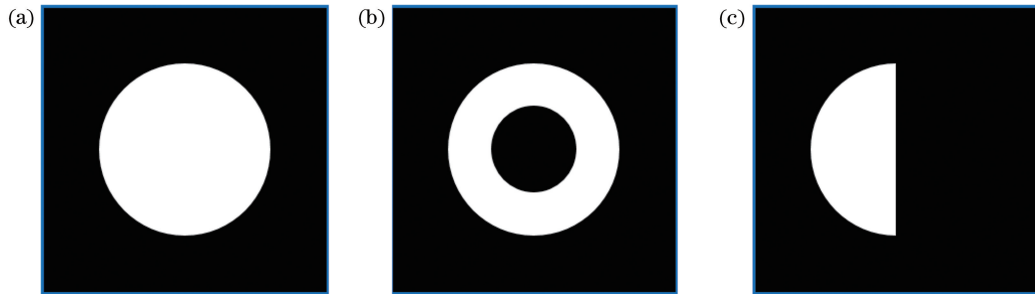


图 7 不同入射孔径示意。(a)圆形;(b)环形;(c)半圆形

Fig. 7 Schematic of input pupils. (a) Circular; (b) ring; (c) half-circular

表 2 总结了入射孔径变化对 6 种光纤扰模系统近场和远场的影响。双光纤扰模系统近场质心 MSE 显著减小。孔径变化对单根光纤和圆形-八边形-圆形光纤串接系统远场的影响比对入射位置改变的影响更加明显,双光纤扰模系统可以显著降低远场改变。双八边形光纤扰模系统的近场 MSE 和远场改变都最小。

#### 4 分析与讨论

从表 1 和表 2 中可以看出,总体来说这 6 种光

纤扰模系统的扰模性能逐渐提升。第 2 种单根八边形光纤的近场扰模性能较第 1 种单根圆形光纤有所改善,但远场扰模性能两者都不好。第 3 种圆形-八边形-圆形光纤串接系统同样只能改善近场扰模性能。第 5 种圆形-八边形混合双光纤扰模系统的近场扰模比第 4 种双圆形光纤扰模系统要好,但远场扰模并没有改善。第 6 种双八边形光纤扰模系统扰模性能无论是近场还是远场都是最佳的。

结合之前的模拟结果<sup>[17]</sup>,可以得出如下结论:圆形光纤由于旋转对称性,近场和远场都只在角向

表 2 入射孔径变化对光纤扰模系统出射近场和远场的影响

Table 2 Influence of input pupil variations on near field and far field of fiber scrambling system

Number	Fiber scrambling system	Near field MSE	Far field variation
1	Single cir-fiber	4.374	>10%
2	Single oct-fiber	1.742	>20%
3	Cir-oct-cir fiber	1.509	>20%
4	Double cir-fiber scrambler	0.277	<3%
5	Cir & oct double fiber scrambler	0.446	<3%
6	Double oct-fiber scrambler	0.193	<2%

有较好的扰模性能,相对来说,近场扰模性能较远场的要好一些。八边形光纤由于破坏了旋转对称性,极大地改善了近场径向扰模性能,但依然对远场的径向扰模无能为力。双光纤扰模系统由于中继光学系统交换了光纤远、近场,利用两段光纤较好的近场扰模性能分别对近场和远场进行扰模,可以显著提高光纤系统近场和远场扰模性能;但由于圆形光纤近场和远场的径向扰模都不理想,因此即使使用了双光纤扰模系统,扰模性能的提升依然有限。而八边形光纤的近场角向和径向扰模都非常好,因此结合双光纤扰模系统,可以同时获得非常优秀的近场和远场扰模性能。

在单根光纤基础上进行扰模必然引起额外的光损耗,而视向速度测量要求尽可能高的星光获取率;因此,除了扰模性能,通光效率也是评价光纤扰模系统的一个非常重要的指标。

本文中测试的第3种圆形-八边形-圆形光纤串接系统中,八边形光纤采用熔接的方式插入。以焦比 $F/4$ 入射,实测插入损耗小于8%,与理论几何失配非常接近。此系统也可以通过法兰对接实现,然而标准的FC/PC法兰接口的插入损耗较大,要将插入损耗降低需要专门定制高精度光纤接口和对接法兰。

双光纤扰模系统中实际选用了爱特蒙特公司提供的高折射率球透镜:光学材料S-LAH79( $n \approx 2.003$ ), $D = 1$  mm,未镀膜,工作波长400~2400 nm。这与理论设计直径 $D \approx 0.8$  mm,略有偏差。由于系统中真正起扰模作用的是前、后两段光纤,光学系统只是用来交换远、近场,因此这种偏差对系统的扰模性能并不会产生影响。然而偏差会带来一定程度的焦比变化和耦合损耗,系统理论通光效率约72%,实测500~700 nm平均通光效率约55%(包含后面3 m光纤)。为了降低球透镜的插入损耗,除了定制合适直径的透镜外,还需要在光纤端面 and 球透镜表面镀宽带减反膜,这都将极大增加实验成本和周期。实际上这种高折射率球透镜的镀膜非常

难,需要寻找专门的单位进行镀膜<sup>[20]</sup>,每次镀膜大约200个球透镜,并根据质量择优选取30个左右。

为了提高双光纤扰模系统的通光效率,本研究考虑了另一种双透镜系统。如图8所示,光学系统由两块相同的透镜组成,后一块透镜对前面系统的远场进行成像,然后投影到后一段光纤端面,同样可以实现远、近场的交换。为了保证不引起额外的耦合损耗和焦比退化,远场像的大小要等于光纤直径。双透镜系统可以选择双胶合透镜,一方面可以保证像质,减少像差引起的损耗,另一方面宽带减反膜比较容易实现。参照216HRS光纤参数,本文选用了索雷博公司的一款双胶合透镜:有效焦距为10 mm,直径为6 mm,镀有400~700 nm的可见光减反膜。两透镜间距为260 mm,系统总长约为300 mm。系统理论通光效率约88%(光纤端面未镀膜),实测500~700 nm平均通光效率约80%(包含后面3 m光纤)。

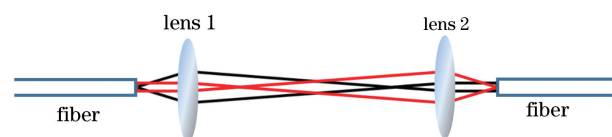


图 8 双透镜模型双光纤扰模系统示意图

Fig. 8 Schematic of twin lens double scrambler

双透镜系统由于中间有一段自由空间光程,非常适合在光学贯穿系统中使用。在高稳定、高精度光谱仪必须采用环境稳定控制箱或真空腔的情况下,双透镜系统的优势显著。这段光程也可以插入碘定标盒或瞳切分器等其他器件,以实现较球透镜系统更多的功能。

## 5 结 论

实验研究了6种不同光纤扰模系统在入射位置变化和入射孔径变化情况下的近场质心变化和远场分布变化,结果定量反映了扰模系统的近场和远场扰模性能。各数据显示双八边形光纤扰模系统的扰模性能显著优于其他扰模系统,是未来高精度视向

速度测量仪器的最佳选择。出于成本和工程量考虑,现有高色散光谱仪的升级,在能满足精度和效率需求的情况下,可以考虑在原有圆形光纤系统中插入一段八边形光纤或双光纤扰模系统。

## 参 考 文 献

- [1] Samuel H, Terrien R, Mahadevan S, et al. A comprehensive radial velocity error budget for next generation Doppler spectrometers[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9908, 99086P.
- [2] Heacock W D. On the application of optical-fiber image scramblers to astronomical spectroscopy[J]. The Astronomical Journal, 1986, 92: 219-229.
- [3] Heacock W D. Radial image transfer by cylindrical, step-index optical waveguides [J]. Journal of the Optical Society of America A, 1987, 4(3): 488-493.
- [4] Hunter T R, Ramsey L W. Scrambling properties of optical fibers and the performance of a double scrambler [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1992, 104: 1244-1251.
- [5] Bruno C, Pepe F, Wildi F, et al. New scramblers for precision radial velocity: square and octagonal fibers [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7739: 773947.
- [6] Bouchy F, Díaz R F, Hébrard G, et al. SOPHIE+: First results of an octagonal-section fiber for high-precision radial velocity measurements [J]. Astronomy & Astrophysics, 2013, 549: A49.
- [7] Wildi F, Pepe F, Bruno C, et al. The performance of the new Fabry-Perot calibration system of the radial velocity spectrograph HARPS [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 8151: 81511F.
- [8] Baldini V, Cirami R, Coretti I, et al. ESPRESSO instrument control electronics: a PLC based distributed layout for a second generation instrument at ESO VLT[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9152: 915228.
- [9] Martin M, Edward H, Weisfeiler M, et al. A optical fiber double scrambler and mechanical agitator system for the Keck planet finder spectrograph [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 1070: 107026F.
- [10] Wang S, Zhu B. Focal ratio degradation of large core spectrum light-transmitting optical fiber [J]. Opto-Electronic Engineering, 2011, 38(7): 17-24.  
王森, 朱冰. 大芯径光谱传光光纤焦比退化特性研究 [J]. 光电工程, 2011, 38(7): 17-24.
- [11] Wang J. Analysis of mechanism of the circle spot generation of large core fibers[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.  
王静. 大芯径天文光纤环形斑产生的机制分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2016.
- [12] Xu L, Chang L, Wang X L, et al. A device and method to improve the uniformity of laser output energy distribution: CN201710951229.7[P]. 2017-12-26.  
许良, 常亮, 王晓丽, 等. 一种提高激光输出能量分布均匀性的装置及方法: CN107515471A[P]. 2017-12-26.
- [13] Mu D D, Zhu Y T, Zhang K. Modulation of annular light distribution by mechanical fiber scrambler[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(5): 996-1001.  
穆丹丹, 朱永田, 张凯. 天文光纤机械扰模器调制环形光场的实验研究 [J]. 应用光学, 2012, 33(5): 996-1001.
- [14] Han J, Xiao D. Near and far field scrambling properties of polygonal core optical fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0406003.  
韩建, 肖东. 多边形光纤远近场扰模特性 [J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0406003.
- [15] Han J, Xiao D, Ye H Q, et al. Scrambling gain and energy variation of sectional fiber transmission systems[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1106002.  
韩建, 肖东, 叶慧琪, 等. 分段式光纤传输系统的扰模增益及能量变化 [J]. 光学学报, 2016, 36(11): 1106002.
- [16] Ye H Q, Han J, Xiao D. Influence of coupling shift from center on ring output field of step-index cylindrical multimode fiber [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0906005.  
叶慧琪, 韩建, 肖东. 中心偏移对阶跃圆柱多模光纤环形出射场的影响 [J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0906005.
- [17] Chen P, Huang K, Ye H Q, et al. Simulation analysis of far and near field scrambling properties of fibers and double-fiber scrambler [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 0506005.  
陈平, 黄凯, 叶慧琪, 等. 光纤及双光纤扰模器远/近场扰模性能的模拟分析 [J]. 光学学报, 2019, 39(5): 0506005.
- [18] Halverson S, Roy A, Mahadevan S, et al. An efficient, compact, and versatile fiber double scrambler for high precision radial velocity instruments [J]. The Astrophysical Journal, 2015, 806(1): 61-69.
- [19] Adam P, Stuermer J, Miller K R, et al. Characterizing octagonal and rectangular fibers for MAROON-X[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9912: 99125C.
- [20] Gábor F, Rafal P, Fournier P, et al. Fiber link design for the NASA-NSF extreme precision Doppler spectrograph concept "WISDOM" [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9908: 99087G.