

多边形光纤远近场扰模特性

韩 建^{1,2} 肖 东^{1,2}

¹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

²中国科学院天文光学技术重点实验室, 江苏 南京 210042

摘要 天文探测中类地行星的探测需要进一步提高视向速度的测量精度。但圆形光纤扰模效果不佳所引起的入射信息变化时的谱线漂移,成为限制测量精度提高的一个主要因素。采用多边形光纤改善光纤传输系统的扰模特性。利用搭建的测试光纤远场和近场光斑质量的光学系统,通过对光纤出射场光斑质量进行评价,研究了圆形、长方形、正方形和八边形光纤在不同入射条件下的远场和近场分布及远场光斑的光强变化和近场光斑的质心偏移,得出了不同光纤的扰模增益系数。实验表明,在相同入射条件下,多边形光纤具有较好的扰模特性,其中八边形光纤的远场光强变化最小,近场光斑质心偏移最少,扰模特性最好。以八边形光纤代替圆形光纤,可有效减小入射偏差引起的谱线漂移,提高视向速度的测量精度。

关键词 光纤光学; 光纤特性; 扰模系数; 光纤入射; 多边形光纤; 谱线漂移

中图分类号 P111

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0406003

Near and Far Field Scrambling Properties of Polygonal Core Optical Fiber

Han Jian^{1,2} Xiao Dong^{1,2}

¹*Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

²*Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210042, China*

Abstract The measurement precision of radial velocity needs improving for the detection of terrestrial planets. However, the spectral line shift during the change of coupling resulting from the insufficient scrambling of circular fibers limits the further improvement of the precision. The polygonal core fiber can provide better scrambling properties. Based the built experimental apparatus for measuring the near and far fields of the fiber output, the scrambling performance of the circular, rectangular, square and octagonal fibers under different coupling conditions is characterized via evaluating the near and far field patterns. The intensity variation in the far field and the barycenter shifting in the near field are investigated, and the scrambling gain is obtained for each fiber. The experimental results show that the polygonal core fiber has better scrambling performance. Especially, the octagon fiber has the minimum intensity variation in the far field, the minimum barycenter displacement in the near field, and the best scrambling performance. It is shown that replacing a circular fiber with an octagon one will effectively decrease the spectra line shift from coupling error and improve the measurement precision of the radial velocity.

Key words fiber optics; fiber properties; scrambling gain; fiber coupling; polygonal core fibers; spectral line shift

OCIS codes 060.2270; 060.2300; 060.2400

1 引 言

在现代天文探测中,通过探寻太阳系外行星大气寻找地外生命迹象及宜居带是目前天体物理学中最热门的话题。近年来,通过基于多普勒频移的视向速度测量技术探测系外行星的数量随着探测精度的提高呈

收稿日期: 2015-09-29; 收到修改稿日期: 2015-11-23

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(11303067)、国家自然科学基金面上基金(11373051)、江苏省青年基金(BK20131061)

作者简介: 韩建(1984—),男,博士,副研究员,主要从事光学频率梳光谱定标及光谱探测等方面的研究。

E-mail: jhan@niaot.ac.cn

现井喷式增长。目前视向速度测量系统,如高精度视向速度行星探测光谱仪(HARPS)^[1]、高分辨阶梯光栅光谱仪(HIRES)^[2]等,其视向速度测量精度达到 1~3 m/s,该精度适合探测质量较大的行星,而对于类地行星及人类宜居带行星的探测,不仅要求探测精度低于 10 cm/s^[3],同时需满足探测时间长达几个月甚至几年的基本要求。因此,提高视向速度测量精度及仪器稳定性,不仅对系外行星探测,同时也对于整个天文物理学研究及进展具有重要意义。

实现每秒厘米量级的视向速度测量精度,关键是增强光谱仪探测系统中光谱线的稳定性,目前影响光谱线精度的主要因素有^[3]光谱仪照明稳定性,星光信号稳定性及定标信号稳定性。视向速度测量系统主要通过光纤将望远镜采集的光谱信息传输到光谱仪中,相比透镜传输,圆形光纤不仅简化了整个探测系统结构,同时多模光纤具有的扰模特性也增强了光束传播的稳定性。尽管如此,圆形光纤虽然在角方向上具有较好的扰模特性,但在径向上扰模效果较差,经过光纤传输后的星光信号受到大气视宁度及入射过程中导向误差和离焦调制的影响,光纤出射场表现出近场质心的变化和远场光强分布的不均匀。光纤出射后由于调制引起的质心或光强变化经光谱仪系统,在谱线采集后引起谱线漂移,该偏移误差与星光探测多普勒频移信号相互影响,从而限制了视向速度测量精度的提高。因此通过提高光纤传输系统的扰模增益以增强出射场稳定性,是目前亟需解决的重要课题。为实现此要求,目前的方法包括透镜扰模法^[4]、机械振动法^[5]和积分球法^[6-7]。但这些方法存在能量损失大、结构不稳定等缺点,不能满足高精度视向速度测量技术探测周期长的要求。通过改变光纤截面形状以提高扰模特性,是目前适用于高精度长周期视向速度测量的最有前景的扰模方法之一。Spronck 等^[8-12]初步对比了多边形光纤和圆形光纤远近场光强分布,阐述了多边形光纤的扰模特性;Feger 等^[13-14]研究了八边形和六边形光纤的扰模,重点分析了光纤近场质心的偏移,并给出了扰模增益;Halverson 等^[3]结合透镜和八边形光纤,测试了该系统的光纤远近场光强分布,重点分析了透镜设计与光纤扰模作用的关系。国内主要针对圆形光纤在机械扰模^[15-16]和光场分布光线追迹^[17-18]方面做了初步研究,但针对多边形光纤的扰模测试及其计算还未见相关报道。

本文对圆形、长方形、正方形和八边形光纤的扰模特性进行了系统测量及分析。搭建了一套适用于测量光纤远场和近场光强分布的扰模光学系统,通过改变光束聚焦点在光纤入射端面位置来模拟视向速度测量系统中的入射变化,分别测量光纤出射端远近场的光强分布,给出了近场图像质心计算的处理方法,通过不同入射条件下近场光斑的质心偏移和远场光斑的光强分布,阐述了不同截面光纤的扰模情况。为在视向速度测量系统中使用多边形光纤提高仪器的稳定性及视向速度测量精度,提供了重要的实验依据。

2 实验装置及光纤出射场分析

2.1 测量光学系统

光纤出射场主要从远场光强变化和近场质心偏移两方面影响视向速度测量精度。远场光强为出射光束在光纤端面短距离传输后的光强分布,通常以出射场截面的光强分布表示;近场光强为光纤端面处的光场分布。视向速度测量系统中光纤远场入射到准直镜、光栅及光谱仪等光学系统中,其光强分布的变化经过光谱仪成像后在焦平面上产生不同的像差,从而引起谱线的偏移。光纤近场与光谱线表现为镜像关系,即光谱谱线为光纤出射端面近场的成像,因而近场质心偏移引起光谱线的移动。扰模测量光学系统既需要模拟和检测入射焦点在光纤端面不同位置以模拟探测系统的入射偏差,同时也需要方便对光纤出射远近场光强进行探测。实验中光纤扰模探测系统如图 1 所示。

图 1 为光纤出射场(远场、近场)扰模测量光学结构示意图。使用 OSL1-EC 光源(Thorlabs 公司,美国)模拟星光信号,光源通过传输光纤(圆形光纤,芯径为 100 μm)导入测试系统中,经透镜 L1 变为平行光,并通过透镜 L3 会聚到待测多边形光纤中,待测光纤入射端放置在精密 5 维调整架 H 上,H 用于改变入射光束焦点与待测光纤端面的位置,以模拟星光信号在光纤传输中的入射偏差,其入射信息经半反半透镜 M1 反射在 CCD1 上成像,以实时调节和监测系统入射变化。待测光纤出射光场经过透镜 L4 后变为平行光,通过透镜 L5 聚焦在焦点处,从而实现传输光纤出射端面的成像,CCD3 监测到光纤近场光斑,半反半透镜 M2 将出射平行光导出后经透镜 L6 聚焦在非焦点处,通过 CCD2 观测远场光斑的光强变化。

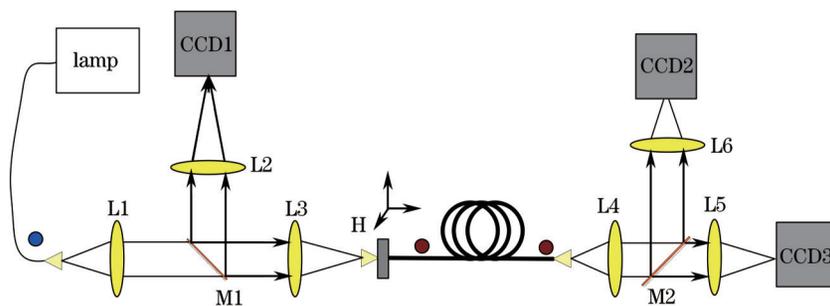


图1 光纤扰模测量结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of fiber scrambling measurement

该实验测试光路具有4方面特性:1)入射光斑调整到与待测光纤光轴平行后将光斑调节固定,以确保不同光纤测试时入射条件的一致性;2)在测量不同多边形扰模时只需更换5维调整架上的光纤适配器,其他光学光路均不变;3)通过高精度的5维调整架调整光束聚焦焦点与光束端面的位置,以模拟入射偏差,并通过CCD1实时监测调整,以确保移动位置的精度;4)光路具有在某一入射条件下,方便对光纤近场和远场同时测量的特点,在处理结果时可方便观测同一入射条件下的远近场变化,保持数据的统一性,既减少了在测量过程中入射调节的重复性,同时也保证了数据分析的准确性。由于近场需要对光斑质心进行计算,质心变化较少,适合使用像素较高的CCD。系统中CCD1的像素为1024 pixel×1280 pixel;CCD2的像素为1024 pixel×1280 pixel;CCD3的像素为2048 pixel×2048 pixel。主要待测光纤截面尺寸为圆形光纤,芯直径为200 μm;八边形光纤,芯直径为100 μm;正方形光纤的尺寸为200 μm×200 μm;长方形光纤的尺寸为150 μm×300 μm。待测光纤长度均为3 m,光纤接头为FC/APC(FC为光纤接头连接方式,APC表示光纤端面稍微倾斜)。

2.2 出射场光斑质量评价及扰模增益

多模光纤远场变化经过光谱仪光学系统后由于像差而引起谱线偏移,即谱线偏移是由远场光斑的光强变化引起的,因此可通过其光强变化对远场扰模效果进行评估;而近场光斑与光谱线为物像关系,其近场质心的移动导致光谱线的偏移。如图2所示,光束入射到光纤端面的中心处,出射场近场质心位于光纤端面中心(蓝色),远场表现为光滑平整的曲线,而当入射光斑与光纤端面存在偏移 d_i 时(红色),光纤出射端近场质心偏移 d_0 ,远场呈现圆环。多模光纤的近场扰模可通过光纤扰模增益^[13]表示,即

$$G = \frac{d_i/D_i}{d_0/D_0}, \tag{1}$$

式中 d_i 为光束入射焦点偏离中心的距离; D_i 为传输光纤的截面直径; d_0 为质心偏离中心的位置; D_0 为出射场近场光斑的尺寸。

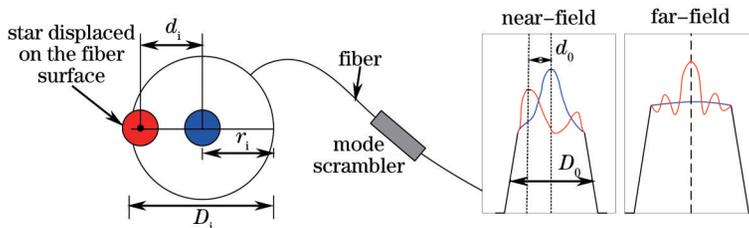


图2 光纤入射条件引起的远近场变化

Fig.2 Impact of fiber coupling conditions on the near and far fields

实验测量中 D_i 由待测光纤的芯径尺寸决定, d_i 通过CCD1检测获得。 D_0 为出射近场光斑尺寸,由CCD2采集的像素数确定,由于质心偏移量绝对值 d_0 数值较小,通常选择入射偏移时质心坐标与没有偏移时的质心坐标之差,光斑近场质心位置为

$$\begin{aligned} X &= \frac{\sum I_j x_j}{\sum I_j} \\ Y &= \frac{\sum I_j y_j}{\sum I_j} \end{aligned}, \tag{2}$$

式中 x_j 和 y_j 分别为 CCD 图像上 x 和 y 方向的像素点, I_j 为像素点 j 处的光强分布, 分别计算不同偏移量绝对值 d_i 处的质心位置, 即可获得质心偏移量的大小, 从而根据(1)式计算出近场扰模增益。

为获得较为准确的测量数据和质心位置计算值, 实际测量中需注意几个问题: 1) 偏移量 d_i 不宜过大, 偏移过大则焦点入射到光纤芯径与包层分界面, 容易引起圆环光斑, 既和实际测量系统不相符, 同时降低了实验数据的准确性; 2) 计算图像质心位置前, 需要对图像进行前处理, 主要消除背景光及图像采集中的杂散光影响, 实验中采用近场光强最大值的 90% 作为计算区域分界, 减小背景光引起的质心位置计算误差; 3) 每一入射条件下, 对光纤的近场和远场光斑进行多幅图像采集, 分别计算其质心位置, 然后作平均处理, 提高质心位置计算的精度。

3 数据分析

由于多边形光纤的扰模特性根据光纤出射远场和近场的光斑质量综合评定, 远场光强变化越小, 近场质心越稳定, 谱线越稳定, 反之则偏移越大。因此, 分析多边形光纤扰模效果需要分别讨论光纤远场的光强变化和近场质心偏移。

3.1 远场光斑光强变化

通过调整 5 维调整架 H 来精确平移多边形光纤, 使光束聚焦入射到光纤端面不同位置处, 模拟视向速度中的入射偏移量 d_i/r_i 的变化, 分别测量光纤出射场在不同入射条件下的远场截面光强, 通过比较不同入射偏移光强与正入射光强的光强差异 ΔI , 分析不同光纤的扰模效果。其监测的入射条件及光强分布如图 3 所示。

图 3 为多边形光纤在不同入射条件 (d_i/r_i) 下的光强变化。每组图形从上到下依次表示为: 扰模测试中监测到的入射偏移量 d_i/r_i 、光纤出射远场的 CCD 采集图像、光纤远场截面光强分布及最大偏移量 ($d_i/r_i=80\%$) 下的光强与 $d_i=0$ 时截面光强的光强差异。从能量扩散角度而言, 视向速度测量系统中的能量扩散表现为焦比蜕化, 圆形光纤能量随入射偏移量的增大而逐渐增大, 并且在入射偏移量的绝对值 d_i 为半径 80% 位置处, 出射远场出现较为清晰的圆环的同时, 光场尺寸增加明显 (光斑变大), 能量向外部分散, 焦比蜕化严重。在视向速度测量系统中光强变化产生谱线漂移的同时, 入射能量降低, 影响系统的整体探测灵敏度, 而多边形光纤随入射偏移量增加, 未出现明显的能量扩散, 因此圆形光纤受入射条件的限制最大, 其扰模特性最差。从能量波动角度而言, 正方形和长方形光纤在 d_i 较小时, 光强变化较小, 但在 d_i 较大时, 远场中心位置处出现明显的亮斑, 中心光强增大, 凸起效果明显, 而周围出现不明显的圆环。在入射能量不变条件下, 圆环处能量向中心移动, 从而降低了光纤的扰模效果。而八边形光纤出射场随着入射偏移量的增大, 光强未出现明显的能量波动, 即使在入射偏移量到达最大时, 最大能量浮动仅为总能量的 8%。因此, 无论从能量扩散还是能量波动角度分析, 在相同测试系统和测试条件下, 八边形光纤随着入射偏移的远场光斑光强的变化最小, 扰模效果最为明显。表 1 分别列出了在入射条件 d_i/r_i 分别为 20%、50% 和 80% 时截面光强与正入射时 ($d_i=0$) 光强间的光强变化 ΔI 最大值。从表 1 可知, 随着入射偏移量的逐渐增大, 光强波动逐渐增强。相同入射偏移量条件下, 八边形光纤的光强波动最小, 因此通过八边形光纤传输的远场光斑稳定性较好, 入射偏移对光斑的影响最小, 扰模效果最为明显。

表 1 不同入射偏移量 d_i/r_i 下多边形光纤远场光强波动 ΔI

Table 1 Far-field intensity fluctuation (ΔI) of polygonal core fibers at different incident shifts d_i/r_i

Fiber shape	Displacement (d_i/r_i)		
	20%	50%	80%
Circular	0.1176	0.1529	0.6275
Rectangular	0.0549	0.0980	0.1529
Square	0.0706	0.0824	0.1647
Octagonal	0.0392	0.0549	0.0706

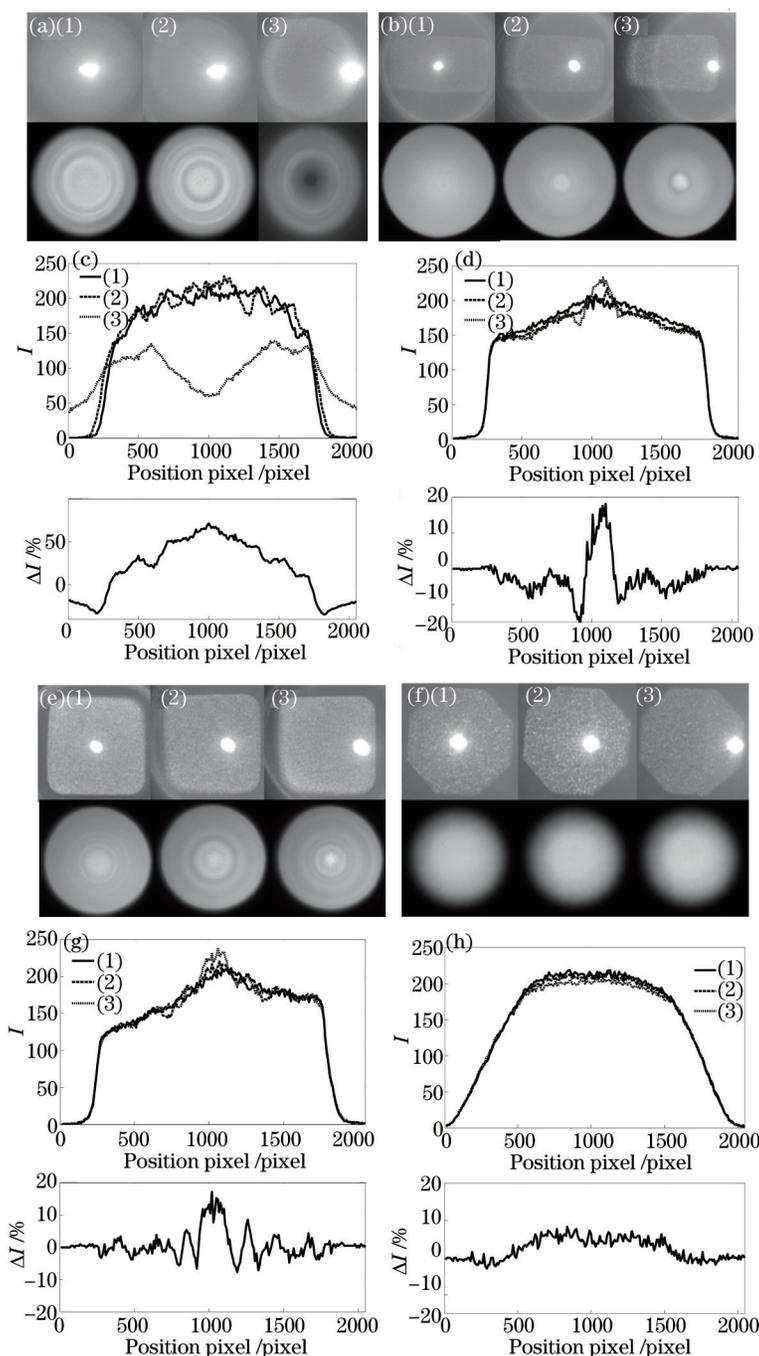


图3 多边形光纤随入射偏移的光强变化。(a)(c)圆形; (b)(d)长方形; (e)(g)正方形; (f)(h)八边形

Fig.3 Intensity variation of polygonal core fibers with incident shift.

(a)(c) Circle; (b)(d) rectangle; (e)(g) square; (f)(h) octagon

3.2 出射场近场光斑质心变化

光纤近场扰模效果根据扰模系数确定,由(1)式和(2)式可知,近场质心在不同入射偏移条件下移动越小,扰模系数越大,扰模效果越好。阐述光纤近场扰模,关键是分析近场质心的变化,质心移动采用 Stürmer^[4]的表现形式,多边形光纤近场质心在不同入射条件下的漂移如图4所示。

图4为多边形光纤(长方形、正方形和八边形)近场在入射偏移下质心的漂移。对质心的漂移采用两种形式表述。图4(a)、(c)、(e)表示质心在 x 和 y 方向随着入射偏移 d_i 的变化;图4(b)、(d)、(f)表示质心在不同入射条件下的聚合程度。在相同坐标尺度下,质心点聚合程度越高,光纤近场越稳定,扰模系数越大。反之,聚合程度越低,扰模系数越小,效果越差。图4表明,无论使用何种多边形光纤,随着入射偏移量的逐渐增大,光

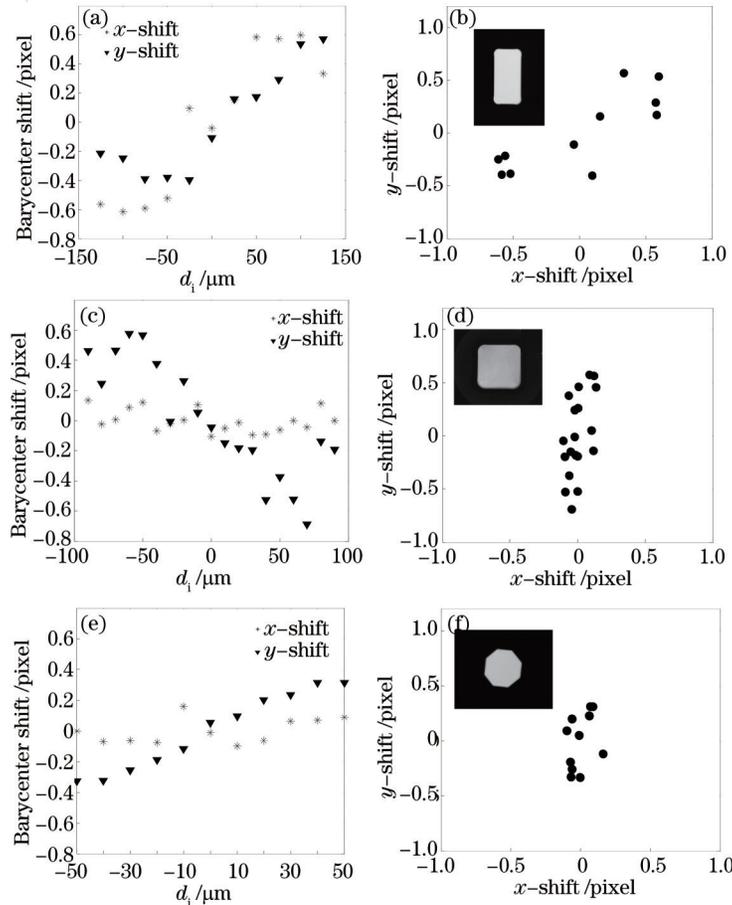


图4 多边形光纤近场随入射偏移的质心变化。(a)(b)长方形; (c)(d)正方形; (e)(f)八边形

Fig.4 Barycenter shifts obtained from polygonal core fibers at different incident shifts. (a)(b) Rectangle; (c)(d) square; (e)(f) octagon

纤近场质心的漂移在 x 和 y 方向都有不同程度的增大。正方形相对于长方形光纤,当 d_i 逐渐增大时,正方形近场质心在单方向上的移动距离较为明显。而多边形光纤中,相比于正方形光纤和长方形光纤,八边形光纤质心随着入射偏移量的变化,移动相对较小,质心聚合程度高,稳定性较为明显。根据(1)式和(2)式计算得知,不同入射偏移量下光纤的扰模系数不同,与文献 [13] 中的实验结果相互吻合。采用入射偏移量为光纤半径的 80% 进行计算,多边形光纤扰模系数及其质心移动方差如表 2 所示。可以看出,八边形测试光纤质心移动方差小,扰模系数也最大,因此稳定性也最强。故在视向速度测量系统中,使用八边形光纤对光束进行传输,由于光纤具有的扰模作用最大,随着星光与光纤入射条件的变化,出射光束具有更大的稳定性。尽管如此,影响多边形光纤扰模效果的因素很多,其中光纤长度的影响较大,光纤长度越大,扰模效果越好。因此国外文献中测试的多边形光纤扰模增益系数互不相同,本文只分析光纤截面面型对光纤扰模效果的影响,采用了严格控制的测试条件,同时将光纤长度定为 3 m。在此测试条件下,相对于正方形和长方形光纤,八边形光纤在近场仍具有较小的质心移动。

表 2 多边形光纤近场质心方差和扰模系数比较

Table 2 Comparison of scrambling gain and barycenter variance obtained from polygonal fibers

Fiber shape	Orientation of shift	Variance	Scrambling gain
Rectangular	x	0.2486	138
	y	0.2779	
Square	x	0.0060	312
	y	0.1863	
Octagonal	x	0.0069	430
	y	0.0633	

4 结 论

为提高视向速度的测量精度和探测系统的稳定性,改善光纤传输系统的扰模特性,采用多边形光纤,如正方形、长方形和八边形光纤代替圆形光纤。通过分析不同入射偏移量下多边形光纤远场光斑的光强变化和近场光斑的质心移动,可以得出:对于远场光强,在不同入射偏移条件下,八边形光纤远场光强最为稳定;正方形和长方形光纤在入射偏移较大时,出现不明显的环,能量集中于中心位置,能量无扩散;圆形光纤圆环较为明显,能量扩散严重,扰模效果最差。对于近场质心,在不同入射偏移条件下,相比于正方形和长方形光纤,八边形光纤近场质心偏移最小,扰模系数最大,稳定性最好,其扰模系数近似为长方形光纤的3倍。因此,用八边形光纤代替圆形光纤具有较好的扰模作用。

参 考 文 献

- 1 Pepe F, Mayor M, Rupprecht G, *et al.*. HARPS: ESO's coming planet searcher. Chasing exoplanets with the La Silla 3.6-m telescope[J]. *The Messenger*, 2002, 110: 9-14.
- 2 Vogt S S, Allen S L, Bigelow B C, *et al.*. HIRES: The high-resolution echelle spectrometer on the Keck 10-m telescope[C]. SPIE, 1994, 2198: 362-375.
- 3 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.
- 4 Barnes S I, Mac Queen P J. A high-efficiency fibre double-scrambler prototype[C]. SPIE, 2010, 7735: 773567.
- 5 Yan L, Yao X S, Lin L, *et al.*. Improved beam uniformity in multimode fibers using piezoelectric-based spatial mode scrambling for medical applications[J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(9): 090502.
- 6 Mahadevan S, Halverson S, Ramsey L, *et al.*. Suppression of fiber modal noise induced radial velocity errors for bright emission-line calibration sources[J]. *The Astrophysical Journal*, 2014, 786(1): 1-18.
- 7 Halverson S, Mahadevan S, Ramsey L, *et al.*. The habitable-zone planet finder calibration system[C]. SPIE, 2014, 9147: 91477Z.
- 8 Chazelas B, Pepe F, Wildi F, *et al.*. New scramblers for precision radial velocity: Square and octagonal fibers[C]. SPIE, 2010, 7739: 773947.
- 9 Chazelas B, Pepe F, Wildi F. Optical fibers for precise radial velocities: An update[C]. SPIE, 2012, 8450: 845013.
- 10 Spronck J F, Fischer D A, Kaplan Z A. Use and limitations of single- and multi-mode optical fibers for exoplanet detection[M]. Rijeka: InTech, 2011: 353-370.
- 11 Avila G, Singh P, Chazelas B. Results on fibre scrambling for high accuracy radial velocity measurements[C]. SPIE, 2010, 7735: 773588.
- 12 Spronck J, Kaplan Z, Fischer D, *et al.*. Extreme Doppler precision with octagonal fiber scramblers[C]. SPIE, 2012, 8446: 84468T.
- 13 Feger T, Brucalassi A, Grupp F U, *et al.*. A testbed for simultaneous measurement of fiber near and far-field for the evaluation of fiber scrambling properties[C]. SPIE, 2012, 8446: 844692.
- 14 Stürmer J, Stahl O, Schwab C, *et al.*. Building a fibre link for CARMENES[C]. SPIE, 2014, 9151: 915152.
- 15 Mu Dandan, Zhu Yongtian, Zhang Kai. 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.
- 16 Yang Cong, Han Jian, Wu Yuanjie, *et al.*. Theoretical and experimental study on suppression of speckle from a multimode optical fiber by dynamic scrambling[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(9): 090602.
杨 聪, 韩 建, 吴元杰, 等. 动态扰模抑制多模光纤散斑的理论及实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090602.
- 17 Wang Sen, Zhu Bing. 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.
- 18 Liao Suying, Gong Mali. Analysis of mode evolution between straight and curved fiber transition in large mode area fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305006.
廖素英, 巩马理. 大模场光纤直弯过渡中的模场演变分析[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305006.

栏目编辑: 史 敏