

分段式光纤传输系统的扰模增益及能量变化

韩 建^{1,2} 肖 东^{1,2} 叶慧琪^{1,2} 吴元杰^{1,2} 徐韦佳³

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

³中国人民解放军理工大学理学院基础实验室, 江苏 南京 211101

摘要 天文探测中,要求类地行星探测中视向速度的测量精度达到 10 cm/s。圆形光纤扰模引起的谱线漂移成为影响视向速度测量精度的一个主要因素。提出了圆形结合多边形光纤的分段式光纤传输系统,以改善圆形光纤的扰模特性。利用搭建的测试光纤远近场光斑质量的光学系统,评价光纤出射场的光斑质量;分别研究了圆形光纤、圆形结合正方形光纤、圆形结合八边形光纤的分段式光纤传输系统在不同耦合条件下的远近场分布;分析了系统的扰模增益及能量变化。结果表明,圆形结合多边形光纤的分段式光纤传输系统提高了系统的扰模特性和稳定性。当多边形光纤芯径小于圆形光纤时,较大的入射偏移量引起耦合能量损失;当多边形光纤芯径大于圆形光纤芯径时,能量守恒。圆形结合八边形光纤传输系统的近场质心偏移较小,扰模系数较高,可有效减小耦合误差引起的谱线漂移,从而提高视向速度的测量精度。

关键词 光纤光学; 视向速度测量; 扰模特性; 分段式光纤传输系统; 谱线漂移

中图分类号 P111 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1106002

Scrambling Gain and Energy Variation of Sectional Fiber Transmission Systems

Han Jian^{1,2} Xiao Dong^{1,2} Ye Huiqi^{1,2} Wu Yuanjie^{1,2} Xu Weijia³

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*

³*Basic Laboratory, College of Science, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211101, China*

Abstract In astronomical detection, the measurement precision of radial velocity in Earth-like planet detection is required to reach 10 cm/s. The spectrum drift caused by circular fiber scrambling is becoming a major factor that influences the measurement precision of radial velocity. The sectional fiber transmission systems of circular fiber combined with polygonal fiber are proposed to improve the scrambling property of circular fiber. The spot quality of fiber output field is evaluated by an optical system for testing spot quality of far field and near field. The far field and near field distributions of sectional fiber transmission systems, which are consisted of circular fiber, circular fiber combined with square fiber, and circular fiber combined with octagonal fiber, are studied under different coupling conditions. The scrambling gains and energy variations of these fiber transmission systems are analyzed. The results show that the scrambling property and the system stability are improved by the sectional transmission system of circular fiber combined with polygonal fiber. The coupling energy loss is caused by large incidence shift on the condition that the core diameter of polygonal fiber is smaller than the core diameter of circular fiber, and the conservation of the energy holds on when the core diameter of polygonal fiber is larger than or equal to the core diameter of circular fiber. The transmission system of circular fiber combined with octagonal fiber, which is with a small mass center offset in the near field and a large scrambling coefficient, can decrease the spectrum drift induced

收稿日期: 2016-05-18; **收到修改稿日期:** 2016-06-16

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方面的研究。

E-mail: jhan@niaot.ac.cn

by coupling error, and increase the measurement precision of radial velocity.

Key words fiber optics; radial velocity measurement; scrambling property; sectional fiber transmission system; spectrum drift

OCIS codes 060.2270; 060.2300; 060.2400

1 引 言

在现代天文观测中,类地行星探测中的视向速度测量精度需达到 $10 \text{ cm/s}^{[1]}$ 。当前仪器稳定性较差且光纤扰模系数较低,成为影响视向速度测量精度的主要因素。圆形光纤的径向扰模作用较差,使得光纤出射光束的光强随入射偏移量的变化产生明显变化。因此,在星光信号传入光谱仪过程中,视宁度、望远镜导向误差与光纤入射偏移等因素使得星光信号的点扩展函数(PSF)不断变化,并且耦合偏差引起的谱线偏移与星体视向速度引起的谱线偏移相互影响,从而降低了仪器的探测精度。因此,提高光束传输过程中的稳定性以及光纤的扰模增益,可提高视向速度的测量精度。

光纤出射光束引起的谱线偏移可分为光纤近场(即光纤出射端面光束的光强分布)偏移和光纤远场(即光纤出射光束的角度分布)偏移。在光谱仪中,光纤近场可直接成像于光谱仪焦平面,近场光强的分布直接影响仪器 PSF 的变化;光纤远场表现为光斑的照明光强变化,变化的光纤远场入射到光谱仪光学器件上,光学仪器系统产生的不同像差影响 PSF 的分布,从而引起视向速度的变化^[1]。总之,远场和近场的光纤出射场变化都会降低视向速度的测量精度,因此需要增加光纤传输系统的稳定性和扰模系数,从而增加出射场的稳定性。目前提高视向速度测量精度的方法主要包括:1) 透镜法^[2-3],即通过一个中继透镜使得光纤的出射近场和远场相互变换,从而增加系统的扰模系数;2) 机械振动法^[4],即通过振动光纤增加光束在光纤中的传输模式,从而稳定出射场分布;3) 积分球法^[5-6],即通过使用积分球使得光束的模式分布增多,从而增加系统的稳定性。上述方法存在能量损失大、结构不稳定等缺点,难以满足高精度视向速度测量中探测周期长的要求。多边形光纤作为一种新的光束传输介质,成为一种提高扰模特性的新形式。本质上,多边形光纤扰模通过改变光纤截面形状,增加光束在光纤传输过程中模式,从而提高了系统的稳定性。多边形光纤扰模具有能量损失小、结构稳定等优点。Spronck 等^[7-8]初步对比了多边形光纤和圆形光纤的远近场光强分布,并阐述了多边形光纤的扰模特性;Feger 等^[9-10]研究了八边形和六边形光纤的扰模特性,重点分析了光纤近场质心偏移,并得到了其扰模增益;Halverson 等^[1]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;Bouchy 等^[11-12]在望远镜(SOPHIE+、IRTF)上使用八边形光纤以增加传输系统的扰模特性,使得仪器的视向速度测量精度提高为 $1\sim 2 \text{ m/s}$;Sablowski 等^[13]在机械扰模作用下比较了圆形光纤和多边形光纤的焦比退化和模式噪声,在焦比退化不变的条件下使用八边形光纤降低了模式噪声,信噪比增加至原来的 1.6 倍。国内主要针对圆形光纤在机械扰模^[14]、光场光线追迹^[15]、模场演变^[16]等方面作了初步研究。针对多边形光纤的扰模特性,韩建等^[17]进行了深入的实验研究,发现多边形光纤的扰模特性优于圆形光纤^[17];但如果将望远镜系统中的光束传输系统改变为多边形光纤,工程量大,造价高,短时间内很难完成。由于多边形光纤制造成本昂贵以及天文探测系统改善面临较大困难,目前多边形光纤还未得到普遍的应用。

本文提出了一种简洁可行并且可改善传输系统稳定性的分段式光纤传输系统,即圆形结合多边形光纤的光纤传输系统。通过改变光束聚焦点在光纤入射端面的位置,模拟视向速度测量系统中的耦合变化;分别测量了分段式光纤传输系统出射端远近场的光强分布;对圆形结合正方形光纤、圆形结合八边形光纤的扰模特性进行了系统分析;研究了出射场近场光斑的质心偏移和远场光斑的光强分布;阐述了不同分段式连接方式的扰模情况及能量变化。上述研究为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的测量精度提供了重要的实验依据。

2 分段式光纤传输系统出射场测试装置及出射场分析方法

2.1 分段式光纤出射场光斑质量扰模评价及扰模增益

光谱谱线测量系统中,变化的光纤远场光强分布经过光谱仪系统产生的像差、光纤近场光斑与光谱谱线

间的物像关系、光纤出射场的变化(远场光强及近场质心变化)都会引起谱线偏移。如图 1 所示,当光束入射到光纤端面中心处,光纤出射端近场质心位于光纤端面中心,远场表现为光滑平整曲线(实线);当入射光斑存在偏移时,光纤出射端近场质心出现偏移,且远场呈现圆环(虚线)。光纤扰模增益系数 G 可表示为^[9]

$$G = \frac{d_i/D_i}{d_o/D_o}, \quad (1)$$

式中 d_i 为光束耦合焦点偏离中心的距离, D_i 为传输光纤的截面直径, d_o 为质心偏离中心的位置, D_o 为出射场近场光斑的尺寸。在视向速度测量系统中,视向速度测量误差可近似表示为

$$\sigma \approx \frac{c \Delta\theta}{R\theta G}, \quad (2)$$

式中 c 为光在真空中的传播速度, R 为望远镜系统的光谱分辨率, $\Delta\theta$ 为导星误差, θ 为光纤的对天张角。由(2)式可知,光纤扰模增益越大,测量误差越小。

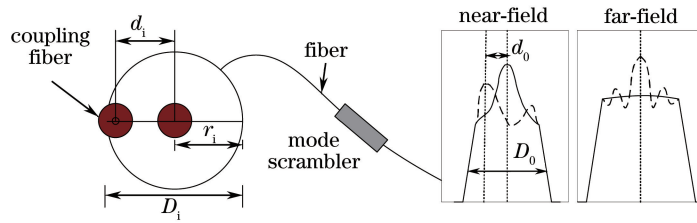


图 1 光谱谱线测量系统及远近场分布示意图

Fig. 1 Spectral line measurement system and diagram of far and near field distributions

实验测量中, D_i 由待测光纤的芯径决定; r_i 为圆形光纤半径; d_i 可通过 CCD1 检测获得(图 2); D_o 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 d_o 数值较小,通常选择入射偏移时质心坐标与无入射偏移时的质心坐标之差作为 d_o 。光斑近场质心位置 $C(X, Y)$ 的计算公式为

$$X = \frac{\sum I_j x_j}{\sum I_j}, \quad Y = \frac{\sum I_j y_j}{\sum I_j}, \quad (3)$$

式中 x_j, y_j 分别为 CCD 图像在 x, y 方向的像素点位置, I_j 为像素点 j 处的光强分布。分别计算不同偏移量 d_i 处的质心位置,即可获得质心偏移量的大小。

2.2 分段式光纤传输系统扰模测量实验装置

为模拟系统的耦合误差,需要同时测量分段式光纤传输系统的近场质心偏移和远场光强变化,并检测入射焦点在光纤端面不同位置的情况。设计的扰模测量实验装置如图 2 所示。

图 2 为分段式光纤传输系统出射场(远场、近场)扰模测量的光学结构示意图。使用型号为 OSL1-EC 的光源(Thorlabs 公司)模拟星光信号。光源通过传输光纤(圆形光纤,芯径为 $100 \mu\text{m}$)导入测试系统,经 L1 变为平行光,并通过 L3 会聚到待测分段式光纤传输系统中。调整精密五维调整架 H,可改变入射焦点在光纤端面的位置,从而可以模拟星光信号的入射偏移,偏移信息经 M1 半反半透镜反射到 CCD1 上成像。待测光纤出射场经过准直镜 L4 后变为平行光,通过 L5 在焦点处聚焦,从而实现传输光纤出射端面的成像,并利

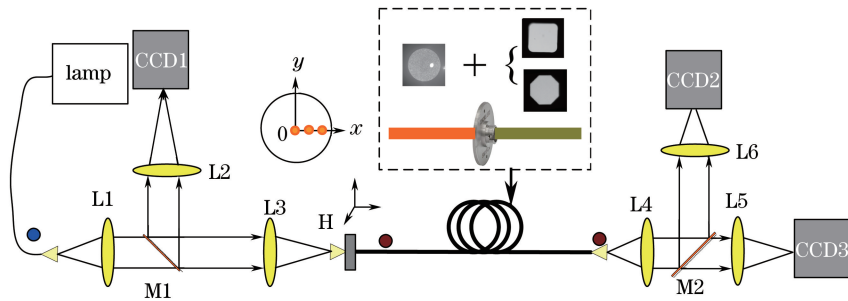


图 2 光纤扰模测量实验装置示意图

Fig. 2 Diagram of experimental setup of fiber scrambling measurement

用 CCD3 监测光纤近场光斑。半反半透镜 M2 将出射平行光导出后经 L6 聚焦于非焦点处,通过 CCD2 观测远场光斑的光强变化。在圆形光纤后利用光纤耦合器分别连接正方形光纤和八边形光纤,形成待测分段式光纤传输系统结构。

该光纤扰模测量光路具有 4 个特性:1) 将入射光斑调整到与待测光纤光轴平行后,固定光斑,可确保不同光纤测试时耦合条件的一致性;2) 当测量不同多边形扰模时,只需更换五维调整架上的光纤适配器,其他光路不变;3) 利用高精度的五维调整架调整光束聚焦焦点与光束端面的位置,模拟耦合误差,并利用 CCD1 实时监测调整,可确保移动位置的精度;4) 在某一耦合条件下,此光路可同时测量光纤近场和远场,处理结果时保持数据的统一性既减少了测量过程中耦合调节的重复性,同时也提高了数据分析的准确性。测试系统中,CCD1 和 CCD2 的像素为 $1024 \text{ pixel} \times 1280 \text{ pixel}$,CCD3 的像素为 $2048 \text{ pixel} \times 2048 \text{ pixel}$ 。圆形光纤的芯径 $D=200 \mu\text{m}$,八边形光纤的芯径 $D=100 \mu\text{m}$,正方形光纤的截面尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 。光纤接头为平面接触式或斜面接触式连接器。

3 分段式光纤传输系统的扰模特性及能量变化分析

3.1 圆形光纤出射端远近场光斑随不同耦合条件的光强变化

研究圆形光纤在不同入射偏移量(d_i/r_i)条件下的远近场光强分布对分析圆形结合多边形光纤提高扰模增益以及入射偏移量下圆形光纤近场耦合到多边形光纤中的能量分布情况都具有重要意义。

图 3、4 分别为圆形光纤在不同入射偏移量条件下的 CCD 采集图像及光纤出射端远近场截面光强分布的变化趋势。分析圆形光纤的远场分布,发现随着入射偏移量的增加,远场光强波动显著;同时光斑能

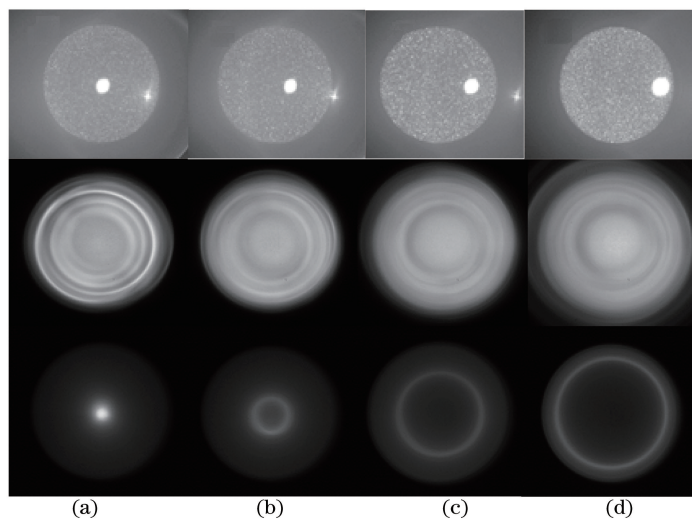


图 3 圆形光纤在不同入射偏移量条件下的 CCD 采集图像。(a) $d_i/r_i=0$; (b) $d_i/r_i=0.3$; (c) $d_i/r_i=0.6$; (d) $d_i/r_i=0.9$

Fig. 3 CCD images from circular fiber under different incidence offsets. (a) $d_i/r_i=0$; (b) $d_i/r_i=0.3$;

(c) $d_i/r_i=0.6$; (d) $d_i/r_i=0.9$

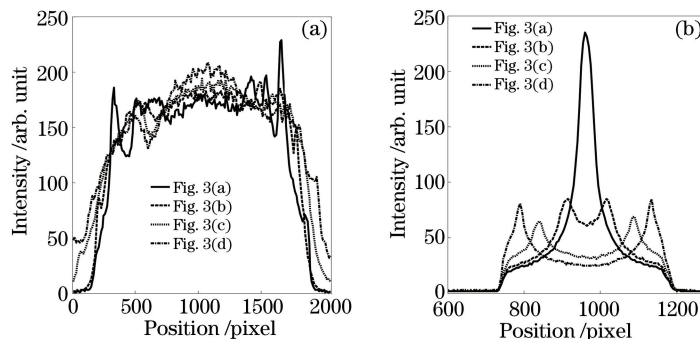


图 4 圆形光纤在不同入射偏移量条件下的(a)远场和(b)近场截面光强分布

Fig. 4 Sectional light intensity distributions of (a) far field and (b) near field from circular fiber under different incidence offsets

量逐渐向边缘扩散,光斑半径增大,光纤出射端焦比退化严重。在光谱探测中,焦比退化不仅降低了探测信号强度,同时降低了信噪比,增加了光谱偏移量。分析圆形光纤的近场分布,发现随着入射偏移量的增加,近场光斑出现明显的环形;环形半径随着入射偏移量增加逐渐增大,中心区域变暗,能量向光纤边缘扩散。在光谱探测中,带有圆环的光纤近场直接在光谱仪上成像,使得入射耦合引起的谱线偏移更为明显。总之,圆形光纤出射端远场和近场都受到入射偏移量的影响,且传输系统稳定性弱,从而限制了视向速度测量精度的提高。

3.2 圆形结合多边形光纤出射端远场光斑扰模效应及能量分布

通过改变光束传输过程中的边界条件,改进光纤模式,从而提高圆形结合多边形光纤传输系统的稳定性。圆形光纤和多边形光纤的连接通过光纤耦合器完成,其连接方式按多边形光纤和圆形光纤的芯径大小关系可分为2种:1)多边形光纤芯径大于圆形光纤芯径;2)多边形光纤芯径小于圆形光纤芯径。实验中,在圆形光纤后连接正方形和八边形光纤,并讨论了不同系统的扰模效应和能量分布。

3.2.1 圆形结合多边形光纤出射端远场截面光强及能量分布随耦合条件的变化规律

图5为正方形光纤和八边形光纤与圆形光纤连接后,不同入射耦合条件下的远场光斑图像。由图5可知,相比于圆形光纤传输系统,圆形结合多边形光纤传输系统在不同入射耦合条件下的光斑质量得到很大改善。结合图3可知,当入射偏移量较大时,尽管圆形光纤末端传输到多边形光纤中的光斑质量较差,但经过多边形光纤后,系统出射端的远场光强分布与入射耦合条件无关,且系统的稳定性增强。同时,整个系统光斑大小不变,焦比退化现象消失,即圆形结合多边形光纤传输系统的扰模增益得到提高。图6为远场光斑横截面光强分布图,分析两个系统的截面光强,发现圆形结合正方形光纤传输系统中的截面光强在4种入射偏移量条件下基本重合;圆形结合八边形光纤传输系统中的光强减弱,并且其截面光强在入射偏移量较大时下降明显,该现象的主要原因在于八边形光纤芯径小于圆形光纤芯径。

图7(a)为圆形结合多边形光纤传输系统中的芯径差异示意图,图7(b)为圆形结合八边形光纤传输系统在不同入射偏移量条件下的能量损失。整个亮斑边缘组成的圆面为圆形光纤芯径,正方形和八边形光纤与圆形光纤连接处的尺寸如图7(a)所示。双光纤连接处的圆形光纤近场光束以入射光束形式耦合到多边形光纤中。结合图3可以发现,随着入射偏移量的逐渐增加,圆形光纤近场光斑能量逐渐从中心处以圆环形式向四周扩散,且入射偏移量越大,圆环半径越大。在圆形结合多边形光纤传输系统中(当多边形光纤芯径小于圆形光纤芯径时),当较大入射偏移量使出射端近场的圆环半径大于多边形光纤芯径时,传输能量在光纤连接处遗漏,产生能量损失;当入射偏移量引起的圆环芯径小于多边形光纤芯径时,能量全部耦合到多边形

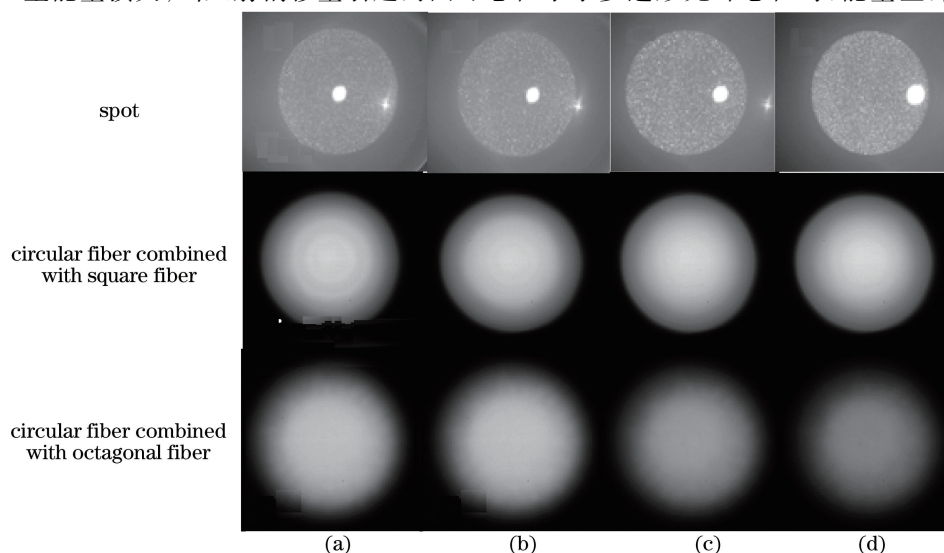


图5 分段式光纤传输系统在不同入射偏移量条件下的远场光斑图。(a) $d_i/r_i=0$; (b) $d_i/r_i=0.3$; (c) $d_i/r_i=0.6$; (d) $d_i/r_i=0.9$

Fig. 5 Far field light spot images of sectional fiber transmission systems under different incidence offsets. (a) $d_i/r_i=0$; (b) $d_i/r_i=0.3$; (c) $d_i/r_i=0.6$; (d) $d_i/r_i=0.9$

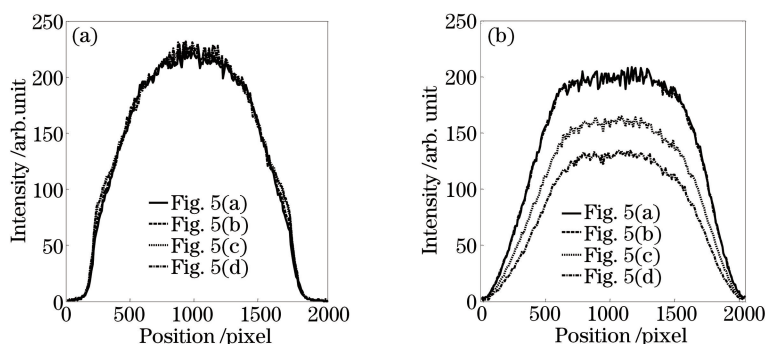


图 6 分段式光纤传输系统在不同入射偏移量条件下的远场截面光强分布。(a)圆形结合正方形光纤；(b)圆形结合八边形光纤

Fig. 6 Sectional light intensity distributions of far field of sectional transmission systems under different incidence offsets. (a) Circular fiber combined with square fiber; (b) circular fiber combined with octagonal fiber

光纤中,从而实现能量守恒。分析图 7,得到分段式光纤传输系统中的能量变化规律为:1)当多边形光纤芯径大于圆形光纤芯径时,圆形结合多边形光纤传输系统在入射偏移条件下能量守恒;2)当多边形光纤芯径小于圆形光纤芯径时,圆形结合多边形光纤传输系统在入射偏移量较大时存在能量损失。出现能量损失的主要原因在于入射偏移引起的光斑圆环半径大于多边形光纤芯径,产生能量遗漏。

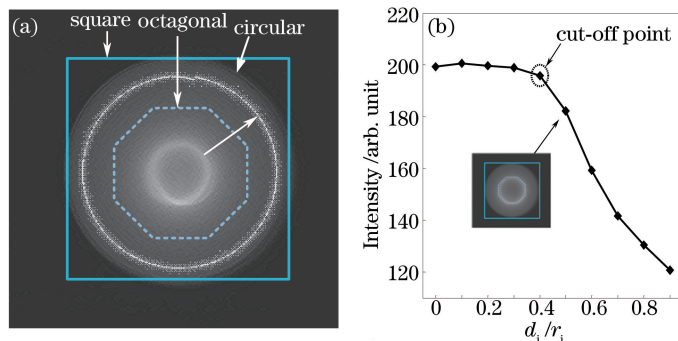


图 7 (a) 圆形结合多边形光纤传输系统中的芯径差异; (b) 圆形结合八边形光纤传输系统中入射偏移引起的能量损失
Fig. 7 (a) Core diameter difference in fiber transmission systems of circular fiber combined with polygonal fiber; (b) energy loss caused by incidence offset in fiber transmission system of circular fiber combined with octagonal fiber

实验中选用的正方形光纤芯径等于圆形光纤芯径,八边形光纤芯径小于圆形光纤芯径。在圆形结合正方形光纤传输系统中,无论哪种入射偏移引起圆形光纤近场能量扩散,系统整体能量都会入射到正方形光纤中,因此圆形结合正方形光纤传输系统的出射端远场光斑能量保持不变;在圆形结合八边形光纤传输系统中,入射偏移量的增加使得近场光斑环形尺寸大于八边形光纤芯径,部分分散的能量不能耦合到八边形光纤中,因此圆形结合八边形光纤传输系统出射端的远场光强随着入射偏移量的增加而减弱。图 7(b)系统分析了圆形结合八边形光纤出射端远场中心光强随入射偏移量的增加逐渐减弱的变化趋势。当入射偏移量较小时,不同入射偏移量下的远场光强基本相同,图中光强变化近似为直线(即入射偏移较小引起的近场圆环尺寸小于八边形光纤,能量保持不变)。图 7(b)中,当入射偏移量 $d_i/r_i > 0.4$ 时,此时由于近场圆环半径大于八边形光纤芯径,出现能量损失;随着入射偏移量的增加,能量损失增加,光强下降明显。图 7(b)中,当入射偏移量 $d_i/r_i = 0.5$ 时,圆形光纤近场圆环与八边形光纤尺寸相近,出现能量损失。实际应用中,为保证分段式光纤传输系统在扰模稳定的同时获得较好的能量稳定性,需要选择芯径不小于圆形光纤芯径的多边形光纤。

3.2.2 圆形结合多边形光纤出射端近场质心偏移随耦合条件的变化规律

在视向速度测量系统中,光纤近场光斑可直接在光谱仪上成像,光谱谱线随光斑质心的变化产生偏移,使得耦合条件变化引起的谱线偏移与视向速度测量中的谱线偏移相互影响,限制了仪器测量精度的提高。圆形结合多边形光纤的出射端近场光强分布基本不变,而近场光斑的质心偏移对测量精度的影响较大。因

此,结合(3)式,着重分析不同入射耦合条件下近场质心的移动,从而对分段式光纤传输系统的整体稳定性进行分析。

图 8 比较了不同入射偏移量条件下圆形结合正方形光纤传输系统[图 8(a)、(b)]和圆形结合八边形光纤传输系统[图 8(c)、(d)]的质心偏移。图 8(a)、(c)为近场光斑质心在 x 和 y 方向上的偏移,可以表征光斑质心在入射偏移下的聚合程度;图 8(b)、(d)为入射光束在不同入射偏移量条件下 x 和 y 方向质心偏移的变化规律。由图 8(a)、(c)可以发现,与圆形结合正方形光纤传输系统相比,圆形结合八边形光纤传输系统出射端近场的质心稳定性较高,具体表现为圆形结合八边形光纤传输系统质心的聚合程度较大,而圆形结合正方形光纤传输系统近场质心较为分散。由图 8(b)、(d)可以发现,随着入射偏移量的增加,质心在 x 、 y 方向上的偏移量也逐渐增加。当 $d_i/r_i=0.8$ 时,对两种不同传输系统的扰模增益进行量化分析,对比两种传输系统的扰模增益和系统在 x 、 y 方向的质心偏移方差,如表 1 所示。与圆形结合正方形光纤传输系统相比,圆形结合八边形光纤传输系统在质心的移动方差(x 、 y 方向)和光纤扰模系数两个方面都具有较好的稳定性。因此,在视向速度测量系统中,该光束传输系统的扰模效果最好,光束传输稳定性最优。

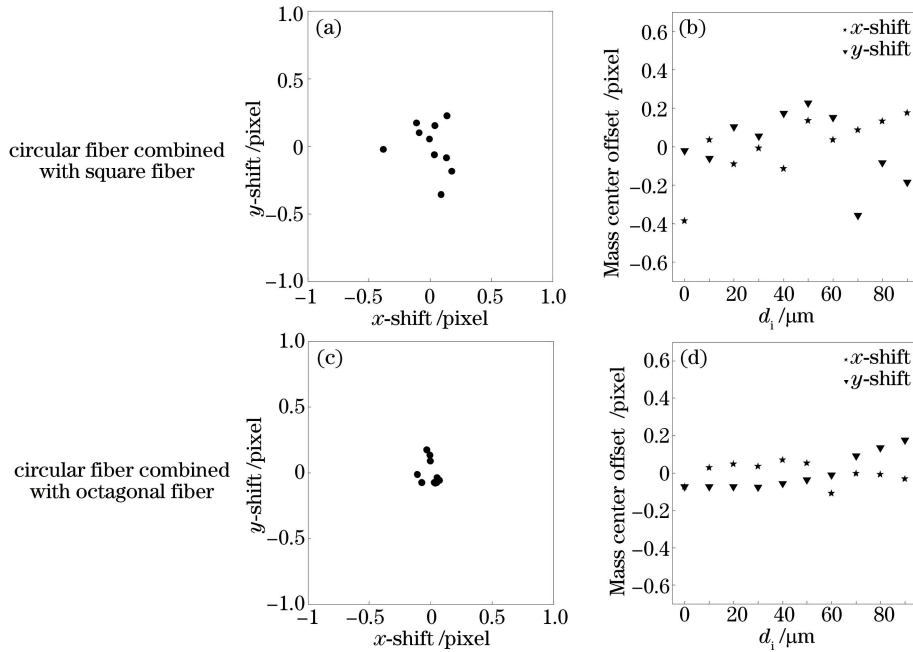


图 8 不同分段式光纤传输系统在 x 和 y 方向的质心偏移。(a)(c)近场光斑的质心偏移;
(b)(d)不同入射偏移量条件下的质心偏移

Fig. 8 Mass center offsets of different sectional fiber transmission systems in x and y directions. (a)(c) Mass center offsets of near field spots; (c)(d) mass center offsets under different incidence offsets

表 1 圆形结合多边形光纤传输系统的近场质心偏移方差及扰模系数

Table 1 Scrambling coefficients and variances of near field mass center offset obtained by fiber transmission systems of circular fiber combined with polygonal fiber

Mode	Offset direction	Variance	Scrambling gain
Circular fiber combined with square fiber	x	0.0274	525
	y	0.0323	
Circular fiber combined with octagonal fiber	x	0.0034	679
	y	0.0028	

4 结 论

视向速度测量系统中,由于圆形光纤扰模系数较小,光束入射耦合条件变化引起的谱线偏移与光谱谱线偏移相互影响,严重影响了视向速度的测量精度。提出了圆形结合多边形光纤传输系统,即在圆形光纤后

连接多边形光纤的分段式光纤传输系统;分析了不同入射偏移量条件下,圆形结合正方形光纤传输系统和圆形结合八边形光纤传输系统的远场光强变化和近场质心偏移。分析得到如下结论。

1) 与单独的圆形光纤传输系统相比,圆形结合多边形光纤的分段式传输系统的扰模性能较好,稳定性得到很大程度的改善。

2) 当多边形光纤芯径大于圆形光纤芯径时,系统出射场能量保持不变;当多边形光纤芯径小于圆形光纤芯径时,系统出射场能量随着入射偏移量的增加而逐渐减弱。出现该现象的主要原因在于光纤耦合过程中存在能量损失。

3) 与圆形结合正方形光纤的分段式光纤传输系统相比,圆形结合八边形光纤传输系统的近场质心偏移较小,扰模系数较高,可有效提高光纤传输系统的稳定性。

参 考 文 献

- 1 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: 61.
- 2 Barnes S I, MacQueen P J. A high-efficiency fibre double-scrambler prototype[C]. *SPIE*, 2010, 7735: 773567.
- 3 Spronck J F P, Fischer D A, Kaplan Z, *et al.* Fiber scrambling for high-resolution spectrographs. II. A double fiber scrambler for Keck observatory[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2015, 127(956): 1027-1037.
- 4 Yan L S, Yao S X, 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.
- 5 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.
- 6 Halverson S, Mahadevan S, Ramsey L, *et al.* The habitable-zone planet finder calibration system[C]. *SPIE*, 2014, 9147: 91477Z.
- 7 Spronck J F P, Fischer D A, Kaplan Z A. Use and limitations of single- and multi-mode optical fibers for exoplanet detection[M]. Vienna: InTech Open Access Publisher, 2012.
- 8 Spronck J F P, Kaplan Z A, Fischer D A, *et al.* Extreme Doppler precision with octagonal fiber scramblers[C]. *SPIE*, 2012, 8446: 84468T.
- 9 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.
- 10 Stürmer J, Stahl O, Schwab C, *et al.* CARMENES in SPIE 2014. Building a fibre link for CARMENES[C]. *SPIE*, 2014, 9151: 915152.
- 11 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*, 2012, 549: A49.
- 12 Plavchan P P, Bottom M, Gao P, *et al.* Precision near-infrared radial velocity instrumentation II: noncircular core fiber scrambler[C]. *SPIE*, 2013, 8864: 88640G.
- 13 Sablowski D P, Plüschke D, Weber M, *et al.* Comparing modal noise and FRD of circular and non-circular cross-section fibres[J]. *Astronomische Nachrichten*, 2015, 337(3): 216-225.
- 14 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.
- 15 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.
- 16 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.
- 17 Han Jian, Xiao Dong. 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.