

文章编号:1002-2082(2012)05-0996-06

天文光纤机械扰模器调制环形光场的实验研究

穆丹丹^{1,2,3}, 朱永田^{1,2}, 张 凯^{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;
3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 光纤入射光束的角度和位置的变化对光纤出射光束的远场光强分布有较大影响。通过分析光纤出射光场的光强分布,研究了斜光束的偏轴角对光纤出射光场的影响。光纤耦合理论说明光纤的宏弯曲会使光纤内部模式相互耦合,根据这一原理设计一种能使光纤宏弯曲并以此来改善光纤出射场分布的机械扰模器。在实验中,对不同偏轴角入射及处于不同扰模程度的光斑进行中值滤波、高斯拟合等处理,得到光斑的径向光强分布曲线、高斯拟合度、不同出射焦比范围的能量变化等参数,以此分析机械扰模器的扰模效果。

关键词: 光纤;机械扰模器;偏轴光束;高斯拟合

中图分类号: TN25;TH741

文献标志码: A

doi: 10.5768/JAO201233.0508001

Modulation of annular light distribution by mechanical fiber scrambler

MU Dan-dan^{1,2,3}, ZHU Yong-tian^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}

- (1. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, National Astronomical Observatories, CAS, Nanjing 210042, China;
2. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, CAS, Nanjing 210042, China;
3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The far-field pattern of fiber output beam changes dramatically due to different positions and angles of the input beam on fiber. This paper studies the change of the fiber's output beam when the axis of input beam is shifted a small angle off the axis of optical fiber through the analysis of the fiber's output distribution. Fiber coupling theory indicates that the fiber macrobending leads to mutual coupling of fiber mode, so an improvement of fiber transmission with a mechanical scrambler which gives certain pressure to bend parts of fiber is designed. The collected output spots in different off-axis angles and scrambling degree are taken by median filtering and Gaussian fitting approaches. The scrambling effects are measured mainly through the profile of radial intensity distribution as well as its fitting degree of Gaussian distribution and the change of the energy ratio between different output focal ratio and input.

Key words: fibre; mechanical scrambler; off-axis beam; Gaussian fitting

收稿日期:2012-02-27; 修回日期:2012-05-07

基金项目:国家自然科学基金委员会与中国科学院天文联合基金(10978004)

作者简介:穆丹丹(1986—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要从事光纤天文应用研究工作。

E-mail: ddmu@niaot.ac.cn

引言

20 世纪 70 年代末光纤被应用于天文观测中,光纤能够非常方便地把望远镜和终端仪器连接在一起,避免大型仪器附在望远镜的本体上,对跟踪精度、重力变形、温度测量精度的影响。目前众多使用光纤的天文仪器研制成功,应用的天文观测领域极为广泛,主要用于多目标天体光谱、三维全景光谱、高精度天体视向速度测量、长基线光学干涉仪的精密光学补偿等^[1]。我国的大天区多目标光纤光谱望远镜——LAMOST 中光纤的应用取得了突破性的进展。其采用“并行可控式光纤定位”技术将 4 000 根光纤对准各自的观测目标,将接收到的 4 000 个天体的光通过光谱仪转化为光谱数据信息^[2]。而大气扰动、望远镜镜面的微小形变以及光纤定位对准精度等都会导致光纤入射光束的光轴偏离光纤轴线^[3]。偏轴光束入射,使光纤出射的远场图偏离高斯分布^[4],严重影响天体的光谱分析精度。

可以通过扰模器将光纤内模式耦合来改善光纤出射场分布。扰模器主要分两种^[5]:一种是光学扰模器,即微透镜组^[6-7],这种扰模器已经成功应用于欧洲南方天文台智利 La Silla 观测站的 3.6 m 望远镜分辨率光谱仪 HARPS 和 2.2 m 望远镜配备的高分辨率光谱仪 FEROS^[8],但光学扰模器的微透镜会在扰模的同时带来较大的能量损耗,且成本很高;另一种是机械扰模器^[9],目前还没有应用于天文望远镜中,是一项处于探索阶段的热点研究方向之一。本文旨在研究一种自制的机械扰模器对光纤出射的环形光场的改善。

1 模式耦合理论

我们所设计的机械扰模器的原理为通过给光纤提供宏弯曲使光纤内模式耦合,从而改善光纤的出射场分布。通常的宏观不规则性如宏弯曲、宏应力等都导致正规光波导变为非正规光波导中的缓变光波导。一个非正规光波导不存在严格意义下的模式的概念,但它的场可以分解导行模的离散和及辐射模的连续和(求积分)^[10],即:

$$E = \sum_k a_k(z) e_k(x, y) \exp(j\beta_k z) + \int_0^\infty a_\rho(z) e_\rho \exp(j\beta(\rho)z) d\rho \quad (1)$$

上式右边的第一项表示导行模求和,第二项表示对辐射模求和。由于非正规波导有纵向不均匀性,使得其内传输的对应正规光波导的模式(幅度(或功率))不断地变化,由一些模式转换到另一些模式,既可以从低阶模转换到高阶模或辐射模,也可以从高阶模转换到低阶模。模式耦合系数为

$$D_{\mu\nu} = \frac{k^2 \iint_{\infty} (n^2 - n_r^2) e_{\nu\mu}^* \cdot e_{\nu\mu} dA}{\iint_{\infty} |e_{\nu\mu}|^2 dA} \quad (2)$$

耦合方程表明 $a_\mu(z)$ 的变化率由其他模式 $a_\nu(z)$ 所决定。由耦合系数的方程可以看出,如果光纤传播的过程中能量主要集中在高阶模,即光纤出射场为环形光场,扰模器会使光纤内部的模式耦合,主要是高阶模向低阶模耦合。本文主要通过实验来分析机械扰模器使光纤内模式耦合的效果。

2 偏轴角对光纤出射场分布的影响

当天体的光由天文望远镜汇聚到光纤端面时,最理想的状态是星光垂直照射在光纤端面上(主光线与光纤的夹角为 0°),可是在实际应用中,这种理想状态很难满足,当光从不同角度入射时,光纤的高阶模式就被激励,光纤出射端的光斑形状随之发生改变。实验发现当入射光与光纤的夹角增大时,光纤的出射斑形状发生明显的改变,圆形斑逐渐增大,然后转变成环形斑,随着斜入射的偏轴角度增大环形斑也逐渐增大,呈向外扩散状。

本论文通过实验研究斜入射光束的偏轴角对光纤出射光场分布的影响。实验装置如图 1 所示。LED 耦合导引光纤作为光源,光源经过前透镜的扩束及准直,再由后透镜聚焦于被测光纤入射端,被测光纤为美国 Ploy micro technologies 公司生产的芯径为 $320 \mu\text{m}$ 的多模阶跃光纤。调节可调光栏(φ 为 $1.0 \text{ mm} \sim 25 \text{ mm}$)孔径至最小 $\varphi = 1 \text{ mm}$,此时入射光束的焦比为 $F/16$,再将光栏沿垂直于光轴的方向移动,移动步长分别为 $100 \mu\text{m}$ (角度偏移 $20'$), $50 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$,模拟出不同偏轴角入射光束。在距被测光纤出射端 12.5 mm 处置 CCD 接收不同偏轴角入射光纤出射的远场光斑,CCD 的有效像素为 1944×2592 。

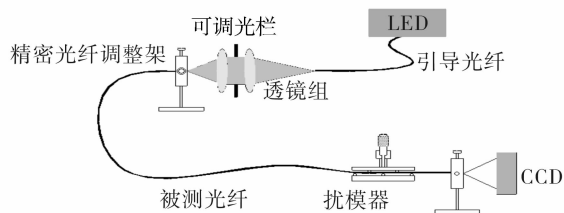


图1 偏轴角对光纤出射场分布影响的测量装置简图

Fig. 1 Device for measuring off-axis angle's influence on fiber output distribution

用 Matlab 处理不同偏轴角入射时光纤出射的远场光斑,先去除背景噪声,再中值滤波,以消除不稳定因素对待拟合图像的干扰。设定阈值为最大光强的 10%,取大于阈值的点进行高斯拟合,计算出光斑的中心位置,绘出光斑过中心位置的径向光强分布图。比较不同偏轴角入射所对应出射光斑(约 150 幅),其中心光强最大且与高斯拟合程度最高的即为正入射所对应的出射光斑,随后可以确定实验中所模拟的偏轴光束的偏轴角。

从所有光斑中挑选出偏轴角为 $0^\circ \sim 5^\circ$ 的 6 幅代表图片来说明偏轴角对光纤出射场分布的影响。

1) 在偏轴角由 0° 增加到 5° 的过程中,光纤出射的远场像由中心较亮的圆斑变为亮度较均匀的圆斑,继而变为中心较暗的圆环,且中心暗场的区域和亮环的半径都逐渐增大,如图 2 所示,偏轴角的微小变化会导致光纤输出光斑的显著变化。

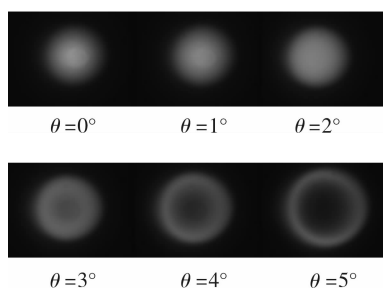


图2 不同偏轴角入射时的远场出射光斑

Fig. 2 Far-field spot at output of fibre for various off-axis angles

2) 远场像无论是圆斑还是圆环,都近似为圆对称,所以过中心的径向光强分布曲线能够反映整个远场像的能量分布情况。图 3 为不同偏轴角入射光纤的出射光斑的径向光强分布,随着偏轴角的增大,光纤远场像的光强分布曲线由近似高斯分布的曲线,逐渐顶部变得齐平,继而呈中间凹陷的双峰曲线,且远场光斑的光强不断减小,光斑

中心范围光强变化敏锐。

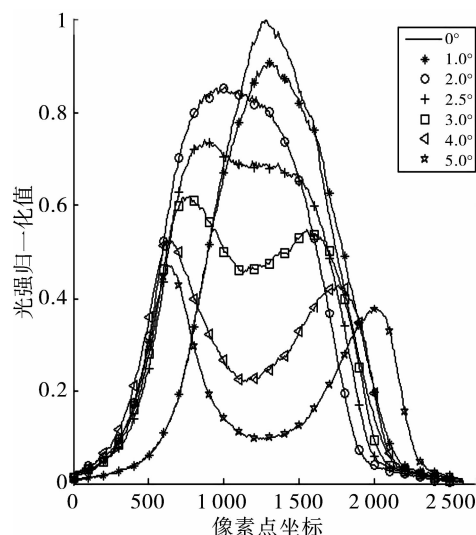


图3 不同偏轴角入射远场出射光斑的径向光强分布图

Fig. 3 Radial intensity distributions of far-field spot for various off-axis angles

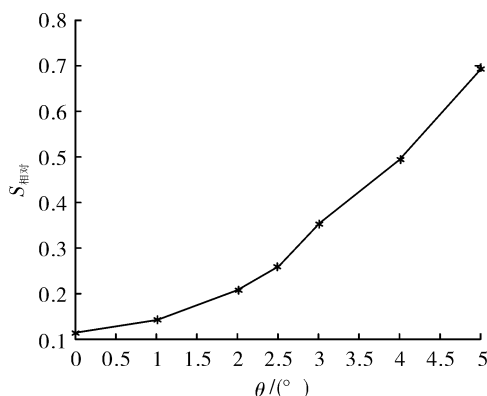


图4 不同偏轴角入射的远场光斑高斯拟合前后的相对均方差

Fig. 4 Relative mean square deviation of far-field spot before and after Gaussian fitting for various off-axis angles

3) 出射光斑的光强分布在进行高斯拟合前后的相对均方差,是本文衡量光斑质量的一个重要指标,表达式为

$$S_{\text{相对}} = \sqrt{\frac{\sum (I_i - I_0)^2}{\sum I_0^2}}$$

式中: I_i 表示实际光斑在每个像素点的光强; I_0 为光斑高斯拟合后每个像素点的光强。图 4 中给出 θ 在 $0^\circ \sim 5^\circ$ 入射时光纤出射光斑与其高斯拟合后曲线的相对均方差,随着偏轴角的增大,相对均方差增大,即出射光斑越来越偏离高斯分布,光斑质量变差;正入射时,多模光纤中的模式以低阶模为主,因此光斑

高斯近似的程度较好,偏轴角大于 5° 时,多模光纤中的模式出现较多的高阶模成分,使光强分布偏离高斯分布,即不能满足光谱仪对光强满足高斯分布的要求。我们也不再对其进行高斯拟合。

综上分析,光束的偏轴入射严重影响光纤的出射光场分布,使出射光场由圆斑变为圆环,能量逐渐下降,严重偏离高斯分布。偏轴角划分3个区间: $0^\circ\sim 2.5^\circ$, $2.5^\circ\sim 5^\circ$ 及大于 5° ,代表出射光斑为圆斑、圆环及无需高斯拟合的圆环。

3 机械扰模器对不同偏轴入射时光纤出射光场分布的改善

扰模器的机械结构图如图5所示,调节运动行程为10 mm的测微丝杆,使上排圆柱向下移动(圆柱半径为5 mm,间距为5 mm),光纤受挤压产生弯曲变形,致内部模式耦合系数改变,从而改善光场分布,达到扰模效果。

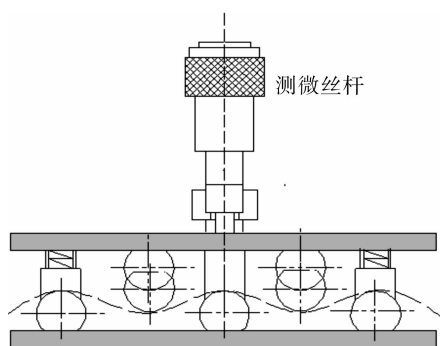


图5 光纤扰模器机械结构图

Fig.5 Mechanical structure of fibre scrambler

光纤处于平直和微弯的临界状态时,记扰模程度 d 为0 mm,下调测微丝杆,测微丝杆的读数与 $d=0$ mm时读数之差为扰模程度 d 的大小。考虑光纤承受外力的能力,取最大扰模程度为 $d=4$ mm。扰模程度不同,扰模效果也有差异。

3.1 偏轴角为 $0^\circ\sim 2.5^\circ$ 时扰模器的扰模效果

入射光束偏轴角在 $0^\circ\sim 2.5^\circ$ 范围内,光纤出射光场相似,从中任选一个偏轴角度为 2.1° 作为研究对象,代表此在偏轴角范围扰模器对其的扰模效果。扰模前后光纤出射光场的变化如下。

1) 未扰模时,由于光束偏轴入射,光纤出射远场光斑中心稍暗,对应的径向光强分布曲线中心有微小的下凹;当扰模程度 $d=1$ mm时,出射光斑的径向光强分布曲线的中心不再下凹,光强峰值位于中心; d 继续增大,光纤出射远场光斑逐渐均

匀,曲线的中心区域逐渐变平滑,光强下降,如图6和图7所示。

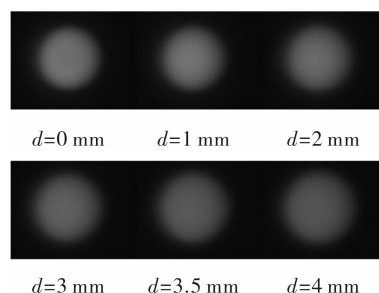


图6 $\theta=2.1^\circ$,不同扰模程度时的远场出射光斑

Fig.6 Far-field spot at various scrambling degrees, $\theta=2.1^\circ$

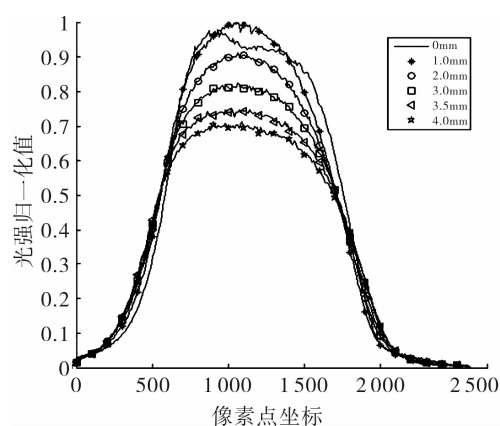


图7 $\theta=2.1^\circ$,不同扰模程度的远场像的径向光强分布图

Fig.7 Radial intensity distributions of far-field spot at various scrambling degrees, $\theta=2.1^\circ$

2) 出射光斑在出射焦比分别为 $F/4$, $F/5$, $F/8$ 范围内的能量随着扰模强度 d 的增大而下降。 $d=1$ mm时,3个出射焦比范围内的能量占光斑总能量的比值下降了4%左右;当 d 增至4 mm,比值下降了15%左右,如图8所示。

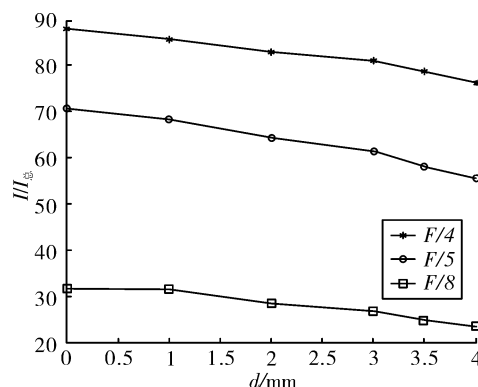


图8 $\theta=2.1^\circ$,不同出射焦比范围内的光强在不同扰模程度下与总光强的比值变化

Fig.8 Change chart of the ratio of intensity in various focal ratios and various scrambling degrees to the total intensity, $\theta=2.1^\circ$

3) 光纤处于不同扰模程度时,光纤出射光斑与高斯分布的拟合程度亦不同。如图 9 所示,在 $d=1\text{ mm}$ 时,光斑的实际光强与高斯拟合后的拟合光强的相对均方差最小,即高斯拟合度最高,扰模程度继续增大,高斯拟合度降低。

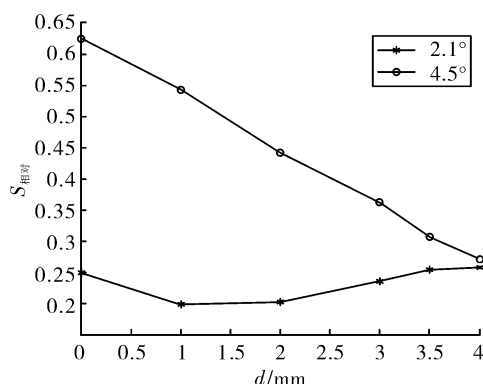


图 9 $\theta=2.1^\circ, 4.5^\circ$ 时不同扰模程度的远场像高斯拟合的相对均方差

Fig. 9 Relative mean square deviation of far-field spot before and after Gaussian fitting at various scrambling degrees when θ is $2.1^\circ, 4.5^\circ$

光束以 2.1° 偏轴角入射,扰模器在扰模程度为 1 mm 时对光纤出射光场的改善最明显,提高了高斯拟合程度,且能量只有微小下降。

3.2 偏轴角为 $2.5^\circ \sim 5^\circ$ 时扰模器的扰模效果

在入射光束偏轴角范围为 $2.5^\circ \sim 5^\circ$,取 $\theta=4.5^\circ$,不同扰模程度时的光纤出射光场变化如下。

1) 当 d 由 0 mm 增大至 4 mm ,如图 10 所示,出射光斑由中心暗场的圆环逐渐变为均匀的圆斑;光斑的径向光强分布曲线(图 11)由初始的中间深凹的双峰曲线变为中间近似齐平的曲线。

2) 如图 9 所示,随着扰模程度的增大,光斑在 $F/5$ 和 $F/8$ 这两个焦比范围内的能量增大 10% 左右;在出射焦比为 $F/4$ 范围内光斑的能量在扰模程度为 $0\text{ mm} \sim 3.5\text{ mm}$ 时增加了约 4% ,在 d 为 4 mm 时,光斑能量下降 5% 。

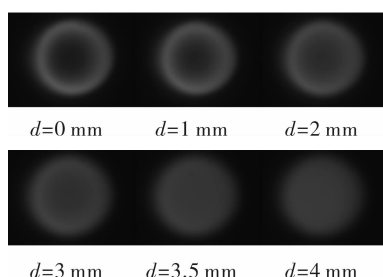


图 10 $\theta=4.5^\circ$,不同扰模程度时的远场出射光斑

Fig. 10 Far-field spot at various scrambling degrees, $\theta=4.5^\circ$

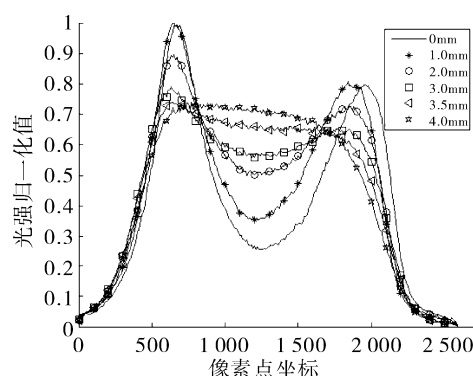


图 11 $\theta=4.5^\circ$,不同扰模程度的远场像的径向光强分布图

Fig. 11 Radial intensity distributions of far-field spot at various scrambling degrees, $\theta=4.5^\circ$

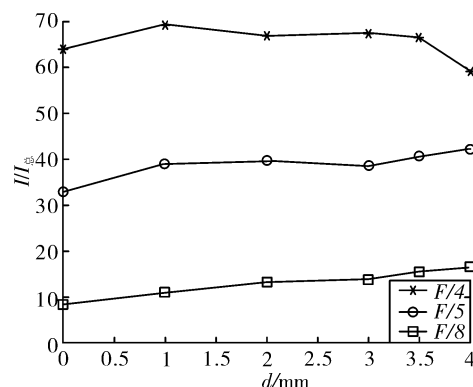


图 12 $\theta=4.5^\circ$,不同出射焦比范围内的光强在不同扰模程度与总光强的比值变化图

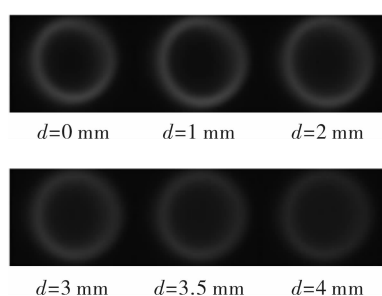
Fig. 12 Change chart of the ratio of intensity in various focal ratios and various scrambling degrees to the total intensity, $\theta=4.5^\circ$

3) 图 12 中 $\theta=4.5^\circ$ 时相对均方差的值随着扰模程度的增加而减小,说明扰模程度的加大使光纤输出的光场更接近高斯分布。

$\theta=4.5^\circ$ 时,扰模器在扰模效果随着扰模程度的增加越来越明显,在 $d=4\text{ mm}$ 时,光纤出射光场分布最接近高斯分布,中心区域的能量最大,扰模效果最好。如果扰模程度继续增大,光纤出射光场中心区域的能量有减小的趋势,且扰模器对光纤施加的力也将会超出光纤的承受范围。

3.3 偏轴角大于 5° 时扰模器的扰模效果

偏轴角大于 5° ,出射的光斑为半径极大的圆环,其径向光强分布已经严重偏离高斯分布,无需进行高斯拟合。扰模器对此偏轴角范围扰模效果仅用光纤出射光斑图来描述。当偏轴角为 6.5° 时,光纤在受扰模器的扰模程度 d 由 0 mm 增大至 4 mm 的过程中,光纤输出的远场像如图 13 所示。

图 13 $\theta=6.5^\circ$,不同扰模程度的远场光斑Fig. 13 Far-field spot at various scrambling degrees, $\theta=6.5^\circ$

出射光场分布环形部分的光强有所下降,中心暗场的光强稍有增大,但出射光场仍然是圆环,当偏轴角大于 5° ,扰模器对光纤出射光场分布并无明显的改善效果。

4 结论

本文设计的基于宏弯曲的静态机械扰模器可以改善偏轴光束入射给出射光场分布带来的影响。实验研究表明该扰模器对偏轴角度在 $0^\circ\sim 5^\circ$ 范围内的入射光束有很好的扰模效果,只要针对不同的偏轴角度,适当调节扰模器的扰模程度,可以使光纤出射端的光强分布近似高斯分布,且对光纤传播能量的效率没有实质的影响。此扰模器对 5° 以上偏轴角入射的光纤出射光场的改善效果不明显。在望远镜中,可以考虑加入此类型扰模器来降低 $0^\circ\sim 5^\circ$ 偏轴角对光纤输出光场分布的影响,提高天文光谱仪的分析精度。

参考文献:

- [1] 刘瑞斌. 天文用光纤特性的研究[D]. 长春:长春理工大学,2002.
LIU Rui-bin. The study on fibers in astronomy[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2002. (in Chinese)
- [2] HU Hong-zhuan, XING Xiao-zheng, ZHAI Chao, et al. New type optical fiber positioning unit device for LAMOST[C]. Waikoloa, HI, USA: Large Ground-based Telescopes (SPIE) Conference, 2003.
- [3] HUNTER T R, RAMSEY L W. Scrambling properties of optical fibers and the performance of a double scrambler[J]. Astronomical Society of the Pacific, 1992, 104(682): 1244-1251.
- [4] 郑史烈,章献民,陈抗生. 塑料光纤的远场辐射图和微分模式损耗研究[J]. 光子学报,2003, 32(12): 1334-1337.
ZHENG Shi-lie, ZHANG Xian-min, CHEN Kang-sheng. Far field pattern and differential mode attenuation of POF[J]. Acta Photonica Sinica, 2003, 32(12): 1334-1337. (in Chinese with an English abstract)
- [5] AVILA G, SINGH P, ALBERTSEN M. Photometrical scrambling gain and focal ratio degradation in fibers for astronomical instruments[C]. Orlando, FL, USA: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy (SPIE) Conference, 2006.
- [6] AVILA G, BUZZONI B. Fiber characterization and compact scrambler at ESO[C]. Kona, HI, USA: Optical Astronomical Instrumentation (SPIE) Conference, 1998.
- [7] AVILA G, SINGH P, ALBERTSEN M. A high-efficiency fibre double-scrambler prototype[C]. San Diego, California, USA: Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy III (SPIE) Conference, 2010.
- [8] AVILA G, KOHLER D, ARAYA M, et al. Performances of HARPS and FEROS fibres in La Silla ESO Observatory[C]. Glasgow, Scotland, United Kingdom: Ground-based Instrumentation for Astronomy (SPIE) Conference, 2004.
- [9] AVILA G, SINGH P. Optical fiber scrambling and light pipes for high accuracy radial velocities measurements[C]. Marseille, France: Advanced Optical and Mechanical Technologies in Telescopes and Instrumentation (SPIE) Conference, 2008.
- [10] 吴重庆. 光波导理论[M]. 第2版. 北京:清华大学出版社,2005.
WU Chong-qing. Optical waveguide theory[M]. 2nd Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2005. (in Chinese)