

# 中心偏移对阶跃圆柱多模光纤环形出射场的影响

叶慧琪<sup>1,2</sup> 韩 建<sup>1,2</sup> 肖 东<sup>1,2\*</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, 江苏 南京 210042

**摘要** 在天文光纤光谱仪中,阶跃型圆柱多模光纤的出射场在有些情况下会变成环形分布的光斑而不是具有高斯分布的圆形光斑,这将对天文光谱测量造成重要影响,不仅引起伪光谱漂移导致光谱测量精度降低,而且还产生伪光谱结构使得原本复杂的天文光谱更加难以分析。利用光线理论对阶跃型圆柱多模光纤的光学传播性能进行分析,揭示了造成环形出射场形成的两大因素:一是入射偏移(包括中心偏移和角度偏移),另一个是圆柱光纤旋转不变性导致的空间光线传播方式。并通过建立入射中心偏移量与出射场环形分布的数学模型,研究了随着中心偏移量增大环形出射场的形成和演化过程,理论分析与实验现象吻合。

**关键词** 光纤光学; 多模光纤; 出射场; 天文光谱; 偏移; 旋转不变性

**中图分类号** O435 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201636.0906005

## Influence of Coupling Shift from Center on Ring Output Field of Step-Index Cylindrical Multimode Fiber

Ye Huiqi<sup>1,2</sup> Han Jian<sup>1,2</sup> Xiao Dong<sup>1,2</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, Jiangsu 210042, China

**Abstract** In astronomical fiber spectrograph, the output field of step-index cylindrical multimode fiber under certain circumstances can become a ring profile rather than a spot with Gauss distribution. The change can greatly affect the measurement of astronomical spectroscopy, deteriorate the precision of spectrograph, and make the astronomical spectrum too complicated to analyze because of pseudo drifts and structures in spectrum. The propagation characteristics of step-index cylindrical multimode fiber are analyzed by ray optics, and thus the two major factors causing the formation of the ring output field are revealed. One is the coupling deviation, including center deviation and angle deviation. The other is the trace of the ray due to the rotation invariance of cylindrical fiber. A mathematic model is established to study the dependence of the distribution of output field on the center deviation. The formation and evolution process of the ring output field as the center deviation increases are studied, and the results show that they are in accordance with experimental results.

**Key words** fiber optics; multimode fiber; output field; astronomical spectrum; deviation; rotation invariance

**OCIS codes** 060.2310; 060.2270; 060.2400; 350.1260

## 1 引 言

光纤除了具有结构简单和灵活性高的特点外,由于光纤自身的扰模性能<sup>[1-2]</sup>,还可以用于隔离望远镜与光谱仪,消除环境因素的影响,提高光束传播的稳定性,因此可使用光纤代替复杂的光学系统将望远镜采集

**收稿日期:** 2016-04-01; **收到修改稿日期:** 2016-05-10

**基金项目:** 国家自然科学基金青年基金(11403069)、国家自然科学基金面上项目(11373051)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20141062)、中国科学院南京天文光学技术研究所优秀青年人才领域前沿项目(Y-09)

**作者简介:** 叶慧琪(1985—),男,博士,副研究员,主要从事光学频率梳天文光谱定标方面的研究。

E-mail: hqye@niaot.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: dxiao@niaot.ac.cn

的目标光输送到光谱仪中。光纤在天文望远镜,尤其像郭守敬望远镜(LAMOST)这种多目标天文望远镜,被广泛使用,其中最常用的是阶跃型圆柱多模光纤。光纤的芯径需要根据望远镜的参数和当地视宁度选取,通常都比较大,如在 LAMOST 中采用的光纤芯径是  $300\ \mu\text{m}$ ,目前在兴隆  $2.16\ \text{m}$  望远镜中安装的光纤芯径是  $100\ \mu\text{m}$ 。

然而阶跃型圆柱多模光纤并不能完全消除入射端耦合发生改变时带来的影响。众多研究表明,圆柱多模光纤的扰模性能在角向上是完美的,而径向上并不完美<sup>[1-7]</sup>。当光正入射进光纤时,出射场为理想高斯分布;但是,当光偏移入射时,出射场会变成环形分布,这种现象将对天文光谱测量产生严重影响。大气扰动、望远镜跟踪误差和光纤耦合对准误差等输入端的偏移都会被传递到光纤输出端,引起伪光谱偏移从而降低天文光谱测量精度,甚至产生伪光谱结构,使得原本非常复杂的天文光谱更加难以分析。

现代天文学研究对光谱测量精度要求越来越高,如与地球质量相似的太阳系外行星搜索需要视向速度测量精度达到  $10\ \text{cm/s}$  量级,直接测量宇宙膨胀速率要求视向速度测量精度达到  $1\ \text{cm/s}$  量级<sup>[8]</sup>。天文光学频率梳虽然在近几年内才出现,但是因其优异的光谱定标能力受到大家普遍认可,有望实现  $\text{cm/s}$  量级的光谱测量精度<sup>[8-13]</sup>,已经成为高精度光谱定标源的一种必然选择。同时,天文光学频率梳的应用对仪器的稳定性提出了前所未有的高要求<sup>[8]</sup>。以上描述的多模光纤传输引入的光谱测量误差已经成为影响仪器精度和稳定性的重要因素<sup>[11]</sup>。为解决此类问题需要对光纤的扰模特性有充分的了解,这需要进行大量的实验测试。研究者们已经对圆柱多模光纤的扰模性能开展了大量的实验研究,并提出了各种扰模方法来增加光纤的扰模增益<sup>[3-7,14-17]</sup>。对光纤的各种效应进行理论研究和模拟仿真也是另外一种行之有效的方法。Heacox 最早提出可以利用光纤的扰模性能提高天文光谱仪的稳定性<sup>[1]</sup>,并用光学追迹的方法从理论上分析了阶跃型圆柱多模光纤的图像传输性能<sup>[2]</sup>。Allington 等<sup>[18-19]</sup>利用光学追迹的方法对光纤中焦比退化等复杂现象进行模拟。

在此基础上,本文针对阶跃型圆柱多模光纤环形出射场问题,利用光线理论进行详细分析,揭示了其产生原因并展示了其形成过程。

## 2 阶跃型圆柱多模光纤中的光线

如图 1(a)所示,圆柱形光纤中传播的光线可以分为子午光线和空间光线。子午光线轨迹在子午面内,在一个全反射周期中与光纤中心轴线相交两次,其光线轨迹在光纤端面投影如图 1(b)所示。空间光线与光纤中心轴线既不相交也不平行,始终与中心轴线保持一定距离旋转前进,其光线轨迹在光纤端面投影如图 1(c)所示,光线轨迹在光纤端面投影的内切圆半径  $r$  为光线与轴线的距离。定义光线与光纤中心轴线夹角为  $\alpha$ ,以及光线旋转角为  $\beta$ , $\beta$  即图 1(c)所示的光线在光纤端面投影与端面圆周法线方向夹角。通过空间几何关系可以证明角  $\alpha$  与  $\beta$  在光线传播过程始终保持不变<sup>[20-21]</sup>,这是由圆柱多模光纤的旋转不变性决定的。值得注意的是空间光线的这种旋转前进方式,使得光线的轨迹在所有角度的分布是等效的。因此,光束进入光纤后,具有特定旋转角  $\beta$  的光线在光纤截面所有角度趋向于均匀分布,导致出射场呈均匀的角向分布<sup>[2]</sup>。光线在出射场径向的分布不仅与光线的  $\beta$  角有关,还依赖于光线的人射位置。

由上述分析可知,子午光线并不会造成环形出射场现象,空间光线旋转前进的传播方式是造成环形出射场的本质原因。然而,在光纤耦合过程中形成大量空间光线的因素,以及对出射场产生影响的方式,还有待进一步分析。

## 3 中心偏移对出射场的影响

在天文观测中,光纤通常被放置在望远镜焦点处,目标光被望远镜主镜收集,以一定的  $F$  数进入光纤。为保证两个通道的一致性,天文光学频率梳(或其他同步定标光源)的输出光也以望远镜  $F$  数耦合进光纤,这种耦合方式是光束以光锥形式进入光纤。假设耦合光锥是理想的,如图 2(a)所示所有光线在光锥顶点处会聚成理想点。光锥  $F$  数对应的数值孔径( $NA$ )小于光纤数值孔径,并在一定的人射偏移范围内所有光线均能进入光纤进行传播。考虑实际的光斑不可能聚焦为理想的点,设定光锥顶点在光纤圆柱内,光纤端面横

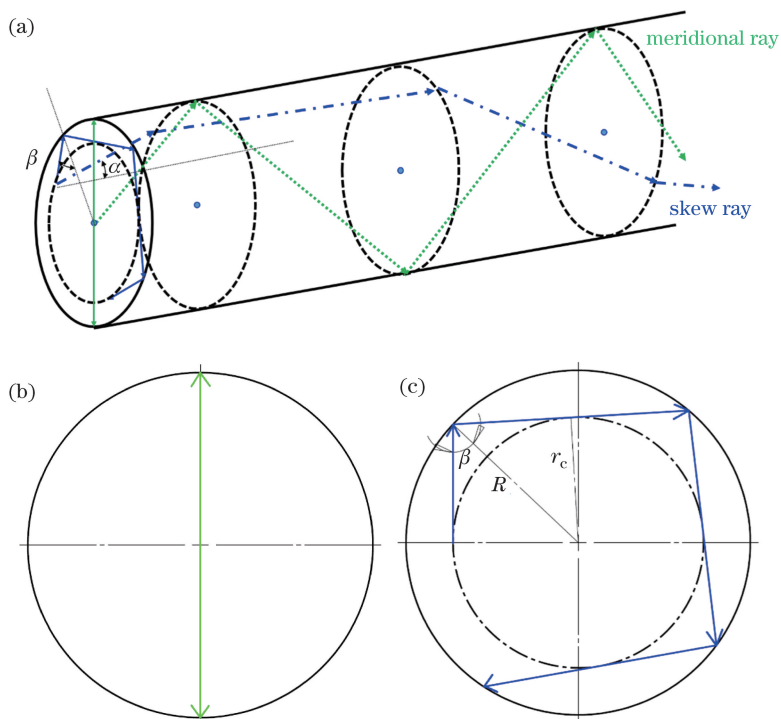


图 1 光纤中的光线轨迹及其在入射端面投影。(a) 立体图;(b) 子午光线;(c) 空间光线端面投影图  
 Fig. 1 Traces and projections on input end of rays in fiber. (a) Three-dimensional diagram;  
 (b) projections of meridional ray; (c) projections of skew ray

切光锥形成的截面为耦合光斑。为了简化分析过程,这里不考虑光从空气进入光纤纤芯发生的折射。从光纤入射端面看,进入光纤的光线都是经过光锥顶点在端面的投影,指向外。

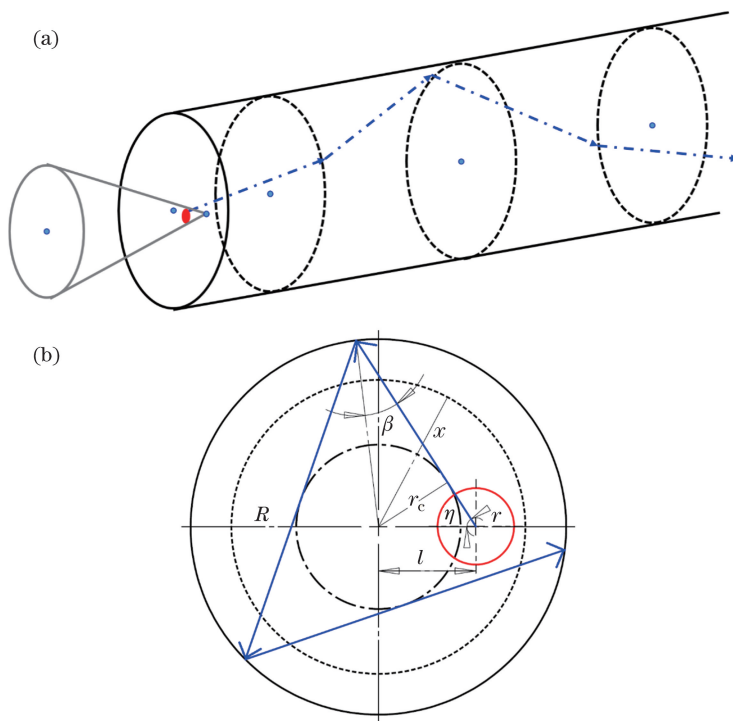


图 2 (a) 光束以光锥的形式耦合进光纤;(b) 光斑中  $\eta$  角的光线在出射端面的分布  
 Fig. 2 (a) Beam coupling into fiber in form of optical cone; (b) distribution of light with angle of  $\eta$  on output end

中心偏移无疑会对光纤出射场分布产生重要影响。如图 2(a)、(b)所示,光束以光锥的形式入射光纤端面,光斑直径为  $2r$ ,光纤纤芯直径为  $2R$ , $x$  为出射端面任意点到端面中心的距离。假设中心偏移的偏移量

即光斑中心与光纤端面圆心的距离为  $l$ 。定义任意光线在端面的投影与水平方向夹角为  $\eta$ 。光线的旋转角  $\beta$  与  $\eta$  对应,当  $\eta=0$  和  $\pi$  时, $\beta=0$ ,光线为子午光线;当  $\eta \neq 0$  和  $\pi$  时, $\beta \neq 0$ ,光线为空间光线。结合图 1(c)和图 2(b)所示的空间光线的传播特性及实际光纤出射场分布,假定光锥中以  $\eta$  角入射的光线在光纤出射端面在径向上服从高斯分布:

$$f(x) = a \exp\left[-\left(\frac{x-b}{c}\right)^2\right], \quad (1)$$

式中  $a$  为归一化常数,高斯函数的中心  $b=r_c=l \sin \eta$ ,  $c$  可结合真实的光纤出射场分布拟合给出,其值为在偏移量  $l=0$  即正入射情况下的出射场直径。设光斑总能量为单位 1,光斑内能量分布服从函数  $g(s, \eta)$ ,其中  $s$  为径向距离, $\eta$  为光线投影方向与水平方向的夹角,如图 2(b)中所示。那么光斑内任意点  $(s, \eta)$  在光纤出射端面的分布为  $g(s, \eta) \cdot f(x, l, \eta)$ 。对光斑内所有光线进行积分,可以获得整个入射光斑在光纤出射端面任意一点的分布函数

$$p(x, l) = \iint g(s, \eta) f(x, l, \eta) s ds d\eta. \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式,并假定光斑内的能量是均匀分布的,即  $g(s, \eta)$  为一常数  $\frac{1}{\pi r^2}$ ,可求得

$$p(x, l) = \frac{a}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left[-\left(\frac{x-l \cdot |\sin \eta|}{c}\right)^2\right] d\eta. \quad (3)$$

原则上只能取到  $0 \leq x \leq R$  范围内的能量分布,将遗漏掉  $-R \leq x < 0$  范围内的能量分布,因此在最后计算光纤出射场分布时需要将这部分能量补偿回去,可以得到

$$P(x, l) = p(x, l) + p(-x, l), \quad (4)$$

式中  $0 \leq x \leq R; 0 \leq l \leq R-r$ 。在不考虑耦合损耗和传输损耗时, $P(x, l)$  满足

$$\int_0^R 2\pi x P(x, l) dx = 1. \quad (5)$$

利用(5)式求得归一化常数  $a$ ,并将其与(3)式代入(4)式进行数值求解并可视化,可以得到不同偏移量  $l$  下,光纤出射端面径向的出射场分布,结果为图 3(a)所示。其中设定光纤半径  $R=1$ ,取  $\frac{c}{R}=0.1$ ,以相对位移量  $l/R$  和  $x/R$  分别作为  $X$  轴和  $Y$  轴变量,出射场能量密度  $P(x, l)$  作为  $Z$  轴函数,颜色代表能量密度  $P(x, l)$  的大小。可以看出,当偏移量  $l/R=0$  时,出射场峰值在  $x/R=0$  即光纤中心处,随着  $x/R$  增大即远离光纤中心时,出射场强度逐渐减小;当偏移量  $l/R$  逐渐增大时,出射场中心能量逐渐减小,能量峰值向远离中心方向移动,形成中心凹陷的环形结构。

为了更直观地展示出射场与入射偏移量的关系,选取  $l/R=0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$ ,并将  $P(x, l)$  扩展到整个光纤端面,结果如图 3(b)所示,对应为通过光纤中心横切的出射场强度分布。图中清楚地显示了出射场分布的形成和演化过程:随着偏移量增大,出射场从原本的高斯分布变成环形分布,并逐渐扩大,同时峰值能量逐渐降低。

## 4 实验结果

为验证理论模型的正确性,在实验室搭建了测试平台进行实验测试,详情见文献[22]。测试平台可以调节不同入射偏移量,并记录光纤出射场近场图片。记录的近场图片通过图像处理,可以获得出射场近场在光纤端面径向  $[-R, R]$  的强度分布。实验中采用直径为  $105 \mu\text{m}$  的阶跃型圆柱多模光纤,数值孔径为  $NA=0.22$ 。为了方便与理论结果对比,选取中心偏移量  $l/R \approx 0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$ ,结果如图 4 所示。可以看出,随着中心偏移量的增加,出射场中心开始凹陷形成环形分布,并且环的直径逐渐变大,同时峰值能量逐渐减小。与理论结果展示的趋势完全一致。

同时发现实验结果中光纤出射场并不是呈理想的高斯分布,并且在相同偏移量下,出射场分布的峰值位置理论与实验也不太一致。这可能由多方面的因素造成:1) 实验误差,实际的耦合偏移量与预计的偏移量有所偏差;2) 耦合光斑的实际能量分布与理论假设有所偏差,而光斑中的能量分布会对出射场产生重要影

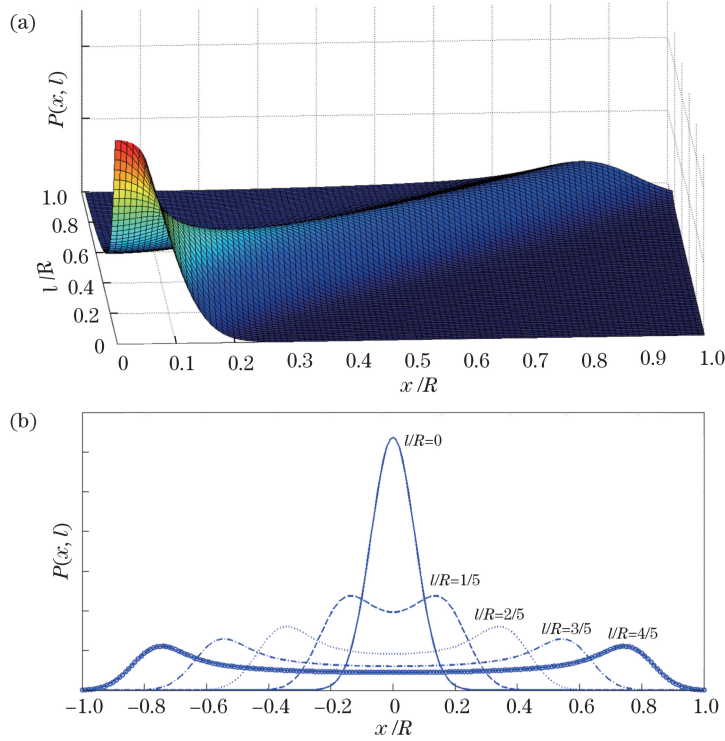


图 3 (a) 出射场的分布  $P(x, l)$  随偏移量  $l/R$  以及  $x/R$  变化关系; (b) 当  $l/R$  分别为  $0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$  时出射场的分布  $P(x, l)$  随  $x/R$  变化关系

Fig. 3 (a) Distribution of output field  $P(x, l)$  versus  $l/R$  and  $x/R$ ; (b) distribution of output field  $P(x, l)$  versus  $x/R$  with  $l/R$  of  $0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$ , respectively

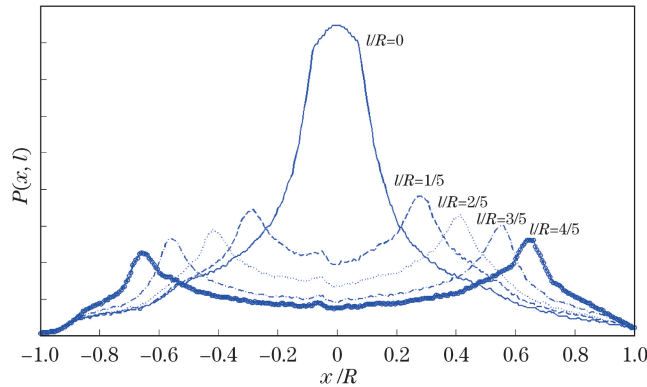


图 4 当  $l/R$  分别为  $0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$  时系实验测得光纤出射场的近场分布  $P(x, l)$  随  $x/R$  变化关系

Fig. 4 Experimentally measured distribution of output field  $P(x, l)$  versus  $x/R$  with  $l/R$  of  $0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5$ , respectively

响;3) 光纤的其他效应如焦比退化<sup>[23]</sup>会对光线传播产生扰动,改变原本光线的行进轨迹,从而影响出射场。

## 5 分析与讨论

事实上,角度偏移也会对出射场分布产生重要影响。正入射时,如图 5(a)所示,光锥中心轴线与光纤中心轴线平行,则耦合光斑为一正圆,光斑中心与光纤端面中心重合。由于光锥顶点在光纤端面投影也与端面中心重合,所以从光纤入射端面看,所有光线从圆心指向圆周,都为子午光线。如果入射光锥偏离  $\theta$  角,如图 5(b)所示,则耦合光斑为一椭圆,椭圆中心与光纤端面圆心  $o$  重合,然而光锥顶点在光纤端面的投影  $o'$  不再与光纤端面中心  $o$  重合,他们之间的距离为  $l$ 。从光纤入射端面看,所有光线从光锥顶点在端面的投影点  $o'$  指向椭圆圆周,光线在光纤端面的投影将与端面圆周法线方向形成夹角即旋转角  $\beta$ ,光线从子午光线变成空

间光线。而光斑从正圆变成椭圆,并且光线出发的中心不再是椭圆中心 $o$ 而是光锥顶点在端面的投影点 $o'$ ,这将会影响到入射光斑能量角向分布的均匀性,从而改变出射场分布。与中心偏移时处理方法类似,对整个光斑进行积分即可得到在角度偏移下光纤出射场的分布函数。

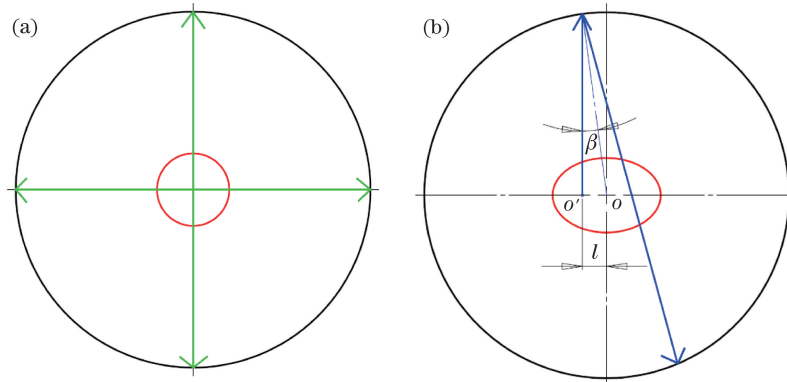


图 5 (a) 耦合时无角度偏移,光线在光纤端面投影;(b) 有角度偏移时,光线在光纤端面投影

Fig. 5 (a) Projections on input end of rays coupling into fiber without angular deviation;

(b) Projections on input end of rays coupling into fiber with angular deviation

实际情况中,中心偏移和角度偏移可能同时存在。耦合偏移时,会有部分原本可以进入光纤传播的光漏出去,从而造成额外的耦合损耗。实际的光纤系统远比理论模型要复杂,焦比退化等机制也会严重影响光线在光纤中的传播。光纤纤芯折射率起伏、界面不平整和弯曲扭转挤压等不确定因素更加会对纤芯旋转对称性产生一定程度的破坏。同时也正是由于这些不确定因素,环境对光纤产生的扰动也会引起传播光线行进轨迹的改变,从而对出射场分布造成影响。

## 6 结 论

利用光线理论详细分析了阶跃型圆柱光纤环形出射场的形成原因,入射偏移以及光纤旋转不变性导致的空间光线传播方式是形成环形出射场的两大因素。其中入射偏移可分为中心偏移和角度偏移。这为提高光纤扰模增益和消除环形出射场现象提供了解决方案,主要有两种方式:1)提高耦合精度,尽量避免入射偏移;2)打破旋转不变性,改变空间光线在光纤中的传播方式。这与实际中通过挤压、弯曲和扭转光纤等方法增加扰模增益一致,因为这些方法都会导致光纤变形,在一定程度上破坏旋转对称性。尤其这几年有学者提出的多边形光纤,其旋转对称性较圆柱光纤产生极大的退化,原本的空间光线传播方式遭到彻底破坏,出射场分布几乎不受耦合条件影响,因此在理论上具有近乎完美的扰模性能。

## 参 考 文 献

- 1 Heacox W D. On the application of optical-fiber image scramblers to astronomical spectroscopy[J]. The Astronomical Journal, 1986, 92(1): 219-229.
- 2 Heacox W D. Radial image transfer by cylindrical, step-index optical waveguides[J]. J Opt Soc Am A, 1987, 4(3): 488-493.
- 3 Boisse I, Bouchy F, Chazelas B, *et al.* Consequences of spectrograph illumination for the accuracy of radial-velocimetry [C]. European Physical Journal Conferences, 2011, 16(2): 309-315.
- 4 Barnes S I, MacQueen P J. A high-efficiency fibre double-scrambler prototype[C]. SPIE, 2010, 7735: 773567.
- 5 Avila G, Singh P. Optical fiber scrambling and light pipes for high accuracy radial velocities measurements[C]. SPIE, 2008, 7018: 70184W.
- 6 Feger T, Brucalassi A, Grupp F, *et al.* A test bed for simultaneous measurement of fiber near and far-field for the evaluation of fiber scrambling properties[C]. SPIE, 2012, 8446: 844692.
- 7 Casse M, Vieira F. Comparison of the scrambling properties of bare optical fibers with microlens coupled fibers[C]. SPIE, 1997, 2871: 1187-1196.
- 8 Steinmetz T, Wilken T, Araujo-Hauck C, *et al.* Laser frequency combs for astronomical observations[J]. Science, 2008,

321(5894): 1335-1337.

- 9 Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, *et al.* High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 380(2): 839-847.
- 10 Wilken T, Lovis C, Manescau A, *et al.* High-precision calibration of spectrographs[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 405(1): L16-L20.
- 11 Wilken T, Curto G L, Probst R A, *et al.* A spectrograph for exoplanet observations calibrated at the centimetre-per-second level[J]. *Nature*, 2012, 485(7400): 611-614.
- 12 Han Hainian, Wei Zhiyi, Zhao Gang. Astro-frequency-combs and high precision measurement of the radial velocity of celestial bodies[J]. *Physics*, 2012, 41(4): 249-255.  
韩海年, 魏志义, 赵刚. 天文光学频率梳及其在天体视向速度高精度测量中的应用[J]. *物理*, 2012, 41(4): 249-255.
- 13 Jiang Mingda, Xiao Dong, Zhu Yongtian, The progress in high precision astronomical radial velocity technique [J] *Progress in Astronomy*, 2012, 30(2): 264-253.  
姜明达, 肖东, 朱永田. 高精度天体视向速度测量技术研究进展[J]. *天文学进展*, 2012, 30(2): 246-253.
- 14 Bouchy F, Connes P. Autoguider locked on a fiber input for precision stellar radial velocities [J]. *Astronomy & Astrophysics Supplement Series*, 1999, 136(1): 193-204.
- 15 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的理论及实验研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(9): 090602.
- 16 Yan L S, 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.
- 17 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.
- 18 Allington-Smith J, Murray G, Lemke U. Simulation of complex phenomena in optical fibres[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2012, 427(2): 919-933.
- 19 Allington-Smith J, Dunlop G. Lemke U. *et al.* End effects in optical fibres [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 436(4): 3492-3499.
- 20 李淑凤, 李成仁, 宋昌烈. 光波导理论[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013: 15-20.
- 21 Chi Zeying, Chen Wenjian, Li Wusen. Fiber optics, theories and application[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014: 16-31.  
迟泽英, 陈文建, 李武森. 光纤光学与光纤应用技术[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2014: 16-31.
- 22 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.
- 23 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.