

## 基于四象限探测器的光纤焦比退化的测量方法

张美玲, 邹 华, 刘金升, 王淋正

(河海大学 理学院, 江苏 南京 211100)

**摘 要:** 为开展提高光纤焦比退化测量精度方法的研究, 提出了一种基于四象限探测器的光纤焦比退化的测量方法。该方法是将光纤的出射光斑打到四象限探测器上, 通过偏转镜扫描四象限探测器靶面, 获得探测器上的光斑位置灵敏度, 间接获得出射光斑实际尺寸, 进而得出光纤的焦比退化。并对光斑位置灵敏度与光斑半径的关系进行了分析, 同时探究了四象限探测器的沟道宽度对光纤焦比退化的影响。

**关键词:** 焦比退化; 光纤; 四象限探测器; 沟道宽度

中图分类号: O435; O439; TN29 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0617001

## Measuring method of fiber focal ratio degradation based on a four-quadrant detector

Zhang Meiling, Zou Hua, Liu Jinsheng, Wang Linzheng

(School of Science, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** A method of measuring focal ratio degradation of fibers based on a four-quadrant detector was proposed to improve the measurement accuracy of focal ratio degradation in fibers. The output spot of fibers was re-imaged on to the four-quadrant detector, and the spot position sensitivity of detectors was got through scanning the surface of the four-quadrant detector with a steering mirror, the actual size of the output spot and focal ratio degradation were measured indirectly in turn in this method. The relationship between the spot position sensitivity and the spot radius was deduced in detail. Meanwhile, the influences of the channel width of four-quadrant detectors on the focal ratio degradation were seriously studied.

**Key words:** focal ratio degradation; fiber; four-quadrant detector; channel width

收稿日期: 2018-01-05; 修订日期: 2018-02-15

基金项目: 国家自然科学基金(11503005); 中央高校基本科研业务(2015B27114)

作者简介: 张美玲(1992-), 女, 硕士生, 主要从事光纤光谱仪效率优化等方面的研究。Email: zhangmeiling2153@163.com

导师简介: 邹华(1976-), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光纤光谱仪效率优化、信息光学方面的研究。Email: zouhua96@163.com

## 0 引言

由于光纤具有长距离传输、一定口径内的集光、灵活的空间排布能力, 光纤技术在天文望远镜中得到广泛应用。采用光纤技术可将望远镜终端仪器和望远镜焦面分离, 极大地提高了光谱获取率。实际光纤由于介质对光的散射、吸收以及光纤几何上的缺陷和非自然状态, 导致入射光的焦比经过光纤传输后减小的趋势称之为焦比退化。光纤焦比退化是衡量光纤传输性能的重要参数之一。

多项实验结果表明, 数值孔径(NA)<sup>[1]</sup>、入射焦比<sup>[2]</sup>、弯曲及应力<sup>[3]</sup>、入射角度<sup>[4]</sup>、波长<sup>[5-6]</sup>、光纤长度<sup>[7-8]</sup>、使用环境等都会影响光纤的焦比退化。为了精细测量光纤的焦比退化, 人们提出了不同的测量方法, 包括利用光纤的传输效率<sup>[9-10]</sup>、光纤输出端光通量<sup>[11]</sup>、光纤输出端光斑的半高宽(FWHM)<sup>[12]</sup>等方法。最近 Daniel 等人将光纤出射端的光通过立方棱镜系统后分成两个光环, 对这两个光环同时进行测量, 提高了光纤性能的测量速度且误差小<sup>[13]</sup>。国内对焦比退化的测量研究也一直在进行, 2011 年中国科学技术大学的研究者以 LAMOST 的实际使用条件为依据, 分析计算了光纤在 C 形、S 形弯曲的情况下光纤焦比退化对观测质量的影响, 为光纤在天文中的实际应用提供了依据<sup>[14]</sup>。

四象限探测器由四个光电探测器构成, 具有体积小、灵敏度高、分辨率高等特点<sup>[15-16]</sup>。当光斑落在四象限探测器的不同位置时, 每个象限会输出不同的电信号, 通过对电信号的数据处理可得到光斑的诸多信息, 例如光斑大小、光斑中心位置等, 且四象限探测器的四个象限之间存在宽度不同的沟道, 沟道宽度会影响灵敏度的大小。

为更细致地开展光纤焦比退化测量方法的研究, 文中提出了一种基于四象限探测器测光纤焦比退化的方法, 该方法计算量小, 精确度高, 测量方便快捷。主要是通过偏转镜扫描四象限探测器靶面, 获得光斑位置探测灵敏度, 间接获得出射光斑实际尺寸, 进而求得光纤的焦比退化。

## 1 焦比退化原理

焦比即焦距与光斑直径的比值。如图 1 所示, 光

斑经光纤传输后由于散射、衍射等原因光斑直径变大即  $r_2 > r_1$ , 所以  $f/r_2 < f/r_1$ , 即出射焦比相对于入射焦比减小, 这就是焦比退化。理想的直光纤, 输出焦比和输入焦比是相同的。而实际应用中影响光纤焦比退化的因素很多, 如光纤长度、受力情况、环境温度、光纤的弯曲、散射、芯径变化以及光纤制作工艺引起的内部因素等都是影响光纤焦比退化的原因。焦比退化不仅使得光纤的出射斑弥散程度加重, 更为关键的是带来能量的损失。



图 1 焦比退化原理图

Fig.1 Schematic diagram of focal ratio degradation

## 2 基于四象限探测器测光纤焦比退化

### 2.1 焦比退化测量装置

焦比退化的测量装置是一个将光束扩束、准直、聚焦的过程, 装置如图 2 所示。扩束镜将激光器发射出来的光进行扩束, 由透镜  $L_1$  将光束准直, 为了更好的进行测量, 用光阑限制光束的尺寸, 透镜  $L_2$  将光束耦合进光纤, 经光纤传播出射光束照射到四象限探测器上, 调节光纤与四象限探测器的距离, 观察并记录光斑中心的偏移量及光强的变化, 同时用偏转镜扫描四象限探测器靶面, 获得光斑位置探测灵敏度, 间接获得出射光斑实际尺寸。

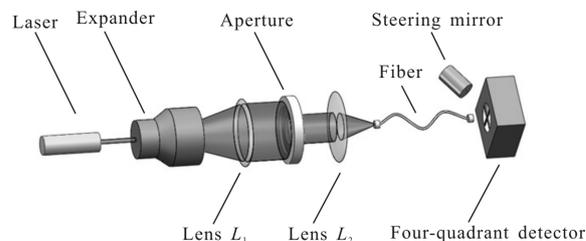


图 2 焦比退化测量装置

Fig.2 Focal ratio degradation measurement setup

### 2.2 光斑位置探测灵敏度

位置探测灵敏度是指探测器测得光斑位置偏移量的电压信号与偏移量的比值。以四象限探测器的中心为坐标原点, 设四象限探测器的半径为  $R$ , 光斑半径为  $r$ , 光斑中心为  $(x, y)$ ,  $x$ 、 $y$  分别为横向与纵向偏移量。探测器的前端处理电路采用和差比电路形

式，以下分两种情况对位置探测灵敏度与光斑半径的关系进行分析。

2.2.1 理想的四象限探测器

理想四象限探测器的沟道宽度趋于 0，如图 3 所示，四象限探测器被分成 I、II、III、IV 四个部分，当光斑照射到四象限探测器的光敏面时，设光斑在每一部分的照射面积分别为  $S_1、S_2、S_3、S_4$ ，电压分别为  $U_1、U_2、U_3、U_4$ ， $U_x、U_y$  分别表示横向、纵向的输出偏移量电压信号，则：

$$U_x = \frac{(U_1+U_4)-(U_2+U_3)}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{(S_1+S_4)-(S_2+S_3)}{S_1+S_2+S_3+S_4} \quad (1)$$

$$U_y = \frac{(U_1+U_2)-(U_3+U_4)}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{(S_1+S_2)-(S_3+S_4)}{S_1+S_2+S_3+S_4} \quad (2)$$

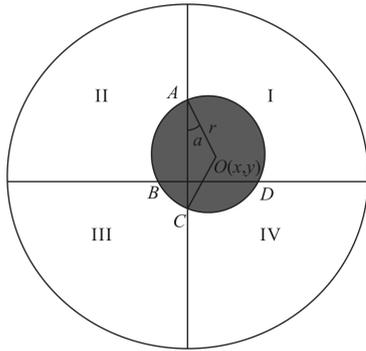


图 3 理想的四象限探测器

Fig.3 An ideal four-quadrant detector

图 3 中， $S_{OADCO}、S_{OABCO}$  分别代表扇形  $OADCO、OABCO$  的面积， $S_{OAC}$  代表三角形  $OAC$  的面积，则：

$$\tan a = \frac{x}{\sqrt{r^2-x^2}} \quad (3)$$

$$S_{OADCO} = \frac{r^2}{2} (\pi + 2a) \quad (4)$$

$$S_{OABCO} = \frac{r^2}{2} (\pi - 2a) \quad (5)$$

$$S_{OAC} = x\sqrt{r^2-x^2} \quad (6)$$

$$U_x = \frac{S_{OADCO} + S_{OAC} - (S_{OABCO} - S_{OAC})}{\pi r^2} = \frac{S_{OADCO} - S_{OABCO} + 2S_{OAC}}{\pi r^2} = \frac{2ar^2 + 2S_{OAC}}{\pi r^2} \quad (7)$$

由公式(3)~(7)可得：

$$U_x = \frac{2}{\pi r} \left( \arctan \frac{x}{\sqrt{r^2-x^2}} + x\sqrt{1-\frac{x^2}{r^2}} \right) \quad (8)$$

同理可得：

$$U_y = \frac{2}{\pi r} \left( \arctan \frac{y}{\sqrt{r^2-y^2}} + y\sqrt{1-\frac{y^2}{r^2}} \right) \quad (9)$$

当  $r$  取不同值时  $U_x$  随  $x$  的变化曲线如图 4 所示，由图可知  $U_x$  随  $x$  的增大而增大，且当  $-r \leq x \leq r$  时  $U_x$  与  $x$  近似线性关系，当光斑中心与四象限探测器坐标原点重合时  $U_x=0$ ，即无偏移量电压信号，只有当  $x \neq 0$  时  $U_x$  才有一定的值。

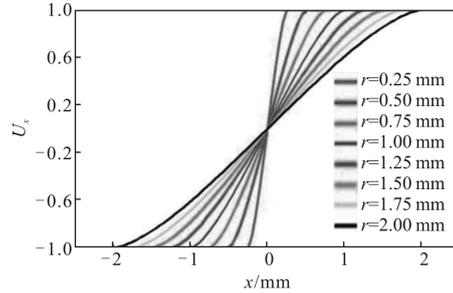


图 4 光斑半径  $r$  不同时  $U_x$  随  $x$  的变化曲线

Fig.4 Curve of  $U_x$  with  $x$  for different radii  $r$  of the spot

公式(8)中对  $x$  求导可得  $x$  方向的光斑位置探测灵敏度  $S_x$  为：

$$S_x = \frac{dU_x}{dx} = \frac{4}{\pi r^2} \sqrt{r^2-x^2} \quad (10)$$

所以当  $x=0$  时，可得公式(11)，即当光斑中心与四象限探测器的中心重合时  $S_x$  与光斑半径  $r$  成反比：

$$S_x = \frac{4}{\pi r} \quad (11)$$

同理可得  $y$  方向的光斑位置探测灵敏度  $S_y$  为：

$$S_y = \frac{dU_y}{dy} = \frac{4}{\pi r^2} \sqrt{r^2-y^2} \quad (12)$$

根据公式(10)可得出  $r$  不同时  $S_x$  随  $x$  的变化曲线，如图 5 所示。从图中可知光斑中心越接近四象限探测器坐标原点灵敏度越好。

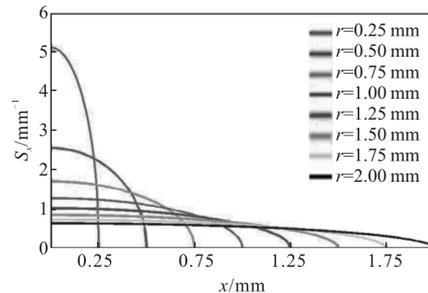


图 5 光斑半径  $r$  不同时  $S_x$  随  $x$  的变化曲线

Fig.5 Curve of  $S_x$  with  $x$  for different radii  $r$  of the spot

2.2.2 实际的四象限探测器

实际情况下四象限探测器的四个象限之间是有间隙的，即沟道宽度，如图 6 所示，设四象限探测器的沟道宽度为  $m$ ， $U_x、U_y$  分别表示横向、纵向的输出

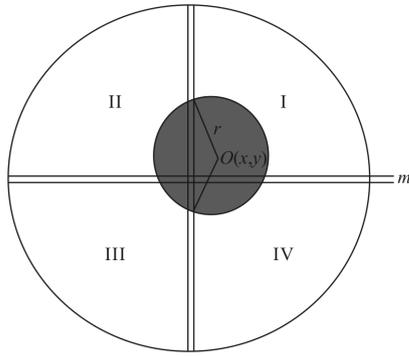


图 6 实际的四象限探测器

Fig.6 An actual four-quadrant detector

偏移量电压信号,则:

$$U_x = \frac{(U_1+U_4)-(U_2+U_3)}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{(S_1+S_4)-(S_2+S_3)}{S_1+S_2+S_3+S_4} = \frac{2 \int_{-x-\frac{m}{2}}^{x+\frac{m}{2}} \sqrt{r^2-x^2} dx - mx}{\pi r^2 - 2 \int_{y-\frac{m}{2}}^{y+\frac{m}{2}} \sqrt{r^2-y^2} dy - 2 \int_{x-\frac{m}{2}}^{x+\frac{m}{2}} \sqrt{r^2-x^2} dx + m^2} \quad (13)$$

$$U_y = \frac{(U_1+U_2)-(U_3+U_4)}{U_1+U_2+U_3+U_4} = \frac{(S_1+S_2)-(S_3+S_4)}{S_1+S_2+S_3+S_4} = \frac{2 \int_{-y-\frac{m}{2}}^{y+\frac{m}{2}} \sqrt{r^2-y^2} dy - my}{\pi r^2 - 2 \int_{y-\frac{m}{2}}^{y+\frac{m}{2}} \sqrt{r^2-y^2} dy - 2 \int_{x-\frac{m}{2}}^{x+\frac{m}{2}} \sqrt{r^2-x^2} dx + m^2} \quad (14)$$

公式(13)、(14)分别对  $x$  和  $y$  求导,得到光斑位置探测灵敏度  $S_x, S_y$ ,则当光斑中心与探测器中心重合时,即  $x=y=0$  时,得到公式(15):

$$S_{x=0,y=0} = \frac{dU_x}{d_x} = \frac{dU_y}{d_y} = \frac{2 \frac{\sqrt{4r^2-m^2} - m}{\pi r^2 - 4r^2 \sin^{-1}(m/2r) - m \sqrt{4r^2-m^2} + m^2}}{\quad} \quad (15)$$

用控制器来控制偏转镜的偏转角度( $\beta$ ),光斑扫描探测器的整个靶面,可得到  $U_x$  随  $\beta$  的变化曲线,从而获得曲线线性区的的变化斜率  $h(h=\Delta U_x/\Delta\beta)$ ,又因为  $S_x=dU_x/d_x=h/b$ , $b$  为偏转镜与探测器之间的距离。将  $S_x$  代入公式(15)即可得到光斑半径  $r$ ,则光斑直径  $D_i=2r$ 。

### 3 数据处理及分析

由于四象限探测器的四个象限之间存在宽度不同的沟道,且沟道宽度对数据的测量结果会产生影

响,进而影响光纤的焦比退化测量精度,所以文中取三个不同的沟道宽度,对其相应的焦比退化测量结果进行对比。根据图 2,调节光纤出射端与四象限探测器之间的距离  $d(10、15、20、25、30 \text{ mm})$ ,相应的光斑直径为  $D_1、D_2、D_3、D_4、D_5$ ,对这五次测量结果进行数据处理,可求出相应的出射焦比  $f_{out}$ ,然后对五次出射焦比取平均值,即可获得此光纤的焦比退化程度。光纤的入射焦比也是影响光纤焦比退化的因素之一,文中光纤的入射焦比为  $f/5$ 。

#### 3.1 理想的四象限探测器

理想情况下四象限探测器的沟道宽度  $m=0$ ,根据公式(11), $S_x=4/\pi r$ ,调节光纤出射端与四象限探测器之间的距离  $d$ ,经测试得  $d=10 \text{ mm}$ , $S_x=1.179$ ;  $d=15 \text{ mm}$ , $S_x=0.791$ ;  $d=20 \text{ mm}$ , $S_x=0.579$ ;  $d=25 \text{ mm}$ , $S_x=0.445$ ;  $d=30 \text{ mm}$ , $S_x=0.369$ 。如表 1 所示,将  $S_x$  带入上式求出相应的光斑半径  $r$ ,则相应直径  $D_i=2r$ 。

表 1 沟道宽度  $m$  为 0 mm 的数据

Tab.1 Data with channel width  $m$  of 0 mm

$d/\text{mm}$	$D_i/\text{mm}$	$f_{out}(d/D_i)$
10	2.16	4.762
15	3.22	4.658
20	4.40	4.545
25	5.72	4.371
30	6.90	4.348
Average		4.536 8

#### 3.2 沟道宽度为 $m=0.05 \text{ mm}$

当沟道宽度为 0.05 mm 时,经测试得  $d=10 \text{ mm}$ , $S_x=1.2$ ;  $d=15 \text{ mm}$ , $S_x=0.78$ ;  $d=20 \text{ mm}$ , $S_x=0.568$ ;  $d=25 \text{ mm}$ , $S_x=0.447$ ;  $d=30 \text{ mm}$ , $S_x=0.369$ 。如表 2 所示,将  $m$  带入公式(15)求出相应的光斑半径  $r$ ,则相应直径  $D_i=2r$ 。

表 2 沟道宽度  $m$  为 0.05 mm 的数据

Tab.2 Data with channel width  $m$  of 0.05 mm

$d/\text{mm}$	$D_i/\text{mm}$	$f_{out}(d/D_i)$
10	2.20	4.545
15	3.34	4.491
20	4.56	4.386
25	5.78	4.325
30	6.98	4.298
Average		4.409

### 3.3 沟道宽度为 $m=0.10\text{ mm}$

当沟道宽度为  $0.10\text{ mm}$  时,经测试得  $d=10\text{ mm}$ ,  $S_x=1.209$ ;  $d=15\text{ mm}$ ,  $S_x=0.775$ ;  $d=20\text{ mm}$ ,  $S_x=0.568$ ;  $d=25\text{ mm}$ ,  $S_x=0.448$ ;  $d=30\text{ mm}$ ,  $S_x=0.37$ 。如表 3 所示,将  $S_x$  及  $m$  带入公式(15)求出相应的光斑半径  $r$ ,则相应直径  $D_i=2r$ 。

表 3 沟道宽度  $m$  为  $0.10\text{ mm}$  的数据

Tab.3 Data with channel width  $m$  of  $0.10\text{ mm}$

$d/\text{mm}$	$D_i/\text{mm}$	$f_{\text{out}}(d/D_i)$
10	2.26	4.425
15	3.44	4.361
20	4.64	4.310
25	5.84	4.281
30	7.04	4.261
Average		4.3276

根据表 1~3 的数据可以得到不同沟道宽度时出射光斑直径  $D_i$ 、光斑出射焦比  $f_{\text{out}}$  随光纤出射端与四象限探测器的距离  $d$  的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,当光纤出射端与四象限探测器的距离  $d$  越远时出射光斑直径  $D_i$  越大;当距离  $d$  相同,四象限探测器的沟道宽度越宽时,出射光斑直径  $D_i$  越大。

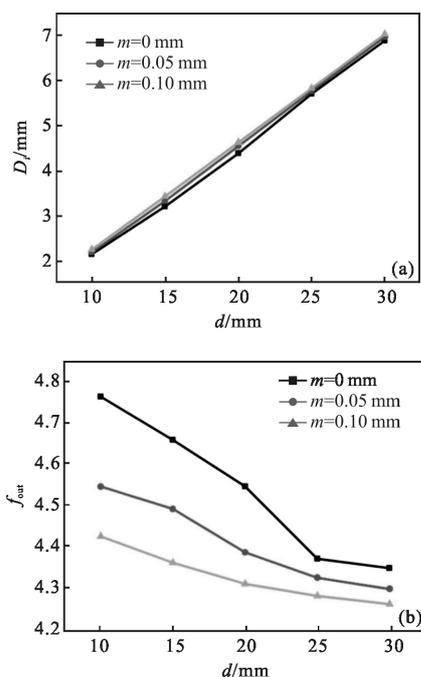


图 7 沟道宽度不同时  $D_i, f_{\text{out}}$  随  $d$  的变化曲线

Fig.7 Curve of  $D_i, f_{\text{out}}$  with  $d$  for different channel widths

由以上三组数据进行对比可知,四象限探测器的沟道宽度为  $0.05\text{ mm}$  时比沟道宽度为  $0\text{ mm}$  测得的焦比退化增长  $2.556\%$ ;沟道宽度为  $0.10\text{ mm}$  时比沟道宽度为  $0\text{ mm}$  测得的焦比退化增长  $4.184\%$ ,比沟道宽度为  $0.05\text{ mm}$  时测得的焦比退化增长  $1.628\%$ 。即光纤焦比退化测量精度与四象限探测器的沟道宽度有关系,且沟道较宽的四象限探测器,光纤焦比退化的测量精度会降低。

## 4 结论

文中提出了一种基于四象限探测器的光纤焦比退化的测量方法,对光斑位置探测灵敏度与光斑半径的关系进行了分析,并将理想四象限探测器与实际四象限探测器测得的焦比退化进行了对比,结果表明,该方法可有效进行光纤焦比退化的测量。该方法利用光斑扫描探测器的整个靶面,理论上可导出任何形态光斑的轮廓,进而精确计算光纤的焦比退化,但测量精度会受到四象限探测器沟道宽度的影响。使用沟道宽度为  $0.05\text{ mm}, 0.10\text{ mm}$  的四象限探测器测得的焦比退化分别比理想状态下(沟道宽度趋于  $0$ )测得值增长了  $2.556\%, 4.184\%$ ,得出光纤的焦比退化测量精度随着沟道宽度的增加而降低,因此应尽量选择低沟道宽度的四象限探测器来提高光纤焦比测量精度。

## 参考文献:

- [1] Zhang Kaiyuan, Zheng J R, Saunders W. High numerical aperture multimode fibers for prime focus use [C]// Proceedings of SPIE, 2016, 9912: 99125J-1-11.
- [2] Chen Jianjun, Bai Zhongrui, Li Guangwei, et al. Correction of fiber throughput variation due to the focal ratio degradation [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2015, 35(4): 1099-1102. (in Chinese)
- [3] Bryant J J, Blandhawthorn J, Fogarty L M R, et al. Focal ratio degradation in lightly fused hexabundles [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2014, 438 (1): 869-877.
- [4] Allingtonsmith J, Dunlop C, Lemke U, et al. End effects in optical fibres[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2013, 436(4): 3492-3499.
- [5] Poppett C L, Allingtonsmith J. Fibre systems for future

- astronomy: anomalous wavelength-temperature effects [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2007, 379(1): 143–150.
- [6] Eigenbrot A D, Bershadsky M A, Wood C M. Impact of surface-polish on the angular and wavelength dependence of fiber focal ratio degradation [C]//Proceedings of SPIE, 2012, 8446: 84465–84475.
- [7] Poppett C L, Aringtonsmith J. The dependence of the properties of optical fibres on length [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2010, 404(3): 1349–1354.
- [8] Reynolds R O, Bechter A, Crass J. Effects of fiber manipulation methods on optical fiber properties [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9912: 991256–1–11.
- [9] Santos J B, Oliveira A C, Gunn J, et al. Studying focal ratio degradation of optical fibers for Subaru's Prime Focus Spectrograph[C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9151: 1–6.
- [10] Allingtonsmith 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.
- [11] Fagrelus P, Poppett C, Edelstein J, et al. Fusion splicing: A novel approach to fiber connections for the Dark Energy Spectroscopic Instrument [C]//Proceedings of SPIE, 2016, 9908: 99087Q–1–9.
- [12] Haynes D M, Withford M J, Dawes J M, et al. Relative contributions of scattering, diffraction and modal diffusion to focal ratio degradation in optical fibres [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2011, 414(1): 253–263.
- [13] Finstad D, Wishnow E, Poppett V, et al. Collimated focal ratio degradation testing for highly multiplexed fiber systems –an improvement to a standard test [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(25): 6829–6831.
- [14] Wang Sen, Zhu Bing. Focal ratio degradation of large core spectrum light-transmitting optical fiber [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, 38(7): 17–24. (in Chinese)
- [15] Chen Yong, Zhu Tianrui, Li Rui. Design and realization of the angle measurement algorithm of the four-quadrant detector based on the interpolation algorithm [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(3): 544–547. (in Chinese)
- [16] Tang Yanqin, Gu Guohua, Qian Weixian, et al. Laser spot center location algorithm of four-quadrant detector based on Gaussian distribution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0206003. (in Chinese)