

中心开孔型四象限探测器光纤定位闭环控制方法

王淋正, 邹 华*, 黄 硕, 张 航, 赵世宇

(河海大学理学院, 江苏南京 210098)

摘要: 光纤定位技术是多目标光纤光谱望远镜中的关键技术, 光纤定位精度是影响望远镜观测效率的重要因素, 随着光谱巡天项目的开展, 光纤定位单元的小型化、高密度化、集成化和高精度定位要求成为普遍趋势, 这对光纤定位系统提出了更高技术要求和挑战。光纤定位技术也期望实现高精度的实时监测和反馈系统, 形成有效的闭环控制。基于此提出了一种中心开孔型四象限探测器光纤定位技术, 并利用二维高斯模型对中心开孔型四象限探测器定位算法进行了设计, 该算法对单元光斑束腰单次标定, 可实现高精度的多次实时光斑位置确定和光纤位置调整。利用光纤光谱仪望远镜原理搭建了模拟实验对此装置和算法的性能进行了模拟, 应用此闭环控制方法, 在四象限探测器零点偏置直径为 4 mm、光纤截面积达到 1 000 μm^2 情况下, 绝对定位误差可以控制在 6 μm 之内, 相对误差可控制在 0.15% 范围内, 可以有效提高望远镜星象和光纤的耦合效率。

关键词: 光纤定位; 四象限探测器; 天文观测

中图分类号: O439 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20190466

Closed-loop control method of optical fiber positioning of center-opening four-quadrant detector

Wang Linzheng, Zou Hua*, Huang Shuo, Zhang Hang, Zhao Shiyu

(College of Science, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Optical fiber positioning technology is a key technology in multi-target optical fiber spectroscopes. The accuracy of optical fiber positioning is an important factor affecting the observation efficiency of telescopes. With the development of the spectral survey project, the requirements for the optical fiber positioning unit to be miniaturized, high density, integrated and high precision positioning have become a general trend, which poses higher technical requirements and challenges for optical fiber positioning systems. Optical fiber positioning technology was also expected to achieve a high-precision real-time monitoring and feedback system, forming an effective closed-loop control. Based on the requirements, a center-opening four-quadrant(4-Q) detector fiber positioning technology was proposed, and a two-dimensional Gaussian model was used to design the center-opening four-quadrant detector positioning algorithm. The algorithm performs a single calibration of the unit beam spot waist, can achieve high precision multiple real-time spot position determination and fiber position adjustment. The performance of the device and algorithm was simulated with the experiment set up based on the principle of the optical fiber spectroscopy telescope. With this closed-loop control method, the absolute positioning error was obtained when the four-quadrant detector had a zero offset diameter of 40 mm and a fiber

收稿日期:2020-03-05; 修订日期:2020-04-10

作者简介:王淋正(1997-),男,博士生,主要从事空气等离子体和光纤光谱仪效率优化相关的研究。Email: linzhengwanghhu@163.com

通讯作者:邹华(1978-),女,副教授,硕士生导师,博士,主要从事高分辨率光谱仪效率优化设计、飞秒微结构光信息处理、信息光学等方面的研究。Email: zouhua96@163.com

cross-sectional area of $1\ 000\ \mu\text{m}^2$. It can be controlled within $6\ \mu\text{m}$, and the relative error can be controlled within 0.15% , which meets the requirements of the optical fiber spectroscopy telescope fiber positioning technology. This device can be applied as an optical fiber positioning system.

Key words: fiber positioning; four-quadrant detector; astronomy observation

0 引言

目前天文学已经进入了“多波段、大样本、高信息量”的时代,这对天文观测提出了更高的要求,大规模的多目标光纤光谱巡天成为天文观测的突破口^[1],其目的是获取数以十万、百万甚至千万计天体的光谱,可以得到成像巡天所不能提供的更加丰富的天体信息^[2]。

光纤定位技术是光纤光谱仪望远镜最关键技术之一,光纤定位的精度也是影响望远镜观测效率的重要因素之一。目前应用于光纤光谱仪巡天望远镜的光纤定位技术主要包括磁扣法、孔板法、双回旋定位法等。英澳天文台的 $3.9\ \text{m}$ 口径望远镜中利用了磁扣法定位,棱镜下方安装磁扣,通过机械手臂将磁扣按照预先设定好的坐标位置吸附在焦面板上,星光经棱镜折射进入光纤^[3];美国斯隆巡天项目采用了孔板法定位^[4],经星象坐标换算,在一块直径 $500\ \text{mm}$ 的球冠型铝板进行打孔,在观测前人工把 660 根光纤安装到焦面板上对应的孔位中;中国 LAMOST 望远镜采用了并行双回转式可控光纤定位系统,将望远镜焦面上呈蜂窝状加工成约 $4\ 000$ 个轴线朝向球心的独立单元,每个单元有轴向和径向两个回转轴,由两个步进电机分别驱动两轴作回转运动,带动光纤实现开环控制的实时定位^[5]。

随着光谱巡天项目的开展,光纤定位单元的小型化、高密度化、集成化和高精度定位要求成为普遍趋势,这也对光纤定位系统提出了更高技术要求和挑战。光纤定位技术也期望实现高精度的实时监测和反馈系统,形成有效的闭环控制。利用四象限探测器可以实现光斑的高精度定位、实时反馈光斑位置信息的特点,设计了一种基于中心开孔型四象限探测器的光纤定位系统。该系统利用四象限探测器接收光斑信号,利用二维高斯拟合算法获取光斑中心位置,实现实时定位。在四象限探测器中心开孔,接入光纤,步进电机驱动四象限探测器,利用光斑位置信息实现

光纤位置的闭环控制,并利用接入的光纤实现光斑信号的实时传输。利用搭建基于光纤光谱仪望远镜的实验平台,对中心开孔型四象限探测器的定位过程进行了模拟,获得了较高的光纤定位精度。

1 中心开孔型四象限探测器光纤定位系统的设计

1.1 中心开孔型四象限探测器

四象限探测器是利用集成电路光刻蚀技术制作的一种光电器件,如图 1 所示,将一个光敏面等分为四个形状相同的区域,每个区域相当于一个独立的光电器件,而四个象限则具有相同的性能参数^[6]。由于四象限探测器具有分辨率高,响应时间短,灵敏度高,体积和结电容较小,抗干扰能力强等特点,因而被广泛应用于光学定位^[7-8]、激光定准^[9-10]、信号传输^[11-12]等诸多领域。

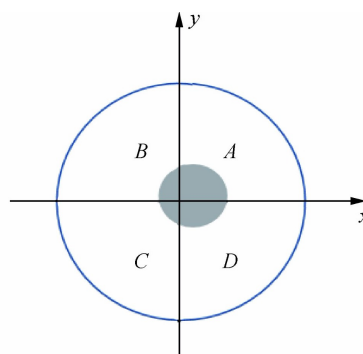


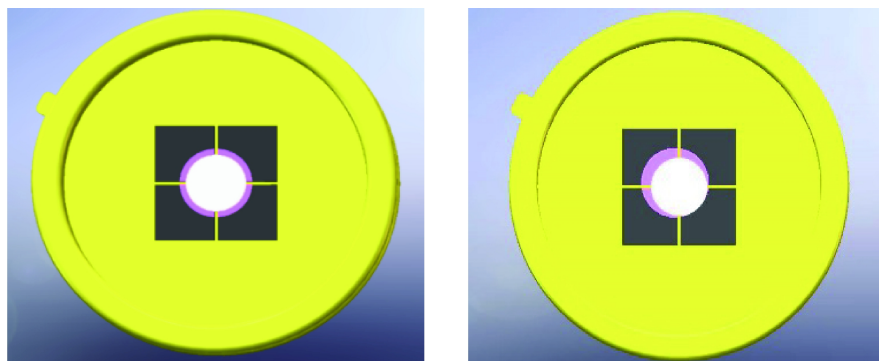
图 1 四象限探测器焦面结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the focal plane structure of the 4-Q detector

四象限探测器进行光斑定位时,光斑落在光敏面上,后经过光电转换和电信号放大等过程,得到四个象限光照强度所对应的电压值,由于四个象限的处理电路在理论上完全相同,因而放大系数一致。四象限探测器光斑中心坐标常采用比幅归一算法^[13],将光斑近似看作均匀分布可得到:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{(U_A + U_D) - (U_B + U_C)}{(U_A + U_B) + (U_C + U_D)} \\ \Delta y &= \frac{(U_A + U_B) - (U_C + U_D)}{(U_A + U_B) + (U_C + U_D)} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: 光斑中心位置为 $(\Delta x, \Delta y)$; A 、 B 、 C 、 D 四个象限对应的输出电压值为 U_A 、 U_B 、 U_C 、 U_D 。



(a) 完全定准时的情况 (b) 光斑偏离中心的情况
(a) Case the calibration is completely fixed (b) Case the spot is off center

图 2 中心开孔型四象限探测器

Fig.2 Center-drilled 4-Q detector

1.2 中心开孔型四象限探测器高斯定位算法

天文观测中所用光纤芯径通常在几十微米至几百微米之间, 比如 LAMOST 中通常使用 $320 \mu\text{m}$ 的光纤, 最粗的光纤达 $440 \mu\text{m}$ ^[14]。将四象限探测器应用于光纤定位系统, 在星象光斑完全落入四象限中心孔时, 在光斑覆盖中心小孔时, 孔内四个象限的光通量近似地相等, 四个象限内光通量分别是孔内光通量总量的 $1/4$, 如公式 (2) 所示:

$$\begin{aligned} U_A &= U_{A0} + 1/4U_H \\ U_B &= U_{B0} + 1/4U_H \\ U_C &= U_{C0} + 1/4U_H \\ U_D &= U_{D0} + 1/4U_H \end{aligned} \quad (2)$$

式中: U_H 为孔内的光辐射能量对应的电压值。进而, 将公式 (2) 代入公式 (1) 中, 化简可以得到打孔之后光斑中心位置的比幅归一公式, 如公式 (3) 所示:

$$\begin{aligned} \Delta x &= \frac{(U_{A0} + U_{D0}) - (U_{B0} + U_{C0})}{U_{A0} + U_{B0} + U_{C0} + U_{D0} + U_H} \\ \Delta y &= \frac{(U_{A0} + U_{B0}) - (U_{C0} + U_{D0})}{U_{A0} + U_{B0} + U_{C0} + U_{D0} + U_H} \end{aligned} \quad (3)$$

望远镜星象轮廓可近似为二维高斯分布, 星象落在四象限探测器上的光斑中心位置坐标为 $(\Delta x, \Delta y)$, $I_{(x,y)}$ 表示 (x,y) 处的光强值, 则二维高斯分布的能量分

该方法采用如图 2 所示的中心开孔型四象限探测器, 在探测器光敏面上利用刻蚀技术进行打孔处理, 再与光纤端口进行耦合, 在接收光斑信号的同时四象限探测器利用孔外的余晖实现星象和光纤的耦合情况的实时监测。

布概率密度函数如公式 (4) 所示^[15]:

$$I_{(x,y)} = \frac{I_0}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y-\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

式中: σ 为高斯分布的束腰半径, 它反映了高斯函数的衰减程度。四象限探测器焦面上的电流和电压值可以分为孔内 (I_H) 和孔外 (I_i) 两个部分, 即可得到:

$$\begin{aligned} I_0 &= I_i + I_o = I_{A0} + I_{B0} + I_{C0} + I_{D0} + I_H \\ U &= kI_0 = k(I_i + I_H) = U_{A0} + U_{B0} + U_{C0} + U_{D0} + U_H \end{aligned} \quad (5)$$

在四象限探测器中, 直角坐标系下, 可以得到各象限电压与偏移量对应关系:

$$\begin{aligned} U_A &= \frac{kI_0}{2\pi\sigma^2} \int_0^\infty \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy \\ U_B &= \frac{kI_0}{2\pi\sigma^2} \int_0^\infty \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy \\ U_C &= \frac{kI_0}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^0 \int_{-\infty}^0 \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy \\ U_D &= \frac{kI_0}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^0 \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y+\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy \end{aligned} \quad (6)$$

采用比幅归一算法计算, 则需要得到四象限探测器上、下、左、右四个半区的电压值公式。利用公式 (6) 可以得到公式 (7):

$$\begin{aligned}
 U_A + U_D &= \frac{kI_0}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y-\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy = \\
 &= \frac{kI_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right] dx \\
 U_A + U_B &= \frac{kI_0}{2\pi\sigma^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2 + (y-\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy = \\
 &= \frac{kI_0}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y-\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dy
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

代入公式 (3) 即可得到中心开孔型四象限探测器的高斯中心定位公式, 如公式 (8) 所示:

$$\begin{aligned}
 \frac{U_{AO} + U_{DO} + 1/2U_H}{U_{AO} + U_{BO} + U_{CO} + U_{DO} + U_H} &= \\
 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(x-\Delta x)^2}{2\sigma^2}\right] dx &= \\
 \frac{U_{AO} + U_{BO} + 1/2U_H}{U_{AO} + U_{BO} + U_{CO} + U_{DO} + U_H} &= \\
 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left[-\frac{(y-\Delta y)^2}{2\sigma^2}\right] dy &=
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

在公式 (8) 中, 有束腰半径 σ 和偏移量坐标 $(\Delta x, \Delta y)$ 三个变量, 通过定准 (可利用四个象限的电压值数据进行比对验证定准) 实现偏移量置零可以解得束腰半径 σ 。束腰半径对于单个单元是一个常量, 因此同一个单元的偏移量坐标 $(\Delta x, \Delta y)$ 可近似地采用恒定的 σ 进行计算。

2 中心开孔型四象限探测器中心定位模拟实验

2.1 实验装置设计

实验中使用如图 3 所示的系统, 以模拟中心开孔型四象限探测器与光纤的耦合体在实际天文观测中的性能。氦氖激光器在实验中常用来模拟星光, 此实验中使用的激光器波长为 632.8 nm。鉴于实验中所用激光器功率远超实际星光辐照功率, 实验中使用由扩束镜、准直透镜、光阑、会聚透镜组成的光学系统来模拟望远镜成像系统。

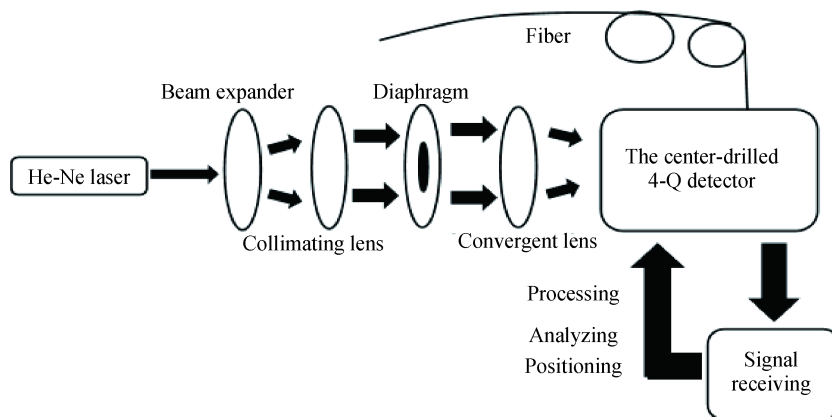


图 3 基于中心开孔型四象限探测器的实验系统

Fig.3 Experimental system based on center-drilled 4-Q detector

实验中使用的四象限探测器采样频率为 2.5 kHz, 四象限探测器单象限取样电压范围为 $(-1 \text{ V}, 1 \text{ V})$, 四象限探测器零点偏置范围为 $(-2 \text{ mm}, 2 \text{ mm})$, 四象限探测器测量单位为 mm, 以 V_{R-L} 表示四象限探测器右半焦面与左半焦面的电压之差, V_{T-B} 表示四象限探测器上半焦面与下半焦面的电压之差, V_{SUM} 表示四象限探测器整个焦面的电压之和, (X, Y) 为实际的光斑中心坐标位置。由中心开孔型四象限探测器定位原理可以得到:

$$\begin{aligned}
 V_R &= 1/2(V_{SUM} + V_{R-L}) \\
 V_T &= 1/2(V_{SUM} + V_{T-B})
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

式中: V_R 表示右半焦面的电压值; V_T 表示上半焦面的电压值。

2.2 光斑束腰半径的获得

在单方向上实现定准, 使得光斑关于沟道对称, 由 V_R, V_T, X, Y 四个值代入公式 (8) 即可得到光斑的束腰半径大小, 光斑束腰半径大小测定获得的部分数据如表 1 所示。为减小误差, 如表 2 所示, 本实验中进行三次重复实验分别获得束腰半径的值, 得到的结

果取平均值,得到光斑束腰半径为 3.09 mm。

表 1 光斑束腰半径的测定数据

Tab.1 Measurement data of the beam waist radius

No.	V_{R-L}	V_{T-B}	V_{SUM}/V	X/mm	Y/mm
A0001	-0.113	-0.002	0.662	-0.681	-0.015
A0002	-0.112	-0.004	0.674	-0.666	-0.021
A0003	-0.113	-0.005	0.670	-0.676	-0.027
...
A1500	-0.111	-0.002	0.665	-0.669	-0.012

表 2 束腰半径确定的实验结果

Tab.2 Experimental results of waist radius determination

V_{R-L}	V_{T-B}	V_{SUM}/V	X/mm	Y/mm	V_R/V_{SUM}	R/mm
-0.112	0.003	0.667	-0.673	-0.018	0.416	3.17
-0.278	0	0.679	-1.639	0.003	0.295	3.04
0.255	0	0.672	1.517	-0.003	0.690	3.05

2.3 中心定位算法模拟实验

得到光斑束腰半径之后,即可进入定位阶段,利用图 3 中所示的光学实验系统,即可采集到如表 3 所示的实验数据,利用中心开孔型四象限探测器的高斯中心定位算法可得到光斑中心偏移量。由于实验中采用的是未打孔的四象限探测器,模拟中心开孔型四象限探测器需要对采样数据进行预处理。

表 3 中心开孔型四象限探测器模拟采样数据

Tab.3 Center-opening 4-Q detector simulation sampling data

No.	V_{R-L}	V_{T-B}	V_{SUM}/V	X/mm	Y/mm
D0001	0.003	-0.004	0.652	0.017	-0.021
D0002	0.003	-0.004	0.650	0.020	-0.022
D0003	0.002	-0.002	0.650	0.014	-0.015
...
D2000	0.001	-0.004	0.648	0.007	-0.022

图 4 中,在焦面上黑色区域内即为中心开孔区域,即

$$X^2 + Y^2 \leq R^2 \quad (10)$$

区域内的采样数据在实际的中心开孔型四象限探测器之中无法得到需要剔除,其中 R 表示圆孔半径大小。

天文观测中所用光纤芯径通常在几十微米至几

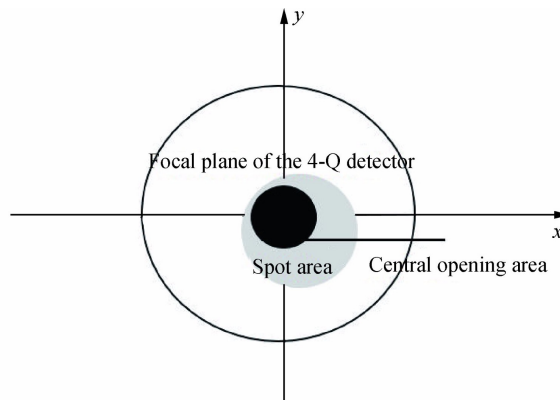


图 4 四象限探测器上中心开孔虚拟区域示意图

Fig.4 Schematic diagram of the virtual area of the center-drilling on the 4-Q detector

百微米之间,比如 LAMOST 中通常使用 $320 \mu\text{m}$ 的光纤,最粗的光纤达 $440 \mu\text{m}$ ^[14]。本模拟装置中四象限探测器的零点偏置直径为 4 mm,据此,取光纤截面积在 $1\ 000 \mu\text{m}^2$ 范围内进行计算,得到绝对误差,计算数据如表 4 所示,其中 (X',Y') 为计算得到的理论中心坐标值, $R^2=0$ 时即为高斯拟合的未开孔四象限探测器中心结果, $Er(X)$ 、 $Er(Y)$ 为实验定位绝对误差,光斑实际中心位置坐标为 $(0.015\ 0, -0.020\ 1)$,单位为 mm。

表 4 中心开孔型四象限探测器模拟结果

Tab.4 Simulation results of the center-drilled 4-Q detector

$R^2/\mu\text{m}^2$	V_L/V_{SUM}	V_T/V_{SUM}	X'/mm	Y'/mm	$Er(X)/mm$	$Er(Y)/mm$
0	0.501 88	0.497 38	0.014 5	-0.020 1	-0.000 5	0
200	0.501 88	0.497 36	0.014 5	-0.020 1	-0.000 5	0
300	0.501 89	0.497 32	0.014 6	-0.020 4	-0.000 4	-0.000 3
400	0.501 93	0.497 32	0.015 0	-0.020 6	0	-0.000 5
500	0.501 99	0.497 23	0.015 5	-0.021 2	0.000 5	-0.001 1
600	0.502 06	0.497 08	0.016 0	-0.022 3	0.001 0	-0.002 2
700	0.502 18	0.496 90	0.016 9	-0.023 7	0.001 9	-0.003 6
800	0.502 20	0.496 76	0.017 1	-0.024 8	0.002 1	-0.004 7
900	0.502 33	0.496 42	0.018 2	-0.025 5	0.003 2	-0.005 4
1 000	0.502 39	0.496 22	0.018 8	-0.026 0	0.003 8	-0.005 9

光纤光谱仪望远镜光纤定位系统中对定位精度有较高要求,例如在 LAMOST 光纤定位系统中,要求误差控制在 $40 \mu\text{m}$ 之内,即相对误差需控制在 10% 之内。从模拟结果可以看出,随光纤直径的增大,两个方向上的定位精度均有下降,但即使在光纤截面积达

到 1 000 μm^2 情况下, 误差仍可以控制在 6 μm 之内, 相对误差可以控制在 0.15%, 可以满足光纤定位的需要。

3 实验误差分析

由于在模拟中采用的模型是高斯模型, 因而需要

对采样数据空间分布进行分析。如图 5 所示, 在这里使用正态分布的 P-P 图进行检验, P-P 图是根据变量的累积概率对应于所指定的理论分布累积概率绘制的散点图, 用于直观地检测样本数据是否符合某一概率分布。如果被检验的数据符合所指定的分布, 则代表样本数据的点应当基本在代表理论分布的对角线上。

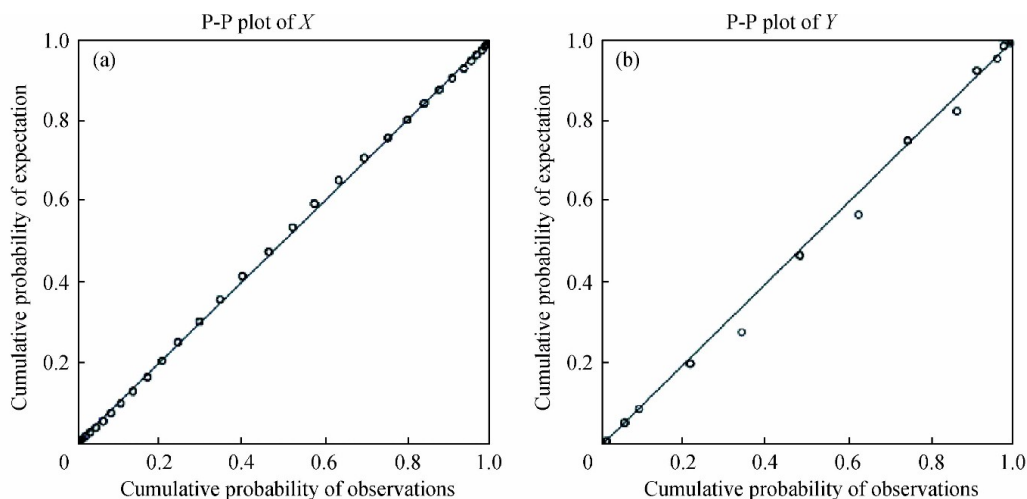


图 5 使用光斑束腰计算所测数据 X 和 Y 绘制的 P-P 图

Fig.5 P-P plot of the measured data X and Y calculated using the beam waist

P-P 图的横坐标为观测量的累积概率值, 纵坐标为正态分布的累积概率值, 散点分布约趋近对角线说明观测量的分布越接近正态分布, 即检验了数据的分布的正态性。利用光斑束腰半径测得的坐标数据, 可以看到数据与正态分布基本吻合, 使用高斯模型进行模拟符合数据的性质。

部分数据偏离对角线主要有以下几点原因。高斯模型只考虑了中心的一级光斑, 而衍射得到的 Airy 光斑中心一级光斑的能量大约占总能量的 84%, 模型本身的缺陷导致了一定程度的误差; 四象限探测器采样为一概率分布, 离散的数据点不能完全反映光场分布情况, 实际操作中可以适当提高采样频率或者加长单次定位测量时间来减小这一误差。

4 结 论

基于目前对光纤定位单元的小型化、高密度化、集成化和高精度定位的需求及四象限探测器轻量化、计算量小、反馈速度快的特点, 文中提出了一种中心开孔型四象限探测器光纤定位方法。利用四象限探

测器实现光斑位置的实时获取和反馈, 并基于反馈信号实现闭环控制, 进而提高望远镜星象和光纤的耦合效率。利用二维高斯模型, 得到了中心开孔型四象限探测器的高斯中心定位算法, 通过一次定位获取光斑束腰半径, 再次对光斑信号进行采样, 即可得到星象光斑中心位置。由于束腰半径对于单个单元是一个常量, 因此一次定准之后可以实现偏移量坐标的实时计算。通过搭建光学平台, 模拟了中心开孔型四象限探测器应用于光纤定位系统中的定位过程, 通过束腰半径的标定、中心位置的采样和计算, 获得了此方法应用于光纤定位系统中的误差模拟情况。在四象限探测器零点偏置直径为 40 mm、光纤截面积达到 1 000 μm^2 接近 69 μm 直径极限情况下, 绝对定位误差可以控制在 6 μm 之内, 相对误差可控制在 0.15% 范围内, 可有效提高望远镜星象和光纤的耦合效率。

参考文献:

[1] Dong Subo, Xie Jiwei, Zhou Jilin, et al. LAMOST telescope reveals that Neptunian cousins of hot Jupiters are mostly single offspring of stars that are rich in heavy elements [J].

- Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(2): 266–271.
- [2] Aleksander Bogucki, Lukasz Zinkiewicz, Wojciech Pacuski, et al. Optical fiber micro-connector with nanometer positioning precision for rapid prototyping of photonic devices [J]. *Optics Express*, 2018, 26(9): 11513–11518.
- [3] Anderson C J, Luciw N J, Li Y C, et al. Low-amplitude clustering in low-redshift 21-cm intensity maps cross-correlated with 2dF galaxy densities [C]//SPIE, 2018, 476(3): 3382-3392.
- [4] Blanton M R, Eisenstein D J, Hogg D W, et al. Relationship between environment and the broad-band optical properties of galaxies in the SDSS [J]. *Astonomical Journal*, 2005, 629: 143.
- [5] Bai Zhongrui, Zhang Haotong, Yuan Hailong, et al. Sky subtraction for LAMOST [J]. *Astronomy and Astrophysics*, 2017, 17(9): 91–100.
- [6] Zhu Chunli, Li Jing. Analysis of stiffness measurement precision of optical trap with Boltzmann statistics method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 1834–1839. (in Chinese)
朱春丽, 李静. 采用玻尔兹曼统计法分析光阱刚度的测量精度 [J]. *光学精密工程*, 2016, 24(8): 1834–1839.
- [7] Wu Hailong, Jia Hongguang, Wei Qun, et al. Optimization of angle increments in tracking loop for roll-pitch seekers [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 26(10): 2787–2795. (in Chinese)
吴海龙, 贾宏光, 魏群, 等. 滚仰式导引头跟踪回路角增量优化 [J]. *光学精密工程*, 2014, 26(10): 2787–2795.
- [8] Xue Peiyao, Wu Yao, Feng Qian, et al. Design of the large field optical system for four-quadrant detecting [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 462–468. (in Chinese)
薛珮瑶, 吴耀, 冯茜, 等. 大视场四象限探测光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 462–468.
- [9] Zhang Junqiang, Xie Fei, Xue Qingsheng, et al. Laser guided lens based on four-quadrant detector [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 471–479. (in Chinese)
张军强, 谢飞, 薛庆生, 等. 基于四象限探测器的激光导引镜头的研制 [J]. *中国光学*, 2015, 8(3): 471–479.
- [10] Grajower Meir, Desiatov Boris, Mazurski Noa, et al. Integrated on-chip silicon plasmonic four quadrant detector for near infrared light [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(14): 3103–3117.
- [11] Han Cheng, Bai Baoxing, Yang Huamin, et al. Study four quadrant detector in the free space laser communication [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(8): 2030–2034.
- [12] Castello M, Sheppard C J R, Diaspro A, et al. Image scanning microscopy with a quadrant detector [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(22): 5355–5358.
- [13] Zhang Meiling, Zou Hua, Liu Jinsheng, et al. Measuring method of fiber focal ratio degradation based on a four-quadrant detector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0617001. (in Chinese)
张美玲, 邹华, 刘金升, 等. 基于四象限探测器的光纤焦比退化的测量方法 [J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(6): 0617001.
- [14] Jiang Hui. Research on camera calibration technology of LAMOST focal plane positioning system [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010. (in Chinese)
江晖. LAMOST 焦面定位系统摄像机标定技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010.
- [15] 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)
唐彦琴, 顾国华, 钱惟贤, 等. 四象限探测器基于高斯分布的激光光斑中心定位算法 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0206003.