

文章编号 1004-924X(2017)12-3187-08

基于二维各向异性高斯拟合评价探测相机的成像质量

李 坤*, 赵建科, 陈永权, 薛 勋, 段亚轩, 曹 昆
(中国科学院 西安光学精密机械研究所, 陕西 西安 710119)

摘要:为了定量评价探测相机的成像质量,提出用二维各向异性高斯函数拟合的方法来评价相机的成像效果。用探测相机采集星模拟器产生的无穷远处的点目标,形成在一定区域内的能量分布。以拟合后的高斯能量分布与原分布的相关度最大为判据,对此能量分布进行二维各向异性高斯拟合,得到其高斯半径、异化因子等参数;对拟合后的结果进行数值积分得到 80% 能量所占区域的大小。实验结果显示:相关度的引入,实现了背景阈值、异性因子的自动优化,减少了面阵探测器的噪声对测试结果的影响;而异性因子的引入,对像素相位误差的评估、光学系统像差对测试结果的影响,均可作为弥散斑测试定量确认的依据。测试实验显示:弥散斑等效面积圆直径测试重复性在“十”字工况吸收为 0.15 pixel,在“田”字工况下为 0.19 pixel。提出的方法完成了探测相机对点目标所成弥散斑的测定,很好地控制了探测相机的成像质量。

关键词:探测相机;像素相位误差;背景阈值;二维各向异性高斯拟合;相关度;异性因子

中图分类号:V447.3;TH703 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20172512.3187

Assessment of image quality for spot-detecting camera with anisotropic Gaussian fitting

LI Kun*, ZHAO Jian-ke, CHEN Yong-quan, XUE Xun, DUAN Ya-xuan, CAO Kun

(Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710119, China)

* Corresponding author, E-mail: wllk-19821118@163.com

Abstract: To evaluate quantitatively the image quality of a spot-detecting camera, a 2D anisotropic Gaussian fitting method was proposed. A spot-detecting camera was used to collect the infinity point target coming from a star simulator, and a certain area of energy distribution was obtained. Based on the correlation of the Gaussian energy distribution and the original distribution, this energy distribution was used in anisotropic Gaussian fitting to solve the parameters such as Gaussian radius and anisotropic factor. Then, the size of 80% of the energy was obtained by numerical integration. The experimental results show that the background threshold and anisotropic factor are optimized automatically and the influence of the noise on test results is reduced since the correlation is introduced. Moreover, the introduction of anisotropic factors, evaluation of pixel-phase error and the effect of optical system aberration on the imaging quality of the camera can be used as the testing condition criterion for defocused spots. The experimental results show that the repeatability of equivalent area circle di-

收稿日期:2017-02-15;修订日期:2017-03-17.

基金项目:中科院知识创新资助项目(No. Y154451ZZ0)

ameter for the defocused spots is 0.15 pixel under the crisscross-shaped condition and that is 0.19 pixel under the farmland-shaped condition, respectively. The proposed method implements the defocused spot test by spot-detecting cameras, and also controls better imaging quality.

Key words: spot-detecting camera; pixel-phase error; background threshold; anisotropic Gaussian fitting; correlation; anisotropic factor

1 引言

探测相机是指搭载于卫星、飞船和空间站平台,用于空间目标观测、平台自身姿态测定,主要针对点目标成像的光电探测设备。该类设备主要由光学系统和面阵探测器组成,为了实现系统对点目标的精确定位,光学系统加入球差或面阵探测器位于光学系统的焦后,其离焦量在加工装配过程中进行控制。

探测相机对点目标的成像能力主要是通过两个阶段形成的,第一阶段是光学镜头设计与加工测试,完成光学系统的弥散斑测定^[1],验证光学镜头在一定的工作距下,具备成规定大小弥散斑的能力;第二阶段是光学镜头与面阵探测器的装配集成,在给定的工作距下,完成面阵探测器的定位和探测器电路参数的优化,对探测器接收到能量形成的弥散斑大小的定量判定是其关键。

目前,对探测相机弥散斑的研究集中于对其定位精度的考核^[2-4],该类方法利用大样本数据的随机性,建立了有效点扩散函数,有效地减少了欠采样造成的影响,实现了高精度定位。徐亮等人通过质心法提取弥散斑能量中心^[5],进而得到弥散斑各点随质心位置的分布,通过一维高斯拟合得到弥散斑的分布特性,由于弥散斑图像的欠采样对质心算法的影响和质心算法对背景阈值的敏感,使得该算法的鲁棒性较差。

本文分析了面阵探测器对光学镜头弥散斑的成像过程,提出了采用二维各向异性高斯函数拟合评价成像效果,将相关度用于评价拟合效果,实现了背景阈值的自适应优化及异性因子的优化;异性因子的给出,对像素相位误差、光学系统像差对测试结果影响的评估,可作为测试过程中,对测试工况确认的判据,从而提高了占总能量 80% 区域的弥散斑直径测试的重复性。

2 探测相机对点目标的成像质量

2.1 面阵探测器对弥散斑的积分离散采样

理想光学系统在像平面所成的星点像的能量分布包含一阶贝塞尔函数,具有精细的“一点一环”的能量分布。在光学系统光轴方向离焦后,星点像将失去其环状结构,呈现高斯分布^[6],因其像差的各向异性,其能量分布可近似为二维各向异性高斯分布^[7]的弥散斑:

$$E(h, v) = \frac{\Phi}{2\pi\sigma_h\sigma_v} \exp\left[-\frac{(h-h_0)^2 + (v-v_0)^2}{2\sigma_h\sigma_v}\right], \quad (1)$$

式中, $E(h, v)$ 为弥散斑的能量分布, Φ 为弥散斑的总能量, σ_h 为 h 方向的高斯半径, σ_v 为 v 方向的高斯半径, (h_0, v_0) 为弥散斑的质心位置。

弥散斑经过面阵探测器积分离散采样^[8],其过程可由下式表征,

$$I(j, k) = \omega \left\{ E(h, v) * \left[\text{rect}\left\{\frac{h}{a}\right\} \text{rect}\left\{\frac{v}{b}\right\} \right] \text{comb}\left\{\frac{h}{c}\right\} \text{comb}\left\{\frac{v}{d}\right\} * \text{rect}\left\{\frac{h}{p}\right\} \text{rect}\left\{\frac{v}{q}\right\} \right\}, \quad (2)$$

其中: $I(j, k)$ 为弥散斑经面阵探测器采样后的灰度分布, a, b 为面阵探测器的单个象元光敏面的横向、纵向尺寸, c, d 为相邻象元的横向、纵向中心间距, p, q 为整个面阵探测器的横向、纵向尺寸, ω 为与面阵探测器的响应灵敏度、曝光时间有关的参数, $\text{rect}()$ 为矩形函数, $\text{comb}()$ 为梳状函数, $*$ 为卷积运算。

面阵探测器对弥散斑的积分离散采样过程可简化为单个独立象元在曝光时间内的接收能量的积分过程,和象元间的电荷转移传输的卷积过程。积分会引起能量分布的集中,而卷积又会造成能量分布的弥散,面阵探测器对弥散斑成像质量是上述两个过程的综合。面阵探测器对弥散斑的积分离散采样过程在一定程度上影响了弥散斑的能量分布,但仍不失高斯分布的特性。

鉴于面阵探测器的制造工艺限制及弥散斑信噪比、动态范围的要求,其单个象元尺寸不能太小,故不能满足空间采样的要求,弥散斑经过面阵探测器采样为欠采样过程。故面阵探测器的灰度分布受弥散斑能量分布的质心与面阵探测器的单个象元光敏面的中心是否匹配影响很大,即像素相位误差^[4]在弥散斑成像质量评价过程中应予以考虑。

2.2 探测相机成像质量评价

弥散斑成像质量评价系统如图 1 所示。

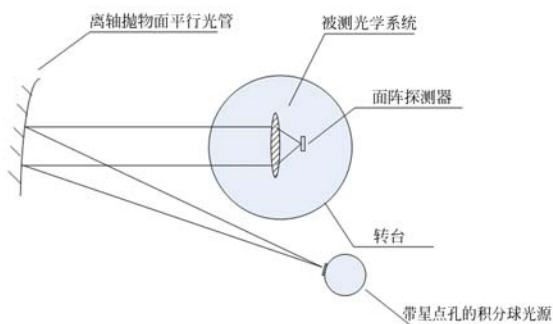


图 1 探测相机弥散斑成像质量评价系统

Fig. 1 Imaging quality evaluation system for spot-detecting camera

离轴抛物面平行光管和其焦平面处的带星点孔的积分球光源组成星模拟器,被测光学系统接收来自星模拟器的平行光成像于其焦平面,面阵探测器在光学系统焦平面附近曝光成像,即采集到弥散斑。高精度转台提供不同的视场角,以得到不同视场下的弥散斑。其中,星点孔直径的大小、积分球光源出光口的光照度满足被测相机对星等模拟器的要求^[9]。

考虑外源辐射能量、面阵探测器本身的响应特性和噪声水平的影响,弥散斑经过面阵探测器积分离散采样后的能量分布可表述为:

$$I(j, k) = f \times \psi_E(j, k) + B, \quad (3)$$

其中: f 为与外源辐射的总能量、面阵探测器量化相关的参数,表现为弥散斑经面阵探测器采样后的最大灰度, B 为弥散斑经面阵探测器采样后的背景噪声, $\psi_E(j, k)$ 为有效点扩展函数。

有效点扩展函数是消除了像素相位误差后,能够得到高精度定位的探测相机的响应函数。在室内测试过程中,无法获得足够多的随机样本,故遍历像素相位误差对测试的影响,得到其消除像

素相位误差的有效点扩展函数。采用异化因子对测试工况的定量确认,需对两种极端工况进行考核。工况 1: 弥散斑能量分布的质心与面阵探测器的单个象元光敏面的中心匹配,能量呈现“十”字分布;工况 2: 弥散斑能量分布的质心与面阵探测器相邻 4 个象元光敏面的中心匹配,能量呈现“田”字分布。

有效点扩展函数的具体表达形式因受面阵探测器积分离散采样及光学镜头像差等各种复杂因素的影响,难用精确的模型表述,而各简化模型之间的差异^[3]并不明显。为简化叙述,并考虑面阵探测器积分离散采样、光学系统像差的各向异性,本文采用二维各向异性高斯函数拟合评价探测相机的弥散斑成像质量。

将二维各向异性高斯函数的拟合结果,进行二维数值积分后得到其 80% 能量区域的大小,将面阵探测器置于满足要求的像面位置,即完成了面阵探测器的定位,具备了探测相机的成像能力。故对面阵探测器采集到的弥散斑进行分析处理,得到可靠稳定的分析结果是探测相机成像的关键技术。

3 图像处理算法

通过面阵探测器积分离散采样,得到数字量化的弥散斑图像,对该图像进行图像处理,其具体流程如图 2 所示。

3.1 相关度

相关度^[10]是表征两幅图像相似程度的参数,其定义由下式给出:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K L_1(j, k) L_2(j, k)}{\sqrt{\sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K L_1^2(j, k) \times \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K L_2^2(j, k)}}, \quad (4)$$

其中: R 为两幅图像的相关度, $L_1(j, k)$ 、 $L_2(j, k)$ 为以像素为单位的图像矩阵, j, k 为像素坐标, J, K 为图像大小。

以原始图像与拟合图像的相似程度作为评价背景阈值优化、二维高斯各向异性拟合效果的判据,可以定量、直观地实现了测试算法中参数的优化。

3.2 背景阈值优化

背景阈值反映了面阵探测器在一定曝光时间

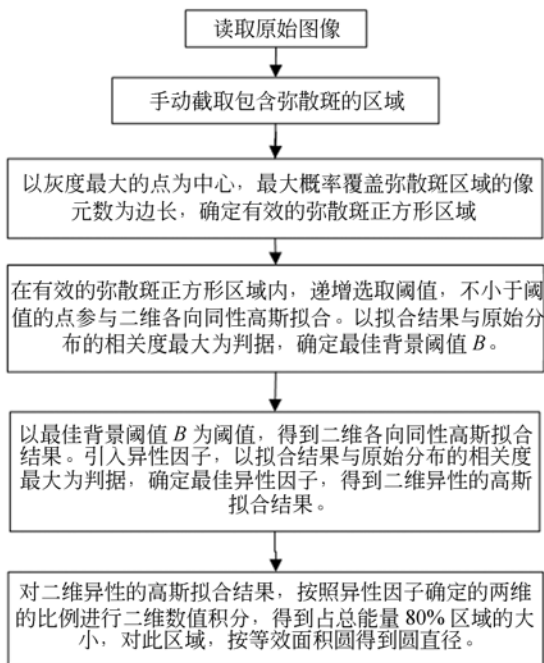


图 2 探测相机弥散斑图像处理流程图

Fig. 2 Flow chart of image processing

和一定增益下的响应特性和噪声水平。

在探测相机对点目标成像时，既要满足对极限星等目标成像满足一定信噪比，具备探测能力，又要对面阵探测器线性响应区内的星等目标尽可能弥散，具备星等目标的定位能力。探测相机的光学系统在选型时，其 F 数都较小，以期具有较强的探测能力；而探测相机的面阵探测器为满足较大的动态范围，其探测器的像元尺寸也较大，故探测相机接收弥散斑的 80% 能量区域集中于 $2 \times 2 \sim 3 \times 3$ 内，其弥散斑 100% 能量最大概率覆盖区域为 5×5 。

背景阈值的选取实现了弥散斑与背景的分，确定了参与拟合计算的有效像元，因弥散斑所占区域较小，故背景阈值的选取对最终拟合结果较为敏感，采用原始图像与拟合图像的相似程度作为背景阈值优化的判据，确定了最优的背景阈值，如图 3 所示，从而实现了背景阈值的自适应优化。

3.3 二维各向异性高斯拟合

因探测相机所成弥散斑所占区域较小，随机噪声对测试结果影响较大，为了给出可靠稳定的测试结果，根据探测相机对点目标的成像特点，采用二维各向异性高斯拟合来评价探测相机对点目

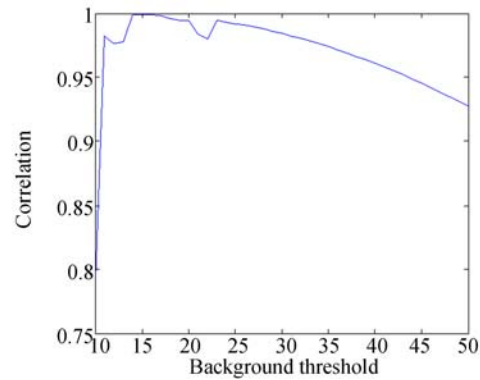


图 3 背景阈值与相关度的关系

Fig. 3 Relationship between background threshold and correlation

标的成像质量。

高斯拟合过程中，像素坐标 j, k 方向的标准偏差 δ_j, δ_k 的乘积作为整体被求解出来，即拟合算法只能得到二维各向同性高斯拟合^[11]的结果。

引入异性因子 ρ ，由下式给定：

$$\rho = \frac{\delta_j}{\delta_k}, \quad (5)$$

其中： δ_j 为像素坐标 j 方向的标准偏差， δ_k 为像素坐标 k 方向的标准偏差。

如图 4 所示，由原始图像与二维各向异性高斯拟合图像的相似程度最大，得到最优的异性因子。

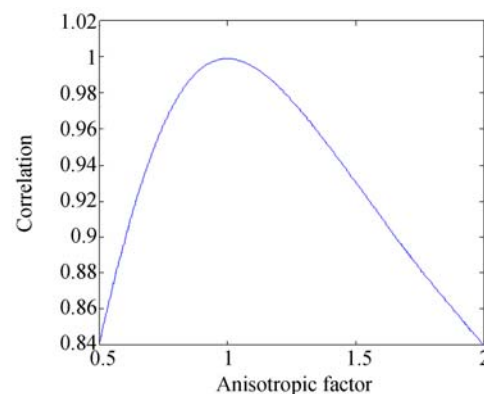


图 4 异性因子与相关度的关系

Fig. 4 Relationship between anisotropic factor and correlation

由二维各向异性高斯拟合，按照异性因子确定的两维比例进行二维数值积分，得到占拟合后总能量 80% 的区域的大小，对该区域按等效面积得到圆的直径。

3.4 测试工况

为了减少像素相位误差对弥散斑测试的影响,对测试弥散斑能量分布的质心与面阵探测器的光敏面的中心匹配情况即测试工况进行控制。以异化因子作为测试工况定量控制的判据;异化因子的引入使得原始图像与拟合图像的相似程度得到提高;相关度的提高量与异化因子的关系如图 5 所示。

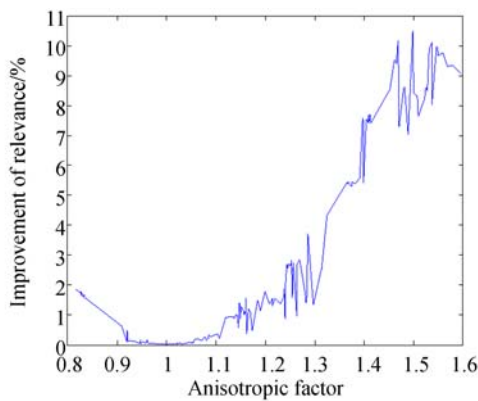


图 5 相关度的提高量与异化因子的关系

Fig. 5 Relationship between improvement of relevance and anisotropic factor

从图 5 可以看出:多次测试试验下,异化因子在 $[0.80, 1.25]$ 区间内,相关度的提高量在 2% 以内,故可将异化因子在 $[0.80, 1.25]$ 区间内作为测试工况确认的标准。为了使测试结果覆盖相机的使用状态,对“十”字、“田”字极端工况进行测试。

4 实验结果和分析

探测相机光学系统的基本参数如下:焦距为

120 mm,入瞳直径为 60 mm,光谱范围为 400 nm ~900 nm;满足要求的工作面为焦后,距离最佳焦面 $35 \mu\text{m}$ 。

探测相机光学系统的面阵探测器的选型如下:芯片类型为 DALSA CCD,型号为 FTT10 10M,量化位数为 10 bit,像元尺寸为 $24 \mu\text{m} \times 24 \mu\text{m}$,像元数为 512×512 ,读出方式为全帧转移、并行输出,曝光时间为 40 ms,测试工况为“十”字分布、“田”字分布,如图 6;测试视场为(中心视场,中心视场)、(-0.7 视场,中心视场)、(0.7 视场,中心视场)(中心视场,-0.7 视场)和(中心视场,0.7 视场)。测试装置如图 7。测试结果见表 1、表 2。



图 6 测试工况:“十”字分布、“田”字分布

Fig. 6 Testing condition of crisscross-shaped and farmland-shaped

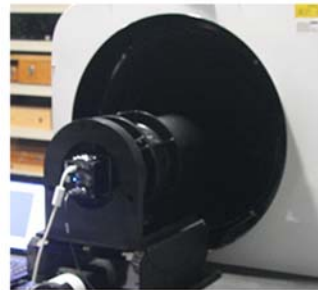


图 7 测试装置图

Fig. 7 Test equipment

表 1 “十”字工况 5 次测量结果

Tab. 1 Under crisscross-shaped condition results of five times repeated measurements

视场	测量次数	最佳背景阈值	初始相关度	异性因子	优化后相关度	总能量 80% 的区域大小/pixel			
						X 维直径	Y 维直径	等效圆直径	平均
(中心视场,中心视场)	1	37	0.998 2	1.001	0.998 3	1.91	1.90	2.15	2.09
	2	39	0.993 7	1.004	0.993 8	1.99	1.97	2.23	
	3	39	0.996 8	1.003	0.997 1	1.86	1.84	2.09	
	4	40	0.992 4	0.984	0.992 5	1.70	1.76	1.95	
	5	40	0.996 1	1.026	0.996 8	1.86	1.76	2.04	

续表 1

视场	测量次数	最佳背景阈值	初始相关度	异性因子	优化后相关度	总能量 80% 的区域大小/pixel			
						X 维直径	Y 维直径	等效圆直径	平均
(−0.7 视场, 中心视场)	1	48	0.989 4	1.037	0.990 8	1.92	1.79	2.09	2.05
	2	50	0.982 0	1.069	0.985 2	1.94	1.70	2.05	
	3	50	0.984 7	1.041	0.986 7	1.86	1.71	2.01	
	4	51	0.980 3	1.069	0.984 3	1.91	1.67	2.01	
	5	51	0.985 0	1.080	0.988 6	1.98	1.70	2.07	
(−0.7 视场, 中心视场)	1	53	0.981 5	1.089	0.986 2	2.10	1.77	2.17	2.22
	2	53	0.972 6	1.080	0.976 6	2.23	1.91	2.33	
	3	55	0.981 1	1.062	0.984 5	2.12	1.88	2.25	
	4	55	0.976 1	1.094	0.981 2	2.00	1.67	2.07	
	5	56	0.983 6	1.045	0.985 5	2.09	1.92	2.26	
(中心视场, −0.7 视场)	1	39	0.981 5	0.96	0.982 8	1.97	2.14	2.32	2.43
	2	38	0.990 7	1.001	0.990 7	2.22	2.21	2.50	
	3	38	0.987 6	0.984	0.988 3	2.24	2.31	2.57	
	4	39	0.986 0	0.969	0.986 6	2.04	2.18	2.38	
	5	38	0.988 1	0.981	0.988 9	2.07	2.15	2.38	
(中心视场, 0.7 视场)	1	51	0.988 6	0.986	0.989 0	1.83	1.89	2.10	2.13
	2	49	0.991 6	0.991	0.991 6	2.03	2.07	2.31	
	3	52	0.986 6	0.957	0.988 3	1.67	1.82	1.97	
	4	51	0.989 4	0.956	0.990 8	1.71	1.87	2.02	
	5	52	0.990 8	0.982	0.991 1	1.95	2.03	2.25	

表 2 “田”字工况 5 次测量结果

Tab. 2 Under farmland-shaped condition results of five times repeated measurements

视场	测量次数	最佳背景阈值	初始相关度	异性因子	优化后相关度	总能量 80% 的区域大小/pixel			
						X 维直径	Y 维直径	等效圆直径	平均
(中心视场, 中心视场)	1	45	0.996 8	1.029	0.996 9	1.75	1.65	1.92	1.83
	2	50	0.992 9	1.009	0.993 0	1.55	1.52	1.73	
	3	48	0.991 4	1.145	0.992 4	1.79	1.37	1.76	
	4	48	0.995 2	1.028	0.995 4	1.75	1.66	1.93	
	5	49	0.993 4	0.947	0.993 5	1.51	1.69	1.80	
(−0.7 视场, 中心视场)	1	54	0.983 9	0.987	0.984 2	1.84	1.88	2.10	2.23
	2	54	0.984 4	0.987	0.984 9	1.91	1.96	2.18	
	3	54	0.984 7	1.046	0.984 9	1.97	1.80	2.13	
	4	51	0.986 7	0.995	0.987 4	2.16	2.18	2.45	
	5	52	0.987 0	1.015	0.987 6	2.06	2.00	2.30	
(0.7 视场, 中心视场)	1	41	0.979 3	0.902	0.983 4	1.79	2.20	2.23	2.24
	2	42	0.986 0	0.978	0.986 6	2.10	2.19	2.42	
	3	42	0.964 9	0.855	0.975 6	1.62	2.22	2.14	
	4	42	0.984 6	0.851	0.992 9	1.62	2.24	2.15	
	5	41	0.976 1	0.907	0.977 9	1.83	2.22	2.27	
(中心视场, −0.7 视场)	1	45	0.961 2	1.233	0.975 5	2.63	1.73	2.41	2.52
	2	43	0.987 6	1.034	0.989 2	2.49	2.33	2.72	
	3	45	0.978 8	1.068	0.980 8	2.43	2.13	2.57	
	4	48	0.978 7	1.074	0.981 4	2.36	2.04	2.48	
	5	49	0.977 1	1.062	0.979 6	2.26	2.01	2.41	
(中心视场, 0.7 视场)	1	60	0.983 9	1.039	0.984 6	2.26	2.09	2.45	2.28
	2	64	0.988 0	1.063	0.989 4	1.90	1.68	2.02	
	3	63	0.992 2	1.030	0.992 6	1.96	1.85	2.15	
	4	60	0.981 2	0.990	0.982 1	2.14	2.19	2.44	
	5	61	0.987 7	0.992	0.988 1	2.05	2.08	2.33	

由表 1、表 2 的测试结果分析,最佳背景阈值在不同视场下的差异反映了面阵探测器在不同区域响应的差异;在同一视场下,最佳背景阈值的波动,反映了面阵探测器同一区域随时间变化的响应差异。在两种工况下,总能量 80% 区域的等效面积圆直径随视场的变化趋势一致,进而表明等效面积圆直径随视场的差异是由视场引入的;同一视场下,两种工况的测试结果较为相近。在同一视场、工况下,异性因子的测试结果较为接近,从而说明以异性因子作为测试工况确定依据的合理性;中心视场光学镜头的像差较小,“田”字工况中,弥散斑质心与面阵探测器相邻 4 个象元光敏面的中心匹配,能量被探测器象元的边缘散射,造成测试结果较“十”字工况偏小,使得中心视场,两种工况测试结果差异较大。

探测器、采集电路的噪声引起探测器响应的波动;星模拟器与探测器组成的系统由于空气扰动、温度的梯度变化造成光学元件的应力等造成像质的变化;以上因素都会造成弥散斑能量分布的改变,从而使得弥散斑测试结果变化;通过多次测量,由极差法^[12]得到总能量 80% 区域的等效面

积圆直径的测试重复性为:“十”字工况:0.15 pixel,“田”字工况:0.19 pixel。

5 结 论

面阵探测器采集的探测相机光学系统离焦所成的弥散斑,经过探测相机面阵探测器积分离散采样,得到数字量化的能量分布,以原始图像与拟合图像的相似程度作为背景阈值、异性因子优化的判据,确定了最优的背景阈值和异性因子。

背景阈值的自适应优化减小了面阵探测器的噪声等系统误差的影响;二维各向异性高斯拟合减小了面阵探测器随机噪声的影响,特别是异性因子的引入,评估了光学系统像差和像素相位误差对测试的影响,通过多次测试试验,给出了满足测试要求的异性因子区间,完成了“十”字工况、“田”字工况下探测相机对点目标成像质量的测试。

该测试方法满足了探测相机成像质量控制的要求,完成了实验室阶段探测相机成像质量评价。

参考文献:

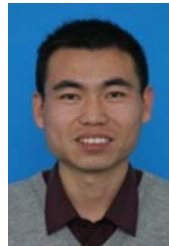
- [1] 李坤,陈永权,赵建科,等. 光学系统弥散斑参数的测试[J]. 光学精密工程,2015,23(9):2482-2489.
LI K, CHEN Y Q, ZHAO J K, *et al.*. Measurement of defocused spot parameters of optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2482-2489. (in Chinese)
- [2] ANDERSON J, KING IR. Toward high-precision astrometry with WFPC 2. 1 deriving an accurate point-spread function[J]. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 2000, 112: 1360-1392.
- [3] 张志渊,彭青玉. ePSF 拟合法与 Gaussian 拟合法的比较[J]. 天文研究与技术,2010,7(2):132-139.
ZHANG Z Y, PENG Q Y. Comparison of fitting ePSF and fitting Gaussian functions[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2010, 7(2): 132-139. (in Chinese)
- [4] 曹西平,彭青玉,张庆丰. 像素相位误差的特性[J]. 天文研究与技术,2011,8(2):159-166.
CAO X P, PENG Q Y, ZHANG Q F. Characteristics of pixel-phase errors[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, 8(2): 159-166. (in Chinese)
- [5] 徐亮,赵建科,薛勋,等. 月基望远镜探测能力的地面标定[J]. 光学精密工程,2012,20(5):972-978.
XU L, ZHAO J K, XUE X, *et al.*. Detectability calibration of lunar-based optical telescope on ground [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(5): 972-978. (in Chinese)
- [6] 黄垒,辛立平,韩旭辉,等. 广角天文望远镜的自动调焦[J]. 光学精密工程,2015,23(1):174-183.
HUANG L, XIN L P, HAN X H, *et al.*. Auto-focusing of wide-angle astronomical telescope [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 174-183. (in Chinese)
- [7] 孔祥楠,卫建华,赵强,等. 基于各向异性高斯核的角点检测[J]. 电子测量技术,2015,38(8):69-72.
KONG X N, WEI J H, ZHAO Q, *et al.*. Corner detection use anisotropic Gaussian filter[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2015, 38(8): 69-72. (in Chinese)
- [8] 刘晶丹,许廷发,荀显超,等. 光学掩模实现几何超分辨率成像的仿真[J]. 光学精密工程,2014, 22(8):2026-2031.
LIU J D, XU T F, XUN X C, *et al.*. Simulation of

- geometric superresolution imaging by using optical mask[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(8): 2026-2031. (in Chinese)
- [9] 刘洪兴,任建伟,刘则洵,等. 基于 LED 的多色温多星等单星模拟器[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0212003.
LIU H X, REN J W, LIU Z X, *et al.*. LED-based single star simulator with multi-color-temperature and multi-star-magnitude output[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0212003. (in Chinese)
- [10] 李正炜,王建立,吴元昊,等. 基于单站地基望远镜的空间姿态估计方法[J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 372-378.
LI Z W, WANG J L, WU Y H, *et al.*. Method of attitude estimation for space object based on single ground-based telescope [J]. *Chinese Optics*. 2016, 9(3): 372-378. (in Chinese)
- [11] 王海涌,周文睿,林浩宇,等. 静态像点高斯灰度扩散模型参数估计方法[J]. *光学学报*, 2012, 32(3): 0323004.
WANG H Y, ZHOU W R, LIN H Y, *et al.*. Parameter estimation of Gaussian gray diffusion model of static image spot [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0323004. (in Chinese)
- [12] 费业泰. 误差理论与数据处理[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
FEI Y T. *Error Theory and Data Processing* [M]. Beijing: China Machine Press, 2004. (in Chinese)

作者简介:



李 坤(1983—),男,山西朔州人,工程师,2009 年于四川大学获得硕士学位,主要从事光学检测技术及图像处理方面的研究。E-mail: wllk-19821118@163.com



陈永权(1979—),男,山西忻州人,高级工程师,2006 年于四川大学获得硕士学位,主要从事激光光束参数标定和质量评价方面的研究。E-mail: cyq@opt.ac.cn



赵建科(1975—),男,陕西宝鸡人,研究员,1999 年于中国计量学院获得学士学位,2009 年于西安交通大学获得硕士学位,主要从事航天、航空相机及光学跟踪测量设备总体指标测试工作。E-mail: zjk@opt.ac.cn

(本栏目编辑:秦 思)