

大口径空间巡天望远镜子孔径拼接平场定标法

逯诗桐^{1,2}, 张天一¹, 张晓辉^{1*}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:大口径空间巡天望远镜的精确平场定标是实现既定科学目标的重要前提。目前普遍是通过平场屏幕或大口径积分球提供均匀平场基准来检验像面响应一致性。针对平场屏幕照明均匀性差, 超大口径积分球制备困难等问题, 本文提出了一种基于子孔径扫描的平场定标方法, 以改善平场基准的均匀性及杂散光导致的定标不确定度。首先, 完成子孔径平场定标理论分析, 建立子孔径平场定标数学模型, 规划子孔径扫描路线及扫描孔径大小, 进行标定用准直系统参数的初设计。其次, 完成像面照度仿真验证实验。最后, 搭建实验平台, 对规划的子孔径进行扫描, 构建全口径照度数据, 验证上述大口径空间巡天望远镜子孔径拼接平场定标方案的可行性。实验结果表明: 以全口径为基准, 用子孔径拼接法扫描待测系统像面能量叠加对比全口径像面照度, 能够恢复全口径的照度信息, 全口径像面灰度值为 231.085, 单个子孔径叠加灰度值为 233.350, 误差为 1%, 本文研究表明子孔径拼接法可用于大口径巡天望远镜的平场定标, 具有实际应用价值。

关键词:大口径; 平场定标; 巡天望远镜; 子孔径拼接

中图分类号: TP394.1; TH691.9

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2019-0252

Flat-field calibration method for large diameter survey mirror aperture splicing

LU Shi-tong^{1,2}, ZHANG Tian-yi¹, ZHANG Xiao-hui^{1*}

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: zhangxiaohui0123@163.com*

Abstract: The accurate flat-field calibration of large-diameter space survey telescopes is an important prerequisite for achieving some established scientific goals. At present, it is common practice to provide a uniform flat-field reference through a flat-field screen or a large-diameter integrating sphere, which is used to check the consistency of an image's plane response. To address issues with the uniformity of flat-field screen illumination and the difficulty of preparing large-size integrating spheres, a flat-field calibration method

收稿日期: 2020-01-03; 修订日期: 2020-02-18

基金项目: 国家自然科学基金: (No. 61875190)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61875190).

based on sub-aperture scanning is proposed in this paper, which improves the uniformity of the flat-field reference and the uncertain calibration caused by stray light. First, we complete a sub-aperture flat-field calibration theory analysis, establish a sub-aperture flat-field calibration mathematical model, plan the sub-aperture scanning route and scan aperture size, and perform the initial design of the parameters of the collimation system for calibration. Secondly, we complete the image surface illumination simulation verification experiment. Finally, we set up an experiment to scan the planned sub-apertures, build full-aperture illuminance data, and verify the feasibility of the above-mentioned large-aperture space survey telescope sub-aperture stitching flat-field calibration scheme. The experimental results show that the full-aperture illuminance information can be restored using the full-aperture stitching method to scan the image surface energy of the system and by using the sub-aperture stitching method to compare and contrast the full-aperture image surface illuminance. The superimposed gray value in our experiment was 233.350 and the error was 1%. It is therefore verified that the sub-aperture stitching method can be used for flat-field calibration of large-diameter sky survey telescopes, and has practical value in real-world applications.

Key words: large diameter; flat-field calibration; survey telescope; sub-aperture stitching

1 引 言

目前,天文学与天文仪器取得了巨大的进展,为了实现更高的空间分辨率与更强的集光能力,国际上已经提出了一系列基于大口径望远镜的巡天计划,如詹姆斯韦伯空间望远镜(JWST)、大型巡天望远镜(LSST)^[1]、30米望远镜(TMT)、广域巡天望远镜(WFIRST)等。我国天文巡天计划虽然起步较晚,但近年已有了跨越式发展,郭守敬望远镜已完成第一阶段运行,公布超过900万条巡天光谱数据^[2]。中国空间站多功能光学设施也已进入最后的研制阶段,其入轨观测后将获得数十亿恒星与星系的海量数据,为天文学与物理学前沿领域的重大突破提供关键线索^[3-4]。

大口径巡天望远镜及终端仪器的精确定标是研制、运行中的重要一环。为了提高观测数据的准确性,一般要进行相关地面定标试验,其中最受关注的是平场定标,目的是解决像面响应的非均匀性。这种像面响应非均匀性不仅直接影响目标辐射强度的测量精度,而且会导致图像上出现或亮或暗的阴影,导致图像分辨率下降^[5-7]。

国际上主流的大口径巡天望远镜平场定标方法均为通过构建平场基准辐射源^[8],再观察基准

辐射源经过光学系统后的像质均匀性情况,应用最广泛的是平场屏幕法和积分球法。但是平场屏幕法的屏幕涂料均匀性无法满足真空测试环境与测试平场均匀性,且空间望远镜巡天项目与地基望远镜有所不同,需在真空模拟环境下进行标定,平场屏幕法是通过光源照亮平场屏幕的,这与真实观测的暗背景不符,将会引入额外环境杂散光,从而增加测试不确定度,无法达到定标精度要求^[9]。此外,大口径积分球法受积分球定标光源体积庞大、积分球内壁朗伯涂层材料污染等原因的影响,无法适用于真空模拟环境。此外,用于大口径积分球照明的卤素灯发热量大,且存在散热问题,其内部充满卤族元素气体需要与外界大气压保持平衡,也不适合在低温真空容器内使用^[10]。

针对上述问题,本文提出了一种基于子孔径拼接扫描的大口径巡天望远镜平场定标方法,改善了平场屏幕法光度不均匀及杂散光导致的不确定度,以提高定标精度。子孔径拼接法基于以小拼大的思想,通过多个子孔径拼接,获得均匀稳定的全口径平场^[11-12]。具体方法是将已知光谱能量分布的光源输入小口径积分球,在积分球出口获得均匀的漫反射光,光线经准直后投射到待测大口径光学系统中,单个子孔径光覆盖全部探测器视场,分别对所有子孔径扫描,构建全口径照度数

据^[13]。以全口径为基准,用子孔径逐一扫描待测系统后得到的像面能量进行叠加后,和直接用全口径扫描得到的像面能量进行对比。经实验验证子孔径扫描法可恢复全口径的照度信息,使用子孔径拼接法进行大口径巡天望远镜平场定标具有实际应用价值。

2 子孔径拼接平场定标理论基础

2.1 平场定标装置组成

子孔径平场定标装置由积分球光源、硅探测器、标定用准直系统、二维扫描机构、光学待测系

统、探测器以及计算机等组成。积分球光源由白光 LED、积分球、分划板组成。图 1 为平场定标系统原理图,使用白光 LED 作为积分球光源,在积分球开口处获得均匀的漫反射光^[14-15]。积分球开口处放置分划板,均匀漫反射光经分划板形成点光源,经标定用准直系统整形为平行光后照射待测光学系统^[16-17]。通过二维扫描机构精确控制扫描路径,使用硅探测器实时监测积分球开口光源辐亮度,通过电流反馈补偿 LED 光源,确保光源在子孔径扫描周期内具有长时间稳定性,以达到定标的精度要求^[18-19]。

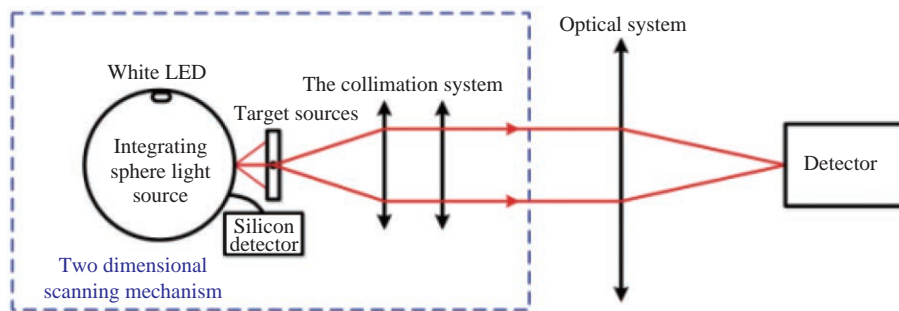


图 1 平场定标系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of flat field calibration system

2.2 子孔径拼接平场定标原理

首先,推导单个子孔径照度与全口径照度间的数学关系。设物面上的辐射元在光学系统像面上的成像为 dS ,出射光束的光亮度为 L 。如果轴外点的成像光束有渐晕,且已知系统的面渐晕系数为 K ,并且轴外像点的光照度随视场角余弦的四次方而降低,则像元 dS 上的光照度为:

$$E = K \frac{\pi T L}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \cos^4 \omega, \quad (1)$$

式中, D 为光学系统的直径, f 为光学系统的焦距, K 为渐晕系数, T 为透过率, ω 为视场角。

全口径的光照度为:

$$E_q = K \frac{\pi T L}{4} \left(\frac{D}{f} \right)^2 \cdot \cos^4 \omega. \quad (2)$$

n 个单个子孔径的光照度为:

$$E_n = K \frac{\pi T L}{4} \left(\frac{d_n}{f} \right)^2 \cdot \cos^4 \omega, \quad (3)$$

式中,单个子孔径光源的直径为 d , n 为子孔径个数。

保证全口径与拼接口径的面积相等,则有

$$\begin{aligned} S_q &= S_p = S_1 + S_2 \cdots + S_n; \\ R^2 &= r_1^2 + r_2^2 + \cdots + r_n^2; \\ \frac{D^2}{4} &= \frac{d_1^2}{4} + \frac{d_2^2}{4} + \cdots + \frac{d_n^2}{4}; \\ D^2 &= d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_n^2; \end{aligned} \quad (4)$$

式中,全口径面积为 S_q ,半径为 R ,单个子孔径的面积为 S_n ,半径为 r_n 。

根据全口径照度与单个子孔径照度的关系,以及面积拼接关系,可推导全口径与所有 n 个子孔径的光照度 E_i 间的关系为:

$$E_q = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n K \frac{\pi T L}{4} \left(\frac{d_i}{f} \right)^2 \cdot \cos^4 \omega, \quad (5)$$

式中每个单个子孔径的直径为 d_i 。

由此可知, 得到单个子孔径光照度后, 分别对所有子孔径扫描, 就可以构建出全口径照度数据。

2.3 子孔径扫描路线及扫描重叠区域的规划

根据式(5)的子孔径拼接平场定标原理可知光照度与孔径直径的平方成比例关系, 用子孔径拼接法进行平场定标时, 对子口径进行扫描, 可以构建全口径照度, 因此, 用子孔径构建全口径照度要保证子孔径拼接面积等于全口径面积。

全口径面积与所有单个子孔径扫描面积相等, 由式(4)可得:

$$D^2 = nd^2. \quad (6)$$

本文结合曝光时间以及工程可实现性定标效率等综合因素, 确定子孔径数量为64, 全口径 $D = 2\,000\text{ mm}$, 子孔径 $d = 250\text{ mm}$ 。

确定各个子孔径的圆心坐标, 保证子孔径叠加面积等于全口径, 子孔径扫描规划示意图如图 2 所示。

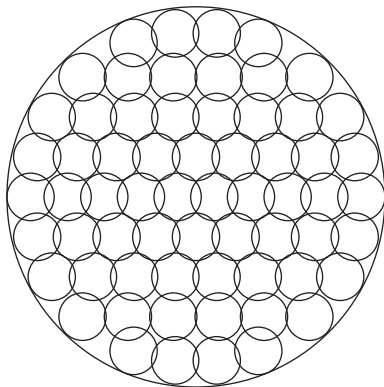


图 2 子孔径扫描路径规划示意图

Fig. 2 Schematic diagram of subaperture scanning route planning

2.4 标定用准直系统参数设计

在子孔径平场定标过程中, 平场基准辐射源的均匀性直接影响定标不确定度。在保证积分球开口处均匀后, 设计双胶合系统作为子孔径拼接平场定标法中的准直系统^[20-21]。

光学设计基本参数如表 1 所示, 双胶合系统结构如图 3 所示, 而波前分布则如图 4 所示, 点列图如图 5 所示。由图 5 可看出, 点列图中的均方根半径是 $0.002\ \mu\text{m}$, 满足了光学系统最小弥散斑的

要求。

表 1 准直系统的设计参数

Tab. 1 Design parameters of collimation system

序号	设计参数	具体参数值
1	焦距/mm	2500
2	口径/mm	250
3	F数	10
4	视场大小/mm	2.2



图 3 准直系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of collimation system

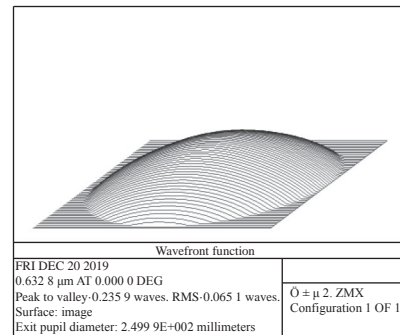


图 4 波前分布图

Fig. 4 Wavefront distribution map

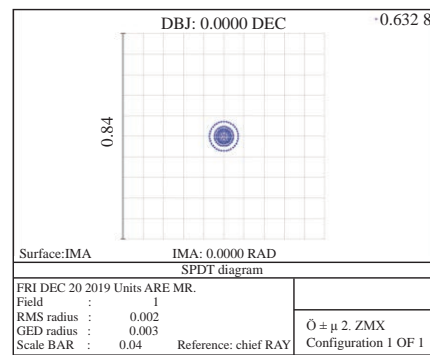


图 5 点列图

Fig. 5 Spot Diagram

准直系统出射光照度分布如图 6 所示(彩图见期刊电子版), 利用 Matlab 软件计算全视场像面照度均匀性, 如图 7 所示。由仿真结果可知, 设计的双胶合准直系统的准直出射光线的辐照均匀度达到了 99.68%, 满足子孔径拼接平场定标对光源均匀性的需求。利用该准直系统能够为大口径

巡天望远镜平场定标提供均匀稳定的光源。

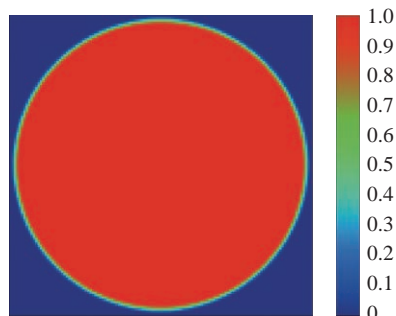


图 6 准直系统出射光照度分布示意图

Fig. 6 Schematic diagram of luminance distribution of collimating system

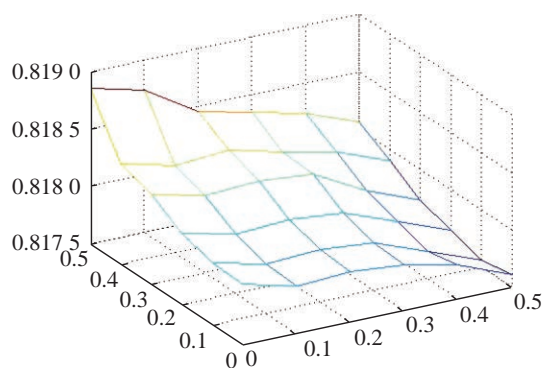


图 7 全视场照度均匀分布示意图

Fig. 7 Schematic diagram of uniform distribution of full field illumination

3 模型仿真验证实验

通过仿真分析验证子孔径拼接平场定标法的可行性, 仿真建模图如图 8 所示。仿真系统设置均匀辐射的面光源模拟积分球开口处光场分布, 光线经前述设计标定用准直系统后, 依次按既定路径扫描入射至待测光学系统入瞳, 并在待测系统入瞳前设置分析面, 通过对比分析等面积的全口径照度与子孔径照度之和来验证标定方法的正确性。

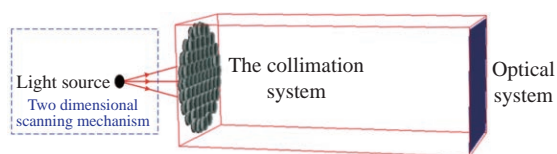


图 8 仿真建模图

Fig. 8 Diagram of simulated model

设置全口径定标光源亮度为 1, 子孔径定标光源亮度为 $1/64$, 执行光线追迹。图 9 为全口径定标待测光学系统入瞳处的照度分布图, 总照度为 0.999。图 10 为子孔径定标待测光学系统照度分布, 总照度为 0.999。仿真数据表明, 子孔径逐一扫描与全口径扫描待测系统像面总能量相等, 通过子孔径拼接扫描的方法, 可以恢复全口径的照度信息。

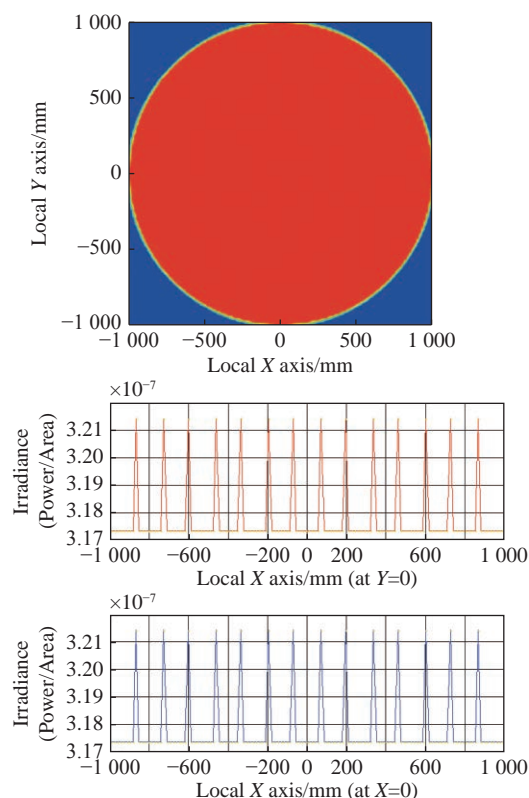
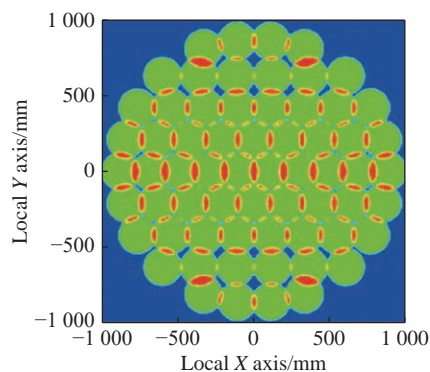


图 9 全口径扫描像面照度仿真分析

Fig. 9 Simulation diagram of illumination of full-aperture scanning image surface



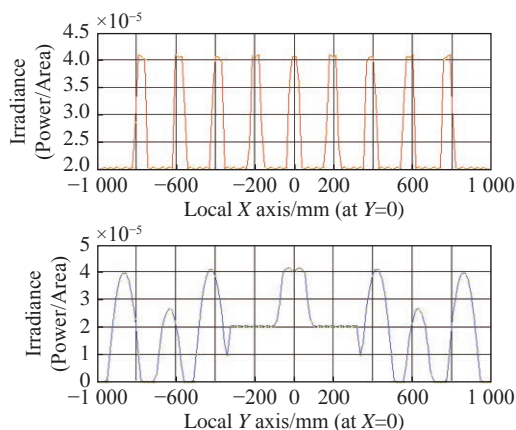


图 10 子孔径扫描像面照度仿真分析

Fig. 10 Simulation diagram of illumination of subaperture scanning image surface

4 实验验证

4.1 子孔径拼接平场定标法实验验证方案

为了验证上述大口径空间巡天望远镜子孔径拼接平场定标方案,建立了如图 11 的实验装置。实验原理如图 1 所示,实验装置参数如表 2 所示。白光 LED 光源目标在积分球内部经均匀漫反射,从积分球出口发出的光线透过分划板形成点光源,再经平行光管出射平行光,通过成像镜头成像至 CCD 上。对平行光管设置光阑,进行子孔径扫描实现像面处不同区域的信息采集,从而获得子孔径的照度信息。平行光管直接照射待测光学系统,采集全口径像面照度信息,计算全口径和子孔径拼接在 CCD 上成像得到的灰度值数据^[22]。



图 11 实验室平场定标实验装置图

Fig. 11 Experimental equipment diagram of flat field calibration

实验中子孔径口径大小为 50 mm,待测光学系统口径为 150 mm,根据式(6)计算得到子孔径个数 n 为 9,规划子孔径的扫描路线及扫描重叠区域,如图 12 所示,完成待测系统平场定标试验。

表 2 实验设备及性能参数

Tab. 2 Experimental equipment and performance parameters

序号	设备名称	性能参数
1	光源(白光LED)	功率 5 W
2	积分球	开口直径 2 mm
3	平行光管	口径 150 mm; 焦距 1 600 mm
4	分划板	孔大小为 2 mm
5	光阑	尺寸 150 mm 透光口直径 50 mm 尼康镜头: 口径 150 mm
6	待测光学系统	焦距 800 mm 像面尺寸 8.8 mm×6.6 mm 感光芯片尺寸 8.5 mm×7.1 mm
7	探测器	像元尺寸 3.45 μm
8	便携式计算机	安装采集软件

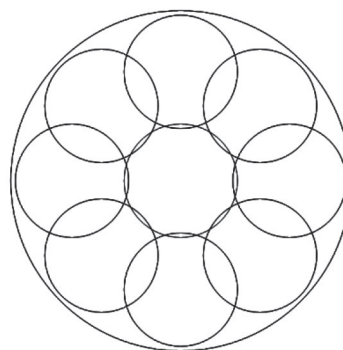


图 12 子孔径扫描分布关系示意图

Fig. 12 Schematic diagram of distribution relation of subaperture scanning

4.2 实验结果及分析

待测光学系统全口径像面 CCD 采集的原始图像如图 13 所示,子孔径拼接扫描 CCD 采集的原始图像如图 14 所示。实验中根据 CCD 采集得到的图像无法准确对比子孔径与全口径之间的照度关系,需将像面灰度值图像数据化,经 Matlab 软件进行数据处理。

子孔径平场定标法通过子孔径子视场恢复全口径照度信息,然而在探测器获取、读出光信号时,不可避免带有诸多种类底部噪声,如散粒噪声、热噪声、信号串扰等,这些噪声在数据融合时会多次叠加,应剔除^[23]。灰度值均值计算流程如图 15 所示,在保证 CCD 采集图像像素点一致的前提下,设置阈值对实验数据进行去噪处理,得到

的实验测量结果如表 3 所示,可见,全口径像面灰度值为 231.085,单个子孔径叠加灰度值为 224.375。

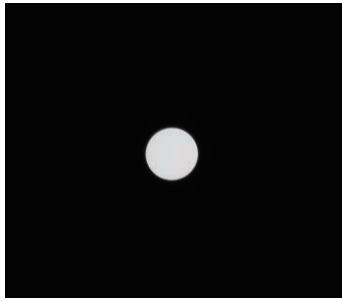


图 13 全口径像面 CCD 采集原始图像

Fig. 13 Original image captured by full aperture image plane CCD

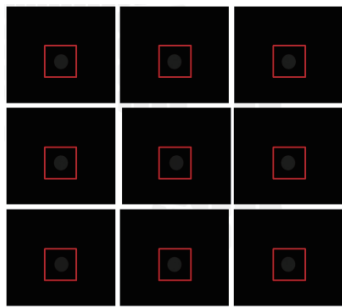


图 14 子孔径像面 CCD 采集原始图像

Fig. 14 Original image captured by the sub-aperture image plane CCD

表 3 实验结果

Tab. 3 Experimental results

DN值	第一次	第二次	第三次	灰度值均值
x_1	26.392 1	26.398 8	26.197 1	$\overline{\sum_{i=1}^{n=9} x_i} = 224.375$
x_2	26.378 3	26.294 2	26.312 6	
x_3	25.806 1	25.773 8	25.807 7	
x_4	26.375 5	26.367 1	26.380	
x_5	24.476 3	24.426 3	24.423 9	
x_6	26.403 8	26.394 6	26.354 8	
x_7	23.923 1	23.912 3	23.884 2	
x_8	25.831 6	25.811 4	25.809 1	
x_9	25.713 8	25.731 8	25.675 8	
x_0	231.301	233.110	230.845	$\overline{x_{全}} = 231.085$

表中 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_9$ 为 n 个子孔径的 DN 值, x_0 为全口径的 DN 值。考虑子孔径扫描过程中光阑的加工误差,如式(5)所示,其理论面积与实际面积之间的差异会直接影响子孔径定标精度。根据半径关系,测得实际光阑面积与理论面积的关系,如式(7)所示,补偿后单个子孔径灰度值的和如式(8)所示。

$$S' = 1.04S, \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{n=9} x'_i = 1.04 \sum_{i=1}^{n=9} x_i = 233.350. \tag{8}$$

计算得到单个子孔径叠加的灰度值为 233.350。以全口径为基准,用子孔径拼接法扫描待测系统的像面能量,再进行叠加,并将其和全口径的像面照度进行对比,恢复全口径照度信息误差为 1%。实验结果与仿真结果基本一致,证明了子孔径拼接平场定标法的可行性。

5 结 论

本文为了解决大口径巡天望远镜平场定标过程中的杂散光等问题,提出了基于子孔径拼接的平场定标方法。介绍子孔径拼接平场定标的装置组成和工作原理,研究标定用准直系统的参数设计,用于保证平场定标光源的均匀性,并完成了像

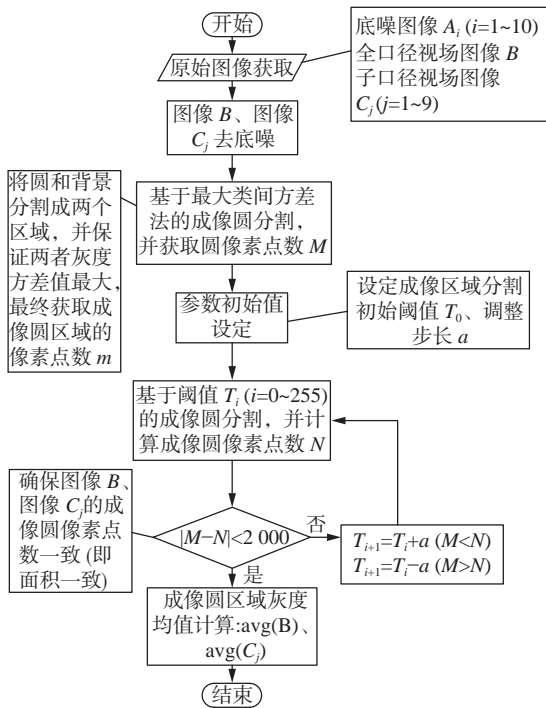


图 15 灰度值均值计算流程图

Fig. 15 Flow chart for calculating mean value of gray value

面照度仿真模型的对比分析。最后, 进行子孔径拼接平场定标法的缩比实验, 证明了该平场定标方法可实现较高精度的平场定标, 具有实用价值。实验结果表明, 以全口径为基准, 采用子孔径

扫描的方法对待测系统进行像面能量叠加, 将子孔径扫描叠加照度与全口径像面照度进行对比, 得到该方法能够恢复全口径的照度信息, 误差为 1%。

参考文献:

- [1] SEBAG J, GRESSLER W J, LIANG M, *et al.*. Calibration systems for LSST[R]. Tucson, AZ: National Optical Astronomy Observatory, 2014: 85719.
- [2] 施建荣. LAMOST望远镜[J]. 科学通报, 2016, 61(12): 1330-1335.
SHI J R. The large sky area multi-object fiber spectroscopic telescope[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2016, 61(12): 1330-1335. (in Chinese)
- [3] 赵永恒. 大规模天文光谱巡天[J]. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44(10): 1041-1048.
ZHAO Y H. Large-scale astronomical spectroscopic surveys[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2014, 44(10): 1041-1048. (in Chinese)
- [4] 郝钟雄. 天文望远镜现状及发展趋势[J]. 现代科学仪器, 2007(5): 30-34.
HAO ZH X. Status and trends of astronomical telescope[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2007(5): 30-34. (in Chinese)
- [5] 赵晓熠. 超大口径凝视相机定标方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
ZHAO X Y. The study of radiometric calibration for staring camera with large diameter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [6] 岳巾英, 李素文, 何玲平. 一种基于非均匀目标的空间相机平场定标方法[J]. 光学仪器, 2016, 38(1): 35-40.
YUE J Y, LI S W, HE L P. A flat field calibration method of space camera based on a non-uniform target[J]. *Optical Instruments*, 2016, 38(1): 35-40. (in Chinese)
- [7] 江孝国, 张开志, 李成刚, 等. 图像平场校正方法的扩展应用研究[J]. 光子学报, 2007, 36(9): 1587-1590.
JIANG X G, ZHANG K ZH, LI CH G, *et al.*. Extended applications of image flat-field correction method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(9): 1587-1590. (in Chinese)
- [8] 任建伟, 刘则洵, 万志, 等. 离轴三反宽视场空间相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2010, 18(7): 1491-1497.
REN J W, LIU Z X, WAN ZH, *et al.*. Radiometric calibration of off-axis three-mirror-anastigmat space camera with wide viewing field[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(7): 1491-1497. (in Chinese)
- [9] RHEAULT J P, DEPOY D L, MARSHALL J L, *et al.*. DECal: a spectrophotometric calibration system for DECam[C]. *SPIE Astronomical Telescopes Instrumentation*, 2013
- [10] 李东景, 于平, 齐心达. 星上定标积分球系统的设计[J]. 光电子技术, 2011, 31(1): 57-62.
LI D J, YU P, QI X D. The design of spaceborne calibration intergrating sphere system[J]. *Optoelectronic Technology*, 2011, 31(1): 57-62. (in Chinese)
- [11] 吴世霞. 大口径平面检测的子孔径拼接算法研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2013.
WU SH X. Research on the sub-aperture stitching algorithm for large optical flat testing[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2013. (in Chinese)
- [12] 闫力松. 子孔径拼接干涉检测光学镜面算法的研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2015.
YAN L S. Research on the algorithm testing optical mirror by subaperture stitching interferometry[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [13] COUGHLIN M, ABBOTT T M C, BRANNON K, *et al.*. A collimated beam projector for precise telescope calibration[C]. *Proceeding of SPIE, Observatory Operations: Strategies, Processes and Systems VI*, 2018.
- [14] 叶钊, 任建伟, 李宪圣, 等. 用于星上定标光源的LED筛选装置[J]. 光学精密工程, 2012, 20(1): 64-71.
YE ZH, REN J W, LI X SH, *et al.*. Screening device for LED as spaceborne calibration light source[J]. *Optics and*

- Precision Engineering*, 2012, 20(1): 64-71. (in Chinese)
- [15] 岳智革, 刘福, 赵贵军, 等. 内置LED定标光源的积分球设计[J]. 光学与光电技术, 2014, 12(4): 52-55.
YUE ZH G, LIU F, ZHAO G J, *et al.*. Integrating sphere design built-in LED calibration light source[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2014, 12(4): 52-55. (in Chinese)
- [16] 李东景, 于平, 王小朋. 星上定标积分球标准光源—稳流源驱动器的研制[J]. 光学精密工程, 2010, 18(1): 212-219.
LI D J, YU P, WANG X P. Development of current stabilized source of standard lamp for spaceborne calibration integrating sphere[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 212-219. (in Chinese)
- [17] 任建伟, 麦镇强, 万志, 等. 星上LED定标光源的可行性研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(3): 398-405.
REN J W, MAI ZH Q, WAN ZH, *et al.*. Feasibility of LED light source in spaceborne calibration[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(3): 398-405. (in Chinese)
- [18] 赫英威, 李平, 吴厚平, 等. 积分球辐射光源照度均匀性研究[J]. 应用光学, 2012, 33(3): 548-553.
HE Y W, LI P, WU H P, *et al.*. Output irradiance uniformity of integrating sphere source[J]. *Journal of Applied Optics*, 2012, 33(3): 548-553. (in Chinese)
- [19] 叶钊, 任建伟, 李葆勇, 等. 大口径积分球辐射定标光源辐射性能研究[J]. 宇航计测技术, 2012, 32(3): 39-44.
YE ZH, REN J W, LI B Y, *et al.*. The radiation testing research of radiometric calibration source of the large aperture integrating sphere[J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2012, 32(3): 39-44. (in Chinese)
- [20] 郭悦, 刘晓鹏, 杨桦. 空间CCD相机的定标方法研究[J]. 光学技术, 2007, 33(S1): 237-238.
GUO Y, LIU X P, YANG H. Analysis of calibration for space CCD camera[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(S1): 237-238. (in Chinese)
- [21] 吴国栋, 张晓辉, 韩昌元, 等. 空间CCD相机辐射标定方法的应用研究[J]. 测试技术学报, 2004, 18(4): 325-329.
WU G D, ZHANG X H, HAN CH Y, *et al.*. Radiometric calibration of the space CCD camera[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, 18(4): 325-329. (in Chinese)
- [22] 刘则洵, 全先荣, 任建伟, 等. CCD相机输出非均匀性线性校正系数的定标[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(8): 2211-2215.
LIU Z X, QUAN X R, REN J W, *et al.*. Calibration of CCD camera's output non-uniformity linear corrected coefficient[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(8): 2211-2215. (in Chinese)
- [23] 王文华, 何斌, 韩双丽, 等. 星上CCD成像非均匀性的实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.
WANG W H, HE B, HAN SH L, *et al.*. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1420-1428. (in Chinese)

作者简介:



逮诗桐(1994—), 女, 吉林长春人, 博士研究生, 2017年于吉林大学获得学士学位, 现就读于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所, 主要从事大口径天文空间光学检测与定标技术研究。E-mail: lushitong123@sina.cn



张天一(1989—), 男, 吉林长春人, 2018年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事光学检测方面的研究。E-mail: tyzhang@niaot.ac.cn



张晓辉(1967—), 女, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 1991年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位, 主要从事光学检测、像质评价技术等方面的研究。E-mail: zhangxiaohui0123@163.com