

一种前照式 CMOS 探测器像元内响应测量和 解算方法

胡琯悦^{1,3}, 周晓东², 唐玉俊¹, 陈凡胜^{1*}

¹中国科学院上海技术物理研究所智能红外感知重点实验室, 上海 200083;

²上海航天技术研究院, 上海 201109;

³中国科学院大学, 北京 100049;

摘要 针对前照式 CMOS 可见光探测器填充因子小于 1 而引起的点目标在像面成像时输出能量随位置波动的问题, 搭建了像元内响应测试系统。根据像元内部设计结构建立了在亚像素尺度上表征响应分布的像元内响应模型。使用两个不同半径的小孔对可见光探测器中的 4 个像元进行了测试。移动小孔的位置, 记录小孔成像在像面不同位置时像元输出的响应值, 使用拟合方法对像元内响应函数及点目标能量的高斯函数的半峰全宽进行了解算。实验结果表明, 通过求解探测器的像元内响应函数, 可对像元内灵敏度的空间分布特征进行描述。该测试与解算方法可为同类型探测器响应的微观表征提供有益参考。

关键词 探测器; 像元内响应; 点目标探测; 天文观测

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0910002

Measurement and Resolution Method for Intra-Pixel Response of Front-Illuminated CMOS Sensors

Hu Zhuoyue^{1,3}, Zhou Xiaodong², Tang Yujun¹, Chen Fansheng^{1*}

¹Key Laboratory of Intelligent Infrared Perception, Shanghai Institute of Technical Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

²Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract This study builds an intra-pixel response measurement system to overcome the issue arising when the output energy of the point target fluctuates with position, which is caused by the fill factor of the forward-illuminated CMOS image sensor less than 1. According to the interior design structure of the pixel, an intra-pixel response model is established. Two holes with different radii are used to measure the intra-pixel response functions of four pixels in the sensor. The response value of the pixel is recorded when the hole is moved to different positions. The full widths at half maximum of Gauss function of the point target and the intra-pixel response function are calculated. Experimental results show that the spatial distribution characteristics of sensitivity within the pixel can be described by calculating the intra-pixel response function. The measurement and resolution method proposed herein is able to provide a useful reference for the microscopic representation of this type of sensor.

Key words detectors; intra-pixel response; point target detection; astronomical observation

OCIS codes 040.5160; 120.0280; 350.1270

1 引言

点目标的探测、定位一直是红外探测的热点问题, 从成像体制来看, 采用过采样系统可提高扫描系

统的点目标探测性能^[1-2]。从像元结构来看, 像元内响应分布不均匀限制了点目标探测特别是天文观测的精度^[3-6]。Grillmair 等^[7]对 Spitzer 望远镜的红外相机(IRAC)进行测试, 发现指向抖动和像元内响应

收稿日期: 2019-03-25; 修回日期: 2019-04-24; 录用日期: 2019-05-13

* E-mail: cfs@mail.sitp.ac.cn

分布的差异引起了高达 5% 的峰值光通量波动。通常,像元的感光面积小于像元面积,当理想点目标成像在像元的非感光区域时,像元没有输出;当点目标连续在像元内移动时,点源所成的像在像面上闪烁。

像元内响应函数可在亚像素尺度上对像元响应进行表征。目前已有很多机构、学者对像元内响应函数的测试进行了研究。像元内响应函数的测试方法可分为两类^[8],一类是将点源直接投影到像面上^[9-12],如 2014 年 Hardy 等^[9]使用发光二极管(LED)小孔模拟点光源,对 James Webb 望远镜项目(JWST)中截止波长为 $2.5\ \mu\text{m}$ 的探测器进行了像元内响应测试;密歇根大学开发出了一套名为 spot-o-matic 的像元内响应函数测试系统^[10],产生比像元尺寸小得多的点光源,同时使用 Foucault 刀刃法测量光束轮廓;为了提高测试效率,Biesiadzinski 等^[11]对该系统中的照明系统进行了改进,通过放大镜头同时将 160000 个小孔图像同步投射到被测探测器上,可以在约 1 天的时间内对整个探测器所有像元进行二维扫描。像元内响应函数的另一类测试方法是利用衍射光栅的自成像特性,将高空间分辨率周期性图样投影到探测器上,如法国航空航天实验室使用平面波照射衍射光栅^[13-14],基

于贝叶斯的反卷积方法计算出整个探测器所有像元的平均像元内响应函数。与上述研究不同的是,本文使用高斯函数描述点目标能量分布,采用拟合的方式同时求解高斯函数和像元内响应函数的参数。

探测器像元内响应的精确测量是实现探测系统目标高精度辐射测量和定位的关键。点源成像在探测器上,像元的灰度值由点源位置、光学系统的成像特性和像元内响应共同决定。本文搭建了可见探测器的像元内响应的测试系统,提出了一种用非连续函数表征像元内响应的模型,并同时计算点源经光学系统后的能量分布函数和像元内响应函数。

2 实验装置及原理

所用像元内响应的测试系统如图 1 所示,包括亮度可调的积分球、小孔、高精度位移平台、焦距为 20 m 的平行光管、焦距为 0.833 m 的望远物镜、可见 CMOS 探测器及相应的控制系统。积分球的面均匀性优于 99.9%,平行光管焦距的测量精度为 $\pm 10\ \text{mm}$ 。积分球和小孔用来生成模拟点光源。所用的两个小孔半径分别为 $65\ \mu\text{m}$ 和 $37.5\ \mu\text{m}$,将其放置在如图 1 所示装置中的平行光管焦平面上进行像元内响应测试。

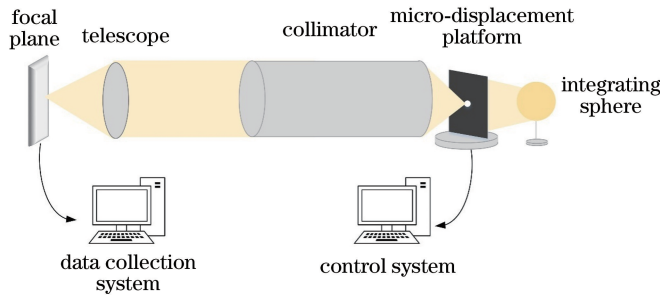


图 1 像元内响应测试装置

Fig. 1 Intra-pixel response test system

调节积分球的亮度和探测器的积分时间,积分球发出的光依次经过小孔和光学系统后,成像在探测器上。移动位移平台使点源所成的像沿像元的水平或竖直方向移动 $2.5\ \mu\text{m}$,即像元边长的十分之一。点源从待测像元的左上角(4 个像元连接处)按照设置的路径移动,遍历整个像元。记录点目标在像元不同位置时的像元输出灰度值,为了减少随机噪声的影响,当点源成像在不同位置时,以 10 帧数据的平均值作为该位置处的灰度值进行计算。

待测的可见 CMOS 探测器由 512×512 个边长为 $25\ \mu\text{m}$ 的像元构成。像元设计采用 3T 结构,每个像元由光敏二极管、复位管、跟随管和行选管组

成,像元感光面采用在 P 衬底上注入 N 阱形成。如图 2 所示为 4 个相邻的像元的内部结构,其中绿色为铝 1 层,蓝色为铝 2 层,玫瑰红为铝 3 层,黄色线内为光敏面感光面(详见电子版),约占整个像元尺寸的 40.59%,光敏面附近没有被铝遮盖的地方也会感光,约占整个像元尺寸的 62%。

3 点目标成像及像元内响应建模

实际的光学系统除了衍射限制外,还受到像差、畸变、抖动等多重因素的影响,点目标的能量分布难以直接测得,本研究使用高斯函数来表示光斑在像面的能量分布,即

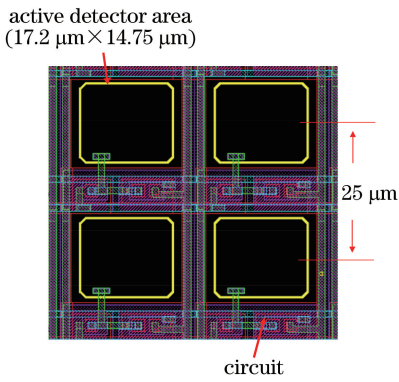


图 2 像元内部设计结构

Fig. 2 Internal structure of pixel

$$g[x, y | (x_k, y_k)] = A \cdot \exp\left[-\frac{(x - x_k)^2 + (y - y_k)^2}{2\delta^2}\right], \quad (1)$$

式中: g 为光斑在像面的能量分布函数; (x, y) 为像面上某点坐标; A 为光斑中心处的光强; (x_k, y_k) 为第 k 次移动时点源在像面的位置; δ 为标准差, 通过拟合可得。

在 CMOS 探测器中, 像元由感光元件本身(在硅衬底上的光电二极管)及读出所需的控制电路两部分构成^[15-16]。在一个像元中, 填充因子被定义为感光区域的面积与像元面积的比值^[17]。根据图 2 所示的像元内部结构, 将像元划分为 3 个响应不同的区域, 归一化的响应值分别为 1, 0.5, 0; 以像元中心为原点, 单个像元响应模型为

$$F(x, y) = \begin{cases} 1, & |x| < \frac{a}{2}, |y| < \frac{b}{2} \\ 0.5, & \frac{a}{2} < |x| < \frac{c}{2}, \frac{b}{2} < |y| < \frac{d}{2} \\ 0, & \frac{c}{2} < |x| < \frac{p}{2}, \frac{d}{2} < |y| < \frac{p}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

$$I(x_k, y_k) = B \iint F \cdot g[x, y | (x_k, y_k)] dx dy, \quad (3)$$

$$r_{es} = \frac{\sum_{k=1}^{100} |I(x_k, y_k) - M(x_k, y_k)|}{\sum_{k=1}^{100} M(x_k, y_k)}, \quad (4)$$

式中: $a < c < p$, $b < d < p$, a 和 b , c 和 d 分别为归一化响应为 1、0.5 时对应区域的长和宽; p 为像元尺寸, 单位均为 μm 。点源成像在 (x_k, y_k) 位置时, 根据像元内响应模型得到像元灰度值; F 为像元响应模型; B 为待测像元的平均响应率; $M(x_k, y_k)$ 为小孔第 k 次移动时, 该像元的实测灰度值; r_{es} 用来衡量拟合误差。

像元输出的响应值与点源的位置、点源在像面的能量分布, 以及像元内响应有关。点源按照预设轨迹遍历整个像元, 每个像元均可采集到 100 组与点源位置对应的像元响应值。对像元响应为 1 和 0.5 的区域的长和宽、能量分布函数的参数、像元的平均响应率、点源实际位置与理想位置在 x 方向和 y 方向的位置偏移量参数进行拟合。分别设定合适的搜索范围和步长, 通过循环遍历, 直至找到使 r_{es} 最小的一组参数, 即为最佳参数。使用 MATLAB 对数据进行处理。

4 分析与讨论

根据实验采集到的数据, 绘制像元输出灰度值随点目标位置的分布图, 如图 3 所示, 三个坐标轴分别代表像元的 x 方向、 y 方向和像元的归一化响应。当点目标落在 4 个像元的连接处时, 像元响应值最小; 当点目标落在像元中心区域时, 像元响应值最大。

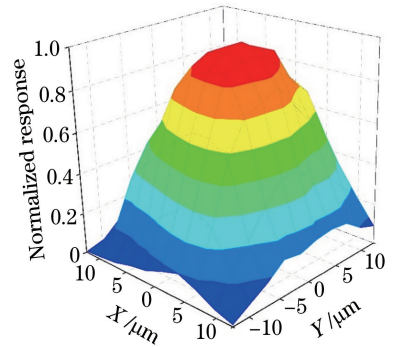


图 3 归一化像元响应值随点目标位置的分布

Fig. 3 Normalized pixel response versus position of point target

根据像元响应值和对应的点源位置, 拟合计算后得到的一系列参数如表 1 所示, (X, Y) 为像面位置坐标, 高斯函数半峰全宽(表 1 中用 FWHM 表示)为 2.355δ 。使用相同半径的小孔在像面成像时, 高斯函数半峰全宽的误差(即高斯函数半峰全宽的最大值与最小值之差与其平均值的比值)小于 3%。对于不同的像元, a, b, c, d 的值略有不同, 这种差异可能受像元的空间制造、基板厚度、抗反射涂层、灰尘等的影响^[18]。本研究所测的 4 个像元, 实测值与拟合值的误差百分比分别为 8.74%, 9.68%, 10.39%, 8.65%。图 4 为对某测试像元进行测试得到的响应值和根据拟合得到的参数计算得到的响应值随点目标位置的分布。

表 1 拟合得到的参数

Table 1 Parameters obtained by fitting

Radius of hole / μm	FWHM / μm	a / μm	b / μm	c / μm	d / μm	$r_{es}/\%$
37.5	6.535	18.0	13.5	18.0	18.5	8.74
65.0	7.948	18.5	12.5	18.5	15.0	9.68
65.0	8.066	18.0	16.0	19.5	16.0	10.39
65.0	8.184	18.5	16.5	19.0	17.0	8.65

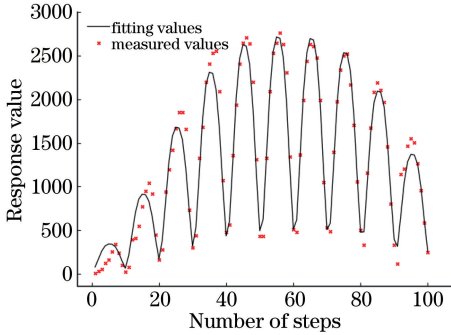


图 4 点目标成像在像元不同位置时像元响应的拟合值和实测值

Fig. 4 Fitting and measured values of pixel response of point target imaging at different positions

当点目标连续移动时,像元间和像元内响应的差异导致像面输出的点目标能量有较大波动。通过求解像元内响应函数并将其代入计算,可减小点目标成像时像面输出能量的波动,提高点目标能量提取及质心定位的精度。

5 结 论

针对像元内响应分布不一致导致的点目标在像面移动时,探测器输出响应值随位置变化的问题,搭建了像元内响应测试系统,并使用两个不同半径的小孔对 CMOS 探测器中的 4 个像元进行测试。根据点目标成像在不同位置时的像元输出灰度值,拟合得到像元内响应函数和高斯函数的半峰全宽。使用相同半径的小孔测试,不同像元拟合得到的高斯函数半峰全宽误差小于 3%。受像元的制造工艺等影响,不同像元的不同响应值对应区域的长和宽存在一定差异。后续可进一步探究不同像元响应区域的差异与探测器响应非均匀性之间的关系。

参 考 文 献

[1] Lin L K, Wang S Y, Wang T B. Simulation and analysis of point target detection performance for infrared scanning over-sampling system [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0528001.
林两魁, 王少游, 王铁兵. 红外扫描过采样系统点目标检测性能分析与仿真 [J]. 光学学报, 2016, 36

(5): 0528001.
[2] Wang S T, Zhang W, Jin L H, *et al.* Point target detection based on Temporal-Spatial Over-Sampling system [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 32(1): 68-72.
王世涛, 张伟, 金丽花, 等. 基于时-空过采样系统的点目标检测性能分析 [J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(1): 68-72.
[3] Ingalls J G, Krick J E, Carey S J, *et al.* Spitzer/IRAC precision photometry: a machine learning approach [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10698: 106985E.
[4] Bryson S T, Tenenbaum P, Jenkins J M, *et al.* The Kepler pixel response function [J]. The Astrophysical Journal Letters, 2010, 713(2): L97-L102.
[5] Zhai C, Shao M, Goullioud R, *et al.* Micro-pixel accuracy centroid displacement estimation and detector calibration [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2011, 467(2136): 3550-3569.
[6] Liu Y, Yang L, Chen F S. Multispectral registration method based on stellar trajectory fitting [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50(4): 189.
[7] Grillmair C J, Carey S J, Stauffer J R, *et al.* Pointing effects and their consequences for Spitzer IRAC exoplanet observations [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8448: 84481I.
[8] Ketchazo C, Viale T, Boulade O, *et al.* Intrapixel measurement techniques on large focal plane arrays for astronomical applications: a comparative study [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10562: 105623D.
[9] Hardy T, Willot C, Pazder J. Intra-pixel response of the new JWST infrared detector arrays [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9154: 91542D.
[10] Barron N, Borysov M, Beyerlein K, *et al.* Subpixel response measurement of near-infrared detectors [J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007, 119(854): 466-475.
[11] Biesiadzinski T P, Tarlé G, Howe M J, *et al.* A method for the characterization of sub-pixel response of near-infrared detectors [J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7742: 77421M.
[12] Mahato S B, de Ridder J, Meynants G, *et al.* Measuring intra-pixel sensitivity variations of a

- CMOS image sensor [J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(7): 2722-2728.
- [13] Holland A D , Beletic J , Ketchazo C, *et al.* A new technique of characterization of the intrapixel response of astronomical detectors[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 91541: 91541Y.
- [14] Viale T, Ketchazo C, Guérineau N, *et al.* High accuracy measurements of the intrapixel sensitivity of VIS to LWIR astronomical detectors: experimental demonstration [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9915: 991517.
- [15] Jain U. Characterization of CMOS image sensor[D]. Netherlands: Technische Universiteit Delft, 2016.
- [16] Nie K M, Xu J T, Gao Z Y. A 128-stage CMOS TDI image sensor with on-chip digital accumulator [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(5): 1319-1324.
- [17] Holst G C. Electro-optical imaging system performance[M]. 6th ed. Washington: Edition JCD Publishing and SPIE, 2017: 32-33.
- [18] Blockstein L, Yadid-Pecht O. Crosstalk quantification, analysis, and trends in CMOS image sensors [J]. Applied Optics, 2010, 49(24): 4483-4488.