

doi: 10.3788/lop47.051101

# CMOS 成像器件性能测试方法的研究

尚媛园 张伟功 宋宇 刘卉

(首都师范大学信息工程学院, 北京 100048)

**摘要** 针对 CMOS 成像器件结构的特殊性, 发展并提出了“像元光子转移技术”法测量增益和读出噪声。同时对 CMOS 器件的线性度、满阱电荷、暗流、不均匀性和量子效率等性能测试方法进行了研究。最后基于 2 k×2 k CMOS 芯片进行了性能测试实验, 实验结果也验证了该测试方法的可行性和可靠性。

**关键词** CMOS 成像器件; 读出噪声; 增益; 量子效率; 满阱电荷

中图分类号 O436 OCIS 110.2990 230.5590 文献标识码 A

## Research on Evaluation Method of CMOS Imager

Shang Yuanyuan Zhang Weigong Song Yu Liu Hui

(College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract** Photon-transfer technique for single pixel is developed to measure the readout noise and gain of CMOS imager in consideration of its special structure. The methods to evaluate the linearity, well capacity, dark current, pixel non-uniformity and quantum efficiency are also discussed. At last, evaluation test is carried out based on a 2 k×2 k CMOS sensor. The experiments show that the evaluation method is feasible and reliable.

**Key words** CMOS imager; readout noise; gain; quantum efficiency; full well capacity

### 1 引言

CMOS 成像器件是近年来固体成像器件研究的热点, 它采用标准半导体工艺生产, 芯片所需的数字逻辑电路、时钟驱动器、模拟信号处理、信号读取电路、模数(A/D)转换器等可以很容易地集成到同一芯片上, 器件直接输出数字信号, 实现片上相机<sup>[1]</sup>。CMOS 器件具有空间抗辐射能力强、动态范围大、读出速度快、成本低、体积小、重量轻、集成度高、功耗低等优点, 现在广泛应用于航空航天、生物医学、工业、天文观测等诸多领域, 逐渐成为主要的固体成像器件<sup>[2,3]</sup>。

一般而言, 当在一些科学应用领域中使用 CMOS 成像器件时, 首先需要测量它的一些性能参数, 据此判断该器件是否满足整个系统的性能要求。但在实际应用中, 由厂家提供的检测指标通常是以电视广播工业标准为标准的, 往往缺乏天文或其他科学实际应用所要求的指标。同时, 在进行科学成像系统的设计前, 必须对所用 CMOS 器件的关键指标进行测试。为此, 以科学应用为目标, 研究 CMOS 成像器件的性能测试方法, 为广大科研工作者提供一套行之有效的测试手段, 具有十分重要的意义。对于科学成像应用来说, 量子效率、噪声、增益、线性和满阱电荷是 CMOS 成像器件最重要的特性指标<sup>[2]</sup>, 本文主要对这些特性的测试方法进行研究, 重点探讨增益和读出噪声的测试方法。

收稿日期: 2009-07-20; 收到修改稿日期: 2009-10-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(10603009)和北京市科技新星项目(2008B57)资助课题。

作者简介: 尚媛园(1977—), 女, 博士, 副教授, 主要从事高性能图像传感器方面的研究。E-mail: syy@bao.ac.cn

## 2 CMOS 成像器件性能测试方法

### 2.1 增益和读出噪声

CMOS 成像器件的增益定义为一个模数转换单位(ADU)对应的原始光生电子数, 其单位为  $e^-/\text{ADU}$ , 即为电子数/模数转换单位。增益是一个很重要的指标, 其他性能的评估大都以它为基础。CMOS 成像器件的读出噪声是器件在无辐射照射、无积分条件下的输出噪声。CMOS 成像器件的噪声主要可分为信号噪声、芯片基底噪声和固定模式噪声 3 类, 它们组成了 CMOS 有源图像传感器的系统噪声, 并且随着光强的增加, 分别发挥主导作用<sup>[4]</sup>。信号噪声主要由光子散粒噪声和暗流散粒噪声组成。基底噪声即读出噪声, 主要由复位噪声、放大器噪声和量化噪声 3 部分组成。固定模式噪声即像元不均匀性噪声。从 CMOS 成像器件总噪声中剔除信号噪声和固定模式噪声, 仅剩下与信号强弱和积分时间长短无关的部分, 就是读出噪声, 一般将其与增益同时测量<sup>[5]</sup>。在实际应用时, 通常用读出噪声来评估 CMOS 成像器件的噪声水平。

由于 CMOS 成像器件的每个像元上都集成了放大器, 同时每一列也都有一个单独的放大器, 所以从理论上讲, 像元之间的增益和读出噪声有微小差别, 需要单独测量。根据这个特点, 发展并提出了一种“像元光子转移技术”法, 做出每个像元的光子转移曲线来测试 CMOS 器件增益和读出噪声。此方法基于原理: 对于 CMOS 成像器件的像元, 输出的总噪声包括即读出噪声和信号噪声两部分, 二者以平方和的关系构成了像元读出总噪声的平方, 并且一般认为信号噪声服从泊松统计分布, 与 CMOS 像元输出信号的平方根成正比<sup>[6]</sup>。于是像元的增益

$$G = \frac{S}{\delta_N^2 - \delta_R^2}, \quad (1)$$

式中  $S$ ,  $\delta_N$  和  $\delta_R$  分别为像元输出信号、总噪声和读出噪声,  $S$  值应扣除本底(本底是 CMOS 相机多幅零积分时间图像的平均), 单位均为 ADU。用相同的方法, 可以得到 CMOS 成像器件其他像元的增益和读出噪声, 它们的统计结果就是成像器件的增益和读出噪声。

在实际测试时, 可以通过调节 CMOS 相机的曝光时间(或调节光源强度)获得不同强度的均匀曝光图像, 每个曝光时间拍多幅进行平均(500 幅以上)。样本数的选择依据是随着样本数目的增加, 像元读出信号的起伏基本不变。然后对于某一像元, 将其在不同曝光时间内得到的图像的读出值分别作为数据序列, 统计它们的平均读数  $S$  和  $\delta_N^2$  方差并做图, 这条线就是像元的光子转移曲线。 $S$  和  $\delta_N^2$  之间的关系应该是线性关系, 用直线拟合后为

$$\delta_N^2 = kS + \delta_R^2, \quad (2)$$

式中  $k$  为斜率。该直线在纵轴上截距的平方根就是像元读出噪声  $\delta_R$ , 而斜率  $k$  的倒数即为像元增益。将该 ADU 为单位的像元读出噪声乘以增益就得到了以电子为单位的读出噪声的值。以此类推, 可以得到所有像元的增益和读出噪声。

### 2.2 量子效率

CMOS 成像器件的量子效率定义为读出的光生电子数与入射光子数之比。量子效率随入射光波长的变化而变化, 反映了成像器件的频谱响应。测量 CMOS 的量子效率, 只需要测量入射到器件表面的单色光强度, 即可得到在曝光时间内入射器件的光子数, 从而得到在该波长上的器件的量子效率

$$Q_E = \frac{MGE_p}{TWA}, \quad (3)$$

式中  $M$  为所选取的像元区域内的平均读数(单位为 ADU),  $G$  为使用器件增益的统计结果,  $E_p$  为测量波长的光子能量(单位为 J),  $T$  为曝光时间(单位为 s),  $W$  为测量时光场照度(单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ ),  $A$  为单个像元面积

(单位为  $\text{cm}^2$ )。为方便测量和计算,选取的像元区域为  $1 \text{ cm}^2$ 。在以上几个参数的测量中,  $W$  的测量最为复杂,它是系统曝光期间照射到 CMOS 芯片上的光场在  $1 \text{ cm}^2$  上的功率,需要由定标探头和监测探头合作完成。具体方法是:在相机曝光前或曝光后,由定标探头测定相机芯片位置处的照度  $W_c$ ,同时得到此时监测探头的电流读数  $I_c$ 。根据相机曝光时记录的监测探头的电流读数  $I$ ,相机曝光时的照度值<sup>[7]</sup>为

$$W = \frac{I}{I_c} W_c. \quad (4)$$

由于 CMOS 器件像素结构的特殊性,填充因子一般远小于 100%,所以在测试量子效率的时候已经包含了填充因子的影响,实际测得的结果为量子效率与填充因子的乘积。

### 2.3 线性和满阱电荷

CMOS 成像器件的满阱电荷定义为器件像元势阱中所能容纳的电荷数量。线性反映了 CMOS 成像器件输入信号和输出信号之间的变化关系。对于一个理想器件,若用  $E_{\text{out}}$  代表输出,  $E_{\text{in}}$  代表输入,  $B$  为本底,应有  $E_{\text{out}} - B = k \times E_{\text{in}}$ ,线性拟合  $E_{\text{out}}$  和  $E_{\text{in}}$ ,并求出相关系数来表征器件的线性度。对于 CMOS 成像器件,由于每个像素上都集成一个读出电路,所以各个像元的满阱电荷各不相同。

测量线性和满阱电荷时,可以直接使用测试增益和读出噪声时获得的图像。对于每个像元,将它们在不同曝光时间下输出图像的平均值作纵坐标,对应曝光时间值作为横坐标,所做的曲线就是它的线性响应曲线。对此曲线进行线性拟合,输出信号和曝光时间直线拟合的相关系数即器件的线性度。当像元的线性响应曲线的输出随输入信号的增强不再增加时,该像元便达到满阱状态,对应的输出值(ADU)与该像元增益的乘积就是像元的满阱电荷。同样的,所有像元满阱电荷的统计结果就代表了该 CMOS 器件的满阱电荷。

### 2.4 不均匀性

CMOS 成像器件像元的不均匀性或者说是固定模式噪声主要是由像素之间响应的差别引起的。可以用平场测量的办法来评估器件的不均匀性,在均匀光场下曝光多幅并得到平均图像。不均匀性为

$$N_{\text{Uniformity}} = \frac{\phi_{\text{RMS(A)}}}{\bar{A}}, \quad (5)$$

式中  $\bar{A}$  为平均值,  $\phi_{\text{RMS(A)}}$  为所有像元的均方根起伏。

测试 CMOS 器件的不均匀性时,将待测 CMOS 相机对均匀稳恒光场曝光成像,做多幅平均,以消除读出噪声的影响,后减去本底,从而得到器件平场图。并用(5)式计算即可得到 CMOS 成像器件的不均匀性。

### 2.5 暗流

暗流是 CMOS 成像器件在无辐射照射的情况下,由于热噪声等原因引起的暗信号。它的值与积分时间长短有关,同时决定了 CMOS 成像器件能达到的最长曝光时间。将芯片挡光以保证在读出过程中没有光子到达光敏区,设置相机的曝光时间  $T$  得到暗场图像,拍多幅并做平均。则像元的暗流值

$$I = \frac{N - B}{T} G, \quad (6)$$

式中  $N$  为像元读出平均值,单位为 ADU,  $B$  为本底。在测量暗流时可对一个足够大的区域做统计平均,增益选用统计时出现频率最高的值。

## 3 实验研究

### 3.1 CMOS 芯片及测试平台

为了验证测试方法的可行性和可靠性,对 Cypress 公司  $2 \text{ k} \times 2 \text{ k}$  CMOS 芯片 LUPA4000 进行测试实验。LUPA4000 是面向天文观测或其他高性能成像系统设计的科学级芯片,像元大小  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ ,光敏面积

24.6 mm×24.6 mm, 采用 6 个场效应管的快照式像素结构<sup>[8]</sup>。驱动 LUPA4000 工作的是自行研制的基于 X64-LVDS 图像采集卡的高速控制采集系统。成像系统的像素读出速率为 25 MHz, 为双路读出模式, 帧读出时间为 80 ms 左右。测试平台需要以下设备: 稳定光源、滤光片组、单色仪、积分球、S380 双通道检流计、监测探头、定标探头和控制计算机。

### 3.2 实验结果与分析

#### 3.2.1 增益和读出噪声

首先用“像元光子转移技术”法对增益和读出噪声进行了测试。调节相机的曝光时间获得不同强度的图像, 每个曝光时间拍 500 幅进行平均。任取芯片上的某像元, 将其在不同曝光时间内得到的 500 幅图的读出值分别作为数据序列, 统计它们的平均读数  $M$  和方差  $\delta_n^2$  并做图, 图 1 是该像元的光子转移曲线。经过计算, 它的增益为 52.042 e<sup>-</sup>/ADU, 读出噪声为 72.491 e<sup>-</sup>。使用相同的方法, 可以得到其他像素的增益和读出噪声, 它们的统计结果如图 2 所示, 增益的中心值为 51.5 e<sup>-</sup>/ADU, 读出噪声的中心值为 69 e<sup>-</sup>。

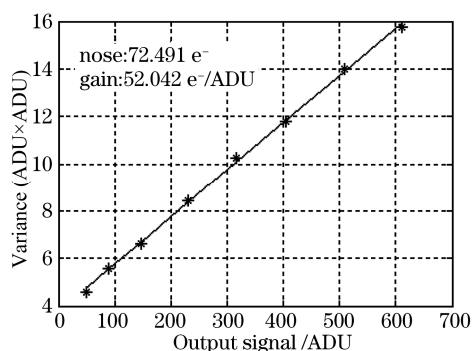


图 1 LUPA4000 某像元光子转移曲线

Fig.1 Photon transfer curve of one pixel of LUPA4000

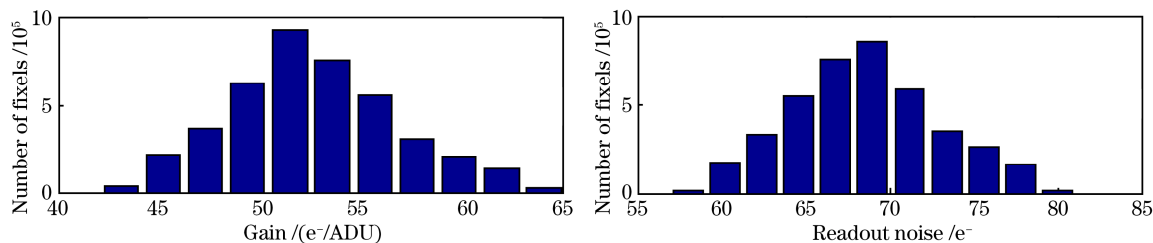


图2 LUPA4000成像系统增益和读出噪声统计结果

Fig.2 Statistics of gain and readout noise of all pixels

用该方法对增益和读出噪声又进行了 2 次重复测试, 增益的测量结果分别为 53.139 和 51.485 e<sup>-</sup>/ADU, 读出噪声的测量结果分别为 74.031 和 71.112 e<sup>-</sup>, 数值变化区间保持在 2.1% 以内, 说明用“像元光子转移技术”法测试增益和读出噪声具有较高的精度和稳定性。

#### 3.2.2 量子效率

按照 2.2 节介绍的方法, 对 LUPA4000 的量子效率进行了测试, 图 3 为测试的结果。芯片的光谱响应范围为 400~900 nm, 峰值响应波长在 650 nm 左右, 对应的量子效率为 34%。这与芯片厂方给出的量子效率峰值 38% 有一定的差异, 分析原因如下: 1) 相机与积分球连接处密封不严, 有一定漏光, 芯片实际接收的光照度比理论计算的值小, 使得测得的量子效率的结果偏低; 2) 这种测试量子效率的方法大约有 2.3% 的系统误差, 会对测量结果有一定的影响<sup>[9]</sup>。

#### 3.2.3 线性和满阱电荷

图 4 是 LUPA4000 芯片上某像元的线性响应曲线, 像元开始饱和时对应的读出信号为 1015 ADU, 增

益为  $52.042 e^-/ADU$ ，所以该像元的满阱电荷为  $52822 e^-$ 。同样的方法，可以得到其他像元的满阱电荷，经过统计，LUPA4000 芯片满阱电荷的中心值为  $53014 e^-$ 。另外，对图 4 的线性响应曲线进行线性拟合，得到该像元的线性度为 99.3%。通过分析统计，芯片上其他像元的线性度都在 99.2% 以上。

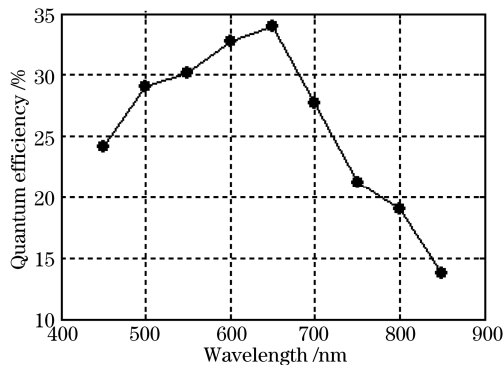


图3 LUPA4000成像器件量子效率测试结果  
Fig.3 Quantum efficiency of LUPA4000 CMOS imager

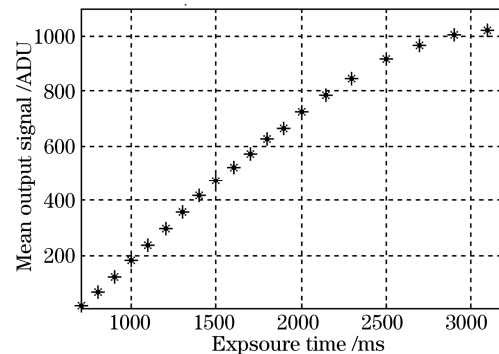


图4 LUPA4000的线性响应曲线  
Fig.4 Linear response curve of LUPA4000

### 3.2.4 不均匀性

将 LUPA4000 CMOS 相机在均匀稳定光源下曝光 100 幅并平均，然后减去本底，即可得到平场图，图 5 是平场图中大小为  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的部分区域。用(5)式进行计算，芯片的不均匀性(均方根)约为 2.17%。通过这个平场图，可以较容易地检测出芯片上的“坏”像素，从而可以进行相关“坏”点修复和图像处理工作。

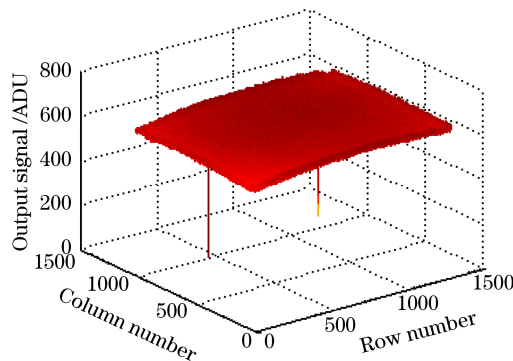


图 5 LUPA4000 CMOS 相机  $1280 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  区域的平场图  
Fig.5 Part of the surface picture of LUPA4000 CMOS imager

## 4 结 论

本文对 CMOS 成像器件的性能测试方法进行了研究，包括线性、满阱电荷、增益、读出噪声以及量子效率等。针对 CMOS 成像器件结构的特殊性，发展并提出了“像元光子转移技术”法测试 CMOS 器件的增益和读出噪声。在理论研究的基础上，提出了 CMOS 成像器件性能检测方法，并基于 Cypress 公司  $2 \text{ k} \times 2 \text{ k}$  CMOS 芯片 LUPA4000 进行了测试验证。将测试结果与 Cypress 公司提供的部分数据进行了比较分析，发现测试结果准确。验证了本文提出的测试方法的可行性和可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 J. Janesick, F. Gunaman, T. Dosluoglu *et al.*. Scientific CMOS pixels[C]. Conf. Proc. on Scientific Detectors for Astronomy, 2004, **300**: 103~114
- 2 Orly Yadid-Pecht, Ralph Etienne-Cummings. CMOS Imagers: From Phototransduction to Image Processing[M]. Dordrecht:

- Kluwer Academic Publishers, 2004
- 3 Y. Shang, Y. Guan, W. Zhang *et al.*. A high dynamic range complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) camera using multi-slope response and an image reconstruction algorithm[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **10**( ): 104002
  - 4 M. R. Stanford, B. J Hadwen. The noise performance of electron multiplying charge coupled devices[J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2003, **50**(5): 1227~1232
  - 5 H. Tian, Boyd Fowler, Abbas El Gamal. Analysis of temporal noise in CMOS photodiode active pixel sensor[J]. *IEEE J. Solid-State Circuits*, 2001, **36**(1): 92~100
  - 6 Y. Shang, J. Zhang, Y. Guan *et al.*. Design and evaluation of a high-performance CCD (charge coupled device) camera for astronomical imaging[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2009, **20**(10): 104005
  - 7 Song Qian. Radiation Damage on the Charge-Coupled Devices Used in Space Astronomical Observatory[D]. Kunming: Yunnan Astronomical Observatory Chinese Academy of Sciences, 2002  
宋 谦. 空间天文观测用电荷耦合器件高能辐射损伤研究[D]. 昆明: 中国科学院云南天文台, 2002
  - 8 Cypress Company. LUPA-4000 4 M Pixel CMOS Image Sensor Specification[R]. January, 2007
  - 9 B. Ye, Q. Song. How accurate are the QE measurements[C]. Conf. Proc. On Scientific Detectors for Astronomy, 2004, **300**: 511~514