

CMOS 相机光电参数的测试方法

李洪博^{1**}, 刘云清^{1***}, 宋延嵩², 董岩^{1*}

¹长春理工大学电子信息工程学院, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学空地激光通信技术国防重点学科实验室, 吉林 长春 130022

摘要 通过分析互补性氧化金属半导体(CMOS)相机的信号传递模型,建立了 CMOS 相机信号与噪声间的传递函数模型,推导了相机输出图像信号与图像噪声间的线性关系。搭建了相机性能参数测试系统,对 CMOS 相机的转换增益、最大信噪比、时域暗噪声进行了测试,并将实测值与指标值进行了对比。研究表明,所提测试方法能较精确地测出相机的性能参数,适用于大部分型号相机光电参数的测试。

关键词 探测器; 光电器件; 转换增益; 最大信噪比; 暗噪声

中图分类号 TN386.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.100401

Test Method of Optoelectronic Parameters of CMOS Camera

Li Hongbo^{**}, Liu Yunqing^{1***}, Song Yansong², Dong Yan^{1*}

¹College of Electronic Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Defence Key Subject Laboratory of Aero and Ground Laser Communication Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract By the analysis of the signal transfer model of a complementary metal oxide semiconductor (CMOS) camera, the transfer function model of signals and noises in this CMOS camera is builded and the linear relationship between the output image signal and the image noise of this camera is deduced. The testing system of the performance parameters of this camera is established, and the conversion gain, the maximum signal-to-noise ratio (SNR) and the dark noise in time domain of this CMOS camera are tested. The test value is compared with the index value, and the results show that, the performance parameters of this camera can be can accurately tested with this proposed test method, which is suitable for the test of the photoelectric parameters of most types of cameras.

Key words detectors; optoelectronic devices; conversion gain; maximum signal-to-noise ratio; dark noise

OCIS codes 040.1240; 120.3940; 040.1490; 240.0250

1 引言

目前,许多国家在互补性氧化金属半导体(CMOS)相机的生产、研发与应用领域开展了广泛的工作。与电荷耦合元件(CCD)相比,CMOS 具有单片集成、灵敏度高、曝光时间短、像素尺寸小及成像速度高等优点^[1]。CMOS 在保安监控、生物医学、航天航空、侦察与微光夜视等领域有着广阔的应用前景^[2]。CMOS 相机参数的测试是相机研发的关键环节之一^[3]。在 CMOS 相机的实际研发过程

中,需要随时对图像传感器的参数进行调整,以保证最后能够达到预期的设计目标^[4]。CMOS 的原始输出是由光电效应产生的光电子,经过模/数(A/D)转换后以图像的形式读出。由于输出的图像数据没有实际的物理单位,通常定义数字量化值(DN)为图像的数据单位^[5]。在相机参数的测试过程中,参数之间需要进行单位转换,相机的转换增益可以解决这一问题。本文利用光子转移测试方法,对 CMOS 相机的转换增益、大信噪比、时域暗噪声等参数进行了测试^[6-7]。

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-04-23; 录用日期: 2018-04-27

基金项目: 吉林省科技厅重点科技研发项目(20180201002SF)

* E-mail: dongyan-personal@163.com; ** E-mail: 1025179564@qq.com; *** E-mail: mzliuyunqing@163.com

2 CMOS 相机参数的测试原理

CMOS 相机的信号传递模型^[2]如图 1 所示,入射光照射到 CMOS 的有效像素上,像素利用光电效

应将光子转换成电子并储存,然后经过电荷测量、前置放大、相关双采样(CDS)、后置放大及 A/D 转换 5 个过程,得到输出的数字信号(DN 值),输出的数字信号一般为 8,12,16 bit。

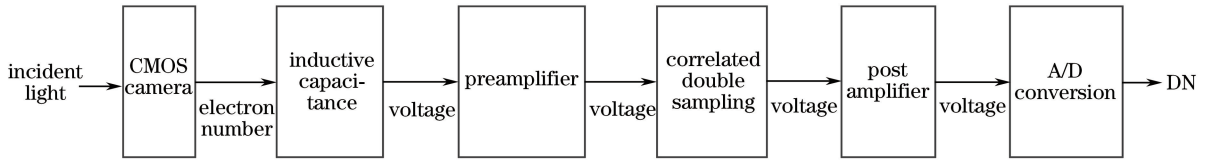


图 1 CMOS 相机的信号传递模型

Fig. 1 Signal transfer model of CMOS camera

当相机开始曝光时,入射光照射到 CMOS 相机上,有效像素产生光生电子并储存。当像素完成入射光的收集后,电子在转移时钟的驱动下转移至片内输出级。随后进行电荷测量,将电子携带的电信号转换为电压信号,电压信号经前置放大器进行阻抗隔离及稳压处理后被传递到 CDS 环节。CDS 环节对 CMOS 的有效信号进行提取,是抑制噪声的关键环节。随后,后置放大器对 CDS 的输出信号进行调节,保证后置放大器的输出信号可在 A/D 转换的线性区内完成转换。经后置放大器处理后的 CMOS 有效信号再经过 A/D 转换变为数字信号被读出,相机完成整个成像过程。

由图 1 可知,相机转换增益为相机在整个成像过程中系统的总增益,其含义是每个有效光子引起输出图像灰度值(或输出电压)的增量(单位为 DN/e-,其中 e-表示电子数)。转换增益 K 为

$$K = A_{SN} A_{SF} A_{CDS} A_{SA} A_{ADC}, \quad (1)$$

式中 A_{SN} 为感应电容环节的增益; A_{SF} 为前置放大环节的增益; A_{CDS} 为 CDS 环节的增益; A_{SA} 为后置放大环节的增益; A_{ADC} 为 A/D 转换环节的增益。

CMOS 相机信号与噪声的数学模型如图 2 所示,其中 P 为入射到有效像素中的平均光子数, η 为量子效率, S 为输出信号的均值, n_e 光电效应产生的光电子数, n_d 为暗噪声。

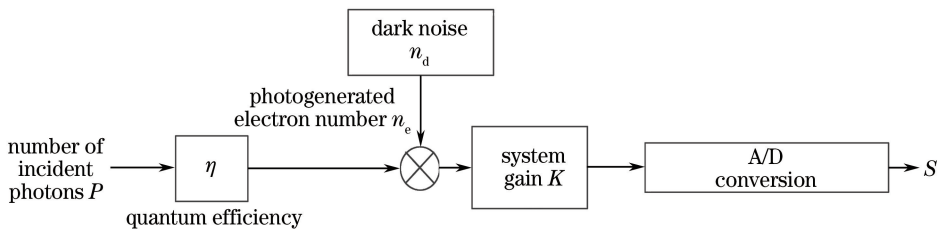


图 2 CMOS 相机信号与噪声的数学模型

Fig. 2 Mathematical model of signal and noise of CMOS camera

由图 2 可知,CMOS 相机在成像过程中会产生噪声。CMOS 相机输出的总噪声包括暗噪声和散粒噪声,二者的平方和等于相机输出总噪声的平方^[7-9],即

$$\sigma_N^2 = \sigma_S^2 + \sigma_R^2, \quad (2)$$

式中 σ_N^2 为相机的总噪声, σ_R^2 为时域暗噪声, σ_S^2 为散粒噪声。

由光子转移法的测试原理可知,信号噪声在时间维度上服从泊松分布,与 CMOS 输出信号的平方根成正比^[1],可推导出

$$K = \frac{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}{S}. \quad (3)$$

当入射光较强时,光电效应产生的散粒噪声是

CMOS 成像过程中最主要且无法消除的噪声源,此时可认为 $\sigma_S^2 \approx \sigma_N^2$,故(3)式可化简为

$$K \approx \frac{\sigma_S^2}{S}. \quad (4)$$

综上所述,以输出信号的均值 S 作为横坐标,方差 σ_S^2 作为纵坐标绘制光子转移曲线(PTC),由此计算转换增益 K 。

信噪比是信号与夹杂在信号中的噪声的比值(单位为 dB),它是评估图像质量及图像传感器性能的重要参数之一。信噪比越大,说明混在信号里的噪声越小,信号的可还原性越强,图像的质量越高。PTC 是在不同的曝光时间下 CMOS 相机输出噪声的响应曲线,因此可利用已测出的 PTC 拐点计算

CMOS 相机的最大信噪比。信噪比的计算公式为

$$R_{SN} = 20 \times \lg(S' / \sqrt{\sigma_S^2}), \quad (5)$$

式中 S' 为 PTC 曲线拐点处的横坐标; $\sqrt{\sigma_S^2}$ 为 PTC 曲线拐点处纵坐标的均方根。

时域暗噪声表征了 CMOS 相机所能探测到的最小信号,即在无光照、最短曝光时间情况下相机产生的电子的个数。令相机最后输出的图像数据的单位为 DN,相机转换增益的单位为 DN/e⁻,可推导出时域暗噪声的计算公式为

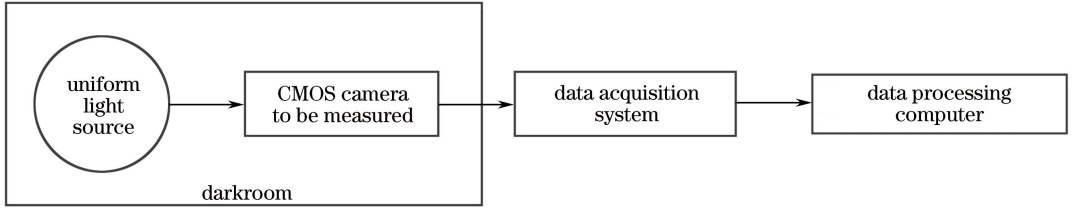


图 3 测试系统的硬件组成

Fig. 3 Hardware components of test system

均匀光源系统一般采用积分球,其光源控制组件可调节输出照度。待测 CMOS 相机的芯片为长春长光辰芯光电技术有限公司的 GSENSE2020S 型芯片,有效像素为 2048 pixel×2048 pixel,像素大小为 6.5 μm×6.5 μm,经 A/D 转换后,输出的数字信号为 12 bit,工作温度为室温 25 °C。相机可以同时产生 10.8 倍可编程增益放大器(PGA)增益及 1.7 倍 PGA 增益的图片,根据这一特性,可以结合相机的光电参数对图像数据进行图像融合,以增大相机的动态范围。采用美国国家仪器(NI)公司的 PXI 型图像采集机箱与美国戴尔公司的 P2419H 型显示器采集待测 CMOS 相机输出的图像数据。数据处理计算机用于运行测试算法,完成相机参数测试。

3.2 软件测试算法

数据处理计算机中的测试算法主要用于绘制 PTC 并计算其他参数。

1) 输出信号均值

像素位置为 (m, n) 处的多帧图像的均值为

$$A_p(m, n) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L s_i(m, n), \quad (7)$$

式中 L 为图像的帧数; $s_i(m, n)$ 为第 i 帧图像中位置为 (m, n) 处的像素的灰度值, $m \in (1, M)$, $n \in (1, N)$, 其中 M, N 分别为相机输出图像的行数和列数。

$|A_p|$ 的平均值即为输出信号的均值:

$$S = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |A_p(m, n)|. \quad (8)$$

$$\sigma_R = \frac{\sigma^2}{K}, \quad (6)$$

式中 σ^2 为计算得到的时域方差值。

3 系统组成

3.1 硬件系统

测试系统的硬件组成如图 3 所示,包括照度可调的均匀光源系统、待测 CMOS 相机、数据采集系统及数据处理计算机。

2) 时域方差

像素位置为 (m, n) 处的多帧图像的方差

$$\sigma_p^2(m, n) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L [s_i(m, n) - A_p(m, n)]^2. \quad (9)$$

$\sigma_p^2(m, n)$ 平均值即为灰度值的时域方差:

$$\sigma_S^2 = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\sigma_p^2(m, n)|. \quad (10)$$

4 实验测试与结果分析

4.1 测试方法的具体实现

在对相机的光电参数进行测试时,需要在亮场和暗场两种测试场景下分别对相机进行测试。为避免相机镜头的传递函数对测试精确度产生影响,相机应不加镜头。亮场中,待测 CMOS 相机与均匀光源系统应放置在暗室中。在暗场中对相机进行测试时,相机应加盖,以避免杂散光的影响。具体测试方法的实施过程如流程图 4 所示。

4.2 参数测试结果与分析

分别对 G2020 在 10.8 倍 PGA 增益(高增益)及 1.7 倍 PGA 增益(低增益)下的光电参数进行测试。根据图 4 所示的测试流程图,在室温 25 °C 下对 CMOS 相机进行测试,不同曝光时间下采集 20 帧图片,得到的 PTC 如图 5、6 所示。

两种模式下 PTC 的线性部分经最小二乘拟合后得到的直角坐标图如图 7、8 所示。可以看出,高

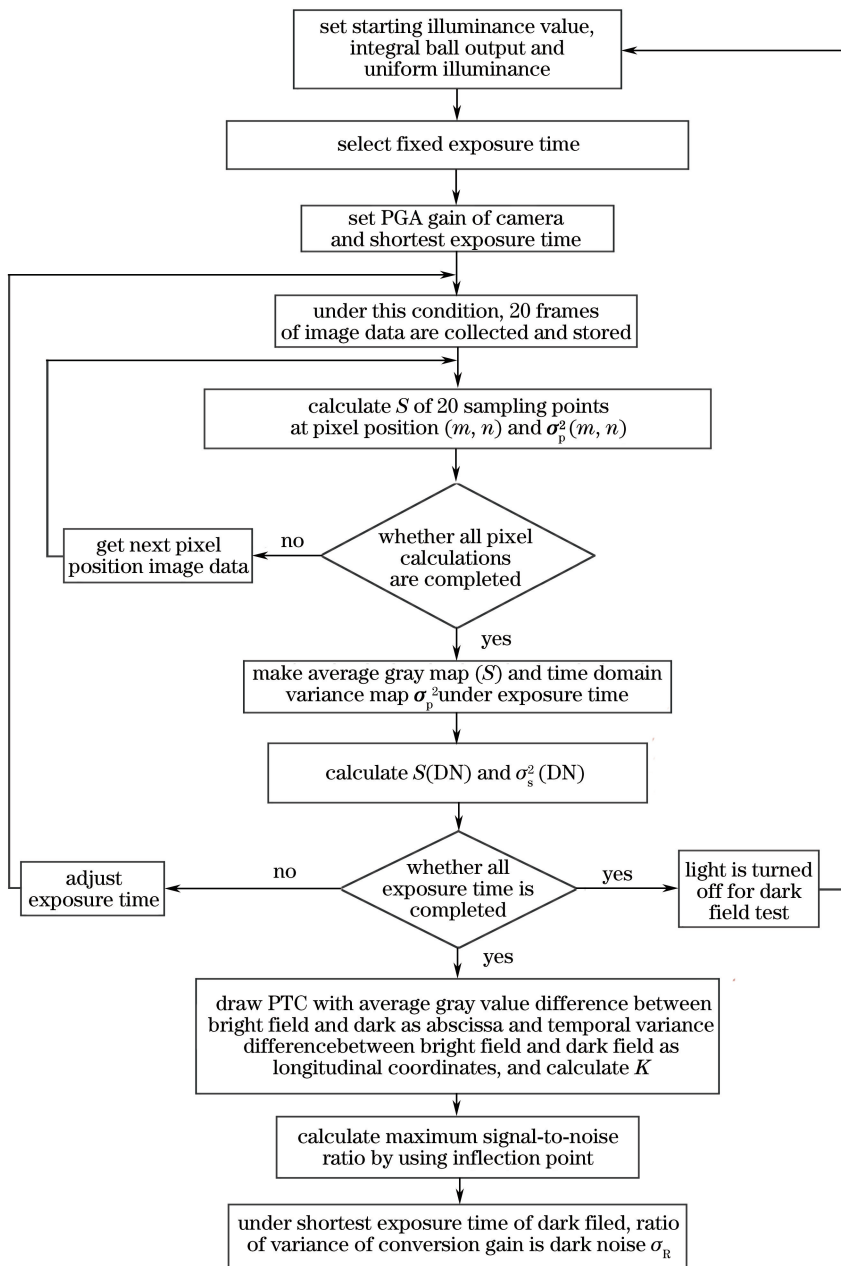


图 4 实验测试的流程

Fig. 4 Flow chart of experimental test

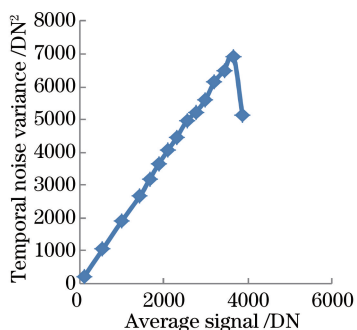


图 5 高增益下的 PTC

Fig. 5 PTC under high gain

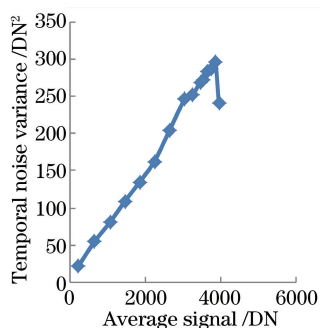


图 6 低增益下的 PTC

Fig. 6 PTC under low gain

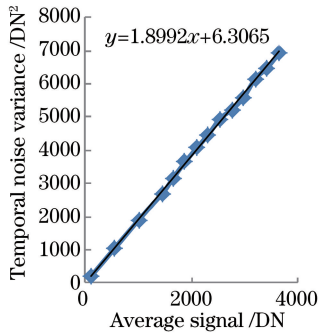


图7 高增益 PTC 曲线的线性部分拟合

Fig. 7 Linear part fitting of high gain PTC curve

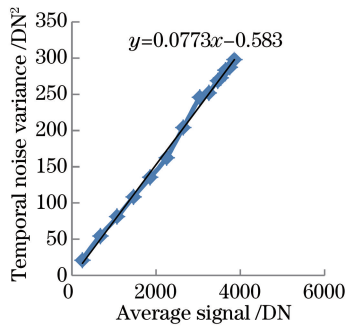


图8 低增益 PTC 曲线的线性部分拟合

Fig. 8 Linear part fitting of low gain PTC curve

增益下相机的转换增益 $K = 1.89 \text{ DN}/e^-$; 低增益下相机的转换增益 $K = 0.07 \text{ DN}/e^-$ 。由(5)式可知, 高增益时 $R_{\text{SN}} = 46.9969 \text{ dB}$; 低增益时 $R_{\text{SN}} = 32.8651 \text{ dB}$ 。由(6)式可知, 高增益下时域暗噪声 $\sigma_{\text{R}} = 2.3e^-$; 1.7 倍 PGA 增益下时域暗噪声 $\sigma_{\text{R}} = 25.5181e^-$ 。

为验证测试方法的可行性与准确性, 将实验测试值与芯片的指标值进行了对比分析, 结果见表 1。可以看出, 实测值与指标值基本一致, 证明所提的测试方法准确有效。但二者仍存在差别, 原因可能是暗室中有电源的杂散光进入相机, 相机与光源之间的距离较远, 相机均匀性较差^[10]或噪声较大等。

表 1 测试值与指标值对比

Table 1 Comparison between test value and index value

Parameter	High gain		Low gain	
	Index value	Test value	Index value	Test value
Conversion gain / (DN/ e^-)	2.15	1.8992	0.08	0.0773
Maximum SNR / dB	32	32.8651	46	46.9969
Dark noise / e^-	1.9	2.3	21	25.5

5 结 论

相机的光电参数是相机研发过程中的重要设计

依据, 对相机的生产与发展具有重要的意义。应用所提的测试方法与测试系统对相机的光电参数进行了测试, 实验结果表明, 所提方法可有效测量相机的参数, 测试系统易于搭建, 测试方法易于实施, 测试结果较为精确。所提测试方法与测试系统可用于测试大部分型号的相机的光电参数, 为研发具有高动态范围的相机提供了参考。

参 考 文 献

- [1] Xu X X, Chen N, Wang B, *et al.* Design of compact middle-wave infrared camera used on airborne platform [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0816002. 徐新行, 陈宁, 王兵, 等. 机载紧凑型中波红外相机的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0816002.
- [2] Lei P, Sun K, Li H, *et al.* Experimental study on the change of cat eye echo pattern with laser damage of CMOS detector [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(6): 0601001. 雷鹏, 孙可, 李化, 等. 猫眼回波图像随 CMOS 器件激光损伤变化的实验研究[J]. 中国激光, 2016, 43(6): 0601001.
- [3] Zhang W W, Qian Y H, Chen Q, *et al.* Performance parameters test of electron multiplying CCD [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(12): 3390-3395. 张闻文, 钱月红, 陈钱, 等. 电子倍增 CCD 性能参数测试方法研究[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(12): 3390-3395.
- [4] Cai J D, Liu Q, Zou Y, *et al.* Design of tunable light source for calibration of CMOS image sensor [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 0323001. 蔡锦达, 刘倩, 邹亿, 等. CMOS 图像传感器校准用可调光源[J]. 光学学报, 2017, 37(3): 0323001.
- [5] Wang H C, Liu H Y, Wang H F, *et al.* System gain calibration of CCD and evaluation of uncertainty [J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s1): s112004. 王洪超, 刘洪元, 王恒飞, 等. CCD 系统增益标定及不确定度评定[J]. 光学学报, 2015, 35(s1): s112004.
- [6] Shang Y Y, Zhang W G, Song Y, *et al.* Research on evaluation method of CMOS imager [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2010, 47(5): 051101. 尚媛园, 张伟功, 宋宇, 等. CMOS 成像器件性能测试方法的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(5): 051101.
- [7] Li Y D, Wang B, Guo Q, *et al.* Testing system for radiation effects of CCD and CMOS image sensors [J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2778-

- 2784.
- 李豫东, 汪波, 郭旗, 等. CCD与CMOS图像传感器辐射效应测试系统[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2778-2784.
- [8] Li Z F, Li J L, Lan T J. Research of the CCD camera's electronics gain test method[J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(12): 49-52.
- 李载峰, 李俊霖, 兰太吉. CCD相机电子学增益测试方法研究[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 49-52.
- [9] Feng J, Li Y D, Wen L, *et al.* Degradation mechanism for photon transfer curve of CMOS image sensor after irradiation[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(10): 2676-2681.
- 冯婕, 李豫东, 文林, 等. CMOS图像传感器光子转移曲线辐照后的退化机理[J]. 光学精密工程, 2017, 25(10): 2676-2681.
- [10] Xiu J H, Huang P, Li J, *et al.* Non-uniformity correction of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 0711003.
- 修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色CCD航测相机成像非均匀性校正[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 0711003.