

文章编号 1004-924X(2021)05-0975-07

聚焦扫描线阵相机量子效率测试系统

唐延甫*, 李俊霖, 杨永强, 李忠明, 韩 冰

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:为了测量线阵图像传感器的量子效率,建立了一套基于聚焦扫描法的量子效率测试系统。该系统由照明光源、单色仪、扫描运动机构和标准探测器等组成,利用扫描运动机构带动线阵相机和标准探测器高精度匀速运动,使相机对生成的单色光斑扫描成像;切换线阵相机与标准探测器之间的位置,可实现对单色光斑能量的测量;最后分析计算线阵相机采集图像灰度总和以及标准探测器探测的光能量总和,结合聚焦扫描法理论公式得到线阵图像传感器的量子效率。测试结果表明:聚焦扫描法测试线阵相机量子效率方案可行,重复精度较高,对测量结果不确定度进行分析,该方法量子效率的测量精度约为 2.6%。聚焦扫描线阵相机量子效率测试系统通过动态直线扫描聚焦测量线阵相机的量子效率,弥补了线阵相机量子效率测试方法少、精度低的不足。另外,应用聚焦扫描法测量量子效率并不局限于线阵相机,也可对多种类型相机进行光电参数测试,且测量精度可满足大多数项目的要求。

关键词:线阵相机;量子效率;图像传感器;光电参数;不确定度

中图分类号: TN386.5; TP391.4 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20212905.0975

Quantum efficiency test system based on focusing scanning for linear array camera

TANG Yan-fu*, LI Jun-lin, YANG Yong-qiang, LI Zhong-ming, HAN Bing

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: tangyanfu_123@163.com

Abstract: In order to measure the quantum efficiency of linear array image sensor (hereinafter referred to as linear array camera), a set of quantum efficiency measurement system based on focusing scanning method is established. A linear array CMOS camera is tested and the uncertainty of the test results is analyzed. Firstly, a test system composed of a lighting source, a monochromator, a scanning motion mechanism and a standard detector is built. Then the scanning motion mechanism is used to drive the linear array camera and the standard detector to move with high precision and uniform speed so that the camera can scan and image the generated monochromatic spot. By switching the position between the linear array camera and the standard detector, the energy of the monochromatic spot can be measured. Finally, the sum of gray scale of the images collected by the linear array camera and the sum of the light energy detected by the standard detector are analyzed and calculated. Combined with the theoretical formula of the focused scanning method, the quantum efficiency of the linear array camera is obtained. The test results show that the focus-

收稿日期:2021-01-13;修订日期:2021-03-03.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62005280)

ing scanning method is feasible for measuring the quantum efficiency of linear array camera, and the repeatability accuracy is high. By analyzing the uncertainty of the test results, the measurement accuracy of the quantum efficiency of this method is about 2.6%. Quantum efficiency measurement system for focused scanning linear array camera innovatively proposes the dynamic linear scanning focusing measurement of linear array camera quantum efficiency. This system is different from the traditional quantum efficiency test method for planar array camera that irradiated by monochromatic light combined with integrating sphere in principle, and makes up for the shortage of the linear array camera's quantum efficiency testing methods and low precision. In addition, the application of focusing scanning method to measure quantum efficiency is not limited to linear array cameras, but can also test photoelectric parameters of various types of cameras, and the measurement accuracy can meet the requirements of most projects.

Key words: linear array camera; quantum efficiency; imaging sensor; photoelectric parameter; uncertainty

1 引言

近年来,图像传感器相关技术发展迅速,并广泛应用于军事、工业监控、工业测量和医学诊断等领域。但由于制造商的技术基础和设备稳定性存在差异,图像传感器性能参差不齐,所以筛选出性能出色的器件尤为重要^[1]。图像传感器的性能指标主要是量子效率^[2-4]、非均匀性^[5]和信噪比^[6]等光电参数。其中,量子效率作为图像传感器的重要参数,是传感器性能评价的基本测试项目^[7]。目前,量子效率的高效率、高精度测试是该领域发展的重点。

欧洲机器视觉协会(European Machine Vision Association, EMVA)于2016年发布了EMVA1288 R3.1标准^[8],该标准给出了包含量子效率在内的图像传感器光电参数的定义及其测试原理、条件和方法等,为图像传感器的性能评价提供了依据。近年来,对图像传感器量子效率的测试大多数是基于单色仪和积分球进行的。通过在单色仪出口处设置光纤耦合装置和准直镜,将单色光束均匀照射至器件靶面,可对工业级面阵CCD的量子效率进行测试^[9]。使用氙灯照射单色仪分离出单色光,光纤将单色光耦合至积分球后,均匀照射至EMCCD探测器靶面,可对其量子效率进行测试^[10]。搭建高紫外探测器辐射定标系统,将光学系统与单色仪集成作为一个成像系统,将单色光聚焦成像至紫外探测器靶面,可对探测器的量子效率进行测试^[11],该方法也可对微通道板(Micro Channel Plane, MCP)在近紫外波段(200~380 nm)的量子效率^[12]进行测试。

将可见光源更换为黑体辐射源,搭配光谱测试仪和标准探测器可完成对红外探测器量子效率的测试^[13]。

综上可知,目前研究多针对面阵图像传感器的量子效率^[14-17],且日趋成熟,而线阵相机量子效率的测试研究却较少。线阵相机具有分辨率高、帧幅数高和价格低廉等优点,具有极大的发展前景^[18-20],因此其量子效率测试的需求也极大。本文通过改进以单色仪和标准探测器为核心的系统,搭建了一套适用于线阵相机的量子效率测试系统。该量子效率测试方案具有方法简单、效率高、精度高等优点,可对大多数线阵相机的量子效率进行高精度测试。

2 工作原理

2.1 系统组成

聚焦扫描线阵相机量子效率测试系统主要由照明光源、单色仪、扫描机构、聚焦光学系统、标准探测器、电控单元和暗箱组成,如图1所示。其中,照明光源由配备准直系统的75 W 氙灯组成,该光源输出稳定,效率高,光谱范围宽,常被用作光电测试照明光源;单色仪用于产生单色光,通过精密控制光栅色散单元及出光狭缝,可使输出单色光准确度达 ± 0.2 nm,分辨率达0.1 nm;扫描机构主要用于被测线阵相机的扫描成像,线阵相机和标准探测器之间的切换以及相机安装时的位置调整。扫描方向速度要求较高,故该方向安装高精度光栅尺,定位精度可达1 μ m;聚焦光学系统用于将单色光准直和聚焦,为避免

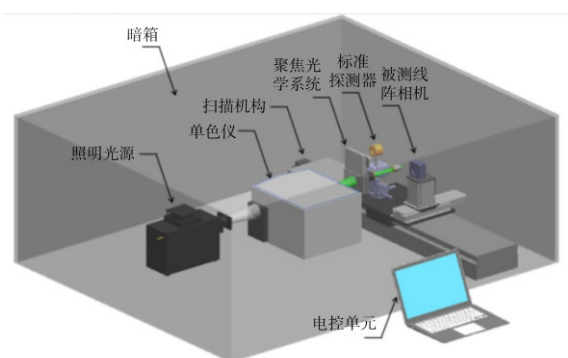


图1 聚焦扫描线阵相机量子效率测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of quantum efficiency test system based on focusing scanning for linear array camera

相机对灯丝成像及单色光斑质量差,还引入光束匀化器和可调光阑;标准探测器作为测量入射光的标准器件,选用Newport公司的紫外硅探测器,并经过出厂标定和中国计量科学研究院校准;被测线阵相机被安装在扫描机构安装架上,像元行列与水平安装面垂直,且正对测试系统;电控单元用于图像采集和处理,同时也控制照明光源、单色仪和扫描机构等单元;(h)暗箱用于提供无杂光的测试环境。箱体内部测试区和设备区单独设计,且均做了隔光处理,经测试,暗箱关闭时测试区照度可低至 10^{-4} lx量级,满足测试要求。

2.2 工作原理

量子效率表征在规定波长光照下,入射光子在器件像元中产生并被收集的电荷数与入射光子数的比值,用于评估被测器件不同波长条件下光子转换为电荷的能力。理论计算公式如下:

$$\eta(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_p} = \frac{\mu_y - \mu_{y \cdot \text{dark}}}{K} \times \left(\frac{A_s \cdot E \cdot t_{\text{exp}}}{\frac{hc}{\lambda}} \right)^{-1}, \quad (1)$$

其中: $\eta(\lambda)$ 为波长 λ 处器件的量子效率; μ_e 为被转换的电荷数; μ_p 为入射到像元的光子数; μ_y 为光照时器件有效像元的灰度值; $\mu_{y \cdot \text{dark}}$ 为无光照时器件有效像元的灰度值; K 为器件转换增益; h 为普朗克常数,为 6.6261×10^{-34} J·s; c 为光在真空中的传播速度,为 3×10^8 m/s; λ 为入射光波长; A_s 为像元面积; E 为器件光敏面的光功率密度; t_{exp} 为器件的曝光时间。

对于转换电子数,可通过光斑图像灰度值与相机转换增益计算得到。现需重点分析入射光子数的测量方法。入射至线阵相机靶面有效像元上的光子数 μ_p 可由公式(2)计算:

$$P_s = \frac{A_e E t_{\text{eit}}}{\frac{hc}{\lambda}}, \quad (2)$$

其中: P_s 为入射至有效像元的光子数; A_e 为相机靶面上的光斑面积; E 为入射光至相机光敏面的光功率密度; t_{eit} 为线阵相机的等效曝光时间。

然后分析线阵相机的等效曝光时间。由于线阵相机在成像时处于扫描运动状态,故相机的曝光时间为像元对目标的实际感光时间,即目标在像元区域的“驻留”时间,如图2所示。

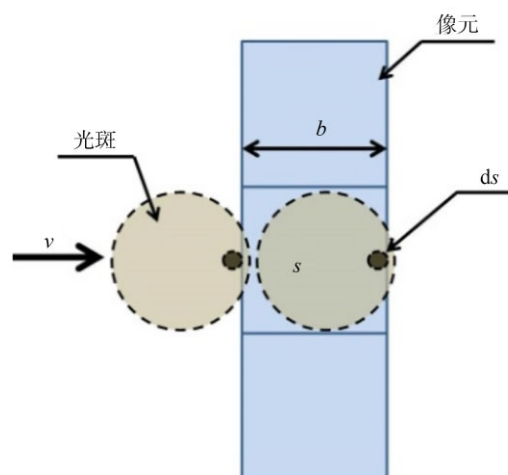


图2 线阵相机扫描成像等效曝光时间原理

Fig.2 Schematic of equivalent exposure time for linear array camera scanning imaging

由图2可知,像元对面元目标 ds 的曝光时间为该面元目标在像元中存在的时间,即扫描方向像元尺寸与扫描速度之比,并非相机设定的曝光时间,即有:

$$t_{\text{eit}} = \frac{b \times 10^{-3}}{v}, \quad (3)$$

其中: t_{eit} 为线阵相机等效曝光时间; b 为线阵相机的像元尺寸; v 为扫描机构的运动速度。

结合式(2)和式(3)可推导出投射至相机靶面的入射光子数:

$$P = \frac{10^{-3} E S b \lambda}{v h c}, \quad (4)$$

其中: P 为入射光子数; S 为投射至相机靶面上目

标的面积。

最后,由回归量子效率计算公式(1)可计算波长 λ 处线阵相机的量子效率。

3 测量结果及分析

3.1 暗场图像采集

关闭光源和暗箱,启动线阵相机并成像,设定线阵相机参数,采集暗场图像,并计算 $\mu_{y \cdot \text{dark}}$,暗场图像如图 3(a)所示。

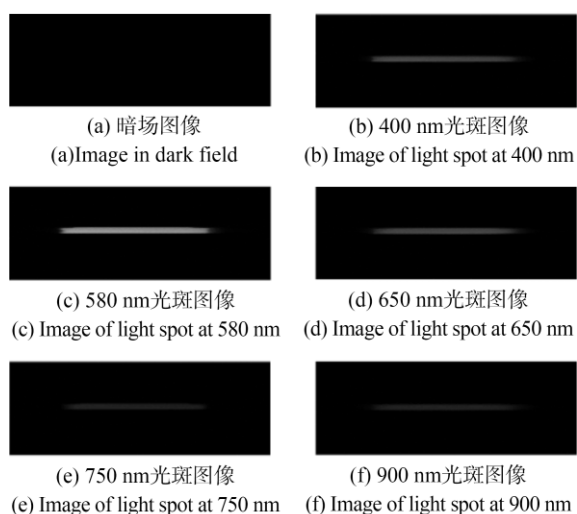


图 3 聚焦扫描法测量量子效率光斑图像

Fig. 3 Light spot images in quantum efficiency testing based on focusing and scanning

3.2 转换增益测量

转换增益用于表征器件输出码值与对应存储在像元势阱内的电荷数之比。本文通过改变均匀面光源辐射能密度进行测试,与传统方法基本一致,不做重点介绍。

3.3 量子效率测量

设置相机连续曝光成像,控制扫描单元运动,采集单色光斑图像(图 3(b)~3(e))计算图像有效像元的总灰度值,切换至标准探测器测量对应的入射光能量,计算波长 λ 处的量子效率。

上述扫描测试需要考虑扫描单元的运动速度要求。理想情况下,相机应在一个曝光周期内对整个光斑目标扫描成像,即图像中仅一列像元有光斑图像,扫描单元的最小速度为:

$$v_{\min} = \frac{D}{T_{\max}}, \quad (5)$$

其中: $v_{\min}$ 为扫描单元的最小速度; D 为投射至相机靶面的光斑宽度, $D=0.7 \text{ mm}$; $T_{\max}$ 为相机的最大曝光时间, $T_{\max}=3.3 \text{ ms}$ 。由此计算得到 $v_{\min}=0.212 \text{ m/s}$ 。然而,步进电机驱动的扫描单元难以达到该速度,因此需要进行“降速扫描”实验。实验发现:当曝光时间相同,扫描速度不同时,图像总灰度值基本相同,故扫描单元“降速扫描”对测量转换电荷数基本无影响,低速扫描测试具有可行性。

通过上述方法对各波长的线阵相机量子效率进行测量,并绘制量子效率曲线,如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。对比产品手册中量子效率曲线(蓝色曲线)发现,两曲线整体趋势一致,但个别波长(如 505, 575 nm 等)的结果差别略大,多次测量后差异依然存在,更换标准探测器后,差异位置发生变化。通过分析标准探测器校正方法,初步认为该现象是由标准探测器出厂校正区间选择以及校正点间拟合误差等造成的。除上述明显差异外,各波长处量子效率的测量结果与手册数据的最大偏差约为 2%。经分析,不同波长单色光经单色仪出射后方向会有差别,聚焦至相机靶面的角度和光斑投影面积不同,导致图像灰度值总和也不相同;另外,扫描时各列像元感光时间不同造成的图像灰度分布梯度、标准探测器的校正精度、被测相机像元响应非均匀性等,均会导致测量结果偏差。

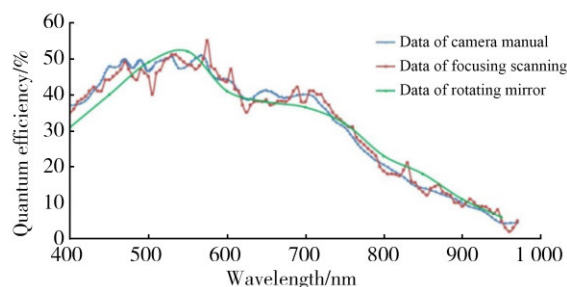


图 4 量子效率测量曲线

Fig. 4 Measured curves of quantum efficiency

为验证测量结果的稳定性,对该线阵相机进行聚焦扫描重复测量实验,测量结果的重复性误差均小于 2%。经分析,该重复性误差偏大的主要原因是扫描机构速度不稳定和光斑目标形状

导致的图像灰度分布梯度过大。通过优化实验条件,可以减小速度稳定性的影响和改善图像灰度分布梯度过大的情形。除此之外,还优化了对焦算法,提高成像光斑边缘的判别精度,减少能量分散导致的灰度计算偏差。采取以上措施后,再次进行重复测量实验,重复测量误差可达1.1%,满足要求。

为验证该方案量子效率测量结果的准确性,使用转镜法对该相机进行量子效率测量,并绘制量子效率曲线(图4中绿色曲线)。转镜法使用高速旋转镜作为动态扫描元件,单色LED照射平行光管作为光源。该方法光斑均匀,图像灰度分布梯度小,常用于测量图像传感器的动态参数,如动态MTF、量子效率等。将测量结果与聚焦扫描法和手册数据对比,3条曲线的整体趋势基本一致,但转镜法的测量结果偏差略大,这是因为单色LED波长偏差、光谱分布、输出稳定性、转镜旋转时反射率变化以及转速稳定性等均会造成测量结果的偏差。

4 不确定度分析

测量不确定度可反映测试水平,体现测试方法和过程的可信度。本文对整个量子效率测量过程进行了不确定度分析,根据不确定度来源及评定方式是否为统计分析方法,不确定度共分为A类和B类。

4.1 A类不确定度

(1)暗箱闭合时杂散光引入的测量误差。被测相机或标准探测器在测试中接收的光照度约在10 lx以上量级,远大于暗箱杂散光照度,故可认为基本无影响;

(2)输出单色光功率不稳定性引入的误差。本方案中被测相机和标准探测器的测试时间和切换时间间隔小,且光源自带稳压设计,整个过程光源输出功率的变化极小,故可忽略不计;

(3)单色仪输出波长不确定度。由于单色仪输出单色光存在一定谱宽和中心波长偏离,量子效率测量结果实际为带宽内所有单色光的总和。本方案中单色仪输出的单色光谱宽为0.3 nm,波

长准确度为 ± 0.2 nm。假设单色光的光谱呈高斯型分布,其高斯分布期望和标准差分别为中心波长和谱宽,故可通过中心波长能量占比计算波长误差,计算结果约为0.77%;中心波长偏差会造成实际量子效率测量结果并非设定波长的结果,将中心波长偏离带入量子效率即可计算偏差,计算结果约为0.2%;故合成之后,输出波长引入的不确定度约为0.8%;

(4)线阵相机曝光时间不准确引入的误差。曝光时间可通过示波器对线阵相机曝光信号(即晶振周期的测量,结合量子效率的计算公式,引入误差约为0.01%;

(5)数据处理引入的误差。该误差主要是指光斑图像灰度输出准确性、操作软件图像阈值、数据公式修约和读数等引入的误差。光斑图像灰度输出通过对比相同照度目标灰度输出结果,软件图像阈值设置后通过采集和扣除背景图像的方式将背景去除,其影响也主要表现在读取灰度值上,实验发现输出灰度值的差别不大于2,影响基本可忽略;数据公式修约和读数中,对公式进行赋值运算,根据修约规则和读数位数等评估其影响,可引入误差约为1%。

综上,计算A类标准不确定度分量 $u_A \approx 1.3\%$ 。

4.2 B类不确定度

(1)标准探测器测量不确定度。标准探测器经中国计量科学研究院计量,其不确定度为2%;

(2)扫描速度不稳定性引入的误差。扫描机构速度不稳定时,等效曝光时间不同。通过查阅扫描单元的速度稳定性,最终得到引入量子效率的测量误差约为0.2%。

(3)被测相机响应非均匀性引入的误差。线阵相机的所有像元响应并非均相同。通过查看被测线阵相机产品手册数据以及非均匀性指标验证,该误差引入的不确定度约为1%;

综上,计算B类标准不确定度分量 $u_B \approx 2.2\%$ 。

分析考察不确定度 u_A 和 u_B 可知,两者相互独立,互不相关。因此,合成标准不确定度 u_C 为:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2} = 2.6\% \quad (6)$$

5 结 论

针对线阵相机量子效率测量需求,本文采用聚焦扫描法对 DALSA 公司的 LINEA 系列高速线阵 CMOS 相机的量子效率进行了测量,绘制了量子效率曲线,并与出厂数据和转镜法测得的量

子效率对比,测量结果的总体趋势基本吻合。最后对测量结果的不确定度进行分析,得到测量不确定度约为 2.6%。该方法可准确测量多款相机的量子效率,测量过程简单、光源要求低、装调难度小,为线阵相机的性能评估提供了有效手段,适用于线阵相机或其他类型相机的光电参数测试。

参考文献:

- [1] 姚萍萍,许孙龙,涂碧海,等. 多角度偏振成像仪面阵探测器筛选及测试方法[J]. 光学学报, 2020, 40(11): 124-132.
YAO P P, XU S H L, TU B H, *et al.* Screening and testing method of area detectors for directional polarimetric camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(11): 124-132. (in Chinese)
- [2] 王小东,汪朝敏,付智红,等. 优化HAD结构提高 CCD 紫外谱段量子效率的研究[J]. 光电子技术, 2020, 40(3): 195-200.
WANG X D, WANG C H M, FU Z H H, *et al.* Research on technology to enhance the quantum efficiency in ultraviolet spectral range of CCD[J]. *Optoelectronic Technology*, 2020, 40(3): 195-200. (in Chinese)
- [3] RAZEGHI M, DEHZANGI A, WU D H, *et al.* Antimonite-based gap-engineered type-II superlattice materials grown by MBE and MOCVD for the third generation of infrared imagers[C]. *SPIE Defense + Commercial Sensing. Proc SPIE 11002, Infrared Technology and Applications XLV, Baltimore, Maryland, USA*, 2019, 1100: 110020G.
- [4] VURGAFTMAN I, CANEDY C L, MERRITT C D, *et al.* Resonant-cavity infrared detectors with high quantum efficiency and very thin absorbers at 4.0 microns[C]. *SPIE Defense+Commercial Sensing. Proc SPIE 11002, Infrared Technology and Applications XLV, Baltimore, Maryland, USA*, 2019, 1100: 110020D.
- [5] 程万胜,赵杰,蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318.
CHENG W S H, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 314-318. (in Chinese)
- [6] 张晨,孙世磊,石文轩,等. 工业线阵 CCD 相机系统测试与噪声评估[J]. 光学精密工程, 2016, 24(10): 2532-2539.
ZHANG C H, SUN S H L, SHI W X, *et al.* Linear CCD camera system for industry measurement and its noise evaluation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2532-2539. (in Chinese)
- [7] SHENG W Y, XIA M P, ZHENG X B. Absolute calibration of the PMT detector based on parametric-down-conversion [C]. *Proc SPIE 11455, Sixth Symposium on Novel Optoelectronic Detection Technology and Applications*, 2020, 1145: 114557Y.
- [8] EMVA Standard1288; Standard for characterization of image sensors and cameras[S]. European Machine Vision Association, 2010.
- [9] 孙昊洋. CCD 芯片量子效率和非均匀性参数测量[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2014.
SUN H Y. *The Measurement of CCD Chip's Quantum Efficiency and Uniformity Parameters* [D]. Xi'an: Xidian University, 2014. (in Chinese)
- [10] 钱月红. EMCCD 光电性能参数测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
QIAN Y H. *Study on Measurement Method of EMCCD Optoelectronic Performance Parameters* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [11] 王锐,宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 469-474.
WANG R, SONG K F. High-accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 469-474. (in Chinese)
- [12] 李晓峰,常乐,邱永生,等. 微通道板近紫外量子效率测量及成像研究[J]. 光子学报, 2020, 49(3): 175-181.
LI X F, CHANG L, QIU Y S H, *et al.* Measurement of quantum yield and image of microchannel plate in near ultraviolet band[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(3): 175-181. (in Chinese)
- [13] 王亮,杨微. 碲镉汞红外探测器量子效率计算研

- 究[J]. 激光与红外, 2019, 49(7): 871-875.
- WANG L, YANG W. Study on the quantum efficiency calculation of HgCdTe infrared detector[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(7): 871-875. (in Chinese)
- [14] 孙宏海, 刘艳滢. 两种高速CMOS图像传感器的应用与测试[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 453-460.
- SUN H H, LIU Y Y. Application and test of two different high-speed digital CMOS image sensors [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2011, 4(5): 453-460. (in Chinese)
- [15] 李晓杰. CCD光电参数测试方法研究及系统设计[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2014.
- LI X J. *Method Research and System Design for Testing Photoelectric Parameters of CCD* [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014. (in Chinese)
- [16] 周跃, 闫丰, 章明朝. CCD光电参数测试系统的研制[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(10): 3451-3456.
- ZHOU Y, YAN F, ZHANG M CH. Development of measurement instrument for photoelectric parameters of CCD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(10): 3451-3456. (in Chinese)
- [17] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 高灵敏度EMCCD导航相机的设计[J]. 光学精密工程, 2018, 26(12): 3019-3027.
- HE J W, HE X, WEI ZH H, *et al.* Design of high-sensitivity EMCCD navigation camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(12): 3019-3027. (in Chinese)
- [18] XUE Z P, WANG C, LI M, *et al.* Image-based method for the angular vibration measurement of a linear array camera[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): 1003-1012.
- [19] 苗健宇, 张立平, 翟岩, 等. 三线阵CCD立体测绘相机的集成装调[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 366-372.
- MIAO J Y, ZHANG L P, ZHAI Y, *et al.* Integrative assembly for three-line array CCD tridimensional mapping camera[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(4): 366-372. (in Chinese)
- [20] 王文华, 何斌, 任建岳. 线阵CCD成像系统自校图形设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 2011-2016.
- WANG W H, HE B, REN J Y. Design of self-check figures in linear CCD imaging system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 2011-2016. (in Chinese)

作者简介:



唐延甫(1987—),男,河南商丘人,硕士,助理研究员,2009年于西北工业大学获得学士学位,2012年于南开大学获得硕士学位,主要从事激光性能参数检测技术、图像传感器测试技术等方面的研究。E-mail: tangyanfu_123@163.com



李俊霖(1984—),男,辽宁鞍山人,博士,副研究员,2007年于北京航空航天大学获得学士学位,2009年于天津大学获得硕士学位,2016年于中科院长春光机所获得博士学位,主要从事光电系统评测、图像传感器测试技术等方面的研究。E-mail: lijunlin0913@126.com