

## 光电成像传感器光子响应非均匀性噪声评价方法研究

孙慧<sup>1,2</sup> 徐抒岩<sup>1</sup> 孙守红<sup>1</sup> 李俊霖<sup>1,2</sup><sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 在全面分析光电成像传感器噪声源的基础上,提出了采用光子响应非均匀性因子 $\Phi$ 来评价光子响应非均匀性噪声,确立了 $\Phi$ 的测试方法,搭建了具有双积分球结构的测试平台完成了测试,并通过比对实验分析了光子散粒噪声、暗噪声和电路读出噪声对测试结果的影响,最后详细分析了整个输出范围内,光子响应非均匀性噪声与入射辐照度的关系,为光电成像传感器其他指标的测试和光子响应非均匀性噪声校正提供了有力的支持。

**关键词** 测量;成像系统;电荷耦合器件;光子响应非均匀性噪声

中图分类号 TN386.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.042302

## Research on Evaluation Method of Optical Imaging Sensors' Photon Response Non-Uniformity Noise

Sun Hui<sup>1,2</sup> Xu Shuyan<sup>1</sup> Sun Shouhong<sup>1</sup> Li Junlin<sup>1,2</sup><sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** It is proposed that the photon response non-uniformity (PRNU) factor  $\Phi$  can be used to evaluate photo response non-uniformity noise, which is based on comprehensive analysis of all kinds of optical imaging sensor noise. A test method has been established, and a test platform has also been built with a double-integrating sphere structure. Finally, the relationship between the PRNU noise and the incident irradiance is discussed in the whole range of the output values, which has provided a powerful support for the test of other indicators and the correction of photon response non-uniformity.

**Key words** measurement; imaging systems; charge coupled device; photon response non-uniformity noise

**OCIS codes** 230.0040; 230.1150; 230.5160

### 1 引言

高灵敏度光电成像传感器因其响应度高、线性度好等优点在星敏感器等微光探测及高精度定位领域发挥了极其重要的作用。随着星敏感器对探测能力和定位精度要求的不断提高,光电成像传感器的噪声指标逐步成为决定设计成败的关键因素,如何客观准确地建立光电成像传感器的噪声模型,并实现各类噪声的测试,最终根据不同噪声的特点进行抑制和校正补偿成为亟待解决的问题。其中,光子响应度非均匀性带来的光子响应非均匀性噪声作为光电成像传感器的主要噪声源,体现了像素间响应度的差异。

光子响应非均匀性噪声是光电成像传感器辐射参量测试的一个重要指标。在工程应用类测试中,没有对该噪声进行单独评价,仅对各种噪声综合作用下产生的响应非均匀性<sup>[1-3]</sup>进行测试,测试方法通常选择半饱和和辐射照度入射条件,然后在该照度下采集一幅图像用于响应非均匀性评估和后续的平场校正。该方法得出的响应非均匀性包含了光子散粒噪声、暗噪声、读出噪声<sup>[4-5]</sup>等所有噪声的影响,在此基础上进行的平场校正包含了大量随机因素,无法最大程度地补偿响应非均匀性噪声,在高灵敏度光电成像传感器应用领域是不可取的。

收稿日期: 2014-12-04; 收到修改稿日期: 2015-01-08; 网络出版日期: 2015-03-13

基金项目: 吉林省科技发展计划(N020120331)

作者简介: 孙慧(1983—),男,硕士研究生,助理研究员,主要从事航天产品工艺技术和成像元器件参数检测方面的研究。E-mail:sunhui@ciomp.ac.cn

针对上述问题,从光电效应和热效应的角度出发对高灵敏度光电成像传感器噪声重新进行了分类。从光子响应非均匀性噪声产生的机理出发,分析并确立了测试方法,搭建了实验装置,对星敏感器中应用的SONY ICX285面阵电荷耦合器件(CCD)进行了光子响应非均匀性噪声测试,并通过对比实验说明了其他各类噪声对测试结果的影响,进一步验证了测试方法的正确性。

## 2 光电成像传感器噪声分类

光电成像传感器作为一种半导体图像传感器,其主要原理是内光电效应。因此光的粒子性和半导体对热的敏感性这两种基本特性都会在成像过程中得到体现,也就是光生电子和热生电子。从这两个基本方面出发,可以很清楚地定位光电图像传感器的噪声源。光电效应产生的主要噪声包括光子散粒噪声和光子响应非均匀性噪声。半导体热效应产生热生电子,即暗电流信号,暗电流信号与光生电荷信号一样以信号形式存在,但是对于成像传感器而言,暗电流信号不是有效信号,因此同样作为噪声处理。与光电效应产生的噪声类似,热效应同样产生暗电流散粒噪声、热响应非均匀性噪声,这里将暗电流、暗电流散粒噪声、热响应非均匀性噪声统称为暗噪声。另外,作为必不可少的一方面,驱动电路部分还会带来电路读出噪声,量化噪声等。图1为从光子入射到信号输出过程中光电成像传感器噪声信号流图(PRNU:光子响应非均匀性,A/D:模数转换)。

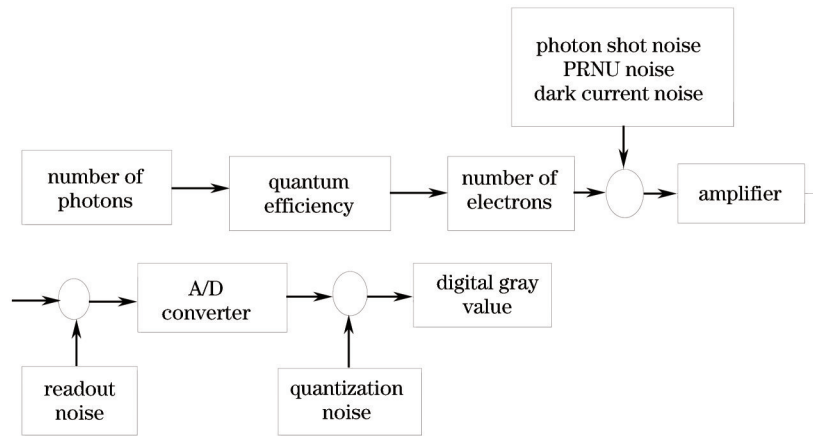


图1 面阵CCD噪声信号模型

Fig.1 Model of array CCD's noise

光子散粒噪声是由于光子发射的随机性造成的,这种随机性在时间域和空间域均存在。在时间域上的表现为同一像素在相同光照和固定积分时间下,每次积分过程中势阱内搜集的电荷均不同,变化具有随机性,基本符合泊松分布<sup>[6-8]</sup>。在空间域上的表现为在相同光照和固定积分时间下,一次积分过程中不同像素势阱内搜集的电荷均不同,且变化具有随机性,同样符合泊松分布。这种随机噪声无法减少和抑制,因此成为限制光电成像传感器信噪比的基本限制因素。光子响应非均匀性噪声是由器件制造过程中各像素的通光面积以及膜层透光程度的差异引起的,体现了像素间响应度的差异,属于固定的系统噪声,该噪声也无法通过电路抑制,但如果能够进行精确的测试,可以通过后续的图像处理进行校正和补偿。暗信号噪声属于热生电子型噪声,受环境温度和器件积分时间影响较大,通过控制环境温度并且在相同状态下减去暗场图像可以实现对该噪声的消除。在由驱动电路引入的噪声中,部分噪声可以通过相关电路的设计进行消除,如KTC噪声,而电路读出噪声或量化噪声不可以减少和抑制,它在使用过程中作为本底噪声一直存在<sup>[9]</sup>。下面利用在均匀光照射条件下获取的图像阐述信号和噪声之间的关系。

在均匀光照条件下获取一幅图像,通常将图像的均值 $\bar{D}_{(i,j)}$ 作为信号的参考值,将该幅图像的标准偏差 $\sigma_{T0}$ 作为噪声的参考值。 $\bar{D}_{(i,j)}$ 表达式如(1)式所示, $D_{(i,j)}$ 为图像单像素的图像输出数码值(DN值), $m$ 、 $n$ 为图像传感器行、列数, $\bar{D}_{si(i,j)}$ 为光电效应产生的有效电荷等效DN值, $\bar{D}_{da(i,j)}$ 为热效应产生的有效电荷等效DN值,即暗电流等效DN值。由(1)式可知,在没进行暗电平校正前,图像的均值中包含了暗电流信号。

$$\bar{D}_{(i,j)} = \frac{1}{m \times n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m D_{(i,j)} = \bar{D}_{si(i,j)} + \bar{D}_{da(i,j)}. \quad (1)$$

$\sigma_{TO}$  的表达式如(2)式所示,各种噪声采用均方根方式合成。其中,  $\sigma_{SL}^2$  为光子散粒噪声的均方差,  $\sigma_{PRNU}^2$  为光子响应非均匀性噪声的均方差,  $\sigma_{DL}^2$  为暗电流散粒噪声均方差,  $\sigma_{DPRNU}^2$  为热响应非均匀性噪声均方差,  $\sigma_{CI}^2$  为电路读出噪声均方差,  $\sigma_{NL}^2$  为AD量化噪声均方差。

$$\sigma_{TO} = \sqrt{\sigma_{SL}^2 + \sigma_{PRNU}^2 + \sigma_{DL}^2 + \sigma_{DPRNU}^2 + \sigma_{CI}^2 + \sigma_{NL}^2}. \quad (2)$$

### 3 光子响应非均匀性噪声评价方法

从光子响应非均匀性噪声的产生机理不难得出,  $\sigma_{PRNU}$  是由图像传感器像素间响应度差异和入射照度共同决定的,其值应与入射照度成正比,于是采用光子响应非均匀性噪声因子  $\Phi$  来评价光子响应非均匀性噪声,关系式如(3)式所示。  $R_i$  为单像素的响应度,因子  $\Phi$  仅为  $R_i$  的函数,在器件加工完成的情况下应为常数。

$$\Phi = \frac{\sigma_{PRNU}}{D_{si(i,j)}} = \frac{n}{n-1} \times \frac{\sum_{i=1}^n \left( R_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \right)^2}{\sum_{i=1}^n R_i}. \quad (3)$$

由(3)式可知,完成  $\Phi$  的测试必须首先获得不同照度下的  $\bar{D}_{si(i,j)}$  和  $\sigma_{PRNU}$ ,因此如何从(1)式中提取  $\bar{D}_{si(i,j)}$  以及如何从(2)式中提取  $\sigma_{PRNU}$  成为关键问题。

从  $\bar{D}_{(i,j)}$  中提取  $\bar{D}_{si(i,j)}$  的过程又称为暗电平校正。  $\bar{D}_{da(i,j)}$  为热效应产生的暗电流信号,只与温度和积分时间有关。在温度恒定,积分时间固定的条件下,将输入照度降为0,即采集暗场图像,则图像的  $\bar{D}_{(i,j)}$  中  $\bar{D}_{si(i,j)}$  分量为0,可以直接得出  $\bar{D}_{da(i,j)}$ 。而在暗场下计算的  $\sigma_{TO}$  包含了  $\sigma_{DL}$ 、 $\sigma_{DPRNU}$ 、 $\sigma_{CI}$  和  $\sigma_{NL}$  分量,可知直接实现了相关噪声的扣除。

在暗场实现了热噪声和电路噪声的扣除后,最后需要处理的即是光子散粒噪声  $\sigma_{SL}$ ,由于该噪声是无法消除的,因此不能直接通过电路设计抵消。这里利用散粒噪声属于随机噪声的特性,采用多次测量取平均的方法消除。具体为在相同光照、温度和积分时间条件下采集  $N$  帧图像,首先求取单个像素  $N$  次采样的均值  $\bar{D}_{p(i,j)}$ ,这样即消除了单像素散粒噪声的影响。之后将  $\bar{D}_{p(i,j)}$  组成一幅新的均值图像,该图像已经不包含散粒噪声的影响,计算出的  $\sigma_{TO}$  中  $\sigma_{NL}$  分量为0。

综上所述,经过暗场图像校正和多幅图像单像素时间域均值处理两个环节,可以从(1)式和(2)式中精确

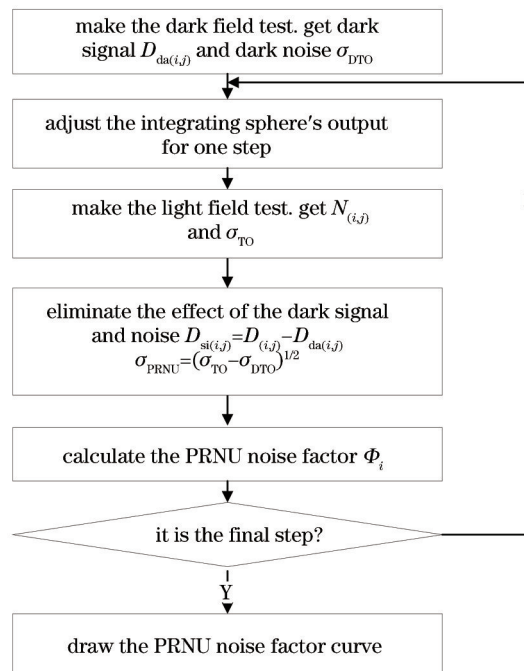


图2  $\Phi$  的测试流程

Fig.2 Testing process of  $\Phi$

地提取  $\bar{D}_{s(i,j)}$  和  $\sigma_{\text{DPRNU}}$ , 进而完成光子响应非均匀性噪声因子  $\Phi$  的测试, 测试流程图如图 2 所示。

首先进行暗场测试, 获取  $N$  帧暗场图像, 计算每帧图像的均值  $D_{di}$  和均方差  $\sigma_{\text{DToi}}^2$ , 再对  $D_{di}$  和  $\sigma_{\text{DToi}}^2$  求均值计算获得暗信号  $D_{\text{da}(i,j)}$  和暗信号噪声  $\sigma_{\text{DToi}}^2$ , 存储测试结果。

然后进行亮场测试, 每次积分球输出辐照度增加一个步长, 待光源稳定后采集  $N$  帧图像。对图像进行处理, 求取该照度下每个像素  $N$  次采样的平均值  $\bar{D}_{p(i,j)}$ , 组成一幅新的图像, 计算该图像的均值  $D_{(i,j)}$  和标准偏差  $\sigma_{\text{To}}$ , 依据流程图中的计算公式完成暗噪声扣除, 最后得出该照度下的噪声因子  $\Phi_{i,j}$ 。增加输出照度至被测设备输出饱和, 重复上述过程, 得出噪声因子序列  $\{\Phi_{i,j}\}$ 。

最后以输入照度为横轴, 以  $\Phi$  为纵轴绘制响应非均匀性噪声因子曲线, 测试过程结束。

需要注意的是, 测试过程中对暗场图像的处理和亮场图像的处理方式是不同的。对于暗场图像, 首先计算每帧图像的均值和均方差, 然后再计算  $N$  帧图像均值的均值和均方差均值的标准偏差。该处理方法在结果的标准偏差中保留了暗电流散粒噪声分量, 采集  $N$  帧图像测试仅为了提高测试的准确度。对于亮场图像, 采集  $N$  帧图像后, 首先计算每个像素  $N$  次采样的均值, 形成一个均值像素图像。然后对均值像素图像进行处理, 得出均值像素图像的均值和标准偏差, 该处理方法消除了光子散粒噪声分量, 为提取  $\sigma_{\text{PRNU}}$  奠定了基础<sup>[10]</sup>。测试最终给出光子响应非均匀性因子  $\Phi$  随辐射照度变化的特性曲线。

## 4 光子响应非均匀性噪声测试

### 4.1 测试平台搭建

高灵敏度光电成像传感器光电参数测试平台如图 3 所示, 该平台由照度可调光源、辐射照度计、控制及图像采集计算机三部分组成。为了保证高响应度光电成像传感器在暗场和饱和输出之间有足够的可调节照度等级, 光源采用双积分球结构设计, 小积分球内对称放置 4 只额定功率为 10 W 的溴钨灯, 大小积分球之间用可调光阑连接, 这样出射光在小积分球内匀光后, 经可调光阑进入大积分球, 并通过大积分球的二次匀光作用后输出至待测传感器像面, 经检测, 大积分球开口中央部分辐射照度均匀性为 99.85%, 满足待测光电成像传感器响应非均匀性噪声测试对光源均匀性的要求。辐射照度计探头放置于靠近积分球开口处的内壁上, 可以实时监测开口处的辐射照度。控制及图像采集计算机控制软件采用 VB.Net 与 Matlab 相结合设计, 对 Matrox 采集卡进行二次开发, 能够完成图像各像素点处数码值实时查询、全帧或部分区域图像自动采集、存储和后续辐射参量计算。

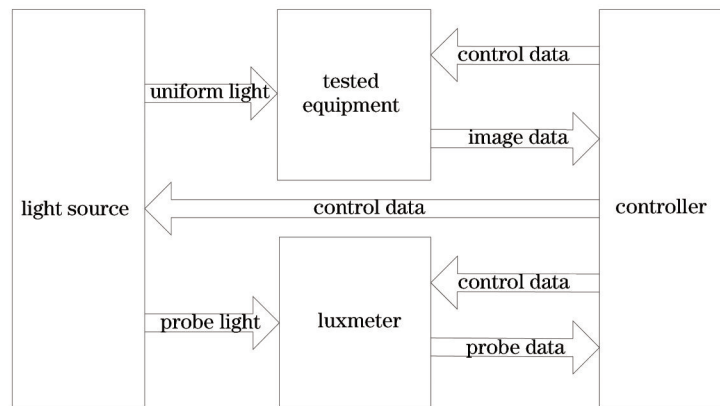


图 3 高灵敏度光电成像传感器光电参数测试平台

Fig.3 High sensitivity optical imaging sensor optical parametric test platform

### 4.2 光子响应非均匀性噪声测试

测试选取了 SONY 公司生产的 1434 pixel×1050 pixel 面阵 CCD ICX285, 设置为全帧读出模式, AD 采用 12 bit 量化。保持暗室中温度为恒温 25 °C, 通过控制软件设定面阵 CCD 积分时间和增益为固定值。计算机控制软件按照图 2 的测试流程控制积分球、图像采集卡等设备完成全部测试过程。

为了便于数据分析和验证光子响应非均匀性噪声测试结果的正确性, 基于采集图像绘制了被测 CCD 的视频响应曲线, 如图 4 所示。从图 4 可以看出, 响应曲线明显分为线性区和饱和区两部分, 且在辐射照度仅

为  $0.13 \text{ W/m}^2$  时 CCD 就达到了线性区的最大输出数码值 3000。经计算,线性区的辐射照度响应度为  $23528.65 \text{ W}^{-1}\text{m}^2$ ,与辐射照度的相关系数为 0.9997。进入饱和区后,随着辐射照度的增大,CCD 的输出值基本没有变化。

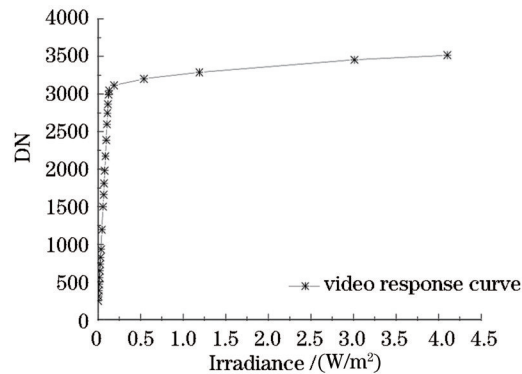


图4 被测 CCD 的视频响应曲线

Fig.4 Video response curve of the measured CCD

在响应非均匀性噪声数据处理过程中,为了比对各种噪声对光子响应非均匀性噪声测试结果的影响,对图像数据进行了分步处理。1) 分别选取 35 个照度等级下 501 帧图像的第 251 帧,以这 35 帧图像为目标图像,分别求出面阵 CCD 有效成像区域  $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的光子响应非均匀性噪声和平均数码值,按照(3)式得出随等效辐射照度变化的关系曲线 PRNU-1,如图 5 中黑色曲线所示。2) 以 35 个照度等级下的 501 帧全部亮场图像为目标图像,在每个照度等级下生成均值等效图像,再用 35 帧均值等效图像,分别求出面阵 CCD 有效成像区域  $1360 \text{ pixel} \times 1024 \text{ pixel}$  的光子响应非均匀性噪声和平均数码值,按照(3)式得出随等效辐射照度变化的关系曲线 PRNU-2,如图 5 中红色曲线所示。3) 将暗场下采集的 501 帧图像按照图 2 中的描述进行处理,得出暗场噪声和暗场均值,将 2) 中的结果的暗场扣除,再按照(3)式得出随等效辐射照度变化的关系曲线 PRNU-3,如图 5 中蓝色曲线所示。

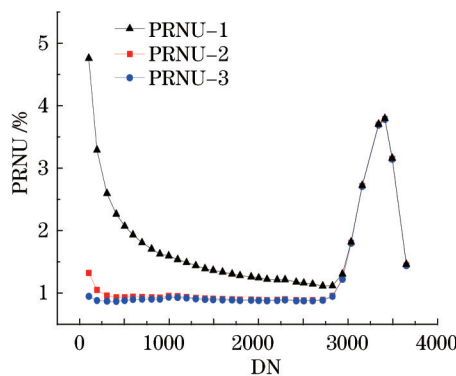


图5 PRNU 随等效辐射照度变化关系曲线

Fig.5 PRNU curve change with the equivalent irradiance

### 4.3 测试结果分析

结合第 3 节的理论分析,可以确定 PRNU-1 曲线中不仅包含了光子响应非均匀性噪声,还包含了光子散粒噪声,暗信号噪声及电路读出噪声;PRNU-2 曲线中包含了光子响应非均匀性噪声,暗信号噪声及电路读出噪声;PRNU-3 曲线中只包含了光子响应非均匀性噪声。

对比图 5 中的 3 条曲线,可以发现光子散粒噪声是影响光子响应非均匀性噪声测试结果最大的噪声源,它使测试结果在整个线性区域偏大,低照度时尤为明显,因此针对光电图像传感器进行光子响应非均匀性噪声测试时必须排除光子散粒噪声的影响。排除了光子散粒噪声后图 5 中的红、蓝两条曲线在输出数码值大于 500 时变化趋势基本一致。在 CCD 输出数码值小于 500 时,由于暗信号噪声和电路读出噪声的存在,红色曲线存在一定程度的上翘。通过暗场处理把这两种噪声去除后,上翘现象得到修正,蓝色曲线在被测 CCD 线性区范围内基本呈水平直线。

图 5 中蓝色 PRNU-3 曲线为面阵 CCD 光子响应非均匀性测试的正确结果,按照全数码值范围内的变化

趋势,曲线可以分为恒定段,上升段和下降段,比对被测 CCD 的视频响应曲线图 4 可以得出,线性区对应恒定段,饱和区对应上升段和下降段。光子响应非均匀性噪声是一种乘性噪声,该噪声随着输出数码值的增大而同比例的增大,而光子响应非均匀性噪声因子  $\Phi$  在线性区是恒定的。

随着光照的继续增大,因加工工艺的差异导致各像素金属氧化物半导体(MOS)电容存储信号电荷能力的不同得以体现,CCD 进入饱和区。这时某些势阱较小的像素随着光照的增强发生了电荷外溢,某些势阱较大的像素仍可以容纳电荷,外在表现为随光照增加同帧图像上各像素的值差异增大,这种差异产生的噪声远大于光子响应非均匀性噪声,因此光子响应非均匀性曲线出现上升现象,最高点表明所有像素的势阱都达到了饱和,此时各像素之间的差异最大;而在饱和区内随着光照的继续增大,电荷容量达到饱和的像素开始电荷外溢,外溢过程致使各像素处电荷数量的差异减小,外在表现为随光照的继续增强,各像素的值差异减小,因此光子响应非均匀性曲线在饱和区出现了先上升后下降的现象。

比对视频响应曲线和光子响应非均匀性噪声曲线,可以得出以下结论,两条曲线均可以体现传感器的线性区和饱和区,但光子响应非线性噪声曲线能够更加灵敏的体现线性区和饱和区的分界线,因此利用光子响应非线性噪声曲线评价传感器的线性区饱和和电压输出更加客观,同时光子响应非线性噪声曲线在线性区内能够反映像素间的响应度差异,为该噪声的平场校正提供了有力支持。

## 5 结 论

对高灵敏度光电图像传感器中存在的光子响应非均匀性噪声进行了机理分析,讨论了其他噪声对测试的影响,确定了测试方法。通过测试数据比对验证了测试方法对其他噪声抑制的有效性,最终结合视频响应曲线确定了测试方法的正确性。光子响应非线性噪声测试曲线不仅可以完成光子响应非均匀性噪声测试,还能够有效区分被测器件的线性区和饱和区,为系统的后期校正和相关指标评价提供了有力支持。

### 参 考 文 献

- 1 Cheng Wansheng, Zhao Jie, Cai Hehao. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD [J]. Opt Precision Eng, 2008,16(2): 314-318.  
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.
- 2 Xiu Jihong, Huang Pu, Li Jun, *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.
- 3 Wang Jun, Yang Huiling, Liu Yaxia, *et al.*. Correction to the nonuniformity of multiple CCDs butting camera [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2005, 26(3): 261-263.  
王军,杨会玲,刘亚侠,等. 多 CCD 拼接相机中图像传感器非均匀性校正[J]. 半导体光电, 2005, 26(3): 261-263.
- 4 Li Xiaojie, Ren Jianwei, Liu Hongxing, *et al.*. Spectral response testing and uncertainty evaluation of plane array CCD [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(11): 111202.  
李晓杰,任建伟,刘洪兴,等. 面阵 CCD 光谱响应测试及不确定度评估[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(11): 111202.
- 5 D J Wang, T Zhang. Noise analysis and measurement of time delay and integration charge coupled device [J]. Chin Phys B, 2011, 20(8): 087202.
- 6 Ye Zhao, Wang Chao, Dong Xiaojing, *et al.*. Radiation response matrix of array charge couple device [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080402.  
叶钊,王超,董小静,等. 面阵电荷耦合器件的辐射性能函数[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080402.
- 7 Liu Yi, Zhou Qing, Yin Dayi. Analysis and solution of two-phase FT-CCD charge overflow phenomenon [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(8): 080401.  
刘懿,周青,尹达一. 二相驱动帧转移型 CCD 电荷溢出现象分析及解决方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(8): 080401.
- 8 Yu Da, Zhou Huaide, Long Kehui, *et al.*. Screening and testing method for area CCD [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0708001.  
余达,周怀得,龙科慧,等. 一种面阵 CCD 的筛选测试方法[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0708001.
- 9 Li Yudong, Wang Bo, Guo Qi, *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.
- 10 Wang Dejiang, Shen Honghai, Song Yulong, *et al.*. Modeling and experimental investigation on the PRNU noise of TDI CCD [J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(2): 232-235.  
王德江,沈宏海,宋玉龙,等. TDI CCD 光子响应非均匀性噪声分析与测量[J]. 光子学报, 2012, 41(2): 232-235.

栏目编辑: 刘丰瑞