

## 基于 CMOS 图像传感器的像增强器闪烁噪声测试系统

杨敏杰, 钱芸生\*, 严毅赞, 吴胜

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 随着国内像增强器性能的逐步提高, 闪烁噪声成为分辨率进一步提升的障碍之一。为了深入分析和研究闪烁噪声的相关特性, 筛选性能更好的像增强器并进一步改进生产工艺, 设计了一套闪烁噪声测试系统。通过驱动长光辰芯 GSENSE400BSI 系列低照度 CMOS 图像传感器, 采集像增强器荧光屏上的图像, 利用 USB 接口传输数据至上位机进行图像分析。实验中对像增强器进行测试, 得到了相应的闪烁噪声离散系数分布, 发现在  $2.8 \times 10^{-6}$  lx 照度环境下噪声最为明显, 信噪比越高的像增强器整体离散系数越低。利用连通域检测算法, 在二值化阈值为 100 的条件下, 三种型号像增强器在连续 200 张图像中的高亮噪声数量平均值分别为 5.18, 1.40, 0.86, 重复性分别为 1.26%, 3.23%, 2.66%, 可以将离散系数和高亮噪声数量作为评价像增强器显示质量的指标之一。

**关键词** 像增强器; 闪烁噪声; 图像传感器; 测试系统; FPGA

中图分类号 TN223

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212537

## Scintillation Noise Test System of Image Intensifier Based on CMOS Image Sensor

Yang Minjie, Qian Yunsheng\*, Yan Yiyun, Wu Sheng

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science & Technology,  
Nanjing 210094, Jiangsu, China

**Abstract** With the enhancement of the performance of image intensifiers in China, flicker noise becomes one of the obstacles to further enhance resolution. To examine and study the characteristics of scintillation noise, a scintillation noise testing system is developed by selecting the image intensifier with better performance and enhancing the production process. By operating the GSENSE400BSI low-illuminance CMOS image sensor, the image on the fluorescent screen of the image intensifier was collected, and the data were transmitted using a USB interface to the computer for image analysis. In the experiment, image intensifiers were evaluated, and the corresponding dispersion coefficient distribution of scintillation noise was generated. It is discovered that the noise is the most evident in the environment with  $2.8 \times 10^{-6}$  lx illumination, and the higher the signal-to-noise ratio, the lower the overall dispersion coefficient of the image intensifier. Through the connected domain detection algorithm, under the condition of a binarization threshold of 100, the average amount of highlight noise in 200 consecutive images of three types of image intensifiers is 5.18, 1.40, 0.86, and the repeatability is 1.26%, 3.23%, 2.66%, respectively. The discrete coefficient and the amount of highlight noise can be used as one of the indicators to evaluate the display quality of image intensifier.

**Key words** image intensifier; flicker noise; image sensor; test system; FPGA

## 1 引言

作为微光夜视成像器件的核心, 像增强器是由光电阴极、微通道板及荧光屏组成的。它基本的工作原理是: 目标物体发出或反射的光信号照射在阴极表面, 经光电效应光子转化为电子, 被激发的电子在电

场的指引和加速下进入微通道板, 继而发生电子倍增, 最后高速轰击荧光屏, 将电子动能重新转变为光信号<sup>[1-4]</sup>。

随着国内夜视装备生产技术的提升, 国产超二代像增强器成像效果已经接近国外同类器件, 但在弱光条件下国产像增强器显示图像时闪烁噪声较大, 严重

收稿日期: 2021-09-15; 修回日期: 2021-10-25; 录用日期: 2021-11-10; 网络首发日期: 2021-11-21

基金项目: 国防科技重点实验室基金(61424120504162412001)

通信作者: \*yshqian2015@163.com

影响对目标的分辨力,大大缩短了像增强器的可探测距离<sup>[5]</sup>。像增强器中闪烁噪声的来源有多种,主要包括光电阴极处的光子涨落噪声、热场致发射噪声、微通道板(MCP)处的涨落噪声、反馈噪声、荧光屏非均匀性引发的颗粒噪声等<sup>[6-8]</sup>。目前常用的噪声评价指标是信噪比,像增强器输出亮度的平均信号值与偏离平均值的均方根噪声值比值可以反映输出信号噪声的平均水平。但这种评价方法不能体现具体位置上闪烁噪声的情况,也无法分辨噪声的种类和来源,所以需要一种新的方法从多个角度测试和分析闪烁噪声<sup>[9-11]</sup>。

基于 CMOS 图像传感器,本文设计了一套闪烁噪声综合分析系统,通过直接拍摄荧光屏上的图像,可以直观地展现出闪烁噪声的分布位置和闪烁情况;再通过分析采集到的多帧图像,可以测得不同像素点上噪声的幅值、高亮噪声的数量、噪声点的位置、离散系数

等一系列参数,实现了对闪烁噪声的定量分析。该测试系统既有助于筛选性能更好的像增强器,同时也可以对闪烁噪声进行深入分析,确定其主要来源,继而帮助提高生产工艺水平。

## 2 系统设计

### 2.1 总体设计

闪烁噪声综合分析测试系统主要包括面均匀光源系统、成像光学系统、低照度高帧频 CMOS、照度计、多轴自动控制转台、工控服务器和测试上位机等部件,如图 1 所示。实验时,面均匀光源系统产生的输出光进入像增强器<sup>[9,12-13]</sup>,像增强器荧光屏上显示均匀面光源产生的图像,图像经成像光学系统被低照度高帧频 CMOS 采集。上位机实时显示和处理接收到的图像数据,并分析闪烁噪声的相关参数特征。

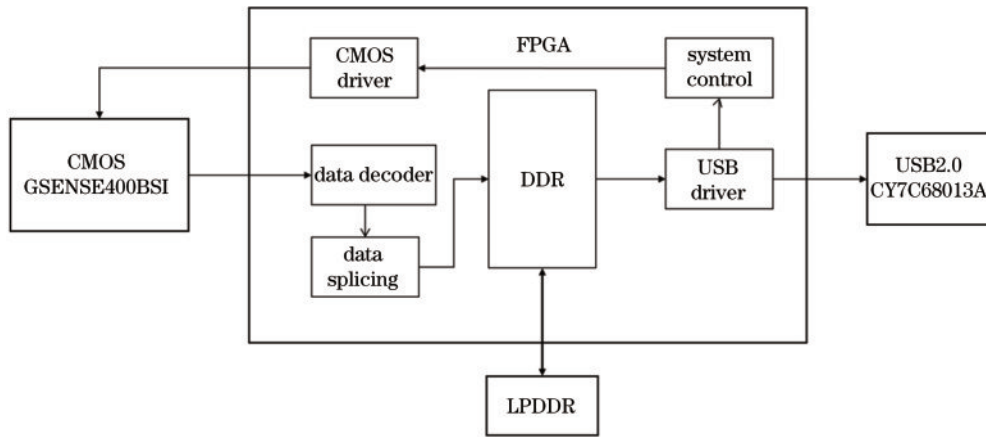


图 1 闪烁噪声综合测试系统框图

Fig. 1 Block diagram of scintillation noise comprehensive test system

### 2.2 CMOS 传感器驱动

本系统设计的重点在于 CMOS 相机的设计及驱动,为了在低照度的实验条件下采集高帧率的荧光屏图像,选用长光辰芯的一款型号为 GSENSE400BSI 的低照度 CMOS 作为光学成像系统的图像传感器。该传感器噪声小,读出噪声仅为  $1.6e^-$ ,最大分辨率为  $2048 \times$

$2048$ ,STD 模式下输出帧率为  $48 \text{ frame/s}$ 。依据其特性设计了硬件电路,包括 CMOS 芯片驱动板、FPGA 核心板、USB 接口板。其中 FPGA 芯片选用了 Xilinx 公司的 Spartan6 芯片,具有成本低、灵活性强的特点。

逻辑设计流程如图 2 所示,主要分为以下几个模块:时钟管理模块、CMOS 驱动模块、系统控制模块、

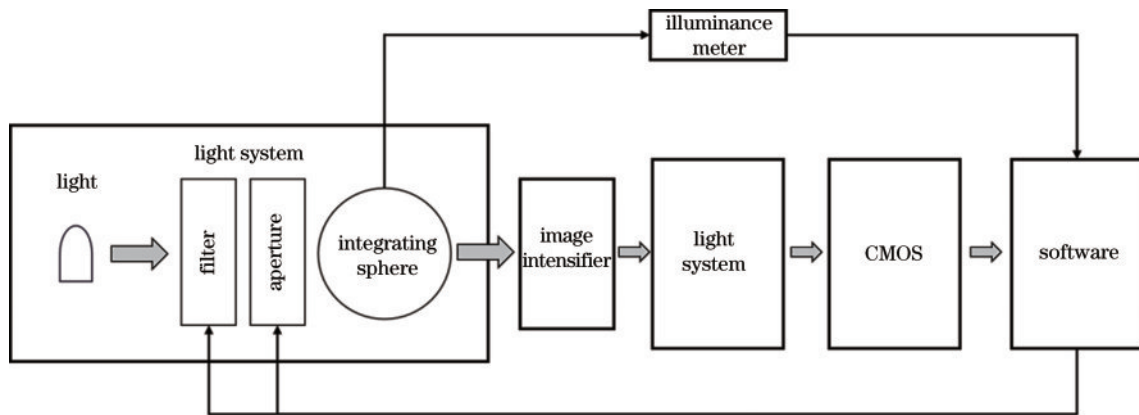


图 2 逻辑设计框架图

Fig. 2 Overall logical framework diagram

SPI 串行协议配置模块、IIC 通信协议配置模块、图像数据训练模块、数据拼接模块、LPDDR 数据缓存模块和 USB 驱动模块。对相机上电后,系统控制模块中的状态机开始工作,对所有模块进行初始化复位。当复位完成后,SPI 配置模块按照通信协议及默认的参数(增益状态、增益倍率、积分时间)对传感器内的寄存器进行配置。

由于不同工作模式下传感器的工作电压不同,SPI 配置结束后,状态机跳转至 IIC 配置模块。通过配置两块不同地址的 AD5625R 芯片输出相应的电压,从而完成 CMOS 的上电的第二阶段。接下来需要通过时序信号来驱动 CMOS 传感器读出图像数据,再通过片内 AD 的解码控制信号的读地址和复位地址确定传感器的曝光时间及传感器图像的开窗位置。当图像读出后,状态机进入训练模式。由于 PCB 电路板上布线带来的延迟,不同通道间的数据到达时间并不一致,所以需要需要对数据进行对齐。训练模块通过 bit 对齐、word 对齐、channel 对齐最终校准对齐 8 路通道的数据。最后通过 FIFO 将 8 路 LVDS 通道中的数据拼接成一路数据,以方便后续图像的处理。数据拼接模块通过 8 个异步 FIFO 来分别缓存各通道的数据,读出时按照顺序依次从 8 个 FIFO 中读取,从而将数据拼接为一路 12 bit 的数据。

由于传感器的分辨率为  $2048 \times 2048$ ,每个像素的位宽为 12 bit,所以缓存一帧完整图片需要  $2048 \times 2048 \times 12 = 50$  Mbit 的存储空间。并且图像拼接后的时钟频率为 200 MHz,而 USB2.0 读取数据的频率为 100 MHz,两者并不在一个时钟域内。因此在 DDR 内开辟 3 片地址空间以缓存图像,并通过乒乓操作防止图像出现撕裂的情况,只有当读完或者写完一片空间时,才能读写下一片地址。

在数据传输模块中,选用了 Cypress 公司的 CY7C68013A 的 USB2.0 控制芯片。其传输频率为 48 MHz,传输位宽为 16 bit,经过测试最大传输速度为 48 MB/s。数据的传输过程中,读写操作均由上位机来发起,通过固件程序控制 USB 芯片进而和 FPGA 进行通信。FPGA 根据读写选通信号确定是发送图像数据还是接收命令。当接收到上位机发送的命令后,FPGA 会根据相应的格式来解析数据,如果工作模式改变,则重新跳转状态机使其回到 SPI 配置模式并重复上述步骤。

### 2.3 上位机控制软件

基于 Visual Studio 2013 的开发环境,闪烁噪声综合分析测试系统利用 Microsoft Foundation Classes (MFC) 编写上位机控制软件。多线程开发的技术可以同时实现数据流采集和图像实时显示,也可以通过 USB2.0 向 FPGA 发送命令。该上位机具有控制数据的采集和停止、拍摄单张图像或连续拍摄指定数量的图像、修改相机的工作模式和曝光时间、PGA 增益、实

时显示图像和帧频的功能。其程序界面如图 3 所示。

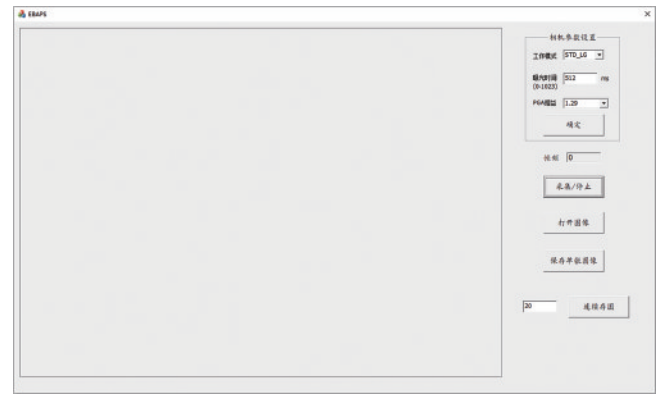


图 3 上位机软件界面

Fig. 3 Software interface of upper computer

## 3 实验测试及结果分析

### 3.1 测试方法

本文实验中,相机的工作模式为 HG\_Gain,读出增益为 7.25X,曝光时间为 42 ms。硬件电路采用 5 V 供电,工作电流为 0.62 A,硬件功耗为 3.1 W。像管的工作电压为 2.8 V,工作电流为 0.1 A,功耗为 0.28 W。光源的工作电压为 12 V,工作电流为 6.35 A,功率为 75 W。在低照度环境下,将像增强器的阴极面对准积分球的出光孔,调节显微镜使相机能对像增强器荧光屏清晰成像,通过上位机控制光衰减程度及光阑孔径,最后分别在不同照度下采集三个参数确定的超二代像增强器荧光屏上的闪烁噪声图像,通过检测算法定量分析噪声闪烁的严重程度。待测超二代像增强器的参数如表 1 所示。

表 1 待测超二代像增强器的参数  
Table 1 Parameters of image intensifier to be measured

Model	Gain	Equivalent background illumination / ( $10^{-6}$ lx)	SNR
I	10118	0.3	23.4
II	9879	0.21	28.6
III	14263	0.15	25.7

在离散程度检测模块中,通过计算每个像素的离散系数,可以定量比较荧光屏上不同位置灰度值的离散情况,找到闪烁相对严重的区域。离散系数的计算公式为

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu}, \quad (1)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}}, \quad (2)$$

式中: $C_v$ 为离散系数; $\sigma$ 为标准差; $\mu$ 为单个像素点的平均灰度值; $n$ 为连续采集的图片数量。不同位置像素

的灰度均值不同,不能直接比较其标准差,采用基于离散系数的测试方法则可以同时比较所有像素位置上的噪声闪烁情况。

从图 4 可以看出,存在一种位置随机、数量少、亮度高的闪烁噪声。在像增强器的使用过程中,该噪声对观测有较大的影响,在测试时需对其进行深入分析。首先通过二值化,提取出高于整幅图平均灰度一定阈值的噪声;再通过连通域检测算法对目标区域进行分割,得到数量、位置、面积等参数,并用矩形框选连通

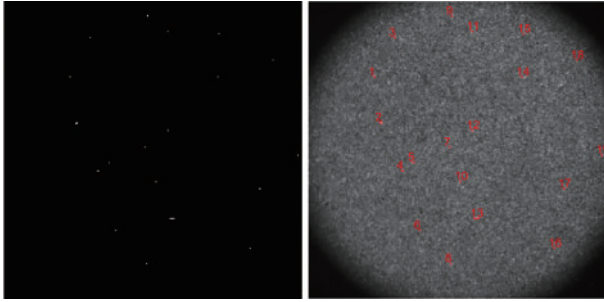


图 4 二值化和连通域检测结果

Fig. 4 Binarization and connected domain detection results

域,在原始图片上进行标记。

### 3.2 结果分析

通过改变光阑的孔径大小,在 6 种不同照度环境下分别对 I 号像增强器荧光屏上的图像进行采样。通过实验发现当样本为 200 张时,离散系数趋于稳定,可以体现当前照度下噪声的闪烁程度。

图 5 为超二代 I 型像增强器在不同照度下对 200 张图像处理得到的离散系数分布热力图,颜色偏蓝的区域离散系数越低,颜色偏红的区域离散系数越高。图中圆形区域颜色较浅,代表该区域离散系数较高,有大量闪烁噪声,属于荧光屏所在区域。部分位置颜色为橙红色,说明闪烁程度严重。图 5(d) 的荧光屏区域大部分呈浅蓝色,离散系数总和为  $9.63 \times 10^4$ ,高于其他照度下的测试结果,可以说明该照度下闪烁噪声最为明显。当低于其照度时,荧光屏上的信号和噪声都逐渐变得微弱且难以区分,当照度继续升高,闪烁噪声渐渐淹没在有效信号中,离散系数整体降低。因此在  $2.8 \times 10^{-6}$  lx 照度情况下比较适合进行噪声分析,后续测试也在该照度下进行。

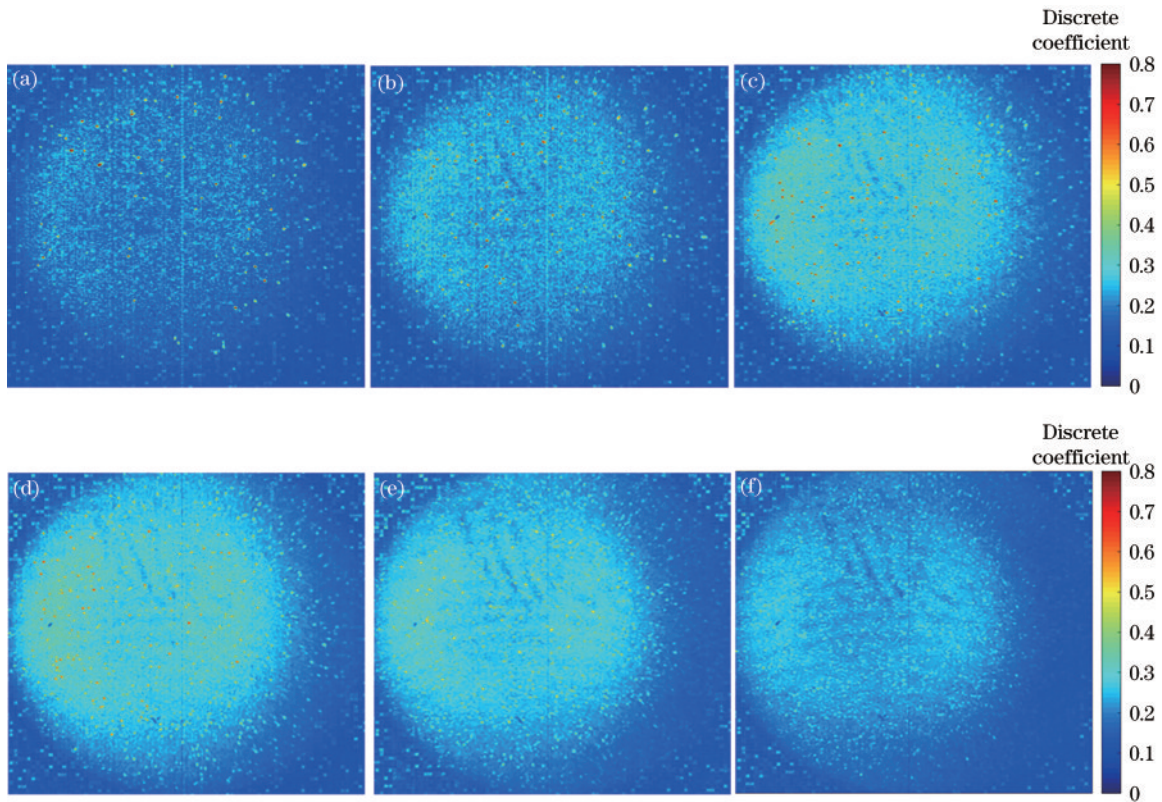


图 5 不同照度下的离散系数热力图。(a)照度为  $5 \times 10^{-7}$  lx; (b)照度为  $7 \times 10^{-6}$  lx; (c)照度为  $1.2 \times 10^{-6}$  lx; (d)照度为  $2.8 \times 10^{-6}$  lx; (e)照度为  $6.37 \times 10^{-6}$  lx; (f)照度为  $1.34 \times 10^{-5}$  lx

Fig. 5 Thermal diagrams of discrete coefficient under different illuminance . (a) illuminance is  $5 \times 10^{-7}$  lx; (b) illuminance is  $7 \times 10^{-6}$  lx; (c) illuminance is  $1.2 \times 10^{-6}$  lx; (d) illuminance is  $2.8 \times 10^{-6}$  lx; (e) illuminance is  $6.37 \times 10^{-6}$  lx; (f) illuminance is  $1.34 \times 10^{-5}$  lx

图 6 是三个不同型号的超二代像增强器在  $2.8 \times 10^{-6}$  lx 照度下得到的荧光屏图像的离散系数热力分布。图 6(a) 中的离散系数总和为  $9.63 \times 10^4$ , 图 6(b)

中的离散系数总和为  $7.29 \times 10^4$ , 图 6(c) 中的离散系数总和为  $8.37 \times 10^4$ 。从图 6 可以看出,对于闪烁噪声的严重程度,超二代 I 型大于超二代 III 型,超二代 III 型大

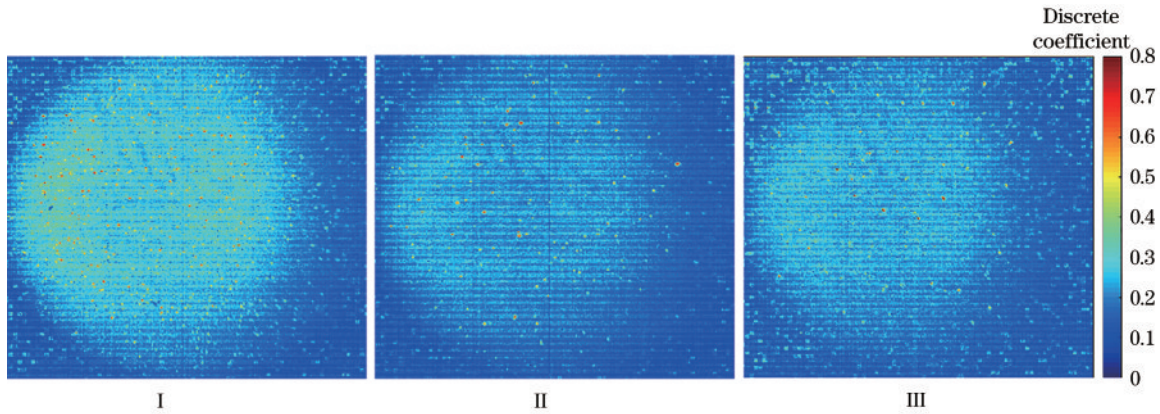


图 6 不同型号像增强器的离散系数热力图

Fig. 6 Discrete coefficient thermal maps of different image intensifiers

于超二代 II 型。根据使用手册中的数据可知,三个像增强器的信噪比从大到小的顺序为:超二代 II 型大于超二代 III 型,超二代 III 型大于超二代 I 型。参考标准条件下三种不同型号像增强器的信噪比测试值,可以发现噪声越严重的像增强器,离散系数越高,信噪比越低。离散系数的热力分布可以体现出每个像素位置上噪声闪烁的严重程度,能够直观地看出荧光屏上不同区域噪声分布情况,这是信噪比测试无法体现的。

为了分析不同二值化阈值下高亮闪烁噪声的数量情况,设置连通域检测算法中二值化的阈值为 100,并分别统计三种型号像增强器对连续 200 张图像处理得到的高亮噪声数量平均值,测得的数据如表 2 所示。

表 2 二值化阈值为 100 时像增强器得到的高亮噪声数量平均值

Table 2 The average amount of highlight noise obtained by image intensifier when the threshold value of binarization is 100

Model	1	2	3	4	5	Mean
I	5.16	5.22	5.08	5.17	5.25	5.18
II	1.48	1.42	1.36	1.39	1.39	1.40
III	0.84	0.86	0.88	0.88	0.83	0.86

从表 2 可以看出: I 号像增强器得到的高亮噪声数量最多,每张图平均有 5.18 个,重复性为 1.26%; II 号和 III 号像增强器得到的噪声数量较为接近,分别为 1.40 个和 0.86 个,重复性分别为 3.23% 和 2.66%。测试结果的重复性良好。不同于布满荧光屏的普通闪烁噪声,这种噪声位置随机、亮度比较高、数量较少,因此对整体的离散系数没有大的影响,像增强器的信噪比测试也很难反映出高亮闪烁噪声的实际存在及严重程度。但是这类噪声在像增强器的实际使用中观测的影响是比较大的,所以这类噪声的数量可以作为评价像增强器显示质量的指标之一。

## 4 结 论

为了解决当前缺乏像增强器闪烁噪声测试手段的

问题,利用 FPGA 驱动低照度 CMOS 图像传感器,设计了一套专门针对闪烁噪声的综合分析测试系统。该系统具有图像数据采集、USB 数据传输、上位机控制、图像数据实时显示和保存等功能。通过算法模块可以分析得到闪烁噪声的离散系数分布、高亮噪声的数量和位置等参数,实现了对具体位置闪烁噪声的定量分析。

在  $2.8 \times 10^{-6}$  lx 的照度环境下,对三个不同型号的像增强器进行检测,得到了每个像素上闪烁噪声的离散系数,总和分别为  $9.63 \times 10^4$ 、 $7.29 \times 10^4$ 、 $8.37 \times 10^4$ 。在二值化阈值为 100 的条件下,三种型号像增强器对连续 200 张图像处理得到的高亮噪声数量平均值分别为 5.18、1.40、0.86,重复性分别为 1.26%、3.23%、2.66%,测试结果的重复性良好。实验结果表明:离散系数越高,像增强器噪声的闪烁程度越严重,对应标准测试条件下所测得的信噪比数值越低。但是信噪比测试很难反映出高亮闪烁噪声的实际存在及严重程度,而该噪声的数量对成像质量有较大的影响,可以将离散系数作为评价像增强器显示质量的指标之一。本文的研究成果有助于深入研究闪烁噪声理论,筛选质量更好的像增强器,改进其生产工艺。

## 参 考 文 献

- [1] 陈庆佑. 微光夜视技术进展简介[J]. 真空电子技术, 2001(1): 32-35.  
Chen Q Y. A brief introduction on the development of the L3 night vision technology[J]. Vacuum Electronics, 2001 (1): 32-35.
- [2] 姚泽, 程宏昌, 李涛, 等. 基于 P31 荧光粉的像增强器余辉测量方法研究[J]. 应用光学, 2020, 41(4): 796-800.  
Yao Z, Cheng H C, Li T, et al. Research on afterglow measurement method of image intensifier based on P31 phosphor powder[J]. Journal of Applied Optics, 2020, 41 (4): 796-800.
- [3] Yan B J, Liu S L, Heng Y K. Nano-oxide thin films deposited via atomic layer deposition on microchannel plates[J]. Nanoscale Research Letters, 2015, 10: 162.

- [4] Chrzanowski K. Review of night vision technology[J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, 21(2): 153-181.
- [5] 金伟其, 张琴, 王霞, 等. 一种改进的直视型微光夜视系统视距模型[J]. *光子学报*, 2020, 49(4): 0411001.  
Jin W Q, Zhang Q, Wang X, et al. An improved apparent distance model for direct-view low-light-level night vision system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, 49(4): 0411001.
- [6] 潘京生. 像增强器的迭代性能及其评价标准[J]. *红外技术*, 2020, 42(6): 509-518.  
Pan J S. Image intensifier upgraded performance and evaluation standard[J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(6): 509-518.
- [7] 王洪刚. 像增强器的电子输运与噪声特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 76-87.  
Wang H G. Research on the electron transport and noise characteristics of image intensifiers[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015: 76-87.
- [8] 向世明. 微光像增强器信噪比理论极限问题研究[J]. *应用光学*, 2008, 29(5): 724-726.  
Xiang S M. Theoretical limit for SNR of LLL image intensifiers[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(5): 724-726.
- [9] 王生云, 孙宇楠, 史继芳, 等. 三代微光像增强器信噪比测量技术研究[J]. *应用光学*, 2013, 34(4): 676-679.  
Wang S Y, Sun Y N, Shi J F, et al. LLL image intensifier of the third generation SNR measurement technology[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(4): 676-679.
- [10] 李晓峰, 李娇娇, 李金沙, 等. 超二代及三代像增强器不同响应波段的参数测量及比较[J]. *光子学报*, 2021, 50(2): 0225001.  
Li X F, Li J J, Li J S, et al. Measure and comparison between the second-generation and the third-generation image intensifier within the different region of wavelength[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50(2): 0225001.
- [11] 崔东旭, 郑少成, 邱亚峰, 等. 微通道板的输出信噪比特性研究[J]. *真空科学与技术学报*, 2012, 32(6): 468-471.  
Cui D X, Zheng S C, Qiu Y F, et al. Output signal-to-noise ratio characteristics of microchannel plate[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2012, 32(6): 468-471.
- [12] 拜晓锋, 苏俊宏, 石峰, 等. 像增强器综合测试用光源照度调变技术研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(5): 806-809.  
Bai X F, Su J H, Shi F, et al. Illumination-adjusting technology of light source used for image intensifier comprehensive testing[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(5): 806-809.
- [13] 微光像增强器试验方法: WJ 2091—1992[S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.  
Test method of image intensifier: WJ 2091—1992[S]. Beijing: Standards Press of China, 1992.