

文章编号 1004-924X(2022)02-0191-08

天问一号高分相机火表复杂照度下自动调光 成像电路设计

黄敬涛*, 王晓东, 孙振亚, 周大立, 周鹏骥

(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: 航天相机的成像质量是获取遥感数据的关键, 航天相机设计中调光是影响相机的成像质量的重要参数, 自动调光是预先获取目标场景的信息, 根据信息确定调光参数, 避免过度曝光或曝光不足带来的图像信息损失。我国首次火星探测任务天问一号高分相机, 针对火表复杂照度, 为获取高质量图像数据, 提出了基于TDI CCD推扫成像与CMOS凝视成像自动调光成像电路设计, 并提出了基于FPGA的自动调光算法。对天问一号高分相机进行自动调光试验, 试验结果表明: 自动调光后图像的动态传函MTF提升0.013, 外场试验中, 对实际景物进行自动调光前后对比拍摄, 结果表明自动调光成像效果良好, 具备较好的场景适应能力, 满足火表复杂照度下自动调光成像需求。

关键词: TDI CCD; CMOS; 自动调光; 天问一号; MTF

中图分类号: TP272 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20223002.0191

Design of auto-exposure imaging circuit under complex illuminance of Mars in Tianwen-1 high-resolution camera

HUANG Jingtao*, WANG Xiaodong, SUN Zhenya, ZHOU Dali, ZHOU Pengji

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

* Corresponding author, E-mail: 3511643@163.com

Abstract: The imaging quality of a space-borne camera is key to accurately obtain remote-sensing data. Exposure is an important parameter in the design of a space-borne camera, which affects the image quality of the camera. Auto-exposure obtains information from the target scene in advance and uses it as the basis for determining the exposure, which can avoid the loss of image information by overexposure or underexposure. In order to obtain high-quality image data from the high-resolution camera in Tianwen-1 under the complex illuminance of Mars, an auto-exposure imaging circuit, based on TDI CCD push-broom and CMOS staring imaging, and an FPGA-based auto-exposure algorithm is proposed. The auto-exposure experimental results from the high-resolution camera in Tianwen-1 show that the dynamic transfer function MTF of the image after auto-exposure is increased by 0.013. In an outdoor test, a comparison of the actual scene before and after the auto-exposure shows that the effect of auto-exposure is good, with better scene adaptation. The proposed circuit has the ability to meet the requirements of auto-exposure imaging

收稿日期: 2020-11-12; 修订日期: 2021-01-02.

基金项目: 北京市科技计划课题资助项目(No. Z191100004319001)

under the complex illumination of Mars.

Key words: TDI CCD; CMOS; auto-exposure; Tianwen-1; MTF

1 引言

我国第一颗火星探测器“天问一号”,迈出了我国深空探测的第一步,高分辨率相机(以下简称高分相机)是火星环绕器上的有效载荷之一,主要完成对火星表面精细观测的任务,旨在为我国的火星探测和为人类全面了解火星地貌地表状况、太阳系起源与演化以及为后续的火星登陆计划做出重要贡献。

火星表面的太阳辐亮度约为地球的 0.43 倍,不同区域如沙丘、冰川、崩塌等辐亮度会有所不同,为实现火星表面地形地貌高精度成像和详细勘测,对相机的成像质量有着很高的要求,航天相机在不同照度下的自动调光是相机设计的关键,影响着航天相机的成像质量^[1]。

高分相机采用时间延迟积分(Time Delayed and Integration, TDI)电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)作为主探测器,进行推扫成像,但在对目标场景成像时只进行一次推扫成像,因此无法预知目标场景的特征信息,进而无法确定调光参数,星上自动调光实现难度较大^[2]。

为了实现线阵 TDI CCD 推扫式相机的星上自动调光,高分相机设计了面阵 CMOS 与 TDI CCD 相结合的焦平面结构,利用 CMOS 预先采集目标场景,对场景信息进行分析预判进而确定调光参数,实现星上自动调光^[3]。TDI CCD 作为主探测器获取火星表面的全色图像和彩色图像,面阵 CMOS 传感器通过凝视成像辅助 TDI CCD 实现自动调光进而提高成像质量。

2 成像系统组成

整个系统由 CCD 预放电路、CCD 视频处理电路和 CCD 驱动电路及控制器电路组成。CCD 预放电路实现对 CCD 输出的模拟信号进行预处理,包括信号放大和抑制噪声,以保证模拟信号传输的完整性;CCD 视频处理电路实现对经过预放电路处理后的 CCD 模拟信号进行模数转换,输出数字图像信号;CCD 驱动电路实现对 CCD 工作所需的时序信号进行功率驱动;控制器电路

用于产生 CCD 与 CMOS 工作所需的时序,接收 CCD 与 CMOS 输出的图像数据并整理输出^[4-5]。系统组成框图如图 1 所示。

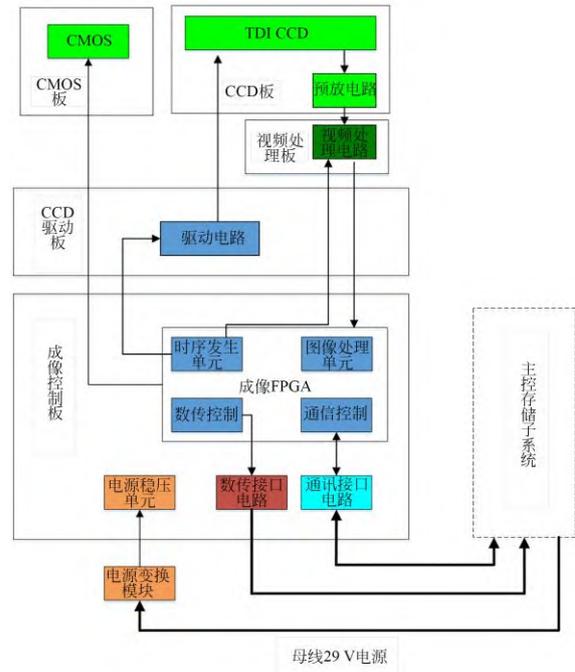


图 1 成像系统组成框图

Fig. 1 Block diagram of imaging circuit

3 成像电路设计

3.1 TDI CCD

高分相机根据任务要求,设计选用了 DAL-SA 公司的 CORONA 型 TDI CCD,实物如图 2 所示。该探测器全色像元数 6 144、彩色像元数 3 072,具有全色,蓝色,绿色,红色和近红外五个

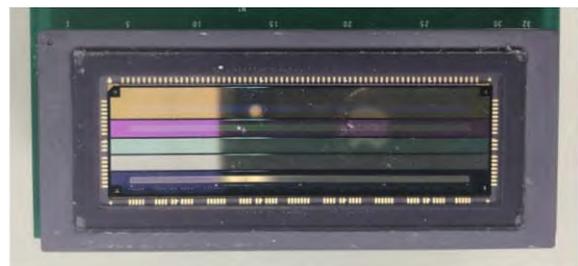


图 2 TDI CCD 实物图

Fig. 2 TDI CCD real figure

谱段,光谱区共 96 行像素,可以通过 5 个级间选择控制信号分别实现 8 行、16 行、32 行、48 行、64

行和 96 行 6 种 TDI 积分级数工作模式,其结构图如图 3 所示。TDI CCD 主要指标见表 1。

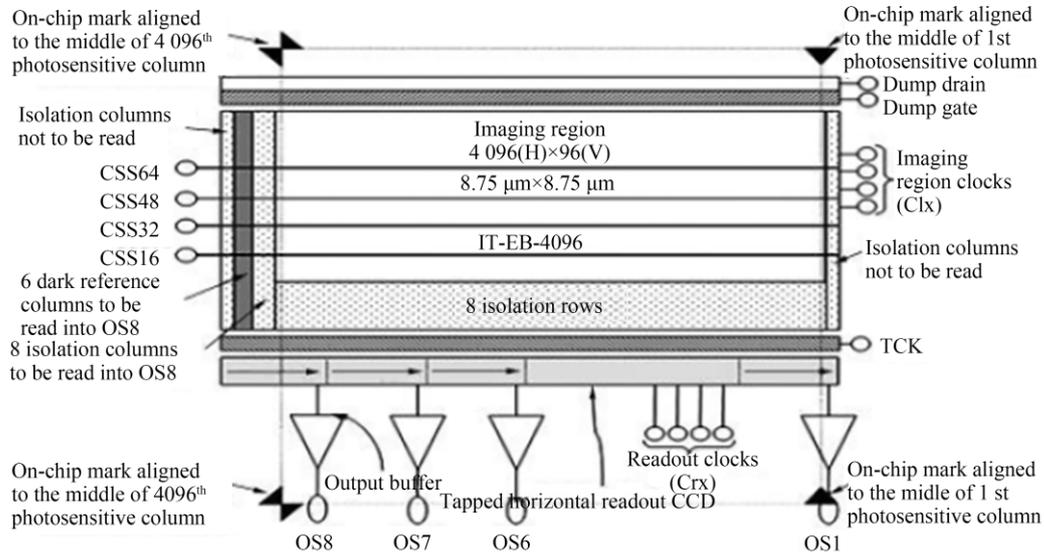


图 3 TDI CCD 结构

Fig. 3 Framework of TID CCD

3.2 CCD 预放电路

CCD 预放电路用于对 CCD 输出的模拟信号进行信号放大和噪声抑制,设计采用运算放大器构造同相放大电路。通过交流耦合的方式,将视频信号中的直流偏置隔离掉,利用运算放大器将低压信号放大至后端视频处理器需要的幅度

范围。

器件选用 TI 公司的视频宽带运算放大器 LMH6722,该器件 3 dB 带宽可达 300 MHz, CCD 视频输出信号频率设计值为 12.65 MHz,满足系统的设计需求。CCD 预放电路如图 4 所示。

表 1 TDI CCD 的主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of TDI CCD

波段	像元尺寸/ μm	像元数量	最大像元读出速率/MHz	最大行转移速率/KHz	光谱谱段/nm	最大积分级数	抗辐照指标
全色	8.75×8.75	6144	≥ 25	≥ 26	450~900	96 级	
B1	17.5×17.5	3072	≥ 25	≥ 14	450~520	64 级	
B2	17.5×17.5	3072	≥ 25	≥ 14	520~600	48 级	$> 30 \text{ Krad}(\text{Si})$
B3	17.5×17.5	3072	≥ 25	≥ 14	630~690	32 级	
B4	17.5×17.5	3072	≥ 25	≥ 14	760~900	32 级	

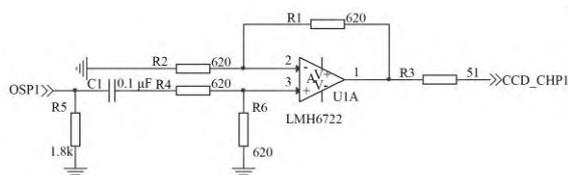


图 4 CCD 预放电路

Fig. 4 Pre-magnification circuit of the CCD

3.3 CCD 视频处理电路

CCD 视频处理电路用于采集 CCD 输出的模拟视频信号,并进行相关双采样、自动增益控制、抑制噪声和高速 A/D 变换。

由于 CCD 频率较高,为了能实现对像元进行及时的处理和获得高质量的图像,相应的对视频处理单元的带宽和量化精度要求也变高。

CCD 视频处理单元的目的在于消除 KTC 噪声,抑制低频噪声和宽带白噪声,并且保证在 CCD 的动态范围内图像信号随目标亮度成线性变化,通过综合比较,采用 TI 公司视频处理器 LM98640。

设计采用全色与彩色均单抽头输出,全 4 路,彩色各 1 路,共 8 路输出,其中全色图像设计每路输出频率为 12.65 MHz,彩色图像设计每路输出频率为 3.11 MHz,量化为 12 位,该器件满足系统的设计需求。

3.4 CCD 驱动电路设计

CCD 驱动电路用于对 FPGA 产生的驱动信号进行功率放大,将驱动时序转换为符合 TDI CCD 工作要求的电平信号。根据 TDI CCD 对驱动信号的要求,驱动器设计选用 Intersil 公司的 ISL7457,该芯片内部集成了电平转换功能,前端输入可以是 3 V 或 5 V 的 TTL 电平,输出信号的高低电平由其 VH 和 VL 决定。同时 ISL7457 输入脉冲频率最高 40 MHz,能满足系统 TDI CCD 的单路最大像元读出速率 12.65 MHz 的设计需求。

CCD 时钟信号的上升沿和下降沿时间必须要在指定的范围内,要得到指定的上升时间,就必须提供相应大小的驱动电流。对于容性负载的 CCD,按照电容模型公式: $I = C \frac{du}{dt}$ 可以算出驱动器需要提供的瞬态电流。对于 CCD 的水平转移时钟而言,上升或下降沿的最长时间按 15 ns 计算,其瞬态电流可达到 200 mA。ISL7457 可提供 2 A 的驱动电流,在负载电容为 1 000 pF 下,可提供的驱动信号上升时间与下降时间分别为 13.5 ns 和 13 ns,均可以满足应用需求。

3.5 CMOS 探测器

CMOS 探测器设计选用长光辰芯的 HR400 型 CMOS 探测器,该器件是一款高动态范围面阵探测器,有效像元数 2 048(H)×2 048(V),像元尺寸 11 μm×11 μm,量化位数为 12 bit,主要技术指标见表 2。

3.6 CMOS 成像电路设计

由于 CMOS 器件自身集成了地址译码器、放大器、A/D 转换器等,外围电路提供合适的供电、偏置电压及驱动时序即可工作^[6-7],设计采用 FPGA 产生驱动时序直接驱动 CMOS 探测器,FPGA

表 2 CMOS 主要技术指标

Tab. 2 Main technical indicators of CMOS

参数	参考值
像元尺寸	11 μm×11 μm
有效像元数	2 048(H)×2 048(V)
快门类型	电子卷帘快门
主时钟速率	20 MHz~30 MHz
帧频	24 fps@HDR, 48 fps@STD
数据率	2.4 Gbit/s at 25 MHz
满阱电荷	120 ke
暗噪声	1.47e
动态范围	>96 dB(HDR 模式)
功耗	<600 mW

GA 选用 XILINX 公司的 XQ4V5X55,该器件具有 IODELAY 功能,可以满足 CMOS 探测器 LVDS 输出需进行 training 操作的需求。

4 自动调光算法

自动调光的目的是改变图像的灰度值,通过改变成像参数,使相机输出图像的灰度趋近于目标灰度值,目标灰度值的选取需根据实际成像场景。

TDI CCD 输出的图像灰度值 f_{CCD} 与相机入瞳辐亮度 B ,积分时间 t 和积分级数 N 有直接关系。

$$f_{\text{CCD}} = \frac{\pi}{4} \times \tau \times \frac{1}{F^2} \times B \times t \times \frac{R}{96} \times N \times \frac{1}{G}, \quad (1)$$

其中: τ 是光学系统平均透过率; F 是光学系统相对孔径; R 是 TDI CCD 探测器响应度,单位 $\text{V} \cdot \text{M}^2 \cdot \text{J}^{-1}$; G 是电子学量化增益,单位 DN/V,本设计中选用的 LM98640 量化位数 12 bit, $G=2 048 \text{ DN/V}$ 。

通常 TDI CCD 在不同轨道高度需要设置不同的积分时间来进行像移匹配^[8],CCD 的积分时间 t 可表示为:

$$t = \frac{GSD}{Vg}, \quad (2)$$

其中: GSD 为地面像元分辨率, Vg 为飞船速度。任务要求火表面像元分辨率全色为 0.5 m、彩色为 2.0 m,飞船速度根据任务的轨道高度而确定,

积分时间 t 在不同轨道高度基本是定值,所以调节图像的灰度值的直接手段即调节积分级数,自动调光的实现即通过改变积分级数 N 来实现,在公式(1)中,入瞳辐亮度 B 是唯一的未知数,其可以通过面阵 CMOS 图像数据求得。

开启自动调光模式时,CMOS 探测器以默认的成像参数进行一次拍摄,FPGA 接收一帧面阵 CMOS 图像数据,并求出所有像元的平均灰度值 f_{cmos} 。

$$f_{\text{cmos}} = \frac{1}{m \times n} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n f(x, y). \quad (3)$$

CMOS 输出的平均灰度 f_{cmos} 与像面辐照度 E 的关系为:

$$f_{\text{cmos}} = E \times t \times \frac{R}{G}, \quad (4)$$

其中: t 是 CMOS 积分时间; R 是 CMOS 探测器响应度,单位 $\text{V} \cdot \text{M}^2 \cdot \text{J}^{-1}$ 。

CMOS 像面辐照度 E 与相机入瞳辐亮度 B 的关系为:

$$E = \frac{\pi}{4} \times \tau \times \frac{1}{F^2} \times B. \quad (5)$$

则 f_{cmos} 与相机入瞳辐亮度 B 的关系为:

$$B = \frac{f_{\text{cmos}} \times 4 \times G \times F^2}{R \times t \times \pi \times \tau}. \quad (6)$$

根据公式(6)得到的入瞳辐亮度 B 代入公式(1)中,即可确定积分级数 N ,从而实现自动调光。

本文设计的自动调光算法,利用面阵 CMOS 图像数据求出相机入瞳辐亮度 B ,进而根据当前轨道高度,选取合适的积分时间和积分级数,得到趋近于目标灰度值 TDI CCD 图像^[9-11],实现星上自动调光。

5 试验结果

5.1 自动调光测试

在实验室条件下,利用积分球作为均匀光源,测试自动调光功能,测试现场如图5所示。

图6是自动调光的图像数据,上半部分是自动调光前的图像信息,下半部分是自动调光后的图像信息,从图中可以看出,自动调光前图像平均灰度值为 57.1,设置目标灰度值为 120,开启自



图5 实验室测试自动调光

Fig. 5 Auto-exposure test in laboratory

动调光功能后图像平均灰度值为 115.12,自动调光功能得到验证。



图6 自适应调光前后的图像

Fig. 6 Image before and after auto-exposure

5.2 MTF 测试

在相机进行动态 MTF 测试时,对自动调光效果进行评估。通过动态目标发生器和平行光管模拟无穷远的运动目标,调整动态目标发生器的目标转速,模拟典型轨道高度下的探测器星下点速度,采用 1 倍频靶标,模拟轨道高度 265 km 进行固定行频设置,增益设置为 1 倍增益,积分级数分别设置 CCD 全色的 96 级、64 级、48 级、32 级、16 级、8 级,进行动态传函的测试,测试结果见表 3。

表 3 各积分级数对应的 MTF

Tab. 3 MTF corresponding to each integral series

轨道高度/km	行频/Hz	增益	级数	MTF
265	8 078.477	1	8	0.093
			16	0.1
			32	0.097
			48	0.104
			64	0.1
			96	0.092

由表中测试数据可以看出,积分级数 48 级时,图像 MTF 最大为 0.104。

同样测试条件下,对比相机开启自动调光前后的全光谱段 MTF 值,图 7 为未开启自动调光功能,TDI CCD 以默认参数进行成像,默认积分级数为 8 级,默认增益为 1,平均 MTF 为 0.092。

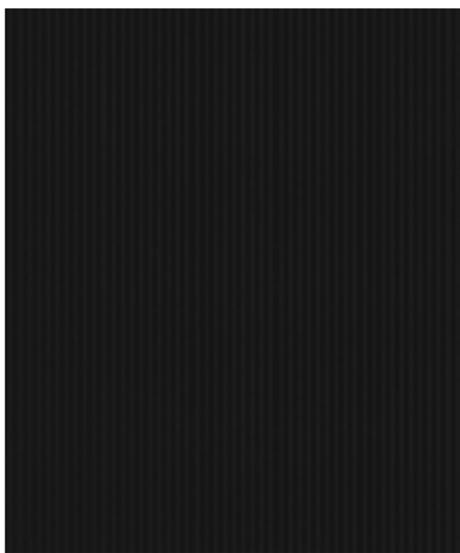


图 7 自动调光前 MTF 测试图像

Fig. 7 MTF test image before auto-exposure

开启自动调光,积分级数自动调整为 48 级,增益为 1,平均 MTF 为 0.105,如图 8 所示。

测试结果如表 4 所示。

相机动态 MTF 测试中,开启自动调光功能后,相机根据当前入瞳辐亮度,自动选择 48 级进行成像,较默认 8 级成像时 MTF 提升 0.013,自动调光效果良好。



图 8 自动调光后 MTF 测试图像

Fig. 8 MTF test image after auto-exposure

表 4 自动调光前后 MTF 值对比

Tab. 4 MTF value comparison before and after adaptive automatic exposure

成像模式	积分级数	增益	行频/Hz	MTF
默认成像参数	8	1	8 078.477	0.092
自适应调光	48	1	8 078.477	0.105

6 外景成像试验

在室温条件下,利用单轴转台模拟推扫成像,对室外 3.5 km 外的目标进行推扫成像,首先使用默认成像参数对目标进行成像,得到的图像灰度值较低,图像层次不分明,如图 9 所示。

开启自动调光功能后,对同一目标进行再次推扫成像,如图 10 所示,图像灰度值明显增加,层次分明,达到了预期的设计目的。

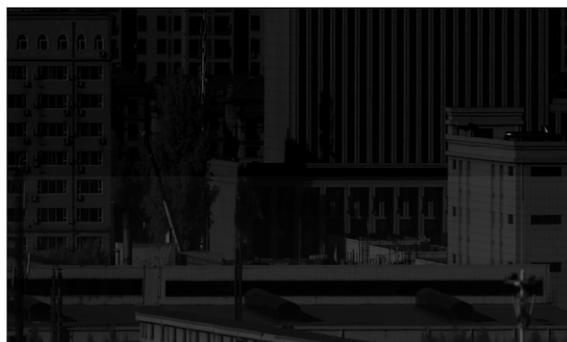


图 9 自动调光前外景图像

Fig. 9 Actual scene image before auto-exposure

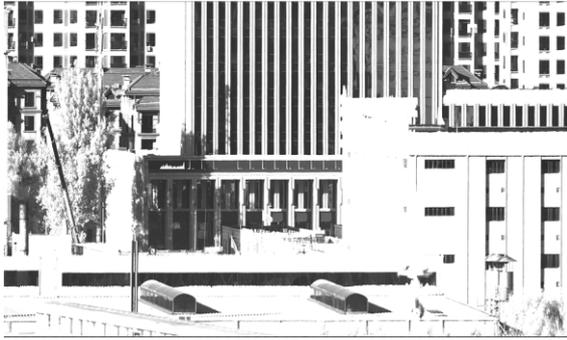


图10 自适应调光后外景图像

Fig. 10 Actual scene image after auto-exposure

参考文献:

- [1] 王赤,张贤国,徐欣锋,等. 中国月球及深空空间环境探测[J]. 深空探测学报, 2019, 6(2): 105-118.
WANG C, ZHANG X G, XU X F, *et al.* The lunar and deep space environment exploration in China [J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, 6(2): 105-118. (in Chinese)
- [2] 李帅,徐抒岩,刘栋斌,等. 高信噪比云与气溶胶探测仪成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(11): 316-323.
LI S, XU S Y, LIU D B, *et al.* Design of imaging system of cloud and aerosol polarization imager with high signal-to-noise ratio[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(11): 316-323. (in Chinese)
- [3] 郑亮亮,金光,曲宏松,等. 高信噪比星载CCD成像电路系统[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2027-2036.
ZHENG L L, JIN G, QU H S, *et al.* Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2027-2036. (in Chinese)
- [4] 李进,金龙旭,韩双丽,等. 大视场遥感相机的时间延迟积分电荷耦合器件测试系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2415-2423.
LI J, JIN L X, HAN S L, *et al.* Test system for time-delayed integration charge coupled device of remote camera with wide field of view [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2415-2423. (in Chinese)
- [5] 孙振亚,刘栋斌,方伟,等. 高密度模块化TDI CCD成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2018,

7 结 论

我国首次火星探测任务天问一号上的高分相机,为获取高质量图像数据,针对火表复杂照度,提出了基于TDI CCD推扫成像与CMOS凝视成像自动调光成像电路设计,并提出了基于FPGA的自动调光算法。在实验室利用积分球对自动调光功能进行了验证,在外场试验中,对实际景物进行自动调光前后对比拍摄。结果表明,自动调光成像效果良好,具备较好的场景适应能力,满足火表复杂照度下自动调光成像需求。

- 47(6): 164-171.
SUN Z Y, LIU D B, FANG W, *et al.* Design of high density modularity TDI CCD imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 164-171. (in Chinese)
- [6] 张恒,马庆军,王淑荣. 紫外遥感仪器高速CMOS成像电子学系统[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 471-479.
ZHANG H, MA Q J, WANG S R. High speed CMOS imaging electronics system for ultraviolet remote sensing instrument [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2): 471-479. (in Chinese)
- [7] 宁永慧,刘辉,赵庆磊,等. 大面阵高帧频CMOS成像电子学系统设计[J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1167-1177.
NING Y H, LIU H, ZHAO Q L, *et al.* High-frame frequency imaging system of large area CMOS image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2019, 27(5): 1167-1177. (in Chinese)
- [8] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级TDICCD相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [9] 袁航飞. 航天相机星上自适应调光研究[D]. 北京:中国科学院,2016.
YUAN H F. *Research on Automatic Adaptive Exposure for Space-borne Remote Sensing Camera* [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2016. (in Chinese)
- [10] 黄辉,周进. 基于现场可编程门阵列的CCD相机

自动调光[J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 426-433.

HUANG H, ZHOU J. Auto-exposure for CCD camera based on FPGA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(2): 426-433. (in Chinese)

[11] 关澈, 王延杰. CCD相机实时自动调光系统[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 358-366.

GUAN C, WANG Y J. Real-time auto light control system of CCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 358-366. (in Chinese)

作者简介:



黄敬涛(1988—),男,吉林通化人,硕士,助理研究员,2013年于吉林大学获得硕士学位,主要从事空间光电探测方面研究。E-mail: 3511643@163.com