

doi: 10.3788/gzxb20164508.0822003

空间相机自适应曝光

曹旗磊,董丽丽,赵明,许文海,李瑛

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘 要:为实现空间相机的自适应曝光,提出了一种根据场景高亮度信息设置曝光参量的测光、解算、成像工作模式.在空间相机前加装大尺度面阵测光相机,在空间相机推扫某一区域前,测光相机首先采用预设的曝光参量获取该区域图像,实测当前区域的高亮度信息;再将该高亮度设为空间相机的饱和亮度,解算空间相机的曝光参量;随着卫星的转动,空间相机采用该曝光参量完成位置区域拍摄成像,实现空间相机的自适应曝光.地面验证实验结果表明:与采用固定的较小的曝光参量相比,本文方法可以减小欠曝光图像数量;根据某次实验结果统计,图像的灰度范围由 37 提高到 253,图像熵显著提高.该方法能够根据当前场景内容充分利用成像系统的动态范围并提高图像的灰度层次和图像质量.

关键词:空间相机;测光相机;动态范围匹配;曝光调整

中图分类号:V445.8

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)08-0822003-6

Adaptive Exposure of Space Camera

CAO Qi-lei, DONG Li-li, ZHAO Ming, XU Wen-hai, LI Ying

(Information Science and Technology College, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China)

Abstract: In order to realize the adaptive exposure of the space camera, this paper proposes a method for adaptively configuring exposure parameters according to the highest luminance information of scene, which is realized by metering, calculating and imaging, successively. A large-scale array camera for light metering is installed besides the space camera. First, before the space camera is push-broom imaging a certain area, the image of this area can be obtained by metering camera with preset exposure parameters in advance, and the highest luminance information of this area can be measured. Then, exposure parameters of the space camera can be calculated by setting the highest luminance information measured before as the saturation luminance of the space camera. Finally, when the space camera focuses on this area after orbiting to a certain extent, the space camera could realize adaptive exposure by adopting exposure parameters calculated previously. Ground experiment results show that, compared with the method of using fixed small exposure parameters, the proposed method can reduce the number of underexposed images. According to statistical results, the gray range of images is enlarged from 37 up to 253, and the image entropy also increases significantly. This method can adequately make use of the dynamic range of imaging system according to the current scene, improving the gray range and quality of the image.

Key words: Space camera; Metering system; Dynamic range match; Exposure adjustment

OCIS Codes: 220.1080; 220.4830; 280.4788; 040.1490; 040.1520; 110.2970

0 引言

空间相机绕地球拍摄时,场景会由海洋变为陆地,

由城镇变为沙漠,天气情况也会由晴天变为阴天,地面景物反射率可能从 0.05 左右变为 0.8 左右,变化非常大.而随着太阳高度角等条件的变化,入瞳处的辐射亮

基金项目:国家科技支撑计划(No. 2014BAB12B03)和中央高校基本科研业务经费(No. 3132016209)资助

第一作者:曹旗磊(1989-),女,博士研究生,主要研究方向为光电信息检测与处理. Email: caoqilei_2013@163.com

通讯作者:董丽丽(1980-),女,副教授,博士,主要研究方向为光电信息与光电检测等. Email: dll_lili@163.com

导师:许文海(1956-),男,教授,博士,主要研究方向为光电信息检测与处理. Email: whxu@dlmu.edu.cn

收稿日期:2016-02-23;录用日期:2016-04-06

<http://www.photon.ac.cn>

度变化范围也很大,为避免图像饱和,空间相机的曝光控制主要依靠先验知识,采用较小的固定增益和积分级数,这会使有些图像曝光合适,而有的图像信息集中在低灰度区,图像整体偏暗、细节丢失严重^[1-2]。

目前普通数码相机的自动曝光控制^[3-7]主要是通过增加感兴趣区域权重,比较图像的加权亮度均值与预先设定的参考值。空间相机单次推扫所得图像不可重复,不能预先获得场景信息,成像目标丰富,很难区分感兴趣区域,所以普通数码相机的调光算法不适用于空间相机。

近年来,许多学者对空间相机的曝光控制问题进行了研究,例如,北京空间机电研究所的彭妮娜^[8]等提出了一种基于线阵时间延迟积分(Time Delay Integration, TDI)相机的实时自动增益控制算法,该方法设定图像灰度均值的上限值、图像灰度均值的下限值、图像灰度范围的下限值和图像中饱和点的数量四个阈值,通过统计图像中相关参量与设定值比较来调整曝光参量。该方法中阈值的选择对算法有很大的影响,而且该方法是对前一时刻的图像做的统计,得到的曝光参量未必适用于下一时刻的地物目标,或达不到调整目的。长春光机所的薛旭成^[9]等指出信噪比(Signal Noise Ratio, SNR)会随着积分级数的增加而增加,但调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)会随着积分级数的增加而降低,所以将 $SNR \cdot MTF$ 作为图像质量的评价指标,对积分级数和增益设置进行了优化,该方法未考虑场景的灰度分布。长春光机所的武星星^[10]等提出了一种基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整方法,该方法入瞳辐射亮度是基于晴朗天气计算的,未考虑大气成分的变化,并且假设场景中一直存在最大反射率点。长春光机所的李宪圣^[11]等提出了空间相机在轨成像模式的概念,研究了建立空间相机成像模式的方法,但也未能根据场景内容充分利用相机动态范围。

本文采用测光、解算、推扫的工作模式,提出了一种基于实测的场景高辐射亮度点的空间相机曝光参量的调整方法,以充分利用相机的动态范围。

1 测光方法

为了预先获得场景入瞳辐射亮度,在星上安装测光相机,实测场景区域入瞳辐射亮度,根据实测入瞳辐射亮度来解算曝光参量,从而实现空间相机自适应曝光。其原理如图 1。

在空间相机推扫某一成像区域前,测光相机率先采用预先设定的较小的曝光参量获取该成像区域图像,如图中方框所示;通过图像,可解算出该成像区域的最高入瞳辐射亮度;为了避免图像饱和并尽可能利用相机的动态范围,将实测的最高辐射亮度点设置为

饱和辐射亮度,以此解算空间相机的积分级数和增益。在空间相机推扫此场景时,采用解算的积分级数和增益,从而实现空间相机的自适应曝光。

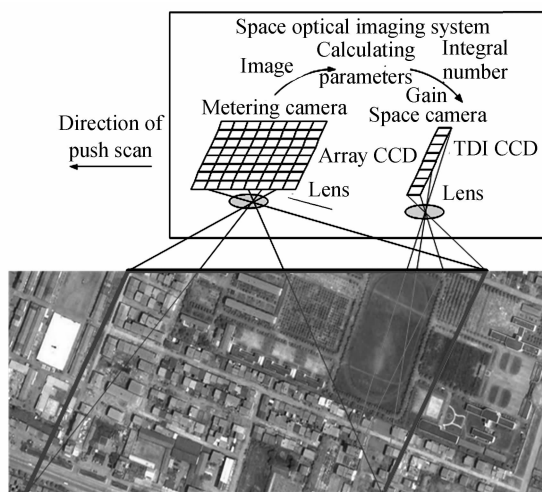


图 1 空间成像系统原理

Fig. 1 Schematic diagram of space imaging system

测光相机需要满足饱和辐射亮度的要求,即当相机入瞳辐射亮度小于饱和辐射亮度时输出的图像不能饱和。本文提到的预先设定的较小的曝光参量是根据用户要求的饱和辐射亮度和相机响应度来设置的^[11]。饱和辐射亮度由用户要求的最大反射率和可能的最佳光照条件通过 MODTRAN 软件计算得到。

2 自适应曝光方法

本文提出的自适应曝光方法的基本思想是充分利用相机动态范围,尽可能多地获取场景信息。当场景中高辐射亮度小于饱和辐射亮度时,饱和辐射亮度不再是用户要求的最大辐射亮度,而是根据场景中的高辐射亮度来设定,以此充分利用相机动态范围,实现空间相机的自动曝光。

测光相机为面阵相机,测光相机在 t_1 时刻通过某一场景时,采用预先设定的较小的曝光参量获取场景图像。随着卫星转动,空间相机在 t_2 时刻也会通过同一场景, t_1 和 t_2 时间间隔很短,认为入瞳处辐射亮度没有发生变化。这样,通过测光相机获得的图像,空间相机可以预先获得场景入瞳辐射度信息,根据场景高辐射亮度信息自适应调整曝光参量,具体过程如图 2。

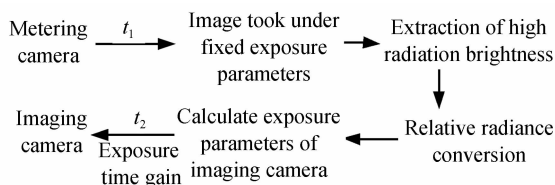


图 2 自适应调整曝光参量示意图

Fig. 2 Block diagram of adaptive adjustment exposure parameters

自动曝光控制主要由场景高辐射亮度提取、传感器相对辐亮度转换和曝光参量解算三部分构成。

2.1 场景高辐射亮度提取

图像灰度 V 与入瞳处辐射亮度 L 的关系^[12-16]为

$$V = L \times \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{D}{f}\right)^2 \times \tau_0 \times R_{\text{CCD}} \times g \times t + o_v \quad (1)$$

式中, D/f 为光学系统的相对孔径, τ_0 为光学系统的总透过率, R_{CCD} 为 CCD 焦平面探测器的响应度, g 为模拟前端中可变增益放大器的增益, t 为积分时间, o_v 是根据 g 变化的直流偏置, 属于噪声项, 相对于第一项来说值很小, 舍去之后, 设 $g_t = \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \tau_0 \times R_{\text{CCD}}$, 则

式(1)转为

$$V = g_t \times L \times \left(\frac{1}{f}\right)^2 \times g \times t \quad (2)$$

由于 g_t 的计算相对复杂, 而且当成像系统确定后, g_t 为定值, 因此在应用中不需要计算出 g_t 的值, 所以定义传感器相对辐亮度 L_r 为

$$L_r = g_t \times L = \frac{V}{t \times g} \times f^2 \quad (3)$$

根据式(3)可知, 传感器相对辐亮度 L_r 与图像像素灰度值 V 的关系与曝光时间、增益和焦距有关。

由于测光相机采用的是饱和辐亮度计算的曝光参量, 所以可确定场景的最高相对辐亮度。为了避免噪声点的干扰, 需要排除噪声点的干扰: 规定在行方向上连续 3 点以上的灰度值相差小于 5 的像素点才确定有效, 而将那些 3 个像素以下的可疑最值点认定为噪声^[8], 这样就可以有效地抑制噪声, 从而更好地利用有效灰度空间。

2.2 传感器相对辐亮度换算

测光相机测得场景高亮度信息后, 由于测光相机与成像相机使用的传感器不同, 为了确定成像系统的最大相对辐亮度, 要对两个系统的响应进行换算。

虽然测光与成像相机不同, 但对于同一个场景, 入瞳辐亮度是一致的。设 L_{r2} 为成像相机的相对辐亮度值, g_{r2} 为成像相机的特征增益, L_{r1} 为测光相机的相对辐亮度值, g_{r1} 为测光相机的特征增益, 则相对辐亮度的换算方法为

$$L_{r2} = \frac{g_{r2}}{g_{r1}} \cdot L_{r1} \quad (4)$$

测光相机和成像相机采用相同的积分时间、增益和焦距在同一位置对同一亮度物体进行成像, 可得

$$g_{r1}/g_{r2} = V_1/V_2 \quad (5)$$

式中, g_{r1} 为测光相机的特征增益, g_{r2} 为成像相机的特征增益, V_1 为测光相机的灰度值, V_2 为成像相机的灰度值。

2.3 曝光参量解算

曝光参量解算是采用高亮度匹配方法, 即根据当

前场景的最高辐射亮度确定饱和辐射亮度, 使场景动态范围尽可能大的分布于成像系统动态范围上, 充分利用相机动态范围。

由式(3)可计算得到饱和辐亮度情况下成像系统的曝光时间与增益的乘积为

$$t \cdot g = \frac{V_{\text{sat}}}{L_{\text{rmax}}} \times f^2 \quad (6)$$

式中, t 为曝光时间, g 为模拟前端(Active Front End, AFE)中可变增益放大器(Video Graphics Array, VGA)的增益, V_{sat} 为相机饱和数字量化值, 如采用 10 bit 量化, 饱和数字量化值为 1 023, L_{rmax} 为场景中最高相对辐亮度。

对于 TDI CCD 来说, 增加 TDI 级数等效于增加积分时间。在卫星姿态准确度和稳定度一定的情况下, 信噪比和 MTF 不会随着增益的改变而变化, 而 MTF 随着 TDI 级数的增加而下降, 信噪比随着 TDI 级数的增加而增加^[10]。根据需求的 MTF 最小值可确定出 TDI 最大级数, 将此级数作为 TDI 级数的上限, 以保证系统需求。在调整时, 由于增加 TDI 级数会提高信噪比, 因此优先调整 TDI 级数, 当 TDI 级数大于上限时, 再调整增益。

3 实验系统

3.1 地面验证系统

为了模拟空间相机对地成像过程, 本文搭建了地面验证系统, 利用高准确度云台搭载测光相机与成像相机, 通过精确控制测光相机和成像相机成像的时间间隔, 对同一目标场景进行测光与拍照。

地面验证系统结构如图 3。

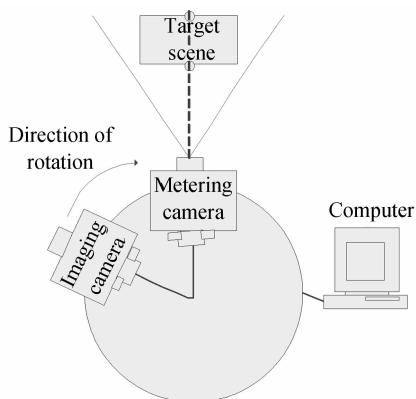


图 3 地面验证系统结构

Fig. 3 Configuration diagram of ground verification system

地面验证系统主要包括高准确度云台、二维调节座、测光相机和成像相机。通过设置高准确度云台的预置位, 使测光相机能够先获取目标场景。测光相机和成像相机之间有一定角度, 角度与转台的运行速度和测光时间相关。测光相机和成像相机下还有二维调节座, 可以微调相机的横滚角和俯仰角, 以便于对同一景物

进行拍摄. 由于增加积分级数和增加积分时间是等效的, 所以通过控制相机积分时间模拟不同的 TDI 积分级数. 本系统中高精度云台为亚安变速智能云台 YS3051, 水平旋转速度在 $0.01^{\circ} \sim 60^{\circ}/s$ 可调, 最大承重为 15.5 kg. 测光相机和成像相机均为德国 XIMEA 相机, 传感器型号为 CMV4000ES-3E5M1PP, 镜头为 24~120 mm 五倍变焦的尼康镜头, 测光相机的焦距为 24 mm, 成像相机的焦距为 120 mm, 像元尺寸为 $5.5 \times 5.5 \mu\text{m}$, 分辨率为 2048×2048 .

测光相机拍摄的场景比成像相机大, 有多余的场景信息, 在计算时只计算下一个成像相机拍摄位置区域内测光相机的场景最高相对辐亮度, 以提高准确度.

地面验证系统实物如图 4.



图 4 地面验证系统实验装置

Fig. 4 Experiment device of ground verification system

3.2 标定系统

测光相机与成像相机的标定是自适应曝光参量调整的重要依据, 标定系统如图 5.

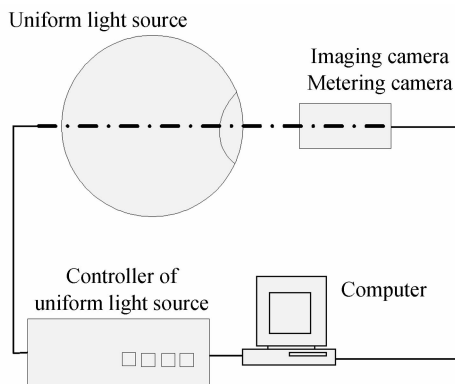


图 5 标定系统组成示意图

Fig. 5 Sketch of the calibration system

标定系统由均匀光源控制器、均匀光源、测光相机、成像相机和计算机组成. 标定实验系统实物如图 6.

标定过程由积分球和光学直线导轨组成, 在积分球发出均匀光亮度不变的情况下, 分别使用测光相机和成像相机在相同焦距、相同距离下成像. 由此可计算出成像系统间特征增益系数的比值.

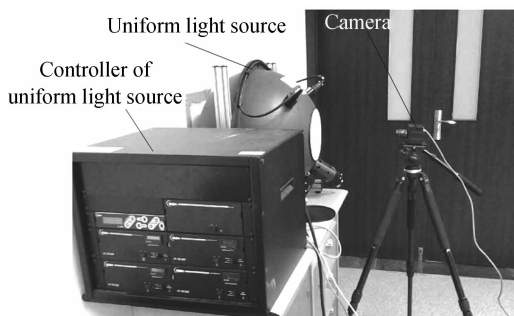


图 6 相机标定实验装置

Fig. 6 Experiment device of two camera calibration

4 实验结果及分析

为了验证本文方法的有效性, 进行了地面验证实验.

地面验证系统采用两种工作模式: 一是按照预先设定的曝光参量对目标场景成像; 二是采用测光、解算、成像的工作模式. 采用测光、解算、成像的工作模式时, 地面验证系统要先设定云台预置位, 使测光相机对准目标场景, 测光相机获取目标场景图像, 统计目标场景最高相对辐亮度并解算曝光参量, 成像相机采用该曝光参量成像.

分别采用预先设定的较小的曝光参量和本文的调整方法对不同的场景进行实验, 获得实验图像, 对各种场景的实验图像进行统计, 统计结果如表 1.

表 1 各场景图像曝光统计结果

Table 1 Statistics results of each scene image exposure

	Underexposure	Normal exposure
Fixed exposure	54	36
After adjustment	0	100

表 1 中的欠曝光是指相机动态范围利用率低于 50%. 从表 1 可以看出, 采用预先设定的较小的曝光参量时, 由于场景辐射亮度变化大, 有的图像曝光合适, 而有的图像欠曝光, 相机动态范围未得到充分利用, 经本文方法调整后, 欠曝光图像的数量明显较少.

图 7 为采用预先设定的较小的曝光参量和经本文方法调整后的图像. 表 2 为图 7 图像数据的统计结果. 图 7(a) 为预设曝光参量下获得的欠曝光图像, 图像的最大灰度值为 39, 灰度均值为 10.223, 灰度级为 37, 图像熵为 3.8260; 图 7(b) 为预设曝光参量下获得的正常曝光图像, 图像的最大灰度值为 251, 灰度均值为 28.27, 灰度级为 249, 图像熵为 5.1737; 图 7(c) 为欠曝光图像调整曝光后图像, 图像的最大灰度值为 255, 灰度均值为 54.851, 灰度级为 253, 图像熵为 6.1362; 图 7(d) 为正常曝光图像调节曝光参量后图像, 图像的最大灰度值为 255, 灰度均值为 39.595, 灰度级为 253, 图像熵为 5.6739.

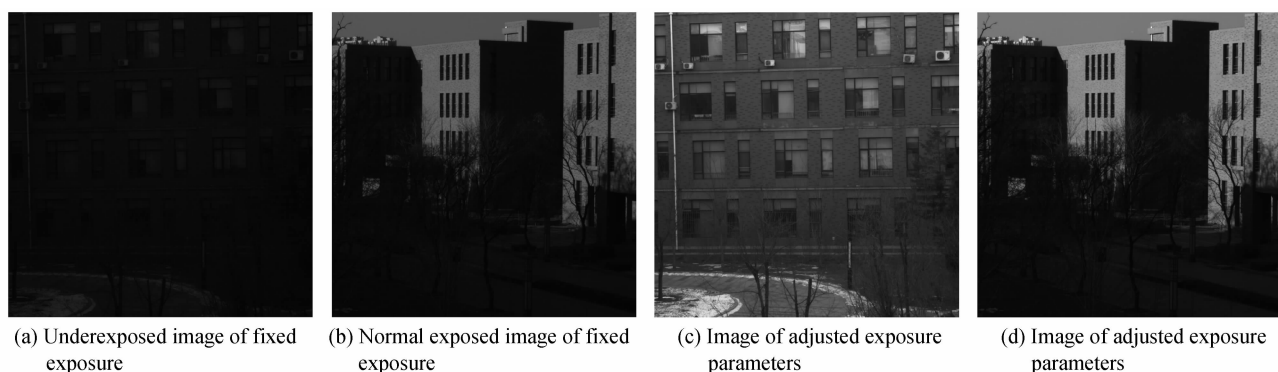


图7 实验结果

Fig.7 Results of imaging experiment

表2 图像统计结果

Table 2 Statistic results of image digital numbers

Statistic results of image	Max	Min	Mean	Gray level	Comentropy
Under exposed image by fixed exposure	39	2	10.223	37	3.826 0
Normal exposed image by fixed exposure	251	2	28.270	249	5.173 7
Under exposed image after adjustment	255	2	54.851	253	6.136 2
Normal exposed image after adjustment	255	2	39.595	253	5.673 9

从实验结果可以看出,采用预先设定的固定曝光参量时,有的图像正常曝光,而有的图像信息集中在低灰度区,细节丢失严重.而采用本文方法调整曝光参量后,图像灰度层次更加丰富,相机动态范围得到有效利用.

5 可行性分析

航天相机的重量是一个重要指标,若要将该系统应用于星上,测光相机的重量相对于空间相机来说要足够小,测光相机的作用是进行场景信息测量,因此不需要很高的分辨率,地面分辨率可以大一些.故可以采用较小的焦距,减轻测光相机的体积和重量.测光相机的具体焦距确定还需要进行场景统计分析才能确定.

某型号空间相机轨道高度 500 km^[16],在地心坐标系中的星下点速度为 7.06 km/s,在推扫方向上以 10 km 为一个推扫单位,一个单位图像的推扫时间为 1.416 s.本文提出的算法从测光相机拍照到解算出测光时间可在 0.75s 内实现,因此可以应用于卫星的对地拍摄.

6 结论

本文提出一种基于实测高辐射亮度点的空间相机自动曝光方法.在空间相机前安装测光相机,确定当前场景最高亮度,将场景最高亮度作为饱和辐射亮度,根据场景内容充分利用相机的动态范围,提高了图像质量.搭建了地面验证系统并验证了本设计方法的可行性.实验结果表明,与采用预先设定的较小的曝光参量方法相比,该方法减小了欠曝光图像的数量;对实验中欠曝光图像的统计,灰度范围由 37 提高到 253,图像信

息熵提高,相机动态范围得到了充分利用.

参考文献

- [1] LI Zhi-yong, YANG Xiao-jun. Consideration on designing of dynamic range for TDI CCD camera on remote sensing satellite [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011, **32**(1): 24-27.
李智勇, 杨校军. 关于遥感卫星 TDICCD 相机动态范围设计的思考[J]. *航天返回与遥感*, 2011, **32**(1): 24-27.
- [2] HE Hong-yan, WANG Xiao-yong, FU Xing-ke. Study on the designing of the dynamic range of remote satellite's CCD camera [J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2008, **29**(1): 39-42.
何红艳, 王小勇, 付兴科. 遥感卫星 CCD 相机的动态范围设计考虑[J]. *航天返回与遥感*, 2008, **29**(1): 39-42.
- [3] YANG Zuo-ting, RUAN Ping, ZHAI Bo. Auto-exposure algorithm for scenes with high dynamic range based on image entropy [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 742-746.
杨作廷, 阮萍, 翟波. 基于图像熵的高动态范围场景的自动曝光算法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(6): 742-746.
- [4] YANG Hai-tao, CHANG Yi-lin, WANG Jin, et al. A new automatic exposure algorithm for video cameras using luminance histogram [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **36**(5): 841-847.
杨海涛, 常义林, 王静, 等. 一种基于亮度直方图的自动曝光控制方法[J]. *光学学报*, 2007, **36**(5): 841-847.
- [5] SU Hong-wu, YANG Xiao-jun, LI Zhe, et al. The auto light control system based on the average and maximum gray scale [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(1): 158-160.
苏宏武, 杨小君, 李哲, 等. 基于平均和峰值灰度加权的自动调光系统[J]. *光子学报*, 2006, **35**(1): 158-160.
- [6] HUANG Hui, ZHOU Jin. Auto-exposure for CCD camera based on FPGA [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(2): 426-433.
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.
- [7] RAHMAN M T, KEHTARNAVAZ N, RAZLIGHI Q R. Using image entropy maximum for auto exposure [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2011, **20**(1): 013007.

- [8] PENG Ni-na, CHEN Da-yu, WANG Kun, *et al.* Realtime automatic gain control algorithm based on linear TDI CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(7): 1370-1375.
彭妮娜, 陈大羽, 王琨, 等. 采用线阵 TDICCD 相机的实时自动增益控制算法[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(7): 1370-1375.
- [9] XUE Xu-cheng, SHI Jun-xia, LU Heng-yi, *et al.* Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(4): 857-863.
薛旭成, 石俊霞, 吕恒毅, 等. 空间遥感相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(4): 857-863.
- [10] WU Xin-xin, LIU Jin-guo, ZHOU Huai-de, *et al.* Automatic on-orbit adjusting gains of space camera based on lighting conditions[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, **34**(3): 283-289.
武星星, 刘金国, 周怀得, 等. 基于光照条件的空间相机增益在轨自动调整[J]. *光学学报*, 2014, **34**(3): 283-289.
- [11] LI Xian-sheng, REN Jian-yue, REN Jian-wei, *et al.* Establishment of image model for on-board space camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(7): 1852-1858.
李宪圣, 任建岳, 任建伟, 等. 空间相机在轨成像模式的建立[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(7): 1852-1858.
- [12] QIN Li, DONG Li-li, XU Wen-hai, *et al.* Method for conversion calibration between CCD image gray value and illumination[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, **36**(3): 639-644.
秦莉, 董丽丽, 许文海, 等. CCD 图像灰度与照度的转换标定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, **36**(3): 639-644.
- [13] TANG Hao. Research on matching method of dynamic range of scene and imaging system[D]. Dalian Maritime University, 2014.
唐昊. 成像系统与场景动态范围匹配的方法研究[D]. 大连海事大学, 2014.
- [14] REN Jian-wei, WAN Zhi, LI Xian-sheng, *et al.* Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, **15**(8): 1886-1190.
任建伟, 万志, 李宪圣, 等. 空间光学传感器的辐射传递特性校正方法[J]. *光学精密工程*, 2007, **15**(8): 1186-1190.
- [15] XIU Ji-hong, HUANG Pu, LI Jun, *et al.* Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, **20**(6): 1365-1373.
修吉宏, 黄浦, 李军, 等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. *光学精密工程*, 2012, **20**(6): 1365-1373.
- [16] MENG Xi-xi, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai, *et al.* Method to realize autofocus of remote sensing camera based on the TDI pattern of interline transfer progressive scan CCD[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(11): 284-290.
孟希羲, 冯华君, 徐之海, 等. 基于面阵 CCD 的时间延时积分模式的自动对焦[J]. *光学学报*, 2011, **31**(11): 284-29.