

# 航天遥感相机及参数优化方法

曹旗磊, 赵明, 董丽丽, 张明波, 许文海

大连海事大学信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026

**摘要** 为提高遥感图像质量,对航天遥感相机系统进行了优化,并提出一种航天遥感相机参数优化方法。在航天遥感相机中设计动态钳位电压值并在航天遥感相机前加装大尺度面阵测光相机,在航天遥感相机推扫某一区域前,测光相机通过低曝光参数和高曝光参数获取该区域图像,实测当前区域的高辐射亮度和低辐射亮度。将高辐射亮度与低辐射亮度的差值设为航天遥感相机的饱和亮度,解算航天遥感相机的曝光参数,并将实测低辐射亮度值设置为钳位电压值。随着卫星的转动,航天遥感相机采用上述曝光参数和钳位电压值完成该位置区域的成像,实现航天遥感相机参数自动调整。地面验证实验表明,通过优化航天遥感相机系统,可在成像前去除大气对灰度层次的影响,提高图像辐射分辨率。根据实验结果统计,图像的灰阶范围可提高 80.7%,图像熵显著提升。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,提高图像的灰度层次和图像质量。

**关键词** 遥感; 航天遥感相机优化; 互补金属氧化物半导体; 测光相机; 参数调整; 大气程辐射去除

**中图分类号** V445.8 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.032802

## Optimization of Remote Sensing Camera and Its Parameters

Cao Qilei, Zhao Ming, Dong Lili, Zhang Mingbo, Xu Wenhai

School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

**Abstract** A method for optimizing the space camera system and its parameters is proposed in order to improve the quality of remote sensing images. First, a clamp voltage value is set in the space camera and a largescale array camera for light metering is installed besides the space camera. The image of a certain area can be obtained by metering camera with low and high exposure parameters before the space camera scans this area by the pushbroom mode, and the lowest and the highest luminance information of this area can be measured. Then, exposure parameters of the space camera can be calculated by setting the difference between the highest and the lowest luminance measured as the saturation luminance of the space camera. The value of clamp voltage is set according to the lowest measured luminance. Finally, when the space camera focuses on this area after orbiting to an appropriate position, the space camera images the area with the exposure parameters and the clamp voltage above, and thus the adaptive adjustment of the space camera parameters is realized. Ground experiment results show that the influence of atmosphere on the gray level is removed before imaging and the radiation resolution of the image is improved by optimizing the space camera system. According to the statistical results, the gray range of images increases by 80.7%, and the image entropy also increases significantly. This method makes use of the dynamic range of the imaging system sufficiently based on the current scene, and improves gray level and image quality of the image.

**Key words** remote sensing; optimization of remote sensing camera; complementary metal-oxide-semiconductor transistor; metering camera; parameter adjustment; removal of atmospheric radiation

**OCIS codes** 280.4788; 10.5200; 040.1490; 040.1520; 110.2970

**收稿日期:** 2016-11-03; **收到修改稿日期:** 2016-11-23

**基金项目:** 国家科技支撑计划(2014BAB12B03)、中央高校基本科研业务经费(3132016209, 3132016351)、交通运输部建设科技项目(2014328204050)

**作者简介:** 曹旗磊(1989—),女,博士研究生,主要从事光电信息检测与处理方面的研究。

E-mail: caoqilei\_2013@163.com

**导师简介:** 许文海(1956—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电信息检测与处理等方面的研究。

E-mail: whxu@dlnu.edu.cn

## 1 引言

时间延迟积分(TDI)电荷耦合元件(CCD)能够增加对同一景物的曝光次数,提高像元感光能力,目前航天遥感相机多采用 CCD。航天遥感相机为避免图像饱和,其曝光控制主要依靠先验知识,采用固定增益和积分级数,但太阳高度角、地球表面的地物属性和大气状况的不断变化,会使有的图像曝光合适,而有的图像信息集中在低灰度区,图像存在整体偏暗、细节丢失严重等问题<sup>[1-5]</sup>,所以自适应调整航天遥感相机参数是改善航天遥感相机成像质量的重要方式。

目前针对航天遥感相机的曝光控制方法主要有两种。一种是在摄影过程中对获取的图像数据或成像传感器输出的模拟电压进行统计分析之后对增益进行调整。此方法是对前一时刻的图像进行统计,得到的曝光参数未必适用于下一时刻的地物目标,因而达不到调整目的。另一种方法是基于晴朗天气并且假设场景中一直存在最大反射率点,根据太阳高度角预先估算入瞳辐亮度,对曝光参数进行调整。该方法未考虑天气情况的变化和地物反射率的变化,调整曝光参数后,获取的图像仍存在低端量化信息不能利用的问题。这是由于航天遥感相机的轨道高度大于 240 km,成像距离远,航天遥感相机探测器获得的辐射信号包括地表目标辐射信号和大气辐射信号。大气辐射信号是与地物目标无关的量,会使入瞳能量增加,影响曝光参数选取和成像质量,而目前的航天遥感相机在成像时均未考虑大气辐射信号的影响。

何红艳等<sup>[6-7]</sup>提出设计遥感相机时,需要考虑大气对遥感图像品质的影响;李智勇等<sup>[8]</sup>提出了使航天遥感相机较窄的相机动态范围可在较大的输入辐亮度范围内滑动的建议。

基于此,本文对航天遥感相机系统进行优化,在航天遥感相机模拟电路中设计动态钳位电压值,在成像前除去大气程辐射对灰度层次的影响。并提出一种航天遥感相机参数优化方法,以获取最佳成像质量。

## 2 航天遥感相机优化原理

航天遥感相机信号处理的优化流程<sup>[9]</sup>如图 1 所示。当光线照射到成像系统的焦平面时,CCD 传感器将光信号转换为电信号,输出模拟电压形式的视频信号,视频信号再被送入视频处理电路进一步处理。视频信号经过相关双采样(CDS)处理后,便可获得有效的视频电压信号。钳位电压值是根据大气辐射信号设定的电压值,将视频电压信号与钳位电压值经过减法器相减,可得到地物目标场景的电压值,将其通过可编程增益放大器(PGA)被放大  $g_{ad}$  倍,然后通过模数转换器(ADC),最终输出数字图像信号。

相机入瞳处辐射亮度为

$$L = \frac{E \times \rho \times \tau}{\pi} + L_{\text{path}}, \quad (1)$$

式中  $E$  为太阳光和天空背景光到达地面的辐射照度; $\rho$  为地物目标的反射率; $\tau$  为大气透射率; $L_{\text{path}}$  为大气程辐射,只与大气状况和观测几何条件有关,与地表目标信息无关。

相机焦平面处辐照量为

$$E = \frac{\pi}{4F^2} \times L \times \tau_0 \times t, \quad (2)$$

式中  $F$  为光学系统的相对孔径, $\tau_0$  为光学系统的总透射率, $t$  为积分时间。

相机信号输出电压为

$$V_s = E \times R_{\text{CCD}}, \quad (3)$$

式中  $R_{\text{CCD}}$  为 CCD 焦平面探测器的响应度,

$$R_{\text{CCD}} = M \times \mu_{\text{CCE}} \times \frac{\lambda \eta A}{hc}, \quad (4)$$

式中  $M$  为相机的积分级数, $\mu_{\text{CCE}}$  为 CCD 的电荷转换因子, $\lambda$  为波长, $\eta$  为量子效率, $A$  为像元面积, $h$  为普朗克函数, $c$  为光速。

经过减法器后的电压值为

$$V = V_s - V_{\text{set}}, \quad (5)$$

式中  $V_{\text{set}}$  为可设定的动态钳位电压值。相机数字量输出为

$$V_{DN} = \frac{V \times g_{ad} \times 2^n}{V_{sat}}, \quad (6)$$

式中  $n$  为量化位数,  $g_{ad}$  为模拟增益,  $V_{sat}$  为 ADC 的饱和电压值。由(1)~(6)式可知,大气程辐射参与成像时,会使入瞳能量偏大,图像容易饱和,并使相机低端量化信息不能利用,辐射分辨率变小。通过调整钳位电压值,采用更高的积分级数和模拟增益,可以除去模拟域的大气程辐射影响,从而获取高辐射分辨率图像。

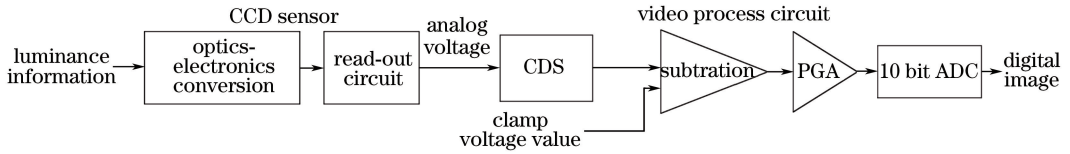


图 1 CCD 成像系统信号处理流程

Fig. 1 Signal processing flow of CCD imaging system

### 3 测光方法

为了合理设置钳位电压值  $V_{set}$ 、积分级数  $M$  和增益  $g_{ad}$ ,在卫星上安装互补金属氧化物半导体(CMOS)测光相机,预先获得场景入瞳辐射亮度。空间系统成像原理如图 2 所示。CMOS 测光相机与航天遥感相机之间有一定的预置角度,在航天遥感相机推扫某一区域前(图 2 中红框所示),可实测场景区域入瞳辐射亮度,以此解算航天遥感相机的钳位电压值、积分级数和增益。在航天遥感相机推扫此场景时,采用解算得到的钳位电压值、积分级数和增益,实现航天遥感相机的自适应曝光。

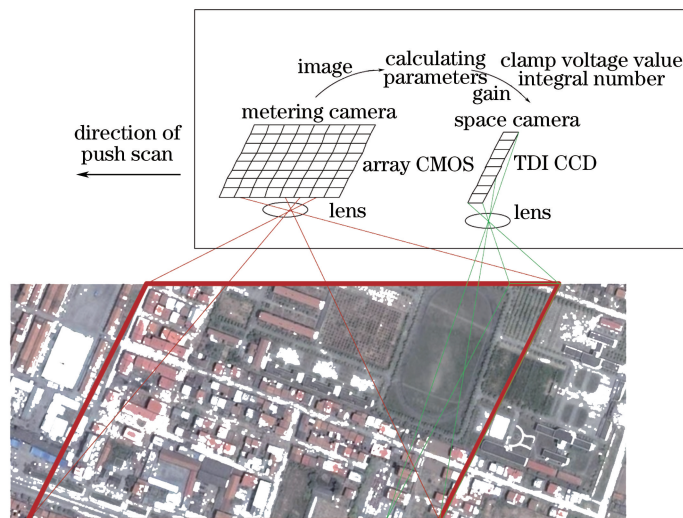


图 2 空间成像系统原理

Fig. 2 Schematic of space imaging system

某型号航天遥感相机轨道高度<sup>[10]</sup>为 500 km,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。在上述时间内能够利用 CMOS 测光相机完成对目标场景的曝光特征统计,则 CMOS 测光相机就能为空间动态钳位相机提供合理的调光参数,实现航天遥感相机的自适应调光。

CMOS 测光相机的预置角度为

$$\theta = \arctan(d/H), \quad (7)$$

式中  $H$  为航天遥感相机轨道高度,  $d$  为一个推扫单位的距离。由(7)式可知,要预先获取 10 km 场景的内容时,CMOS 测光相机的预置角度为  $1.146^\circ$ 。

图 3 为利用 CMOS 图像获取目标场景的过程。在航天遥感相机推扫某一成像区域前,可改变 CMOS 测光相机的开窗位置实现对同一目标场景的多次成像。

开窗位置根据帧与帧之间的像移确定。帧与帧之间的像移为

$$P_i = \frac{t_i \nu f}{h_0 a}, \tag{8}$$

式中  $t_i$  为第  $i+1$  帧与第  $i$  帧之间的时间间隔,  $\nu$  为地心坐标系中的星下点速度,  $f$  为镜头焦距,  $h_0$  为被摄物体至镜头的距离,  $a$  为像元之间的距离。

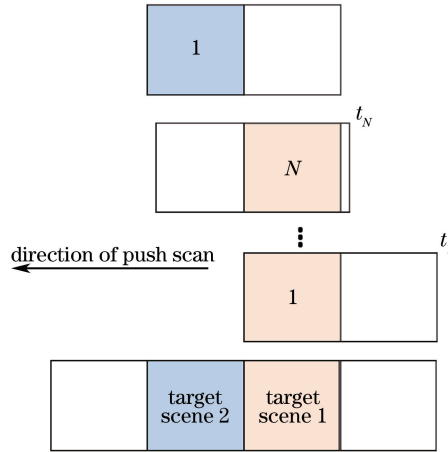


图 3 利用 CMOS 图像获取目标场景的过程

Fig. 3 Process of obtaining target scene with CMOS images

### 4 航天遥感相机参数优化方法

优化后航天遥感相机需要调整的参数是钳位电压值、积分级数和增益。航天遥感相机参数自动调整过程如图 4 所示。在航天遥感相机推扫某一成像区域前, CMOS 测光相机率先采用低曝光参数和高曝光参数获取该区域图像; 对低曝光参数下获取的图像进行云判处理, 并统计非厚云区域的高辐射亮度信息; 利用高曝光参数下获取的图像统计低辐射亮度信息。将实测的低辐射亮度对应的电压值设置为钳位电压值, 以避免丢失实际信号; 将实测的高辐射亮度与低辐射亮度差值设置为饱和辐射亮度, 以此解算航天遥感相机的积分级数和增益。在航天遥感相机推扫此场景时, 采用解算的钳位电压值、积分级数和增益, 实现航天遥感相机参数的自动调整。

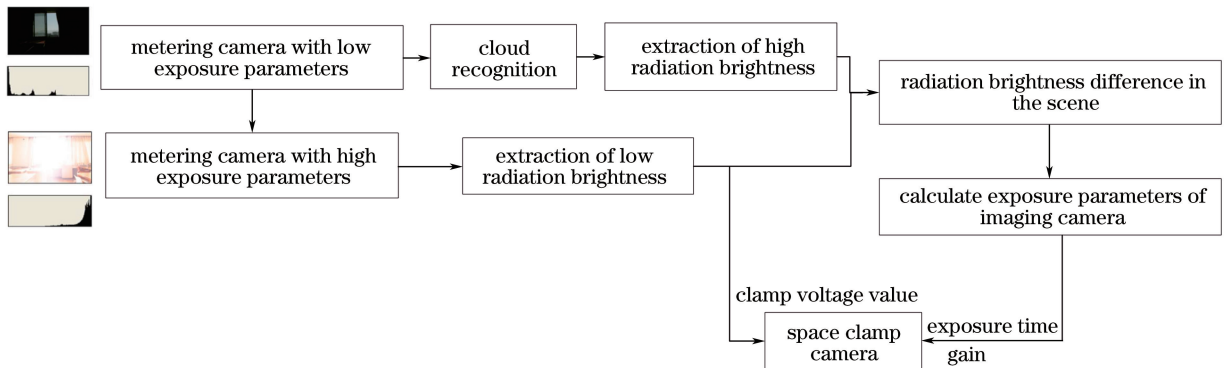


图 4 自适应调整曝光参数框图

Fig. 4 Block diagram of adaptive adjustment of exposure parameters

#### 4.1 场景信息统计

CMOS 测光相机图像灰度  $G$  与入瞳处辐射亮度  $L$  的关系为<sup>[10-14]</sup>

$$G = L \times \frac{\pi}{4F^2} \times \tau_0 \times R_{CCD} \times g_{ad} \times t. \tag{9}$$

设  $g_t = \pi \tau_0 R_{CCD} / (4F^2)$ , 则(9)式可写为

$$L = \frac{G}{t \times g_{ad} \times g_t}. \tag{10}$$



由于测光相机低曝光参数采用饱和辐亮度计算,所以可根据低曝光参数确定场景的高辐射亮度信息。利用高曝光参数图像统计场景低辐射亮度信息。经大量实验验证,该研究中将高辐射亮度的1%和低辐射亮度的1%作为场景的辐射亮度信息。在统计高辐射亮度信息时,云层的低透射率和反射率会对场景高辐射亮度统计结果造成很大的影响,因此需要对低曝光参数下的图像进行云检测。云检测也是一个重要的研究领域,已有文献报道了很多方法<sup>[15-16]</sup>。本文采用基于模式识别的云识别算法,不对云检测方法进行详细论述。

## 4.2 参数解算

曝光参数解算采用高亮度匹配方法,将统计的当前场景的高辐射亮度与低辐射亮度的差值作为饱和辐射亮度,使场景动态范围尽可能大地分布于成像系统动态范围内,充分利用相机动态范围。

饱和辐亮度情况下成像系统的曝光时间与增益的乘积为

$$t \cdot g_{ad} = \frac{N_{sat}}{(L_{max} - L_{min}) \times g_t}, \quad (11)$$

式中  $N_{sat}$  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 1023;  $L_{max}$  为场景中高辐射亮度的 1%,  $L_{min}$  为场景中低辐射亮度的 1%。

对于 TDI CCD,增加 TDI 级数等效于增加积分时间。在卫星姿态精度和稳定度一定的情况下,信噪比和调制传递函数(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<sup>[15]</sup>。根据需求的 MTF 最小值可确定 TDI 最大级数,将此级数作为 TDI 级数的上限,以保证系统需求。因此优先调整 TDI 级数,当 TDI 级数大于上限时再调整增益。

钳位电压值根据场景低辐射亮度信息由(2)~(4)式确定。为了确保不丢失有用细节信息,在大量实验的基础上设定钳位电压值为计算值的 90%。

## 5 实验验证

### 5.1 地面验证系统

搭建地面验证系统,利用高精度云台搭载测光相机与航天遥感相机,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。

地面验证系统主要包括高精度云台、二维调节座、测光相机和成像相机。设置高精度云台的预置位,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。系统中高精度云台为亚安变速智能云台 YS3051,水平旋转速度范围为 0.01~60(°)/s,最大承重为 15.5 kg。测光相机为德国 XIMEA 相机,传感器型号为 CMV4000ES3E5M1PP,成像相机为自主研发的动态钳位相机。

### 5.2 实验结果及分析

在辽宁旅顺白云山顶进行实验,实验当天是薄雾天气,能见度为 4 km。

采用不设置动态钳位电压值情况下的固定曝光参数、中灰度曝光调整方法和设置动态钳位电压值的调整方法对不同的场景进行实验,获得实验图像,并对各种场景的实验图像进行统计,统计结果如表 1 所示。

表 1 各场景图像曝光统计结果

Table 1 Statistic results of each scene image exposure

Method	Under exposure	Normal exposure	Over exposure
Fixed exposure	98	52	0
Medium gray exposure	0	72	78
After adjustment	0	150	0

表 1 中的欠曝光是指相机动态范围利用率低于 50%,正常曝光指相机动态范围利用率大于 50%且饱和点个数小于总像素的 2%,过曝光是指图像中饱和点个数大于总像素的 2%。从表 1 可以看出,采用固定的曝光参数时,由于不同场景间辐射亮度变化大,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。利用传统的中灰度曝光时,虽然欠曝光图像数量减少,但过曝光图像数量增加。经设置动态钳位

电压值调整后,欠曝光图像的数量明显减少,且不会增加过曝光的图像数量。

图 5 为获得的实验图像,其中图 5(a)、(b)表示固定曝光参数下的图像,图 5(c)、(d)表示钳位电压值为 0 时自适应调整积分时间和增益后的图像,图 5(e)、(f)表示自适应调整钳位电压、积分时间和增益后的图像。表 2 为实验所得图像的统计结果。

相比于固定曝光参数的图像,自适应调整曝光时间和增益可以有效提高图像灰度层次,图 5(c)的灰度层次比图 5(a)提高了 27.7%,图 5(d)的灰度层次比图 5(b)的灰度层次提高了 28.5%。但是依然存在图像低端量化信息不能利用的问题,图 5(c)的低辐射亮度最小值为 91,图 5(d)的低辐射亮度最小值为 56。这是由于实验是在薄雾天气条件下进行的,大气的散射作用使入瞳能量增加。图 5(e)的灰度层次比图 5(a)提高了 80.7%,图 5(f)的灰度层次比图 5(b)提高了 49.7%,且图 5(e)与(f)中图像的暗部细节没有丢失。此结果表明在航天遥感相机中自适应调整动态钳位电压值可以显著提高图像的成像质量。

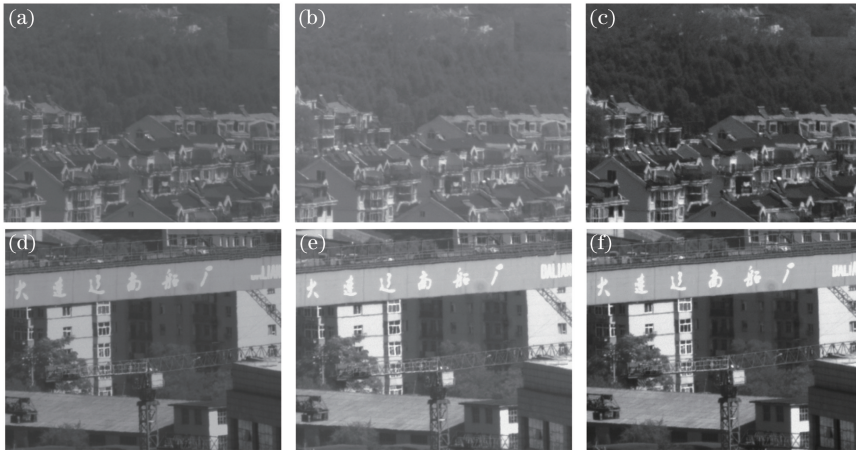


图 5 不同曝光方法得到的实验结果。(a),(b)固定曝光参数;(c),(d)钳位电压值为 0,自适应调整积分时间和增益;  
(e),(f)自适应调整钳位电压、积分时间和增益

Fig. 5 Results of imaging experiments with different exposure methods. (a), (b) Fixed exposure parameters;  
(c), (d) integral time and gain are adjusted adaptively when clamp voltage is 0;  
(e), (f) clamp voltage, integral time and gain are adjusted adaptively

表 2 实验所得图像统计结果

Table 2 Statistic results of image number

Image	Gray mean value	Gray maximum value	Gray minimum value	Gray level	Comentropy
Fig. 5(a)	95	192	73	119	5.3572
Fig. 5(b)	104	190	46	151	6.7549
Fig. 5(c)	119	243	91	152	5.7205
Fig. 5(d)	132	250	56	194	7.1046
Fig. 5(e)	73	255	40	215	6.3082
Fig. 5(f)	110	250	24	226	7.3056

## 6 结 论

提出了航天遥感相机系统优化方法和参数优化方法。经过优化后的航天遥感相机,能够在成像前除去大气对灰度层次的影响,入瞳辐亮度相同时,可以采用更大的模拟增益,从而提高图像的辐射分辨率,增强图像细节。根据航天遥感相机参数优化方法,能够根据当前场景内容充分利用成像系统的动态范围,提高图像的灰度层次和图像质量。根据实验结果统计,图像的灰阶范围可提高 80.7%,图像熵显著提升。

## 参 考 文 献

- [1] Peng Nina, Chen Dayu, 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.
- [2] Wu Xingxing, Liu Jinguo, Zhou Huaide, *et al.* Automatic on-orbit adjusting gains of space camera based on lighting conditions[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0328001.  
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): 0328001.
- [3] Li Xiansheng, Ren Jianyue, Ren Jianwei, *et al.* Establishment of image model for onboard 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.
- [4] Yuan Hangfei, Guo Yongfei, Qu Lixin, *et al.* Automatic exposure system of spaceborne camera based on land-atmosphere radiative transfer model[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0228001.  
袁航飞, 郭永飞, 曲利新, 等. 基于地气间辐射模型的航天相机自动调光系统[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0228001.
- [5] Xue Xucheng, Shi Junxia, Lü Hengyi, *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.
- [6] He Hongyan, Wang Xiaoyong, Fu Xingke. 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.
- [7] He Hongyan, Yang Jukui, Qi Wenwen. Analysis of atmosphere's influence on image quality of remote satellite[J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2011, 32(2): 42-47.  
何红艳, 杨居奎, 齐雯雯. 大气对遥感卫星图像品质的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(2): 42-47.
- [8] Li Zhiyong, Yang Xiaojun. Consideration on designing of dynamic range for TDICCD 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.
- [9] Zheng Liangliang, Zhang Guixiang, He Xiaojun, *et al.* Research on response model of TDI CCD image system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1104001.  
郑亮亮, 张贵祥, 贺小军, 等. TDI CCD 成像电路系统响应模型的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1104001.
- [10] Meng Xixi, Feng Huajun, Xu Zhihai, *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): 1128002.  
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空间相机自动对焦[J]. 光学学报, 2011, 31(11): 1128002.
- [11] Qin Li, Dong Lili, Xu Wenhai, *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.
- [12] Tang Hao. Research on matching method of dynamic range of scene and imaging system[D]. Dalian: 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: 大连海事大学, 2014.
- [13] Ren Jianwei, Wan Zhi, Li Xiansheng, *et al.* Radiation transfer characteristic and calibrating method for space optical remote sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(8): 1186-1190.  
任建伟, 万 志, 李宪圣, 等. 空间光学遥感器的辐射传递特性与校正方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(8): 1186-1190.
- [14] Xiu Jihong, 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.
- [15] Yuan Hangfei. Research on adaptive automatic exposure for spaceborne remote sensing camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.  
袁航飞. 航天相机星上自适应调光的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [16] Yan Yusong, Long Teng. Realtime cloud detection in optical remote sensing image[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2010, 30(7): 817-821.  
闫宇松, 龙 腾. 遥感图像的实时云判技术[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(7): 817-821.