

# 基于地-气间辐射模型的航天相机自动调光系统

袁航飞<sup>1,2</sup> 郭永飞<sup>1</sup> 曲利新<sup>1</sup> 司国良<sup>1</sup> 马天波<sup>1</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** 在航天相机的成像过程中,拍摄场景的亮度随着地表目标和大气环境的变化而发生改变,为了保证航天相机输出理想的图像,提出了基于地-气间辐射模型的航天相机自动调光方法。根据地-气间辐射传输特性建立航天相机入瞳处辐照度模型,通过分析大气气溶胶对遥感成像的影响,对该模型进行了改进,并在此基础上提出了航天相机自动调光方法。航天相机自动调光首先根据总辐照度以及地面目标辐照度占总辐照度的比例对自动调光参数进行调节,目的是尽可能提高地面目标信息量,然后根据大气气溶胶光学厚度确定自适应拉普拉斯滤波的参数,增强遥感图像的细节。由实验结果可以看出,自动调光增加了遥感图像的信息量,增强了图像对比度,航天相机的成像质量得到了明显地提高。

**关键词** 遥感; 航天相机; 自动调光; TDICCD; 辐射传输模型; 大气气溶胶

中图分类号 TP391

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0228001

## Automatic Exposure System of Spaceborne Camera Based on Land-Atmosphere Radiative Transfer Model

Yuan Hangfei<sup>1,2</sup> Guo Yongfei<sup>1</sup> Qu Lixin<sup>1</sup> Si Guoliang<sup>1</sup> Ma Tianbo<sup>1</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** In the process of spaceborne camera imaging, the brightness of the scene changes with atmosphere and ground target. In order to obtain ideal images, an automatic exposure method based on land-atmosphere radiative transfer model for spaceborne camera is proposed. The irradiance model is established at the pupil of spaceborne camera according to the land-atmosphere radiation transmission characteristics. After analyzing the influence of atmospheric aerosol in remote sensing image, improving the irradiance model, and on this basis an automatic exposure is proposed. Through calculating the total irradiance and the ratio of ground target irradiance in the total irradiance, and adjusting the automatic exposure parameter of spaceborne camera to improve ground targets information as much as possible. Then the adaptive Laplace filter parameters are determined according to the atmospheric aerosol optical thickness, in order to enhance the details of the remote sensing images. The experimental results shows that the quality of the remote sensing images are improved greatly, on account of promoting information and contrast of remote sensing images with the proposed method.

**Key words** remote sensing; space borne camera; automatic exposure; TDICCD; radiative transfer model; atmospheric aerosol

**OCIS codes** 280.4788; 040.1520; 010.0280

## 1 引言

随着空间遥感科技的不断进步及国家发展战略对空间遥感数据的需求,航天卫星遥感技术得到了高度

收稿日期: 2015-06-30; 收到修改稿日期: 2015-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 袁航飞(1988—),女,博士研究生,主要从事 CCD、图像处理方面的研究。E-mail: yhfciomp@163.com

导师简介: 郭永飞(1961—),男,研究员,博士生导师,主要从事 CCD 在计算机中的应用等方面的研究。

E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn

重视,定量提取遥感数据的信息已成为主要的发展方向,因此提高航天遥感数据的质量成为了目前研究的重点之一。对于高分辨率的航天相机而言,优化航天相机系统设计是提高光学遥感数据质量的关键<sup>[1]</sup>。

航天相机的遥感平台距地面的高度大于 240 km,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<sup>[2]</sup>。由于地球表面的属性和地球大气状况的不断变化,在遥感图像成像过程中使用固定曝光参数会导致图像过亮、过暗或者图像动态范围较小,造成图像信息的缺失,所以实时改变相机曝光量是提升航天相机成像质量的重要方式。

目前,航天相机通常采用手动调光来改变曝光量,即人工通过获取的图像信息来判断所需的曝光量,然后将曝光参数上传给航天相机,由于图像下传、图像处理判断及参数上传会消耗较长时间,而且随着卫星的高速运行,拍摄场景会发生变化,所以手动调光的实时性较差<sup>[1]</sup>。为了满足实时性的需求,航天相机需要采用自动调光的方式来改变相机曝光量。自动调光,是一种自动调节曝光量的技术。普通数码相机自动调光是对同一拍摄场景多次曝光,通过图像的灰度值和直方图来估计拍摄所需的曝光量<sup>[3]</sup>。航天相机采用信噪比和灵敏度比较高的时间延迟积分电荷耦合器件(TDICCD)作为传感器,采用推扫模式进行图像捕获,与普通数码相机自动调光方式不同,航天相机的自动调光系统必须在图像拍摄之前快速、准确的调整曝光量,以获取理想的遥感图像数据,因此需要对拍摄场景进行预判,估算出航天相机入瞳处的辐照度。

地-气间辐射传输模型描述了光在大气和地表目标间的传输过程。根据大气气溶胶特性和地表辐射特性,利用地-气间辐射传输模计算航天相机入瞳处的辐照度是自动调光的重要条件。目前,利用遥感数据对大气-地表特性进行反演的研究有很多,然而根据大气-地表特性进行航天相机自动调光的有关研究却鲜有报道<sup>[4]</sup>。

本文结合地-气间辐射传输特性,分析了大气气溶胶对航天相机成像的影响,建立并改进了航天相机入瞳处辐照度模型。自动调光系统首先通过预估的辐照度以及地面目标辐照度在总辐照度中所占的比例来调节航天相机的TDI积分级数和系统增益,实现航天相机曝光量改变,然后根据大气气溶胶厚度确定自适应拉普拉斯滤波的参数,以提高遥感图像的清晰度。航天相机自动调光系统不仅提高了遥感图像的质量,而且满足了星上调光实时性的要求。

## 2 航天相机调光原理

航天高分辨率光学遥感相机普遍采用TDICCD作为图像传感器。TDICCD是一种面阵结构、线阵输出的CCD,采用推扫模式对景物成像。与普通线阵CCD相比,它通过时间延迟积分的方法对同一目标进行多次光能量累加,等效于增加了积分面积或积分时间<sup>[5]</sup>,因此有着较高的信噪比和灵敏度。本文航天相机由10片TDICCD机械拼接而成,目的是扩大相机的视场。如图1所示,第一行与第二行相邻的TDICCD之间有50个像元的搭接。

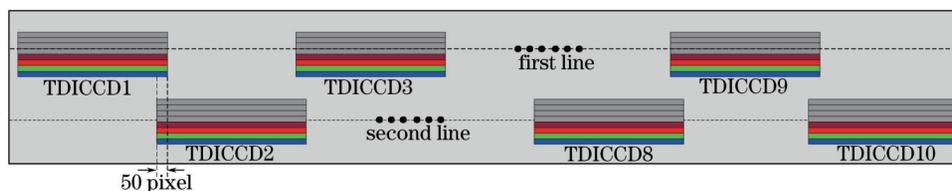


图1 多TDICCD拼接焦面结构

Fig.1 Focal plane constituted with multi-TDICCD

TDICCD输出图像的量化位数是12 bits,图像的灰度值范围是0~4095,TDICCD输出图像的灰度值可以表示为

$$g_{DN} = g(R_e \times E \times t_{in} \times N/G), \quad (1)$$

式中  $g_{DN}$  是成像系统的总输出的数字量,单位是ADU,  $E$  是CCD靶面的辐照度,单位是  $W/m^2$ ,  $t_{in}$  是光积分周期,也称行周期,单位是s,  $R_e$  是TDICCD的响应度,单位是  $e^-/(J \cdot m^2)$ ,电子学系统增益  $G$  的单位是  $e^-/ADU$ ,  $N$  是TDI级数,无量纲,  $g$  表示图像处理函数。其中  $E$  可以表示为<sup>[6]</sup>

$$E = \frac{\pi}{4} \times E_0 \times \eta_{\text{optics}} / F^2 \text{ (W/m}^2\text{)}, \quad (2)$$

式中  $E_0$  是航天相机入瞳处的辐照度, 也叫做大气层顶(TOA)辐照度,  $\eta_{\text{optics}}$  是光学系统的透射率,  $F$  是光学系统相对孔径。将(2)式代入(1)式得:

$$g_{\text{DN}} = g\left(\frac{\pi}{4} \times R_c \times E_0 \times \eta_{\text{optics}} \times t_{\text{int}} \times N/F^2 G\right). \quad (3)$$

航天相机的  $\eta_{\text{optics}}$  和  $F$  是固定值, 无法在星上进行调整。行周期  $t_{\text{int}}$  是由相机与地面目标的相对速率以及地面像元分辨率共同决定的, 每一个卫星轨道都对应一个固定的行周期, 否则对于TDICCD而言, 随意改变行周期会导致图像模糊变形, 所以在航天相机自动调光的过程中, 行周期也是固定不可变的。

由此可见, 根据(3)式, TDICCD输出图像的灰度值将由TDI级数  $N$ 、电子学系统增益  $G$ 、图像处理函数  $g(x, y)$  和 CCD靶面的辐照度  $E$  共同决定。其中  $N$ 、 $G$  和  $g(x, y)$  是航天相机的调光参数, 航天相机入瞳处的辐照度  $E_0$  是确定自动调光参数的前提条件, 因此预判航天相机靶面的辐照度是自动调光的关键所在。

### 3 地-气间辐射传输模型

#### 3.1 航天相机入瞳处辐照度

由于地球外大气圈的存在, 航天相机入瞳处的辐照度不仅包括了地面目标对太阳光的反射辐射, 同时也包含了大气程辐射<sup>[7]</sup>, 其构成如图2所示。

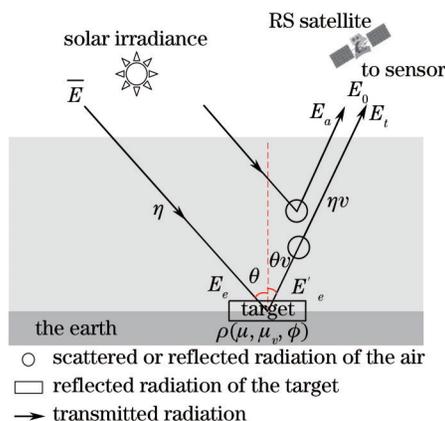


图2 大气对遥感成像的影响

Fig.2 Influence of atmosphere in remote sensing image

由图2可知, 航天遥感器入瞳处的辐照度  $E_0$  可以表示为

$$E_0 = E_a + E_t, \quad (4)$$

式中  $E_a$  表示到达航天相机入瞳处的大气程辐射,  $E_t$  是地面目标反射辐射, 其形成如图2所示, 太阳入射辐射  $\bar{E}$  以入射角  $\theta$  穿过地球大气到达地表目标, 入射方向的大气透射率为  $\eta$ , 则地表目标处的入射辐照度  $E_e$  表示为

$$E_e = \bar{E} \times \cos \theta \times \eta, \quad (5)$$

地表目标处的入射辐照度  $E_e$  经过地表的反射得到地表目标的出射辐照度  $E'_e$  为

$$E'_e = E_e \times \rho, \quad (6)$$

式中  $\rho$  为地表目标的反射率, 它是地表目标的特性。地表目标的出射辐射  $E'_e$  经大气衰减以及地-气之间多次耦合作用后进入遥感相机视场角的部分即为航天相机入瞳处的辐照度  $E_t$  为

$$E_t = \frac{E'_e}{1 - \rho_s} \times \eta_v, \quad (7)$$

式中  $\eta_v$  是地表目标到航天相机方向的大气透射率,  $s$  为大气球形反照率, 式中分母项体现了地-气之间多次耦合作用<sup>[8]</sup>。将(5)~(6)式代入(7)式, 得到  $E_t$  的表达式为

$$E_t = \frac{\bar{E} \times \cos \theta \times \eta \times \rho}{1 - \rho_s} \times \eta_v. \quad (8)$$

太阳辐射  $\bar{E}$  可以通过普朗克公式计算,把太阳看作是绝对温度为 5900K 的黑体,根据普朗克黑体辐射公式,一定光谱范围内的辐出度可表示为

$$M = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} [\exp(hc/\lambda kT) - 1]^{-1}, \quad (9)$$

式中  $h$  为普朗克常数,  $c$  为真空中的光速,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $\lambda$  为波长,  $T$  为太阳的绝对温度。太阳对地表目标的单色辐照度为

$$E(\lambda) = \frac{M(\lambda) \cdot A}{4\pi R^2}, \quad (10)$$

式中  $A$  为太阳表面积,  $R$  为日地距离。在可见光 0.4~0.7  $\mu\text{m}$  波段,太阳对地的辐照度为

$$\bar{E} = \int_{0.4}^{0.7} E(\lambda) d\lambda = 550 \text{ (W/m}^2\text{)}. \quad (11)$$

将(8)、(11)式代入(4)式,得到航天相机入瞳处的辐照度为:

$$E_0 = E_a + E_t = E_a + \frac{550 \times \cos \theta \times \eta \times \rho}{1 - \rho_s} \times \eta_e, \quad (12)$$

从(12)式可知,大气程辐射信号是叠加在地面遥感信号上的无效信息,而大气透射率表示大气对地表辐射能量有一定程度的衰减,这都直接干扰了光学传感器的信号接收,对成像质量产生了退化作用,使得遥感图像对比度降低,尤其是图像的清晰度发生了明显的变化,因此大气程辐射和大气透射率成为了影响遥感影像质量的主要因素。

对于工作在可见光谱段的航天相机而言,大气程辐射和大气透射率主要是由于大气气溶胶以及云层对辐射的吸收和散射造成的,它们只与大气状况和观测几何条件有关,与地表目标信息无关,因此航天相机自动调光需要重点考虑大气气溶胶对遥感成像的影响。

### 3.2 大气气溶胶对遥感成像的影响

大气气溶胶是指悬浮在大气中的微小颗粒物构成的多分散体,其尺度范围约在 0.001~10  $\mu\text{m}$  之间。气溶胶光学厚度(AOT)是描述大气气溶胶属性的主要参数,定义为介质的消光系数在垂直方向上的积分,用来描述气溶胶对光辐射的衰减作用<sup>[9]</sup>。

大气气溶胶光学厚度  $\tau$  与大气透射率存在如下关系<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \eta = \exp(-\tau/\mu) \\ \eta_e = \exp(-\tau/\mu_e) \end{cases}, \quad (13)$$

由(13)式可知,大气透射率随着大气气溶胶光学厚度的增加而降低,由(7)式可知,大气透射率的降低减小了地表目标到达探测器的辐射能量,同时也降低了地面目标图像的对比度,进而导致图像的清晰度发生明显的变化。

大气程辐射与大气气溶胶光学厚度的关系如图 3 所示,大气程辐射随着大气气溶胶光学厚度的增加而增大。大气程辐射的增大干扰了航天相机对地面目标的探测,增加了航天相机入瞳处的总辐照度,在大气程辐射较大时,自动调光的目的是在保证遥感图像不饱和的情况下尽量增加图像亮度,以提高地面目标的辐射能量,增加遥感信息量。

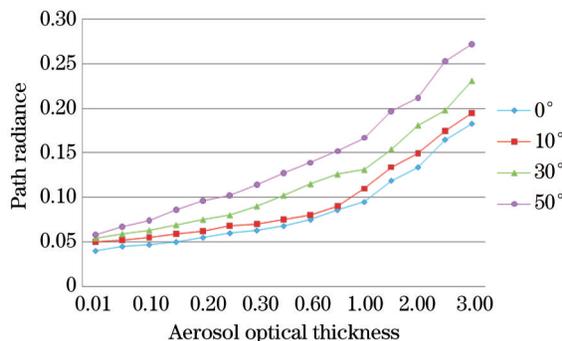


图 3 大气气溶胶厚度与大气程辐射的关系

Fig.3 Relationship between atmospheric aerosol optical thickness and path radiance

文献[4]将大气气溶胶粒子对遥感图像的影响模型化为大气有效散射点扩展函数(PSF)对遥感图像的退化作用,并建立了不同大气气溶胶光学厚度下的点扩展函数。大气气溶胶厚度与大气能见度  $V$  存在如下关系:

$$\tau = \sigma h = \frac{3.912}{V} \times h^{0.2}, \quad (14)$$

(14)式是经验公式,  $h$  为目标到探测器的距离,  $\sigma$  为消光系数,  $\sigma = 3.912/V$ 。将(14)式带入(13)式得到大气透射率与能见度的关系:

$$\begin{cases} \eta = \exp\left(-\frac{3.912}{V} \times h^{0.2}/\mu\right) \\ \eta_r = \exp\left(-\frac{3.912}{V} \times h^{0.2}/\mu_r\right) \end{cases}, \quad (15)$$

根据文献[4]并结合大气能见度与大气气溶胶的关系,可以建立不同能见度下的大气点扩展函数,如图4所示。随着天气状况逐渐变差,能见度降低,气溶胶光学厚度增加,PSF影响的范围由3~5个像元扩展到20~30个像元,PSF的退化强度也随着光学厚度的增加而显著增大。

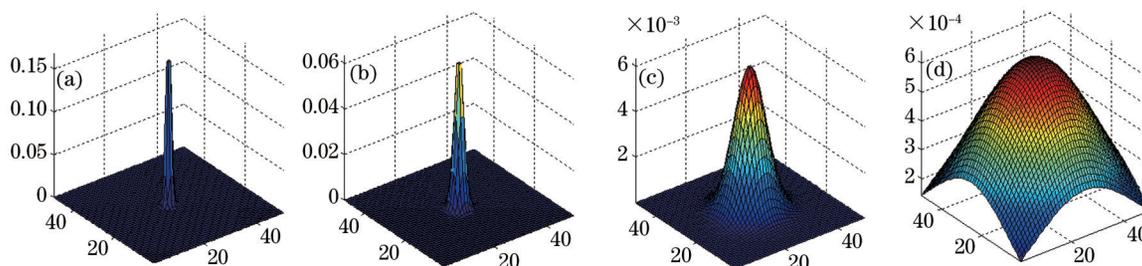


图4 不同能见度下的大气点扩展函数。(a)  $V=35$  km; (b)  $V=23$  km; (c)  $V=15$  km; (d)  $V=6$  km

Fig.4 PSF under different visibilities. (a)  $V=35$  km; (b)  $V=23$  km; (c)  $V=15$  km; (d)  $V=6$  km

由此可见,大气气溶胶对航天相机成像的影响不仅体现在辐射能量改变,在空域内也体现在对图像质量的退化作用,因此航天相机自动调光就要针对大气气溶胶的特性对遥感图像进行亮度调整和一定程度地模糊复原,以增大遥感图像信息量。

### 3.3 辐射传输模型

将(15)式代入到(12)式得到航天相机入瞳处的辐射传输模型:

$$E_0 = E_a + E_r = E_a + \frac{550 \times \cos \theta \times \rho}{1 - \rho_s} \times \exp\left(-\frac{3.912}{V} \times h^{0.2}/\mu\right) \times \exp\left(-\frac{3.912}{V} \times h^{0.2}/\mu_r\right), \quad (16)$$

式中  $E_a$ 、 $\rho$ 、 $\theta$ 、 $\theta_r$ 、 $V$  是计算  $E_0$  的主要参数,也是对调光系统的判读的关键和难点。卫星运行时将实时接收来自地面以及其他卫星的辅助数据,例如气象信息(包括能见度、云层覆盖度等)、拍摄地的经纬度、拍摄地的日期时间等等,航天相机将通过这些辅助数据提取相关参数或者建立相应的查找表来确定参数的值。

能见度  $V$  直接由气象卫星数据获取,  $\theta_r$  由卫星姿态角决定,  $\theta$  由拍摄地的纬度和日期时间共同决定,为了节省资源,采用查找表的方式。中分辨率成像光谱仪(MODIS)提供了各种各样的地表反照率,而且精度也已被广泛的验证和评定<sup>[11]</sup>,因此地表反照率  $\rho$  可以通过建立经纬度与 MODIS 产品的查找表来获得; MORDTRAN 是基于大气参数的大气辐射近似计算模型,能够根据大气参数和观测几何条件计算大气背景辐射(即大气程辐射),因此根据 MORDTRAN 的仿真计算结果,在星上建立多种气象条件与大气程辐射  $E_a$  的查找表,气象参数将由气象卫星提供。

## 4 航天相机自动调光方法

航天相机自动调光时首先设置调光参数  $N$ 、 $G$ ,使遥感图像处于较高的动态范围和适中的灰度级,然后根据大气气溶胶厚度确定图像处理的方法。

### 4.1 调光参数 $N$ 、 $G$ 的设置

积分级数  $N$  表示对同一目标景物曝光的次数,是以目标景物为基准改变相机曝光量,可以提升目标景物信息量。增益  $G$  是在相机将目标景物转化为电子量后对电子量进行一定倍数的改变,只提高了目标景物的对比度,而没有增加目标景物的信息量<sup>[12]</sup>。在自动调光参数设置时,针对目标景物改变曝光量是提高目标

信息量的关键,因此调节积分级数的优先级始终高于调节增益的优先级。

为了尽量提高地面目标信号的辨识度,不仅需要考虑  $E_0$  的大小,还需要考虑  $E_i$  在  $E_0$  中所占的比重,在此引入一个变量  $K$  为

$$K = E_i/E_0, \quad (17)$$

式中  $K \in [0, 1]$ , 在航天相机自动调光时需要讨论  $K$  的大小:

1) 当  $0.85 \leq K \leq 1$  时,地表目标辐射为主要辐射,自动调光应根据总辐照度  $E_0$  的大小设置  $N$ 、 $G$  的值,使输出图像的灰度值在 1900~2200 之间;

2) 当  $0.70 \leq K < 0.85$  时,大气程辐射与地面目标辐射交叠,为了提升地面目标辐射的能量,自动调光应根据  $E_0$  的大小设置  $N$ 、 $G$  的值,使输出图像的灰度值在 2100~2400 之间;

3) 当  $0.35 \leq K < 0.70$  时,地面目标的信息较弱,几乎被大气程辐射能量湮没,此时若以  $E_0$  为基准将图像灰度值控制在较低的值,地面目标的辐射能量将集中在低灰度值区域,不仅容易被噪声污染,而且对比度降低,因此自动调光必须以  $E_0$  为基准在保证图像不饱和的情况下尽可能的提高遥感图像的灰度值,将输出图像的灰度值控制在 2400~2700 之间;

4) 当  $K < 0.35$  时,大气程辐射已经将地面目标信号完全掩盖,此时相机调光已不能解决问题,因此将调光参数恢复到默认值即可。

#### 4.2 图像处理方法

大气气溶胶光学厚度决定了遥感图像的模糊程度,因此图像处理要着重提高图像的细节,增加图像的清晰度。基于航天相机对硬件及处理速度的需求,提出了一种自适应拉普拉斯滤波算法,该算法采用  $3 \times 3$  的掩模窗口,以减少计算量,提高运算速度<sup>[13]</sup>。

0	-B	0
-B	A+4B	-B
0	-B	0

图5 自适应拉普拉斯滤波掩模

Fig.5 Masking of adaptive Laplace filter

为了实现算法的自适应性,采用如图5所示的掩模算子,其表达式为

$$g(x,y) = Af(x,y) - B\nabla^2 f(x,y), \quad (18)$$

式中  $A$  和  $B$  是自适应调整系数。 $A$  和  $B$  会根据大气状况的不同,取相应不同的值,进而针对每一场景都能得到良好的增强效果。

$A$  主要影响遥感图像的亮度,在自动调光参数的设置中已经通过调节  $G$ 、 $N$  使遥感图像处于较为理想的灰度级,因此在图像处理过程中将不再对遥感图像的亮度进行改变,  $A=1$ 。 $B$  主要影响边缘锐化的程度,遥感图像的清晰度随着能见度的降低而下降,且由图4可知,PSF的影响范围和退化强度随着能见度的降低而增加,因此结合不同能见度下的大气点扩展函数对图像进行退化,然后用图5掩模算子进行图像增强,通过多次仿真得到  $B$  和  $V$  的经验公式,

$$B = 2 \ln \frac{1}{\eta_v} = 2 \ln \frac{1}{\exp\left(-\frac{3.912}{V} \times d^{0.2} / \mu_v\right)}. \quad (19)$$

## 5 实验结果与分析

受天上工作环境和硬件条件的限制,实验航天相机的积分级数和增益值均有固定范围,且精度受限。在本文所研究的航天相机中,采用的是DALSA公司的TDICCD,积分级数可设置为4,8,16,32,64和96级,电子学系统增益的范围是0.8~1.85<sup>[14]</sup>。航天相机拍摄的默认积分级数为32级,默认增益为0.95。实验用一幅WorldView-2拍摄的遥感图像作为航天相机成像的场景,如图6所示。



图6 WorldView-2拍摄的遥感图像

Fig.6 Remote sensing image taken by WorldView-2

为了验证航天相机自动调光的有效性,实验分别对不同太阳入射角和不同能见度的情况进行了大气气溶胶对遥感图像影响的模拟,如图7所示。根据图6和Worldview2相机的拍摄参数,通过MORDTRAN软件计算出地表目标辐照度、大气透射率以及大气程辐射。假设相机观测均为垂直观测,即 $\theta_v = 0^\circ$ ,得到的相关数据如表1所示。

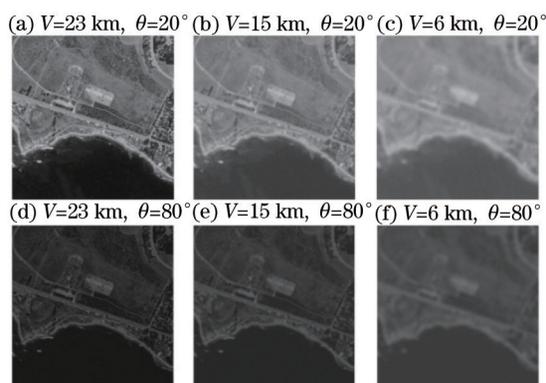


图7 不同能见度和太阳入射角下的遥感图像

Fig.7 Remote sensing images under different visibilities and different angles of solar incidence

表1 图7中遥感图像的相关辐射数据

Table 1 Correlative radiation data of remote sensing images in Fig.7

$\theta/^\circ$	$V/km$	$\eta$	$E_t/(W/m^2)$	$E_a/(W/m^2)$	$K$
20	23	0.55	394.6	13.6	0.96
	15	0.41	294.2	146.7	0.66
	6	0.16	123.4	322.8	0.27
80	23	0.51	108.7	7.2	0.93
	15	0.37	81.2	34.8	0.7
	6	0.13	54.7	102.6	0.34

根据每幅图对应的 $K$ 值,首先按照4.1节方法调整TDICCD积分级数 $N$ 和增益 $G$ ,尽量地提高图像的动态范围,增强地面目标的辨识度,然后根据能见度 $V$ 确定自适应拉普拉斯滤波的参数 $A$ 和 $B$ ,对图像进行锐化处理,处理结果如图8所示。

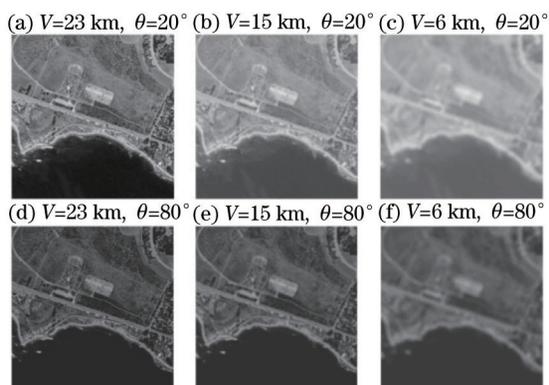


图8 自动调光处理后的遥感图像

Fig.8 Remote sensing images processed by adaptive exposure

图9是能见度15 km、太阳入射角80°下的图像和自动调光后的图像与原图的细节对比。可以看出自动调光后的图像与调光前的图像相比,灰度级和动态范围都得到了提高,清晰度也明显增加,虽然与原始图像还有一定差距,但是自动调光的效果也比较理想。



图9 局部放大图像对比。(a)  $V=15\text{ km}$ ,  $\theta=80^\circ$ 下的图像;(b) 自动调光后的图像;(c) WorldView-2原图像  
Fig.9 Contrast of partial enlarged images. (a) Image at the condition of  $V=15\text{ km}$ ,  $\theta=80^\circ$ ; (b) image processed by adaptive exposure; (c) original image of WorldView-2

表2是图7、图8中遥感图像的灰度直方图和动态范围(DR),表3是对图7、图8中遥感图像质量的客观评价。 $m_g$ 是图像灰度平均值,值得注意的是入射角为80°时,场景亮度太低,将积分级数调到96级,增益设为0.8仍然不能使图像灰度级达到4.1节要求的范围。 $\sigma_g$ 是图像灰度值标准差,灰度平均梯度(GMG)的值越大,说明图像越清晰,质量越好,图像信息熵的值越大,说明图像信息量越大。从表2和表3中可以看出,自动调光明显地提高了遥感图像的动态范围、灰度平均梯度和信息熵,其中GMG平均提高了40.23%,信息熵平均提高了3.62%。

表2 图7和图8中遥感图像的灰度直方图和动态范围

Table 2 Grey histogram and dynamic range of remote sensing images for Fig.7 and Fig.8

$\theta / (^\circ)$	20			80		
$V / \text{km}$	23	15	6	23	15	6
Before automatic exposure						
	$D_{DR}=480\sim3792$	$D_{DR}=928\sim3376$	$D_{DR}=1248\sim332$	$D_{DR}=224\sim1632$	$D_{DR}=608\sim1760$	$D_{DR}=912\sim1872$
After automatic exposure						
	$D_{DR}=400\sim4095$	$D_{DR}=960\sim3968$	$D_{DR}=1376\sim393$	$D_{DR}=176\sim2864$	$D_{DR}=688\sim2656$	$D_{DR}=768\sim2752$

表3 图7和图8中遥感图像质量的客观评价

Table 3 Objective evaluation of remote sensing images quality for Fig.7 and Fig.8

$\theta / (^\circ)$	$V / \text{km}$	Before auto-exposure				After auto-exposure			
		$m_g$	$\sigma_g$	$G_{GMG}$	$E$	$m_g$	$\sigma_g$	$G_{GMG}$	$E$
20	23	1555.96	704.20	75.03	7.23	1911.92	793.17	100.86	7.35
	15	1767.04	508.09	62.84	6.27	2121.60	612.04	75.20	6.49
	6	2038.88	458.65	47.67	5.02	2446.56	548.93	63.72	5.34
80	23	495.36	250.05	42.76	6.73	1002.80	443.82	73.32	6.92
	15	865.42	205.21	33.25	5.98	1224.7	342.69	58.47	6.12
	6	1172.8	171.96	29.86	4.89	1485.76	335.35	47.42	5.14

## 6 结 论

结合地-气辐射传输特性和大气气溶胶对遥感影像的影响,建立了航天相机入瞳处辐照度模型,并提出了航天相机自动调光方法,该方法在相机拍摄前对拍摄场景进行预判,然后对相机曝光参数进行设置。自动调光解决了手动调光时图像下传和参数上注带来的延时问题,提高了调光的实时性和自适应性,避免了因曝光不足或曝光过量导致图像失真和信息丢失,使航天相机能够最大程度地获取地面信息。通过实验结果可以看出,通过自动调光后的遥感图像信息熵提高了3.62%,灰度平均梯度提高了40.23%,图像的信息量得到了明显地提升。航天相机自动调光最大的难点在于预判拍摄场景的辐照度和大气气溶胶的特性参数,MORDTRAN和MODIS软件计算大气参数和地表参数的局限性会造成实时获取参数的不准确,这是今后仍需要重点研究的问题。

## 参 考 文 献

- 1 Zhu Hongyin. Research on Imaging Uniformity and Real-Time Automatic exposure of Remote Sensing Camera [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2012.  
朱宏殷. 星上成像均匀性及实时自动调光的研究[D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2012.
- 2 Ma Xiaoshan, Meng Xin, Yang Zhen, *et al.*. Analysis and modeling of atmosphere influence on space-based optical remote sensing imaging simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 226-231.  
马晓珊, 孟新, 杨震, 等. 天基光学遥感成像仿真中大气影响分析与模拟[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(1): 226-231.
- 3 He Chunliang, Li Binqiao, Liu Zhenwang, *et al.*. Integration time optimization for TDI CMOS image sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0204002.  
何春良, 李斌桥, 刘振旺, 等. TDI CMOS图像传感器曝光时间优化方法研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(2): 0204002.
- 4 Hu Xinli, Gu Xingfa, Yu Tao, *et al.*. Effects of aerosol optical thickness on the optical remote sensing imaging quality[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(3): 735-740.  
胡新礼, 顾行发, 余涛, 等. 大气气溶胶光学厚度对天基光学遥感系统成像品质的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 735-740.
- 5 Liu Haiqiu, Xu Shuyan, Wang Dong, *et al.*. Space camera image motion measurement based on images from time delayed integration sensors overlapped area[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(2): 0212001.  
刘海秋, 徐抒岩, 王栋, 等. 基于空间相机时间延迟积分传感器拼接区图像的像移测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(2): 0212001.
- 6 Zhang Lei, Ding Yalin, Zhang Hongwen, *et al.*. Adjustable exposure system for digital camera based on single curtain type shutter[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(5): 1265-1271.  
张雷, 丁亚林, 张洪文, 等. 基于单帘快门的数字相机调光系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(5): 1265-1271.
- 7 Verhoef W, Bach H. Simulation of hyperspectral and directional radiance images using coupled biophysical and atmospheric radiative transfer models[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(1): 23-41.
- 8 Zhang Ying, Niu Yanxiong, Yang Lu, *et al.*. Analysis and study on detection capability of satellite photoelectric imaging system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0111004.  
张颖, 牛燕熊, 杨露, 等. 星载光电成像系统探测能力分析与研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(1): 0111004.
- 9 Jin Guang, Ren Bingwen, Zhong Xing. Influence of distortion on TDICCD space camera and its suppression method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(10): 1022001.  
金光, 任秉文, 钟兴. 畸变对TDICCD空间相机的影响分析及抑制方法[J]. *光学学报*, 2013, 33(10): 1022001.
- 10 Tao Shuyin. Research on Image Degradation and Recovery Based on Physical Properties of Atmosphere[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.  
陶叔银. 基于大气物理特性的光学图像退化及补偿技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- 11 Li Chengcai, Mao Jietai, Liu Qihan. Remote sensing aerosol with MODIS and the application of MODIS aerosol products[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2003, 39(12): 108-117.  
李成才, 毛节泰, 刘启汉. 利用MODIS遥感大气气溶胶及气溶胶产品的应用[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2003, 39(12): 108-117.
- 12 Tao Shuping, Jin Guang. Influence analysis on the rolling shutter for time delay and integration in digital domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0311001.

陶淑苹, 金光. 卷帘快门对数字域TDI成像的影响分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0311001.

13 Yuan Hangfei, Guo Yongfei, Liu Chunxiang, *et al.*. Study and experiment of adaptive image enhancement on satellite for space remote sensing camera[J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(9): 2962–2966.

袁航飞, 郭永飞, 刘春香, 等. 航天遥感相机星上自适应图像增强研究与实验[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(9): 2962–2966.

14 Zheng Liangliang, Zhang Guixiang, He Xiaojun, *et al.*. Research on response model of TDICCD image system[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1104001.

郑亮亮, 张贵祥, 贺小军, 等. TDICCD成像电路系统响应模型的研究[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1104001.

栏目编辑: 苏 岑