

doi: 10.3788/gzxb20174601.0111002

# 航天遥感相机动态钳位设计

董丽丽, 曹旗磊, 赵明, 吴厚德, 许文海

(大连海事大学 信息科学技术学院, 辽宁 大连 116026)

**摘 要:**提出了航天遥感相机的动态钳位方法,该方法通过在相机的模拟前端对大气程辐射值进行减除,实现场景信息的充分量化.建立了航天遥感相机成像链路模型,分析了大气程辐射对图像灰阶范围的影响.研制了动态钳位相机,实现了在相机硬件电路中减除模拟信号.在外场对动态钳位相机进行了实验验证,实验中利用 MODTRAN 软件计算大气程辐射并转换为相机钳位值.实验结果表明:本文方法可使相机低端信息得到充分利用,图像灰阶范围能够提高 62%;在航天遥感相机中设计动态钳位能够利用低端量化信息,用更多的量化位数来表示地物目标信息,并可提高辐射分辨率,保留更多图像的细节信息.

**关键词:**航天遥感;大气辐射;图像增强;动态钳位;图像灰阶范围

中图分类号:V445.8

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2017)01-0111002-8

## Dynamic Clamping Design of Space Remote Sensing Cameras

DONG Li-li, CAO Qi-lei, ZHAO Ming, WU Hou-de, XU Wen-hai

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

**Abstract:** The dynamic clamping method of space remote sensing cameras was proposed to solve the above-mentioned problem. The method can realize adequately quantization of scene information by subtracting the value of atmospheric path radiation at the analog front end of camera. Imaging chain model for space remote sensing cameras was established first, and the effect of atmospheric path radiation on the image grey-scale area was analysed. Then, the dynamic clamping camera was developed, therefore the analog signal subtracted from the camera hardware circuit was implemented. Besides, experiments were carried out to test the dynamic clamp camera. And the value of atmospheric path radiation calculated by MODTRAN software was converted to value of camera clamp in experiments. Experiments results showed that, the low end information of camera can be fully used by this method, and the image grey-scale range increases by 62 percent. Thus low end quantitative information can also be adopted by designing dynamic clamping for space remote sensing cameras. Then the information of targets can be represented by more quantization bits, and the radiometric resolution is improved as well as more details information of image are remained.

**Key words:** Remote sensing; Atmospheric radiation; Image enhancement; Dynamic clamping; Image grey-scale range

**OCIS Codes:** 110.2970; 280.4788; 290.1310; 110.5200; 040.1490; 040.1520

## 0 引言

评价遥感图像的质量有很多指标,例如辐射分辨率、饱和点比例、图像灰阶范围以及信息熵等.其中图像

**基金项目:** 国家科技支撑计划(No. 2014BAB12B03)、中央高校基本科研业务经费(Nos. 3132016209, 3132016351)和交通运输部建设科技项目(No. 2014328204050)资助

**第一作者:** 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

**通讯作者:** 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

**收稿日期:** 2016-07-12; **录用日期:** 2016-09-29

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

灰阶范围是一个很重要指标,因为图像灰阶范围越大,就包含越多的与地物目标相关的信息,以便判读员从中提取到更多信息,发现目标的细微变化。

由于时间延迟积分电荷耦合原件(Time Delay Integration Charge-Coupled Device, TDI CCD)能够提高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 TDI 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<sup>[1-4]</sup>,由于大气程辐射的存在会使入瞳能量增加,使设定的相机积分级数和增益偏小,导致部分图像存在动态范围窄、细节丢失严重等问题<sup>[5-7]</sup>. 为了使用更多的量化输出值来表征场景的亮度区间,可使用模拟增益放大图像电信号,提高其在量化区间内的分布,提升图像的灰阶范围. 目前针对航天遥感相机已提出的增益调整方法<sup>[1-5,8]</sup>主要有两种,一种是通过在摄影过程中,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而后对增益进行调整;另一种是基于光照条件的航天遥感相机增益自动调整方法,上述调整方法都一定程度上提高了图像的灰阶范围。

但由于大气的散射作用,使一部分大气光进入航天遥感相机参与成像,这部分能量是与地面目标无关的能量,其存在会在地物目标信息上叠加无用的大气背景,导致入瞳能量提高. 在相机量化时,大气背景的存在使相机低端信息不能利用,使图像中地物目标的有效范围变窄. 大气程辐射的存在使模拟增益提高动态范围的方法受限. 这是因为在模拟增益增大的同时放大了大气程辐射对场景暗部的影响,相机低端信息不能利用的问题依然存在。

为了获得更大的动态范围提升效果,北京空间机电研究所何红艳<sup>[6,9]</sup>等提出在遥感相机设计时,需要考虑大气的影响;北京市遥感信息研究所李智勇<sup>[7]</sup>等提出了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思想。

在上述基础上,本文首先建立了航天遥感相机成像链路模型,分析了大气程辐射对图像灰阶范围的影响,提出通过设置动态钳位在航天遥感相机上去除大气程辐射的方法;然后设计并实现了动态钳位相机,并进行了相关实验. 户外实验表明,通过设置钳位电压值,相机能够采用更大的模拟增益值,并在成像时充分利用相机低端信息,使更多的灰度层次来表示目标信息,提高图像的灰阶范围,增强图像细节。

## 1 航天遥感相机成像链路

从到达地物场景的辐射照度到相机输出图像的一个可见光航天遥感相机完整成像链路如图 1。

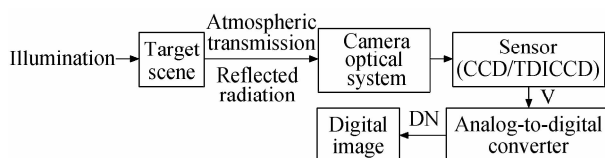


图 1 航天遥感相机成像链路

Fig. 1 Imaging chain of space camera space remote sensing cameras

地物场景反射到达其表面上的辐射照度,经过大气传输,到达相机光学系统;通过控制曝光时间等可决定到达成像系统的传感器上的能量;CCD 传感器将光信号转为电信号,通过模数转换器最终输出图像. 图像灰度  $V$  与入瞳前辐射亮度  $L$  的关系<sup>[10-11]</sup>为

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

式中, $D/f$  为光学系统的相对孔径,  $\theta$  为感光区域与光轴的夹角,  $\tau_0$  为光学系统的总透过率,  $R_{\text{ccd}}$  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。

可见光航天遥感相机入瞳前辐射亮度如图 2。

首先,地物目标反射太阳光以及天空背景光,在大气传输的过程中,由于大气粒子的吸收作用,此部分能量会发生衰减;同时由于大气粒子的散射作用使大气作为光源进入航天遥感相机参与成像. 地物遥感相机接收到的入瞳处能量包括地物目标反射能量和大气程辐射两部分. 入瞳处能量<sup>[12]</sup>为

$$L = \frac{E \times \rho \times \tau}{\pi} + L_{\text{path}} \quad (2)$$

式中: $L$ 为入瞳处辐射亮度, $E$ 为太阳光以及天空背景光到达地面的辐射照度; $\rho$ 为地物目标的反射率; $\tau$ 为大气透过率; $L_{\text{path}}$ 为大气程辐射,是与地物目标无关的量。

$E$ 随着太阳高角的变化而变化, $\rho$ 与地物的种类相关, $L_{\text{path}}$ 与传输路径、大气条件相关。

在遥感成像时,传输路径远,大气程辐射的存在占据入瞳能量的比重增加,在成像时,会使相机低端信息不能利用。下面将具体分析大气程辐射对图像灰阶范围的影响。

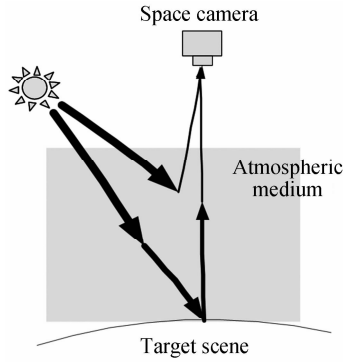


图2 航天遥感相机入瞳能量

Fig. 2 Pupil energy of space remote sensing cameras

## 2 大气程辐射对图像灰阶范围的影响

大气程辐射在图像上最直接的反映是图像直方图偏离0点,即相机低端信息不能利用。对于数字图像,可以用图像灰度值(Digital Number, DN)来表示。图像背景的灰度值直接影响图像目标信息的有效范围,图像背景灰度值越大,目标信息的有效范围越窄。对于采用8 bit 量化(最大255DN)的数字图像,如果图像背景为75DN,则目标信息范围最多为180DN,图像信息的灰度层次严重受压缩,如图3。

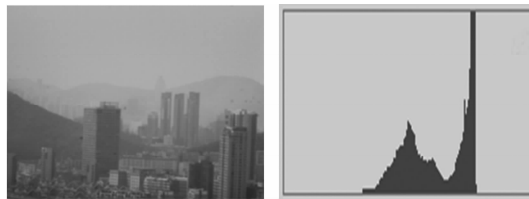


图3 雾天场景图像及其直方图

Fig. 3 Fog image and its histogram

为了定量分析大气程辐射占入瞳能量的比值,使用MODTRAN软件估算景物到相机入瞳前反射辐射亮度和大气程辐射。计算条件:波段为510~690 nm;中纬度夏季第112天;无云无雨;乡村气溶胶;大气能见度为23 km;轨道高度大于100 km;地面海拔100 m;180°垂直观测,地球温度300 K。计算场景的反射率从0.05变为0.9,通过式(2)确定大气程辐射占入瞳能量的比值如图4。

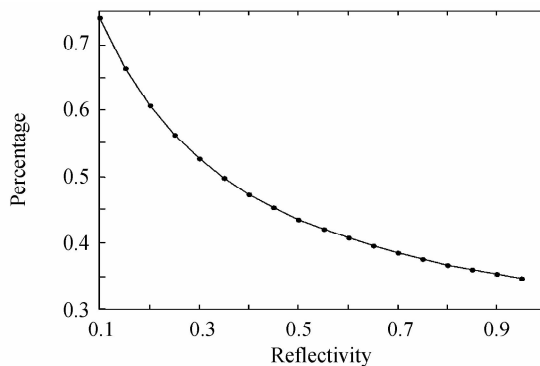


图4 大气程辐射占入瞳能量百分比

Fig. 4 The percentage of atmospheric radiation of pupil energy

从图中可以看出,在遥感成像时,当场景中存在高反射率点时,大气程辐射占据了相机入瞳能量的 35% 左右,在满足饱和和辐亮度要求时,将会有 35% 左右的相机动态范围不能利用. 在场景中高辐射亮度点反射率变小时,大气程辐射占入瞳能量的比值将会进一步提高. 而且,随着天气情况变差,大气程辐射所占比例将会更高.

目前,针对大气辐射对图像的影响是在成像后进行处理<sup>[13-17]</sup>. 虽能使图像的视觉效果变好,图像的直方图分布于更广的灰度范围内,但是却出现了信息离散化的现象,图像细节没有增强. 其根本原因在于信息量没有得到增加,因为该处理方法仅是从人眼视觉上提高了图像的质量.

针对上述问题,本文提出了在遥感相机上设计动态钳位,通过钳位电压值在量化前去除大气程辐射,获取更多的图像细节.

### 3 动态钳位设计与实现

为了能利用相机的低端信息,本文提出在模拟域去除大气程辐射.

动态钳位图像灰度  $V$  与入瞳处辐射亮度  $L$  的关系为

$$V = (L - L_p) \times \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{D}{f}\right)^2 \times \cos\theta \times \tau_0 \times R_{ccd} \times g \times t + o_v \quad (3)$$

式中,  $L_p$  为大气程辐射对应的能量值.

图 5 可说明航天遥感相机中设计动态钳位的作用. 图 5 中细实线为 4 级积分级数下相机响应曲线;粗实线为 4 级积分级数、2 倍增益下相机响应曲线;粗虚线为设置钳位电压值后 4 级积分级数下相机的响应曲线;细虚线为设置钳位电压值后 4 级积分级数、2 倍增益下相机的响应曲线;由第 3 节分析可知,在遥感成像时,由于大气程辐射的影响,入瞳的最小辐射亮度偏离 0 点,当目标段的辐射能量如图 5 所示时,未设置钳位电压值时,为了避免图像饱和,相机只能采用 4 级积分级数,获取的图像灰阶范围如图中实竖线所示,可以看出,相机低端信息未被利用. 而通过设置钳位电压值,相机可采用 4 级积分级数、2 倍增益而使图像不饱和,如图中虚竖线所示. 这可使相机低端信息充分利用,使图像可利用的灰度层次扩大,并且提高了相机的辐射分辨率.

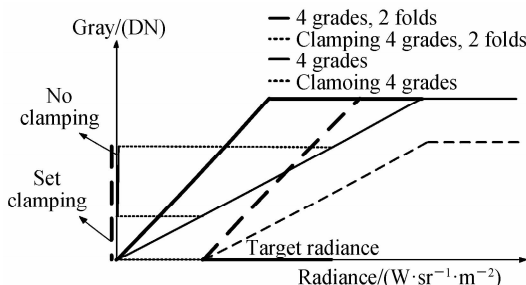


图 5 动态钳位相机工作示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the principle of dynamic clamp camera

为了验证在模拟域去除大气程辐射功能,本文研制了一款动态钳位相机,进行验证. 动态钳位相机原理如图 6.

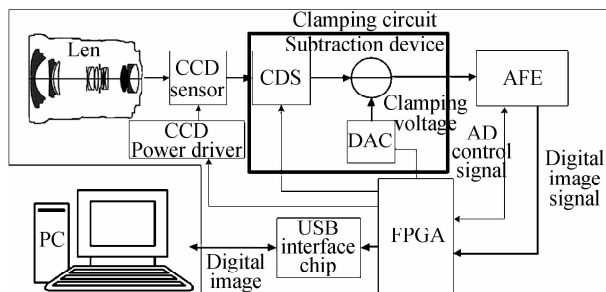


图 6 动态钳位相机原理图

Fig. 6 Dynamic clamp camera schematic

动态钳位相机是在普通 CCD 基础上增加 CCD 模拟图像信号截断功能,用于在模拟信号域去除图像信号中的低电平.截断电路由相关双采样芯片、减法器 and 数模转换器构成;CCD 输出的模拟图像信号经过相关双采样后转换为单端的像素电平信号,FPGA 控制 DAC 产生截断电平,单端像素电平与截断电平相减,实现信号在模拟域的截断功能.

动态钳位相机实物图如图 7.



图 7 动态钳位相机实物图  
Fig.7 Dynamic clamp camera

## 4 实验验证

为了验证本文方法的有效性,在大连星海广场一方公馆 32 层楼的天台进行了大量的户外实验,实验当天是薄雾天气.在薄雾天气条件下进行实验是因为遥感成像时大气的成像光程长,大气程辐射值较大.

实验中首先根据 MORDTRAN 软件计算大气程辐射值,再根据相机的光电转换关系确定钳位电平值.大气程辐射可由大气辐射近似传输计算模型 MORDTRAN 根据能见度等大气参数和太阳高度角、成像距离等参数计算得到.实验拍摄时间为 2016 年 4 月 24 日上午 9:50,当天能见度是 4 km,拍摄距离为 2 650 m,目标经度为  $121.58^\circ$ ,目标纬度为  $38.88^\circ$ ,相机的海拔高度为 100 m,经过 MODTRAN 计算,此时的大气程辐射为  $37.01(\text{W} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$ .

为了确定相机的光电转换关系,利用均匀光源对钳位相机进行标定.首先,调整均匀光源亮度使芯片饱和,测量芯片饱和电压.改变均匀光源的输出亮度,测量芯片的电压值.经过辐射定标,获得芯片输出的电压与输入辐射亮度之间的辐射响应关系如图 8.确定截断电压为 550 mV.

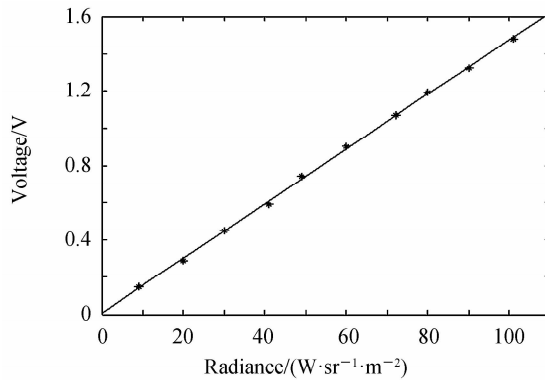


图 8 钳位功能相机响应图  
Fig.8 The response diagram of dynamic clamp camera

首先在钳位电压值设置为 0 的情况下,满足饱和辐亮度的要求,采用固定曝光参数获取多个场景图像;通过 MODTRAN 软件计算当前的大气程辐射值,据此设置钳位电压值,并保持获取图像的最大值不变,根据式(3)确定新的固定的曝光时间和增益,利用上述参数获取图像;为了更好的验证效果,设置钳位电压值为 0,利用上述计算的曝光时间和增益,获取图像.

实验结果如图 9.图中编号③的直方图是与编号①的图像相对应的.图 9(a)为设置钳位值为 0,增益为 0 dB 的图像;图 9(b)为设置钳位值为 550 mV,增益为 4.3 dB 时的图像;图 9(c)为设置钳位值为 0,增益为 4.3 dB 的图像.

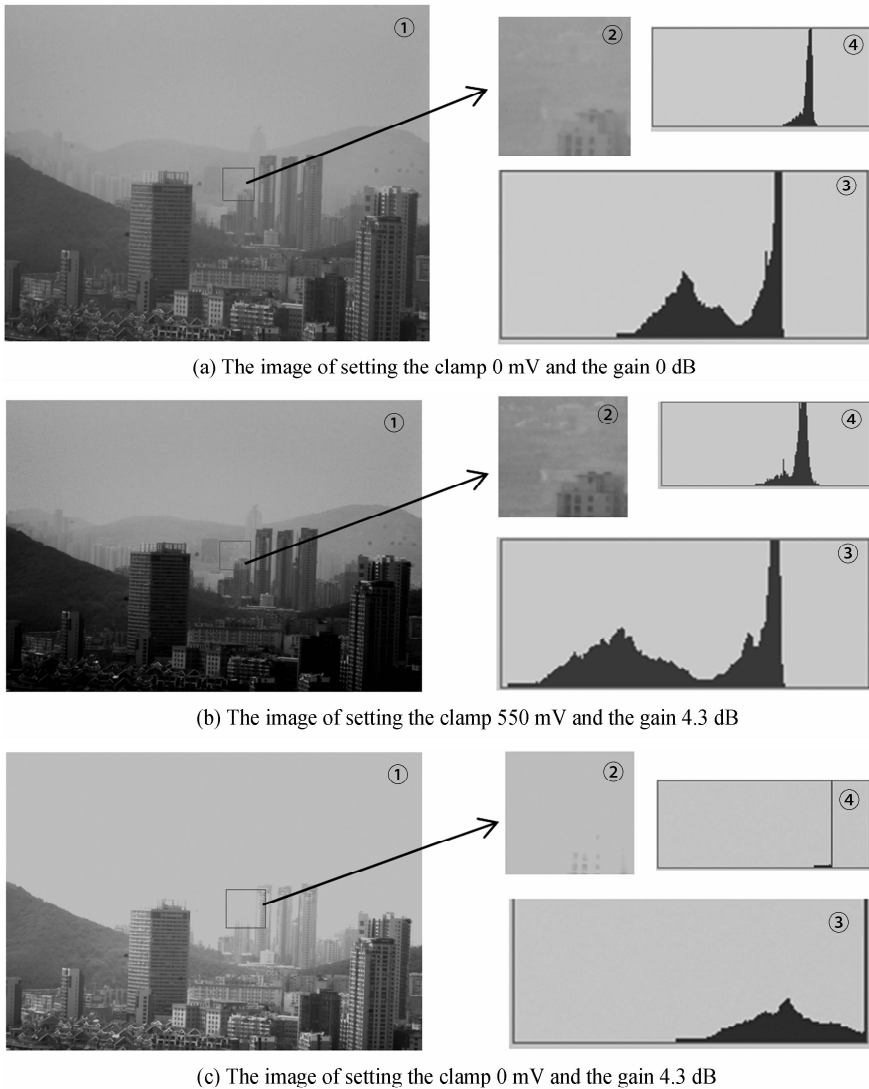


图9 实验结果

Fig. 9 The results of the experiment

从图 9(a)可以看出钳位值为 0 时,由于雾的存在,相机低端信息未能利用,场景信息集中在部分量化区间内,部分细节丢失;从表 1 中可知图像最小灰度值为 78,最大值为 199,图像灰阶范围为 121. 从图 9(b)可以看出,图像低端量化信息得到利用;从表 1 中可知图像的最小灰度值为 3,最大值为 199,图像灰阶范围为 196. 通过图 9(a)和(b)可以看出,在图像最大值相同的情况下,通过设置动态钳位,可使相机低端信息得到利用,图像灰阶范围能够提高 62%.

表 1 图像统计结果

Table 1 Statistic results of image digital numbers

	Max	Min	Gray level	Entropy
Fig. 9(a)	199	78	121	6.059 2
Fig. 9(b)	199	3	196	6.794 5
Fig. 10(a)	190	81	109	4.830 2
Fig. 10(b)	192	3	189	6.214 7
Fig. 10(c)	175	59	116	5.917 8
Fig. 10(d)	180	5	175	6.650 7

从图 9(c)可以看出,在钳位值为 0 时,增益为 4.3 dB,图像中高亮度信息饱和,部分信息丢失. 通过图 9(a)和(b)的比较,在相机中设计动态钳位能够利用相机低端信息,提高图像灰阶范围. 通过图 9(b)和(c)的比较,在相机中设计动态钳位能够采用更大的模拟增益,而使图像不饱和,从而提高辐射分辨率.

通过图 9(a)和(b)的直方图也可以看出,设置钳位电压值能够合理利用相机的低端信息,提高图像的灰

阶范围. 通过比较图像中虚线框部分, 设置钳位电压值后的图像能够设置更大的模拟增益, 提高图像的辐射分辨率, 保留更多的细节信息.

本文中的实验是地面实验, 由于景深的影响, 图像中大气程辐射的值是不同的, 通过设置钳位电压值, 远处去除效果不明显; 而在遥感应用时, 由于成像距离远, 景深的影响可以忽略, 各处大气程辐射相差较小, 所以, 针对景深变化小的局部区域进行了实验验证, 结果如图 10, (a)、(c) 为未设置钳位电压值图像, (b)、(d) 为设置动态钳位后图像. 可以看出, 通设计钳位值, 相机低端量化信息能够得到利用, 图像的细节更加清楚.

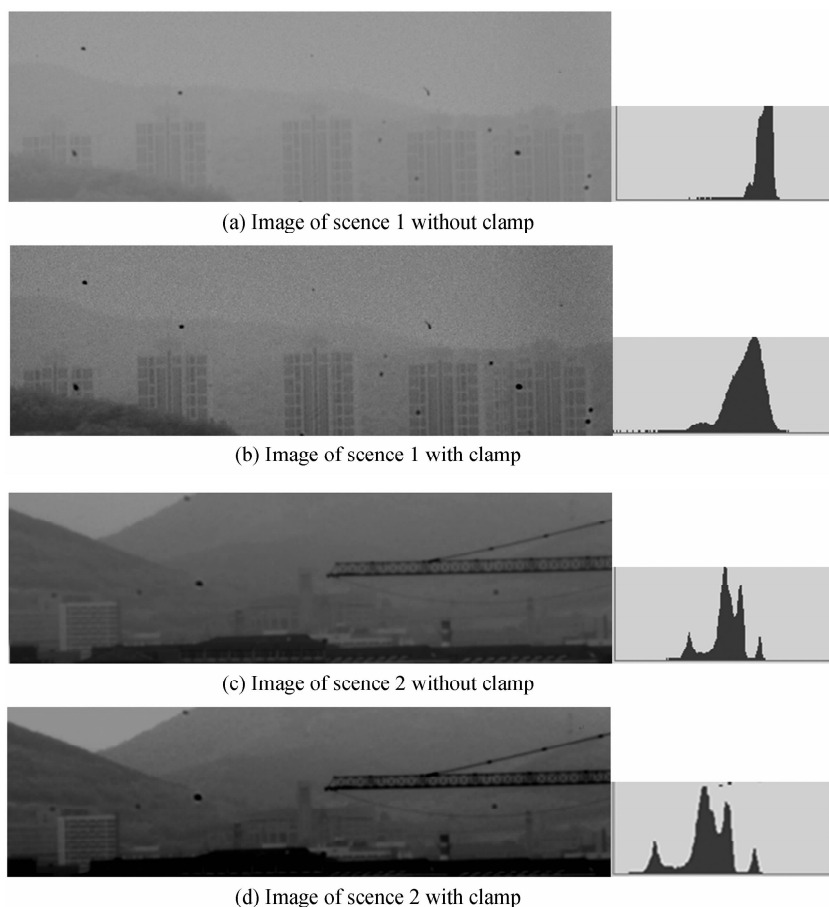


图 10 景深变化小的图像

Fig. 10 Images with small change indepth

## 5 结论

本文提出航天遥感相机的动态钳位方法, 该方法通过在相机的模拟前端对大气程辐射值进行减除, 实现场景信息的充分量化. 分析了大气程辐射对图像灰度层次的影响, 设计并实现了动态钳位相机; 然后在薄雾天气条件下进行大量的验证实验. 实验结果表明, 本文方法可使相机低端信息得到充分利用, 图像的灰阶范围可提高 62%. 在相机中设计动态钳位能够使相机的低端信息得到利用, 用更多的量化位数来表示地物目标信息, 提高辐射分辨率, 保留更多图像的细节信息.

本文为将来遥感相机的设计提出了一种建议, 并进行了初步验证. 目前钳位电压值是根据 MODTRAN 软件的计算结果设定的, 实际应用时, 将对钳位值的设置方法进行进一步研究.

### 参考文献

- [1] 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 TDI CCD 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 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.
- [3] 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.
- [4] CAO Qi-lei, DONG Li-li,ZHAO Ming, *et al.* Adaptive exposure of space camera[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(8):0822003.  
曹旗磊,董丽丽,赵明,等. 空间相机自适应曝光[J]. 光子学报 2016, **45**(8):0822003.
- [5] 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. 空间光学遥感器的辐射传递性校正方法[J]. 光学精密工程,2007, **15**(8): 1186-1190.
- [6] 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.
- [7] 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): 39-4.
- [8] ZHENG Liang-liang, ZHANG Gui-xiang, HE Xiao-jun, *et al.* Research on response model of TDI CCD image system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014,**11**:52-59.  
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,**11**:52-59.
- [9] HE Hong-yan,YANG Ju-kui,QI Wen-wen. Analysis of atmosphere's influence on image quality of remote satellite[J]. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 2011,**02**:42-47.  
何红艳,杨居奎,齐文雯. 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,**02**:42-47.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] YUAN Hang-fei, GUO Yong-fei, QU Li-xin, *et al.* Automatic exposure system of spaceborne camera based onland-atmosphere radiative transfer model[J]. *Acta Optica Sinica*,2016,**02**:255-264.  
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,**02**:255-264.
- [13] JI Xiao-Qiang, DAI Ming, YING Chuan-li, *et al.* Haze removal for aerial degraded images [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011,**07**:1659-1668.  
嵇晓强,戴明,尹传历,等. 航拍降质图像的去雾处理[J]. 光学精密工程,2011,**07**:1659-1668.
- [14] WU Di, ZHU Qin-song. The latest research progress of image dehazing [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2015,**02**:221-239.  
吴迪,朱青松. 图像去雾的最新研究进展[J]. 自动化学报,2015,**02**:221-239.
- [15] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Miami. USA:IEEE, 2009: 1956-1963.
- [16] WANG Rui, LI Rui, LIAN Xiao-qin. Multiple scattering model based image dehazing with superpixel[J]. *Acta Photonica Sinica*,2016,**04**:130-136.  
王睿,李蕊,廉小亲. 基于大气多散射模型和超像素分割的图像去雾[J]. 光子学报,2016,**04**:130-136.
- [17] PAN X, XIE F, JIANG Z, *et al.* Haze removal for a single remote sensing image based on deformed haze imaging model[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2015, **22**(10):1806-1810.