文章编号 1004-924X(2018)04-0944-07

推扫式遥感相机超满阱大动态范围成像

孙 武[1,2*],韩诚山[1],晋学飞[3],吕恒毅[1,2],刘海龙[1]
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学,北京 100049;
3. 吉林大学 中日联谊医院,吉林 长春 130033)

摘要:为了提高推扫式遥感相机的动态范围,对应用 DTDI(Digital domain Time Delay Integration)技术并采用固定积分级数的成像方法以及高动态范围图像的显示方法等进行研究。首先介绍了 DTDI 技术基本原理,然后利用该技术突破传统模拟域 TDI 的满阱电荷限制,获得更高深度、更大动态范围的灰度图像数据,进而拓展了推扫式遥感相机的动态范围。最后结合图像熵和图像灰度分布方差构造评价函数,并将其作为判据选择被关注目标高动态范围图像的最优显示窗口,将信息量最大、层次最为丰富的区间自动显示出来。计算和实验结果表明,当固定积分级数为 64 的时候,推扫式遥感相机的动态范围可以有效地提高 36.124 dB;基于评价函数的显示窗口自动选取方法较人工选择能够更加快速、准确地显示最优结果。本文提出的方法能够基本满足推扫式遥感相机领域大动态范围成像及选择显示的需求。

关 键 词:CMOS;DTDI;超满阱;推扫式遥感相机
中图分类号:V447.3;TN386.5 **文献标识码**:A **doi**:10.3788/OPE.20182604.0944

HDR imaging method of overcoming full well limitation for push-broom remote sensing cameras

SUN Wu[1,2*], HAN Cheng-shan[1], JIN Xue-fei[3], LÜ Heng-yi[1,2], LIU Hai-long[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*
3. *China-Japan Union Hospital of Jilin University, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: sunwuhit@163.com*

Abstract: In order to increase the dynamic range of push-broom remote sensing cameras, An imaging method which applied the DTDI (Digital domain Time Delay Integration) technology with fixed integral stages and display method of HDR (High Dynamic Range) image was investigated in this paper. Firstly, the principle of DTDI was introduced. Secondly, by adopting the DTDI technology with fixed integral stage, the full well limitation could be overcome. Thus, a picture with higher image bit depth and larger dynamic range could be achieved, and then the dynamic range of the push-broom remote sensing camera got extended. Finally, a new evaluation function based on the entropy and histogram

收稿日期:2017-08-22;**修订日期**:2017-09-12.
基金项目:吉林省自然科学基金资助项目(No. 20150520059JH)

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of an image was constructed, and it could be used for automatically selecting the best show window covering the most abundant information and the richest gradation from the original HDR image. The calculation and experimental results indicate that when the fixed integration stage is 64, the dynamic range of the push-broom remote sensing camera increases by 36.124 dB. And the automatic selection by the constructed evaluation function can get the best result more accurately and quickly than the artificial selection. The method proposed in this paper can meet the demands of HDR imaging and display in the field of push-broom remote sensing cameras.

Key words: Complementary Metal Oxide Semiconductor(CMOS); Digital domain Time Delay Integration(DTDI); overcome the limit of full well; push-broom remote sensing cameras

1　引　言

在航天遥感领域，不论是时间延迟积分电荷耦合器件(Time Delay Integration Charge Coupled Device，TDI CCD)探测器还是 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)探测器，动态范围大都在 60～80 dB，与实际的目标场景中大于 180 dB[1]的动态范围相比差距较大，直接用这种探测器会损失很多目标场景中的信息。

目前虽然有对于提高探测器本身动态范围的尝试和努力，比如李兆涵[2]设计了超宽动态范围图像传感器，动态范围高达 167.1 dB，但存在暗噪声大，信号干扰强等多种问题，设计与流片远未达到成熟可应用的程度。

在相机和目标场景之间没有相对运动的情况下，提高相机动态范围的常规方法是多曝光融合算法[3]：Robertson[4]等提出了对多幅不同曝光时间的图像加权平均得到新的大动态范围图像，但像素灰度值与真实场景的辐照度没有明确的关系；Debevec 等[5]提出以不同的曝光时间对同一场景进行多次曝光，并根据恢复出来的相机响应函数将多个图像融合成为一个大动态范围的图像，所得到的图像灰度值仍与真实场景的辐照度成比例；此后包括 Mei[6]在内的多位学者对 Debevec 提出的方法进行了补充和修正，使原方法适应性更强；李卫中[7]等也针对图像的细节提出了新的多曝光融合算法。

Huo 等[8]提出使用单幅小动态范围图像，通过对原始的单幅低动态范围图像进行相机相应函数的逆运算，估计出高动态范围的图像，这种办法能够在一定程度上提高对比度的同时保留原图像的细节，但是准确度较差，仍在探索阶段。

在航天推扫式遥感相机领域，尤其是高分辨率航天相机，其运行轨道普遍较低，相机和场景之间存在高速的相对运动，传统的多曝光融合算法不再适用。针对这个问题，薛旭成[9]等提出应用双排 TDI CCD，并将其积分级数设为高低两个数值，将所获得的两幅图像融合为一幅大动态范围图像，能够将相机的动态范围提高大概 15 dB。但是这个方法成本高，电路复杂，功耗也大，同样还增加了发射重量等。

本文提出通过使用固定积分级数 DTDI (Digital domain Time Delay Integration)技术，突破满阱电荷的限制，达到有效拓展相机的动态范围的目的，同时可以省去调整积分级数的操作。根据计算，64 级的固定积分级数数字 TDI 成像方法可以将动态范围提高约 36 dB。

2　固定积分级数 DTDI 拓展动态范围工作原理

2.1　DTDI 技术原理

在推扫成像领域等相机和场景之间高速相对运动的的情况，入瞳辐亮度很低，TDI CCD 探测器可以通过累加多级像元的光生电荷来克服这一困难。由于是对电荷的累加，通常还被称作模拟域 TDI 技术。与之相对应的是数字域 TDI，即 DTDI 技术，该技术的本质是面阵 CMOS 探测器的特殊应用模式。在 DTDI 技术中，每个像元产生的电荷都被转换为像素值，然后再将同一列像元的像素值加在一起作为输出值。

图 1 展示了一个 $M\times N$ 像元 CMOS 应用 DTDI 技术对目标中的一个点推扫成像的过程：对于目标场景中的一个固定的点 α_j $(1\leqslant j\leqslant N)$，

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

首先是 CMOS 传感器第 1 行中的第 j 个像元($1\leqslant j\leqslant N$)对其成像;随着相机向前运动,第 2 行的第 j 个像元 v_{2j} 对该点成像;然后是第 3 行中的第 j 个像元 v_{3j},…,依此类推,直到第 M 行第 j 个像元 v_{Mj} 对点 a_j 成像。

在这个过程中,对于同一个目标点 a_j,可以获得 M 个像素值,可以把它们的累加值 $\sum_{i=1}^{M} v_{ij}$ 作为该目标点的像素值。随着相机继续向前推扫,就可以获得所扫过的区域的图像。以上就是 DTDI 成像技术的工作原理。

与 TDI CCD 相比,DTDI CMOS 成像技术除了具有低功耗、电路简单[10-11]等优势外,在工作时没有电荷水平转移和电荷累加的过程,因此受到满阱电荷的限制就小很多。只要单个的像元没有饱和,输出就不会饱和。对于满阱电荷数相同的 TDI CCD 相机和 DTDI CMOS 相机而言,后者可以获取更亮目标的图像而不至于饱和。

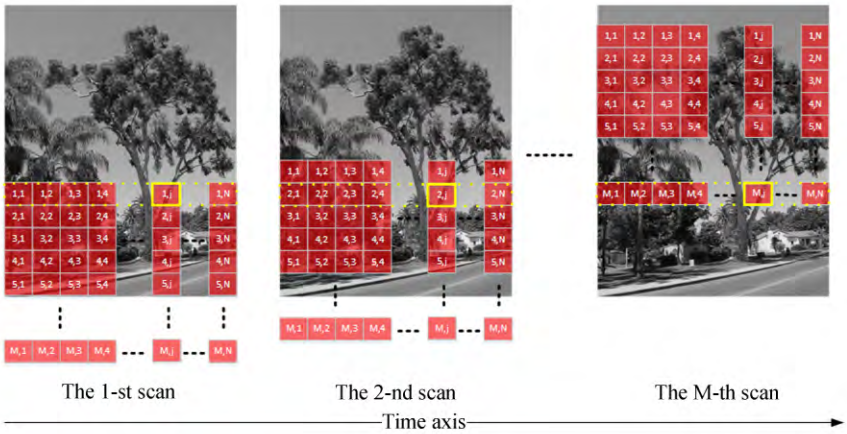


图 1 $M\times N$ 像元面阵 CMOS 的 DTDI 成像过程

Fig. 1 DTDI imaging process of CMOS sensor with $M\times N$ pixels

2.2 固定积分级数 DTDI 动态范围拓展方法

对于 TDI CCD 相机而言,要针对太阳高角、地面反照率等多种因素及时调整积分级数,以获得较好的图像效果,既能观测到目标,又不致图像饱和,以达到适度曝光的目的。传统的遥感相机应用中,一般选择满足 TDI CCD 不饱和的最大积分级数作为成像时的积分级数[12-13]以避免光生电荷超出像元满阱电荷数造成饱和或溢出。

本文提出一个固定积分级数 DTDI 动态范围拓展方法:设置一个较高的数值作为 DTDI 成像时的固定的积分级数,实现动态范围的拓展。使用该方法后,相机动态范围拓展量的分析如下:

对于一个 $M\times N$ 像元的 CMOS,有 M 行像元,所以可以直接将积分级数设为 m($1\leqslant m\leqslant M$)。相机可探测的最大能量是单个像元可探测最大能量的 m 倍:

$$E_{\text{camera_max}}=m\cdot E_{\text{pixel_max}}. \tag{1}$$

而相机可探测的最小能量和单个像元可以探测的最小能量相同:

$$E_{\text{camera_min}}=E_{\text{pixel_min}}. \tag{2}$$

相机的动态范围可以表示为 Ψ_{camera}:

$$\Psi_{\text{camera}}=20\lg\left(\frac{E_{\text{camera_max}}}{E_{\text{camera_min}}}\right). \tag{3}$$

与单个像元相比较,相机的动态范围增加量为:

$$\Delta\Psi=\Psi_{\text{camera}}-\Psi_{\text{pixel}}. \tag{4}$$

由公式(1)~(4)可得

$$\Delta\Psi=20\lg(m), \tag{5}$$

当 $m=64$,动态范围提高量为 36.124 dB。

固定积分级数 DTDI 技术动态范围拓展方法的优势在于,设置较高的固定积分级数时,可以通过多次数字量的叠加来实现对能量的累积,突破满阱电荷的限制,提高推扫式遥感相机的动态范围,获取层次更丰富的场景信息。同时不再需要调整相机的积分级数,避免预设积分级数时难以兼顾场景中的亮、暗细节的问题,也解决了积分级数设置不合理造成过曝光或者欠曝光的问题。

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3　大动态范围图像的选择显示

通过上述方法，可以获取一个 14 位的高动态范围图像。但是常规的显示器一般是 8 bit 显示器，不能直接显示高动态范围的图像。直方图调整，双边滤波等技术[14]可以将其变换为 8 bit 图像，但是这种方法会导致暗目标信息的损失或者非线性等问题，不适用于航天遥感应用。

为了更加真实地显示图像灰度变化的情况，可以选择一个滑动窗口来显示高低不同的 8 bit 灰度范围。如图 2 所示，其中 Γ 表示滑动窗口的最低位。

3.1　人工选择显示窗口方法

一般而言，观测辐亮度比较大的目标需要选取位置较低的 8 bit 窗口；同理，观测辐亮度比较小的目标时选取位置比较高的滑动窗口。可以根据人工的对比判断选择一个最佳的滑动窗口来观测细节。

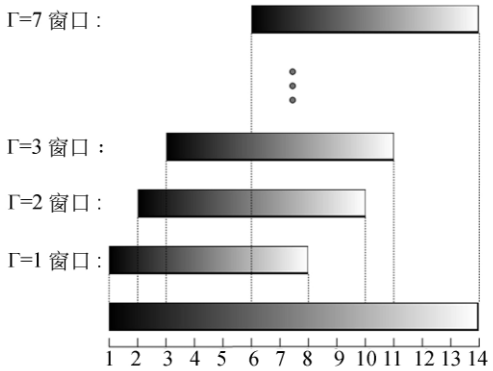


图 2　14 bit 图像灰度变化示意图

Fig. 2　Sketch map of 14 bit gray level range

3.2　自动选择显示窗口方法

在没有人工选择的必要时，可以设计评价函数，并利用该评价函数自动选择合适的显示窗口，将信息量大、信息层次丰富的一段图像显示出来。现有的自动选择显示窗口方法多是根据图像的灰度值均值或者直方图[15]等单一参数进行优选，无法兼顾图像所包含信息量、信息层次这两个方面的要求。

熵是指体系混乱的程度，代表了该组数据中所含信息量的多少，在图像处理中熵表示图像中包含的平均信息量[15]；而图像处理的理论表明，若一幅图像的像素占有全部可能的的灰度级并且分布均匀，则这样的图像有高对比度和多变的灰度色调[16]，故图像像素灰度值分布的方差可以作为图像信息层次丰富程度的指征。综合考虑图像熵和灰度值分布方差这两个因素可以选取到满足要求的最佳显示窗口。

图像熵 H 的定义是：

$$H(\Gamma)=-\sum_{i=0}^{FS} p_i \cdot \log_2(p_i), \tag{6}$$

其中：FS 是满量程灰度值，p_i 表示灰度值等于 i 的像素在图像中出现的频率；$H(\Gamma)$ 是一个正值，其大小与图像所含信息量的多少成正相关[17-18]。

对于图像的灰度分布，可以表示为：

$$\rho(\tau_k)=\varepsilon_k. \tag{7}$$

图像灰度值的方差对每个像元的平均值可以表示为：

$$\omega(\Gamma)=\frac{\sigma^2(\rho(\tau_k))}{M \cdot N}, \tag{8}$$

$\omega(\Gamma)$ 越小说明图像所包含的信息层次越丰富。

同时利用图像熵和图像灰度值方差这两个参数，构造一个新的函数 $G(\Gamma)$，作为选取滑动显示窗口的判别依据：

$$G(\Gamma)=\frac{H(\Gamma)}{\omega(\Gamma)}, \tag{9}$$

显然 $G(\Gamma)$ 越大，说明对应图像包含信息越多，信息层次越丰富。$G(\Gamma)$ 最大的显示窗口即为显示图像的最佳窗口。

4　实验与结果

4.1　图像采集

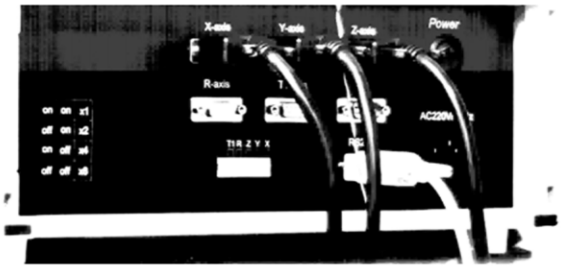
选取一台面阵 CMOS 相机中的 900×2 050 个像元用于本实验，进行 DTDI 固定积分级数成像实验。固定积分级数选取为 64 级，等效于对同一场景重复成像 64 次。这部分采集得到了 64 幅 8 bit 图像，作为数字 TDI 的原始数据，然后可以按照 DTDI 的原理累加，得到一幅 14 bit 的图像数据。

4.2　滑动窗口的选取与显示

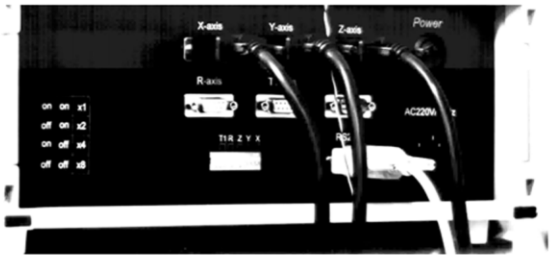
按照 3.1 节中介绍的方法，Γ 从 1 取到 7 的时候，可以得到 7 幅图像，如图 3(a)～(g)所示。根据观察可以发现，第 4 幅包含的信息最多，层次最为丰富。

对上面不同滑动窗口对应的显示结果进行评

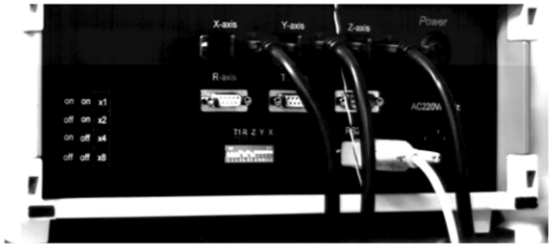
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



(a)$\Gamma=1$



(b)$\Gamma=2$



(c)$\Gamma=3$

(d)$\Gamma=4$

(e)$\Gamma=5$

(f)$\Gamma=6$

(g)$\Gamma=7$

图 3　不同显示窗口对应的 8 位图像

Fig. 3　8 bit images corresponding to different show windows

价，图像熵 $H(\Gamma)$、灰度方差对像元数的平均值 $\omega(\Gamma)$ 以及本文构造评价函数 $G(\Gamma)$ 的数值如表 1 所示。由表 1 可以看出，当 $\Gamma=4$ 时，$G(\Gamma)$ 取最大值。自动判别的函数说明，第 4 幅图是所包含信息量最多，层次最为丰富的一个窗口。这与人工视觉判断选择的最优结果一致，能够满足需求。

表 1　不同滑动窗口对应的图像评价结果

Tab. 1　Evaluation result of different slide show window

Γ	$H(\Gamma)$	$\omega(\Gamma)$	$G(\Gamma)$
1	2.45	1 918	0.001 28
2	2.51	1 851	0.001 36
3	2.91	1 652	0.001 76
4	3.19	1 613	0.001 98
5	2.93	1 738	0.001 69
6	2.53	1 940	0.001 30
7	2.22	2 163	0.001 03

5　结　论

固定积分级数数字 TDI 技术成像方法应用于航天推扫式遥感相机的时候，可以有效地提高相机的动态范围。固定积分级数取值为 64 的时

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

候，相机的动态范围相应可以提高 36.124 dB。

本文提出的滑动显示窗口也可以有针对性的选择所需要重点关注的局部信息。另一方面，可以选择部分区域，通过本文提出的自动算法，将针对此部分区域选择一个最优的窗口进行显示，其显示结果与人工选择的结果一致性比较好。

参考文献：

[1] 王春萌. 多曝光图像融合关键技术的研究[D]. 济南：山东大学，2015：3.
WANG CH M. *Research on key technologies of exposure fusion*[D]. Jinan: Shandong University, 2015: 3. (in Chinese)

[2] 李兆涵. 超宽动态范围图像传感器的研究[D]. 长春：吉林大学，2016：83-84.
LI ZH H. *Research on ultra wide dynamic range image sensor*[D]. Changchun: Jilin University, 2016: 83-84. (in Chinese)

[3] 郭剑桥. 多曝光融合算法研究及 HDR 图像合成与色调映射算法设计实现[D]. 合肥：中国科学技术大学，2016：3.
GUO J Q. *Research of multi-exposure fusion algorithm and design and implementation of HDR image merging and tone mapping algorithms*[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 3. (in Chinese)

[4] ROBERTSON M A, BORMAN S, STEVENSON R L. Dynamic range improvement through multiple exposures[C]. *Proceedings of* 1999 *International Conference on Image Processing*, *IEEE*, 1999: 159-163.

[5] DEBEVEC P E, MALIK J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs[C]. *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, *ACM*, 1997: 369-378.

[6] MEI Y, QIU G. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs revisited: a simple and important fix[C]. *Proceedings of* 2013 *Seventh International Conference on Image and Graphics*, *IEEE*, 2013: 23-28.

[7] 李卫中，易本顺，邱康，等. 细节保留的多曝光图像融合[J]. 光学 精密工程，2016，24(9)：2283-2292.
LI W ZH, YI B SH, QIU K, *et al*.. Detail preserving multi-exposure image fusion[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(9): 2283-2292. (in Chinese)

[8] HUO Y Q, ZHANG X D. Single image-based HDR imaging with CRF estimation[C]. *Proceedings of* 2016 *International Conference on Communication Problem-Solving*, *IEEE*, 2016: 1-3.

[9] 薛旭成，韩诚山，薛栋林，等. 应用双排 TDI CCD 提高空间推扫遥感相机动态范围[J]. 光学 精密工程，2012，20(12)：2791-2795.
XUE X CH, HAN CH SH, XUE D L, *et al*.. Increasing dynamic range of space push-broom remote sensing camera by two-row TDI CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(12): 2791-2795. (in Chinese)

[10] CEYLAN O, KAYAHAN H, YAZICI M, *et al*.. Implementation of pixel level digital TDI for scanning type LWIR FPAs[J]. *SPIE*, 2014, 9070: 7.

[11] 孙宏海，何舒文，吴培，等. 高动态科学级 CMOS 相机设计与成像分析[J]. 液晶与显示，2017，32(3)：240-248.
SUN H H, HE SH W, WU P, *et al*.. Design and imaging analysis of high dynamics scientific CMOS camera[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(3): 240-248. (in Chinese)

[12] 吕恒毅，刘杨，薛旭成. 遥感相机中时间延时积分电荷耦合器件积分级数的最优选择[J]. 光子学报，2012，41(6)：642-648.
LÜ H Y, LIU Y, XUE X CH. Selecting the optimal integral grade for TDI CCD in remote sensing cameras[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(6): 642-648. (in Chinese)

[13] 刘则洵，万志，李宪圣，等. 时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素[J]. 光学 精密工程，2015，23(7)：1829-1837.
LIU Z X, WAN ZH, LI X SH, *et al*.. Influence factors on SNR of TDICCD space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1829-1837. (in Chinese)

[14] 方竞宇. 高动态范围彩色图像捕获与显示方法及技术研究[D]. 杭州：浙江大学，2016：78-82.
FANG J Y. *Study on methodology and technology*

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

of acquisition and rendering for high dynamic range color images[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016: 78-82. (in Chinese)

[15] **袁方. 基于智能车的自动曝光研究[D]. 武汉: 湖北工业大学**, 2016: 14-28.
YUAN F. *Research of automatic exposure based on intelligent vehicle*[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2016: 14-28. (in Chinese)

[16] GONZALEZ R C, WOODS R E. *Digital Image Processing* [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2010.

[17] **潘锋,闫贝贝,肖文,等. 基于数学形态学的数字全息再现像融合方法[J]. 中国光学**, 2015, 8(1):64.
PAN F, YAN B B, XIAO W, *et al*.. Digital holographic reconstruction image fusion based on mathematical morphology [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1):64. (in Chinese)

[18] **王浩,张叶,沈宏海,等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学**, 2017, 10(14):445-446.
WANG H, ZHANG Y, SHEN H H, *et al*.. Review of image enhancement algorithms [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(14):445-446. (in Chinese)

作者简介:

孙 武(1990—),**男,山东滕州人,博士研究生,2013年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事航天遥感成像电子学及图像处理的研究**。E-mail: sunwuhit@163.com

导师简介:

韩诚山(1972—),**男,辽宁盖州人,博士,研究员,博士生导师**。1993**年于吉林工业大学获得学士学位**,1998**年**、2004**年分别于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士、博士学位,主要从事空间相机自动控制技术研究**。E-mail: xuan_han@yahoo.com.cn

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net