

# TDICCD 相机在轨成像参数自主调整方法

曹启鹏 董小静 韩杏子 尹 欢

(航天东方红卫星有限公司, 北京, 100094)

**摘要:** 为了改善光学遥感卫星的成像质量,提升卫星操控的灵活性,基于遥感成像理论,提出了依据太阳高度角的卫星在轨成像参数自主调整方法。文中首先讨论了影响卫星遥感成像质量的因素,分析了入瞳辐亮度随太阳高度角的变化规律及在不同侧摆角时,一个轨道周期内相机积分时间的变化范围,并据此建立了太阳高度角、侧摆角与积分级数、增益的对应关系。然后分析了太阳高度角和侧摆角的最佳分挡策略,最终得到了可用于卫星在轨成像参数自主调整的二维查找表,以实现卫星在轨成像参数自主调整。利用该方法可提升图像的辐射质量,极大减少了地面上注的数据量。

**关键词:** 成像参数; 太阳高度角; 积分级数; 增益

中图分类号: V475.3; TN386.5

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2019)S-0073-05

## Autonomous Imaging Parameters' Adjustment for Space TDICCD Camera

CAO Qipeng, DONG Xiaojing, HAN Xingzi, YIN Huan

(DFH Satellite Co. Ltd., Beijing, 100094, China)

**Abstract:** A method for autonomous imaging parameters' adjustment based on solar elevation from remote sensing theory is proposed in this paper. The factors which influence imaging quality and the relationship between apparent radiance and solar elevation are firstly discussed. Then, the integral time change under different roll angles in one orbital period and the internal links among solar elevation, roll angle, integral grade and gain are analyzed. Finally, the best grading strategy is obtained and the two-dimensional lookup table which can be used for the autonomous imaging parameters' adjustment is built. The use of two-dimensional lookup table improves the image radiation quality and fairly reduces satellite's control workload.

**Key words:** imaging parameter; solar elevation; integral grade; gain

由于时间延时积分型电荷耦合器件(Time delay integration charge-coupled device, TDICCD)能够利用多级光敏元对同一个运动目标进行多次积分,使得成像系统的信噪比、动态范围、体积和重量等多个参数得到有效改善,所以当前国内外高分辨率遥感卫星普遍采用 TDICCD 作为成像器件<sup>[1]</sup>。

随着高分辨率成像卫星的快速发展,用户对卫星操控的便利性和成像质量的要求越来越高<sup>[2-4]</sup>,这就要求卫星能够具有根据成像条件对相机参数

进行调整的能力<sup>[5]</sup>。特别是卫星进行长条带成像时,如按其中某个摄影点进行一次参数设置,在设置后的一次任务内不能调整,不够准确且费时费力<sup>[6]</sup>。如果每次成像的工作参数(积分级数和增益)能够在星上进行自主设置,可以解决长达几分钟的成像任务仅用一组成像参数带来的图像动态范围未充分利用的问题,极大提高卫星参数的设置效率。本文针对此问题开展了在轨成像参数自动调整研究<sup>[7]</sup>。

收稿日期: 2019-04-10; 修订日期: 2019-06-15

通信作者: 曹启鹏, 男, 高级工程师, E-mail: caoqipeng2004@126.com。

引用格式: 曹启鹏, 董小静, 韩杏子, 等. TDICCD 相机在轨成像参数自主调整方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51(增刊): 73-77. CAO Qipeng, DONG Xiaojing, HAN Xingzi, et al. Autonomous Imaging Parameters' Adjustment for Space TDICCD Camera[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(S): 73-77.

通过开展针对图像动态范围的在轨成像参数自动调整策略研究,可提升光学遥感卫星在轨成像参数设置的灵活性和自动化程度,使卫星图像的动态范围更加合理,从而提高图像的辐射质量。

## 1 参数调整原理和方法

### 1.1 调整参数选择

从成像质量的角度出发,根据遥感成像理论,分析 TDICCD 相机的参数与动态范围之间的关系<sup>[8]</sup>。相机的绝对辐射定标方程可以表示为

$$DN = aGL + b \quad (1)$$

式中:  $DN$  为图像输出灰度值;  $a$  为绝对定标系统参数(单位为  $1/(Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1})$ );  $G$  为模拟增益,与积分级数、增益和积分时间有关;  $L$  为入瞳辐亮度(单位为  $Wm^{-2}sr^{-1}\mu m^{-1}$ );  $b$  为偏置量。

从式(1)可知,相机输出图像的灰度值  $DN$  与相机的入瞳辐亮度  $L$ 、积分级数、增益和积分时间有关。而入瞳辐亮度  $L$  与拍摄地的地物特性(主要为地面反射率  $\rho$ ) 和太阳高度角  $\delta$  有关。相机输出图像的灰度值代表了图像动态范围的大小,因此影响图像动态范围的因素有地物的反射率  $\rho$ 、太阳高度角  $\delta$ 、积分级数、增益和积分时间。

相机的信号电压计算公式为<sup>[9]</sup>

$$V_s = \frac{100(1 - A^2)}{4F^2} E(\lambda) \rho(\lambda) \tau_a(\lambda) \tau_o(\lambda) \Delta\lambda R(\lambda) \cdot t \quad (2)$$

式中:  $A$  为镜头的遮拦比,对于透射或离轴反射镜头  $A=0$ ;  $F$  为镜头相对孔径的倒数;  $E(\lambda)$  为地面目标光谱辐照度;  $\rho(\lambda)$  为地面目标反射率;  $\tau_a(\lambda)$  为大气透过率;  $\tau_o(\lambda)$  为相机光学透过率;  $\Delta\lambda$  为谱段宽度;  $R(\lambda)$  为相机的响应度;  $t$  为相机的积分时间。

对于某一相机,在地物反射率固定时,则有

$$V_s \propto E(\lambda) \tau_o(\lambda) \cdot t \quad (3)$$

$E(\lambda) \tau_o(\lambda)$  仅与太阳高度角相关,因此信号电压  $V_s$  仅与太阳高度角和积分时间相关。

在太阳高度角  $\delta$ 、积分级数、增益和积分时间  $t$  这些参数中,太阳高度角  $\delta$  和探测器的积分时间  $t$  与卫星的星历、姿态相关,随星历、姿态变化而变化<sup>[10]</sup>;在轨成像时,太阳高度角  $\delta$  是随着地面目标地理位置变化而变化;积分时间需与卫星的速度、姿态,摄影点的高程相匹配不能任意调整。相机的积分级数和增益为设计值,可通过软件进行设置,以使得图像的灰度值能合理分布。

因此,在图像动态范围的影响因素中,只能选择相机的积分级数和增益作为调整因素。

### 1.2 调整方法

在一个轨道周期中,太阳高度角和积分时间实时变化,因而在设计积分级数和增益的参数时,需要建立太阳高度角和积分时间与积分级数和增益的映射关系,即当在某一组太阳高度角和积分时间时,设置其对应的积分级数和增益,使图像的灰度值接近动态范围的上限。

相机的积分时间公式为

$$t_{int} = GSD / V_i \quad (4)$$

式中:  $GSD$  为地面分辨率;  $V_i$  为对应的地速,具体为

$$V_i = \left[ \frac{1.272 \times 10^{14}}{(6.371 \times 10^6 + l)^{3/2}} + 4.633 \times 10^2 \cos \Omega \cos \epsilon \right] \frac{f}{l} \quad (5)$$

式中:  $\Omega$  为轨道倾角;  $\epsilon$  为照相时的纬度;  $f$  为相机焦距;  $l$  为卫星与摄影点之间的距离,对于可侧摆的卫星,可以表示为

$$l = H / \cos \theta \quad (6)$$

式中:  $\theta$  为侧摆角,  $H$  为星下点的高度。

在式(4,5)中,当相机一定时,  $GSD$ ,  $f$  为确定值。由于遥感卫星的轨道高度为几百千米,则  $\frac{1.272 \times 10^{14}}{(6.371 \times 10^6 + l)^{3/2}}$  量级为  $10^5$ ; 而对于多数太阳

同步轨道遥感卫星,  $\Omega$  一般为  $97^\circ \sim 99^\circ$ , 则  $\cos \Omega$  的范围为  $-0.12 \sim -0.16$ 。那么  $4.633 \times 10^2 \cos \Omega \cos \epsilon$  量级为 100, 则其与  $\frac{1.272 \times 10^{14}}{(6.371 \times 10^6 + l)^{3/2}}$  相比为小

量。当卫星侧摆角  $\theta$  变化时,  $l$  变化较大,故对于某特定轨道,积分时间的主要影响因素为侧摆角,即将侧摆角和积分时间关联起来,进而可以将太阳高度角和积分时间与积分级数和增益的映射关系,可变为太阳高度角和侧摆角与积分级数和增益的映射关系。

工程实现时,可以将太阳高度角和侧摆角与积分级数和增益的对应关系,预先存储于卫星上,根据卫星实时计算的太阳高度角和积分时间,卫星自主将成像参数(积分级数和增益)发送给相机,以实现相机成像参数的自主调整。

根据上述分析,核心为建立太阳高度角、侧摆角与积分级数、增益的对应关系,即建立一个太阳高度角和侧摆角与积分级数和增益的二维查找表。

在建立查找表时,需进行以下3个方面的研究: (1) 分析在不同侧摆角时,一个轨道周期内相机积分时间的变化范围并进行分档; (2) 分析入瞳

辐亮度随太阳高度角的变化规律,进行分档;(3)根据不同侧摆角和太阳高度角,给出在轨成像时积分级数增益设置策略。

2 仿真分析及校验

仿真条件如下:  
轨道类型:太阳同步轨道;  
轨道高度:645 km;  
降交点地方时:10:30 am;  
成像弧段:降轨段,阳照区成像;  
相机谱段:0.45~0.89 μm;  
成像条件:最大太阳高度角为70°,地物反射率0.65,无云和气溶胶;

相机积分级数为: $nM$ ( $M$ 为TDICCD的最小使用级数; $n$ 为倍数, $n=1,2,\cdots,10$ );增益可设置的最小值不超过 $0.7N$ ,其中 $N$ 为电路增益基数。

2.1 不同侧摆角时相机积分时间的变化

由于相机成像时,卫星可能处于不同的侧摆角,而不同的侧摆角度对应的积分时间不同。采用STK软件分别仿真了每个轨道周期内各侧摆角(侧摆角范围为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ,每隔 $1^{\circ}$ 仿真一次)成像的对应的积分时间范围。

为了缩小二维查找表的规模,根据积分时间的仿真结果,将 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 的侧摆角分为若干小范围档,如表1所示(各角度档内最小、最大积分时间与平均值的相对偏差不超过3%)。

表1 侧摆角与积分时间的对应关系  
Tab.1 Correspondence between roll angle and integral time

侧摆角/(°)	最小积分时间/ms	最大积分时间/ms	最小、大值与平均值的相对偏差/%	最小值与平均值的比例/%
0~10	0.148 4	0.157 0	2.82	97.18
10~15	0.157 0	0.160 7	1.20	98.80
15~20	0.160 7	0.166 0	1.70	98.30
20~25	0.166 0	0.173 2	2.20	97.80
25~30	0.173 2	0.182 9	2.70	97.30

2.2 入瞳辐亮度与太阳高度角的关系

根据前面的仿真条件,采用MODTRAN软件分析出不同高度角时相机入瞳处的辐亮度,结果见图1。

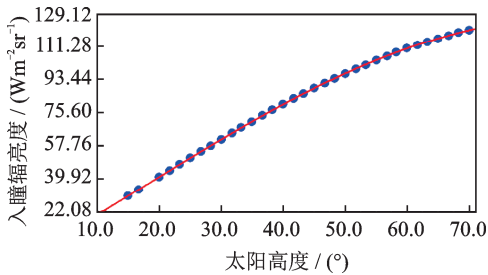


图1 相机入瞳辐亮度与太阳高度角之间的关系图  
Fig.1 Illustration of remote sensing radiances and solar altitude

为了后续分析,需对入瞳辐亮度 $L$ 与太阳高度角 $\delta$ 的关系进行数学拟合,其表达式为

$$L=32.519\ 82+94.878\ 71\cos(0.021\ 734\delta+4.369\ 61)\tag{7}$$

2.3 太阳高度角的分档策略

同理,为了缩小二维查找表的规模,需要将高度角进行分档设计。约定以某一太阳高度角,某一积分时间,地物最大反射率为输入条件,使相机其输出的灰度值不超过饱和值84%;根据前面分析,一轨内积分时间相对于平均值变化小于3%(即最大值为平均值的1.03倍)。因此,为了使得在一组

参数内相机输出的灰度值不饱和,则应满足以下关系

$$0.84\times(1+x)\times1.03\leqslant1\tag{8}$$

式中 $x$ 为辐亮度值允许的相对变化量。

由式(8)可知, $x\leqslant15.5\%$ ,即辐亮度往大的方向变化不超过15.5%。根据式(7),以变化15.5%为阈值,则可将高度角分为10挡,如表2所示。

表2 太阳高度角分档情况

高度角范围/(°)	偏差值/%
70~55.3	15.31
55.3~46	15.22
46~39	15.37
39~33.5	15.00
33.5~28.9	15.12
28.9~25	15.17
25~21.7	15.01
21.7~18.8	15.35
18.8~16.3	15.32
16.3~15	8.67

2.4 增益级数设置策略

以太阳高度角 $55.3^{\circ}$ 时的情况为例,积分时间为侧摆角 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 对应动态范围的84%,假设此时的相机输出值为1(归一化值),且此时对应的积分

级数和增益分别为 $M, N$ (实际工程中可通过辐射定标试验确定)。若采用相同的积分级数和增益,则在不同的太阳高度角和侧摆角度下,相机输出值 $S$ 可表示为

$$S = \frac{L_i}{L_{55.3^\circ}} \times \frac{t_j}{t_{25^\circ \sim 30^\circ}} \times M \times N \quad (9)$$

式中 $L_i$ 表示太阳高度角某档中辐亮度的下边界, $t_j$ 为积分时间的平均值。

根据式(9)和表3可以得到当积分级数和增益相同时,不同侧摆角和太阳高度角相机输出的归一化值,如表3所示。

表 3 归一化相机动态范围输出

Tab. 3 Normalization dynamic range of camera sensor

高度角/(°)	侧摆角/(°)				
	0~10	10~15	15~20	20~25	25~30
70~55.3	0.857 624	0.892 165	0.917 439	0.952 541	1.000 000
55.3~46	0.744 343	0.774 322	0.796 258	0.826 723	0.867 913
46~39	0.645 154	0.671 138	0.690 150	0.716 556	0.752 258
39~33.5	0.560 978	0.583 572	0.600 104	0.623 064	0.654 107
33.5~28.9	0.487 309	0.506 935	0.521 296	0.541 241	0.568 208
28.9~25	0.423 101	0.440 141	0.452 610	0.469 927	0.493 340
25~21.7	0.367 880	0.382 696	0.393 538	0.408 595	0.428 952
21.7~18.8	0.318 917	0.331 762	0.341 160	0.354 213	0.371 861
18.8~16.3	0.276 537	0.287 675	0.295 824	0.307 143	0.322 446
16.3~15	0.254 481	0.264 730	0.272 230	0.282 646	0.296 728

为了充分利用好相机的动态范围,对于TDICCD相机,为了提高信噪比,一般优先考虑调整积分级数参数,其次再调整增益参数,增益调整为积分级数调整的补充<sup>[10]</sup>。

当 $S$ 接近1,则积分级数 $nM$ 中的 $n$ 为

$$n = \text{INT} \left( \frac{L_{55.3^\circ} \cdot t_{25^\circ \sim 30^\circ}}{\xi L_i \cdot t_j} \right) \quad (10)$$

式中:INT为取整函数, $\xi$ 为增益 $N$ 最小可调整的系数,本文中取 $\xi=0.7$ 。

同时,此时对应的归一化增益 $N$ 的系数 $y$ 可表示为

$$y \leq \frac{L_{55.3^\circ} \cdot t_{25^\circ \sim 30^\circ}}{n L_i \cdot t_j} \quad (11)$$

根据式(10,11),结合表3可设计查找表如表4所示。

表 4 增益级数输出查找表

Tab. 4 Camera gain and series output

高度角/(°)	侧摆角/(°)				
	0~10	10~15	15~20	20~25	25~30
70~55.3	$M-1.166\ 0\ N$	$M-1.120\ 8\ N$	$M-1.089\ 9\ N$	$M-1.049\ 8\ N$	$M-N$
55.3~46	$M-1.343\ 4\ N$	$M-1.291\ 4\ N$	$M-1.255\ 8\ N$	$M-1.209\ 5\ N$	$M-1.152\ 1\ N$
46~39	$2M-0.775\ 0\ N$	$2M-0.745\ 0\ N$	$2M-0.724\ 4\ N$	$M-1.395\ 5\ N$	$M-1.329\ 3\ N$
39~33.5	$2M-0.891\ 3\ N$	$2M-0.856\ 7\ N$	$2M-0.833\ 1\ N$	$2M-0.802\ 4\ N$	$2M-0.764\ 4\ N$
33.5~28.9	$2M-1.026\ 0\ N$	$2M-0.986\ 3\ N$	$2M-0.959\ 1\ N$	$2M-0.923\ 8\ N$	$2M-0.879\ 9\ N$
28.9~25	$3M-0.787\ 8\ N$	$3M-0.757\ 3\ N$	$3M-0.736\ 4\ N$	$3M-0.709\ 3\ N$	$2M-1.013\ 0\ N$
25~21.7	$3M-0.906\ 0\ N$	$3M-0.871\ 0\ N$	$3M-0.847\ 0\ N$	$3M-0.815\ 8\ N$	$3M-0.777\ 0\ N$
21.7~18.8	$4M-0.783\ 9\ N$	$4M-0.753\ 5\ N$	$4M-0.732\ 7\ N$	$4M-0.705\ 7\ N$	$3M-0.896\ 3\ N$
18.8~16.3	$5M-0.723\ 2\ N$	$4M-0.869\ 0\ N$	$4M-0.845\ 0\ N$	$4M-0.813\ 9\ N$	$4M-0.775\ 3\ N$
16.3~15	$5M-0.785\ 9\ N$	$5M-0.755\ 4\ N$	$5M-0.734\ 6\ N$	$5M-0.707\ 5\ N$	$4M-0.842\ 5\ N$

## 2.5 上注效率分析

如果以每60 s上注一个数据块进行参数设置,假设每个数据块数据量为13 B(含时间4 B,级数和增益9 B(含全色、多光谱)),每轨平均成像600 s,如果每天成像8轨,则每天成像参数的上注

量为1 040 B;而每次任务的控制指令约为4条指令(每条指令8 B),每天上注的指令数据量约为256 B,则成像参数数据量占总上注量的80.24%。而采用星上自主调整成像参数,则每天仅需上注256 B指令,效率较通过地面上注参数设置提高了

4倍,大大减少了地面上注的数据量。

### 3 结 论

本文从遥感成像理论出发,分析了太阳高度角、侧摆角对相机动态范围的影响,并据此建立了太阳高度角、侧摆角与积分级数和增益的映射关系。根据仿真实例给出了设计方法。文中方法在关于某些条件的假设方面可能偏于理想,在具体的工程实际中,可根据具体情况对公式中的参数进行调整,但该方法可为后续在轨遥感卫星的成像质量改善和使用便捷提供了一种可行有效的途径。

#### 参考文献:

- [1] 马天波. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.  
MA Tianbo. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 2028-2035.
- [2] SOPRUNIUK P M, BACHEVSKII R S. Semantic and associative aspects of the space pictures of earth's surface processing [J]. Earth Resources & Remote Sensing (IAF), 1988, IAF88-135: 1-5.
- [3] VISSER S J, DAWOOD A S, WILLIAMS J A. FPGA based satellite adaptive image compression system [J]. Journal of Aerospace Engineering, 2003, 16(3): 129-137.
- [4] LI Jia, QIN Yali, REN Hongliang. Research on parallel unsupervised classification performance of remote sensing image based on MPI [J]. International Journal for Light and Electron Optics, 2012, 123(21): 1985-1987.
- [5] DU Junping, ZHENG Jinxin. Automatic image parameter optimization based on Levenberg-Marquardt algorithm [C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009). Seoul, Korea: IEEE, 2009: 724-728.
- [6] ROGGE D, BACHMANN M, RIVARD B, et al. A spatial-spectral approach for deriving high signal quality eigenvectors for remote sensing image transformations [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014, 26: 387-398.
- [7] 何红艳. 遥感卫星 TDICCD 相机的成像参数与在轨成像质量的关系研究 [C]//第二十三届全国空间探测学术交流会论文集. 厦门: 中国空间科学学会, 2010: 1-9.  
HE Hongyan. Research on imaging parameter and quality of TDICCD camera of remote sensing satellite [C]//23rd Conference on Space Exploration in Chinese. Xiamen: Chinese Space Science Academy, 2010: 1-9.
- [8] 阮宁娟. 空间 TDICCD 相机动态信噪比计算方法研究 [J]. 中国空间科学技术, 2009, 29(6): 15-20.  
RUAN Ningjuan. Research on calculation method of dynamic SNR of TDICCD camera [J]. Chinese Space Science and Technology, 2009, 29(6): 15-20.
- [9] 陈世平. 空间相机设计与试验 [M]. 2 版. 北京: 中国宇航出版社, 2009: 265-269.  
CHEN Shiping. Design and test on the space camera [M]. 2nd ed. Beijing: Chinese Astronautics Press, 2009: 265-269.
- [10] 薛旭成. 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.  
XUE Xucheng. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 857-863.

(编辑:刘彦东)