

文章编号 1004-924X(2011)04-0857-07

# 空间遥感相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置

薛旭成<sup>1</sup>, 石俊霞<sup>1,2</sup>, 吕恒毅<sup>1</sup>, 马天波<sup>1</sup>, 郭永飞<sup>1</sup>

(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. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 为了提高空间 TDI CCD 遥感相机的成像质量, 研究了相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置方法。分别讨论了信噪比(SNR)和调制传递函数(MTF)与积分级数的关系, 指出增加积分级数能解决光能量不足问题并有效提高 SNR, 但同时会引起系统 MTF 下降; 增加增益也可解决光能量不足问题, 但不能改变系统的 SNR 和 MTF, 因此优化积分级数和增益可改善图像质量。采用  $SNR \times MTF$  作为图像质量评价指标, 对积分级数和增益设置进行了优化。数值计算结果表明: 在给定的相机参数下, 当卫星俯仰角速度为  $0.005 (^{\circ})/s$ , 曝光量为饱和值的  $1/66$  时, 积分级数选为 44 级, 增益设置为 1.5 可获得较好的图像质量。

**关键词:** TDI CCD; 信噪比; 调制传递函数; 增益; 积分级数; 优化

**中图分类号:** V475.3; TN386.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111904.0857

## Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras

XUE Xu-cheng<sup>1</sup>, SHI Jun-xia<sup>1,2</sup>, LÜ Heng-yi<sup>1</sup>, MA Tian-bo<sup>1</sup>, GUO Yong-fei<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to improve the image quality of the space TDI CCD remote sensing cameras, the method to set optimally of TDI CCD integration stages and gains was proposed. The dependence of the Signal to Noise Ratio(SNR) and Modulation Transfer Function(MTF) on the integration stages was discussed. Then, it points out that increasing integration stages can resolve the lack of exposure light energy and improve SNR, but it causes the image MTF reduced. However, increasing gains can also resolve the problem of lack of exposure light, and it makes the SNR and the imaging MTF unchanged. These results means that the set of the SNR and imaging MTF can improve the image quality. By using the  $SNR \times MTF$  as the optimal goal, this paper optimizes the integration stage and the gain. Numerical calculation result shows that when the pitch speed of satellite is  $0.005^{\circ}/s$  and the exposure is  $1/66$  of saturation, the high quality image can be obtained in the integration stage to be 44 and the gain to be 1.5.

收稿日期: 2010-11-26; 修订日期: 2011-02-15.

基金项目: 中科院国防创新基金资助项目

**Key words:** TDI CCD; Signal to Noise Ratio(SNR); Modulated Transfer Function(MTF); gain; integration stage; optimization

## 1 引言

推扫式空间遥感相机利用卫星和地面的相对运动进行扫描成像。在固定的圆形轨道上,卫星和地面的相对速度基本保持不变,因此分辨率越高,积分时间越短。为了解决由于积分时间短带来的曝光能量不足的问题,一般采用 TDI(Time Delay Integration) CCD 作为空间相机探测器。TDI CCD 器件的优点是在运动中利用多级光敏元件对同一目标进行多次积分,通过把各级弱信号进行叠加从而得到增强的信号,提高系统的信噪比<sup>[1-2]</sup>。然而,TDI CCD 成像对卫星姿态控制精度要求很高,任何控制精度误差都会带来较大的 TDI CCD 累计积分误差,使得成像调制传递函数(MTF)下降,且积分级数越大,MTF 下降越明显。为了保证 TDI CCD 的成像质量,研究人员开展了相应的研究工作。文献[3]对时钟导致的模糊现象进行了深入分析,提出通过改变转移时钟的时序关系降低模糊现象,从而保证 MTF 不下降。文献[4]和[5]则对像移匹配对 MTF 的影响进行了分析和建模。文献[6]和[7]对 TDI CCD 的信噪比(SNR)以及降噪技术进行了具体研究。然而,这些研究分别从 MTF 和 SNR 两方面开展研究,并未考虑在应用 TDI CCD 时 MTF 和 SNR 二者之间的联系和制约关系。实际上,积分级数的增加有利于提高相机的 SNR 却会对卫星姿态控制精度提出更高要求。若卫星姿态达不到要求,那么相机的 MTF 就会下降。因此在积分级数的设置中必须进行一个折中的优化选择。

图像的 SNR 反映了图像的灰度分辨率,图像的 MTF 则反映了图像的空间分辨率。因此,本文采用  $SNR \times MTF$  作为图像质量<sup>[8]</sup> 优化指标,对积分级数进行了优化选择和设置,指出在工程应用时通过数值计算的方法可得到最优结果,并给出了本文相机给定参数设置下,积分级数和增益的具体设置。

## 2 SNR 和 MTF 与积分级数的关系

### 2.1 SNR 与积分级数的关系

信噪比定义为目标辐射在 CCD 探测器上产生的电子数和噪声电子数之比。CCD 的噪声主要包括光子霰粒噪声、暗电流霰粒噪声和读出噪声等。在光照充足的条件下,光子霰粒噪声起主导作用,暗电流噪声和读出噪声相对可以忽略,光子霰粒噪声的产生机理如下:

光注入 TDI CCD 光敏区产生信号电荷的过程可看作独立、均匀、连续发生的随机过程。单位时间内产生的信号电荷数目并非绝对不变,而是在一个平均值上做微小的波动。这一微小的起伏便形成霰粒噪声,其分布可近似用离散型泊松分布表示

$$P(n\tau) = \frac{a\tau}{n!} \exp(-a\tau), \quad (1)$$

其中, $\tau$  为观察的时间间隔, $n$  为在  $\tau$  秒内发出的粒子数, $a$  为每秒发出粒子的平均数。

光子霰粒噪声电子数的统计平均标准偏差  $\sigma_{\text{photo}}$  是信号电子数  $S_e$  的开方,即:

$$\sigma_{\text{photo}} = \sqrt{S_e}, \quad (2)$$

TDI CCD 是一种具有面阵结构、线阵输出的 CCD,通过对同一目标进行多级重复采样达到增加曝光量的目的。若 TDI CCD 的级数是  $M$ ,则 TDI CCD 输出信号是普通线阵 CCD 输出信号的  $M$  倍。因此,

$$\frac{SNR_{m=M}}{SNR_{m=1}} = \frac{M \times S_e / \sqrt{M \times S_e}}{S_e / \sqrt{S_e}} = \sqrt{M}. \quad (3)$$

可见,级积分级数为  $M$  时的信噪比是积分级数为 1 时的  $\sqrt{M}$  倍。

### 2.2 MTF 与积分级数的关系

卫星在正确姿态下沿轨道方向运动时,地面目标在相机焦面的 TDI CCD 器件上形成的像移速度要严格与 TDI CCD 中的光生电荷包的转移

速度相匹配,这样多级像元曝光时相对目标能够保持相对静止。当卫星偏离其正确姿态时,TDI CCD 器件上像的运动可能导致附加的非正常像移,这种非正常像移将导致 TDI 时电荷包转移到其他像元中,使图像质量下降<sup>[9-11]</sup>。像移方向定义为 TDI 方向为  $x$  方向,垂直 TDI 方向为  $y$  方向。

卫星的姿态有俯仰角、滚动角和偏航角 3 个量,姿态稳定度有俯仰角速度、滚动角速度和偏航角速度 3 个量。首先,考虑卫星姿态指向精度产生的像移。在俯仰角、滚动角和偏航角这 3 个量中,只有偏航角会产生非正常像移。而卫星的俯仰角使成像视场沿轨前后变化,滚动角使成像视场沿轨方向左右变化。这些变化不会在相机焦面的 TDI CCD 上产生非正常像移,因此,不会对系统调制传递函数造成影响。设卫星偏航角为  $\theta$ ,由于偏航角  $\theta$  一般较小,在单个 TDI CCD 积分时间  $t_0$  内,由偏航所导致的非正常像移主要发生在垂直于 TDI CCD 方向,其大小为  $d_{y_1} = a \tan \theta$ 。式中: $a$  为 TDI CCD 的像元尺寸。

其次考虑卫星姿态稳定度的影响。俯仰角速度、滚动角速度和偏航角速度 3 个量都会产生非正常像移。偏航方向的角速度  $\theta'$  在单个 TDI CCD 积分时间  $t_0$  内形成的非正常像移为  $d_{y_2} = a \tan(\theta' t_0)$ 。

滚动角速度  $\eta'$  使得相机在曝光过程中在垂直于 TDI 方向同样产生非正常像移。单个积分时间  $t_0$  内产生的像移量为  $d_{y_3} = f' \tan(\eta' t_0)$ ,其中  $f'$  为光学系统的焦距。因此,垂直于 TDI 方向由 3 部分像移构成总的最大像移量为

$$d_y = d_{y_1} + d_{y_2} + d_{y_3}. \quad (4)$$

俯仰角速度  $\phi'$  使得相机沿 TDI 方向产生非正常像移,单个 TDI CCD 积分时间  $t_0$  内产生的像移量为

$$d_x = f' \tan(\phi' t_0). \quad (5)$$

式(4)、(5)分别给出了由卫星姿态精度和稳定度导致的相机焦面上垂直于 TDI 方向和沿 TDI 方向的非正常像移量<sup>[12]</sup>。

对于 TDI CCD 相机,积分级数越高,则非正常像移所导致的调制传递函数下降越大。垂直于 TDI 方向造成的非正常像移量而导致的 MTF 为

$$MTF_y(f_y) = \frac{\sin(M\pi d_y f_y)}{M\pi d_y f_y}, \quad (6)$$

式中: $M$  为 TDI CCD 积分级数; $f_y$  (单位为 lp/mm) 为相机焦面上所对应的垂直于 TDI 方向的空间频率<sup>[13]</sup>。

沿 TDI 方向造成的非正常像移量而导致的 MTF 下降为

$$MTF_x(f_x) = \frac{\sin(M\pi d_x f_x)}{M\pi d_x f_x}. \quad (7)$$

式中: $f_x$  (单位 lp/mm) 为相机焦面上所对应的沿 TDI 方向的空间频率<sup>[10]</sup>。式(6)、(7)反映了 MTF 和 TDI 积分级数的关系。在卫星姿态精度和稳定度一定的情况下,由于非正常像移的存在,MTF 随着 TDI 级数  $M$  的增加而下降。

### 3 积分级数与增益的优化选择

通过上述分析可知,增加积分级数能解决光能量不足的问题,并有效地提高 SNR,但同时会使系统 MTF 下降;而解决光能量不足的另一个途径是增加增益,增益的增加对 SNR 和 MTF 没有影响。因此,为了保证遥感图像的高品质,需要对积分级数和增益进行优化设置。目前已经有一些图像质量的客观评价指标。由于图像的 SNR 反映了图像的灰度分辨率;图像的 MTF 则反映了图像的空间分辨率,因此,本文以  $SNR \times MTF$  作为图像质量评价指标,以沿 TDI 方向为例进行分析。

记单级积分级数时的 SNR 为  $k_1$ ,则  $M$  级积分级数时的 SNR 为  $k_1 \sqrt{M}$ 。记 TDI CCD 正常推扫时(无像移)的 MTF 为  $k_2$ ,则  $k_2 = MTF_0 \times MTF_M \times MTF_{CCD}$ ,它由光学传递函数、装调传递函数以及 CCD 传递函数等共同决定。当 TDI CCD 工作在  $M$  级时,

$$SNR \times MTF = k_1 k_2 \sqrt{M} \frac{\sin(M\pi d_x f_x)}{M\pi d_x f_x}, \quad (8)$$

使式(8)得最大值时的  $M$  即为最合理的积分级数,因此需要取式(8)对  $M$  的偏导数:

令

$$\frac{\partial(SNR \times MTF)}{\partial M} = \frac{\partial(k_1 k_2 \sqrt{M} \text{sinc}(M\pi d_x f_x))}{\partial M} = 0, \quad (9)$$

则有

$$\frac{k_1 k_2}{\sqrt{M}} \cos(M\pi^2 d_x f_x) - \frac{1}{2} \frac{k_1 k_2}{\sqrt{M}} \operatorname{sinc}(M\pi^2 d_x f_x) = 0, \quad (10)$$

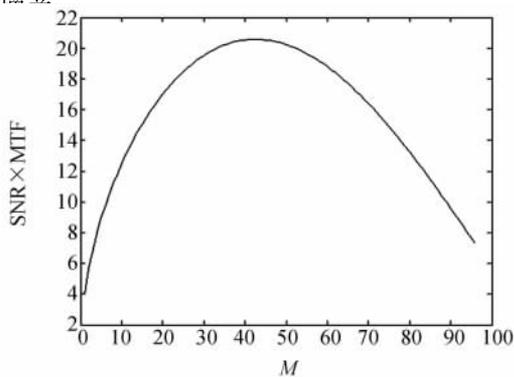
解方程(10), 求出  $M$  即可。然而, 由于方程(10)没有解析解, 因而实际工程中需根据相机和卫星姿态等具体参数, 进行数值计算来求取获得最大  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  时的积分级数  $M$ 。

求得最优积分级数  $M$  后, 需要进行增益的优化设置。增益的设置是为了让信号能够充满系统的动态范围, 即图像尽可能充满灰度范围, 使得图像层次丰富。由于增益会使信号和噪声得到相同的放大, 所以增益设置对  $\text{SNR}$  和  $\text{MTF}$  都不影响。若曝光量为饱和值的时, 则增益  $G$  需设置为  $G = E/M$ 。

#### 4 数值计算实验与分析

设相机的焦距为  $f' = 2 \text{ m}$ , 曝光量为饱和值的  $1/66$ , 单个 TDI CCD 积分时间为  $t_0 = 100 \mu\text{s}$ , 单级积分级数时  $\text{SNR}$  为  $k_1 = 20$ , TDI CCD 正常推扫时(无像移)的  $\text{MTF}$  为  $k_2 = 0.2$ , TDI CCD 像元尺寸为  $a = 10 \mu\text{m}$ , 则奈奎斯特频率  $f = 1/2a = 400 \text{ lp/mm}$ 。当给定姿态精度及稳定度后, 就可以根据公式(8)求出不同积分级数  $M$  下的  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值。

当俯仰角速度  $\phi' = 0.005 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  时, 则  $d_x = f' \tan(\phi' t_0) = 0.017 \mu\text{m}$ , 图 1 所示为不同积分级数  $M$  下对应的  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值。从图中可见  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  的最大值为 20.84, 此时  $M = 44$ 。因而, 当积分级数  $M = 44$  时,  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  取最大值, 此时像质最佳。由于曝光量为饱和值的  $1/66$ , 增益



1 不同积分级数  $M$  下的  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值 ( $\phi' = 0.005 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ )  
Fig. 1  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  with different stages ( $\phi' = 0.005 \text{ (}^\circ\text{)/s}$ )

应设置为  $66/44 = 1.5$ 。表 1 列出了不同积分级数下的  $\text{SNR}$ ,  $\text{MTF}$  及  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值。当积分级数低时,  $\text{SNR}$  较低,  $\text{MTF}$  较大; 当积分级数高时,  $\text{SNR}$  较高,  $\text{MTF}$  较小。而  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  却存在着最大值, 即在积分级数为 44 时达到最大, 此时, 图像质量最佳。

表 1 不同积分级数下的  $\text{SNR}$ ,  $\text{MTF}$  及  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值

Tab. 1  $\text{SNR}$ ,  $\text{MTF}$  and  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  with different stages

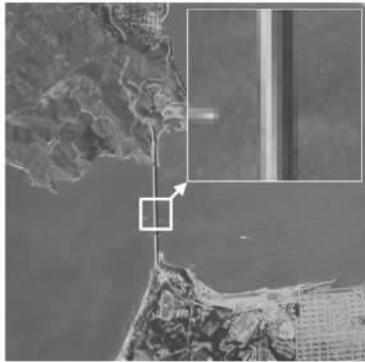
$M$	$\text{SNR}$	$\text{MTF}$	$\text{SNR} \times \text{MTF}$
8	56.57	0.198 4	11.22
16	80.00	0.193 7	15.49
44	132.66	0.157 1	20.84
64	160.00	0.112 1	17.93
96	195.96	0.037 1	7.27

图 2 中的仿真图像则反应了这一现象。图 2 (a) 是 8 级下  $\text{SNR}$  为 56.57,  $\text{MTF}$  为 0.198 4 对应的图像。图像质量差的原因主要是噪声较大。图 2 (b) 是 96 级下  $\text{SNR}$  为 195.96,  $\text{MTF}$  为 0.037 1 对应的图像。图像质量差的原因主要是  $\text{MTF}$  较低, 图像模糊。图 2 (c) 则是 44 级下  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  取得最大值的图像, 图像质量较好。

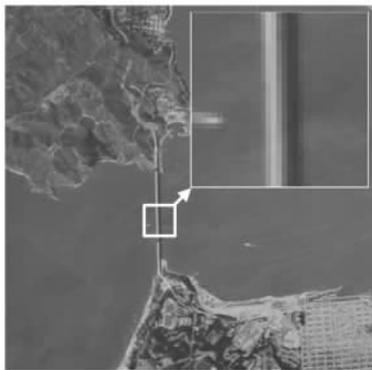
当俯仰角速度  $\phi' = 0.007 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  时, 不同积分级数  $M$  下对应的  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值如图 3 所示。从图中可以看出相对于  $\phi' = 0.005 \text{ (}^\circ\text{)/s}$  而言, 卫星姿态更加不稳定, 因此可以使用的积分级数也相应地变低。积分级数在 30 级下  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  取得最大值 17.39。此时, 为了使信号充满系统的动态范围, 增益应设置为  $66/30 = 2.2$ 。

表 2 列出了在不同俯仰角速度下为了使  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  取得最大值的积分级数设置和增益设置以及此时的  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值。从表中可知, 俯仰角速度越小, 则需设置的最优积分级数越大, 最优增益越小,  $\text{SNR} \times \text{MTF}$  值也越大。因此, 高的卫星姿态精度和稳定度是高质量图像的保证。当卫星姿态精度和稳定度确定后, 就可按照上述方法计算出需要设置的最优积分级数和增益, 使

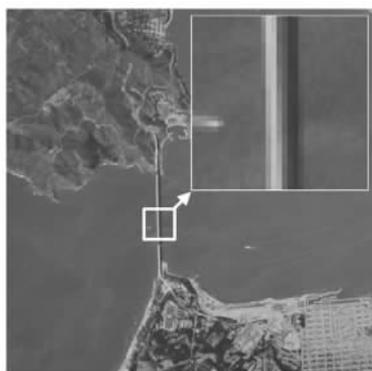
图像质量最佳。由于 TDI CCD 的积分级数并不是连续可调的,因此,可以根据算出的最优值设置相近的积分级数和增益。



(a) 积分级数为 8 时的图像  
(a) Image when stage is 8



(b) 积分级数为 96 时的图像  
(b) Image when stage is 96



(c) 积分级数为 44 时的图像  
(c) Image when stage is 44

图 2 不同积分级数 M 下图像  
Fig. 2 Image with different stages

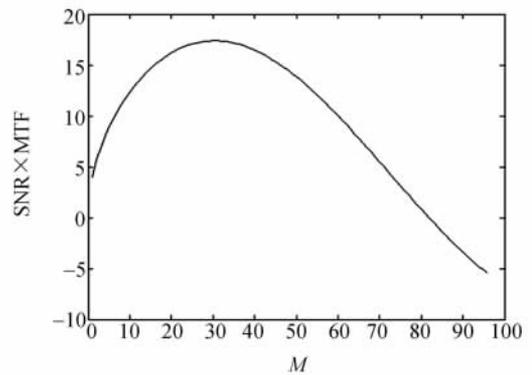


图 3 不同积分级数 M 下 SNR×MTF 值( $\phi'=0.007$  (°)/s)  
ig. 3 SNR×MTF with different stages M( $\phi'=0.007$  (°)/s)

表 2 不同俯仰角速度下积分级数和增益的最优值

Tab. 2 Optimal values of integration stage and gain with different pitch speeds

俯仰角速度 $\phi'/(^\circ)/s$	积分级数	增益	SNR×MTF
0.007	30	2.2	17.39
0.006	36	1.83	18.79
0.005	44	1.5	20.84
0.004	53	1.245	22.99

### 5 结 论

TDI CCD 的优点是可以增加积分时间提高信噪比,但是 TDI CCD 对像移匹配有严格的要求,且对像移的要求随着积分级数的增加而更加严格,像移的不匹配会导致 MTF 的下降。SNR 和 MTF 是图像质量的重要评价指标,低噪声可保证图像的灰度分辨率,MTF 高则是图像空间高分辨率的要求。曝光能量不足时,通过增加增益不会提高 SNR 但也不会降低 MTF。积分级数和增益的设置存在一个优化的问题。本文通过采用 SNR×MTF 作为图像质量评价指标,给出了对积分级数和增益进行优化设置的方法。指出了在工程应用时可通过数值计算的方法得到需要设置的最优结果。在本文相机给定参数下,当卫星俯仰角速度为 0.005 (°)/s,曝光量为饱和值的 1/66 时,积分级数应选择为 44 级,增益应设置为 1.5。

## 参考文献:

- [1] HOLST G C. *CCD Arrays, Cameras, and Displays*[M]. 2nd ed. USA: JCD Publishing, 1998.
- [2] HOLST G C. *Electro-Optical Imaging System Performance* [M]. USA: JCD Publishing, 2008.
- [3] WANG D J, ZHANG T, KUANG H P. Clocking smear analysis and reduction for multi phase TDI CCD in remote sensing system [J]. *Optics Express*, 2011,19(5):4868-4880.
- [4] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. *光学精密工程*, 2010,18(9):2028-2035.  
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(9):2028-2035. (in Chinese)
- [5] 邓湘金,郭强,饶炜. 月球探测器 TDI-CCD 相机成像质量影响因素分析[J]. *航天器工程*, 2010,19(5):70-75.  
DENG X J, GUO Q, RAO W. Factors Affecting the TDI-CCD Camera Image Quality in the Lunar Orbiter[J]. *Spacecraft Engineering*, 2010,19(5):70-75.
- [6] 徐茜,苗丽峰,王跃明,等. 8192 像元 TDI-CCD 相机信噪比的深入分析[J]. *红外技术*, 2008,30(12):683-687.  
XU Q, MIAO L F, WANG Y M, *et al.*. In-depth Analysis of TDI-CCD Image Sensor[J]. *Infrared Technology*, 2008,30(12):683-687.
- [7] JANESICK J R. *Scientific Charge-Coupled Devices*[M]. USA: SPIE Publications, 2001.
- [8] 陈世平. 关于遥感图像品质的若干问题[J]. *航天返回与遥感*, 2009,30(2):10-17.  
CHEN SH P. Some issues about the remote sensing image quality[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2009,30(2):10-17. (in Chinese)
- [9] 杨秀彬,贺小军,张刘,等. 偏流角误差对 TDI CCD 相机成像的影响与仿真[J]. *光电工程*, 2008,35(11):45-50.  
YANG X B, HE X J, ZHANG L, *et al.*. Effect and simulation of the deviant angle error on TDI CCD cameras image [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008,35(11):45-50. (in Chinese)
- [10] 闫得杰,徐抒岩,韩诚山. 飞行器姿态对空间相机像移补偿精度的影响[J]. *光学精密工程*, 2008,16(11):2199-2203.  
YAN D J, XU SH Y, HAN CH SH. Effect of aircraft attitude on image motion compensation of space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008,16(11):2199-2203. (in Chinese)
- [11] 曲宏松,张叶,金光. 基于数字域 TDI 算法改进面阵 CMOS 图像传感器功能[J]. *光学精密工程*, 2010,18(8):1896-1903.  
QU H S, ZHANG Y, JIN G. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010,18(8):1896-1903. (in Chinese)
- [12] 龙夫年,张旺,刘剑峰. 卫星姿态精度对 TDI CCD 相机的影响[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2002,34(3):382-384.  
LONG F N, ZHANG W, LIU J F. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002,34(3):382-384. (in Chinese)
- [13] WONG H S, YAO Y L, SCHLIG E S. TDI charge-coupled devices: design and applications [J]. *IBM Journal of Research and Development*, 1992,36(1):83-105.

## 作者简介:



薛旭成(1980—),男,河北阳原人,助理研究员,2008年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要研究方向为光电成像及处理技术。E-mail: xue0818@163.com



石俊霞(1984—),女,内蒙古乌兰察布人,博士研究生,主要从事光电成像技术及图像处理方面的研究。E-mail: 19031121@163.com



吕恒毅(1984—),男,辽宁大连人,硕士,研究实习员,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,主要从事信号处理方面研究。E-mail: lv-hengyi@163.com



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1990年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得硕士学位,主要从事光电技术应用,CCD成像电子学,嵌入式系统开发等方面的研究。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn



马天波(1984—),女,吉林长春人,硕士,助理研究员,2008年于吉林大学获得硕士学位,主要从事图像处理及光电成像中的计算机应用技术方面的研究。E-mail: matb0319@yahoo.com.cn

#### ●下期预告

## 620 mm 薄镜面主动支撑结构及校正分析

陈夫林<sup>1,2</sup>,张景旭<sup>1</sup>,吴小霞<sup>1</sup>,范磊<sup>1,2</sup>

(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 研究生院,北京 100039)

针对大口径薄镜面望远镜,为了实现主镜在不同俯仰角的支撑面形精度,采用模态振型模式定标实时对主镜面形进行了主动校正。针对620 mm口径,18 mm厚的薄镜面主动支撑系统,底支撑采用36点主动支撑,侧支撑采用6点切向被动支撑。分析了主镜自由振动时的模态振型,在进行主动校正前将其前十阶模态振型的RMS值归一化成1 000 nm,定标出相应的校正力;分析了不同俯仰角下主镜面形的变化,并采用最小二乘法用模态振型为底基函数拟合了主镜面变形,求解出主动校正力;对比了校正面型和原始面型的关系,并在二次主动校正之后分析了拟合残差和校正残差的关系。最终校正结果显示,主镜竖直放置时用最大为2.23 N的校正力,可将面型RMS从27.62 nm校正到12.95 nm,主镜水平放置时用最大为0.59 N的校正力,可将面型RMS从7.68 nm校正到2.84 nm。结果验证了采用模态振型校正主镜面型的可行性。