

文章编号 1004-924X(2011)10-2500-07

TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响

王德江^{1,2,3*}, 董斌², 李文明², 金灿强²

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 中国科学院航空

光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 长春光学精密工程与物理研究所, 吉林 长春 130033;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 由于多相位 TDI CCD 行间电荷转移引起的像移无法通过光、机、电等方法消除, 本文研究了电荷转移对遥感相机成像质量的影响。首先, 介绍了推扫式遥感相机的工作原理与前向像移补偿方法。接着根据 TDI CCD 行间电荷的转移方式, 利用脉冲传递函数建立了电荷转移速度模型, 并对 TDI CCD 电荷转移速度与景物像点移动速度进行了比较分析, 揭示了 TDI CCD 电荷转移像移产生的原因。然后, 建立了多相位 TDI CCD 电荷转移像移的调制传递函数, 定量给出了二、三、四相位 TDI CCD 电荷转移像移引起的空间频率对比度损失。最后, 搭建测试平台, 采用胶片式遥感相机获取了奈奎斯特频率处的靶标图像, 其分辨率为 60 lp/mm, 并比较了三、四相位 TDI CCD 电荷转移像移对靶标分辨率的影响。实验结果表明, 提出的电荷转移像移模型与图像实验仿真结果相吻合。

关键词: 时间延迟电荷耦合器件; 遥感成像系统; 电荷转移; 调制传递函数

中图分类号: V443.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111910.2500

Influence of TDI CCD charge transfer on imaging quality in remote sensing system

WANG De-jiang^{1,2,3*}, DONG Bin², LI Wen-ming², JIN Can-qiang²

(1. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

** Corresponding author, E-mail: wangdj04@live.cn*

Abstract: The smear caused by a charge transfer for multi-phase TDI CCD in a remote sensing system couldn't be eliminated by the motion compensation methods. First, the operation principle and forward motion compensation method are introduced. Then, according to the charge transfer mode of a TDI CCD, the velocity model of charge transfer in one line period is developed by employing an impulse function, velocities of image point and TDI CCD are analyzed, and why the charge transfer cau-

收稿日期: 2011-01-16; **修订日期:** 2011-02-27.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2006AA06A208); 国家重点基础研究发展规划项目 (No. 2009CB72400102A)

ses the smear is also presented. Furthermore, the Modulation Transfer Function of charge transfer smear existed in a multi phase TDI CCD is developed, and the contrasts of spatial frequency losses due to charge transfer smear for two, three and four phase TDI CCDs are illustrated. Finally, an image quality evaluation platform is established, an image drone with a resolution of 60 lp/mm is captured by a film aerial camera at Nyquist frequency, and effects of charge transfer smear on image quality for two, three and four phase TDI CCDs are studied, respectively. The results confirm that the proposed charge transfer model accords well with the experiment.

Key words: TDI CCD; remote sensing imaging system; charge transfer; modulation transfer function

1 引言

1969 年 Boyle 与 Smith 发明了电荷耦合器件 (Charge Coupled Devices, CCD)^[1], CCD 以其低噪声、大动态范围、高量子效率、宽光谱响应以及高几何稳定性等优点,广泛应用于空间遥感、天文观测、微光夜视等科学研究领域。CCD 的时间延迟积分 (Time Delay Integration, TDI) 工作模式在不牺牲空间分辨率的情况下,显著提高了探测器的响应度,在空间遥感领域是解决相机轻量化的主要途径^[2-3],如我国成功发射的嫦娥二号月球探测卫星,其中最重要的载荷即为一个三线阵 96 级 TDI CCD 立体相机,据报导该相机距月球表面 18.7 km 时,对月球虹湾表面所摄影像分辨率达到了 1.3 m。为了获得高分辨率的遥感图像,推扫型 TDI CCD 相机必须补偿由飞行器飞行带来的前向像移,然而即使像移补偿精度非常高,实际成像过程中平行于飞行方向的照相分辨率仍然低于垂直于飞行方向的照相分辨率,这是因为 TDI CCD 在平行于飞行方向存在固有像移,这种像移是由 TDI CCD 的电荷转移方式决定的,无法通过外部光、机、电等像移补偿方式消除^[4]。Chamberlain 与 Smith 认为对于 Φ 相位的 TDI CCD 成像过程中电荷转移引起的像移为 $1/\Phi$ 像素^[5-6],Smith 的研究中还分析了像移对遥感相机成像质量的影响,即当像移量小于一个像素时,对遥感图像质量的影响可以忽略不计,当像移在一至两个像素之间时,对图像质量的影响是能够察觉到了,当像移量大于两个像素时,对图像质量的影响是能明显察觉到了。马天波等认为 TDI CCD 的成像过程中电荷转移像移量为一个像素^[7],而另一些遥感相机设计人员则认为电荷转移像移不存在,或是对成像质量没有什么影响^[8]。

对电荷转移像移认识上的模糊影响了遥感成像系统像移建模精度,使理论分析与实际照相结果产生矛盾。当前某些 TDI CCD 由于其工作方式的原因产生的电荷转移像移量过大,与遥感成像系统在实际工作中发生的像移残差叠加在一起,最终将导致像移总量大于两个像素。针对于此,本文首先从理论上对 TDI CCD 的电荷转移过程进行了深入分析,然后提出了一种 TDI CCD 行间电荷转移的数学模型,并建立了电荷离散转移像移的调制传递函数,最后根据实验结果分析了电荷转移像移对遥感图像质量的影响。

2 电荷转移像移产生原因与数学模型

图 1 为推扫型 TDI CCD 相机的成像原理图。

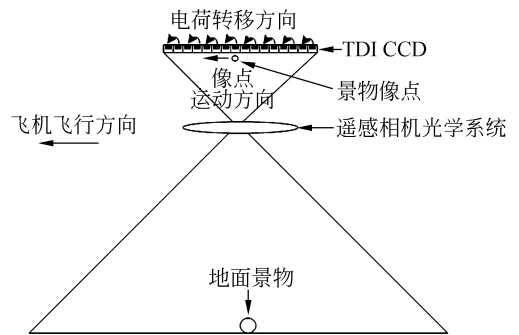


图 1 推扫相机成像原理图

Fig. 1 Imaging diagram of push broom sensing system

地面景物经遥感相机光学系统在焦平面上成对应景物像点,景物像点的运动方向与飞机前向飞行方向相同,速度为:

$$v_{\text{Scene}} = \frac{v}{H} f, \quad (1)$$

其中 v 为飞机飞行速度, H 为飞行高度, f 为遥感相机焦距。TDI CCD 行间电荷转移速度为:

$$v_{\text{TDICCD}} = b/T, \quad (2)$$

其中 b 为像元尺寸, T 为 TDI CCD 的行间电荷转移时间。

当 $v_{Scene} = v_{TDICCD}$ 时, 传统观点认为由飞机飞行带来的前向像移得到了完全补偿, 实际中在一个行转移周期内景物像点的运动可认为是连续的, 而 TDI CCD 电荷转移运动是离散的, 式(2)只是电荷的平均移动速度, 景物像点与 TDI CCD 在一个行转移周期内的具体时刻是存在相对运动的。

以四相位 TDI CCD 为例对一个行转移周期内的电荷运动进行分析。如图 2 所示, 光敏像元阵列与暗像元阵列均由四相位时钟信号 CI1、CI2、CI3、CI4 控制, 在这四个相位时钟的驱动下光敏区生成的电荷经由暗像元区转移到水平读出寄存器中, 最终在水平读出寄存器中经 CRX 时钟驱动串行顺序读出^[9-11]。

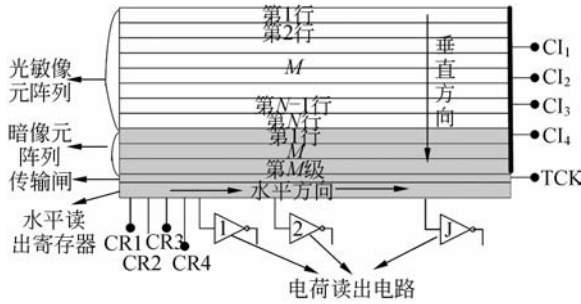


图 2 TDI CCD 结构框图

Fig. 2 Structure of TDI CCD

图 3 是该四相位 TDI CCD 垂直方向(包含光敏像元阵列与暗像元阵列)电荷转移示意图。每个像素对应着四个相位控制信号(CI_1 、 CI_2 、 CI_3 、 CI_4)。当相位 CI_x 为高电平时, 对应光敏区产生的电荷存储在其下的势阱中; 当相位 CI_x 为低电平时, 其光敏区下为势垒区, 对应光敏区生成的电荷储存在临近的势阱中。

完成一行电荷转移共分八个周期, 每个周期中的双向箭头表示等效光敏像素单元, 周期变换时等效光敏像素单元转移距离为 $1/8$ 像素, 转移时间近似为 0, 转移过程可描述为:

$$\frac{b}{8} \int_{-\infty}^{+\infty} V_{charge} dt, V_{charge} = 0, (t \neq 0), \quad (3)$$

对式(3)求导, 则电荷转移速度为:

$$V_{charge} = \frac{b}{8} \delta(t), \quad (4)$$

一个行转移周期包含 8 个电荷转移过程, 因

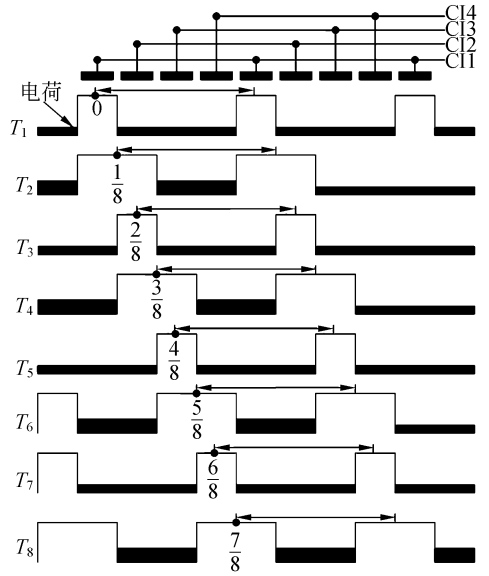


图 3 行间电荷转移流程图

Fig. 3 Charge transfer in one line

此 TDI CCD 电荷行转移速度可表示为:

$$V_{TDICCD} = \frac{b}{8} \left(\sum_{i=1}^8 \delta(t - t(i)) \right), \quad (5)$$

其中 $t(i)$ 表示第 i 个电荷转移周期发生的时刻。

图 4 为图 3 的电荷转移时序图, 为了避免电荷混叠, 在水平读出寄存器正在读出电荷时(CRX 信号有效), 垂直方向的电荷转移必须停止, 只有当水平读出寄存器中的电荷全都读出后, 才允许接收下一行的转移电荷。

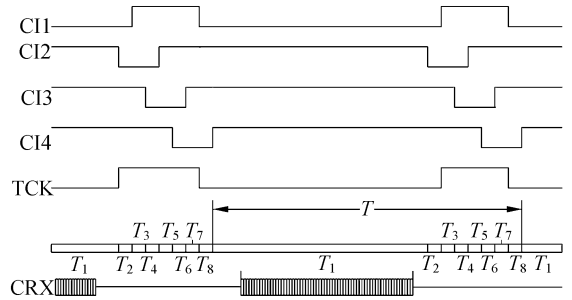


图 4 TDI CCD 电荷转移时序图

Fig. 4 Timing diagram of TDI CCD

由于电荷读出过程是串行的, 一般占行转移周期的 65% 以上, 因此设 T_1 周期占行转移时间的 70%。除了这一个时钟周期, 其它时钟周期占用的时间相等, 分别为占行转移周期的 4.285 7%。按照这种比例关系, 图 5、图 6 分别给出了一个行转移周期内景物像点与 TDI CCD 电

荷转移速度和位置图。

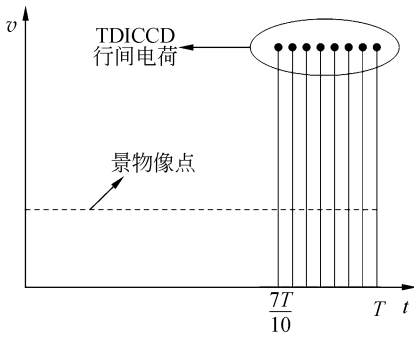


图 5 景物像点与 TDI CCD 电荷转移速度

Fig. 5 Velocity diagram of image point and TDI CCD charge transfer in one line period

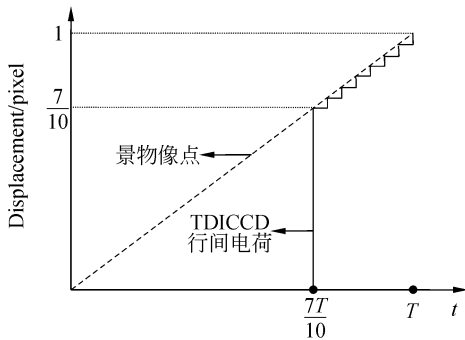


图 6 景物像点与 TDI CCD 电荷转移位移

Fig. 6 Displacement diagram of image point and TDI CCD charge transfer in one line period

从图 5 中可以看出 TDI CCD 电荷的转移运动是离散的,由 8 个脉冲式速度分量组成,而景物像点的速度是连续的;从图 6 中可以看出这种离散的电荷转移运动导致一个行转移周期时间内景物像点与光敏像元之间存在相对运动,这种运动即为电荷转移像移。

3 电荷转移像移调制传递函数

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是评价成像系统性能的重要参数^[12],本节以 ϕ 相位 TDI CCD 为对象给出电荷转移像移对调制传递函数的影响。

设原始图像为 $I(x, y)$,当曝光时间内景物与感光介质产生相对运动时,模糊图像为:

$$I'(x, y) = I(x, y) * \frac{E}{l} \text{rect}\left(\frac{x}{l}\right), \quad (6)$$

其中 * 表示卷积, $\frac{E}{l} \text{rect}\left(\frac{x}{l}\right)$ 为矩形脉冲函数。E 表示等效曝光强度, l 为相对位移,如图 7 所示。

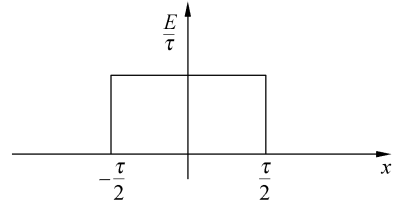


图 7 像移模糊函数

Fig. 7 Function of image smear

在第一个电荷转移周期内,曝光过程中景物像点与 TDI CCD 之间的相对位移为:

$$l_1 = \frac{T_1}{T} b, \quad (7)$$

其中 T_1 为第一个电荷转移周期占用的时间, T 为行间电荷转移时间。等效曝光强度为:

$$E_1 = \frac{T_1}{T}, \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(6),生成的模糊图像为:

$$I_1'(x, y) = I(x, y) * \frac{1}{b} \text{rect}\left(\frac{x}{l_1}\right), \quad (9)$$

在第二个电荷转移周期开始前,景物像点移动的距离为 l_1 ,电荷移动距离为 $\frac{b}{2\phi}$,在曝光前对应的图像为 $I(x - l_1 + \frac{b}{4}, y)$,曝光过程中相对位移为 $l_2 = \frac{T_2}{T} b$,曝光强度为 $E_2 = \frac{T_2}{T}$,生成的模糊图像为:

$$I_2'(x, y) = I(x - l_1 + \frac{b}{4}, y) * \frac{1}{b} \text{rect}\left(\frac{x}{l_2}\right), \quad (10)$$

以此类推,在第 n 个电荷转移周期生成的模糊图像为:

$$I_n'(x, y) = I(x - \sum_{i=1}^n l_i + \frac{(n-1)b}{2\phi}, y) * \frac{1}{b} \text{rect}\left(\frac{x}{l_n}\right), \quad (11)$$

其中 $l_n = \frac{T_n}{T} b$ 。

在一个行转移曝光时间内生成的图像是 1 至 2ϕ 电荷转移周期生成的图像总和,如式(12)所示:

$$I'(x, y) = \sum_{i=1}^{2\phi} I_i'(x, y) =$$

$$\frac{1}{b} (I(x, y) * \text{rect}(\frac{x}{l_1}) + I(x - l_1 + \frac{b}{2\phi}, y) * \text{rect}(\frac{x}{l_2}) \dots + I(x - \sum_{i=1}^{2\phi-1} l_i + \frac{(2\phi-1)b}{2\phi}, y) * \text{rect}(\frac{x}{l_{2\phi}})), \quad (12)$$

式(12)经傅里叶变化后为:

$$I'(f_x, f_y) = \frac{I(f_x, f_y)}{b} \cdot (l_1 \cdot \text{sinc}(\pi l_1 f_x) + l_2 \cdot \text{sinc}(\pi l_2 f_x) e^{-j2\pi(l_1 - \frac{b}{2\phi})f_x} \dots + l_{2\phi} \cdot \text{sinc}(\pi l_{2\phi} f_x) \cdot e^{-j2\pi(\sum_{i=1}^{2\phi-2} l_i - \frac{(2\phi-1)b}{2\phi})f_x}), \quad (13)$$

对应的传递函数为:

$$MTF = \frac{1}{b} \cdot (l_1 \cdot \text{sinc}(\pi l_1 f_x) + l_2 \cdot \text{sinc}(\pi l_2 f_x) e^{-j2\pi(l_1 - \frac{b}{2\phi})f_x} \dots + l_{2\phi} \cdot \text{sinc}(\pi l_{2\phi} f_x) \cdot e^{-j2\pi(\sum_{i=1}^{2\phi-2} l_i - \frac{(2\phi-1)b}{2\phi})f_x}). \quad (14)$$

仍假设 T_1 所占时间为行转移周期的 70%，其它电荷转移步骤所占用时间相等，根据式(7)，表 1 列出了二、三、四相位 TDI CCD 一个行转移周期内各个电荷转移步骤引起的像移。

表 1 每个电荷转移步骤引起的像移

Tab. 1 Smear occurred in each charge transfer step

	两相位	三相位	四相位
T_1	7b/10	7b/10	7b/10
T_2	1b/10	3b/50	3b/70
T_3	1b/10	3b/50	3b/70
T_4	1b/10	3b/50	3b/70
T_5	×	3b/50	3b/70
T_6	×	3b/50	3b/70
T_7	×	×	3b/70
T_8	×	×	3b/70

将表 1 中的数值代入式(13)，图 8 给出了二、三、四相位 TDI CCD 电荷转移像移对应的调制传递函数。

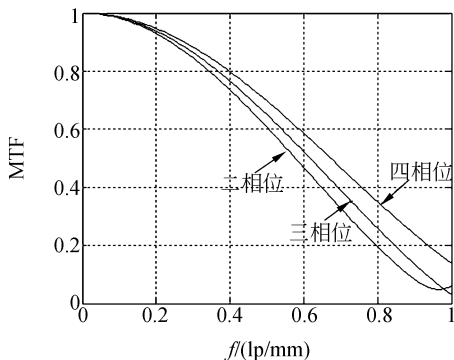


图 8 电荷转移像移的调制传递函数

Fig. 8 MTF of charge transfer smear

4 实验与结果分析

为了验证 TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像分辨率的影响，搭建了一个试验平台。如图 9 所示。试验测试系统主要包含四部分：均匀光源、条形靶标、平行光管、胶片型遥感相机。均匀光源照射在条形靶标上形成目标图样，平行光管用光学方法将靶标图样置于无穷远处；胶片相机对无穷远处的靶标图样成像。

式(15)给出了靶标图样在焦平面所成像的宽度：

$$R = w \frac{f_2}{f_1}, \quad (15)$$

其中 f_2 为平行光管焦距(4 000 mm)， f_1 为相机焦距(1 000 mm)， w 为一对明暗条纹宽度(最细为 0.06 mm)。

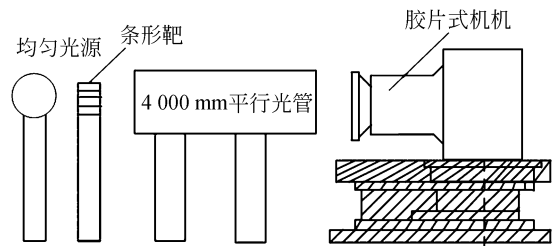
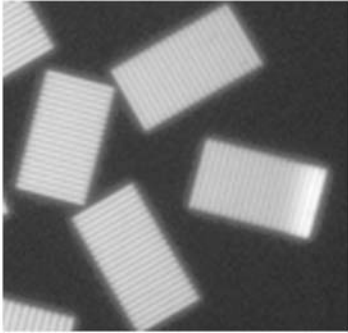


图 9 实验系统框图

Fig. 9 Block diagram of experiment

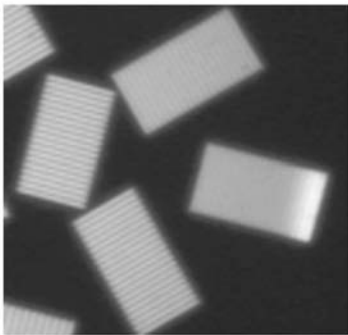
根据式(15)最细的一对靶标图样在像面上对应的宽度为 0.015 mm(60 lp/mm)，该相机的分辨率为 61 lp/mm，则可以近似认为靶标像的空间

频率即为相机的奈奎斯特频率。对采集到的胶片图像进行数字化处理,量化位数为 8 比特,如图 10(a)所示。胶片相机不存在 TDI CCD 器件电荷转移带来的像移,因此靶标水平与垂直方向分辨率近似相等。假设 TDI CCD 相机的电荷转移分为水平与垂直两种方向,根据第三节提出的电荷转移像移传递函数对图 10(a)的靶标图案进行处理,图 10(b)、(c)为采用三相位与四相位 TDI



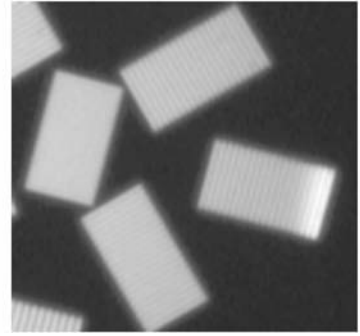
(a) 胶片相机采集的奈奎斯特频率靶标图案

(a) Drone pattern captured by film camera at Nyquist frequency



(b) 三相位 TDI CCD 靶标图案(水平方向为电荷转移方向)

(b) Drone pattern of three phase TDI CCD (charge transfer in horizontal direction)



(c) 四相位 TDI CCD 靶标图案(垂直方向为电荷转移方向)

(c) Drone pattern of four phase TDI CCD (charge transfer in vertical direction)

图 10 靶标图像评估

Fig. 10 Evaluation of drone pattern

CCD 获得的靶标图样,从中可以发现电荷转移的方向图像分辨率降低,这与第三节的理论分析是相吻合的。

5 结 论

本文详细分析了 TDI CCD 成像原理与电荷转移流程,据此给出了一种新的电荷转移速度模型,对于二、三、四相位 TDI CCD,该像移模型精度较传统的模型精度分别提高约 $1/2$ 、 $2/3$ 与 $3/4$ pixel,因此较传统的 TDI CCD 电荷转移平均速度表示方法更为准确,也更易揭示电荷转移像移的产生原因。通过对电荷转移像移的调制传递函数分析,定量地给出了空间频率的对比度损失,最后对实验获得的 60 lp/mm 的靶标图样进行判别,实验验证了电荷转移像移分析的正确性。

参考文献:

- [1] BOYLE W S, SMITH G E. Charge coupled semiconductor devices[J]. *Bell Systems Technical Journal*, 1970, 49(1): 585-593.
- [2] 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 al-

gorithm in digital domain [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8): 1896-1903. (in Chinese)

- [3] 郑耿峰, 张柯, 韩双丽, 等. 空间 TDI CCD 相机动态成像地面检测系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(3): 623-629.

ZHENG G F, ZHANG K, HANG SH L, et al.. Design of test system for motion images of space TDI CCD cameras[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 623-629. (in Chinese)

- [4] 谢冰, 焦斌亮. 基于航天 TDI CCD 相机像移分析的 PSF 估计及图像复原算法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(3):936-940.
XIE B, JIAO B L. The PSF estimation method and image restoration algorithm based on image-motion analysis of spaceborne TDI CCD camera[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3):936-940. (in Chinese)
- [5] SMITH S L, MOONEY J, TANTALO T A, *et al.*. Understanding image quality losses due to smear in high-resolution remote sensing imaging systems[J]. *Optical Engineering*, 1999, 38(5): 821-826.
- [6] CHAMBERLAIN S G, WASHKURAK W D. High-speed, low-noise, fine-resolution TDI CCD imagers [J]. *SPIE*, 1999, 1242:252-262.
- [7] 马天波, 郭永飞, 李云飞. 科学级 TDI CCD 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 TDI CCD camera. [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [8] 翟林培, 流明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(3):490-494.
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3):490-494. (in Chinese)
- [9] HOLST G C. *Electro-Optical Imaging* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2008.
- [10] HOLST G C. *CMOS/CCD Sensor and Camera System* [M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2007.
- [11] IRE K. A technique for evaluation of CCD video-camera noise[J]. *IEEE Transaction on Circuits and System for Video Technology*, 2008, 18(2): 280-283.
- [12] HOCK K M. Effect of oversampling in pixel arrays[J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(5): 1281-1287.

作者简介:



王德江(1981—),男,黑龙江双鸭山人,博士研究生,助理研究员,2004年于南开大学获得学士学位,2007年于清华大学获得硕士学位,主要从事航空相机设计工作。E-mail: wangdj04@live.cn



李文明(1978—),男,吉林农安人,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硕士学位,主要从事航空相机设计工作。E-mail: snow_79@163.com



董 斌(1980—),男,吉林长春人,助理研究员,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获硕士学位,主要从事航空相机结构设计工作。E-mail: dwz_863@126.com



金灿强(1977—),男,河南汝县人,助理研究员,2001年于吉林大学获学士学位,主要从事航空相机设计工作。E-mail: 18943154285@189.cn