

文章编号:1002-2082(2011)05-0872-06

推扫式线阵 TDI CCD 扫描调制传递函数分析

杨永明, 李昕阳, 赵嘉鑫

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要:根据线阵 TDI CCD 离散采样的特点,以采样间距内成像调制均值为基础,构建了推扫成像模式下线阵 TDI CCD 扫描方向的调制传递函数。该调制传递函数的数值分析表明:对于像元为 $10\ \mu\text{m}$ 的线阵 TDI CCD,行转移驱动时钟相数为 4, 3 或 2 时, Nyquist 频率处调制传递函数值分别为 0.363, 0.333 或 0.255;行频误差为 1% 及 3% 时,不同积分级数下调制传递函数变化曲线表明,增大行频误差及增加积分级数将使调制传递函数值减小,图像分辨率降低。成像实验结果符合所构建调制传递函数的定量分析结论。

关键词:调制传递函数;推扫成像;时间延迟积分;电荷耦合器件;行频误差

中图分类号: TN911.73; TP75

文献标志码: A

Scanning modulation transfer function analysis of push-broom linear TDI CCD

YANG Yong-ming, LI Xin-yang, ZHAO Jia-xin

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, CAS, Changchun 130033, China)

Abstract: Scanning modulation transfer function (MTF) for linear time-delay integration (TDI) charge coupled device (CCD) using push-broom imaging mode was established. The MTF which took the discrete sampling characteristics of linear TDI CCD into account, was based on the imaging modulation mean within sampling interval. The numerical analysis of the proposed MTF indicated that the value of MTF at Nyquist frequency for linear TDI CCD with $10\ \mu\text{m}$ pixel size was 0.363, 0.333 and 0.255 respectively, when the number of row transfer phase clocks was 4, 3 and 2. When the row frequency error was 1% or 3%, the changes of MTF curves with different integration numbers implied that increasing the row frequency error and the integration number could decrease the value of MTF and reduce the image resolution. The results of imaging experiment agree with the quantity analysis of the proposed MTF.

Key words: modulation transfer function; push-broom imaging; time delay integration; charge coupled device; row frequency error

引言

电荷耦合器件 (CCD) 能够实时获取数字化影像信息, 广泛应用于航天遥感相机。线阵 TDI CCD 具有高灵敏度、高信噪比、大动态范围等优点, 适用于航天遥感及侦察领域。对航天光电系统成像质量进行系统分析是使航天相机实现期望

分辨率的主要方法。地面像元分辨率是根据 CCD 像元尺寸, 利用几何光学得出的相机所能分辨地面目标的最小尺寸; 相机实际成像过程中由于受到大气散射及衰减、镜头及探测器性能、载体姿态变化及目标对比度等诸多因素影响, 通常难以实现地面像元分辨率。为了定量分析成像过程中各

收稿日期: 2011-04-25; 修回日期: 2011-06-08

基金项目: 国家“863”计划 (2008AA121309)

作者简介: 杨永明 (1980—), 男, 吉林长春人, 博士, 助理研究员, 主要从事航空相机成像控制技术研究工作。

E-mail: yongmingyang@sohu.com

环节对成像质量的影响, 研究人员将调制传递函数 (MTF) 引入到光电成像系统中。CCD 的 MTF^[1-3] 已得到较为深入的研究, 文献[4-5]对亚像元成像的 MTF 进行了分析, 文献[6-7]利用 MTF 对 TDI CCD 的成像质量进行分析。

目前, 缺少对线阵 TDI CCD 离散采样过程 MTF 的系统分析。本文从 MTF 的定义出发, 结合线阵 TDI CCD 离散采样的特点, 以采样间距内成像调制度均值为基础, 构建了推扫成像模式下线阵 TDI CCD 沿扫描方向的 MTF。分析了行转移电荷驱动方式、行频误差及积分级数对扫描方向 MTF 的影响, 并利用成像实验验证了所构建 MTF 的定量分析结论。

1 扫描方向 MTF 影响因素

1.1 行转移驱动方式

TDI 是一种扫描成像方式, 通过控制光生电荷沿扫描的转移实现对同一目标的多次曝光。线阵 TDI CCD 光生电荷的转移受时钟相数影响, 时钟相数越多, 电荷运动越连续, 在积分时间内产生的像移对成像质量影响越小。行方向电荷转移可利用 4 相时钟、3 相时钟或 2 相时钟驱动, 目前大多数线阵 TDI CCD 行方向电荷转移采用 4 相时钟连续式驱动。图 1 说明了 4 相时钟连续式驱动方式的工作时序^[8], 图 1 中 Cl_1, Cl_2, Cl_3 及 Cl_4 分别为 4 相时钟的时序波形, TCK 为同步转移时钟, TCK 的周期即为线阵 TDI CCD 一次行转移时间。连续式驱动方式下, 4 相时钟、3 相时钟或 2 相时钟分别在像移量达到 1/4 像元、1/3 像元或 1/2 像元时进行电荷转移; 行转移驱动时钟相数将影响线阵 TDI CCD 的 MTF。

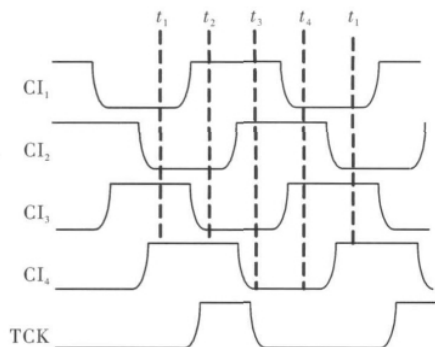


图 1 连续式 4 相时钟工作时序

Fig. 1 Continuous time sequence for 4 phase clocks

1.2 行频误差

推扫成像过程中视轴垂直对地, 通过飞机的前向飞行实现对地面景物的扫描成像。推扫成像过程中存在着飞机前向飞行产生的前向像移, 如图 2 所示, V 为飞机前向飞行速度, H 为照相高度, f' 为相机焦距, β 为地面景物点 A 与对应像点 A' 的连线与视轴的夹角。 A' 点前向像移角速度 ω_F 为

$$\omega_F = \frac{V}{H} \cos \beta \quad (1)$$

A' 点前向像移线速度 V_F 为

$$V_F = \frac{V}{H} \cos \beta \cdot \frac{f'}{\cos \beta} = \frac{V \cdot f'}{H} \quad (2)$$

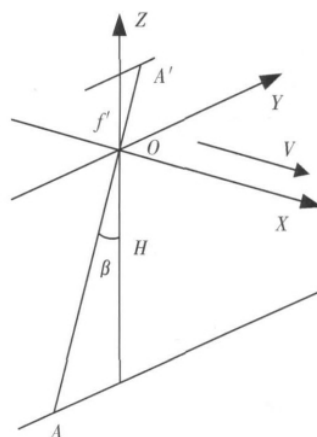


图 2 前向像移示意图

Fig. 2 Schematic of forward image motion

线阵 TDI CCD 通过控制行转移频率 (行频) 实现前向像移补偿, 设像元尺寸为 b , 则行频 k 可由 (3) 式计算。当相机焦距及像元尺寸一定时, k 只与速度和高度有关:

$$k = \frac{V_F}{b} = \frac{f'}{b} \cdot \frac{V}{H} \quad (3)$$

推扫成像过程中, 速度与高度的测量误差将导致行频出现误差, 从而影响扫描方向的 MTF。

2 光学系统的 MTF

光学系统的 MTF^[9] 是指光学系统对亮强呈正弦分布物体的成像响应。设物的亮度 $I(x)$ 分布如 (4) 式所示:

$$I(x) = i_0 + i_m \cos(2\pi f x) \quad (4)$$

式中: i_0 为物平均亮度; i_m 为物亮度变化强度; f 为空间频率。物经光学系统成像后得到像的光强分布 $I'(x)$ 如 (5) 式所示:

$$I'(x) = i'_0 + i'_m \cos(2\pi f x - \varphi) \quad (5)$$

式中: i'_0 为像平均亮度; i'_m 为像亮度变化强度; φ 为物与像之间的相位差。

调制度 M 定义为 $M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$, 则物的调制

度 $M_0 = \frac{i'_m}{i'_0}$, 像的调制度 $M'_0 = \frac{i'_m}{i'_0}$ 。MTF 定义为像的调制度与物的调制度之比:

$$\text{MTF} = \frac{M'_0}{M_0} \quad (6)$$

3 扫描方向 MTF

MTF 具有理论严谨、可推广到成像过程的各个环节、便于总体成像质量评价等优点; 如果能够将 MTF 应用于 CCD 探测器, 则可以利用 MTF 评价整个光电系统的成像质量。将 MTF 理论应用于某一系统时, 要求该系统具有线性、时间不变性及空间不变性^[2]。CCD 成像过程满足线性及时间不变性, 但 CCD 属于离散采样器件, 不满足空间不变性。K. M. Hock 提出将 CCD 探测器成像调制度定义为像元光敏区域在采样间距内成像调制度的均值^[10], 调制度均值满足空间不变性, 实现了 MTF 向 CCD 探测器的扩展。本文以成像调制度均值为基础, 建立了线阵 TDI CCD 的扫描方向 MTF。

目前大多数线阵 TDI CCD 的填充因子已经达到 100%, 即像元有效光敏区长度与像元中心距相等。设像元中心距为 d , 见图 3, x 轴正方向为 CCD 扫描方向。设沿扫描方向输入信号的光强分布为(7)式, 其中 x 为空间坐标, f 为信号空间频率, 可见输入信号的调制度为 1。取输入信号某一周期波峰位置为坐标原点 O , 设距 O 点最近像元的中心在 x 轴上的坐标为 s_H , 距该周期波谷位置最近像元的中心坐标为 s_L , 则有一 $d/2 \leq s_H < d/2$, $-d/2 \leq s_L - 1/2f < d/2$ 。 s_L 可由(8)式及(9)式得出^[5], (9)式中 round 为四舍五入取整函数:

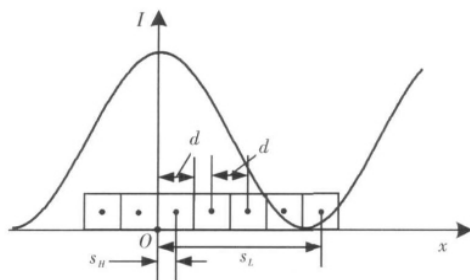


图 3 输入信号坐标及参数定义

Fig. 3 Coordinates and parameters for input signal

$$I(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2\pi f x)) \quad (7)$$

$$s_L = s_H + k \cdot d \quad (8)$$

$$k = \text{round}\left(\frac{1/(2f) - s_H}{d}\right) \quad (9)$$

3.1 时钟相数对 MTF 的影响

行转移驱动时钟相数为 n 时, 线阵 TDI CCD 在扫描方向像移量达到 d/n 时进行电荷转移, CCD 输出信号的最大值 $I_{\max}(f)$ 及最小值 $I_{\min}(f)$ 可分别由(10)式及(11)式计算:

$$I_{\max}(f) = \frac{n}{d} \int_0^{d/n} \frac{1}{d} \int_{s_H-d/2+p}^{s_H+d/2+p} I(x) dx dp \quad (10)$$

$$I_{\min}(f) = \frac{n}{d} \int_0^{d/n} \frac{1}{d} \int_{s_L-d/2+p}^{s_L+d/2+p} I(x) dx dp \quad (11)$$

在某一 s_H 下的调制传递函数 $\text{MTF}_s(f)$ 可由(12)式计算。图 4 给出了 $n=4, d=10 \mu\text{m}$, f 分别为 10 lp/mm 及 25 lp/mm, s_H 由 $-5 \mu\text{m}$ 增至 $5 \mu\text{m}$ 时 $\text{MTF}_s(f)$ 的变化情况。由图 4 可知, s_H 改变时 $\text{MTF}_s(f)$ 也将变化, (12)式定义的调制传递函数值与输入信号初始相位 s_H 有关, 不满足空间不变性。

$$\text{MTF}_s(f) = \frac{\int_0^{d/n} \int_{s_H-d/2+p}^{s_H+d/2+p} I(x) dx dp - \int_0^{d/n} \int_{s_L-d/2+p}^{s_L+d/2+p} I(x) dx dp}{\int_0^{d/n} \int_{s_H-d/2+p}^{s_H+d/2+p} I(x) dx dp + \int_0^{d/n} \int_{s_L-d/2+p}^{s_L+d/2+p} I(x) dx dp} \quad (12)$$

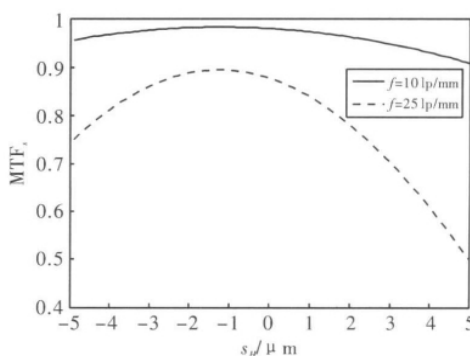


图 4 $\text{MTF}_s(f)$ 随 s_H 变化曲线

Fig. 4 $\text{MTF}_s(f)$ versus s_H

为满足 MTF 空间不变性要求, 将线阵 TDI CCD 在不同时钟相数下的调制传递函数 $\text{MTF}_m(f)$ 定义为 $\text{MTF}_s(f)$ 在采样间距内的均值, 参见(13)式。 $\text{MTF}_m(f)$ 的取值与输入信号的初始相位 s_H 无关, 满足空间不变性。图 5 说明了 $d = 10 \mu\text{m}$, n 分别取 4, 3 或 2 时, $\text{MTF}_m(f)$ 随 f 的变化情况。通过图 5 可知在 Nyquist 频率处, n 取 4, 3 或 2 时 MTF 值分别为 0.363, 0.333 或 0.255;

随着 n 的减小, 像移量增大, MTF 值降低。目前, 绝大多数线阵 TDI CCD 采用 4 相时钟连续式行转移驱动方式, 以增大 MTF 值。

$$\text{MTF}_m(f) = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \text{MTF}_s(f) ds_H \quad (13)$$

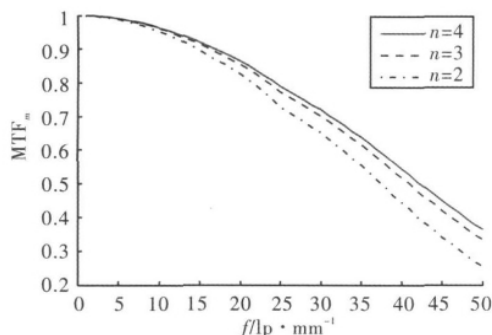


图 5 $\text{MTF}_m(f)$ 随 f 变化曲线

Fig. 5 $\text{MTF}_m(f)$ versus f

3.2 行频误差对 MTF 的影响

设行频误差为 e , 对于采用 4 相行转移驱动时钟的线阵 TDI CCD, 第 i 次电荷转移的起始相位为 $s_H + i \times e \times d/4$, 结束相位为 $s_H + i \times e \times d/4 + (1+e) \times d/4$; 当积分级数为 N 时, CCD 输出信号的最大值 $I_{\max}^N(f)$ 及最小值 $I_{\min}^N(f)$ 可分别由 (14) 式及 (15) 式计算:

$$I_{\max}^N(f) = \frac{1}{4N} \sum_{i=0}^{4N-1} \frac{1}{(1+e)d/4} \int_{i \times e \times d/4}^{i \times e \times d/4 + (1+e)d/4} I(x) dx dp \quad (14)$$

$$I_{\min}^N(f) = \frac{1}{4N} \sum_{i=0}^{4N-1} \frac{1}{(1+e)d/4} \int_{i \times e \times d/4}^{i \times e \times d/4 + (1+e)d/4} I(x) dx dp \quad (15)$$

在某一 s_H 下调制传递函数 $\text{MTF}_s^N(f)$ 为

$$\text{MTF}_s^N(f) = \frac{\sum_{i=0}^{4N-1} \int_{i \times e \times d/4}^{i \times e \times d/4 + (1+e)d/4} I(x) dx dp - \sum_{i=0}^{4N-1} \int_{i \times e \times d/4}^{i \times e \times d/4 + (1+e)d/4} I(x) dx dp}{\sum_{i=0}^{4N-1} \int_{i \times e \times d/4}^{i \times e \times d/4 + (1+e)d/4} I(x) dx dp + \sum_{i=0}^{4N-1} \int_{i \times e \times d/4}^{i \times e \times d/4 + (1+e)d/4} I(x) dx dp} \quad (16)$$

4 相时钟线阵 TDI CCD, 行频误差为 e 时调制传递函数 $\text{MTF}_m^N(f)$ 为 $\text{MTF}_s^N(f)$ 在采样间距内的均值:

$$\text{MTF}_m^N(f) = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \text{MTF}_s^N(f) ds_H \quad (17)$$

由 $\text{MTF}_m^N(f)$ 可以得出在不同行频误差及积分级数作用下, 线阵 TDI CCD 推扫成像时扫描方向 MTF 的变化曲线。图 6 说明了 $d=13 \mu\text{m}$, $e=1\%$ 时, N 分别取 16, 48 或 96 时 $\text{MTF}_m^N(f)$ 的变化曲线。由图 6 可知随着积分级数的增加, $\text{MTF}_m^N(f)$ 不断下降; N 取 96, 空间频率为 32 lp/mm 时

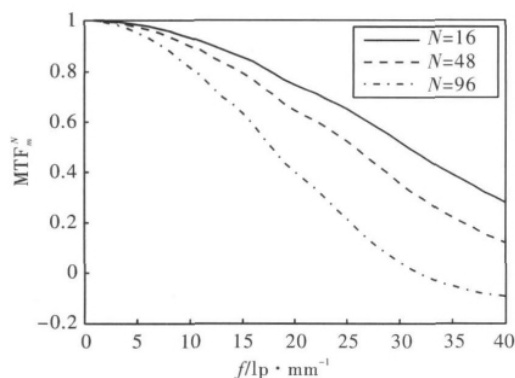


图 6 $e=1\%$ 时 $\text{MTF}_m^N(f)$ 变化曲线

Fig. 6 Curves of $\text{MTF}_m^N(f)$ when $e=1\%$

MTF 值已降低至 0。图 7 说明了 $d=13 \mu\text{m}$, $e=3\%$ 时, N 分别取 8, 24 或 36 时 $\text{MTF}_m^N(f)$ 的变化曲线。由图 7 可知, N 取 8 时 Nyquist 频率处的 MTF 值为 0.282, N 取 24 时 Nyquist 频率处的 MTF 值为 0.019, N 取 36 时空间频率为 29 lp/mm 时 MTF 值降至 0; 随着积分级数的增加 MTF 降幅加大。

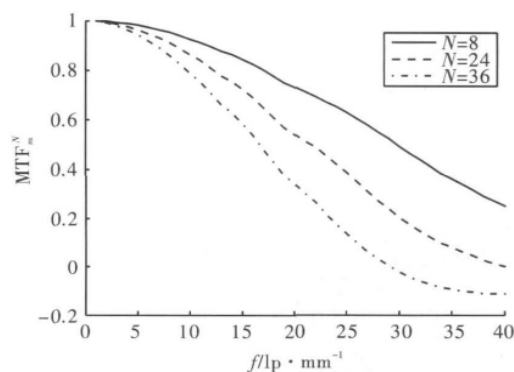


图 7 $e=3\%$ 时 $\text{MTF}_m^N(f)$ 变化曲线

Fig. 7 Curves of $\text{MTF}_m^N(f)$ when $e=3\%$

4 成像实验

为检验所构建的 MTF, 利用转台模拟推扫成像过程, 分别对分辨率板及室外景物进行了成像

实验。实验过程中采用 4 相时钟线阵 TDI CCD, 像元尺寸为 $13\ \mu\text{m} \times 13\ \mu\text{m}$ 。图 8 为分辨率板图像, 由图 8 可知, $e=3\%$, $N=8$ 时可以实现对空间频率分别为 $22.5\ \text{lp/mm}$ 及 $38.5\ \text{lp/mm}$ (Nyquist 频率) 靶标的有效分辨; $e=3\%$, $N=24$ 时可对空间频率为 $22.5\ \text{lp/mm}$ 的靶标进行分辨, 但无法分辨 Nyquist 频率的靶标, 这与图 7 给出的 $\text{MTF}_m^N(f)$ 曲线变化规律相符。图 9 为 $N=36$, e 分别取 0% 及 3% 时室外景物图像, 从图 9 可以发现 $e=3\%$ 时得到的外景图像中, 部分景物细节已无法分辨, 这与图 7 中 $e=3\%$, $N=36$ 时 $\text{MTF}_m^N(f)$ 曲线表明分辨率下降情况相符。

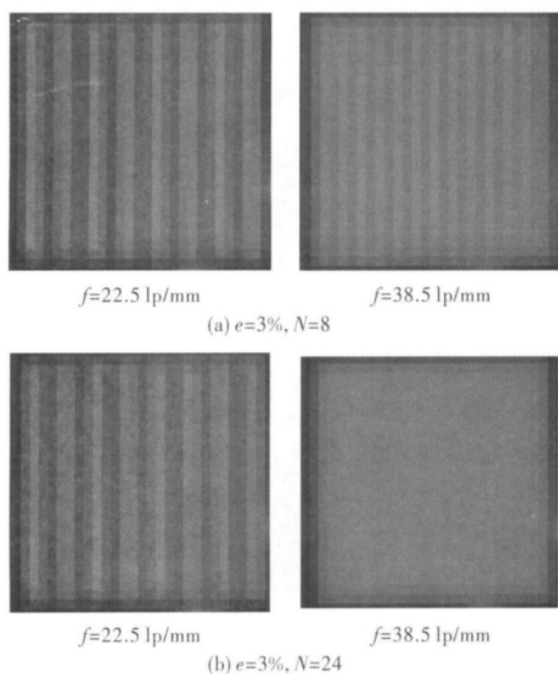


图 8 分辨率板图像

Fig. 8 Images of resolution checkers

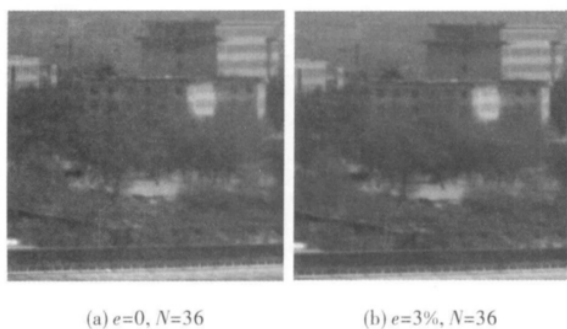


图 9 室外景物图像

Fig. 9 Images of outdoor scene

在遥感成像过程中, 光电成像系统的整体传递函数为各环节传递函数的乘积, 大气条件、光学

系统、装调误差等多种因素都将导致传递函数降低。为了能够实现对期望空间频率的有效分辨, 相机在期望空间频率处的 MTF 值应大于 $0.2^{[11]}$ 。根据本文构建的线阵 TDI CCD 扫描方向 MTF 可以得出不同成像条件下可有效分辨的空间频率。如由图 6 可知, $e=1\%$, $N=96$ 时, 可有效分辨的空间频率为 $25.2\ \text{lp/mm}$; 由图 7 可知, $e=3\%$, $N=36$ 时, 可有效分辨空间频率为 $23.1\ \text{lp/mm}$ 。

5 结论

本文根据线阵 TDI CCD 离散采样过程, 建立了推扫成像模式下线阵 TDI CCD 的扫描方向 MTF, 分析了时钟相数及行频误差对扫描方向 MTF 的影响。由数值分析结果可知, 对于像元为 $10\ \mu\text{m}$ 的 CCD, 行转移驱动时钟相数为 4, 3 或 2 时 Nyquist 频率处 MTF 值分别为 0.363, 0.333 或 0.255。行频误差为 1% 及 3% 时在不同积分级数下的 MTF 变化曲线表明, 增大行频误差及增加积分级数将使 MTF 值减小, 图像分辨率降低; 成像实验与 MTF 定量分析结果相符。本文所建立的调制传递函数可用于分析推扫成像模式下, 光电成像系统在不同成像条件下可有效分辨的空间频率。

参考文献:

- [1] FELTS J C, KARIM M A. Modulation transfer function of charge-coupled devices[J]. Applied Optics, 1990, 29(5): 717-722.
- [2] 郑琳, 仲思东, 何对燕. 电荷耦合成像器件的调制传递函数[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1996, 21(2): 176-182.
ZHENG Lin, ZHONG Si-dong, HE Dui-yan. The modulation transfer function of charge-coupled devices[J]. Journal of Wuhan Technical University of Surveying and Mapping, 1996, 21(2): 176-182. (in Chinese with an English abstract)
- [3] MAGNAN P, ESTRIBEAU M, ROLLAND G, et al. Theoretical evaluation of MTF and charge collection efficiency in CCD and CMOS image sensors [J]. SPIE, 2009, 7427: 23-34.
- [4] 王凌, 冯华君, 徐之海. 基于调制传递函数的 CCD 亚像元成像质量评价[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(7): 845-847.
WANG Ling, FENG Hua-jun, XU Zhi-hai. Evaluation for subpixel imaging quantity of CCD sensor

- based on modulation transfer function[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2004, 38(7): 845-847. (in Chinese with an English abstract)
- [5] 王凌, 徐之海, 冯华君, 等. 线阵推扫式 CCD 亚像元成像的列向动态调制传递函数[J]. 浙江大学学报:工学版, 2008, 42(2): 317-320.
WANG Ling, XU Zhi-hai, FENG Hua-jun, et al. Transverse dynamic modulation transfer function of subpixel push-scanning imaging by linear CCD[J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science, 2008, 42(2): 317-320. (in Chinese with an English abstract)
- [6] LAMBERT B M, HARBOLD J M. Experimental methods for measurement of the modulation transfer function (MTF) for time delay and integrate (TDI) charge coupled device (CCD) image sensors [J]. SPIE, 2009, 7405: 75-83.
- [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 Tian-bo, GUO Yong-fei, LI Yun-fei. Precision of row frequency of scientific grade TDI CCD camera [J]. Optics and Precision Engineering, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese with an English abstract)
- [8] 许世文, 姚新程, 付苓. 推扫式 TDI-CCD 成像时像移影响的分析[J]. 光电工程, 1999, 26(1): 60-63.
XU Shi-wen, YAO Xin-cheng, FU Ling. An analysis for the influence of image motion on push-broom TDI-CCD imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 1999, 26(1): 60-63. (in Chinese with an English abstract)
- [9] 刘亚侠. TDI CCD 遥感相机标定技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
LIU Ya-xia. Research on the calibration technique of the TDI CCD remote sensing camera[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine mechanics and Physics, CAS, 2005. (in Chinese)
- [10] HOCK K M. Effect of oversampling in pixel arrays[J]. Optical Engineering, 1995, 34(5): 1281-1288.
- [11] 杨秉新. TDI CCD 相机的相对孔径与器件像元尺寸关系的研究[J]. 航天返回与遥感, 2001, 22(2): 9-12.
YANG Bing-xin. Investigation on the relationship of relative aperture to pixel dimensions for TDI CCD camera[J]. Space Craft Recovery and Remote Sensing, 2001, 22(2): 9-12. (in Chinese with an English abstract)