

数字域时间延迟积分 CMOS 遥感相机 动态传函建模分析

陶淑苹^{1*}, 冯钦评¹, 陈晓龙^{1,2}, 郑亮亮¹, 张紫玉^{1,2}, 高 倓^{1,2}

(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)

摘要: 调制传递函数(MTF)是遥感相机的重要评价指标,但是目前对于数字域 TDI CMOS 相机动态 MTF 特性研究十分有限,为了深入研究其像质下降机理,结合数字域 TDI CMOS 成像原理,建立了像元、电子快门、曝光时间、振动引起的数字域 TDI 成像 MTF 下降数学模型。结合推导模型开展了预估分析和实验验证。结果表明:传感器的有效像元区域分布会影响图像 MTF,且开口率越小影响越大;CMOS 传感器的卷帘快门会导致数字域 TDI 成像 MTF 下降,卷帘速度越慢影响越严重,其中卷帘速度从 $6\ \mu\text{s}$ 变为 $10\ \mu\text{s}$ 时,对应的图像 MTF 从 0.191 下降为 0.177;曝光时间越短则 MTF 越高,尤其当存在低频像移失配时更为明显,曝光时间从 $180\ \mu\text{s}$ 减小为 $100\ \mu\text{s}$ 时,图像 MTF 从 0.126 提高为 0.155,但同时也会影响图像信噪比,因此在实际应用中应合理选择曝光时间。

关键词: 时间延迟积分;图像传感器;卷帘快门;调制传递函数;像移

中图分类号:TP394.1;TH691.9

文献标志码:A

doi:10.37188/CO.2022-0111

Dynamic MTF modeling and analysis of digital domain TDI CMOS remote sensing camera

TAO Shu-ping^{1*}, FENG Qin-ping¹, CHEN Xiao-long^{1,2}, ZHENG Liang-liang¹,

ZHANG Zi-yu^{1,2}, GAO Tan^{1,2}

(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)

* Corresponding author, E-mail: taoshuping-163@163.com

Abstract: The modulation Transfer Function (MTF) is an important evaluation index for remote sensing cameras, but at present, the research on the dynamic MTF characteristics of digital domain TDI CMOS cameras is very limited. In order to deeply research its image quality degradation mechanism, combined with the principle of digital domain Time Delay Integration Complementary Metal Oxide Semiconductor (TDI CMOS) imaging, a mathematical model of digital domain TDI imaging MTF degradation caused by pixel, electronic shutters, exposure time and vibration is established. Combined with the derived model, the prediction analysis and experimental verification are carried out. The results show that the regional distribution of

收稿日期:2022-06-01; 修订日期:2022-07-12

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 62075219); 吉林省重点科技研发计划项目(No. 20220201076GX)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 62075219); Key Technological Research Projects of Jilin Province, China (No. 20220201076GX)

effective pixels of the sensor will affect the image MTF with a greater influence from smaller opening rates, and the rolling shutter of the CMOS sensor will lead to the decrease of the digital domain TDI imaging MTF with a more serious impact for slower rolling shutter speeds. When the rolling shutter speed changes from $6\ \mu\text{s}$ to $10\ \mu\text{s}$, the corresponding image MTF decreases from 0.191 to 0.177. As the exposure time shortens, the MTF grows higher, especially when there is low-frequency image shift mismatch. When the exposure time is reduced from $180\ \mu\text{s}$ to $100\ \mu\text{s}$, the MTF increases from 0.126 to 0.155 with some influence on the image signal-to-noise ratio. Therefore, the exposure time should be reasonably controlled in practical applications.

Key words: TDI; image sensor; rolling shutter; MTF; image motion

1 引言

时间延迟积分(Time Delay and Integration, TDI)技术,通过对同一列像素信号在扫描运动的同时多次延时累加,可在低照度、快速扫描条件下,获得高灵敏度、高空间分辨率的图像,因此被广泛应用于航空、航天遥感相机中。

然而传统实现 TDI 的 TDI CCD 器件存在功耗大、成像控制复杂、级数不可连续调整等固有缺陷。为了解决上述问题,必须从 CMOS 传感器入手,寻求实现 TDI 的新方式。因此, MAYE R、ERCAN、XU、NIE 等人分别提出了不同的片上 TDI CMOS 设计方法^[1-5]。为了摆脱器件束缚、增强灵活性,学者们进一步提出了数字域 TDI CMOS^[6-11]。

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)是遥感相机成像质量的重要评价指标之一,为了深入了解成像系统的传函特性,多年来研究人员开展了大量研究工作。TDI CCD 在轨飞行成像过程中 MTF 下降分析在卫星研制领域得到广泛研究,所采用的理论是通过像移分析 TDI CCD 推扫成像过程中对 MTF 的影响^[12-13],但是 TDI CCD 与 CMOS 在像元结构、电荷转移、信号累加方式等各方面都存在巨大差异,TDI CCD 的传函及像移模型并不适用于 TDI CMOS 成像系统。

Fillfactory 公司 LEPAGE G 针对提出的 TDI CMOS 传感器设计架构给出了简单的 MTF 讨论分析^[2],但该方案不适合多次采样叠加的数字域 TDI CMOS 成像系统,也没有考虑成像过程中有关因素对 MTF 的影响。2015 年,韩国空间研究院和天津大学分别提出通过缩短曝光时间来降低运

动模糊引起的 TDI CMOS 传函下降^[14-15],但降低了系统信噪比,且均未涉及降质模型研究。天津大学研究团队首次基于 TDI CMOS 传感器开展了像移降质模型研究^[16-18],但只考虑了过采样叠加和线性像移失配对 MTF 的影响,未考虑传感器快门、卫星姿态变化、轨道运动、振动等因素的影响。

综上,目前对于数字域 TDI CMOS 相机像质下降的研究十分有限,相关研究工作主要集中在线性像移失配对 MTF 影响分析层面,未系统深入地揭示数字域 TDI 在轨动态成像过程 MTF 下降因素及机理。

本文从数字域 TDI 成像原理出发,结合理论建模和仿真分析,研究数字域 TDI CMOS 遥感相机动态成像过程中像元结构、电子快门、曝光时间、振动对成像质量的影响,得出数字域 TDI CMOS 遥感相机像质下降模型,最后结合成像实验结果进行讨论。

2 数字域 TDI CMOS 成像原理

数字域 TDI 是指将时间延迟积分的操作借助现场可编程门阵列(FPGA)、外部存储器等在模数转换后的面阵图像信号上完成,这是近些年对于多模态和小型化高光谱遥感成像需求日益紧迫的情况下提出的新兴成像模式。

数字域 TDI 算法基本原理如图 1 所示,以同列像素逐行累加为例,在推扫成像过程中,目标依次经过 CMOS 像素阵列的不同像元行。在第一个行周期,利用第 3 行像元(1 级像元)对目标成像。在第二个行周期,目标相对传感器在像面移动一个像元位置,此时 CMOS 像素阵列第 2 行像元(二级像元)与上一帧图像的第 3 行图像恰好对

应同一目标, 两信号累加后进入下一级积分。依次类推, 直到第 M 个行周期, 第 M 级像元信号与

前面共 $M-1$ 级像元对同一目标的信号累加后, 输出积分信号。

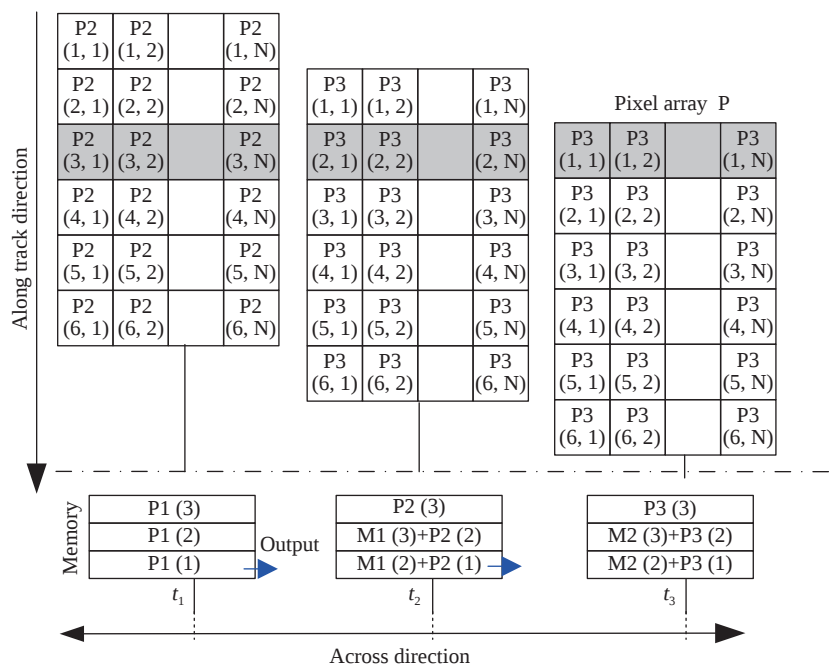


图 1 数字域 TDI 算法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TDI algorithm in digital domain

根据上述描述, 数字域 TDI 成像基本原理与 TDI CCD 并无区别, 都要求在扫描成像过程中每个行周期目标投影在像面恰好移动一个像元位置的距离。但同时也存在明显差异, 即数字域 TDI 成像 M 级积分经过了 CMOS 传感器 M 次快门曝光以及 M 次信号重采样。

3 数字域 TDI CMOS 系统传函模型

数字域 TDI CMOS 遥感相机成像过程中 MTF 将受到多种因素的影响。将干扰因素分解为相对独立的离散单因子, 包括目标、光学系统、大气、离焦、像移、CMOS 像元结构、快门、曝光时间、采样累加方式、级数、位姿(轨道、姿态角)变化、振动。最终, 数字图像的调制可近似描述为各环节调制传递函数的乘积。因为目标、大气、光学系统、离焦、线性像移失配这些环节与 TDI CCD 成像系统一致, 而且其研究已经相对成熟, 因此本文选择异于 TDI CCD 遥感相机的其他几个关键因素进行分析。

3.1 像元结构对 MTF 的影响分析

在 CMOS 有源像素传感器 (APS) 阵列中, 每

个像元由 2 个功能部分组成: 一部分为发生光电效应的有效区域, 称为光敏元; 另一部分是用于将收集的电荷读出的控制电路。显然, APS 像元的填充因子小于 100%。文献 [12-13] 等在分析 CCD 动态传函时未考虑孔阑的影响, 是因为 CCD 的填充因子接近 100%, 但 CMOS APS 与 CCD 不同, 在分析 CMOS 图像传感器的动态传函时还必须考虑孔阑影响。

如图 2 所示, 定义垂轨方向为 x 轴, 沿轨方向为 y 轴。以 L 形有效区域像元结构为例, 图中 P 代表像元尺寸, $a_i (i=1,2)$ 代表垂轨方向的像元有效获取尺寸, $A_i (i=1,2)$ 代表沿轨方向的像元有效获取尺寸, 灰色区域对光不敏感。

对于辐射强度为 $I(x,y)$ 的目标场景, 经过探测器光电感输出电信号可表示为:

$$G(x,y) = h(x,y) * I(x,y) = \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} \int_{-\frac{P}{2}}^{\frac{P}{2}} h(x,y) I(x-\tau, y-u) d\tau du \quad (1)$$

式中, $h(x,y)$ 为 CMOS 传感器脉冲响应函数。通常情况下对其进行傅立叶变换即可得到传感器的 MTF。为便于分析, 首先计算得到单方向单个矩形的脉冲响应传函:

$$MTF_{\text{aperture},x}(\omega) = \left| \frac{1}{p} \int_{-\frac{a}{2}}^{\frac{a}{2}} h(x) e^{-j\omega x} dx \right| = \frac{a}{p} \text{sinc}\left(\frac{\omega a}{2}\right), \quad (2)$$

然后将“L”形分解为 2 个矩形, 得到由 于孔阑特性曲线产生的 MTF:

$$MTF_{\text{aperture}} = \left| e^{j\frac{\pi}{2} \frac{a_1}{p}} \sum_{i=1}^2 \left[\frac{A_i}{p} \times (a_i - a_{i-1}) \times \alpha_i \times \text{sinc} \frac{\pi (a_i - a_{i-1})}{2p} \times e^{j\frac{\pi}{2} \frac{a_i}{p}} \right] \right|$$

$$\left| e^{j\frac{\pi}{2} \frac{A_1}{p}} \sum_{i=1}^2 \left[\frac{a_2}{p} \times (A_i - A_{i-1}) \times \beta_i \times \text{sinc} \frac{\pi (A_i - A_{i-1})}{2p} \times e^{j\frac{\pi}{2} \frac{A_i}{p}} \right] \right|$$

$$\alpha_i = \frac{a_i}{\sum_{m=1}^2 A_m \times (a_m - a_{m-1})} \quad \beta_i = \frac{A_i}{\sum_{m=1}^2 A_m \times (a_m - a_{m-1})} \quad a_0 = 0, \quad (3)$$

式中, α 为垂轨方向权重, β 为沿轨方向权重, a_i, a_m 为垂轨方向的像元有效获取尺寸, A_i, A_m 为沿轨方向的像元有效获取尺寸。

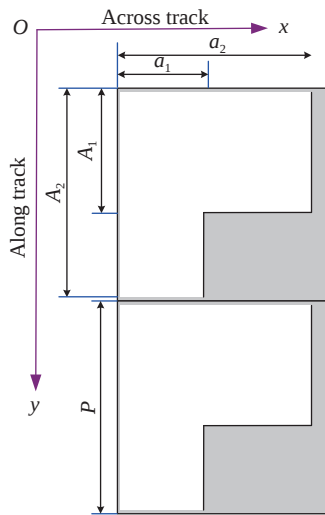


图 2 “L”形有效区域像元结构图

Fig. 2 Pixel structure of "L" shaped effective area

利用式(3)在同一像元尺寸下分别选取 0.85、0.65、0.5 三种开口率, 得到不同开口率下 MTF 曲线如图 3(彩图见期刊电子版)所示。

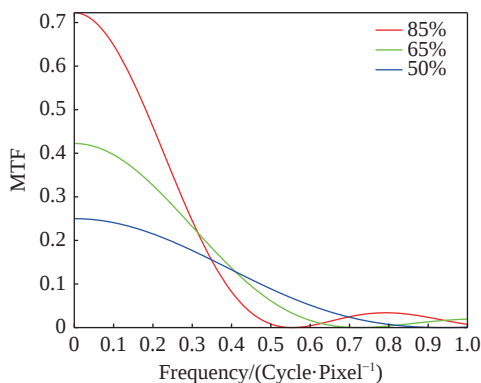


图 3 不同开口率下 TDI CMOS 的 MTF 曲线

Fig. 3 MTF curves of TDI CMOS at different opening rates

分析图 3 可知, CMOS 传感器像元对传函的影响与像元感光区域直接相关, 且开口率越小对数字域 TDI 成像影响越大。

3.2 电子快门对 MTF 的影响分析

CMOS 传感器的电子快门分为卷帘和同步快门两种, 同步快门的所有像素同时曝光, 一帧曝光结束后再读出, 卷帘快门一帧图像的曝光时间均不相同, 同步曝光与分时曝光对静止目标成像不会存在差异, 但是对于必然存在像移运动的 TDI 成像来讲, 必须要考虑非同时曝光对图像传函的影响^[19]。CMOS 电子快门对数字域 TDI 成像的影响可通过计算卷帘快门引起的像移传函得到。

为简化分析, 假设卷帘快门方向与扫描运动方向相反, 且不存在偏流误差, 即目标景物在传感器像面投影只有沿卷帘快门反方向的速度分量。假设 P 为视场内目标景物点, 在推扫成像过程中, P 与 S 的几何投影关系如图 4 所示。

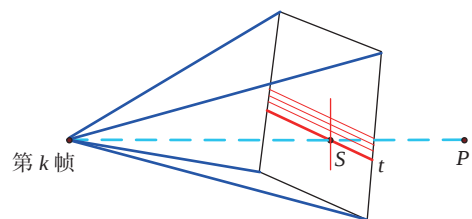


图 4 运动目标点在传感器投影成像为线

Fig. 4 The moving target point is imaged as a line in the projection of the sensor

以 $P_k(p_x, p_y)$ 表示第 k 帧正常图像目标点对应的成像点位置, 其对应失真图像的成像点位置表示为 $S_k(s_x, s_y)$ 。根据卷帘快门工作原理可知, 失真图像的每个扫描行在曝光时间的某一特定时刻采样, 以 $kT + S_y$ 表示第 k 帧图像像素点 $S_k = (s_x, s_y)$ 的采样时刻。可以推导出在一个行周期内, 由卷帘

快门产生的帧内和帧间像移分别为:

$$\Delta S_{\text{intra}} = \int_{kT+s_{y1}}^{kT+s_{y2}} v(t)dt = \frac{a}{T} \times \left(T_{\text{rft}} + N_{\text{pix}} \times \frac{1}{f_{\text{rd}}} \right), \quad (4)$$

$$\Delta S_{\text{inter}} = \int_{(k-1)T+s_{y1}}^{kT+s_{y2}} v(t)dt = \frac{a}{T} \times \left(\frac{T_{\text{int}} + T_{\text{fm, roll}}}{N} - T_{\text{rft}} \right), \quad (5)$$

式中, T 为行转移周期, T_{rft} 为行空白时间, N_{pix} 为每行图像像元数, f_{rd} 为像元读出频率, T_{int} 为行转移周期内实际曝光时间, 且曝光时间不大于行转移周期, $T_{\text{fm, roll}}$ 为帧同期。

分析上式可得: 当在 $[(k-1)T + s_{y1}, kT + s_{y2}]$ 时间间隔内, 若 $v_y(t) = 0$, 则 S_k 与 S_{k-1} 仍位于同一扫描行, 此时不存在帧间几何失真, 因此在应用中应通过合理采样设计消除帧间像移。但帧内失真不可避免, 该像移会引起 MTF 下降, M 级积分其 Nyquist 频率处的 RS 传函为:

$$\text{MTF}_{\text{RS}} = \text{sinc}(\pi \times M \times \Delta S_{\text{intra}} \times f_{\text{Nyquist}}) \quad (6)$$

采用某遥感相机在轨标称成像参数进行分析。该相机像元尺寸为 $4.25 \mu\text{m}$, 在轨标称行转移时间为 $128 \mu\text{s}$, 在 8 级和 16 级积分级数下, 计算得到不同像素读出频率(对应于不同卷帘快门速度)下 MTF 曲线如图 5(彩图见期刊电子版)所示。

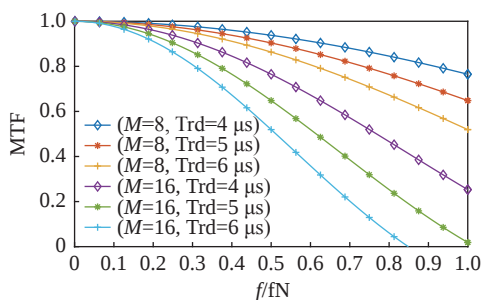


图5 不同RS速度和级数下的MTF曲线

Fig. 5 MTF curves at different RS speeds and stages

观察图 5 可知, 卷帘快门效应引起的像移会对数字域 TDI 算法带来较大的影响, 尤其在卷帘速度较慢或积分级数较高时影响更为突出。但只要运动速度确定, 就可以计算出卷帘快门引起的像移影响, 甚至可进一步对失真图像进行校正。

3.3 曝光时间、振动对 MTF 的影响分析

与 TDI CCD 不同, 数字域 TDI CMOS 成像系统的曝光时间可独立于行周期进行单独设置。

而运动对像元模糊和 TDI 成像的影响均与曝光时间息息相关, 因此对于数字域 TDI CMOS 成像系统需重新构建与运动有关的像移传函模型。

将像移分为垂轨横向像移和沿轨纵向像移两类。考虑偏流角为引起横向像移的主要因素, 单个积分周期内产生的横向像移失配量 Δd 可以根据曝光时间和偏流角等参数算出:

$$\Delta d = T_{\text{int}} \times v_p \times \sin(\theta), \quad (7)$$

式中, v_p 为沿扫描方向的像移速度, θ 为偏流角。

根据数字域 TDI 采样累加原理可以得到横向像移过程的退化函数为:

$$h_{\text{across}}(x, y) = \frac{a}{T_{\text{int}} \cdot v_p \cdot \sin(\theta) \cdot M} \cdot \text{rect} \left[\frac{x}{\frac{T_{\text{int}} \cdot v_p \cdot \sin(\theta) \cdot M}{a}} \right], \quad (8)$$

由公式 (8) 可知, 偏流角或积分级数大, 会引起退化函数扩散, 即传递性能变差。因此在积分扫描成像, 尤其是在高积分级数情况下, 必须保证偏流角补偿控制精度。如果偏流补偿欠佳, 则应该尽量采用小级数成像, 避免横向像移导致的图像质量退化。

暂不考虑卷帘快门产生的像移影响, M 级数字域 TDI 积分的纵向像移速度匹配残余误差引起的退化函数为:

$$h_{\text{along}}(x, y) = \frac{1}{\sum_{i=1}^M \varepsilon(i)} \text{rect} \left[\frac{y}{\sum_{i=1}^M \varepsilon(i)} \right], \quad (9)$$

式中 ε 为纵向像移匹配残差, 其定义如式 (10) 所示。式中 v_e 为数字域 TDI CMOS 的平均行转移速度。

$$\varepsilon = \frac{v_e - v_p}{v_p}, \quad (10)$$

在成像过程中除了上述整体像移匹配残差外, 平台或单机振动还会引起遥感相机像移速度矢分布场变化, 进而引入信息采样不规则性和空间变化的像元运动模糊, 影响 TDI 成像质量。

为了便于分析又不失一般性, 采用正弦运动组合来表征形式复杂的振动, 像移与正弦运动关

系如图 6 所示, 得到 M 级积分的振动像移为:

$$\Delta S_{\text{vib}}(x, y) = \sum_l \frac{M}{T} \int_{(k-1)T}^{(k-1)T+T_{\text{int}}} A_l \times \sin(2\pi f_l t + \varphi_{k,l}) dt, \quad (11)$$

式中, A_l 为第 l 个振动成分的幅值, f_l 为第 l 个振动成分的振动频率, $\varphi_{k,l}$ 为第 l 个振动成分在第 k 个积分周期的初始相位, T_{int} 为单次曝光时间, T 为行转移周期。

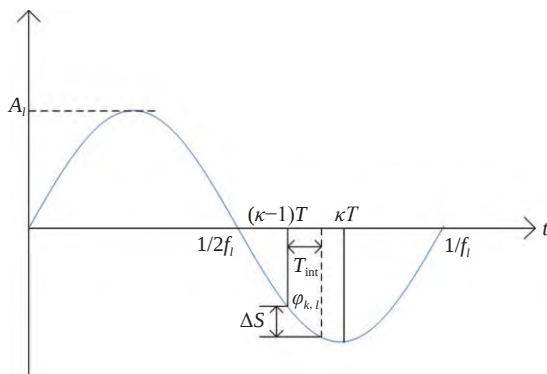


图 6 像移与正弦运动关系图

Fig. 6 Relationship between image motion and sinusoidal motion

根据运动频率与行转移时间的相对关系, 可将振动分为低频和高频两种, 因为在积分时间内低频运动的幅频变化几乎为零, 因此可将低频运动近似视为线性运动。公式(9)的像移失配即可视为频率为零的一种特殊振动, 此时可按照常规线性像移失配计算其对 MTF 的影响。

$$MTF_{\text{vib}} = \text{sinc} \left[\frac{\pi f_c}{2 f_N} \sum_{k=1}^M \frac{\int_{(k-1)T}^{(k-1)T+T_{\text{int}}} \sum_l A_l \times \sin(2\pi f_l t + \varphi_{k,l}) dt}{\int_{(k-1)T}^{kT} v_p(k) dt} \right], \quad (12)$$

式中, f_c 为特征频率, f_N 为乃归斯特频率。

假设归一化振动幅值为 0.2, 采用前述遥感相机的成像参数不变, 在 16 级积分条件下设置不同曝光时间和振动频率, 基于像移传函模型计算得到 Nyquist 频率处 MTF 值, 其与振动频率、曝光时间的关系如图 7(彩图见期刊电子版)所示。观察图 7 可以看出, 曝光时间越短, 传函越高, 尤其在低频运动下表现越明显, 但曝光时间同样会影响图像信噪比。因此, 在实际应用中应结合两个指标要求选择合理的曝光时间。另外, 可以看到,

低频运动下不同曝光时间对应的 MTF 存在较大的不同, 即低频运动对图像传函的非规律性影响较大, 但在高频运动下则规律一致, 此时的 MTF 是时空移不变的。

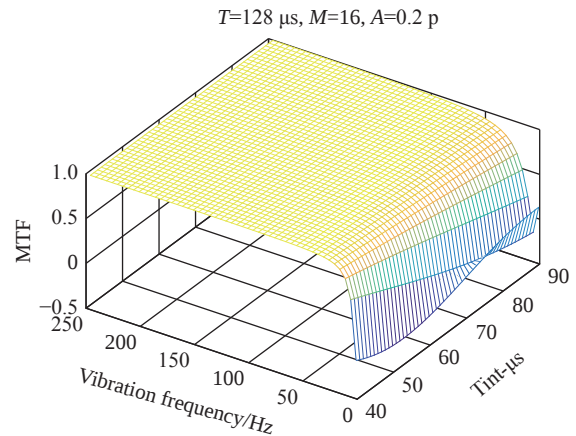


图 7 MTF 与振动频率及曝光时间的关系图

Fig. 7 Relationship between MTF, vibration frequency and exposure time

4 实验及结果分析

为了验证 MTF 理论模型的效果, 分别开展数字域 TDI CMOS 仿真及成像实验。

仿真实验选取扇形靶标图像作为样本, 根据几何投影关系、感光原理和数字域 TDI 算法生成不同开口率的积分图像, 如图 8 所示。然后采用刃边法测试图像 MTF 曲线, 得到图 9(彩图见期刊电子版)结果。可以看出, 传感器开口率越小 (即有效像元区域越小) 获取图像的 MTF 下降越严重, 与图 3 理论分析结论吻合。

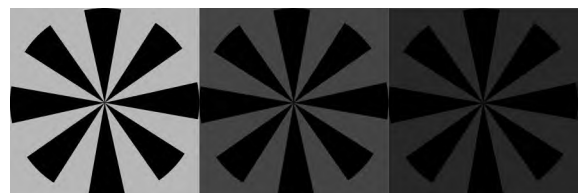


图 8 不同开口率下扇形靶标仿真图像: 从左到右的开口率分别为 0.8、0.5、0.3

Fig. 8 Simulation images of the sector target under different aperture ratios: 0.8, 0.5 and 0.3 (from left to right)

为了验证卷帘快门效应和曝光时间对 TDI 成像的影响, 设计卷帘数字 TDI CMOS 成像系统, 并开展成像实验。将相机固定于二维调整架

后安装于水平运动转台上, 整个成像过程保持转台速度不变。为满足帧间像移匹配, 设置行周期为 $200\ \mu\text{s}$, 通过调整时钟频率设置行读出时间分别为 $6\ \mu\text{s}$ 、 $10\ \mu\text{s}$, 即对应于不同的卷帘速度。8 级积分图像如图 10 所示, 可以看出, 卷帘速度降低后图像几何失真加重。刃边法计算 2 幅图像的奈奎斯特频率处 MTF 分别为 0.191、0.177。结果表明卷帘快门速度越快 MTF 下降越小, 验证了图 5 理论分析结果。

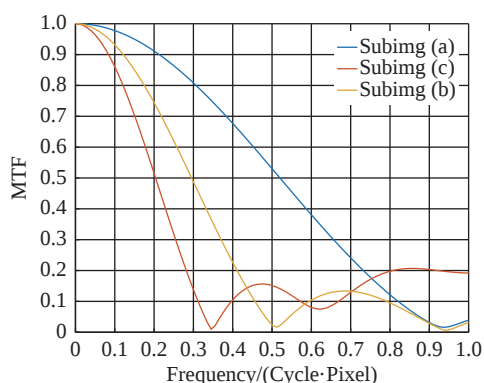


图 9 图 8 中各图像的 MTF 曲线

Fig. 9 MTF of images in figure 8



(a)



(b)

图 10 行读出时间分别为(a) $6\ \mu\text{s}$; (b) $10\ \mu\text{s}$ 时不同卷帘速度的 TDI 图像

Fig. 10 TDI images with different rolling shutter speeds. (a) $6\ \mu\text{s}$; (b) $10\ \mu\text{s}$

保持转台速度和行周期不变, 调整二维调整架使相机倾斜一定角度(实验中选取角度大约为 5°), 在此条件下对目标水平推扫成像。分别设置单次曝光时间为 100、140 和 $180\ \mu\text{s}$, 采用 16 级积分对同一目标成像, 得到不同曝光时间下的数

字域 TDI 图像如图 11 所示。由图 11 可知, 在存在偏流角失配情况下, 随着曝光时间减小, 图像边缘逐渐清晰, 但层次感减弱。计算 3 幅图像的 MTF 和信噪比, 结果如表 1 所示。可以看出缩短曝光时间对图像 MTF 有利, 但信噪比却降低, 与图 7 理论分析结果吻合。

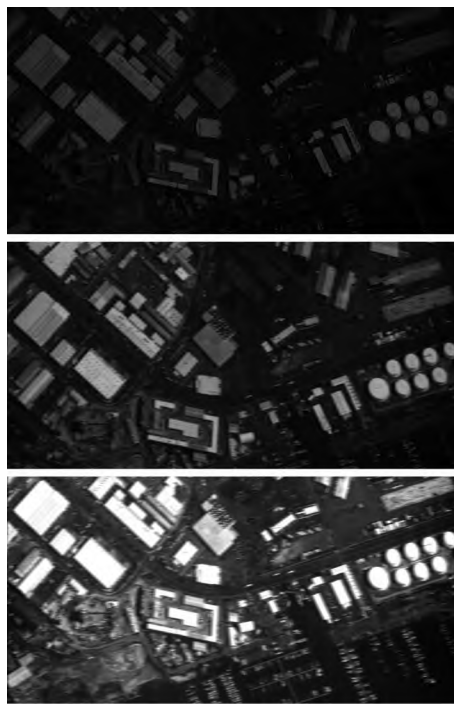


图 11 不同曝光时间的 TDI 图像: 曝光时间(从上到下)分别为 100、140、 $180\ \mu\text{s}$

Fig. 11 TDI images with different exposure times. 100, 140 and $180\ \mu\text{s}$ (from top to bottom)

表 1 图像 MTF 和 SNR 测试结果

Tab. 1 The MTF and SNR test results of images

测试图像	MTF	SNR/dB
上图	0.155	17.496
中图	0.136	23.012
下图	0.126	26.004

5 结 论

论文针对数字域 TDI CMOS 遥感相机动态 MTF 分析需求, 介绍了数字域 TDI CMOS 成像原理, 开展了像元、电子快门、曝光时间、振动对数字域 TDI CMOS 成像的影响分析, 推导了上述各因素下的 MTF 数学模型, 并对其影响进行预估分

析。构建的MTF模型表明:传感器有效像元区域分布会影响图像MTF,且开口率越小影响越大;CMOS传感器的卷帘快门会导致数字域TDI成像MTF下降,卷帘速度越慢影响越严重;曝光时间越短

则MTF越高,尤其存在低频像移失配时更为明显。为了验证构建的理论模型分别开展了计算机仿真及成像实验。实验结果与理论分析规律一致,验证了MTF模型的正确性。

参考文献:

- [1] XU J T, SHI X L, NIE K M, *et al.*. A global shutter high speed TDI CMOS image sensor with pipelined charge transfer pixel[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(7): 2729-2736.
- [2] LEPAGE G, BOGAERTS J, MEYNANTS G. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(11): 2524-2533.
- [3] NIE K M, YAO S Y, XU J T, *et al.*. A 128-stage analog accumulator for CMOS TDI image sensor[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I:Regular Papers*, 2014, 61(7): 1952-1961.
- [4] NIE K M, YAO S Y, XU J T, *et al.*. Thirty two-stage CMOS TDI image sensor with on-chip analog accumulator[J]. *IEEE Transactions on Very Large Scale Integration (VLSI) Systems*, 2014, 22(4): 951-956.
- [5] NIE K M, XU J T, GAO ZH Y. A 128-Stage CMOS TDI image sensor with on-chip digital accumulator[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(5): 1319-1324.
- [6] TAO SH P, ZHANG X Y, XU W, *et al.*. Realize the image motion self-registration based on TDI in digital domain[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(23): 11666-11674.
- [7] 陶淑革, 张续严, 冯钦评, 等. 针对广域像移变化的数字时间延迟积分方法[J]. 光学学报, 2019, 39(9): 0911001.
TAO SH P, ZHANG X Y, FENG Q P, *et al.*. Digital time delay and integration method for wide-range image motion variation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(9): 0911001. (in Chinese)
- [8] 陶淑革, 金光, 曲宏松, 等. 实现空间高分辨成像的数字域时间延迟积分CMOS相机设计及分析[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0411001.
TAO SH P, JIN G, QU H S, *et al.*. Design and analysis of CMOS camera based on time delay and integration in digital domain to realize spatial high-resolution imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0411001. (in Chinese)
- [9] 陶淑革, 金光, 曲宏松, 等. 采用卷帘数字域TDI技术的CMOS成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2380-2385.
TAO SH P, JIN G, QU H S, *et al.*. Design of CMOS Imaging System based on Rolling TDI in Digital Domain[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(9): 2380-2385. (in Chinese)
- [10] TAO SH P, JIN G, ZHANG X Y, *et al.*. Realization of the FPGA based TDI algorithm in digital domain for CMOS cameras[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8419: 841930.
- [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]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(8): 1896-1903. (in Chinese)
- [12] 庄绪霞, 王治乐, 阮宁娟, 等. 像移对星载TDICCD相机成像品质的影响分析[J]. 航天返回与遥感, 2013, 34(6): 66-73.
ZHUANG X X, WANG ZH L, RUAN N J, *et al.*. Influence analysis of image motion on image quality of satellite-board TDI camera optical system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(6): 66-73. (in Chinese)
- [13] 邱振戈, 岳庆兴, 张春玲, 等. TDI-CCD在轨成像质量MTF数值模拟[J]. 国土资源遥感, 2009, 21(1): 13-17, 33.
QIU ZH G, YUE Q X, ZHANG CH L, *et al.*. The MTF numerical simulation of TDI-CCD on-orbit imaging quality[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2009, 21(1): 13-17, 33. (in Chinese)
- [14] HEO H P, RA S W. Reducing motion blur by adjusting integration time for scanning camera with TDI CMOS[J]. *International Journal of Signal Processing Systems*, 2015, 3(2): 172-176.
- [15] MAYER F, BUGNET H, PESENTI S, *et al.*. First measurements of true charge transfer TDI (time delay integration) using a standard CMOS technology[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10564: 105640N.
- [16] 何春良, 李斌桥, 刘振旺, 等. TDI CMOS图像传感器曝光时间优化方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0204002.
HE CH L, LI B Q, LIU ZH W, *et al.*. Integration time optimization for TDI CMOS image sensor[J]. *Acta Optica Sinica*,

- 2015, 35(2): 0204002. (in Chinese)
- [17] 袁高斌. TDI-CMOS 成像系统研究与设计及 MTF 分析[D]. 天津: 天津大学, 2012.
YUAN G B. Research and design TDI-CMOS imaging system and MTF[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [18] 徐江涛, 金伟民, 聂凯明, 等. TDI-CMOS图像传感器像移降质模型研究[J]. 南开大学学报(自然科学版), 2018, 51(6): 28-34,47.
XU J T, JIN W M, NIE K M, *et al.*. Research of image motion degradation model for TDI-CMOS image sensor[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2018, 51(6): 28-34,47. (in Chinese)
- [19] 陶淑苹, 金光. 卷帘快门对数字域TDI成像的影响分析[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0311001.
TAO SH P, JIN G. Influence analysis on the rolling shutter for time delay and integration in digital domain[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(3): 0311001. (in Chinese)

作者简介:



陶淑苹(1986—), 女, 山东潍坊人, 博士, 副研究员, 硕士生导师, 2008年于四川大学通信工程专业获得学士学位, 2013年于中国科学院大学光学工程专业获得博士学位, 主要从事空间遥感成像的研究。E-mail: taoshuping-163@163.com