

TDI-CMOS 图像传感器多次采样叠加 调制传输函数模型研究

李 林 姚素英 徐江涛* 何春良

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

摘要 提出了多次采样叠加下时间延迟积分(TDI)CMOS 图像传感器沿扫描方向的调制传输函数(MTF)分析模型。基于行滚筒曝光读出原理,研究了一个行时间内采样次数、叠加次数、TDI 级数和速度失配比对扫描 MTF 的影响机理。为验证扫描 MTF 模型,基于 TDI-CMOS 图像传感器将连续视场映射为离散图像的几何和能量传输关系分析,建立了成像仿真系统并利用刃边法计算 MTF 曲线。仿真结果表明,扫描 MTF 随着采样次数增加而增大;当采样次数固定,扫描 MTF 随着叠加次数增大而减小;扫描 MTF 随着速度失配比和 TDI 累加级数增大而减小。

关键词 传感器;TDI-CMOS 图像传感器;调制传输函数;多次采样叠加;行滚筒曝光

中图分类号 TN492; TN356.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0228002

Research on Modulation Transfer Function Model of TDI-CMOS Image Sensor with Oversample-Superposition

Li Lin Yao Suying Xu Jiangtao He Chunliang

(School of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract An analytical model of modulation transfer function (MTF) for time-delay-integration (TDI) CMOS image sensor with oversample-superposition in the scanning direction is proposed. Impacts of sample number in a line-time, superposition number, TDI stage and velocity mismatch ratio on scanning MTF are studied based on the along-track-rolling exposure readout principle. To verify the scanning MTF model, an imaging simulation system is established, which is based on analysis of geometric and energy transmission relationship from continuous scene to discrete image on the TDI-CMOS image sensor. Then knife-edge method is used to calculate the MTF curve. The simulation results show that scanning MTF increases with the increase of sample number, scanning MTF is negatively related to superposition number when sample number is fixed, and scanning MTF decreases with the increase of velocity mismatch ratio and number of TDI stages.

Key words sensors; TDI-CMOS image sensors; modulation transfer function; oversample-superposition; along-track-rolling exposure

OCIS codes 040.5160; 110.2960; 110.4100

1 引 言

调制传输函数(MTF)用于计算光学成像系统的空间频率响应,表示图像对比度和空间频率之间的关系,常用于评价图像传感器系统的成像质量^[1-2]。MTF 在图像传感器像元两个坐标轴方向上可分离,对于扫描成像系统沿扫描方向的 MTF 与成像质量密切相关^[3]。时间延迟积分(TDI)是一种特殊的扫描成像方式,可以实现对同一景物的多

次曝光,等效延长曝光时间,从而改善信噪比和灵敏度^[4-7]。TDI 首先应用于电荷耦合器件(CCD)工艺,能实现像素间电荷同步转移和无噪声累加。在 CMOS 工艺下也能实现 TDI 功能,且具有低功耗、低成本、高集成度和抗辐照强等优点^[8-10]。多次采样叠加是通过对于一个瞬时视场多次采样来提高扫描方向的 MTF 值,从而提高成像分辨率,MTF 值的提高是以积分时间的减少为代价的^[3,11]。

收稿日期: 2013-09-03; **收到修改稿日期**: 2013-09-28

基金项目: 国家自然科学基金(61274021)、天津市科技支撑计划(11ZCZDGX20300)

作者简介: 李 林(1990—),男,硕士研究生,主要从事 CMOS 图像传感器设计方面的研究。E-mail: llse@tju.edu.cn

导师简介: 姚素英(1947—),女,教授,博士生导师,主要从事 CMOS 图像传感器方面的研究。E-mail: syyao@tju.edu.cn

* **通信联系人**。E-mail: xujiangtao@tju.edu.cn

针对图像传感器 MTF 的研究, Shi 等^[12] 提出了基于扫描 TDI-CCD 图像传感器多次采样叠加的 MTF 模型, 但 TDI-CCD 图像传感器成像过程及时序要求与 TDI-CMOS 图像传感器不同, 此 MTF 模型不能完全适用于 TDI-CMOS 图像传感器; Lepage 等^[10] 提出了多种不同结构的 TDI-CMOS 图像传感器设计方案, 并给出了简单的 MTF 讨论分析, 但该方案不适合多次采样叠加下的 TDI-CMOS 图像传感器, 也没有考虑 TDI-CMOS 图像传感器成像过程中有关因素对 MTF 的影响。

本文根据行滚筒曝光的 TDI-CMOS 图像传感器的工作机理和时序要求, 提出在过采样叠加下图像传感器成像系统沿扫描方向的扫描 MTF 分析模型, 讨论了多次采样叠加对扫描 MTF 的影响。建立了 TDI-CMOS 图像传感器成像仿真系统, 并采用刃边法计算 MTF, 从而验证了提出的 TDI-CMOS 图像传感器过采样叠加扫描 MTF 分析模型。

2 工作原理

TDI-CMOS 图像传感器以面阵实现线阵扫描的功能, 由有源像素阵列、累加电路、模数转换器 (ADC)、寄存器等组成。TDI-CMOS 图像传感器架构如图 1 所示, 其中 M 为 TDI 深度, P 为相邻像素间距, W 为像素感光区尺寸。

采用行滚筒曝光读出的 TDI-CMOS 图像传感器时序机理如图 2 所示 (以 4 级 TDI 为例)^[13], 每行像素要在行选时间 T_s 内完成读出和复位, 每个像素在一个行时间 T_L 内完成一次曝光, 曝光时间为

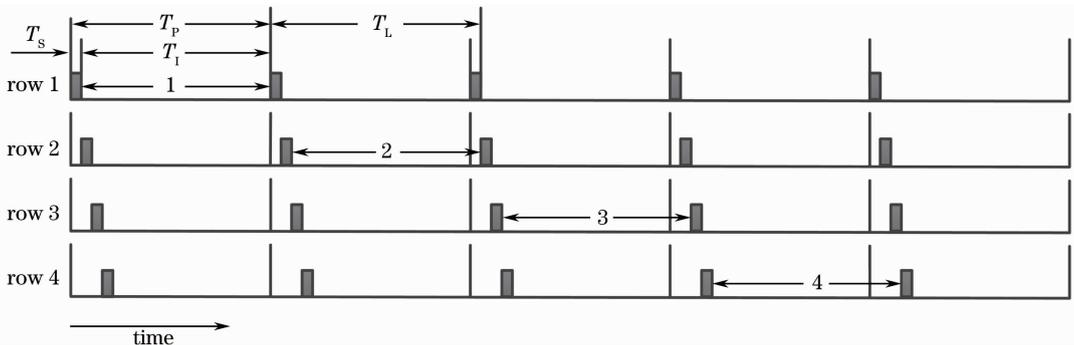


图 2 4 级 TDI 行滚筒曝光时序

Fig. 2 Timing with along-track-rolling exposure for 4 stage TDI

3 多次采样叠加下扫描 MTF

在扫描成像图像传感器中, 考虑传感器、采样过程、像移等影响因素, 沿扫描方向的 MTF 可表示为^[11-12, 14]

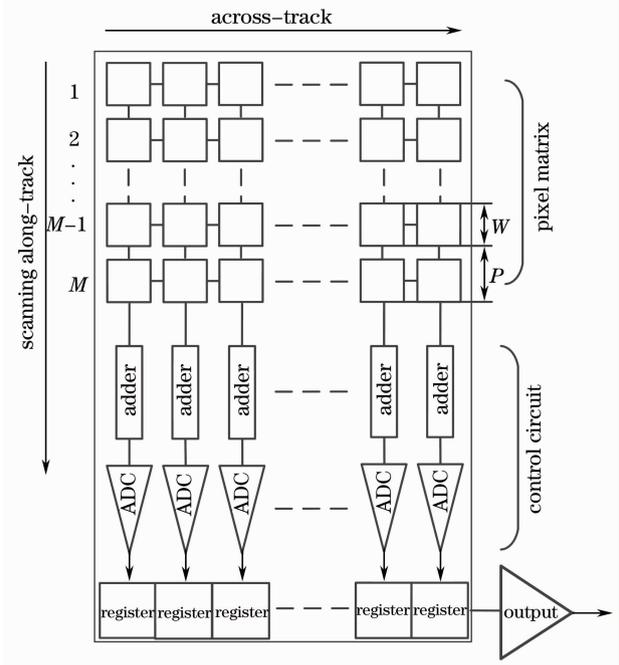


图 1 TDI-CMOS 图像传感器结构

Fig. 1 Architecture of TDI-CMOS image sensor

T_1 , 像点从第一行移动到第 4 行后被曝光 4 次, 曝光结果均进入同一累加寄存器进行累加操作, 当第 4 行像素对某一像点曝光后累加前 3 次曝光结果并读出等效 TDI 像素信号, 该累加寄存器复位于下一累加循环。为保证相邻像素的采样一致性, 需要增加一级累加寄存器实现一种空间的过采样。等效的 TDI 像素周期为 T_p 。由于每行像素的曝光开始时间和结束时间均不相同, 任意时刻只有一个像素占据列读出总线, 在不影响同列像素采集信号一致性的前提下实现了行滚筒曝光。

$$f_{\text{MTF}(S)} = f_{\text{MTF}(DE)} \times f_{\text{MTF}(SP)} \times f_{\text{MTF}(RE)} \times f_{\text{MTF}(\Delta V)}, \quad (1)$$

式中 $f_{\text{MTF}(S)}$ 为 TDI-CMOS 图像传感器沿扫描方向上的扫描 MTF, $f_{\text{MTF}(DE)}$ 为探测器调制传输函数, 表

示探测器像素单元对景物的平均积分作用, $f_{\text{MTF}(\text{SP})}$ 为采样调制传输函数, 表示探测器对景物的平均抽样效果, $f_{\text{MTF}(\text{RE})}$ 为读出调制传输函数, 表示电路读出引起的 MTF 变化, $f_{\text{MTF}(\Delta V)}$ 为速度同步调制传输函数, 表示速度失配对 MTF 的影响。

对于行滚筒曝光 TDI-CMOS 图像传感器, 假设图像传感器 TDI 级数为 M , 目标场景相对于图像传感器在扫描方向上的速度为 V_0 , V 为 V_0 在像素平面上的像方量, 则行时间为 $T_L = P/V$, 在一个行时间内积分次数为 N , 等效 TDI 像素周期为 $T_P = T_1 + T_s$ 。为保证采样一致性, 在空间过采样操作下, 则有 $T_L = N \times T_P + T_s$ 。定义扫描效率 ϵ 为

$$\epsilon = T_1/T_P. \quad (2)$$

为满足时序要求, $1 - \epsilon$ 需要小于 $1/M$ 。定义采样系数 λ 为

$$\lambda = T_L/T_P = N + 1 - \epsilon, \quad (3)$$

式中 $N=1$ 表示一个行时间内对瞬时视场采样一次, $N=n$ 则表示一个行时间内对瞬时视场采样 n 次。

假定 $I(x)$ 为目标景物的辐射分布函数, $h(x) = \text{rect}(x/d)$ 是探测冲激响应, 则探测器输出 $G(x)$ 可表示为^[11]

$$G(x) = h(x) \otimes I(x) = \text{rect}(x/d) \otimes I(x) = \int_0^d I(x - \tau)h(\tau) d\tau, \quad (4)$$

式中 \otimes 表示卷积, d 为探测器扫描区间宽度尺寸。

以采样叠加次数 $N=2$ 为例的多次采样叠加原理如图 3 所示。图中区间 $[a, a_1]$ 、 $[b, b_1]$ 为像素探测器的相邻的采样区间, 区间宽度为扫描方向单个像素尺寸 W , $\theta = W/P$ 为像素有效感光比。

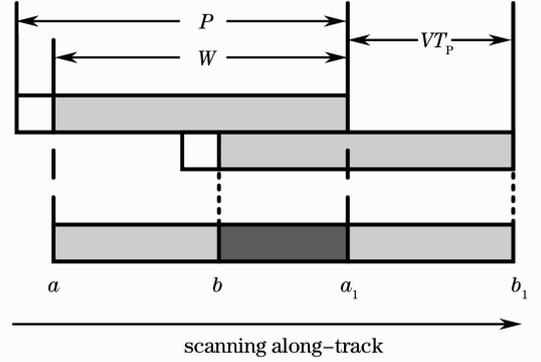


图 3 多次采样叠加示意图 ($N=2$)

Fig. 3 Diagram of oversample-superposition ($N=2$)

根据线性系统理论, 2 次叠加平均后探测器的输出 $G_2(x)$ 为

$$G_2(x) = \frac{1}{2} \left[\int_a^{a_1} I(x - \tau)h(\tau) d\tau + \int_b^{b_1} I(x - \tau)h(\tau) d\tau \right] = \frac{1}{2} \left[\int_a^{a_1} I(x - \tau)h(\tau) d\tau + \int_b^{a_1} I(x - \tau)h(\tau) d\tau \right]. \quad (5)$$

由图 3 可知, $[a, b_1]$ 、 $[b, a_1]$ 长度分别为 $S_1 = W + VT_P$ 、 $S_2 = W - VT_P$, (5) 式可表示为

$$G_2(x) = \frac{1}{2} \left[\int_a^{a_1} I(x - \tau)h(\tau) d\tau + \int_b^{a_1} I(x - \tau)h(\tau) d\tau \right] = \frac{1}{2} [\text{rect}(x/S_1) + \text{rect}(x/S_2)] \otimes I(x). \quad (6)$$

从(6)式可看出叠加平均后的冲激响应 $h_2(x)$ 为

$$h_2(x) = \frac{1}{2} [\text{rect}(x/S_1) + \text{rect}(x/S_2)]. \quad (7)$$

设 f 为扫描方向上的空间频率, 则叠加平均后的冲激响应取傅里叶变换的模即可得到 MTF, 对(7)式两边进行傅里叶变换并取模, 可得

$$f_{\text{MTF}(2)} = \frac{1}{2} [\text{sinc}(fS_1) + \text{sinc}(fS_2)]. \quad (8)$$

(8) 式可推广到一般形式, 当采样次数 N 为 n 时, k 次叠加平均后探测器 MTF 为

$$f_{\text{MTF}(\text{DE})} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{sinc}(fS_i) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{sinc} \left[fP \left(\theta + \frac{2i-1-k}{n+1-\epsilon} \right) \right], \quad (9)$$

式中 $S_i = W - kVT_P + (2i-1)VT_P = \theta P + (2i-k-1)P/(n+1-\epsilon)$ 。

考虑采样过程对 MTF 的影响, 则采样 MTF 为

$$f_{\text{MTF}(\text{SP})} = \text{sinc} \left(\frac{fP}{\lambda} \right) = \text{sinc} \left(\frac{fP}{n+1-\epsilon} \right). \quad (10)$$

考虑电路读出效率对 MTF 的影响, 则读出 MTF 为

$$f_{\text{MTF}(\text{RE})} = \text{sinc}(fVT_1) = \text{sinc} \frac{f\epsilon P}{n+1-\epsilon}. \quad (11)$$

对 TDI-CMOS 图像传感器,速度同步失配引起的像移会导致扫描 MTF 的退化,进而严重影响扫描图像质量。假设像点在像素平面上的实际像方量为 V_P ,则速度失配量 $\Delta V = V_P - V$ (V 为匹配的像方量 P/T_L),速度失配比为 $\Delta V/V$ 。经过 M 级 TDI 累加操作,则速度同步 MTF 为

$$f_{\text{MTF}(\Delta V)} = \text{sinc}(fMT_L\Delta V) = \text{sinc}\left(fPM\frac{\Delta V}{V}\right). \quad (12)$$

TDI-CMOS 图像传感器沿扫描方向扫描 MTF 为

$$f_{\text{MTF}(S)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{sinc}\left[fP\left(\theta + \frac{2i-1-k}{n+1-\epsilon}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left(\frac{fP}{n+1-\epsilon}\right) \cdot \text{sinc}\left(\frac{f\epsilon P}{n+1-\epsilon}\right) \cdot \text{sinc}\left(fPM\frac{\Delta V}{V}\right). \quad (13)$$

设图像传感器系统的奈奎斯特频率为 $f_N = 1/(2P)$,则(13)式可写为

$$f_{\text{MTF}(S)} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \text{sinc}\left[\frac{f}{2f_N}\left(\theta + \frac{2i-1-k}{n+1-\epsilon}\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[\frac{f}{2f_N(n+1-\epsilon)}\right] \cdot \text{sinc}\left[\frac{f\epsilon}{2f_N(n+1-\epsilon)}\right] \cdot \text{sinc}\left(\frac{f}{2f_N}M\frac{\Delta V}{V}\right). \quad (14)$$

一个行时间内采样次数 n 的变化引起探测器 $f_{\text{MTF}(DE)}$ 和 TDI-CMOS 图像传感器扫描方向 $f_{\text{MTF}(S)}$ 的变化分别如图 4 和图 5 所示,图中取叠加次数和采样次数 n 一致,即 $k=n$,像素有效感光比 $\theta=0.9$,扫描效率 $\epsilon=0.9$,速度失配比 $\Delta V/V=0$ 。从图 4 可以看出, $f_{\text{MTF}(DE)}$ 随采样次数 n 的增加而减小。图 5

反映沿扫描方向的扫描 $f_{\text{MTF}(S)}$ 随采样次数 n 的增加而增加,这是由于随着采样次数 n 增加,采样 $f_{\text{MTF}(SP)}$ 和读出 $f_{\text{MTF}(RE)}$ 增加,并在 $f_{\text{MTF}(S)}$ 中起到了关键作用。

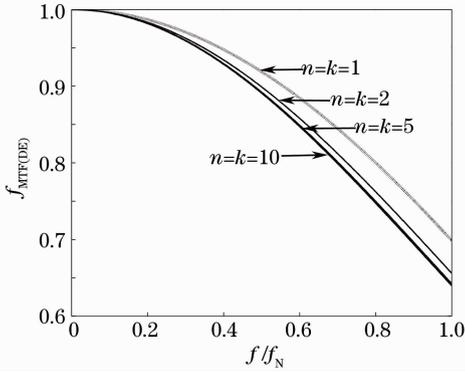


图 4 采样次数和叠加次数一致时 $f_{\text{MTF}(DE)}$ 曲线
Fig. 4 $f_{\text{MTF}(DE)}$ curves when sample number equals to superposition number

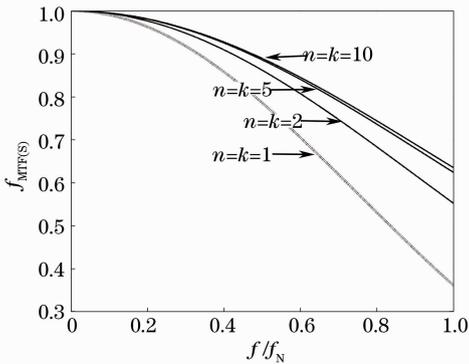


图 5 采样次数和叠加次数一致时 $f_{\text{MTF}(S)}$ 曲线
Fig. 5 $f_{\text{MTF}(S)}$ curves when sample number equals to superposition number

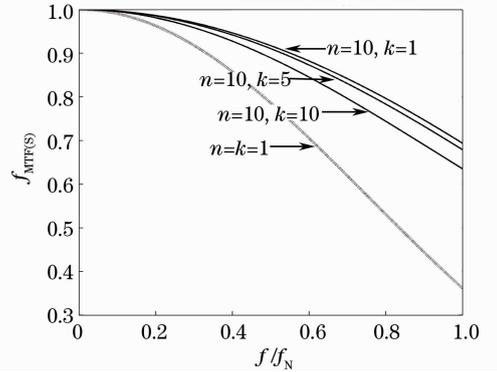


图 6 不同叠加次数时 $f_{\text{MTF}(S)}$ 曲线

Fig. 6 $f_{\text{MTF}(S)}$ curves at different sample numbers

图 6 反映了固定采样次数 n ,叠加次数 k 变化引起扫描 $f_{\text{MTF}(S)}$ 变化,图中取 $\theta = 0.9$,扫描效率 $\epsilon = 0.9$,速度失配比 $\Delta V/V = 0$ 。从图中可以看出,采样

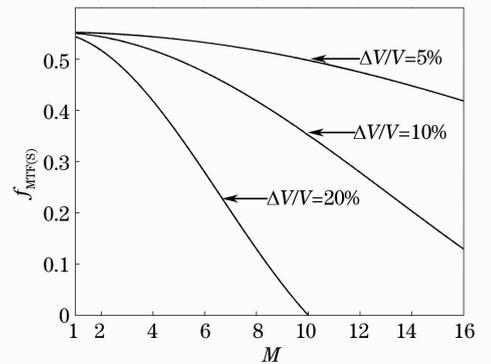


图 7 奈奎斯特频率下 $f_{\text{MTF}(S)}$ 随 TDI 级数变化曲线
Fig. 7 $f_{\text{MTF}(S)}$ curves under different TDI stages at Nyquist frequency

次数 n 固定, $f_{\text{MTF}(S)}$ 随叠加次数 k 增加而减小。

图 7 反映了空间频率 f 为奈奎斯特频率 f_N , 速度失配比变化和 TDI 级数 M 变化引起扫描 $f_{\text{MTF}(S)}$ 变化, 图中取 $n = k = 2, \theta = 0.9$, 扫描效率 $\varepsilon = 0.9$ 。从图中可以看出, 当速度失配比 $\Delta V/V$ 一定, 奈奎斯特频率下 $f_{\text{MTF}(S)}$ 随 TDI 累加级数的增加而逐渐减小。同一 TDI 累加级数下, 奈奎斯特频率下 $f_{\text{MTF}(S)}$ 随速度失配比增大而减小。当速度失配比增大时, $f_{\text{MTF}(S)}$ 随 TDI 累加级数增加而减小的趋势

加剧。

4 仿真和验证

为验证提出的 TDI-CMOS 图像传感器多次采样叠加扫描 MTF 模型, 根据 TDI-CMOS 图像传感器将已知连续视场映射为离散图像并多次曝光累加的成像机理, 分析在映射过程中的几何和能量传输关系, 使用 Matlab 建立了 TDI-CMOS 图像传感器成像数学仿真系统, 如图 8 所示。

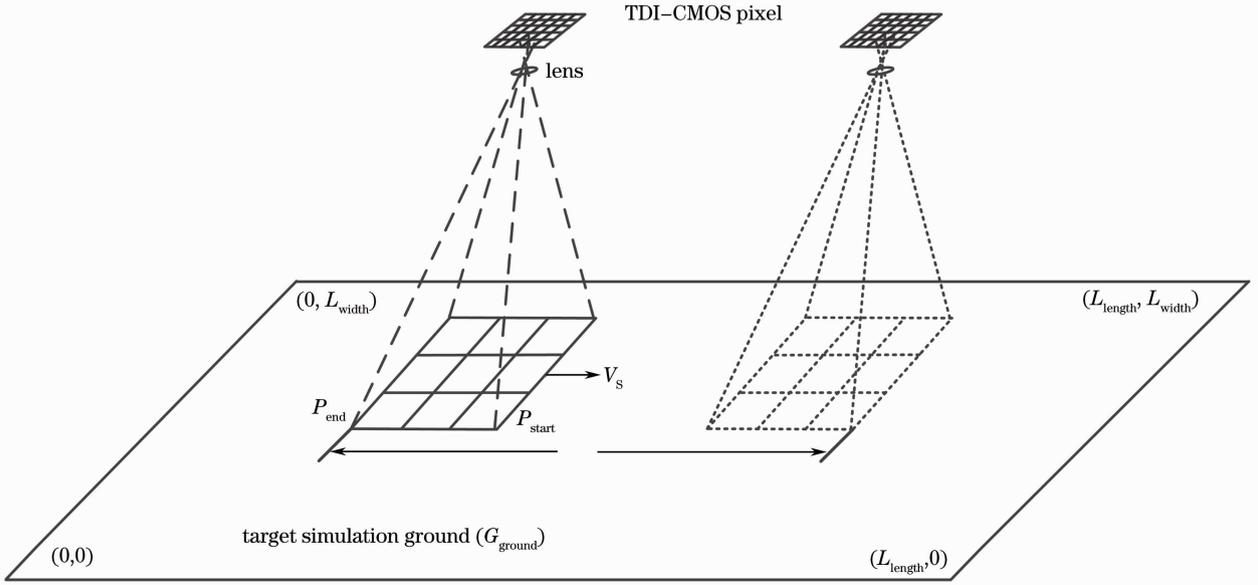


图 8 TDI-CMOS 图像传感器成像仿真系统示意图

Fig. 8 Diagram of TDI-CMOS image sensor imaging simulation system

模型中使用具有高分辨率的灰度图片作为模拟目标视场。图片上每点的灰度值表征该场景的亮度信息。根据几何映射关系, 图像传感器的每个像素对应仿真视场的一个像素矩阵。TDI-CMOS 图像传感器的输出像素信息为在 TDI 过程中相应像素在曝光时间内扫过视场的像素灰度值积分。在图 8 中, L_{length} 和 L_{width} 表示模拟目标视场的灰度图片分辨率大小, P_{start} 和 P_{end} 分别表示 TDI-CMOS 图像传感器中单个像素对应于目标视场图片中的起始像素位置和终止像素位置, V_s 表示图像传感器和目标视场间的相对运动速度, 单位为 pixel/s, A_{exp} 表示单个像素在一定时间内以速度 V_s 对目标视场进行扫描曝光区域。在目标视场参考系下 TDI-CMOS 图像传感器等效像素输出 $O(x, y)$ 为

$$O(x, y) = \sum_i^{L_N + V_N \times T_1} \sum_j^{W_N} G_{\text{ground}} \times [x \times g - L_N + i, (y - 1) \times g + j], \quad (15)$$

式中 L_N 和 g 分别为相对于 TDI-CMOS 图像传感器扫描方向有效像素尺寸和像素间距在目标视场下的像素数目, W_N 为相对于 TDI-CMOS 图像传感器垂直扫描方向有效像素尺寸在目标视场下的像素数目, V_N 为图像传感器相对于目标视场的扫描移动速度, T_1 为曝光积分时间。

选取标准分辨率靶测试图像作为模拟目标视场来仿真实现 TDI-CMOS 图像传感器成像过程。图 9 反映了建立的 TDI-CMOS 图像传感器成像数学仿真模型作用于测试靶图像的不同效果。假设 TDI-CMOS 图像传感器像素尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$, 每行像素数为 250 pixel, 像素有效感光比 θ 为 0.9, 扫描效率 ε 为 0.9, 卫星飞行高度为 800 km, 成像系统焦距为 3 m, 成像系统扫描速度为 8 km/s。图 9(a) 为 TDI 级数 $M=1$, 行时间内采样次数 $n=1$ 和叠加次数 $k=1$ 时的成像效果; 图 9(b) 为 TDI 级数 $M=4$, 行时间内采样次数 $n=1$ 和叠加次数 $k=1$ 时的成像效果; 图 9(c) 为 TDI 级数 $M=4$, 行时间内采样次数

$n=4$ 和叠加次数 $k=1$ 时的成像效果;图 9(d) 为 TDI 级数 $M=4$, 行时间内采样次数 $n=4$ 和叠加次数 $k=4$ 时的成像效果。从图 9 可以看出 TDI 级数增大, 等效曝光时间增加, 图像越明亮清晰, 信噪比

得到明显提高。在 TDI 级数 M 均为 4 时, 行时间内采样次数 n 增加, 图像分辨率得到提升, 采样次数 n 一定, 叠加次数 k 减小, 图像分辨率也有所提高。

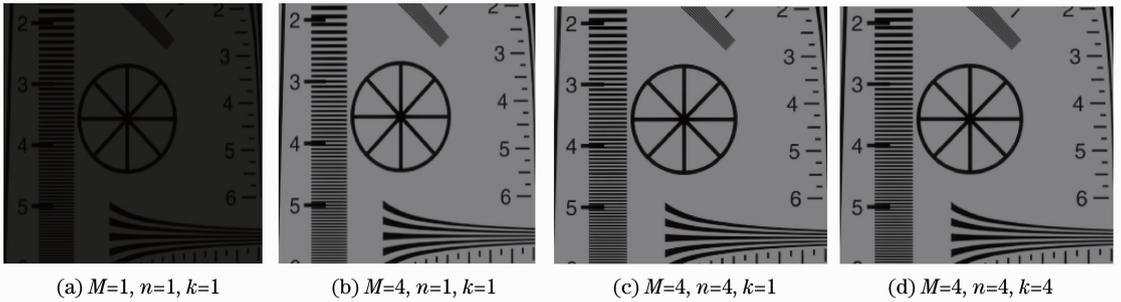


图 9 不同累加级数、采样次数和叠加次数下仿真图像

Fig. 9 Simulation pictures at different stages, sample and superposition numbers

为分析过采样叠加对 TDI-CMOS 图像传感器成像质量的影响, 同时为简化计算成像效果图片的 MTF, 选取了一张分辨率为 $3000 \text{ pixel} \times 3000 \text{ pixel}$ 的黑白条纹图片作为模拟目标视场。在经过 TDI 仿真过程后采用刃边法计算图片的 MTF 值^[15]。在模拟仿真中, 通过改变 TDI 累加级数 M 、行时间内的采样次数 n 、叠加次数 k 和速度失配比 $\Delta V/V$, 得到不同情况下的 TDI-CMOS 成像仿真系统处理的黑白条纹图像, 并计算出图像的 MTF 曲线, 如图 10~13 所示。进而分析讨论了多次采样叠加在 TDI-CMOS 图像传感器成像中的影响。

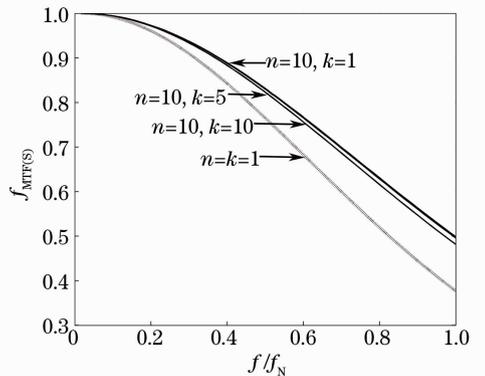


图 11 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随不同叠加次数变化曲线

Fig. 11 $f_{\text{MTF(S)}}$ curves with different superposition numbers

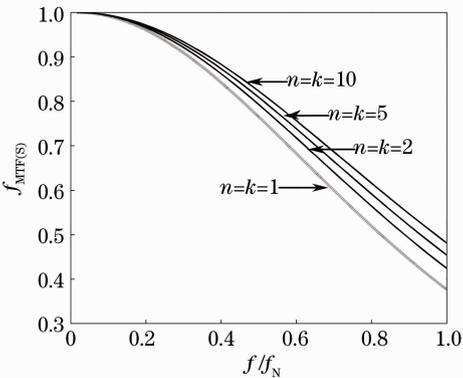


图 10 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随不同采样次数变化曲线

Fig. 10 $f_{\text{MTF(S)}}$ curves with different sample numbers

图 10 反映了在行时间内采样次数 n 和叠加次数 k 一致时, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随着采样次数 n 的变化趋势, 其中像素有效感光比 θ 为 0.9, 扫描系数 ϵ 为 0.9, 速度失配比 $\Delta V/V$ 为 0。从图中可以看出, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随着采样次数的增加而增大, 这是由于采样次数增大, 平均的采样间隔减小使得传感器扫描方向上总的扫描 MTF 增大。

图 11 为当行时间内采样次数 n 固定时, 扫描

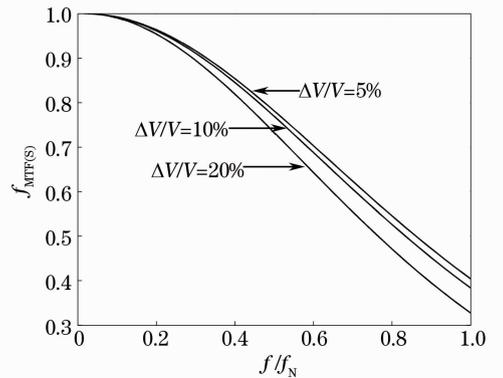


图 12 不同速度失配比下 $f_{\text{MTF(S)}}$ 曲线

Fig. 12 $f_{\text{MTF(S)}}$ curves with different velocity mismatch ratios

$f_{\text{MTF(S)}}$ 随着叠加次数 k 的变化趋势, 其中像素有效感光比 θ 为 0.9, 扫描系数 ϵ 为 0.9, 速度失配比 $\Delta V/V$ 为 0。可以看出, 当采样次数 n 固定, 叠加次数 k 越小, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 越大。其中 MTF 的上升引起分辨率的提高是以信噪比的减小为代价的。

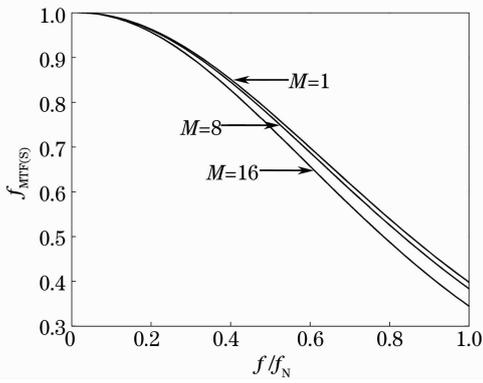
图 13 固定速度失配下不同 TDI 级数 $f_{\text{MTF(S)}}$ 曲线

Fig. 13 $f_{\text{MTF(S)}}$ curves with different TDI stages when velocity mismatch ratio is fixed

图 12 说明了当采样次数 n 、叠加次数 k 和 TDI 累加级数 M 都固定, 速度失配比 $\Delta V/V$ 不同, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随着空间频率 f 的函数曲线。其中像素有效感光比 θ 为 0.9, 扫描系数 ϵ 为 0.9, 采样次数 n 和叠加次数 k 均取 2, TDI 累加级数 M 为 8。从图中可以看出, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随着速度失配比 $\Delta V/V$ 增大而明显减小。图 13 说明了当采样次数 n 和叠加次数 k 一定, 速度失配比 $\Delta V/V$ 固定且不为 0, TDI 累加级数 M 不同, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 随着空间频率 f 的函数曲线。其中像素有效感光比 θ 为 0.9, 扫描系数 ϵ 为 0.9, 采样次数 n 和叠加次数 k 均取 2, 速度失配比 $\Delta V/V$ 为 10%。可以看出, 当 TDI 累加级数 M 增大, 扫描 $f_{\text{MTF(S)}}$ 逐渐减小。在实际的 TDI-CMOS 图像传感器成像过程中, 由于很难做到扫描速度和传感器成像时序同步, TDI 累加级数和速度失配比越小, MTF 越高, 成像分辨率也越高。

5 结 论

通过分析行滚筒曝光 TDI-CMOS 图像传感器的扫描成像工作机理和时序要求, 提出并推导了多次采样叠加下 TDI-CMOS 图像传感器的扫描 MTF 分析模型。分析结果表明: 扫描 MTF 随着采样次数增加而增大; 当采样次数一定, 扫描 MTF 随着叠加次数的增大而减小; 当采样次数和叠加次数一定时, 扫描 MTF 随着速度失配比和 TDI 累加级数的增大而明显减小。此外, 通过 TDI-CMOS 图像传感器在成像时的几何和能量传输机制, 建立了成像数学仿真系统, 并采用刃边法计算图像 MTF, 在采样次数、叠加次数、TDI 累加级数和速度失配比等参数变化时, 仿真计算图像 MTF 的变化, 验证了多次采样叠加下 TDI-CMOS 图像传感器的扫描 MTF 分析模型。

参 考 文 献

- 1 J C Feltz, M A Karim. Modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. Appl Opt, 1990, 29(5): 717-722.
- 2 J F Johnson. Modeling imager deterministic and statistical modulation transfer functions [J]. Appl Opt, 1993, 32(32): 6503-6513.
- 3 Han Xinzhi. Discussion on CCD modulation transfer function of the pushbroom space remote sensor along track [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2002, 21(2): 145-147. 韩心志. 推扫式航天遥感器 CCD 航向调制传递函数的讨论[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(2): 145-147.
- 4 Z Yacong, L Dan, L Wengao, et al.. A TDI CMOS readout circuit for IRFPA with linearity improvement [C]. IEEE Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits, 2005. 589-592.
- 5 C B Kim, C H Hwang, B H Kim, et al.. CMOS TDI readout circuit that improves SNR for satellite IR applications [J]. Electron Lett, 2008, 44(5): 346-348.
- 6 Tao Shuping, Jin Guang, Qu Hongsong, 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. 陶淑苹, 金光, 曲宏松, 等. 实现空间高分辨率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.
- 7 Yang Xiubin, Jiang Li, Jin Guang. Design and analysis of CMOS camera based on TDI in digital domain to realize high-resolution staring imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0911004. 杨秀彬, 姜丽, 金光. 数字域时间延迟积分时间 CMOS 相机高分“凝视”成像设计分析[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0911004.
- 8 H Michaelis, R Jaumann, S Mottola. CMOS-APS sensor with TDI for high resolution planetary remote sensing [C]. IEEE CCD & AIS Workshop, 2005. 31-34.
- 9 I Cem Baykal, G A Jullien. Self synchronization of time delay and integration (TDI) cameras [C]. Proceedings of the 44th IEEE 2001 Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2001, 1: 184-187.
- 10 G Lepage, J Bogaerts, G Meynants. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2009, 56(11): 2524-2533.
- 11 Li Piding, Li Yumin, Fu Yutian, et al.. Effect of oversample-superposition on MTF for long wave infrared camera [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2006, 25(1): 13-16. 李丕丁, 李玉敏, 傅雨田, 等. 长波红外相机多次采样叠加对 MTF 的影响分析[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(1): 13-16.
- 12 X Shi, X Wu, X Xu. Modulation transfer function model of scanning TDI sensors with oversampling-superposition [C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. 652-656.
- 13 Sang Meizhen, Xu Jiangtao, Nie Kaiming, et al.. Design and implementation of timing control for TDI CMOS image sensor [J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2011, 24(12): 1707-1711. 桑美贞, 徐江涛, 聂凯明, 等. TDI 型 CMOS 图像传感器时序控制设计与实现[J]. 传感技术学报, 2011, 24(12): 1707-1711.
- 14 Yuan Gaobin, Li Binqiao, Xu Jiangtao, et al.. Research of MTF velocity mismatch model for time delay integration CMOS area image sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0104001. 袁高斌, 李斌桥, 徐江涛, 等. 时间延迟积分型面阵 CMOS 图像传感器 MTF 速度失配模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0104001.
- 15 T Wang, S Li, X Li. An automatic MTF measurement method for remote sensing cameras [C]. 2nd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, 2009. 245-248.