

TDI CMOS 图像传感器曝光时间优化方法研究

何春良 李斌桥 刘振旺 徐江涛*

天津大学电子信息工程学院, 天津 300072

摘要 为了提高时间延迟积分互补金属氧化物半导体(TDI CMOS)图像传感器的成像质量,研究了TDI CMOS图像传感器中曝光时间的选取对成像质量的影响。基于行滚筒曝光读出原理,分别分析了曝光时间对信噪比(SNR)和调制传递函数(MTF)的影响机理,根据分析结果,提出在级数已选定的情况下,曝光时间的选取存在最优值,此时得到的图像质量较好。为验证结论,基于自主研发的TDI CMOS图像传感器芯片及现场可编程门阵列(FPGA)开发板,搭建了TDI CMOS图像传感器成像测试系统。实验中采用 $MTF \times SNR$ 作为评价图像质量的指标,实验结果表明,在选定的相机参数下,积分级数为8级,光强为20 lx时,TDI CMOS图像传感器曝光时间选取64 μs 时所得到的图像质量最好,此时 $MTF \times SNR$ 最大。

关键词 探测器;时间延迟积分互补金属氧化物半导体图像传感器;曝光时间;调制传输函数;信噪比

中图分类号 TN492

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0204002

Integration Time Optimization for TDI CMOS Image Sensor

He Chunliang Li Binqiao Liu Zhenwang Xu Jiangtao

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

Abstract In order to improve the image quality of the time delay integration complementary metal oxide semiconductor (TDI CMOS) image sensor, the influence of integration time selected on image quality is studied. Based on the rolling shutter readout principle, the impacts of integration time on signal to noise ratio (SNR) and modulation transfer function (MTF) are analyzed respectively. According to the results of the analysis, it is proposed that in the case of series selected, the optimal value exists in the selection of integration time, which makes a better image quality. To validate the conclusion, on the basis of self-developed TDI CMOS image sensor chip and field programmable gate array (FPGA) development board, the imaging testing system of TDI CMOS image sensor is set up. By using $MTF \times SNR$ as the image quality evaluating index in the experiment, the experimental results show that under the selected camera parameters, the stage is 8, and the light intensity is 20 lx, when the integration time is 64 μs , the best image quality can be obtained and the $MTF \times SNR$ is maximum.

Key words detector; time delay intergration complementary metal oxide semiconductor image sensor; integration time; modulation transfer function; signal to noise ratio

OCIS codes 040.5160; 110.2960; 110.4100

1 引 言

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^[1-4],特别适用于暗光和运动物体的成像,被广泛应用于航天卫星遥感、遥测、测绘等领域^[5]。目前实现光电信号转换的图像传感器主要分为电荷耦合器件(CCD)和互补金属氧化物半导体(CMOS)两类。随着CMOS工艺的成熟,CMOS图像传感器性能已得到极大改善,且近年来已出现将TDI在

收稿日期: 2014-09-05; 收到修改稿日期: 2014-09-23

基金项目:国家自然科学基金(61036004)、天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCQNJC00600)

作者简介:何春良(1986—),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: hechliang@163.com

导师简介:李斌桥(1956—),男,教授,硕士生导师,主要从事CMOS图像传感器方面的研究。E-mail: libinqiao@tju.edu.cn

*通信联系人。E-mail: xujiangtao@tju.edu.cn

CMOS 图像传感器上实现的研究和应用^[6-8]。

文献[9]对 CCD 和 CMOS 相机的信噪比(SNR)进行了深入分析。文献[10]对影响图像调制传递函数(MTF)的各种因素进行了理论分析,提出了多次采样叠加下 TDI CMOS 图像传感器沿扫描方向 MTF 的分析模型。文献[11]首次提出了用 MTF 与 SNR 的乘积来评价航天相机成像性能的方法。文献[12]提出了用 MTF×SNR 作为图像质量评价的指标,对积分级数和增益设置进行优化,来提高 TDI CCD 遥感相机的成像质量。

但这些研究都分别从 MTF 和 SNR 进行研究,尚未考虑曝光时间(T_i)的选取对 TDI CMOS 图像传感器成像的影响。然而实际中,两者是相关的:增大曝光时间,一方面会使 SNR 提高,另一方面 MTF 会因曝光时间的增大而降低。由此可见,MTF 和 SNR 在曝光时间的选择方面存在相互制约的关系。在 TDI CMOS 图像传感器级数已选定的情况下,就需要在曝光时间的选取上做出一个优化的选择。图像的 MTF 反映了图像的空间分辨率^[13-14],图像的 SNR 反映了图像的灰度分辨率。因此,本文采用 MTF×SNR 作为图像质量优化指标,对曝光时间进行了优化选择和设置,以保证得到高质量的图像。

2 工作原理

图 1 为自主研制的模拟域累加实现的 TDI CMOS 图像传感器的结构示意图,主要由多行像素感光阵列、

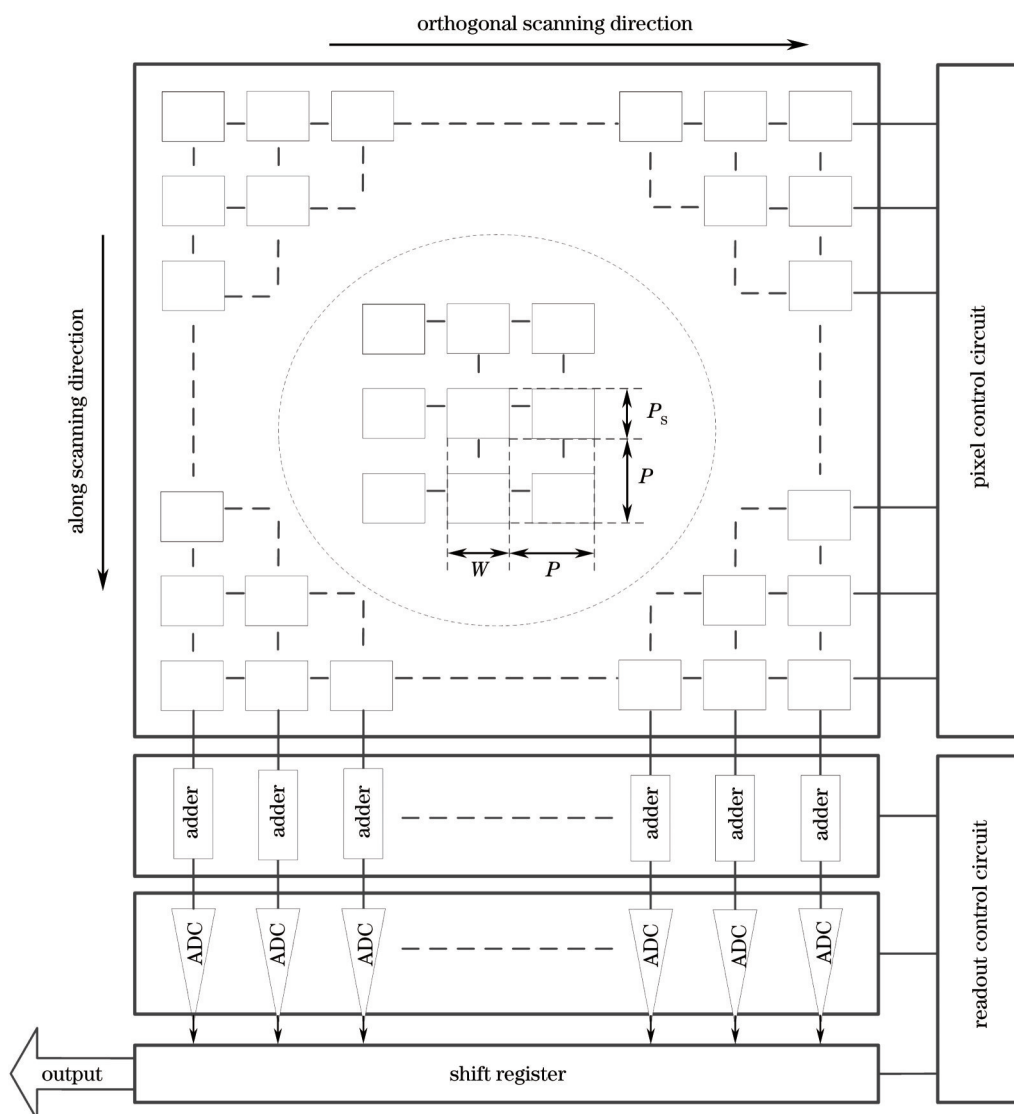


图 1 TDI CMOS 图像传感器的结构
Fig.1 Structure of TDI CMOS image sensor

列级模拟数字转换器(ADC)及累加器等组成。感光阵列的行数为最大的时间延迟积级数,列数为传感器线阵长度。图中, P 表示相邻两个像素的间距, W 表示像素的有效感光区宽度, P_s 表示像素沿扫描方向的有效感光区长度。

若使用传统的面阵像素行滚筒式时序^[8],每行像素要在行选时间 T_s 内完成对像素信号和复位信号的读出并进入累加器,每个像素在一个行渡越时间 T_L (线阵图像传感器在沿扫描方向上扫描走过一个像素尺寸的时间)内只曝光一次。TDI像素信号周期 T_p 为传感器输出等效TDI像素信号的时间。 T_L 和 T_p 一致,即一个行渡越时间 T_L 内只输出一行累加完成的等效TDI像素信号。当累加级数为 M 时,目标景物从第一行移动到第 M 行被曝光 M 次,但这 M 次曝光的目标景物并不一致,不能达到TDI工作时曝光同步性的要求。对传统的面阵行滚筒式曝光进行改进^[15-16],使得在一个行渡越时间 T_L 内可以多进行一次行选,如图2所示,这样在 M 个渡越时间内可以曝光积分 $M+1$ 次,输出等效TDI像素信息时间仍为 T_p ,即采用了空间过采样,保证了单列 M 个像素对同一目标景物的曝光积分,实现曝光积分同步性。同时,为了保证不丢失信号并满足时序需求,需要增加一级累加器来存储增加的曝光信号。在同列像素中,每个像素的行选时间均不重叠,任意时刻该列只有一个像素占据列总线,因此可以在不造成信号间重叠的情况下实现滚筒式同步曝光。

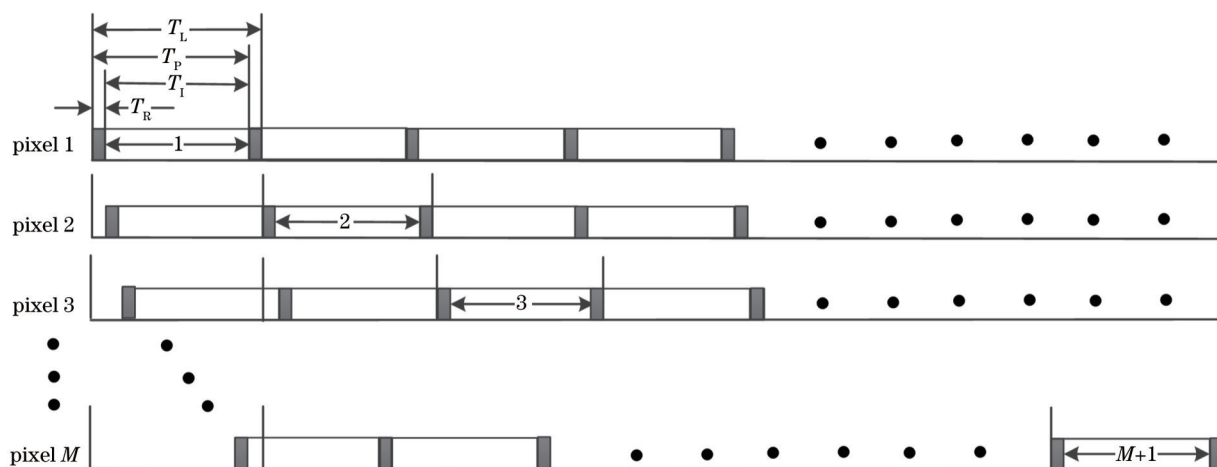


图2 级数为 M 时TDI CMOS图像传感器的时序
Fig.2 Timing sequence of TDI CMOS image sensor of M stages

3 级数固定时SNR和MTF与曝光时间的关系

3.1 SNR与曝光时间的关系

SNR是图像传感器一个重要的参数,定义为相机系统的输出信号的电压与同时输出的噪声电压之比。CMOS的噪声包括光子噪声、读出噪声和暗噪声等。在TDI CMOS图像传感器的累积过程中,级数为 n 时,信号和 n 成线性关系,而噪声则为 n 的 $1/2$ 次方关系^[2],所以TDI CMOS图像传感器的SNR可以表达为

$$f_{\text{SNR}}(n) = \frac{n \times V_{\text{sig}}}{\sqrt{n} \times V_{\text{noise_rms}}} = \sqrt{n} f_{\text{SNR}}(1), \quad (1)$$

式中 $f_{\text{SNR}}(n)$ 代表级数为 n 时TDI CMOS图像传感器的信噪比, V_{sig} 代表信号的功率, $V_{\text{noise_rms}}$ 代表噪声的功率, $f_{\text{SNR}}(1)$ 为级数为1时TDI CMOS图像传感器的信噪比。

在大多数情况下,信噪比可以作为几个影响因素的函数,即曝光时间、目标的光通量、焦比、暗电流、分辨率、读出噪声。这其中最主要的影响因素是曝光时间,因此最简单的增加信噪比的方式就是增大曝光时间。TDI CMOS图像传感器的原理也正是通过多次累加的方法增加了曝光时间,达到较高的信噪比。而在TDI CMOS图像传感器中每次曝光的时间是可以设置的,信噪比作为这几个影响因素的函数可表示为^[6]

$$f_{\text{SNR}} = 20 \lg \frac{i_{\text{ph}} T_1}{\sqrt{\sigma_r^2 + q(i_{\text{ph}} + i_{\text{dc}}) T_1}}, \quad (2)$$

式中 f_{SNR} 为TDI CMOS图像传感器的信噪比, i_{ph} 为光电流, i_{dc} 为暗电流, σ_r^2 为时间噪声的变化。(2)式反应了 f_{SNR} 和 T_1 的关系。可见随着曝光时间的增加,收集到的光子数增加,信噪比增大。

3.2 MTF与曝光时间的关系

MTF反应了图像对比度和空间频率的关系,常用于评价图像传感器的成像质量。对于一个图像传感器,MTF受很多因素影响,例如像素尺寸、电荷扩散、光学系统、像移等。本文主要考虑在级数已选定的情况下,曝光时间的长短对MTF的影响。

$f_{\text{MTF}}(T_1)$ 代表曝光时间对MTF的影响,在滚筒式曝光的TDI CMOS图像传感器成像系统中,假设 V 代表像平面相对于图像传感器的速度, P 代表相邻的两个像素间距。则行渡越时间 T_L 为

$$T_L = P/V. \quad (3)$$

由于TDI CMOS图像传感器曝光时间可调,曝光时间 T_1 的取值范围为

$$T_1 \in (0, T_L). \quad (4)$$

定义 ε 为一个行时间的扫描效率, $\varepsilon = T_1/T_L$, f 为扫描方向上景物的空间频率,则有:

$$f_{\text{MTF}}(T_1) = \sin c(fp\varepsilon) = \sin c\left(fp\frac{T_1}{T_L}\right). \quad (5)$$

由(5)式可知, f_{MTF} 随着曝光时间的增大而减小,这是由于随着曝光时间的增大相邻像素点曝光混叠区也增大。如图3所示,可直观理解曝光时间对 f_{MTF} 的影响。积分时间越大时,两相邻像素曝光混叠区越大,从而导致拍摄图像空间分辨率的减小,即 f_{MTF} 的减小。

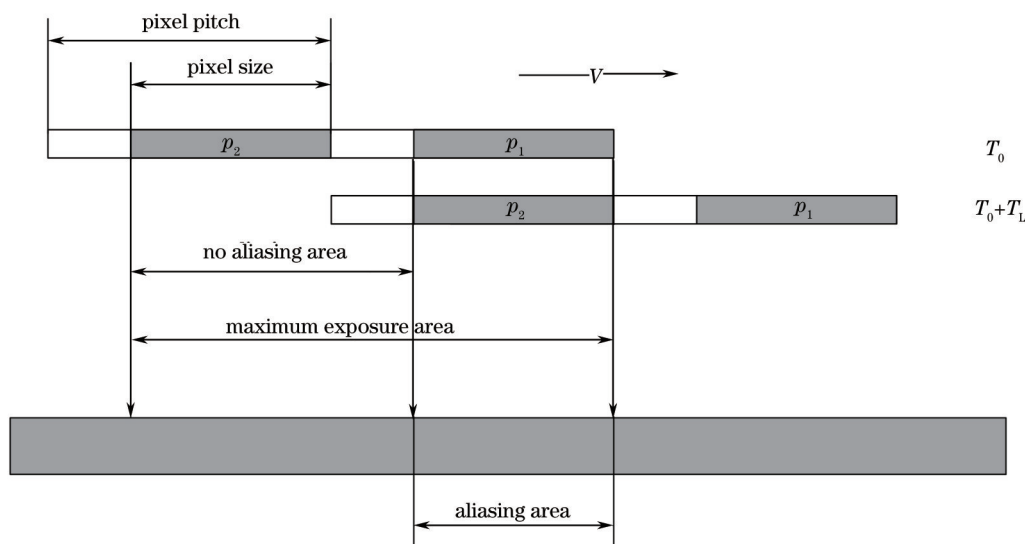


图3 曝光时间对相邻像素混叠区的影响

Fig.3 Influence of integration time on adjacent pixel aliasing area

3.3 曝光时间的优化选取

通过以上的分析可知,曝光时间 T_1 的增加能提高SNR,但同时会降低MTF。因此,在级数已选定的情况下确定曝光时间时,需要对曝光时间进行优化设置,以保证得到高品质的图像。

$$f(T_1) = f_{\text{SNR}} \times f_{\text{MTF}}(T_1) = 20 \lg \frac{i_{\text{ph}} T_1}{\sqrt{\sigma_r^2 + q(i_{\text{ph}} + i_{\text{dc}}) T_1}} \times \sin c\left(fp\frac{T_1}{T_L}\right). \quad (6)$$

对(6)式进行仿真,设光强度为20 lx,光电流为640 fA,暗电流为16 fA, σ_r 为 $10e^-$,TDI CMOS图像传感器级数为8级,像元尺寸为15 μm 。曝光时间为2~256 μs 可调,渡越时间为258 μs 。根据公式可以求出不同曝光时间下的单个像素的SNR和MTF。

图4反映了曝光时间 T_1 变化引起信噪比 f_{SNR} 的变化。从图中可以看出, f_{SNR} 随曝光时间 f_i 增大而增大。

图5反映了空间频率 f 为奈奎斯特频率 f_N 的情况下,曝光时间 T_1 变化引起的 $f_{\text{MTF}}(T_1)$ 变化。从图中可以看

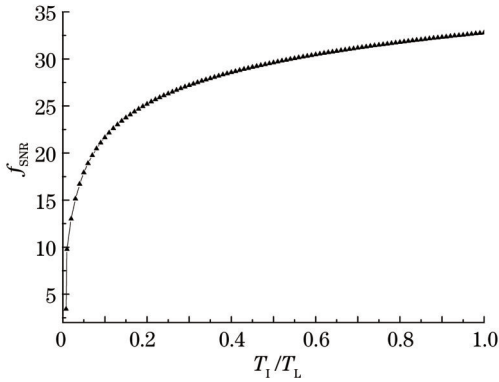


图4 不同曝光时间下的 f_{SNR} 值

Fig.4 f_{SNR} at different integration times

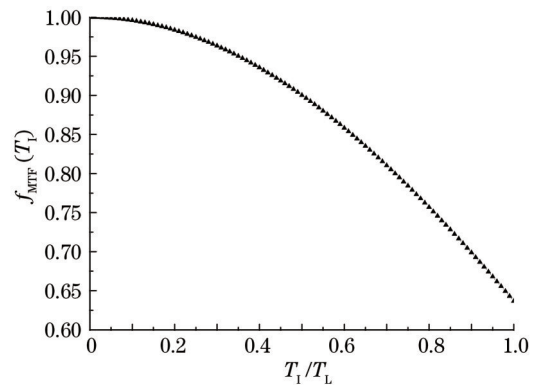


图5 不同曝光时间下的 $f_{MTF}(T_1)$

Fig.5 $f_{MTF}(T_1)$ at different integration times

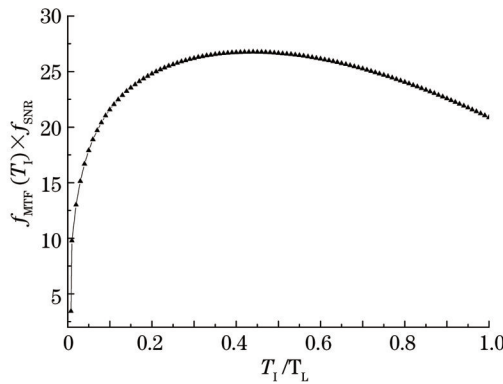


图6 不同曝光时间下的 $f_{MTF}(T_1) \times f_{SNR}$

Fig. 6 $f_{MTF}(T_1) \times f_{SNR}$ at different integration times

出,TDI CMOS图像传感器的 $f_{MTF}(T_1)$ 随曝光时间增大而减小。

图6反映了空间频率为奈奎斯特频率时,曝光时间 T_1 变化引起的 $f_{MTF}(T_1) \times f_{SNR}$ 的变化。从图中可以看出, $f_{MTF}(T_1) \times f_{SNR}$ 随着曝光时间的增大先递增而后减小,在其中某一时刻会存在一个最大值。

4 测试结果

成像测试系统如图7所示。包括用于运动控制的履带滚筒和伺服电机,用于数据采集的TDI CMOS图像传感器,用于数据传输及控制的Xilinx Virtex-5开发板和用于图像显示的显示器。

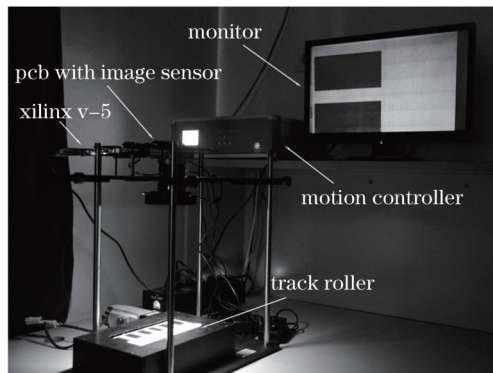


图7 TDI CMOS成像系统

Fig.7 TDI CMOS imaging system

为分析在固定级数时曝光时间对TDI CMOS图像传感器MTF的影响,选取了打印的黑白条纹图片作为被拍摄物体,TDI CMOS图像传感器的级数固定为8级。在成像过程中,通过改变曝光时间,得到不同的黑白条纹图像,计算出所成图像的MTF值。

图 8 为曝光时间分别为 4、8、16、32、64、96、128、160、192、224、256 μs 时所成图像的 MTF 值(f_{MTF})。从图中可以看出, f_{MTF} 随着曝光时间的增大而减小。

图 9 为曝光时间分别为 16 μs 和 160 μs 时所成的图像, 计算得出它们的 MTF 值分别为 0.128 和 0.080。正常情况下, 如果图像的 MTF 很高, 那么在黑白条纹的过渡区上过渡会比较明显, 过渡区两边灰度值相差会很大。而从图中可以看出, 16 μs 曝光下图像黑白条纹过渡较快, 而 160 μs 曝光下图像黑白条纹过渡相对缓慢。这是由于随着曝光时间增大, 相邻像素点重叠区变大, 从而导致黑白过渡缓慢、MTF 值降低。

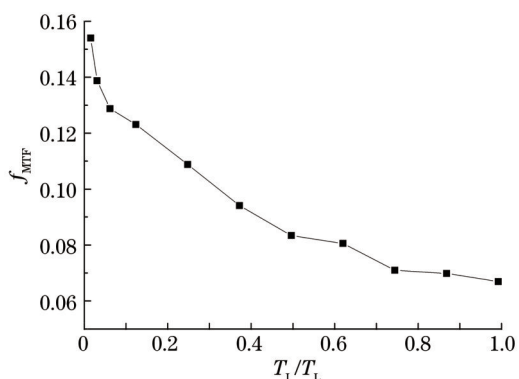


图 8 不同曝光时间下的 f_{MTF}

Fig.8 f_{MTF} at different integration times

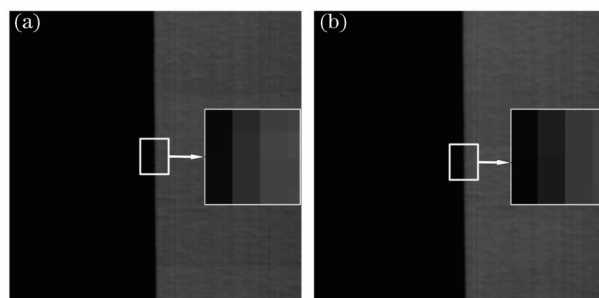


图 9 不同曝光时间下的刃边图像。(a) 16 μs ; (b) 160 μs

Fig.9 Blade edge image at different integration times. (a) 16 μs ;

(b) 160 μs

设定光强为 20 lx, TDI CMOS 级数为 8 级, 图 10 为不同曝光时间下的 SNR 值(f_{SNR})。从图中可以看出, f_{SNR} 随着曝光时间的增大而增大。

将不同曝光时间下所得的 f_{MTF} 和 f_{SNR} 相乘, 可得到对应的 $f_{\text{MTF}} \times f_{\text{SNR}}$ 值。图 11 为不同曝光时间下的 $f_{\text{MTF}} \times f_{\text{SNR}}$ 值。从图中可以看出, $f_{\text{MTF}} \times f_{\text{SNR}}$ 随着曝光时间的增大先增大后减小, 此过程中存在一个最大值。在该实验条件下, 曝光时间为 64 μs 时的图像质量最佳。由此可见, 在曝光时间的选取上并不是越大越好, 合适的曝光时间能使得 MTF \times SNR 最大, 此时得到的图像质量最好。

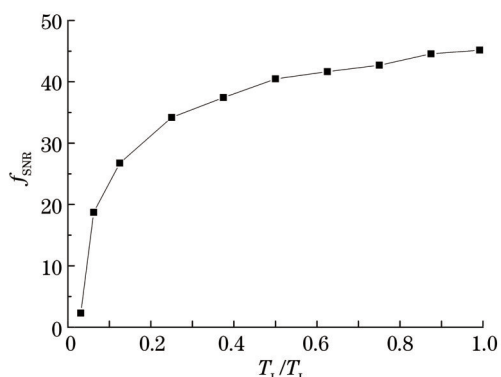


图 10 不同曝光时间下的 f_{SNR}

Fig.10 f_{SNR} at different integration times

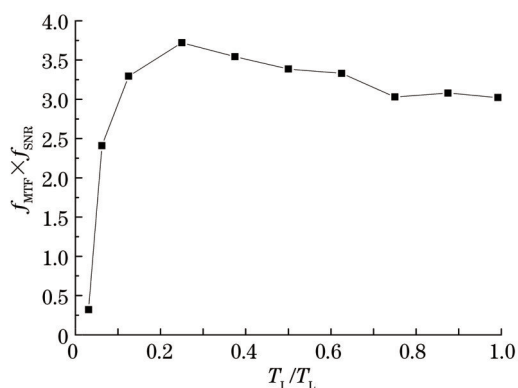


图 11 不同曝光时间下的 $f_{\text{MTF}} \times f_{\text{SNR}}$

Fig. 11 $f_{\text{MTF}} \times f_{\text{SNR}}$ at different integration times

5 结 论

TDI CMOS 图像传感器中, 增大曝光时间可以提高信噪比, 但相邻像素曝光混叠区也随着曝光时间的增大而增大, 从而导致了 MTF 的下降。鉴于信噪比和 MTF 是评价图像质量的两个重要指标, 所以曝光时间的选择是很重要的。通过分析曝光时间对 MTF 和 SNR 的影响, 采用 MTF \times SNR 作为评价指标, 得出了在曝光时间的选取上存在一个最优值的结论。搭建了成像测试系统, 分别测试曝光时间对 MTF 和 SNR 的影响, 然后计算出不同曝光时间下的 MTF \times SNR。测试结果表明, 在级数设定为 8 级的情况下, 曝光时间的选取确实存在一个最优值, 能使得所成图像最佳。从而验证了理论分析得出的结论。

参 考 文 献

- 1 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.
- 2 C B Kim, C H Hwang, B H Kim, *et al.*. CMOS TDI readout circuit that improves SNR for satellite IR applications [J]. Electronics Letters, 2008, 44(5): 346-348.
- 3 Xing Hui. Method of adjusting the line array direction of the time delay integration CCD [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0912006.
邢 辉. 时间延迟积分 CCD 线阵方向的调整方法[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912006.
- 4 Jia Xuezhi, Zhang Lei, An Yuan, *et al.*. Design and experiment of focal plane for high speed TDI CCD space camera [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0823004.
贾学志, 张 雷, 安 源, 等. 高速 TDI CCD 空间相机焦平面设计与实验[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0823004.
- 5 Chang Lin, Jin Guang, Yang Xiubin. Fast registration algorithm design and analysis of TDI CCD camera assembly imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0511001.
常 琳, 金 光, 杨秀彬. 航天 TDI CCD 相机成像拼接快速配准算法设计与分析[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0511001.
- 6 I C 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.
- 7 H Michaelis, R Jaumann, S Mottola. CMOS-APS sensor with TDI for high resolution planetary remote sensing [C]. Nagano: IEEE CCD&AIS Workshop, 2005: 31-34.
- 8 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.
- 9 D X D Yang, A El Gamal. Comparative analysis of SNR for image sensors with enhanced dynamic range [J]. International Society for Optics and Photonics, 1999: 197-211.
- 10 Li Lin, Yao Suying, Xu Jiangtao, *et al.*. Research on modulation transfer function model of TDI-CMOS image sensor with oversample-superposition [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0228002.
李 林, 姚素英, 徐江涛, 等. TDI-CMOS 图像传感器多次采样叠加调制传输函数模型研究[J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0228002.
- 11 Chen Rongli, Li Yingcai, Fan Xuewu. Investigation on synthetically evaluating image quality of TDICCD camera [J]. Spacecraft Recovery and Remote Sensing, 2003, 24(3): 10-13.
陈荣利, 李英才, 樊学武. TDICCD 相机像质综合评价研究[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(3): 10-13.
- 12 Xue Xucheng, Shi Junxia, Lü Hengyi, *et al.*. Optimal set of TDI CCD integration stages and gains of space remote sensing cameras [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(4): 857-863.
薛旭成, 石俊霞, 吕恒毅, 等. 空间遥感相机 TDI CCD 积分级数和增益的优化设置[J]. 光学精密工程, 2011, 19(4): 857-863.
- 13 J C Feltz, M A Karim. Modulation transfer function of charge-coupled devices [J]. Appl Opt, 1990, 29(5): 717-722.
- 14 J F Johnson. Modeling imager deterministic and statistical modulation transfer functions [J]. Appl Opt, 1993, 32(32): 6503-6513.
- 15 Sang Meizhen, Xu Jiangtao, Nie Kaiming, *et al.*. Design and implementation of timing control for TDI CMOS image sensor [J]. Chinese Journal of 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.
- 16 Yuan Gaobin, Li Binqiao, Xu Jiangtao, *et al.*. Research the model of MTF velocity mismatch 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.

栏目编辑: 苏 岑