

# 时间延迟积分型面阵 CMOS 图像传感器 MTF 速度失配模型研究

袁高斌 李斌桥 徐江涛\* 聂凯明

(天津大学电子信息工程学院, 天津 300072)

**摘要** 研究了时间延迟积分型面阵互补金属氧化物半导体(CMOS)图像传感器调制传递函数(MTF)速度失配特性,在分析累加级数、像素尺寸、镜头放大倍数、行周期及电机运动速度失配等影响因素的基础上,建立了 MTF 速度失配模型。基于现场可编程门阵列(FPGA)开发板,搭建面阵 CMOS 图像传感器实现线阵时间延迟积分(TDI)的 CMOS 测试系统。实验结果表明,在光强为 3 lx,速度失配  $M(\Delta V/V) < 2$ ,8 级时间延迟积分与面阵成像相比,MTF 值提高 50%;当累加级数为 8 级,速度失配满足  $M(\Delta V/V) = 2$  的速度失配容限时,奈奎斯特频率处的 MTF 值下降 10%,当速度失配达到  $M(\Delta V/V) = 10$  时,MTF 值下降 35%。

**关键词** 传感器;互补金属氧化物半导体图像传感器;时间延迟积分;调制传递函数速度失配模型;速度失配容限  
**中图分类号** TN386.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0104001

## Research of MTF Velocity Mismatch Model for Time Delay Integration CMOS Area Image Sensors

Yuan Gaobin Li Binqiao Xu Jiangtao Nie Kaiming

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

**Abstract** Modulation transfer function (MTF) velocity mismatch feature for time delay integration (TDI) complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) area image sensors is studied. A model of MTF velocity mismatch is proposed. The effecting factors such as accumulation stage, pixel size, lens magnification, line cycle, motor velocity are analyzed. A TDI algorithm for CMOS area image sensor is applied to achieve time delay integration. The TDI-CMOS system is developed based on a FPGA development board. The experimental results show that  $f_{\text{MTF}}$  increases 50% by 8 accumulation stage compared to CMOS area sensor, when the intensity is 3 lx and velocity mismatch  $M(\Delta V/V)$  is less than 2. The  $f_{\text{MTF}}$  at the Nyquist frequency decreases 10% by 8 accumulation stage, when the velocity mismatch  $M(\Delta V/V) = 2$ . When the velocity mismatch  $M(\Delta V/V) = 10$ , the  $f_{\text{MTF}}$  decreases 35%.

**Key words** sensors; complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) image sensor; time delay integration (TDI); model of modulation transfer function velocity mismatch; velocity mismatch tolerance

**OCIS codes** 040.5160; 110.2960; 110.4100

### 1 引言

图像传感器能够实现光电信号的转换,目前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。现阶段,线阵图像传感器以 CCD 为主<sup>[1]</sup>,在高分辨率航空光学遥感成像系统中,普遍

采用线阵 CCD 作为光电转换器件<sup>[2,3]</sup>,尤其是具有时间延迟积分(TDI)功能的 TDI-CCD 图像传感器。例如美国的 Iknose, QuickBird, WorldView 和 GEOEYE 等商业卫星均使用 TDI-CCD<sup>[4]</sup>。作为一种面阵结构,线阵输出的 CCD 传感器,TDI-CCD 通

收稿日期: 2012-06-26; 收到修改稿日期: 2012-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(61036004,61076024)和教育部博士点基金(20100032110031)资助课题。

作者简介: 袁高斌(1987—),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: ygb\_tju@hotmail.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

通过对同一目标多次曝光电荷累加,成功满足提高成像系统灵敏度的要求。由于 CCD 传感器存在功耗大、与传统 CMOS 工艺不兼容等缺点,增加了整个成像系统设计的复杂性。而早期的 CMOS 器件受到工艺水平的限制,在噪声、非均匀性及暗电流性能上存在缺陷,但是随着工艺水平的不断成熟,CMOS 器件的性能得到很大改善<sup>[5]</sup>。

近年来,科学家们已经开始研究 TDI-CMOS 器件<sup>[6]</sup>,并将它们应用于航空航天领域。德国行星研究院的 Michaelis 等<sup>[7]</sup>在 2005 年提出 2560×16 的 TDI-CMOS 线阵图像传感器设计方案;CMOSIS 的 Lepage 等<sup>[8]</sup>在 2009 年提出了模拟域累加、数字域累加 TDI-CMOS 线阵图像传感器设计方案。以上两者仅限于理论分析,没有具体实现。曲宏松等<sup>[9]</sup>和陶淑苹等<sup>[10]</sup>先后于 2010 年及 2012 年通过面阵 CMOS 图像传感器实现数字域 TDI 功能,后者给出了图像 SNR 分析。但对于 TDI-CMOS 成像中重要的速度同步误差对于成像质量的影响,都未进行分析。

本文对于 TDI-CMOS 成像系统中运动速度失配参数进行分析,建立 TDI-CMOS 成像系统的调制传递函数(MTF)速度失配模型,并基于面阵 CMOS 图像传感器,通过逐次累加数字域算法,搭建 TDI-CMOS 测试系统,验证建立的 MTF 运动速度失配模型。

## 2 TDI 工作原理

TDI 图像传感器是一种特殊的线阵图像传感器,由多行线阵感光像素阵列<sup>[11]</sup>组成的。行数为时间延迟积分级数,列数为线阵长度,如图 1 所示, $p$  为两个矩形像素的距离, $q$  为像素感光区的尺寸。

TDI 功能可以通过电荷域、模拟域、数字域 3 种方式实现。正是由于 TDI-CCD 图像传感器能够实现电荷域内同步转移电荷包<sup>[12]</sup>,不需要额外累加电路,并且在转移的过程中,具有不引入额外噪声的技

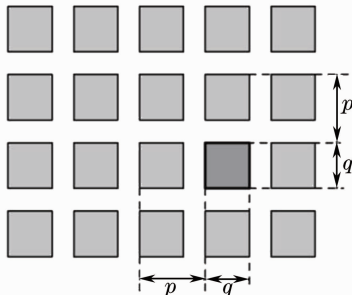


图 1 TDI 图像传感器像素阵列模型

Fig. 1 Pixel array model of TDI sensors

术优势,目前 TDI-CCD 传感器的发展更加成熟。而 CMOS 图像传感器的光信号在像素内就转换为电压或电流信号<sup>[13]</sup>,无法在电荷域内实现 TDI 累加,需要增加模拟域或数字域累加电路。TDI-CMOS 传感器的工作原理如图 2 所示。累加功能的实现可以在模拟域或数字域实现,模拟域累加在模数转换前完成,通过现场可编程门阵列(FPGA)开发板实现数字域 TDI 累加<sup>[14]</sup>。

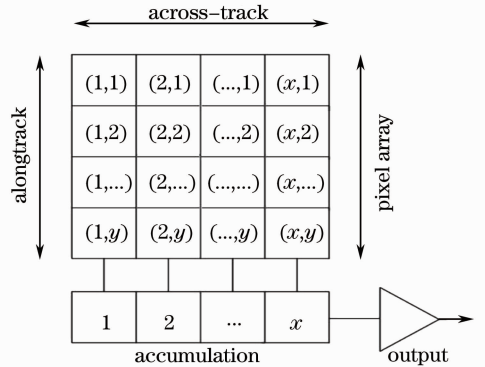


图 2 TDI-CMOS 工作原理

Fig. 2 TDI-CMOS working principle

## 3 TDI-CMOS 成像系统

系统整体架构主要包括以下几个模块,如图 3 所示,图像数据采集模块,通过美光 MT9M001 面阵图像传感器实现图像数据采集;运动控制模块,通过荣世公司的二相步进电机实现运动速度控制;数据处理模块,通过 Xilinx 的 Virtex-5 LX110T 开发板实现累加核心算法;数据传输模块,通过 Cypress 的 EZ-USB 芯片完成数据到计算机的传输;显示模块,通过计算机液晶显示器实现图像显示。

与普通线阵传感器成像原理类似,TDI-CMOS 传感器必须通过传感器和目标的相对运动才能获得一幅二维图像。本系统中采用步进电机驱动目标运

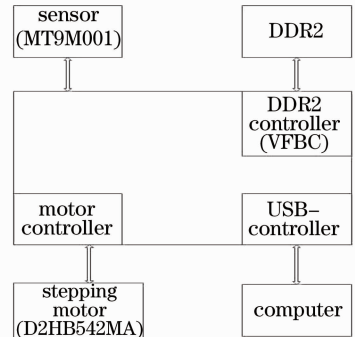


图 3 TDI-CMOS 成像系统工作流程框图

Fig. 3 Block diagram of flow chart of a TDI-CMOS camera system

动实现传感器与目标的相对运动。

数字域 TDI 功能实现是整个成像系统的核心，而 TDI 功能实现与选用传感器像素尺寸、行周期等参数有着重要的联系。该面阵 CMOS 图像传感器的行周期(有效读出时间、水平消隐)可调，更容易实现传感器与目标运动速度同步控制。传感器重要性指标如表 1 所示。

### 3.1 逐次累加数字域 TDI 算法

TDI 读出电路时序设计如图 4 所示。 $T$  时刻后依次读出  $L_n(S_1), L_{n+1}(S_3), L_{n+2}(S_2), L_{n+3}(S_1)$ ，即先后读出的是低行数的高级数据到高行数的低级数据。

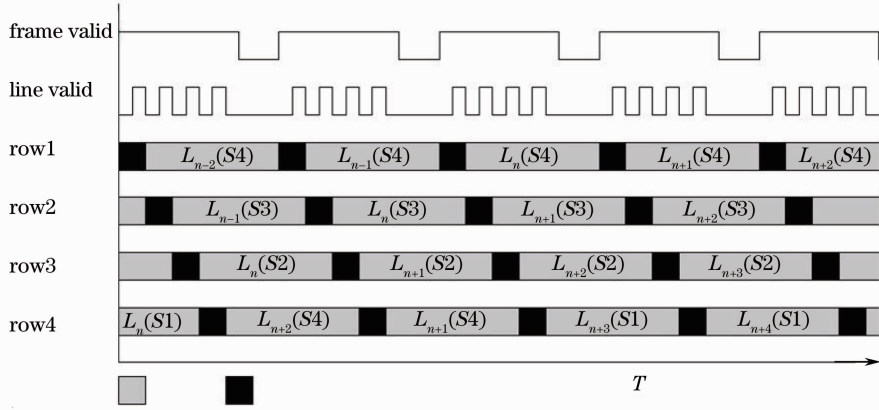


图 4 4 级 TDI 读出时序

Fig. 4 TDI readout timing for four stages

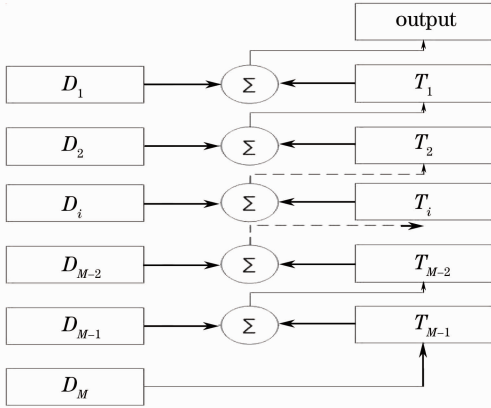


图 5 数字域 TDI 过程

Fig. 5 TDI procession in digital domain

图 5 中左侧  $D_n$  表示最新采集的图像数据，右侧  $T_n$  表示累加后存储的数据。以  $M$  级累加为例，第 1 行  $T_1$  用于存储第  $n$  行图像前  $M-1$  级临时累加结果，第二行  $T_2$  用于存储第  $n+1$  行图像前  $M-2$  级临时累加结果，依此类推，至第  $M-2$  行  $T_{M-2}$  用于存储第  $n+M-3$  行图像前 2 级临时累加结果，最后一行，即第  $M-1$  行  $T_{M-1}$  用于存储第  $n+M-2$  行图像的首次采集结果， $M-1$  行  $T_n$  中存储的数据如表 2 所示。

利用这一时序特性，建立逐次累加数字域 TDI 算法。逐次累加数字域 TDI 算法的实现过程如图 5 所示。

表 1 传感器关键参数

Table 1 Key performance parameters of sensors

Parameter	Value
Optical format	1/2-inch(5:4)
Active imager size	6.66 mm×5.32 mm
Active pixels	5.2 μm×5.2 μm
Shutter type	Electronic rolling shutter
Maximum data rate	48 Mb/s
Master clock	48 MHz

表 2 逐次累加数字域 TDI

Table 2 Successive accumulation TDI algorithm in digital domain

Row address of storage space	Storage data
1	$L_n(S_1) + L_n(S_2) + \dots + L_n(S_{M-2}) + L_n(S_{M-1})$
2	$L_{n+1}(S_1) + L_{n+1}(S_2) + \dots + L_{n+1}(S_{M-2})$
$1 < k < (M-1)$	$L_{n+k-1}(S_1) + \dots + L_{n+k-1}(S_{M-k})$
$M-2$	$L_{n+M-3}(S_1) + L_{n+M-3}(S_2)$
$M-1$	$L_{n+M-2}(S_1)$

逐次累加数字域 TDI 方法有两个主要优势：1) 非常适合 CMOS 图像传感器逐行滚筒曝光方式的工作时序；2) 能够最大地利用存储空间。

### 3.2 CMOS 传感器 MTF 模型

MTF 是评价传感器系统成像质量的重要参数，表示成像系统再现景物图像的能力<sup>[15]</sup>。MTF 定义为

$$f_{\text{MTF}}(f) = \frac{M_o}{M_i}, \quad (1)$$

式中  $M_i, M_o$  分别为成像系统输入、输出信号的调制度，单位为 lp/mm，表明传感器在 1 mm 内可以分辨的线对数量。 $f_{\text{MTF}}$  为 0~1 之间的数值。在线阵成

像系统中,  $f_{\text{MTF}}$  退化的主要影响因素包括光学、传感器和速度失配等<sup>[16]</sup>。

$$f_{\text{MTF(s)}} = f_{\text{MTF(op)}} f_{\text{MTF(de)}} f_{\text{MTF(sp)}} \times f_{\text{MTF(re)}} f_{\text{MTF(\Delta V)}}, \quad (2)$$

式中  $f_{\text{MTF(op)}}$ ,  $f_{\text{MTF(de)}}$ ,  $f_{\text{MTF(sp)}}$ ,  $f_{\text{MTF(re)}}$  和  $f_{\text{MTF(\Delta V)}}$  分别为光学系统、传感器、采样频率、读出电路和速度失配引起的  $f_{\text{MTF}}$  退化。

传感器部分的  $f_{\text{MTF}}$  函数主要包括几何  $f_{\text{MTF(geo)}}$  和离散时间  $f_{\text{MTF(discrete)}}$ , 即

$$f_{\text{MTF(de)}} = f_{\text{MTF(geo)}} f_{\text{MTF(discrete)}} = \text{sinc}\left(\frac{1}{2} \times \frac{q}{p}\right) \times \text{sinc}\left(\frac{1}{2} \times \frac{T_{\text{int}}}{T_{\text{L}}}\right), \quad (3)$$

式中  $T_{\text{L}}$  为渡越时间,  $T_{\text{int}}$  为像素积分时间。对于  $M$  级 TDI-CMOS 图像传感器, 其积分时间与渡越时间的比值为  $T_{\text{int}}/T_{\text{L}} = M/(M+1)$ , 所以传感器部分的 MTF 主要由传感器尺寸及累加级数确定。图 6 和图 7 所示分别为  $f_{\text{MTF}}$  随像素尺寸及累加级数变化曲线。

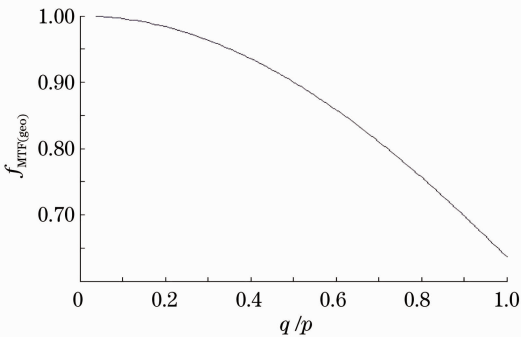


图 6  $f_{\text{MTF(geo)}}$  与  $q/p$  关系曲线

Fig. 6 Relationship between  $f_{\text{MTF(geo)}}$  and  $q/p$

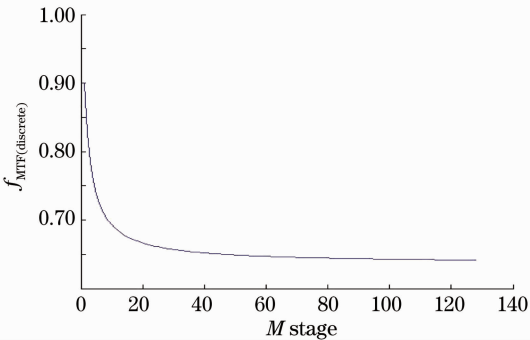


图 7  $f_{\text{MTF(discrete)}}$  与级数  $M$  关系曲线

Fig. 7 Relationship between  $f_{\text{MTF(discrete)}}$  and  $M$  stage

由图 7 可知, 在理想光照情况下, 传感器  $f_{\text{MTF(discrete)}}$  随累加级数增加而下降, 但在航空航天遥感成像系统中, 传感器通常工作在低照度环境下, 离散时间对于  $f_{\text{MTF}}$  下降的影响并不明显, 传感器  $f_{\text{MTF}}$

随累加级数的增加反而增大, 这是由于 TDI-CMOS 图像传感器累加级数的增加实现曝光时间的延长, 提高传感器的光通量、灵敏度和信噪比。对于  $M$  级 TDI 图像传感器, 光通量将增大  $M$  倍, 信噪比将提高  $M^{1/2}$  倍, 从而提高图像传感器的成像质量, 进而提高图像传感器的  $f_{\text{MTF}}$ 。

### 3.3 MTF 速度失配模型

主要研究成像系统速度失配对于  $f_{\text{MTF}}$  指标的影响。根据奈奎斯特采样定理, 图像传感器能分辨的最高空间频率, 为其空间采样频率  $f_s = 1/p$  的一半, 即奈奎斯特频率  $f_n = 1/(2p)$ ,  $p$  为图像传感器的像素尺寸。采用的 CMOS 图像传感器像素长和宽均为  $5.2 \mu\text{m}$ , 即  $p = 5.2 \mu\text{m}$ 。

运动图像的成像特性不同于静态图像的成像特性, 图像运动和位置的不确定将导致 MTF 退化<sup>[17]</sup>。因此, TDI-CMOS 工作时, 需要 TDI 方向的行周期和目标运动速度同步, 实际上, 严格同步很难实现, 但速度失配过大会导致不同时刻推扫的信号相互叠加, 从而降低图像的质量, 这种因速度失配引起的图像质量退化可用 MTF 速度失配模型来衡量。

与 TDI-CCD 相似, TDI-CMOS 速度失配引起的 MTF 退化仅仅作用于 TDI 方向, 对于  $M$  级 TDI-CMOS, 设行周期为  $T_{\text{L}}$ , 像素和目标的同步速度为  $V = \frac{p}{MT_{\text{L}}}$ , 电机运动引起的像移速度,  $n$  为镜头放大倍数,  $V_n$  为电机运动速度, 则速度失配为

$$\Delta V = V - V_n = \frac{p}{MT_{\text{L}}} - nV_n, \quad (4)$$

速度失配率, 即同步误差  $\Delta V/V$  为

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\frac{p}{MT_{\text{L}}} - nV_n}{\frac{p}{MT_{\text{L}}}} = 1 - \frac{nMT_{\text{L}}V_n}{p}. \quad (5)$$

$M$  级累加后,  $M$  级的同步误差为

$$M(\Delta V/V) = M\left(1 - \frac{nMT_{\text{L}}V_n}{p}\right). \quad (6)$$

(6) 式模型表明, 影响速度失配的参数主要包括: 累加级数  $M$ 、像素尺寸  $p$ 、镜头放大倍数  $n$ 、行周期  $T$  及电机运动速度  $V_n$ 。

由速度失配引起的线扩展函数<sup>[18]</sup>

$$L(x) = \frac{1}{Mp(\Delta V/V)}, \quad -\frac{Mp(\Delta V/V)}{2} < x < \frac{Mp(\Delta V/V)}{2}. \quad (7)$$

速度失配  $\Delta V$  引起的 MTF 退化表示为



$$f_{\text{MTF}(\Delta V)} = \sin\left(\pi p f M \frac{\Delta V}{V}\right) / \left(\pi p f M \frac{\Delta V}{V}\right). \quad (8)$$

图 8 为不同累加级数情况下速度失配率对于  $f_{\text{MTF}}$  影响。由曲线可知,随失配情况的变大, $f_{\text{MTF}}$  逐渐变小,即图像的分辨能力变差。同时对于相同的速度失配,随累加级数  $M$  增加,速度失配对于图像质量的影响逐渐变大,即  $M$  越大,系统对于速度失配率  $\Delta V/V$  的要求越严格。以 128 级为例, $\Delta V/V = 0.02$  时, $f_{\text{MTF}}$  已经为 0。

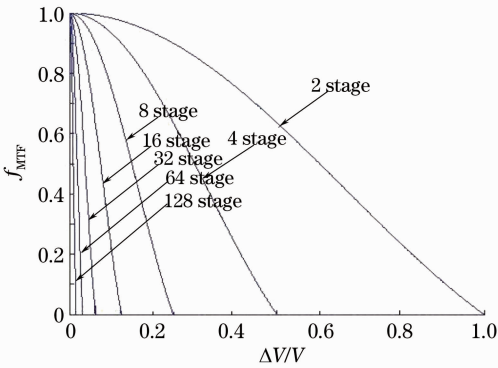


图 8 不同级数  $\Delta V/V$  对于  $f_{\text{MTF}}$  的影响

Fig. 8  $f_{\text{MTF}}$  versus  $\Delta V/V$  with different stages

由(8)式可知,当  $\Delta V/V > 0$  时,即速度基本上完全匹配,  $\lim_{\Delta V \rightarrow 0} f_{\text{MTF}(\Delta V)} = 1$ , 图像的质量不受运动速度失配的影响。对于  $M(\Delta V/V) = 1$ , 奈奎斯特频率处  $f_{\text{MTF}} \Delta V = 0.64$ ; 在  $f = 2f_n$  时,  $f_{\text{MTF}}$  严重退化为 0。人眼分辨率要求, 成像系统的  $f_{\text{MTF}} \geq 0.02$ 。当  $M(\Delta V/V) = 2$  时, 奈奎斯特频率处  $f_{\text{MTF}(\Delta V)} = 0$ 。通常将  $M(\Delta V/V) = 2$  定义为速度失配容限。此处参考 TDI-CCD 的误差衡量基准, 根据 TDI-CCD 制造商 DALASA 公司的研究报告显示: 同步误差对于图像质量的影响可以通过  $M(\Delta V/V)$  表示, 当  $M(\Delta V/V) < 2$  时, 速度失配对成像系统  $f_{\text{MTF}}$  的影响可以忽略。对于 96 级 TDI-CCD, 要提取出清晰的图像, 同步误差要控制在  $\pm 2\%$  以内。所以  $M(\Delta V/V) = 2$  成为 TDI-CMOS 同步控制要求的一个重要设计依据。随 TDI 级数的增加, 速度失配对成像系统  $f_{\text{MTF}}$  的影响增大。

### 3.4 TDI-CMOS 推扫速度同步实现

设计中采用步进电机实现传感器与目标的速度同步控制。步进电机的转速与输入时钟频率成正比, 由专门的驱动电源供电, 实现精确定位。驱动控制电路包括: 脉冲发生器、脉冲分配器和功率放大器。设计中选用荣世公司的 60BYGH 控制器, 实现脉冲发生器和脉冲分配器的功能, 同时选用荣世公

司的二相细分步进电机驱动器 D2HB542MA, 实现功率放大。

行周期与目标运动必须满足  $M(\Delta V/V) < 2$ 。理论上的严格同步为

$$V_i = n \times \frac{p}{T_L}, \quad (9)$$

如果物距为  $H$ , 焦距为  $f$ , 则镜头放大倍数  $n = H/f$ ,  $p$  为 CMOS 传感器的像素尺寸,  $T_L$  为图像运动速率及放大倍数下 TDI 的行周期。 $F_i = 1/V_i$ , 为 TDI 的频率, 调节脉冲发生器  $F_i$  使之与图像的运动速度同步。

## 4 实验结果

成像系统如图 9 所示。包括实现运动控制的水平导轨和步进电机, 实现数据采集的正对导轨的图像传感器, 实现数字域累加的 Xilinx Virtex-5 LX110T 开发板, 实现数据传输的 ES-USB 和图像显示的 PC。实验中, 采用 Picta 标准分辨率测试卡完成成像系统的验证及对  $f_{\text{MTF}}$  的测试。

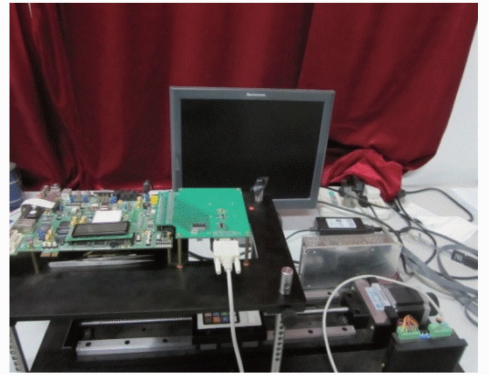


图 9 TDI-CMOS 成像系统

Fig. 9 TDI-CMOS imaging system

由于图像的 MTF 模型受到光学、传感器、速度失配等多种因素的影响, 绝对的  $f_{\text{MTF}}$  并不能准确地反映速度失配的影响。由于输入图像的条件一致, 即输入图像的调制度为定值。采用输出图像的调制度和  $f_{\text{MTF}}$  相对变化值代替绝对的  $f_{\text{MTF}}$  值评价图像质量改变。Picta 测试卡输出调制度的计算方法可表示为

$$M_0 = \frac{N \times 100}{h}, \quad (10)$$

式中  $N$  为图像中可以分辨条纹旁的数字,  $h$  为测试卡的高度。

成像系统验证的实验条件, 光强 3 lx 低照度环境, 推扫速度满足  $M(\Delta V/V) < 2$  的同步要求, TDI-CMOS 成像系统 1 级、4 级 TDI、8 级 TDI 的成像效果, 如图 10 所示。

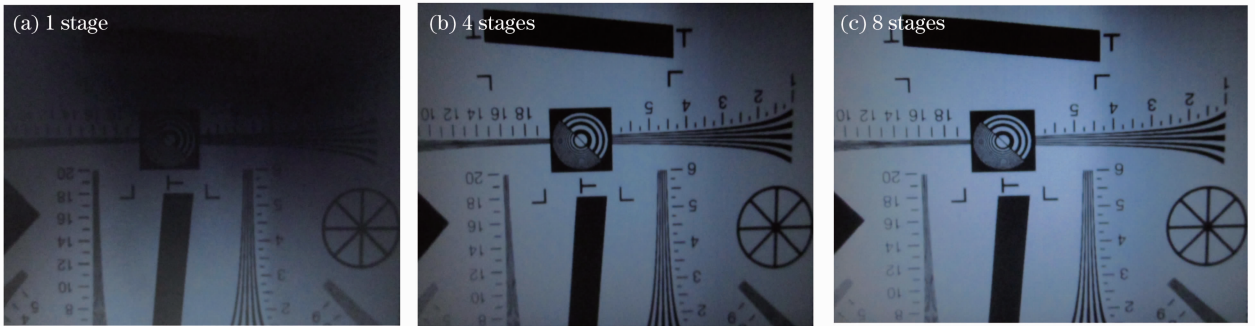


图 10 TDI-CMOS 系统图像质量

Fig. 10 Image quality of a TDI-CMOS system

由图 10 可见,在光强为 3 lx 的低照度环境下,不经过累加的面阵 CMOS 图像传感器已经不能真实的再现图像信息,输出图像的调制度只有 2 lp/mm 左右,即成像系统能够在 1 mm 内分辨 2 条线对,如图 10(a) 所示。经过 4 级、8 级累加后的图像质量得到明显改善,输出图像调制度分别为

2.7 lp/mm 和 3 lp/mm,即  $f_{\text{MTF}}$  分别提高 35% 和 50%,如图 10(b) 和 (c) 所示。正是由于 TDI 提高系统的灵敏度和信噪比,图像的  $f_{\text{MTF}}$  逐渐变大。

速度失配对于图像质量影响的实验条件为,光强 3 lx,TDI 为 8 级固定不变,速度失配  $M(\Delta V/V)$  分别为 0, 2, 5, 10, 实验结果如图 11 所示。

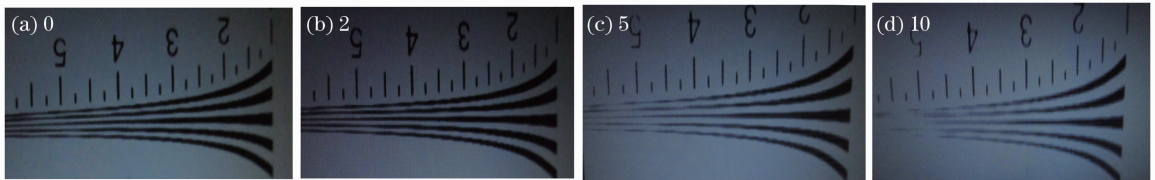


图 11 不同速度失配对于 MTF 的影响

Fig. 11 Influence of different velocity mismatch on MTF

由图 11 可知,在速度失配为 0 的条件下,输出图像的调制度为 5.5 lp/mm,如图 11(a) 所示。图 11(b) 显示在速度失配为 2 时,即达到速度失配容限,满足人眼分辨率  $f_{\text{MTF}} > 0.02$  的要求,调制度依然达到 5 lp/mm,  $f_{\text{MTF}}$  值下降约 10%。但是随着速度失配的进一步增大,在速度失配为 5 和 10 时,不再满足  $f_{\text{MTF}} < 0.02$  人眼分辨率的要求,输出图像的调制度下降为 4 lp/mm 及 3.6 lp/mm,  $f_{\text{MTF}}$  值下降 27% 和 35%,如图 11(c) 和 (d) 所示,验证图像的质量随速度失配的变大而变差。由于速度失配,图中 11(b)~(d) 的图像存在部分图像变形。

容限  $M(\Delta V/V) = 2$  时,  $f_{\text{MTF}}$  下降 10%,速度失配达到 5 和 10 时,  $f_{\text{MTF}}$  分别下降 27% 和 35%,进而验证建立的 MTF 速度失配模型。

## 参 考 文 献

- 1 H. S. Wong, Y. L. Yao, E. S. Schlig. TDI charge-coupled devices; design and applications [J]. *IBM J. Res. & Dev.*, 1992, **36**(1): 83~105
- 2 Zhang Da. Research of High-speed Multi-Channel CCD Signal Processing and Transmission Technology on Satellite [D]. Beijing: Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, 2008  
张 达. 星上高速多通道 CCD 信号处理与传输技术研究[D]. 北京:中国科学院研究生院, 2008
- 3 Hu Jun, Wang Dong. Detection and generation of multi-spectral TDI CCD signals for space optical remote sensors [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, **17**(8): 1810~1818  
胡 君, 王 栋. 空间光学遥感器的多光谱 TDI CCD 信号检测与生成[J]. *光学精密工程*, 2009, **17**(8): 1810~1818
- 4 Qu Hongsong, Jin Guang, Zhang Ye. Next View program and process in optical remote sensing satellites [J]. *Chinese J. Optics and Applied Optics*, 2009, **2**(6): 467~476  
曲宏松, 金 光, 张 叶. “Next View 计划”与光学遥感卫星的发展趋势[J]. *中国光学与应用光学*, 2009, **2**(6): 467~476
- 5 Fu Qiuyu, Lin Qingyu, Zhang Wangcheng *et al.*. A high-speed CMOS image sensor for real-time vision chip [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0828001

## 5 结 论

通过分析累加级数、像素尺寸、镜头放大倍数、行周期及电机运动速度等影响 MTF 的因素,建立 MTF 速度失配模型,搭建基于 FPGA 开发板的 TDI-CMOS 成像系统,验证 MTF 速度失配模型。在光强为 3 lx 的低照度环境下,经过 4 级、8 级累加的图像  $f_{\text{MTF}}$  与面阵 CMOS 相比分别提高 35% 和 50%;在固定累加 8 级不变,速度失配达到速度失配

- 付秋瑜, 林清宇, 张万成等. 面向实时视觉芯片的高速 CMOS 图像传感器[J]. 光学学报, 2011, **31**(8): 0828001
- 6 G. Lepage, D. Dantès, W. Diels. CMOS long linear array for space application[C]. *SPIE*, 2006, **6068**: 61~68
- 7 H. Michaelis, R. Jaumann, S. Mottola *et al.*. 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. Memynants. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2009, **56**(11): 2524~2533
- 9 Qu Hongsong, Zhang Ye, Jin Guang. Improvement of performance for CMOS area image sensors by TDI algorithm in digital domain[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(8): 1896~1903
- 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
- 10 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
- 11 J. F. Johnson. Modeling imager deterministic and statical modulation transfer functions[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(32): 6503~6513
- 12 Chen Xiaoli, Yin Chengliang, Feng Yong. A virtual simulation system of TDI line scan camera [C]. Proc. IEEE Advanced Intelligent Mechatronics, 2008. 138~144
- 13 E. A. Gamal, H. Eltoukhy. CMOS image sensors[J]. *Circuits and Devices Magazine IEEE*, 2005, **21**(3): 6~20
- 14 Ren Huanhuan, Ruan Ping, He Jianwei *et al.*. Study of the radiation calibration of TDI CCD spatial stereo camera[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3476~3480
- 任焕焕, 阮萍, 何建伟等. TDI CCD 空间立体相机辐射定标研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(12): 3476~3480
- 15 J. C. Felt, M. A. Karim. Modulation transfer function of charge coupled-devices[J]. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(5): 717~722
- 16 Shi Xiaowei, Wu Xingwu, Xu Xiaojian. Module transfer function model of scanning TDI sensors with oversampling-superposition [C]. Proc. IEEE International Instrumentation and Measurement Technology, 2008. 652~656
- 17 Gérald Lepage, Jan Bogaerts, Guy Memynants. Time-delay-integration architectures in CMOS image sensors [J]. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 2009, **56**(11): 2524~2533
- 18 Zhang Lin, Wu Xiaoqin, Yuan Ming. Synchronous control research of TDI-CCD camera dynamic imaging [J]. *J. Transducer Technology*, 2005, **24**(12): 10~15
- 张林, 吴晓琴, 袁明. TDI-CCD 相机动态成像的速度同步控制研究[J]. 传感器技术, 2005, **24**(12): 10~15

栏目编辑: 何卓铭