

文章编号 1004-924X(2008)09-1629-06

# 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式研究

周怀得<sup>1</sup>, 刘海英<sup>2</sup>, 徐 东<sup>1</sup>, 李广泽<sup>1</sup>, 王 冶<sup>1</sup>, 刘金国<sup>1</sup>

(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. 吉林东光精密机械厂, 吉林 长春 130012)

**摘要:**具有微透镜的行间转移面阵 CCD 在空间辐照环境下, 微透镜材料容易模糊, 导致不能正常成像; 而如果不使用微透镜, 则会由于行间转移 CCD 的填充因子和量子效率低, 曝光量不足, 影响图像质量和信噪比, 亦不能满足使用要求。本文提出采用时间延迟积分(TDI)工作方式来解决这一问题。使用现场可编程逻辑器件(FPGA), 在实现行间转移面阵 CCD KAI0340-S 正常工作的基础上, 根据 TDI CCD 的工作原理, 实现了 CCD KAI0340-S 的 TDI 工作方式。同时, 采用 RS485 总线, 实现了计算机和 FPGA 之间的通信和数据交换, 完成了面阵 CCD TDI 积分级数、行 TDI 积分时间、以及集成视频信号处理器增益和偏置参数的任意设置。实验结果表明, 在没有微透镜下正常成像时, 图像质量很差, 其信噪比仅为 22.13 dB(TDI 级数为 1); 通过设置合适的 TDI 积分级数后, 图像质量有很大的提高, 信噪比超过 33.62 dB(TDI 级数为 4)。行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式, 可以改善和提高在空间辐照环境下没有微透镜时的图像质量, 解决了借助微透镜可提高其量子效率, 但微透镜在空间辐照环境下时间较长又容易模糊的矛盾。

**关键词:**行间转移; 面阵 CCD; 微透镜; 时间延迟积分; 量子效率; 现场可编程逻辑器件

**中图分类号:** TN386.5; P231 **文献标识码:** A

## Study of TDI pattern for interline transfer progressive scan CCD

ZHOU Huai-de<sup>1</sup>, LIU Hai-ying<sup>2</sup>, XU Dong<sup>1</sup>, LI Guang-ze<sup>1</sup>, WANG Ye<sup>1</sup>, LIU Jin-guo<sup>1</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 2. Jilin Dongguang Factory of Fine Mechanics, Changchun 130012, China)

**Abstract:** In space environment, the micro-lens of interline transfer progressive scan Charge Coupled Device(CCD) will become fuzzy, for the effect of space ray in a long time results in bad quality image of the space camera. However, an interline transfer area CCD without the micro-lens has a lower fill factor and quantum efficiency, it will result in bad quality and lower ratio of Signal to Noise(SN) of image also. In order to apply this kind of CCD in space camera, a Time Delay Integral(TDI) pattern to overcome the conflict based on the character of the CCD was proposed, a system using Field Programming Gate Array (FPGA) to generate the driving signal was designed to realize the TDI pattern. At the same time, the communication and data transfer of FPGA with computer was completed by RS485 bus for setting the TDI stage, the integral time of TDI and the gain and offset parameters of video process chip. The experimental results indicate that the SN ratio is only 22.13 dB(the TDI stage is one) and the quality of the image is very bad when imaging without a micro-lens. After setting a

收稿日期: 2008-03-26; 修订日期: 2008-06-25.

基金项目: 中国科学院“优秀博士学位论文、院长奖获得者科研启动专项基金”资助项目

reasonable TDI stage parameter, the SN ratio of the image is 33.62 dB (TDI stage is four), the quality of the image has a big improvement. Experiments show that the TDI pattern of interline transfer progressive scan CCD can improve the quality of image without micro-lens under space ray environment, Which resolves the conflict of micro-lens can improve the quantum efficiency of interline transfer progressive scan CCD, but micro-lens will become fuzzy for the effect of space ray in a long time.

**Key words:** interline transfer; area Charge Coupling Device (CCD); micro-lens; Time Delay Integral (TDI); quantum efficiency; Filed Programming Gate Array (FPGA)

## 1 引言

近年来,随着 CCD 器件本身工艺水平的提高,其成像质量和器件本身可靠性也得到了进一步的改善和提高,将 CCD 应用在星载相机上对地成像,并在星上直接完成模拟图像的数字化后传输回地面,形成高清晰对地数字图像的技术也在飞速发展。和传统的胶片式星载相机相比,CCD 星载相机具有在轨运行寿命长,和地面站配合可以进行观测图像的实时传输等优点。

针对不同的应用需要,星载相机使用的 CCD 类型也不完全一样,如 TDI CCD、面阵 CCD 等。本文在星载相机上使用了行间转移 (Interline Transfer) 面阵 CCD (Charge Coupling Device),采用间隙摄像的方式对地成像。行间转移面阵 CCD 像元本身结合了电荷转移通道,通过快速转移积分获取图像,克服了帧转移面阵 CCD 中存在的图像拖影现象。但由于像元本身电荷转移通道的存在,降低了像元的量子效率和成像灵敏度。为了提高其量子效率和灵敏度,采用了微透镜。但在空间辐照环境下,时间较长后微透镜本身又容易模糊,也会导致成像图像质量的下降。本文针对这一问题,根据行间转移面阵 CCD 像元结构和 TDI CCD 像元结构的相似性,提出采用行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式,解决了借助微透镜可提高其量子效率,但微透镜在空间辐照环境下时间较长又容易模糊的矛盾,改善了图像的质量。

## 2 行间转移面阵 CCD 结构及其 TDI 工作方式

### 2.1 行间转移面阵 CCD 结构

行间转移面阵 CCD 结合了电荷转移通道,称为行间掩模,其结构是紧挨着每个光敏二极管进行掩模,如图 1 所示。行间转移面阵 CCD 在积分

曝光获取图像完成后,累积的电荷可以立即转移到由行间掩模区形成的电荷转移通道。行间转移面阵 CCD 通过快速转移积分获取的图像,克服了帧转移面阵 CCD 中存在的图像拖影现象。

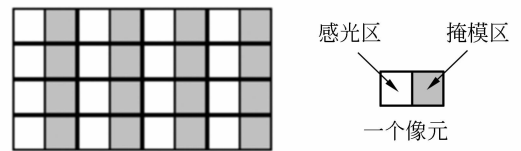


图 1 行间转移面阵 CCD 像元结构图

Fig. 1 Pixel structure of interline transfer progressive scan CCD

行间转移 CCD 器件的最大缺点是行间掩模减少了像元光敏面积,导致 CCD 的填充因子和量子效率降低,影响了成像的灵敏度和图像的信噪比。为了提高其量子效率,通常在 CCD 的像元上面设计微透镜,以提高像元的量子效率。微透镜的结构和像元的关系如图 2 所示。由相机入射的平行光,经过微透镜的汇聚作用后,正好能够完全落在像元感光区,从而可以提高像元的量子效率。

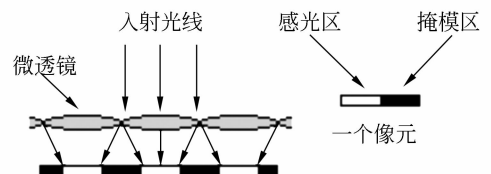


图 2 微透镜结构和 CCD 像元关系图

Fig. 2 Structure of micro-lens and relation with CCD pixel

使用微透镜情况下,像元量子效率可比不使用微透镜情况提高 30% 左右,但在星地相机对地成像系统中,CCD 需长期工作在空间辐照环境下,微透镜本身会随着时间的推移而逐渐模糊,导致成像图像质量下降。而不使用微透镜则由于

CCD 本身的量子效率低,成像的灵敏度和图像质量也不高。如何有效地提高行间转移面阵 CCD 成像器件的量子效率,从而提高成像灵敏度和图像信噪比,成为行间转移面阵 CCD 能否成功应用在星地相机成像系统中的关键因素。

由于行间转移面阵 CCD 结合了行间转移通

道,其结构和普通的 TDI CCD 具有类似之处,如果采用适当的控制方法,完全可以将行间转移面阵 CCD 按 TDI CCD 来使用,使其工作在 TDI 方式,在不使用微透镜的情况下提高成像的灵敏度和图像信噪比。

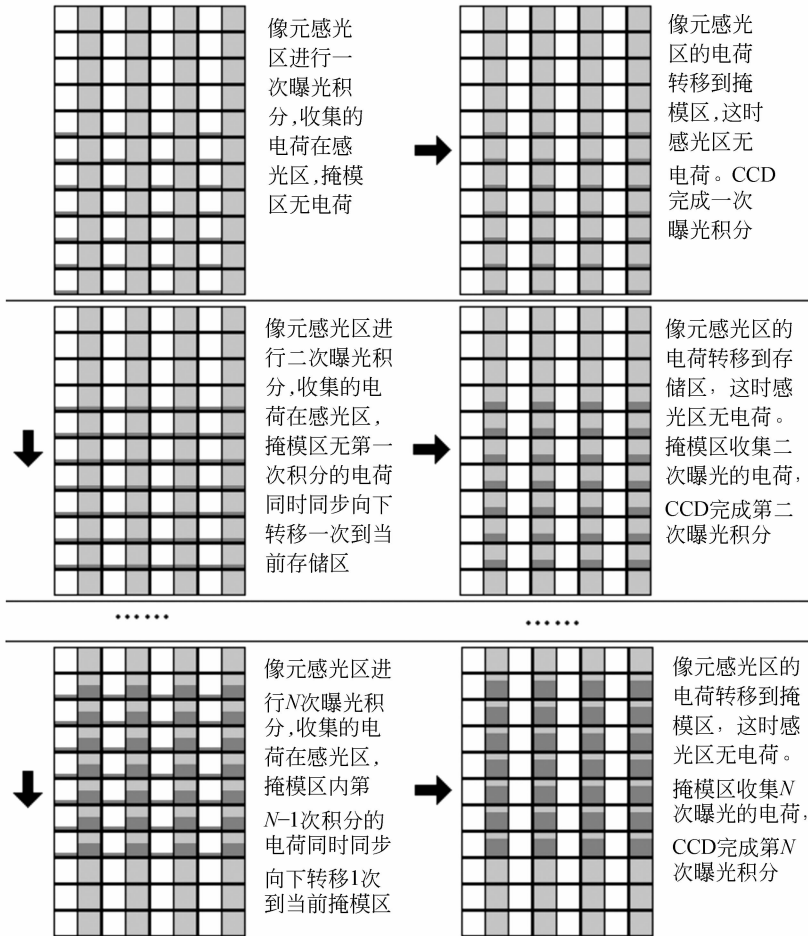


图 3 积分一次时,感光区和掩模区的电荷示意图

Fig. 3 Charge of image area and mask area at one integration step

### 2.2 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作原理

CCD 的 TDI(Time Delay Integral)工作方式,即为时间延迟积分方式。其基本原理为:当 CCD 的第一行某一列的第一个像元在第一次曝光积分时间内累积的电荷并不直接输出,而是在转移时序的控制下移向同列第二个像元并与第二个像元在第二次曝光积分时间内累积的电荷包相加。电荷转移时,CCD 或目标同时前进一步。在完成设定的最后一次曝光积分后,最后一行像元的电荷为本身和前面像元曝光累积的所有电荷包

之和,并在读出时序的控制下被读出。

行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式和普通线阵 TDI CCD 的工作方式是一样的,但如果采用行间转移面阵 CCD 来实现 TDI 工作方式,其电荷的垂直转移和清除过程和线阵 TDI CCD 电荷的转移清除过程将有所不同,且 TDI 级数可以根据图像质量情况进行任意级设置,而不像线阵 TDI CCD,其积分级数通常固定为几级,如:4 级、8 级、16 级、32 级和 96 级等。

行间转移面阵 CCD 在 TDI 工作方式下的工

作过程和原理如图 3 所示。设 CCD 需要进行  $N$  次 TDI 积分,即积分级数为  $N$ 。第一次开始积分时,掩模区为空,感光区开始曝光积分收集电荷。在感光区完成第一次曝光积分后,将收集的电荷转移到像元对应的掩模区,从而完成第一次积分。

第二次积分时,CCD 向前推扫一步,目标对应到第二行像元并开始曝光积分收集电荷,同时上一次曝光积分收集在掩模区的电荷也同步转移到第二步曝光积分像元对应的掩模区。在感光区完成第二次曝光积分后,将收集的电荷转移到像元对应的掩模区,从而完成第二次积分,并且完成第一次和第二次曝光积分电荷的累积。

继续进行积分,在第  $N$  次积分时,CCD 向前推扫  $N$  步,目标对应到第  $N$  行像元并开始曝光积分收集电荷,同时上  $N-1$  次曝光积分收集在掩模区的电荷也同步转移到第  $N$  步曝光积分像元对应的掩模区。在感光区完成第  $N$  次曝光积分后,将收集的电荷转移到像元对应的掩模区,从而完成第  $N$  次积分,并且完成前  $N-1$  次和第  $N$  次曝光积分电荷的累积。

在完成设定的  $N$  次积分后,第  $N$  行像元掩模区内存储的电荷就为这  $N$  次曝光积分累积的电荷之和。 $N$  次积分后,将掩模区收集的积分电荷顺序读出,以清空掩模区。在读出掩模区内电荷的同时,感光区积分生成的电荷在下次积分开始之前可以用电子快门直接清除掉。

### 3 行间转移面阵 CCD 的 TDI 工作方式设计和实现

#### 3.1 成像系统硬件构成

在完成对行间转移面阵 CCD TDI 工作方式的论述后,设计了相应的成像系统,对其工作方式进行了进一步的实现。整个成像系统的硬件结构如图 4 所示,主要由成像部分和控制采集部分组成。成像部分包括成像传感器、时序驱动电路、视频处理电路、FPGA 等,控制采集部分由数据采集卡、计算机等组成。

这里,成像器件选择了 KODAK 公司的行间转移面阵 CCD KAI0340-S,FPGA 为 XILINX 公

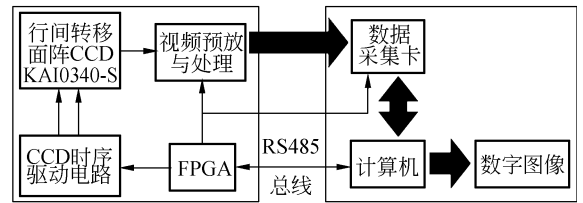


图 4 系统硬件结构简图

Fig. 4 System structure

司产品 XCV300,视频预放与处理采用了集成视频处理器来完成。

KAI0340-S 的有效像元数为  $640 \text{ pixel} \times 480 \text{ pixel}$ ,像元尺寸为  $7.4 \mu\text{m} \times 7.4 \mu\text{m}$ 。在具有微透镜时,其量子效率可以达到 50% 以上,但在空间辐照环境下不能使用微透镜。在没有微透镜时,其量子效率最大仅为 10% 左右,如图 5 所示,很难满足空间成像应用的需要,故本文考虑采用 TDI 工作方式来解决这一问题。

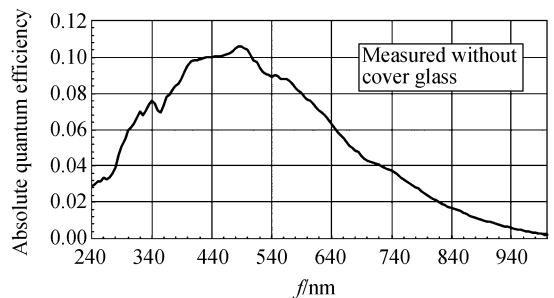


图 5 KAI0340-S 在没有微透镜时的量子效率

Fig. 5 QE of KAI0340-S without micro-lens

XILINX 公司的 FPGA XCV300 内部有 30 万门可编程逻辑资源,最大 I/O 数量达 162 个,且具有 4 个专用时钟输入引脚,另外片内还有 64 kbit 的块 RAM 可以使用。

成像部分和计算机之间的通信采用 RS485 总线进行,完成 CCD 积分级数、行积分时间、集成视频处理器工作参数等的实时设置。

#### 3.2 成像系统工作原理

成像部分在 FPGA 的控制下,完成对成像传感器 KAI0340-S 的驱动,并根据 CCD 工作时序和 TDI 工作方式的要求,将其驱动时序按 TDI 工作方式来驱动。由 CCD 输出的模拟视频信号输

入到集成视频信号处理器中进行处理,完成模拟视频信号的量化,形成数字图像并输出到数据采集卡,FPGA同时伴随输出相应的数据传输时序给数据采集卡。集成视频信号处理器的初始化,工作时序的产生,以及增益、偏置参数的设置等工作,均由FPGA通过I2C总线来完成。FPGA通过485总线和数据采集计算机进行通信,实时接收数据采集计算机发送的相关工作参数:CCD的积分级数、行积分时间、集成视频处理器的增益参数、偏置参数等,并完成CCD积分级数和积分时间的调整,设置视频处理器的增益和偏置等工作。成像部分FPGA程序采用VHDL语言编写。

控制采集部分主要控制成像部分工作,完成对成像部分的参数设置,并采集、显示、存储成像。

### 3.3 KAI0340-S 的 TDI 工作方式的实现

要完成KAI0340-S的TDI工作方式,最主要是完成其曝光积分电荷转移时序的设计。CCD KAI0340-S曝光积分电荷的转移,主要是设计其垂直转移时钟,同时考虑CCD本身的曝光积分时间控制。这里设CCD的既定积分级数为 $N$ ,每次曝光时间为 $t$ ,则其垂直转移时钟、积分级数和曝光时间的时序如图6所示。从图中可以看出,在完成既定时间的曝光积分后,直接将电荷转移到下一行电荷存储区,然后进行下一次积分,直到完成设定积分级数后,再将图像顺序读出。在读出期间曝光积分产生的电荷,下一次开始TDI积分前,由电子快门进行清零。

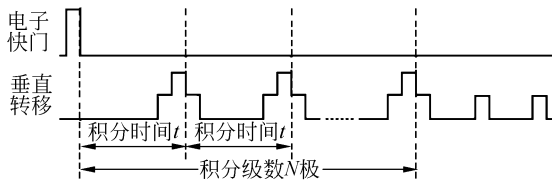


图6 TDI方式下KAI0340-S的垂直转移时序图

Fig. 6 Vertical transfer diagram of KAI0340-S in TDI

### 3.4 实验结果

在完成系统软、硬件设计和调试后进行了成像测试,结果如图7所示。图中的4幅测试图像对应的TDI级数分别为1、2、4、8级,行积分时间

$t$ 均为 $750\ \mu\text{s}$ 。从图中可以看出,在积分级数 $N=1$ 级情况下,图像曝光量明显不足,质量很差,缺乏层次感,其信噪比也仅为 $22.13\ \text{dB}$ ;当TDI级数逐渐增大时,图像质量也逐渐提高。当 $N=4$ 级时,图像质量明显改善,层次感丰富,其信噪比也达到了 $33.62\ \text{dB}$ ;当 $N=8$ 级时,图像已经出现了饱和,这时无法衡量其信噪比。



图7 TDI级数为1、2、4、8时对应的测试图像

Fig. 7 Test images with TDI stage of 1, 2, 4, 8

## 4 结 论

本文根据行间转移面阵CCD的结构特点,提出采用TDI工作方式,解决了在星地相机成像系统中,借助微透镜可提高CCD量子效率,但微透镜在空间辐照环境下时间较长后又容易模糊的问题,同时克服了在没有微透镜情况下CCD像元本身的填充因子和量子效率低的问题,改善了图像的质量。论文还采用FPGA设计了相应的成像系统使行间转移面阵CCD实现了TDI工作方式。实验证明,在没有微透镜也不采用TDI工作方式时,成像图像质量很差,其信噪比仅为 $22.13\ \text{dB}$ ;在使用TDI工作方式后,图像质量明显提高,达到了 $33.62\ \text{dB}$ 。通过调整TDI积分级数,图像质量还应有提高的余地。实验结果表明,行间转移面阵CCD的TDI工作方式在星地相机对地成像系统上的应用是没有问题的。

## 参考文献:

- [1] Data sheet of: KODAK KAI0340-S Image Sensor 2004, Revision 1.0[Z].
- [2] 杨秉新. TDICCD 相机的信噪比的研究[J]. 航天返回与遥感, 2005, 26(2): 22-24.  
YANG B X. Study on the SNR of TDICCD camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2005, 26(2): 22-24. (in Chinese)
- [3] 万旻, 李涛. TDI CCD 时序设计在 FPGA 中的工程实现[J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(3): 37-40.  
WAN M, LI T. A kind of FPGA engineering realization of TDICCD timing design [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(3): 37-40. (in Chinese)
- [4] 赵贵军, 陈长征, 万志, 等. 推扫型 TDI CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. 光学 精密工程, 2006, 14(2): 291-296.  
ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI CCD optical remote sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2): 291-296. (in Chinese)
- [5] 张林, 吴晓琴, 袁睿. 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.  
ZHANG L, WU X Q, YUAN M. Synchronous control research of TDI-CCD camera dynamic imaging [J]. *Journal of Transducer Technology*, 2005, 24(12): 10-15. (in Chinese)
- [6] 樊超, 易红伟. TDICCD 相机动态成像过程的像质分析[J]. 光电与控制, 2007, 14(2): 123-124, 153.  
FAN CH, YI H W. Analysis on the dynamic imaging quality of the TDICCD camera [J]. *Electronics Optics & Control*, 2007, 14(2): 123-124, 153. (in Chinese)
- [7] 黄巧林, 金伟其, 朱敏. 航天 TDICCD 相机视频信号处理中相关双采样技术的研究[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(4): 17-25.  
HUANG Q L, JIN W Q, ZHU M. TDICCD video data sampling technique for space remote sensing camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002, 23(4): 17-25. (in Chinese)

作者简介: 周怀得(1975—), 男, 四川射洪人, 工学博士, 研究方向为传感器成像和数字图像处理。E-mail: gjszhd@sohu.com

## ● 下期预告

## 厦门地区气溶胶折射率的测量研究

李学彬, 黄印博, 徐赤东, 魏合理, 胡欢陵

(中国科学院 安徽光学精密机械研究所 大气光学研究中心, 安徽 合肥 230031)

针对气溶胶折射率在分析大气气溶胶光学特性中的重要性, 提出了一种综合利用黑碳仪、浊度计和光学粒子计数器反演大气气溶胶折射率的新方法。该方法根据黑碳仪和浊度计测量的气溶胶吸收系数和散射系数以及粒子计数器测量的粒子谱分布, 采用球形粒子的米(Mie)散射理论, 通过分析吸收系数、散射系数、粒子谱分布和折射率之间的关系来反演大气气溶胶粒子的折射率, 该方法可以同时反演折射率实部和虚部。通过与其它独立的测量结果对比表明: 该方法反演气溶胶折射率是合理的。最后利用此方法对厦门地区的气溶胶折射率进行了分析。