

## 高集成度多光谱 TDI CCD 焦平面系统

张 达, 李 巍

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

**摘 要:** 提出了一种高集成度 TDI CCD 焦平面系统, 成功应用 TDI CCD 驱动单元厚膜集成模块完成了具有 16 路 CCD 信号输出、像元读出频率 20 MHz 的高集成度高速多光谱 TDI CCD 焦平面系统的研制。通过采用双通道 CCD 信号处理模拟前端、厚膜集成驱动单元模块、高速 LVDS 图像数据传输接口以及机、电、热一体化仿真设计方法, 极大提高了 TDI CCD 焦平面系统的集成度, 降低了系统互连的复杂程度。系统共有 4 路图像数据传输接口, 单路传输能力达到 1.6~2.5 Gbps, 最高可实现 10 Gbps 的图像数据带宽, 在保证高数据率的同时, 提高了数据传输的抗干扰能力。阐述了系统设计方案及多光谱 TDI CCD 探测器工作原理, 并对其中的机电集成设计、驱动单元厚膜集成技术以及高速串行传输总线等关键技术进行了分析描述。通过采用 TDI CCD 传函测试片对系统进行了测试, 焦平面全系统调制传函平均为 0.511。

**关键词:** TDI CCD; 厚膜集成驱动; 多光谱; 高速; 焦平面

**中图分类号:** TP73 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1018006

## Highly integrated multi-spectral TDI CCD focal plane system

Zhang Da, Li Wei

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Highly integrated TDI CCD focal plane system was proposed, the thick-film integrated module of TDI CCD driving unit is applied successfully in the domestic. The research was finished on highly integrated high-speed and multi-spectral TDI CCD focal plane system, including 16 channel CCD output signals and pixel read-out frequency of 20 MHz. The use of dual-channel CCD signal processing analog front end, thick-film integrated drive unit module, high-speed image data transmission LVDS interface and mechanical, electrical, thermal integrated and simulated design approach greatly increases the integration of TDI CCD focal plane system and reduces the complexity of system interconnection. The system includes four image data transmission interfaces, each transmission capacity is 1.6 Gbps to 2.5 Gbps. It is up to 10 Gbps total of the image data bandwidth, ensuring high data rates and improving anti-interference performance of data transmission. The system design and multi-spectral TDI CCD detector working principle was described. As the key technologies, mechanical and electrical integrated design, thick-film integrated technology of drive unit and high-speed serial transmission bus technology were analyzed. The system was tested by using TDI CCD transfer function test chip, average value of

收稿日期: 2016-02-21; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 总装预研项目(513210202)

作者简介: 张达(1981-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间光学遥感仪器的研制、空间光学成像、光谱探测技术方面的研究。

Email: zhangda@ciomp.ac.cn

modulation transfer function is 0.511 in the total focal plane system.

**Key words:** TDI CCD; thick-film integrated driver; multi-spectrum; high-speed; focal plane

## 0 引言

电荷耦合器件(CCD)是遥感探测及成像领域里重要的光电传感器件。它具有较大的动态范围、较高的量子效率、低读出噪声和暗电流、高电荷转移效率、较宽的光谱响应范围以及高可靠性等优点。

时间延时积分电荷耦合器件 (Time Delay and Integration Charge Coupled Devices, DI CCD) 图像传感器是在 CCD 技术基础上发展起来的一种新型光电传感器, 在航空航天、遥感等领域得到了广泛应用。TDI CCD 对低照度条件下的目标探测比常规线阵 CCD 具有更高的灵敏度<sup>[1]</sup>。TDI CCD 通过多级积分控制延长积分时间, 从而提高探测的灵敏度和信噪比。基于上述特点, 采用 TDI CCD 不仅可以提高遥感探测能力, 还在减小遥感相机  $F\#$  数的同时, 使得遥感成像系统的体积、质量大幅度降低, TDI CCD 焦平面系统是空间遥感相机轻小化的关键技术

途径。随着对地遥感图像分辨率要求的不断提高, CCD 的像元读出频率越来越高, 目前在某些应用中 TDI CCD 的单路像元读出频率已达到 20 MHz 以上, 输出路数也在不断增加, 常规方法势必造成信号质量难以保证, 成像电子学体积、功耗等方面大幅增加, 已成为制约成像电子学性能指标提升的关键因素。近些年国外在高速多通道 CCD 成像电子学领域大量采用 ASIC 技术、厚膜技术等多芯片组件 (Multichip Module) 集成技术, 而国内尚未见到类似应用研究报告, 相关系统的深入研究及实现具有重要意义。

## 1 TDI CCD 的结构及工作原理

TDI CCD 图像传感器是一种具有面阵结构、线阵输出的 CCD, 它具有多重级数延时积分的功能。TDI CCD 传感器的原理结构框图如图 1 所示。从图中结构可以看出, TDI CCD 的列数  $N$  是行像元数,

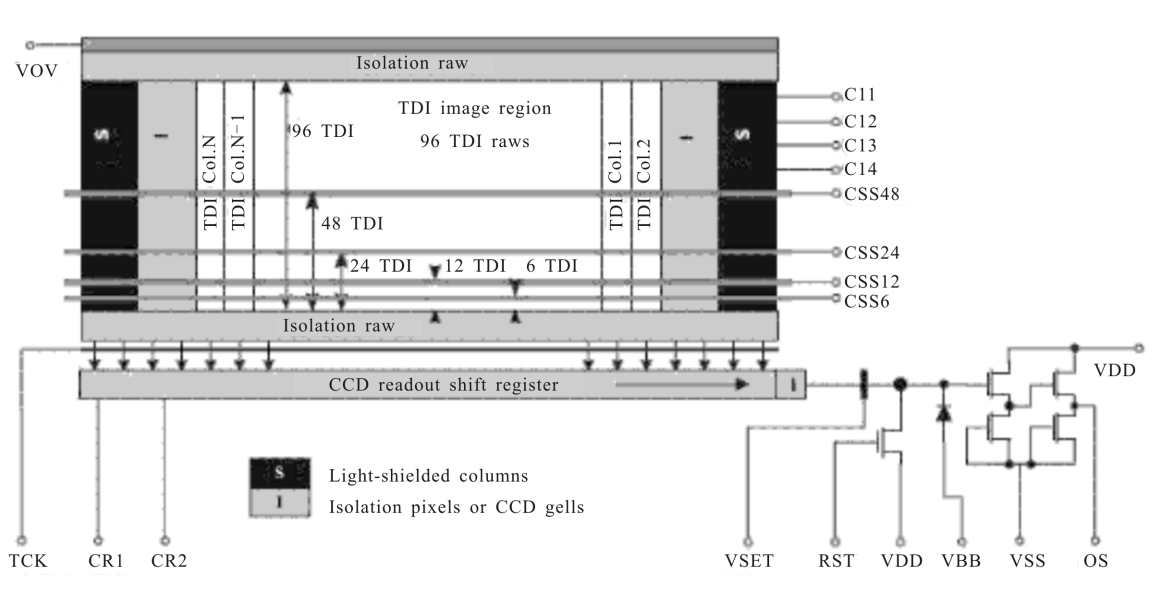


图 1 TDI CCD 原理结构框图

Fig.1 TDI CCD principle block diagram

行数  $M$  是延时积分的级数, 结构形式为多条 CCD 线阵并行排列, 像元在线阵和积分级数两个方向呈矩形排列。

TDI CCD 图像传感器的光生电荷累积方向是

沿列方向(级数方向)进行的, 图中所示的第 1 级至第 96 级积分级数按自下而上的顺序排列。在成像过程中, 随着遥感相机的运动, TDI CCD 按照积分级数第 96 级至第 1 级依次感光, 光生电荷从第 96 级

至第 1 级逐级累积。最终,经过 96 次延时积分累积起来的光生电荷包转移到 TDI CCD 水平读出移位寄存器上,按常规 CCD 传感器的输出方式进行读出。此时,TDI CCD 输出信号的幅度是  $M$  个像元光生电荷的累加结果,相当于一个像元在  $M$  倍积分时间周期内所收集到的光生电荷数,输出信号幅值增大为  $M$  倍,而噪声相当于只增加  $\sqrt{M}$  倍,因此, $M$  级积分级数的 TDI CCD 最终输出信号的信噪比比

常规线阵 CCD 提高  $\sqrt{M}$  倍<sup>[2]</sup>。

## 2 系统设计

### 2.1 系统组成和工作原理

高速多光谱 TDI CCD 焦平面系统组成如图 2 所示,主要包括多光谱 TDI CCD、前置预放大器、CCD 驱动单元、偏置电源单元、模拟视频信号处理单元以及时序控制及接口单元。

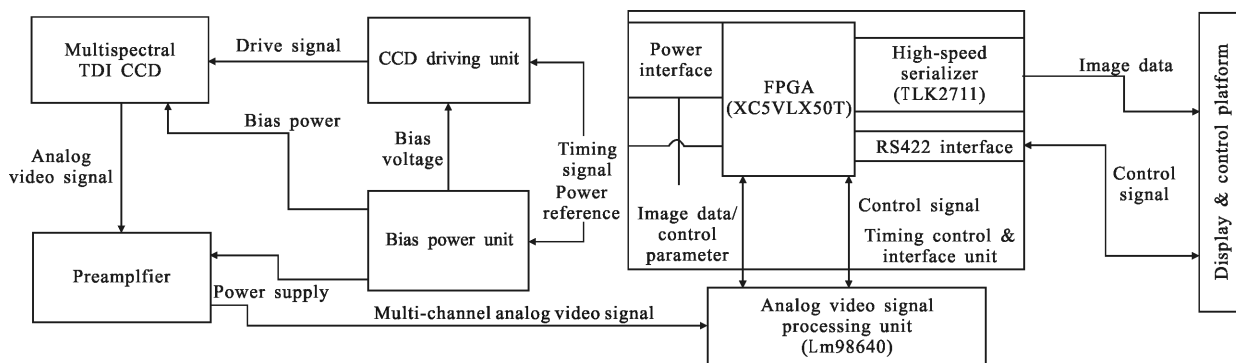


图 2 系统组成框图

Fig.2 System block diagram

TDI CCD 及前置预放大器主要完成光电信号转换和 CCD 模拟信号的多路匹配放大;CCD 驱动单元和偏置电源单元用来产生满足 TDI CCD 正常工作所需的驱动信号和多种偏置电压;模拟视频信号处理单元用来完成多路 CCD 模拟信号的相关双采样、暗电平校正以及模/数转换功能;时序控制及接口单元用以产生正确的 TDI CCD 工作时序信号,完成图像数据的整合打包,通过高速串化/解串器 TLK2711 以高速 LVDS 信号形式将处理后的图像数据输出至图像快视及控制平台;同时系统与图像快视及控制平台间通过控制及接口单元以 RS422 方式进行通讯控制以及必要的参数传递,采用现场可编程门阵列(FPGA)作为控制核心。由于该功能单元实现的是数字逻辑功能,同时需要处理多路高速 LVDS 信号输入,并以较高的频率输出并行图像数据,需要具有较快的处理速度和种类及数量丰富的 I/O 资源,系统选用 Xilinx 公司的 XC5VLX50T 高性能的 FPGA。

系统基于时分复用原理,在 FPGA 内部完成多路全色及多光谱 TDI CCD 图像数据流的缓冲与整合。合并后的图像数据和辅助状态附加信息经过数

据重组打包成特定格式,通过数传接口单元逻辑成具有一定格式的以 16 位并行高速数据流输出至高速串化/解串器并直接以高速 LVDS 信号形式输出给图像快视设备<sup>[3]</sup>。

### 2.2 高速多光谱 TDI CCD 探测器

系统选用具有高灵敏度和高分辨性能的高速多光谱 TDI CCD 器件作为系统的核心传感器。该 TDI CCD 由全色谱段及 4 个多光谱谱段构成。其中全色响应谱段为  $0.4\sim 0.9\ \mu\text{m}$ ,量子效率(QE)峰值大于 0.45,积分级数可达 96 级,像元数  $6144\times 96$  级,像元尺寸为  $8.75\ \mu\text{m}\times 8.75\ \mu\text{m}$ ,8 路输出,单路读出频率最高可达到 25 MHz,最大行频为 25 kHz,动态范围达到 2200:1 以上<sup>[4]</sup>。其工作过程分为光子积分阶段和光生电荷转移阶段,光子积分阶段完成光生电荷的累积,与此同时,上一行转移到水平移位寄存器中的光生电荷向输出级放大器移位输出并清空相应像元势阱中的无效电荷;光生电荷转移阶段完成光生电荷向水平移位寄存器的转移。该 CCD 结构组成及多光谱各谱段波长响应范围内的量子效率曲线分别如图 3(a)、(b)所示。

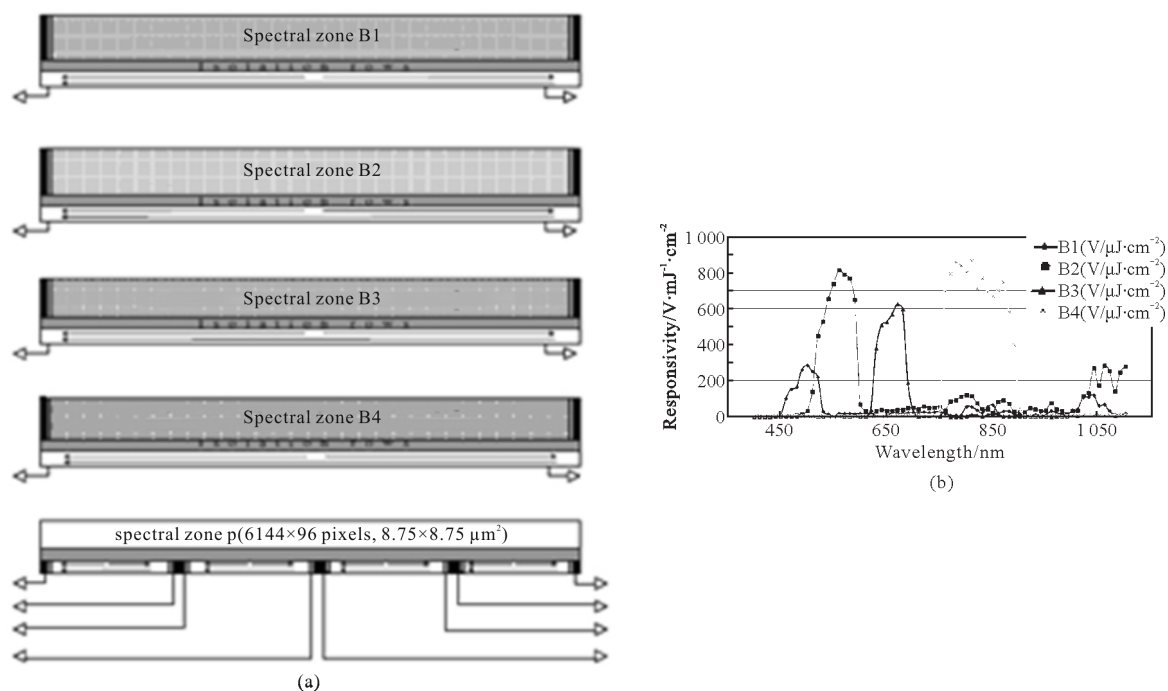


图 3 TDI CCD 结构组成(a)及多光谱谱段光谱响应曲线(b)

Fig.3 TDI CCD structure(a) and spectral responsivity of multi-spectrum(b)

### 2.3 CCD 模拟视频信号处理

在 TDI CCD 焦平面系统中关键的是视频信号高速低噪声处理性能指标的优劣,对 CCD 输出的主要噪声成分进行处理抑制的主要方法是采用相关双采样技术<sup>[5]</sup>。此处对 CCD 模拟视频信号处理采用专用模拟前端 LM98640 处理器加以实现。LM98640 具有模拟双通道输入,最高 40 MSPS 的采样频率,14 bits 模/数转换器,采样边沿可编程调节,内置 TDI CCD 信号处理所需要的相关双采样、可编程增益放大、数据并/串转换等功能。采用 4 位数据+伴随时钟+同步信号的 LVDS 输出信号形式,使其具有耐电离剂量性能和防止数据丢失及误码的能力<sup>[6]</sup>。

## 3 关键技术

### 3.1 驱动单元厚膜集成技术

高速 TDI CCD 驱动技术一直是高速 TDI CCD 应用中的一个难点。原因在于驱动具有一定像元规模的高速 TDI CCD,驱动电路要实现较大负载电容情况下的高速高电压电平转换,需要提供足够的驱动能力并保证高速驱动信号的完整性。同时驱动单元也是发热的重要部分之一,需要考虑采取有效恰当的散热措施,保证长时间工作的稳定可靠性。

TDI CCD 驱动电路影响着系统的最终成像质量。一方面,各驱动信号间的相位匹配对 TDI CCD 输出信号噪声控制具有重要影响;另一方面,成像电子学中调制传递函数(MTF)的好坏主要取决于 TDI CCD 驱动电路,包含垂直驱动电路和水平驱动电路。良好的驱动信号质量可以保证光生电子在 CCD 器件中的扩散得到最大限度地抑制,实现垂直和水平两个方向上的高电荷转移效率,从而提高这两个方向上的 MTF<sup>[7]</sup>。

随着 TDI CCD 读出频率的提高,由于分布参数的影响,高速驱动信号质量会制约整个系统的性能。因此研究驱动电路单元的集成方法和工程实现,并与探测器紧密结合,降低分布参数,是提高 TDI CCD 成像系统整体性能的重要环节。采用厚膜技术实现驱动电路的集成小型化是行之有效的途径之一。将驱动芯片晶圆裸片在厚膜基片上进行绑定,形成独立的高集成度小尺寸驱动单元模块。这样,可以做到驱动时序、驱动芯片和 CCD 驱动端引脚的距离最短,在实现集成化的同时,能够大幅度提高驱动信号质量,有效抑制噪声的引入。电路采用低温共烧陶瓷(LTCC)多层工艺组装,采用 38 mm×38 mm 的基片。驱动器管芯采用绝缘导热胶粘接,外围电容用 PbSn 焊,电阻采用厚膜印刷。设计版图过程中,输入



输出信号进行包地处理,减少信号之间的干扰;进行布线时最大限度考虑信号的一致性,减少一致性要求比较高的信号传输线长度差异;在层设计中,每层信号层都紧邻地层,减小信号干扰。

由于驱动器件的高度集成,为确保厚膜集成后的驱动单元模块具有良好的散热特性,按照 20MHz 像元读出频率工况,根据不同驱动器功耗情况以及封装基板 and 热阻的差异,对其进行了给定条件下的热分析,其厚膜集成版图和热分析温度云图分别如图 4 (a)、(b) 所示。在设定真空环境,厚膜集成封装壳体表面温度 125℃时,模块内部最高温度不超过 135℃。可以看出该厚膜集成驱动模块内部热阻较小,可通过控制壳体表面温度来保证内部驱动器管芯的良好温度水平。

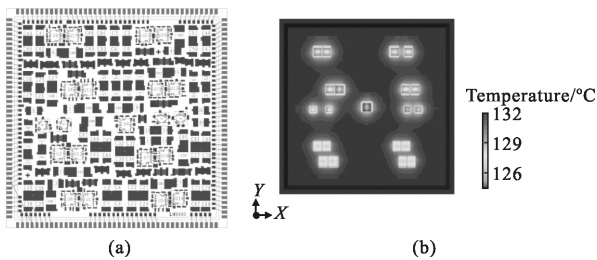


图 4 TDI CCD 厚膜集成驱动版图(a)及热分析温度云图(b)

Fig.4 TDI CCD thick-film integrated driver layout (a) and thermal analysis temperature cloud (b)

采取常规分立元件完成该多光谱 TDI CCD 驱动电路需要一整块 PCB 板实现,采用商业级元器件设计完成的 PCB 实际面积大小约为  $S_{\text{分立}}=77\text{ mm}\times 140\text{ mm}\approx 110\text{ cm}^2$ 。通过采取厚膜集成的方式,实际仅需两片  $44\text{ mm}\times 44\text{ mm}$  大小的厚膜驱动模块即可实现全部功能,面积为  $S_{\text{厚膜}}=2\times 44\text{ mm}\times 44\text{ mm}\approx 39\text{ cm}^2$ ,二者面积之比为 2.82:1,大大减小了驱动单元所占空间,有利于缩短驱动信号与探测器间的距离,提高系统集成度,提升高速驱动信号质量,二者外形尺寸对比如图 5 所示。

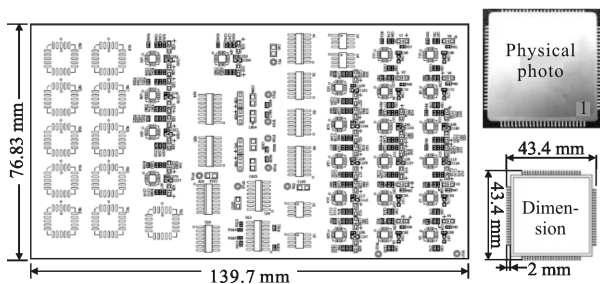


图 5 常规驱动 PCB 与厚膜集成驱动模块外形尺寸对比

Fig.5 Regular driving PCB size vs thick-film integrated driver size

### 3.2 高速串行传输总线

利用高速串行 LVDS 信号形式进行高速数据传输,涉及到模拟/数字转换后进行并行/串行转换数据的过程,在此采用专用高速串化/解串器 TLK2711 实现。在高速串行 LVDS 数据传输过程中,需要重点考虑信号传输过程中的直流漂移问题和信号同步以及内嵌时钟的恢复问题<sup>[9]</sup>。高速串化/解串传输过程为解决上述问题,需要采用一种编码方法用以完成信号同步和时钟恢复功能,同时合适的编码方法能够在传输过程中保持“0”、“1”信号数量的一致,实现信号传输电平中直流分量的消除<sup>[9]</sup>。TLK2711 采用的编码机制是 8b/10b 编码方案<sup>[10]</sup>。

为满足系统较高数据率的要求,系统采用 80 MHz 时钟作为 TLK2711 数据输入的伴随时钟,使高速 LVDS 单路数传能力达到了 1.6 Gbps。提高伴随时钟频率可增加数据带宽,单路 TLK2711 最高传输能力可达 2.5 Gbps。

高速串行总线传输对电路设计和 PCB 布线提出了很高的要求,需要依据传输线理论考虑信号完整性等方面的内容。为保证系统高速串行差分信号的传输质量,设计过程中采用必要的 PCB 前后仿真,以确保设计结果的准确无误和与加工制板的一致性。

## 4 系统实验测试

为检验高速高集成度 TDI CCD 焦平面系统是否满足设计要求,对系统的各部分单元进行了功能验证和性能测试,同时采用 TDI CCD 传函测试片进行了成像试验和传递函数评估。CCD 传函测试片是在 CCD 探测器感光区间隔不同的像元数进行掩模工艺处理,形成一部分像元感光,一部分像元被遮挡。无需光学系统和黑白条纹板即可进行成像焦平面电子学系统的传函测试,该系统所用 TDI CCD 传函测试片实物如图 6 所示。

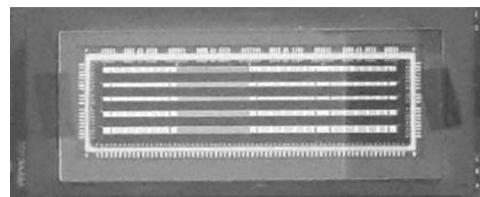


图 6 TDI CCD 传函测试片

Fig.6 TDI CCD transfer function test chip

实验测试结果表明,系统各功能单元工作正常可靠,高速图像数据传输过程中无误码,图像质量清晰,实验获取的 TDI CCD 传函测试图像如图 7 所示,局部传函条纹图像与对应图像码值及平均对比传递函数分布分别如图 8(a)、(b)所示。传递函数计算公式为:

$$MTF = \frac{\pi}{4} \cdot CTF = \frac{\pi}{4} \cdot \left| \frac{L_m - L_b}{L_m + L_b} \right| \quad (1)$$

式中:MTF 为调制传递函数;CTF 为对比度传递函数; $L_m$  为目标亮度值; $L_b$  为背景亮度值。通过计算焦平面系统 CTF 平均值达到 0.651,则 MTF 平均值为 0.511。

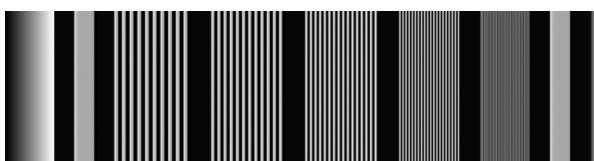


图 7 TDI CCD 传函测试图像

Fig.7 TDI CCD transfer function test image

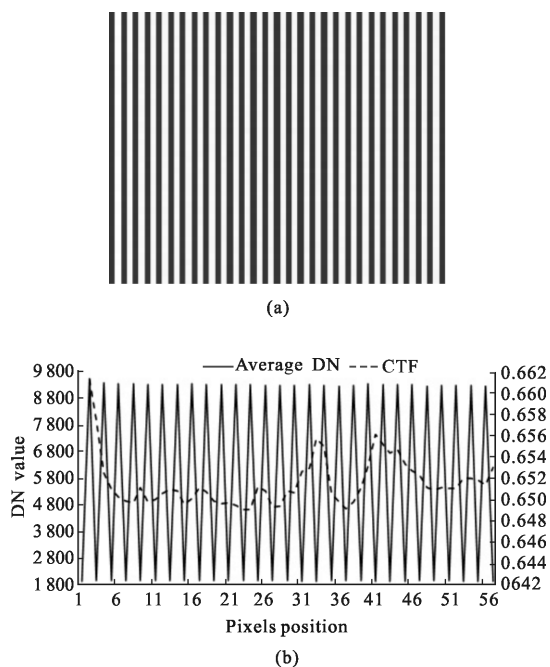


图 8 局部条纹图像与对应 DN 值及 CTF 值

Fig.8 Partial stripe image and corresponding DN & CTF value

## 5 结论

文中所设计的高集成度高速多光谱 TDI CCD

焦平面系统采用双通道专用 CCD 信号处理模拟前端,将常规采用标准分立元器件实现的 CCD 驱动单元采用厚膜技术进行了高度集成,成功应用于 TDI CCD 焦平面系统,像素读出驱动频率高达 20 MHz,TDI CCD 传函测试片单像元黑白条纹对比测试结果得到平均 MTF 达到 0.5 以上。相比原有常规方案,驱动单元占用面积减小了近 65%;大幅提高了焦平面系统的集成度,最终实现了 TDI CCD 成像焦平面系统的小型化和模块化。配合相应的光学系统,可以实现完整的高集成度高速 TDI CCD 成像系统,满足各种航空及航天遥感领域的需求。

## 参考文献:

- [1] Doody B C, Prince N D, Jenkins P T. Ultra high speed CCD image sensors for scanning applications[M]. Nowyork: Dalsa Databook, 1999.
- [2] Liu Zexun, Wang Zhi, Li Xiansheng, et al. Influence factors on SNR of TDICCD space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(7): 1829-1837. (in Chinese)
- [3] Zhang Da. Modular airborne visible and near infrared focal plane system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8): 2471-2476. (in Chinese)
- [4] Dalsa Corporation. TDI CCD datasheet [Z]. 2009.
- [5] Wang Shishen, Sui Xiubao, Chen Qian, et al. High speed HD CCD adaptive correlated double sampling technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(1): 155-159. (in Chinese)
- [6] TI Corporation. LM98640 Dual Channel, 14-Bit, 40 MSPS Analog Front End with LVDS Output datasheet [Z]. 2012.
- [7] Chen Ruiming, Wu Songbo, Wang Jiangyu, et al. Camera video electronics integration technology for high spatial resolution earth observation sensor [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2013, 34(3): 34-41. (in Chinese)
- [8] Zhang Da, Xu Shuyan. High-speed CCD image data transmission system based on fiber [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2009, 17(3): 207-213. (in Chinese)
- [9] Zhang Da, Xu Shuyan. High-speed serial transmission system for image data based on tlk2711 [J]. *Microcomputer Information*, 2009(3): 291-293. (in Chinese)
- [10] TI Corporation. TLK2711 1.6 to 2.7 Gbps transceiver datasheet [Z]. 2001.