

## 高密度模块化 TDI CCD 成像系统设计

孙振亚<sup>1,2</sup>, 刘栋斌<sup>1</sup>, 方伟<sup>1</sup>, 张达<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. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为提升遥感相机的高密度组装技术, 采用厚膜集成电路技术设计了高集成度的 TDI CCD 成像系统, 并对该成像系统中的具体设计做了详述。首先 TDI CCD 焦平面通过机械拼接方式拼凑成可复制的单元。然后, 通过三极管射极跟随器增强 CCD 输出图像信号强度传送给模拟前端芯片 LM98640 中转换成 14 bit 的数字信号, 再传给现场可编程门阵列芯片 XC5VLX50T-1FFG1136C 缓存和整合处理。最终, 通过 TLK2711 高速 LVDS 输出芯片传输给数据采集卡并在计算机上成像。该成像系统中所有的驱动信号和处理时序都是通过现场可编程门阵列产生的, 计算机可以通过 RS422 通信总线对成像系统进行控制和部分参数修改。该系统中的驱动电路和 CCD 二次电源电路采用厚膜集成电路技术设计, 提高了系统的集成度。实验结果表明: 整个系统基于厚膜技术, 驱动电路 PCB 电路板减少了 2/3 的面积, 同时采用了机电热一体化的设计, 实现了相机的高密度组装。该系统总数据输出速度达到 3.6 Gbps, 饱和输出图像信噪比 52.6 dB。

**关键词:** 电荷耦合器件; 模块化; 厚膜; 时间延迟积分; 成像系统

中图分类号: TN386.5 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0618001

## Design of high density modularity TDI CCD imaging system

Sun Zhenya<sup>1,2</sup>, Liu Dongbin<sup>1</sup>, Fang Wei<sup>1</sup>, Zhang Da<sup>1</sup>

- (1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to improve the high density assembly technology of remote sensing camera, a high density TDI CCD imaging system was designed with multichip module technology. First, TDI CCD focal plane with mechanical splicing technology was made to a copied unit. Then, the output energy of CCD output image signals was improved by a transistor emitter follower, they were transmitted to the analog front-end chips. Then they were converted into the 14 bits digital signals. After that they were integrated and processed through field programmable gate array (FPGA). In the end, through TLK2711 high-speed chip they were sent to data acquisition card on the computer. All the driving signals and processing signals of the imaging system were produced by the FPGA. The computer can control the imaging system and exchange the parameter through RS422 communication bus. The experimental results show that the

收稿日期: 2018-01-09; 修订日期: 2018-02-13

基金项目: 国家 863 计划重大项目(2011AA12A103)

作者简介: 孙振亚(1986-), 男, 助理研究员, 博士生, 主要从事空间光电探测方面的研究。Email: szy\_shine@foxmail.com

导师简介: 方伟(1965-), 女, 研究员, 博士, 主要从事太阳辐射计量方面的研究。Email: Fangw@ciomp.ac.cn

area of driving layout cut down 2/3 than convention design. It realized the camera's high density assembly adopting the design of the mechanical and electrical integration of heat. And the total data speed can reach 3.6 Gbps in this imaging system, SNR can reach 52.6 dB.

**Key words:** CCD; modularity; thick-film; TDI; imaging system

## 0 引言

电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)诞生于 20 世纪 70 年代,它是图像传感器的一种。入射光照射在 CCD 光敏单元上并激发出载有光信息的电荷,通过给予适当的驱动脉冲信号,可以将存储的电荷定向转移和传输形成载有图像信息的电信号。因其质量轻、体积小、功耗低、动态范围大、测量精度高、寿命长等诸多优点,被广泛应用在航天遥感观测、载荷对地观测等领域。

目前国内外关于 CCD 电子学成像设计有许多文献<sup>[1-6]</sup>。有电子倍增图像传感器设计、有针对 KAF50100 设计的 CCD 成像系统。文中是针对高性能 TDI CCD 探测器设计的成像系统。时间延迟积分(Time Delayed and Integration, TDI)CCD 是面阵 CCD 的一种线阵应用,它通过在遥感相机的飞行方向上,对相同景物进行多次曝光成像,从而增加其响应度。随着空间光学遥感成像技术不断发展的,空间光学遥感相机对分辨率和图像实时速度要求越来越高。鉴于 TDI CCD 可以在不降低空间分辨率和工作频率的情况下提高成像系统的响应度、动态范围,它能够不同程度地增加成像系统的信噪比、分辨率和响应均匀性使其在高速、微光领域具有广泛的应用前景,成为解决遥感轻量化的主要技术途径和关键技术措施。传统的技术方法已经到达瓶颈,难以实现更高要求的遥感相机,针对 TDI CCD 的优势,文中基于厚膜多芯片组件(Multi-Chip Module, MCM)集成电路技术对成像系统进行高集成度模块化设计<sup>[7]</sup>。

## 1 TDI CCD 成像系统设计

### 1.1 TDI CCD 简介

图 1 给出了该探测器全色的结构图。该 TDI

CCD 光谱区共 96 行像素,单行 6 144 个像素。可以通过 8 个通道同时输出,也可以只通过 4 个通道输出。单个通道理论最高速度 22 MHz,行转移速率理论最高 13 kHz(8 通道输出)。

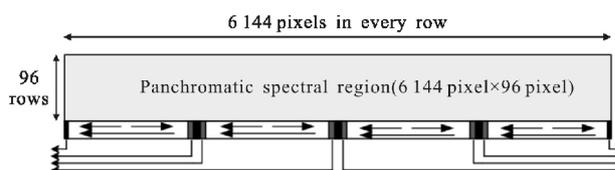


图 1 TDI CCD 结构图

Fig.1 Framework of TDI CCD

探测器通过 5 个级间选择控制信号能分别实现 8 行、16 行、32 行、48 行、64 行、96 行的 6 种 TDI 级数工作模式。TDI 工作模式是在成像系统的飞行方向上,利用面阵 CCD 的 TDI 模式,通过每行 CCD 感光像元对相同景物进行成像,在时间上景物的曝光量呈现累加的特性,从而实现具有积分特性的景物获取。通过对同一景物不同时刻的多次成像并做电荷累加,在有效利用面阵 CCD 每一行感光像元的同时,增强了景物的曝光量,提高了 CCD 像元的感光能力,扩大了 CCD 器件的动态范围。

探测器通过 5 个级间选择控制信号能分别实现 8 行、16 行、32 行、48 行、64 行、96 行的 6 种 TDI 级数工作模式。在进行 TDI CCD 工作时序设计时,需要考虑卫星速高比、行转移时间、列转移时间三者的匹配。如果失配,则会导致图像模糊、景物变形等问题<sup>[8-11]</sup>。

成像系统的噪声( $\sigma_{\text{sys}}$ )主要是由信号电子数( $S$ )、暗电流电子数( $n_{\text{dark}}$ )、读出噪声( $\sigma_{\text{read}}^2$ )组成的,它们的关系如公式(1)所示。

$$\sigma_{\text{sys}} = \sqrt{S + n_{\text{dark}} + \sigma_{\text{read}}^2} \quad (1)$$

光信号非常强时,可以忽略读出噪声和暗电流噪声。只考虑随机噪声(信号电子数)时,总噪声和信噪比为:

$$\sigma_x = \sqrt{S} \quad (2)$$

$$SNR = S / \sigma_x = \sqrt{S} \quad (3)$$

因此 TDI CCD 的理论极值信噪比为  $\sqrt{S}$ ，所以为提高成像系统的信噪比，需要尽可能的保持探测器的工作温度不升高和减少成像系统的工作噪声。

### 1.2 模块化设计

空间遥感相机是空间对地观测的重要手段之一，而大视场一直是成像系统的一个主流方向。然而，随着遥感相机视场范围的扩大已经远远超出了单片探测器的长度，因此，当单片的长度不满足需求时，可以多片拼接成一个大视场的 CCD 阵列。文中采用机械拼接方式，使焦平面上的探测器交错拼接，这样第一行探测器空间间隙可由第二行探测器填充上。图 2 给出了焦平面拼接示意图以及实际的单套焦平面图。

每行的机械电子结构都相同，交错行之间的机械电子结构由于 TDI CCD 推扫方向会略有不同，在实测中对成像系统结果无影响。以单套成像系统为例，图 3 为 TDI CCD 成像系统原理框图。

成像电子学系统主体包含 5 部分：TDI CCD 探测器组成的焦平面、AFE 模数转换电路、驱动电路、FPGA 和高速 TLK2711 并转串输出电路。如图 3 所示，CCD 的外围电路由驱动电路和偏置电压电路组成，驱动时序由 FPGA 产生。TDI CCD 工作在八通道并行输出模式下，独立的八组 CCD 模拟视频信号发送给 4 片 LM98640 芯片，该芯片是双通道、14 bit、40MSPS 的 AFE 芯片，该芯片对模拟视频信号进行相

关双采样(Correlated Double Sample, CDS)、暗电平去除、可编程增益放大以及 A/D 转换后形成串行的 LVDS 数字视频信号传送给 FPGA 进行整合处理。LM98640 需要的差分输入时钟以及 SPI 串行信号都是由 FPGA 产生的。FPGA 接收 LM98640 中的数据并排列整合后传送给 TLK2711 转换成高速串行 LVDS 信号，之后通过同轴电缆传给带有数据采集卡的 PC 机并成像。FPGA 作为成像系统的核心与 PC 机通过 RS422 总线进行命令传输和状态交互通信。

针对图 2 中的 CCD\_A1 和 CCD\_B1 设计的两套成像系统可以在物理空间上采取这种叠放结构，进而改进成大视场成像系统。

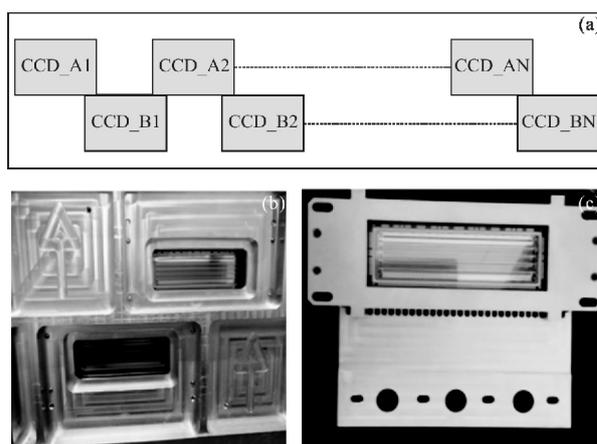


图 2 (a)TDI CCD 焦平面拼接示意图;(b)TDI CCD 焦平面拼接图;(c)TDI CCD 结构图

Fig.2 (a) Diagram of the focal plane of TDI CCD; (b) the focal plane of TDI CCD diagram; (c) TDI CCD structure figure

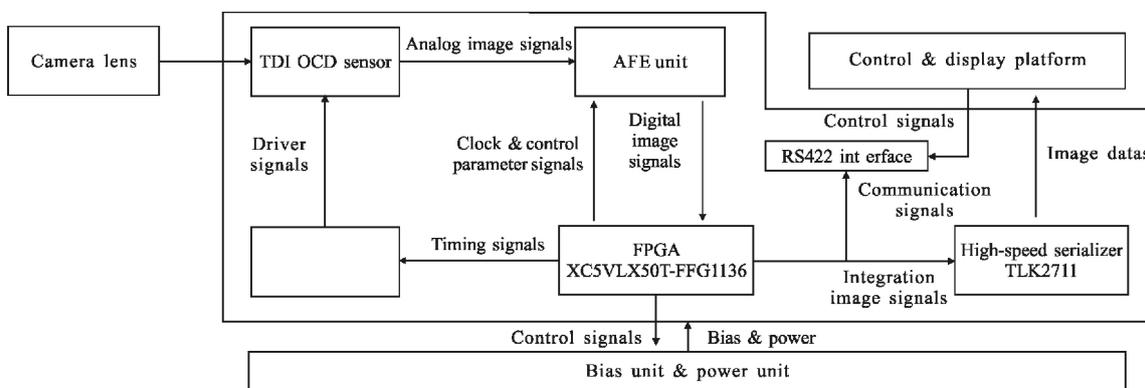


图 3 TDI CCD 成像系统原理框图

Fig.3 Block diagram of the imaging system of TDI CCD

### 1.3 高速串行输出电路设计

8 路数字信号经过 FPGA 数据处理整合后, 发送到 TLK2711 芯片, 利用 TLK2711 将并行的数字信号转换为高速串行 LVDS 信号完成高速数据传输。高速串行 LVDS 信号传输过程需要考虑直流失配的情况, 通过在信号末端串联电容可以解决该问题。TLK2711 采用的编码机制是 8b/10b 编码方案<sup>[12]</sup>, 该方案可以保持“0”、“1”信号数量的一致, 为高速信号传输的准确性提供了保障。采用 90 MHz 作为 TLK2711 输入时钟频率, 使单片 TLK2711 数据率达到了 1.8 Gbps。TLK2711 最高传输数据率可达 2.5 Gbps。

高速串行 LVDS 传输对电路设计和 PCB 布局布线都有很高的要求。TLK2711 的输入包含 1 个时钟信号、16 个数据信号以及其他几个控制信号, 这些信号在 PCB 板上做等长处理误差 $\pm 2$  mil (1 mil=0.025 4 mm)。为保证信号的完整性, 输出的信号线阻抗要求严格控制在  $50 \Omega$  ( $\pm 5 \Omega$ ), 对 PCB 进行了仿真, 从而确保产品与设计一致<sup>[13-14]</sup>。

### 1.4 AFE 电路设计

TDI CCD 在全输出通道模式下工作, 一共 8 个 CCD 抽头输出模拟的 CCD 信号。CCD 探测器电路在一个刚柔板上, 通过弯折后和视频处理板进行对插。CCD 输出的 8 个模拟信号在 CCD 输出管脚通过射随器对信号增强处理后总共经过 11 575 mil ( $\pm 2$  mil) 的  $50 \Omega$  阻抗匹配的信号线连接到模数转换处理电路。PCB 上的 8 个模拟信号线, 相邻的上下两层均为模拟地线层 (模拟地和数字地已分割), 并且 8 个模拟信号线的同层也铺了模拟地的铜皮, 从而将信号线的传输过程中的串扰噪声降到最低。同时 8 个信号线在 PCB 线路板上做等长处理误差控制在  $\pm 2$  mil, 减小信号之间的时间差。

LM98640 是双通道芯片, 所以需要 4 片 LM98640, 其每个通道内的信号依次经过相关双采样、偏置调节、可编程增益放大器 (Programmable Gain Amplifier, PGA)、模数转换 (Analog To Digital Converter, ADC) 之后转换成数字信号, 经过内部数字处理器转换成串行的 LVDS 信号输送给 FPGA 处理。因为 LM98640 的 ADC 是 Pipeline ADC, 所以相关双采样是该芯片中技术难度最高的模块, 该模块的性能限制了 LM98640 的采样频率和噪声两个关键指标。相关双采样技术相比于采样保持技术不仅仅能够消除

CCD 信号中的复位噪声, 而且能够消除放大器输入端的失调电压, 并且可以降低放大器有限增益带来的输出反馈电压的影响, 从而能够提升系统性能。偏置调节可以水平调节输出幅值的大小, 从而使得 8 个信号成像能量最接近。可编程增益放大器是根据系统中 CCD 信号的强弱来调节可以达到所要求的输出摆幅。4 片 LM98640 的数字输出端到 FPGA 之间的差分信号需要在 PCB 电路板上做等长处理, 从而保持信号的同步。

## 2 关键技术设计

### 2.1 电路设计

该 CCD 探测器的驱动信号数量较多, 且负载、电压也不一致, 由此给驱动电路的设计带来了复杂性<sup>[15]</sup>。

该探测器的驱动信号主要有两种: 一种是低速 (10 kHz) 信号, 这些都是 TDI CCD 的电荷垂直转移所必须的。而另一种高速信号, 都是 TDI CCD 最终的电荷读出所需要的驱动信号。由于驱动信号种类繁多, 电压幅值也不一致, 所以驱动芯片主要选用的是 EL7457, 而其中 8 个偏置电压则由电阻分压后通过 LM324M 运算放大器单位增益负反馈的连接方式供给, 不但节约了空间和功耗, 而且保证了偏置电压信号的稳定性和精确度。图 4(a) 是驱动电路所需要的 8 个偏置电压电路。

该 CCD 驱动信号都是经过 EL7457 后再驱动探测器的, EL7457 是一款高速度、同相位、四通道的 CMOS 驱动器。该驱动器最高可以驱动 40 MHz 的信号, 并且输出负载电流值可以达到 2 A。图 4(b) 是 TCK 信号原理图, 由于该类信号的频率较低, 且上升沿和下降沿要求 50 ns, 所以单个输出即可满足。TCK 幅值范围是  $-8 \sim +5$  V, 所以给 EL7457 电源 13 V 的供电电压。因 TCK 通常为低电平, 所以选择  $-8$  V 的偏置电压。EL7457 输出 13 V 的信号, 先通过电容进行隔离, 再通过偏置电压钳位到所需要电平。CIx 的驱动电路也采用和 TCK 类似的设计。CR1xy 等高速信号由于速度快, 所以采用 EL7457 的 4 路输出并联的方式从而提高驱动能力。

以上所有的驱动电路均基于厚膜模块技术集成到模块中, 厚膜电路是直接将芯片的管芯焊接到基板上, 可以使得芯片之间的间距最短, 有效减少传输衰减。

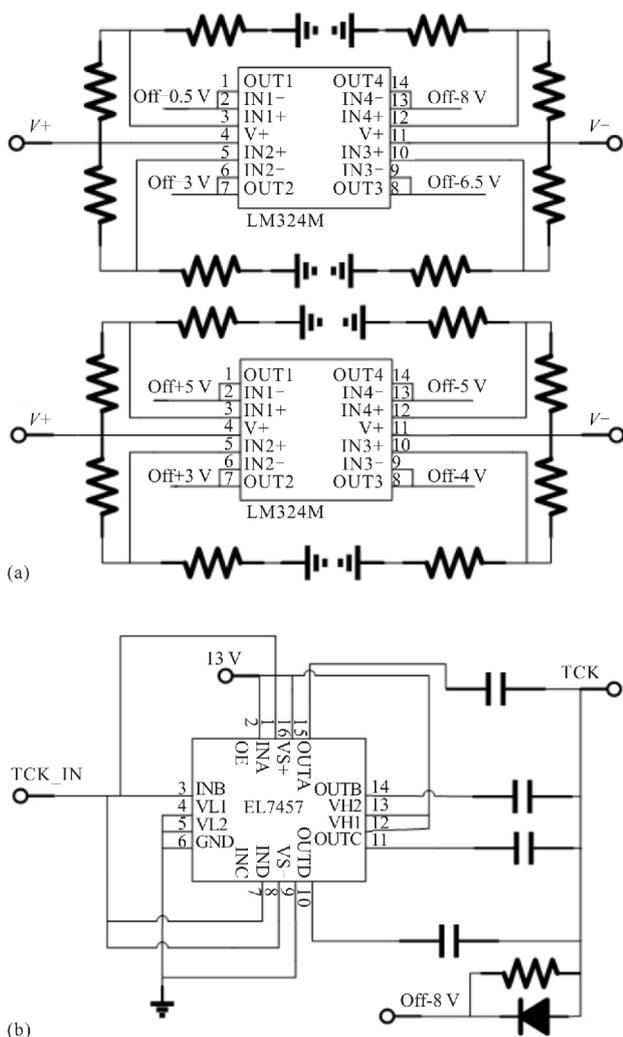


图 4 (a) OFFSET 偏置电压原理图;(b)TCK 信号原理图

Fig.4 (a) Theory diagram of OFFSET voltage; (b) Theory diagram of TCK signal

## 2.2 热设计

采用 MCM 厚膜集成后,器件密度增加,热源集中,模块电路温升会引起噪声增加,工作不稳定,参数漂移,甚至不能正常工作,散热是需要解决的核心问题。因此,热设计需要重点考虑。热设计将有助于增强性能以及可靠性,绝大多数的 IC 器件的最高工作频率受到最高结温的限制。器件必须被维持在最低的结温上,从而降低由于热循环而产生的应力聚集。在器件热设计中必须选择合理的热设计方案增强器件的热性能和可靠性。该模块的功耗和驱动频率成正比,当驱动频率达到 10 MHz 时,功耗为 6 W;驱动频率为 22 MHz 时,功耗为 11 W。为避免热源集中、降低热阻,采取以下热设计措施:(1) 电路主要热

源为 EL7457,将其在基板上均匀放置,减少热源的集中;(2) 在管壳设计上,腔体向下,散热面向上的设计方案进行有效散热。管壳底板材料采用热传导率较高的 CuW;(3) 低温共烧陶瓷 (Low Temperature Co-fired Ceramic, LTCC)基板再流焊到管壳上,降低基板到管壳的热阻;(4) 由于 LTCC 基板的热导率较低,所以在功耗较大的芯片下面做热通孔,用金填充,可以通过热通孔将芯片的热量有效地传导至管壳;(5) 电路外部装配时增加散热器保证应用的可靠性。仿真条件如下:将电路倒置安装在 80 mm×80 mm PCB 印制板上;在电路底面安装散热器,散热器规格为:底板尺寸为 37.6 mm×37.6 mm,底板厚度为 3 mm,肋片高度为 20 mm,肋片厚度为 2 mm,肋片数量为 7,散热器材料为铝。在室温 25℃下,电路正常工作状态下的热分布如图 5 所示。

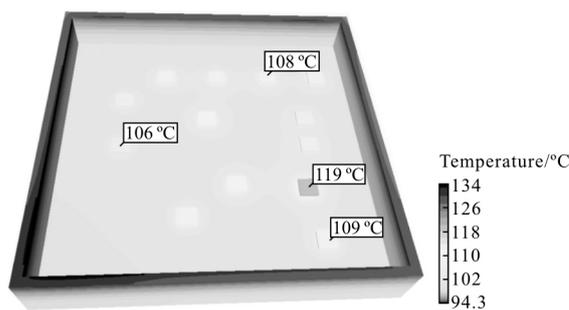


图 5 厚膜模块温度图

Fig.5 MCM module temperature diagram

仿真结论:通过对 CCD 驱动模块进行的热仿真分析,内部元器件中存在热通孔的芯片温升最高的为 119℃,内热阻为 9.1℃/W;温度远低于芯片结温 150℃。在室温下可以正常使用。

图 6(a)是厚膜模块实拍布局图,整体面积 41.4mm×41.4 mm,厚度 6 mm。图 6(b)是厚膜模块的实际应用图。

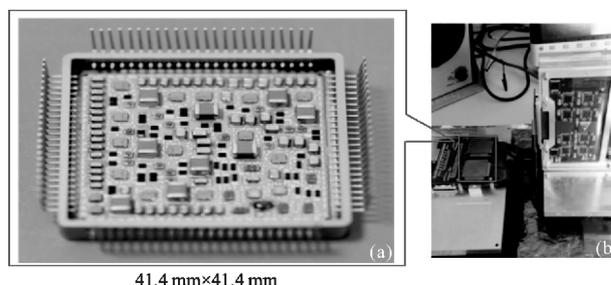


图 6 厚膜模块图。(a)厚膜模块布局图,(b)厚膜模块应用图

Fig.6 MCM module diagram. (a) MCM module distribution diagram, (b) MCM module application diagram

图 7 是使用离散器件和厚膜集成后的 PCB 电路板的尺寸比较,图中的单位均为毫米。图 7(a)中离散驱动电路板是 190 mm×94 mm,面积为 17 860 mm<sup>2</sup>;图 7(b)是厚膜驱动电路板,其尺寸是 103.42 mm×50.1 mm,面积为 5 181.3 mm<sup>2</sup>。从实际情况看,驱动电路板面积减少了约 2/3,节约了空间,易于模块化。

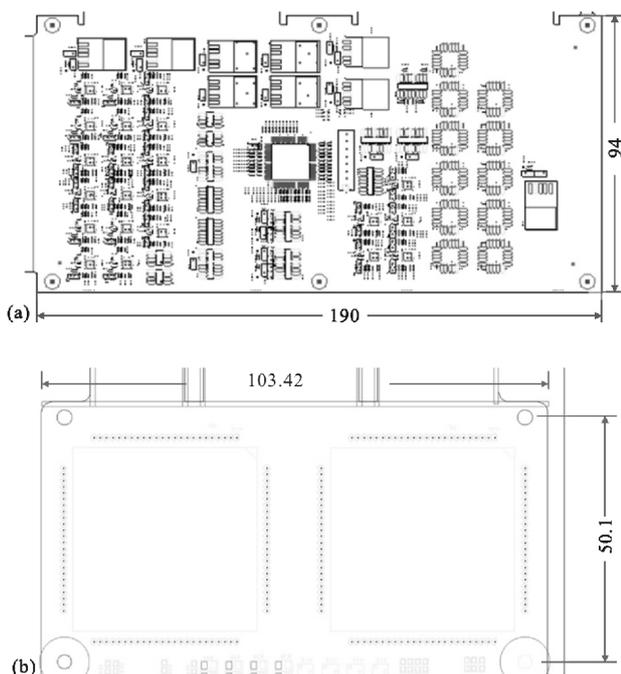


图 7 (a)离散驱动器件面积图;(b)厚膜电路板面积图

Fig.7 (a) Dispersed driving device area diagram; (b) MCM PCB area diagram

### 3 实验结果及分析

为验证采用 MCM 技术设计的高集成度 TDI CCD 成像系统是否可以满足实际应用,对成像系统进行了成像试验和信噪比测试,同时用该系统对 TDI CCD 进行了光谱辐射测试。该 TDI CCD 成像系统实物图如图 8 所示。

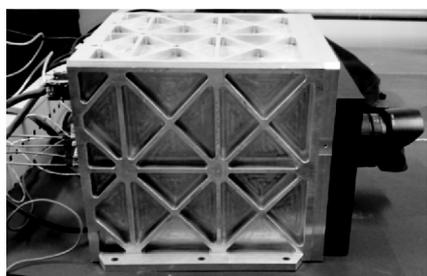


图 8 TDI CCD 成像系统

Fig.8 TDI CCD imaging system

实验结果表明,该成像系统工作正常,图像数据清晰无误。实验测试了部分驱动信号和 CCD 输出信号,如图 9 所示,图 9(a)是 TCK、CI1、CI2、CI3、CI4 信号通过示波器的测试结果,CI2、CI3、CI4 的低电平有效时间为 2.5 μs,它们的实测上升时间和下降时间都在 50 ns (按照信号边沿时间均在 10%以内计算,50 ns<2.5 μs\*10%=250 ns)以内,为探测器的正常输出提供了基础。图 9(b)中是 LM98640 输入端的 CCD 信号以及相关双采样中的钳位信号和采样信号。CCD 的信号周期 50 ns,复位时间占有 15 ns,信号有效时间 15 ns,暗电平参考时间 20 ns。钳位信号和采样信号均为 10 ns 有效高电平。实际信号测量结果良好,为成像系统的高信噪比提供了保障。

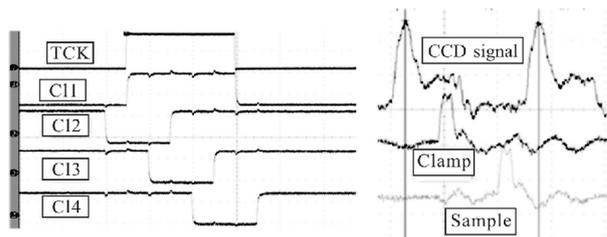
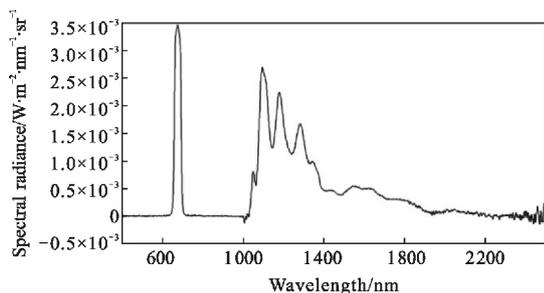


图 9 (a)驱动信号;(b)CCD 输出信号 & 采样信号

Fig.9 (a) Driving signals; (b) Detector's output signal & sampling signal

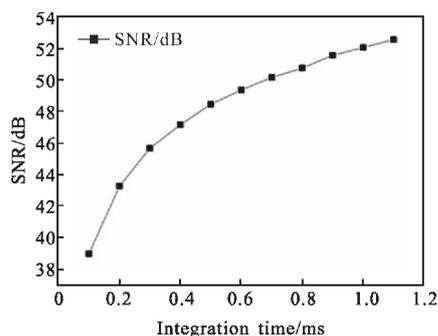
图 10(a)是在对探测器不同波长的光谱响应强度测量,对 350~2 400 nm 光谱范围的相应辐射响应度测量结果。该探测器在 670 nm 光谱下有最好的响应情况,与探测器手册相一致。此时光谱辐射亮度 3.4 mW/m<sup>2</sup>·nm<sup>-1</sup>·sr<sup>-1</sup>。该探测器适用于可见光范围,最适宜光谱段为 670 nm 波长。

成像系统的信噪比是最能反应成像系统成像质量优劣的技术指标。针对采用 MCM 技术的成像系统,测试其信噪比是否能够满足应用要求是非常关键的。图 10(b)是成像系统 SNR 的测试结果,该测试通过积分球固定光源亮度,调节系统积分时间,使得系统可以接近饱和输出。该系统在最大积分时间处,探测器接近饱和,此时信噪比可以达到 52.6 dB,该探测器的全色饱和电子数 400 K,由公式(3)可知理论最大信噪比为 56.02 dB。由此可见:通过厚膜设计增加系统集成度的同时并未对系统信噪比造成较差的影响。



(a) 辐射响应

(a) Radiation response



(b) 信噪比

(b) Signal-to-noise

图 10 成像系统测试结果

Fig.10 Testing result of imaging system

## 4 结论

文中针对遥感相机中的 TDI CCD 探测器设计了成像系统，并且针对该探测器的参数设计了合适的驱动电路、视频处理电路。采用了近 CCD 驱动电路布局，并且将驱动电路采用 MCM 技术集成到模块中，实际测量到良好的驱动电路波形，为 CCD 输出提供的保障。对成像系统中的探测器进行光谱响应测试，在 670 nm 光谱下有最大光谱响应值  $3.4 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。成像系统总数据输出速度 3.6 Gbps，探测器在接近饱和情况下的信噪比达到 52.6 dB。相比与常规离散器件的设计，厚膜集成后的面积减少了 2/3，提升了成像系统的高密度集成化，厚膜电路的使用使得整个电路系统易于机电热一体化模块化设计该成像系统实行机电热一体化设计，使得整个系统小型化、模块化以及可复制性，可以广泛应用于航天卫星遥感探测。

### 参考文献：

[1] Yang Shaohua, Guo Ming'an, Li Binkang, et al. Design of

digital EMCCD camera with mega pixels [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(12): 2970–2976. (in Chinese)  
 杨少华, 郭明安, 李斌康, 等. 百万像素电子倍增 CCD 数字化相机的设计[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(12): 2970–2976.  
 [2] Ocaya R O. Versatile CCD-based spectrometer with field programmable gate array controller core [J]. *IET Science Measurement & Technology*, 2016, 10(7): 719–727.  
 [3] Williamson J M, Bowling R J, McCreery R L. Near-infrared Raman spectroscopy with a 783 nm diode laser and CCD array detector [J]. *Applied Spectroscopy*, 1989, 43(3): 372–375.  
 [4] Zhang Lifeng, Xie Kai, Li Tong. Based in line scan CCD print image detection system [C]//SPIE Ninth International Symposium on Multispectral, 2015, 9813: 98130Q.  
 [5] Shu Zhenghua, Liu Guodong, Xie Zhihua, et al. Segmentation algorithm of color block target captured by CCD camera based on region growing [C]//International Conference on Information Science and Control Engineering, 2016: 597–600.  
 [6] Pollehn H K. Performance and reliability of third-generation image intensifiers [J]. *Advances in Electronics and Electron Physics*, 1986, 64: 61–69.  
 [7] Liu Zexun, Wan 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)  
 刘则洵, 万志, 李宪圣, 等. 时间延迟积分 CCD 空间相机信噪比的影响因素 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(7): 1829–1837.  
 [8] Chen Mingjie, Gu Guohua, Chen Qian, et al. A multi-channel CCD data processing and transmission system based on FPGA [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(3): 161–165. (in Chinese)  
 陈明杰, 顾国华, 陈钱, 等. 基于 FPGA 的多通道面阵 CCD 拼接成像系统 [J]. *红外技术*, 2013, 35(3): 161–165.  
 [9] Zhang Da, Li Wei. Highly integrated multi-spectral TDI CCD focal plane system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(10): 1018006. (in Chinese)  
 张达, 李巍. 高集成度多光谱 TDI CCD 焦平面系统[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(10): 1018006.  
 [10] Zheng Liangliang, Jin Guang, Qu Hongsong, et al. Spaceborne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 2027–2036. (in Chinese)  
 郑亮亮, 金光, 曲宏松, 等. 高信噪比星载 CCD 成像电路

- 系统[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(8): 2027-2036.
- [11] Chen Jianwu, Cao Kaiqin, Sun Dexin, et al. Driving techniques for high-frame-rate-frame transfer CCDs with low smear [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(1): 0123001. (in Chinese)  
陈剑武, 曹开钦, 孙德新, 等. 高帧频低拖尾帧转移 CCD 驱动技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0123001.
- [12] TI Corporation. TLK2711 1.6 to 2.7 Gbps transceiver datasheet [Z]. 2001.
- [13] Li Hongfa, Xue Xucheng, Guo Yongfei. Optimization design of image conformity for double-tap CCD[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(1): 42-47. (in Chinese)  
李洪法, 薛旭成, 郭永飞. 双抽头 CCD 图像整合优化设计 [J]. 中国光学, 2012, 5(1): 42-47.
- [14] Xue Xucheng, Li Hongfa, Guo Yongfei. Anti-crosstalk techniques for high-speed CCD imaging circuit [J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(6): 611-616. (in Chinese)  
薛旭成, 李洪法, 郭永飞. 高速 CCD 成像电路抗串扰技术 [J]. 中国光学, 2011, 4(6): 611-616.
- [15] Hong Feng, Han Ronggui, Hu Xiao, et al. Efficient hardware architecture for miniature SAR on-board imaging processing system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2014, 36(4): 672-678. (in Chinese)  
洪峰, 韩荣桂, 胡晓, 等. 一种高效的微型 SAR 实时成像系统架构设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(4): 672-678.