

高速多光谱 TDI CCD 成像电路系统

郑亮亮*, 张贵祥, 金光

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所)

小卫星技术国家地方联合工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:为实现多光谱 TDI CCD 的高速高信噪比成像,利用可空间应用的多光谱 TDI CCD 传感器研制出了高性能成像电路系统。该系统以现场可编程门阵列(FPGA)为核心逻辑单元,带有 RS422 外围通信控制接口,并采用 CAMERALINK 接口输出图像数据。系统具有动态推扫成像的能力,可同时输出全色和彩色两种模式的图像数据。利用灰度条纹的靶标对传感器的 3 个多光谱(R, G, B)感光区标定白平衡,利用彩色条纹的靶标对系统进行成像测试,在驱动频率为 15 MHz 的情况下,系统单片 CCD 输出的图像数据率达到 1.2 Gbps。试验结果表明,获取全色图像的信噪比达到了 53.56 dB,各多光谱图像的信噪比较高的也在 40 dB 以上,满足空间对地高分辨多光谱遥感成像的技术指标要求,对高速空间多光谱遥感相机的研制具有借鉴意义。

关键词:多光谱,高速成像;TDI CCD,成像电路,信噪比

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130606.0939

High-speed imaging circuit system for multispectral TDI CCD

ZHENG Liang-liang*, ZHANG Gui-xiang, JIN Guang

(National & Local United Engineering Research Center of Small Satellite Technology,

Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: adqe@163.com

Abstract: To complete high speed and high Signal-to-Noise Ratio(SNR) imaging of a multispectral TDI CCD, a high-performance imaging circuit system is designed on a multispectral TDI CCD sensor which can be applied to space. The system is composed of a Field Programming Gate Array(FPGA) to be a kernel logic part, a RS422 communication interface, and an output interface of CAMERALINK, which is capable of outputting the photos under a dynamic scan in two output modes of monochrome and colored image data. A target with grey stripes is used to calibrate the white balance on three multispectral regions(R, G, B) and the imaging test for this system is carried out using colored stripe target. The output image data rate reaches 1.2 Gbps under a

收稿日期:2013-08-17;修订日期:2013-11-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(No. 2012AA121502)

driving frequency of 15 MHz. The SNRs of monochrome and colored images are up to 53.56 dB. The system meets the specification of space observation with high resolution on multispectral sensors and provides a support for the design of high-speed multispectral cameras in space.

Key words: multispectra; high-speed imaging; TDI CCD; imaging circuit; Signal-to-noise Ratio (SNR)

1 引言

多光谱探测技术是新一代光电探测技术,其兴起于20世纪80年代,90年代后形成了研发热潮,至今仍在迅速发展之中。多光谱时间延迟积分光电耦合器件(Time Delangand Interation Charge Couple Device, TDI CCD)相机是在拍照曝光过程中同时用几个谱段对同一景物进行推扫成像的相机,因此其既能获取目标的图像信息,又能获取目标的光谱信息。目前已广泛应用于资源考察、农业、森林、水文和地质勘查、环境监测、灾害调查以及测绘制图等方面。多光谱 CCD 相机还可以提高地物目标的精细观测水平和解译分析能力,获得比常规方法更丰富的图像信息,从而增强了人们对目标的认知能力^[1-8]。

为了获得更多的图像信息,往往要求空间遥感相机具有较高的分辨率指标;而实现高分辨率的技术指标,成像电路系统就要求 TDI CCD 在高速的驱动频率下工作;但较高的驱动频率会使电子学系统的工作噪声加大,降低系统所拍图像的信噪比,严重时噪声甚至会淹没图像信号。因此,如何在较高工作频率下获得高信噪比的图像是高分辨率空间相机所面临的一个关键技术难点。

为解决上述问题,本文分析了影响高速成像系统图像信噪比的电路噪声,并提出了相应的解决措施,包括:合理设计系统电子学的拓扑结构,缩短高速信号回流路径,提高高速信号的信号完整性,有效的电源隔离与滤波等。最后,系统利用具有红、绿、蓝和全色4个成像谱段的多光谱 TDI CCD 传感器,研制了具有较高信噪比指标的高速多光谱成像电路系统。

2 多光谱 TDI CCD 传感器技术

多光谱 TDI CCD 传感器技术不同于传统的单一宽波段全色传感器技术,其包含了多个光谱谱段的感光单元,结合了成像技术与光谱测量技术,获取的信息不仅包括二维空间信息,还包含随波长分布的光谱辐射信息。多光谱 TDI CCD 传感器充分利用地物在不同光谱区的反射特征来获得多个光谱谱段的遥感图像。丰富的目标光谱信息结合空间影像极大地提高了目标探测的准确性,扩展了传统探测器技术的功能^[9-10]。

可用于空间环境的某型号多光谱 TDI CCD 传感器由1个全色感光区和3个多光谱(R、G、B)感光区组成,因此其具备全色图像和彩色图像的输出功能,其组成如图1所示。全色感光区有8个图像输出端口,多光谱感光区每个谱段对应一个图像输出端口。

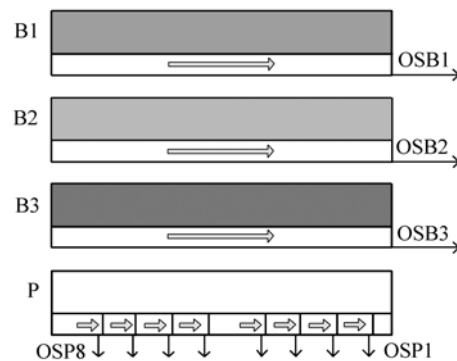


图1 多光谱 CCD 传感器组成框图

Fig.1 Block diagram of multispectral CCD

该传感器由于具有多个感光谱段,每个多光谱谱段的感光范围如表1所示,同时每个谱段都有相应的驱动时序信号,以实现对该区域感光像

元的转移与读出,因此满足 TDI CCD 工作要求的驱动时序信号种类较多,相互时序关系要求也较复杂。TDI CCD 各谱段要求的驱动时序如图 2 所示,共有 46 路驱动信号,其中高频、低频信号各 23 路。

表 1 某型号多光谱 TDI CCD 各谱段感光范围

Tab.1 Sensitization range of multispectral CCD (nm)

谱段	光谱	光谱带宽
B1	450 ~ 520	70
B2	520 ~ 600	80
B3	630 ~ 690	60
P	450 ~ 800	350

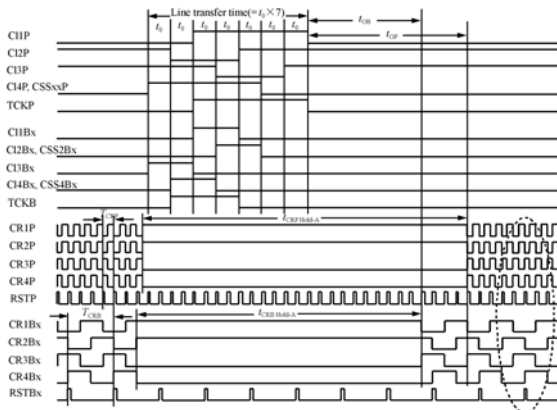


图 2 多光谱 TDI CCD 传感器工作时序图

Fig.2 Driving schedule of multispectral CCD

3 高速成像电路系统设计

3.1 高速成像系统电路噪声分析

CCD 成像电路中直接影响图像信噪比的主要信号包括:CCD 驱动信号、各种偏置电源和模拟视频信号。这 3 种信号由于各有特点,所以对成像的影响效果会不同。

CCD 驱动信号具有频率高、压摆大等特点,因此容易对弱信号造成干扰,同时由于驱动信号较多,其信号间的串扰也不可忽视,而对于单路的驱动信号,当工作频率较高时,其 PCB 走线会表现出传输线效应,不合理的端接会产生信号反射

的问题^[11]。

偏置电源主要是指为 CCD 正常工作所需提供的电源,因此如果偏置电源上存在较大噪声,则将直接影响 CCD 的工作性能。

CCD 输出的模拟视频信号为幅值在 2 V 以内的高频信号,该信号较容易受驱动信号等强信号的串扰影响,同时由于其工作频率高,还需要注意反射噪声的干扰。

视频处理电路是成像电路中的关键环节,需要特别注意。该电路的主要功能是将模拟视频信号进行数字量化处理,属于模拟与数字结合的混合电路,因此该电路工作的稳定性直接影响着系统输出图像的信噪比。如对于某型号具有 12 位量化精度的视频处理器,其输出端的均方根量化噪声最小为 0.85 LSB,最大的信噪比可达 73.66 dB,而如果由于某些设计原因造成该电路工作不稳定,量化噪声为 100 LSB,则此时的信噪比将降低到 32 dB。

3.2 高速成像电路系统设计方案

针对上述对高速成像电路的噪声分析,为使系统获得高信噪比的性能指标,提出如下解决方案,如表 2 所示。

表 2 高速成像系统电路设计方案

Tab.2 Design scheme of high-speed imaging system

序号	设计方案	用途
1	高速信号进行包地屏蔽处理	抑制串扰噪声
2	采用合理的端接方案, PCB 走线阻抗控制	减小反射噪声
3	各种偏置电源进行隔离和滤波	抑制电源间的串扰,降低供电电源的噪声
4	提供完整地平面	利于高速信号回流
5	缩短高速信号的回流路径	提高信号完整性

对于视频处理电路的设计,首先应提供稳定的供电电源与基准的地平面,以防止由于基准变化引起图像上的波动噪声;其次对于同时存在多路视频处理电路的情况,应注意将各路参考基准电压相连,保持同一量化基准,同时还要对多路间的视频处理电路进行隔离处理,以防止相互间的串扰影响。

3.3 高速成像电路系统详细设计

成像电路系统包括二次电源、三次偏置电源、通信控制接口、视频处理单元、图像数据发送、CCD 驱动时序和视频信号预处理等功能模块,如图 3 所示。

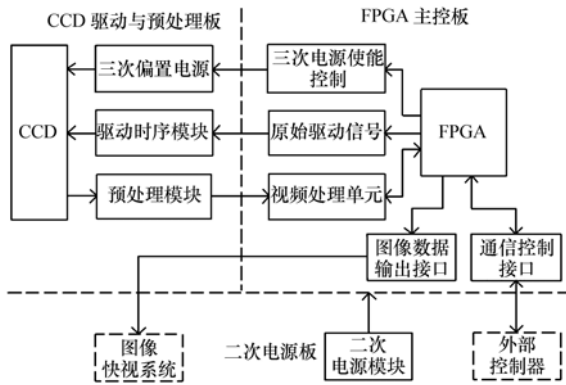


图 3 TDI CCD 成像电路系统组成

Fig. 3 Composition of CCD imaging circuit system

由图 3 可知,成像电路系统由 3 种电路板组成,即 CCD 驱动预放板、现场可编程门阵列(FPGA)主控板和二次电源板,3 种电路板采用叠层结构方式安装,每两块电路板之间均采用板间连接器传输信号。

系统的最底层电路板为系统二次电源板,其主要功能是将输入的一次直流稳压电源转化为系统工作所需要的各种二次电源,具体电源种类包括: +18、+12、+5 和 -5 V 等。因此该电路板主要由多种 DC/DC 模块组成。

中间层的电路板为系统的核心控制单元,由大规模逻辑阵列器件 FPGA 实现对成像系统的数据处理与逻辑控制。其主要功能包括:与外部控制器的数据通信,包括接收各种控制指令、成像配置参数,并将当前的工作状态数据返回;输出多路精确控制的高频 TDI CCD 驱动时序,从而使 CCD 的各感光像元进行有序的行间转移和电荷读出;对 CCD 各种偏置电源模块进行分步使能控制,按顺序输出满足 CCD 要求的各种偏置电源;接收 CCD 输出的模拟视频信号,利用高速高集成度的视频处理器进行数字量化处理,并将量化后的图像数据进行缓存;将整合后的图像数据,按照规定的图像传输格式通过低电压差分信号(LVDS)接

口输出至图像快视系统,从而显示所拍图像。

最顶层板为 TDI CCD 的驱动与预处理电路板,由于系统的驱动频率较高,因此采用了刚柔板形式设计。该部分主要由多片驱动器组成,其主要功能是将输入的原始驱动信号进行功率放大,输出满足 CCD 工作要求的各种驱动时序信号和偏置电源,同时利用运算放大器将 CCD 输出的模拟视频信号进行射随处理,以减小 CCD 输出视频信号的输出阻抗,利于后续模拟视频信号的进一步数字量化处理。

系统的 TDI CCD 工作行频为 25 kHz,其对应的像素读出频率高达 15 MHz,若模拟视频信号的灰度量位数为 10 bits,则单片 CCD 输出图像的数据率最高时达到了 1.2 Gb/s。

成像系统的图像输出接口采用一种基于物理层 LVDS 的传输技术的 Cameralink 接口。为了保证全色和多光谱图像的有效输出,系统设计了两对 Cameralink 接口,其中一对接口用于全色图像数据的输出,其具有 Medium((4 × 10) bit)输出模式和 Full((8 × 8) bit)输出模式,另外一对接口用于彩色图像数据的输出,具有 Base((3 × 8) bit RGB)输出模式,Medium((3 × 10) bit RGB)和 Medium((3 × 12) bit RGB)输出模式。

4 实验结果与分析

多光谱 CCD 成像系统在进行成像测试之前,首先需要对系统的各个多光谱谱段进行颜色校正,以获得目标的真实色彩。本系统采用算法简单、易实现的白平衡法^[12]进行 3 个谱段的响应校正,即利用灰度靶标对传感器的 3 个多光谱谱段进行白平衡标定,理论上系统所拍摄图像的 R、G、B 3 个通道的统计平均值应该相等,因此需要调整 3 个多光谱图像输出抽头的偏置和增益,使各光谱对灰度目标的响应趋于一致,从而将 3 个谱段的图像数据融合后,获得较真实的彩色图像。

在暗室内利用彩色靶标对系统进行成像测试,通过微调镜头焦距后,靶标可以清晰地投射到传感器的感光面上,系统将同时输出采集到的灰

度图像和彩色图像,如图4所示。

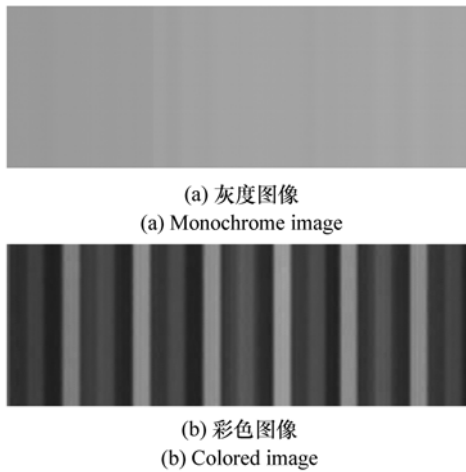


图4 系统实时采集的图像
Fig.4 Acquired images in real time

利用局部标准差法^[13]分析上述所采集图像的信噪比,将图像分割成多个具有一定大小的均匀区域,分别计算各区域内的局部标准差作为局部噪声大小,并选择众数最多的那个区间的局部标准差作为整个图像的平均噪声值。具体计算公式如下:

$$\text{SNR} = 20 \lg \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i)^2}}, \quad (1)$$

式中: p_i 是图像子块中第*i*个像素的灰度值, n 是图像子块中所有像素的总数。

利用式(1)分析灰度图像的信噪比,在8 bits灰度深度的条件下,图像的平均灰度值为160,其信噪比达到了53.56 dB。

彩色图像包含了3个感光谱段的信息,而不同谱段在不同的目标、光照等条件下,其响应会不同,因此3个谱段的信噪比也不尽相同^[14]。3个多光谱谱段合成的彩色图像如图4(b)所示。分别提取图中的各谱段灰度图像,对应的图像如图5所示。

利用式(1)分别计算图5中3个光谱谱段在不同灰度响应条件下的信噪比,信噪比结果如表3所示。

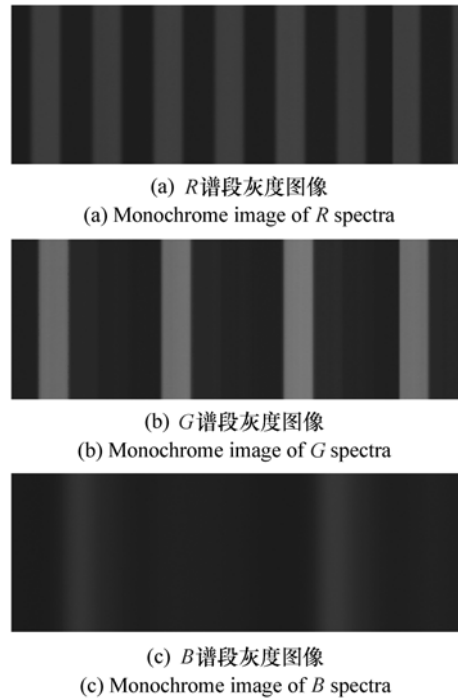


图5 RGB 3谱段对应的灰度图像
Fig.5 Monochrome images of RGB spectra

表3 3谱段信噪比计算结果
Tab.3 SNR results of RGB spectra (dB)

光谱谱段	较亮灰度	较暗灰度
R(红色)	35.95	24.76
G(绿色)	40.71	27.3
B(蓝色)	33.98	22.74

从图5和表3中可以看出,由于蓝色谱段的响应相对较弱,因此其信噪比偏低。但从表2计算结果可知,各多光谱谱段的信噪比均大于20 dB,满足航天相机的信噪比使用要求。

5 结 论

由于多光谱 CCD 传感器具有诸多优点,本文利用可空间应用的某型号多光谱 TDI CCD 传感器研制出了具有灰度图像和彩色图像两种输出模式的高速成像电路系统。该系统采用合理的电子学设计,通过白平衡标定、靶标成像测试等试验证明:在15 MHz的高速驱动频率下,捕获全色图像的信噪比达到了53.56 dB,各多光谱图像中较高

谱段的信噪比在 40 dB 以上。因此,系统实现了 速高分辨率多光谱遥感相机的研制具有一定的借鉴意义。
预计的成像功能,满足实际的使用需求,对空间高

参考文献:

- [1] 李爱玲,张伯珩,张健,等.多光谱 CCD 相机图像采集系统的设计[J].微计算机信息,2011,27(15):15-16,62.
LI A L,ZHANG B H,ZHANG J,*et al.*. Design of digital image acquisition system for multispectral CCD cameras[J]. *Microcomputer Information*,2011,27(15):15-16,62. (in Chinese)
- [2] MATHEWS S A. Design and fabrication of a low-cost, multispectral imaging system[J]. *Appl. Opt.*,2008,47(28):F71-F76.
- [3] 张艳超,孙强,赵建.对数功率谱离焦深度法在多光谱成像仪的应用[J].光学精密工程,2013,21(3):767-773.
ZHANG Y CH,SUN Q,ZHAO J. Application of depth from defocusing based on logarithmic power spectrum to multispectral imager[J]. *Opt. Precision Eng.*,2013,21(3):767-773. (in Chinese)
- [4] 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.
HU J,WANG D. Detection and generation of multispectral TDI CCD signals for space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,17(8):1810-1818. (in Chinese)
- [5] 王莹,王忠民,王义峰,等.面向色彩再现的多光谱图像非线性降维方法[J].光学精密工程,2011,19(5):1171-1178.
WANG Y,WANG ZH M,WANG Y F,*et al.*. Nonlinear dimensionality reduction of multispectral images for color reproduction[J]. *Opt. Precision Eng.*,2011,19(5):1171-1178. (in Chinese)
- [6] 全先荣,李宪圣,任建伟,等.基于辐射亮度反演的 TDI CCD 相机的响应非均匀性校正[J].液晶与显示,2011,26(3):379-383.
QUAN X R,LI X SH,REN J W,*et al.*. Nonuniformity correction of TDI CCD camera based on radiation luminance revises [J]. *Liquid Crystals and Displays*,2011,26(3):379-383. (in Chinese)
- [7] 尹传历,李嘉全.基于位平面的嵌入式超光谱图像压缩系统[J].液晶与显示,2012(2):245-249.
YIN CH L,LI J Q. Embedded hyper-spectral image compression system based on bit-plane[J]. *Liquid Crystals and Displays*,2012(2):245-249. (in Chinese)
- [8] 许洪,王向军.多光谱、超光谱成像技术在军事上的应用[J].红外与激光工程,2007,36(1):13-17.
XU H,WANG X J. Applications of multispectral/hyperspectral imaging technologies in military[J]. *Infrared and Laser Eng.*,2007,36(1):13-17. (in Chinese)
- [9] 陈大可.多光谱与全色图像融合方法的研究[D].长春:吉林大学,2010.
CHEN D K. Fusion algorithms of multispectral and panchromatic images[D]. Changchun:Jilin University,2010. (in Chinese)
- [10] 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):613-616.
XUE X CH,LI H F,GUO Y F. Anti-crosstalk techniques for high-speed CCD imaging circuit[J]. *Chinese Optics*,2011,4(6):613-616. (in Chinese)
- [11] 游晶,刘晓,易维宁,等.一种处理多光谱彩色合成图像的白平衡法[J].大气与环境光学学报,2012,7(4):282-290.
YOU J,LIU X,YI W N,*et al.*. A white balance method for multispectral color synthesis image[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*,2012,7(4):282-290. (in Chinese)
- [12] 蒋青松,王建宇.实用型模块化成像光谱仪多光谱图像的信噪比估算及压缩方法研究[J].光学学报,2003,23(11):1335-1340.
JIANG Q S,WANG J Y. Study on signal-to-noise ratio estimation and compression method of operational modular imaging spectrometer multispectral images[J]. *Acta Optica Sinica*,2003,23(11):1335-1340. (in Chinese)

- [13] 付强,相里斌,景娟娟. 基于多光谱遥感成像链模型的系统信噪比分析[J]. 光学学报,2012,32(2):0211001.
FU Q, XIANG L B, JING J J. System signal-to-noise ratio analysis based on imaging chain model in multispectral remote sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(2):0211001. (in Chinese)

作者简介:



郑亮亮(1982—),男,黑龙江哈尔滨人,硕士,助理研究员,2005年、2007年于南京航空航天大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光学遥感成像技术方面的研究。E-mail: adqe@163.com



金光(1958—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1982年于长春光学精密机械学院获得学士学位,1991年、2001年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所分别获硕士、博士学位,主要从事光学仪器总体、机载与星载光学仪器方面的研究。E-mail: jing@ciomp.ac.cn



张贵祥(1982—),男,四川成都人,博士,副研究员,2004年于中国矿业大学获得学士学位,2009年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学遥感信号处理与传输技术的研究。E-mail: zhang_gui_xiang@126.com