

文章编号 1004-924X(2016)08-2027-10

高信噪比星载 CCD 成像电路系统

郑亮亮^{1,2,*}, 金光¹, 曲宏松¹, 吴勇¹

(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:为获得高信噪比的航天遥感图像,针对 CCD 成像系统链路分析了影响图像信噪比的主要因素。结合 CCD 成像系统的响应模型,明确了系统信噪比的表达式,并摆脱了具体 CCD 型号的束缚,提出了一种“总一分一总”的高信噪比成像电路系统通用设计方法。描述了系统从顶层总体设计、底层各电路模块设计以及全系统联试的完整研制方法。将该方法应用于吉林一号卫星高分辨率多光谱 CCD 成像电路系统的设计中,并对成像系统进行了辐射定标试验,获得了高信噪比的图像数据。结果显示:在灰度为 80% 饱和输出时,获得的全色图像信噪比达到了 53.9 dB,多光谱图像的最高信噪比达到了 56.3 dB,且图像数据经融合后色彩真实、绚丽。本文的 CCD 成像电路系统设计方法能够为其他航天遥感载荷的电路系统设计提供参考。

关键词:电荷耦合器件(CCD);星载 CCD 相机;CCD 成像电路;信噪比;吉林一号卫星

中图分类号:TN386.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162408.2027

Space-borne CCD imaging circuit system with high signal-to-noise ratio

ZHENG Liang-liang^{1,2,*}, JIN Guang¹, QU Hong-song¹, WU Yong¹

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

Abstract: To capture the space-borne remote sensing image with a high Signal-to-noise Ratio(SNR), this paper analyses the main factors effect on the SNR of images according to the chain of the CCD imaging system. The expression of SNR in the system was indicated in terms of the response model of CCD imaging system. By avoiding the independency of specific CCD model, a design method of “overall-division-overall” was proposed to implement the CCD imaging circuit with higher SNRs. A completion development method including a top-level design, a module-level design and a total-system test was described. The method was applied in design of the high-resolution CCD imaging circuit system of the Jilin-1 satellite. The radiation calibration experiments for the imaging system was performed and the idea image dada with higher SNRs were obtained. The experimental results indicate that the SNR of panchromatic image is 53.9 dB and that of multispectral image is 56.3 dB when their gray outputs

收稿日期:2016-03-07;修订日期:2016-05-10.

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

are in the saturation of 80%. Moreover, the fused image shows a real color and magnificent. The proposed method provides references for design of other space-borne CCD imaging circuit systems in remote sensing fields.

Key words: Changed Coupled Device(CCD), space-borne CCD camera; CCD imaging circuit; signal-to-noise ratio; Jilin-1 satellite

1 引言

电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)是 20 世纪 70 年代初发展起来的一种光电成像器件,其能将光信号成比例地转换为电信号,具有高灵敏度、大动态范围和低噪声等诸多优点,目前已被广泛应用于空间遥感等领域。星载 CCD 相机在轨能够获得宽幅、高分辨率的对地观测图像数据,在国家安全防御、目标搜索与侦察、资源普查、突发事件监测等方面均有极大作用,而高信噪比的图像数据一直是航天遥感相机所追求的目标,其包含更多的目标细节信息,有利于地面应用人员做出正确的判读与识别,因此研制出高信噪比的星载 CCD 成像电路系统具有重要的应用价值。

目前国内外关于 CCD 成像电路系统设计的研究已有不少报道^[1-7],但均是针对某具体型号 CCD 传感器而设计的成像系统,其中电路设计介绍较详细的当属文献[4-5]。文献[4]论述了针对 1 024 pixel×1 024 pixel 电子倍增(EM)CCD 图像传感器(CCD201)的数字化相机设计方法,利用复杂可编程逻辑器件(CPLD)产生 CCD 逻辑时序及视频同步处理控制时序,使用带有相关双采样功能的 16 位模数转换器对 CCD 视频信号进行数字化,并介绍了时序控制、驱动电路和视频处理电路等关键组成部分的技术实现方法。文献[5]利用 50M 像元的全帧型 CCD 芯片 KAF50100 设计了超高分辨率 CCD 成像系统,CCD 输出的图像信号在专用模拟前端芯片 AD9845B 中进行处理和模数(A/D)转换,再由现场可编程门阵列(FPGA)缓存与排序,最后通过低压差分信号(LVDS)接口输出图像数据。这些文献均只是针对某具体型号 CCD 传感器而开展的电路设计,缺乏通用性和灵活性,尚未有高信噪比 CCD 成像电路系统的通用设计方法。

不同于以往成像电路的设计,本文摆脱了具

体 CCD 型号的束缚,通过分析成像链路对信噪比的影响,提出了高信噪比 CCD 成像电路的通用设计方法与流程,并将该方法应用于吉林一号卫星的高分辨率 CCD 成像系统中,获得了高信噪比的图像数据。

2 成像电路系统对信噪比的影响

星载 CCD 成像系统通常使用具有时间延迟积分功能的 CCD 传感器,即 TDI(Time Delay Integration)CCD,其通过对同一目标多次曝光,增大对目标光能量的收集。TDI CCD 成像电路系统的组成通常如图 1 所示,地物目标的光信号通过相机的光学系统入射到由 TDI CCD 传感器组成的焦平面上,CCD 传感器对目标的光信号进行积分曝光,完成光电转换,并输出相应比例的模拟视频信号。经过预放单元的阻抗匹配与信号放大后输入到视频处理电路。

视频处理电路通常集成了相关双采样(Correlated Double Sample, CDS)、可编程增益放大器(Programmable Gain Amplifier, PGA)和模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC),因此该电路模块的主要功能是完成 CCD 有效视频信号的提取、放大与数字量化处理,是影响图像信噪比的关键环节之一,量化后的图像数据发送至数字处理电路进行缓存。

数字处理电路是成像电路系统的控制核心,其负责输出满足 CCD 工作需求的各路原始驱动信号,控制偏置电源的上、下电顺序与视频处理电路的工作时序,利用通信总线接收控制指令,返回遥测参数,并将图像数据按照约定的图像传输格式经由接口电路输出到数传系统。

驱动放大电路将原始的 CCD 驱动信号进行功率放大,输出满足 CCD 工作需求的各路驱动信号,偏置电源电路主要是提供 CCD 工作所需的各种稳定电源,这两部分电路也是影响图像信噪比的关键部分。

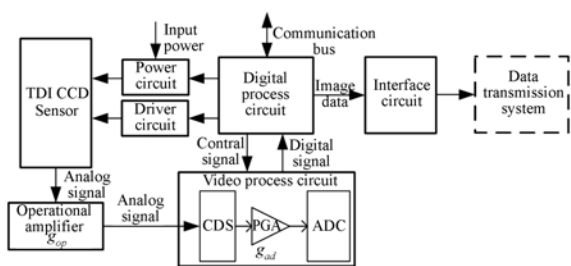


图 1 TDI CCD 成像电路系统示意图

Fig. 1 Sketch map of TDI CCD imaging circuit system

由图 1 所示的成像电路系统,分析影响图像信噪比的主要环节。由于 CCD 输出信号为模拟信号,当模拟信号完成数字量化后,转变为数字信号的处理流程,而数字信号的抗干扰能力较强,对图像信噪比的影响基本可忽略,因此影响图像信噪比的主要环节是模拟电路部分,主要包括:偏置电源电路、驱动放大电路、预放单元和视频处理电路。

假设偏置电源和驱动放大电路对 CCD 传感器输出模拟视频信号的噪声影响分别为 n_p 和 n_d ,则成像电路系统主要的工作噪声电压可表示为:

$$n = g_{ad} \times (g_{op} \times (n_p + n_d) + n_{op}) + n_{ad}, \quad (1)$$

式中: n_{op} 和 n_{ad} 分别表示预放单元与视频处理电路的工作噪声, g_{ad} 和 g_{op} 分别表示视频处理电路与预放单元的放大倍数。

式(1)只是单个像素的成像电路噪声表达式,若针对一幅图像阵列,则会有 $h \times k$ 个式(1)形式的表达式,成像电路系统的噪声可利用 RMS 形式表示为:

$$n_c = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^h \sum_{i=1}^k n_{ij}^2}{h \times k}}. \quad (2)$$

除了成像电路的工作噪声外,CCD 传感器自身还有散粒和暗电流等工作噪声,因此成像系统的总噪声为:

$$n_{sys} = \sqrt{n_c^2 + n_s^2 + n_d^2}, \quad (3)$$

式中: n_s 表示散粒噪声,其主要与入射光子数有关, n_d 表示暗电流噪声,其主要与 CCD 传感器的工作温度有关。

CCD 成像电路系统输出的视频电压信号计算公式为^[8]:

$$V_s = g_{ad} g_{op} E(\lambda) M T_{int} R(\lambda), \quad (4)$$

式中: $E(\lambda)$ 为 CCD 成像系统焦平面处的辐射照度,单位为 W/m^2 , M 表示 TDI CCD 传感器的积分级数,取值范围由其自身结构决定,积分级数为

M ,即表示有 M 行像元对目标进行曝光累加, T_{int} 表示 TDI CCD 工作时的积分时间,即表示每行像元对目标的曝光时间, $R(\lambda)$ 为 CCD 的光谱响应函数,其表征 CCD 传感器的光电转化能力,是传感器的关键参数,单位为 $V/\mu J/cm^2$ 。

因此 CCD 成像系统的信噪比计算公式可表示为:

$$SNR = \frac{V_s}{n_{sys}}. \quad (5)$$

由式(5)可知,在光照与 CCD 工作温度确定的条件下,为使成像系统获得高信噪比的图像,应在保证系统输出信号的同时,尽量降低成像电路系统的工作噪声。即从抑制系统工作噪声的角度考虑,进一步提高图像的信噪比。

3 高信噪比成像电路系统的设计方法

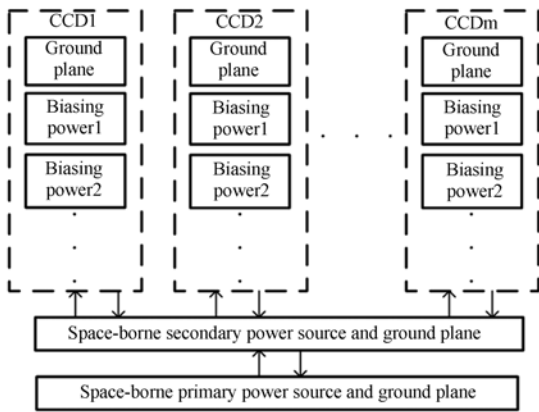
分析公式(1)可知,驱动放大电路与偏置电源的噪声对成像电路的影响最敏感,其次是预放模块和视频处理电路,因此为获得高信噪比的图像数据,CCD 成像电路系统的设计应围绕上述 4 个关键环节开展,本文提出了“总-分-总”的成像电路系统通用设计方法,即总体设计-分布设计-总体联试。

3.1 成像电路系统总体设计

根据总体任务要求进行成像电路系统顶层设计,规划出系统的设计框架与组成,制定总体设计原则,即从设计源头就要考虑成像系统的噪声抑制,包括:CCD 的片间串扰抑制、关键高速模拟信号与偏置电源的信号完整性等问题,同时需明确各电路模块的设计需求。

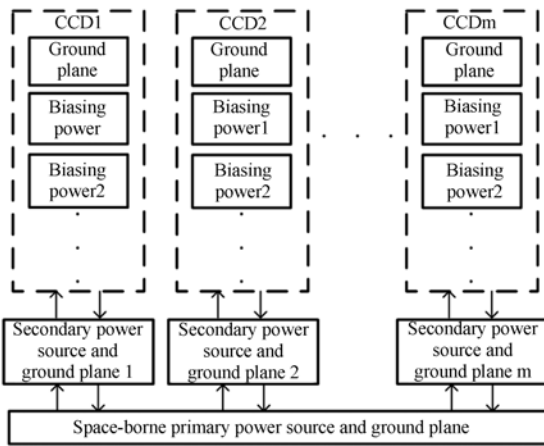
为抑制 CCD 的片间串扰噪声,需要设计系统电源与地平面的拓扑结构,将每片 CCD 的供电电源及相应地平面进行隔离处理。若成像系统的焦平面由 m 片 CCD 传感器拼接组成,CCD 成像电路系统的电源与地平面的拓扑结构设计如图 2 所示。

每片 CCD 传感器均有其独立的偏置电源电路,为相应的 CCD、驱动电路、预放电路与视频处理电路供电,从而实现 CCD 片间成像电路系统的相互隔离,进一步抑制串扰噪声。图 2(a)中,所有 CCD 成像电路使用统一的二次电源和地平面,而 2(b)中,成像电路使用了各自独立的二次电源



(a) 二次电源及地平面统一

(a) Unity of secondary power source and ground plane



(b) 二次电源及地平面隔离

(b) Separation of secondary power source and ground plane

图 2 多片 CCD 成像系统电源与地平面拓扑设计

Fig. 2 Topology structure of power and ground plane for multi-CCD imaging system

与地平面,其 CCD 片间的隔离效果更好,串扰噪声也最小,但对于星上资源的要求也更高,需要更多的连线,二次电源模块数量成倍增多,系统的体积和重量将进一步加大。因此,在进行成像电路系统总体设计时,需要根据不同系统的具体要求确定设计方案。

3.2 分布设计

在完成系统的总体设计后,即可依照总体设计原则,对系统的各电路模块逐一进行详细设计。成像电路系统的组成框图如图 1 所示,具体包括:偏置电源、驱动放大电路、预放单元、视频处理电路和数字处理电路等。

a) 偏置电源

偏置电源是将星上所提供的二次电源转换为 CCD 传感器及驱动放大电路工作所需的各种三次电源,为获得多种低噪声、高稳定的偏置电源,而且各种电源的加断电顺序还有要求,因此采用使用控制端的线性稳压模块进行设计,其具有噪声低、电源抑制比高和静态功耗低等优点。

CCD 参考手册明确了偏置电源的种类并计算各电源模块的功耗,在满足航天设备一级降额要求下,确定偏置电源的拓扑结构与具体的设计方案,再开展原理图及 PCB 的具体设计与实现。

偏置电源在 PCB 布线设计时应采用大面积铺铜方式,优化电源完整性,抑制地弹等噪声。

b) 驱动放大电路

CCD 传感器的驱动信号具有大容性负载、宽电压摆幅等特点,某些驱动信号还有特殊的负电位要求,为获得满足驱动要求的各路时序信号,可采用驱动芯片与分立元件电路相结合的设计方法。

根据 CCD 参考手册,明确驱动信号的具体需求,包括:驱动信号的总数量、工作频率、高低电位要求及容性负载大小等。结合上述具体需求选择适合的集成驱动芯片,设计实现功率驱动信号的拓扑网络,同时计算每片驱动芯片的功耗,在满足航天设备一级降额要求的条件下,优化驱动信号的拓扑网络,再开展原理图及 PCB 的具体设计。

为获得高信号完整性的驱动信号,采用串联源端接电阻的方法,减少信号反射,抑制信号的过冲现象^[9]。在 PCB 设计时要保证驱动信号的阻抗连续,并且信号的回流路径要尽量短。

c) 预放单元

由于 CCD 视频信号输出端的阻抗通常较大,一般在百欧姆量级,因此为便于后续电路的处理,利用预放单元对 CCD 输出的模拟视频信号进行射随与阻抗匹配。可以采用高压摆率、低失调电压的运算放大器进行设计与实现。

CCD 模拟视频信号的幅值通常较小,易受干扰,为保证模拟视频信号的信号完整性,应控制该信号的走线长度,并要阻抗匹配,同时用地线将其与其他信号隔离开,以降低模拟视频信号的串扰噪声。

d) 视频处理电路

视频处理电路的主要功能包括:相关双采样、

增益与偏置控制和模数转换,可采用集上述功能于一体的专用芯片进行设计实现,目前有很多芯片可供选择。

根据成像系统的工作频率,选择具有适合带宽的视频处理器,由于 CCD 输出通道可能较多,为此要选择低功耗的器件,并且为抑制信号间的串扰,应对多通道视频处理电路进行隔离处理,每个处理芯片使用独立的供电模块,减少芯片间的相互耦合。

由于视频处理芯片集成了数字电路和模拟电路,为抑制片内两种电路间的干扰,将其供电电源与地平面分别隔离开来,数字地和模拟地使用磁珠或 0 欧姆电阻进行连接。^[10]

数字处理电路要输出满足 CCD 工作要求各路驱动信号,控制偏置电源电路的上下电顺序与视频处理电路的工作时序,并对图像数据进行整合与编排。可采用 FPGA 或 CPLD 等器件进行设计与实现。结合 CCD 传感器的驱动信号、视频处理电路的时序信号以及系统的工作频率等要求,估算所需的资源情况,选择适合的逻辑器件。同时考虑到空间环境可能影响成像电路系统的工作性能,因此对于 CCD、FPGA 等重要关注件需要选择高等级器件,并采取高可靠的设计措施,从而保证成像系统在寿命末期仍可高效能工作。

3.3 总体联试

在完成上述设计步骤以后,经 PCB 生产与电装,即进入了各电路模块的调试阶段,根据各模块的具体功能要求进行详细的测试与试验。对于驱动放大电路,此时要结合实际驱动波形,选择合适的串行端接电阻,从而保证关键驱动信号的传输质量。当各电路模块功能均测试正常后,可进行系统联试,测试接口的匹配性,优化程序设计,实现系统的功能要求。

4 高信噪比成像电路系统设计方法的应用

将高信噪比成像电路系统设计方法应用于吉林一号卫星的高分辨率 CCD 成像系统的具体设计中。验证该方法的实用性与灵活性。

该相机系统使用了 4 片集成全色及 3 个多光谱谱段的 TDI CCD 传感器,在 656 km 轨道高度

上可以获得的全色分辨率优于 0.72 m,多光谱分辨率优于 2.88 m 的高分辨率图像数据。

4.1 吉林一号成像电路系统总体设计

根据任务要求成像电路系统要实现对四片 TDI CCD 进行驱动与信号处理,每片 CCD 成像电路的设计框架与组成如图 1 所示,结合相机系统的轨道高度、分辨率及光学系统参数,可确定成像系统在轨工作的默认参数:积分时间为 0.1 ms,像素读出时钟为 7.5 MHz。由于 CCD 传感器集成了全色和 3 个多光谱谱段,因此在电路设计时不仅要注意多片 CCD 的片间串扰,还要注意片内多谱段同时工作时相互间的串扰。

结合成像系统在体积和重量方面的设计要求,同时为获得高信噪比图像,进一步抑制 CCD 的片间串扰噪声,吉林一号 CCD 成像电路系统的电源与地平面的拓扑结构设计如图 3 所示。

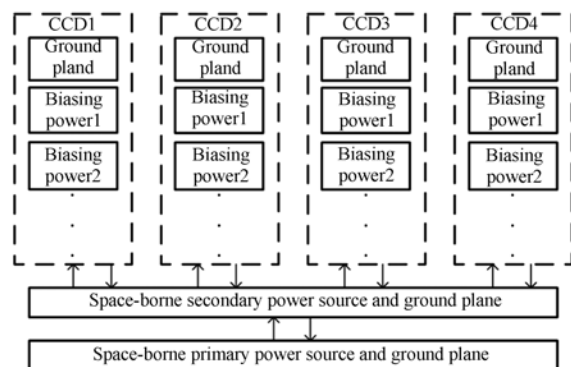


图 3 吉林一号 CCD 成像电路系统电源与地平面拓扑
Fig. 3 Topology structure of power and ground plane for Jilin-1 multi-CCD imaging system

4.2 吉林一号成像电路系统分布设计

可用于空间环境的某型号多光谱 TDI CCD 传感器由一个全色感光区和红、绿、蓝 (R、G、B) 三个多光谱感光区组成,其中全色感光区每行 4 096 pixel,每个多光谱感光区每行 1 024 pixel,因此其具备输出全色图像和彩色图像的功能,其组成如图 4 所示。全色感光区有 8 个图像输出口,多光谱感光区每个谱段对应 1 个输出口。^[11]

由于每个谱段都需要相应的偏置电源与驱动时序信号,所以该传感器工作要求的电源与驱动时序信号的种类较多,相互的时序关系也较复杂,其各谱段要求的驱动时序关系如图 5 所示,各驱动信号的具体压摆要求与容性负载如表 1 所示。

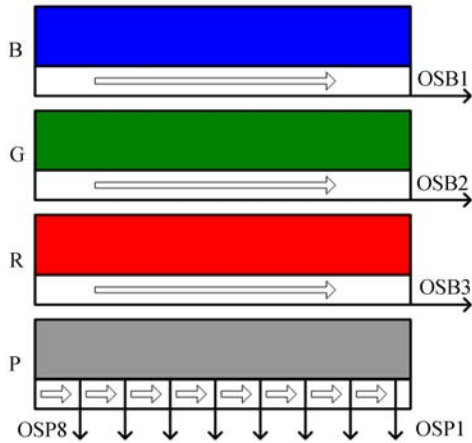


图 4 某型号多光谱 TDI CCD 传感器组成框图

Fig. 4 Block diagram of a multispectral TDI CCD sensor

该器件共需 46 路驱动信号和 6 种偏置电源,电源的具体要求如表 2 所示。

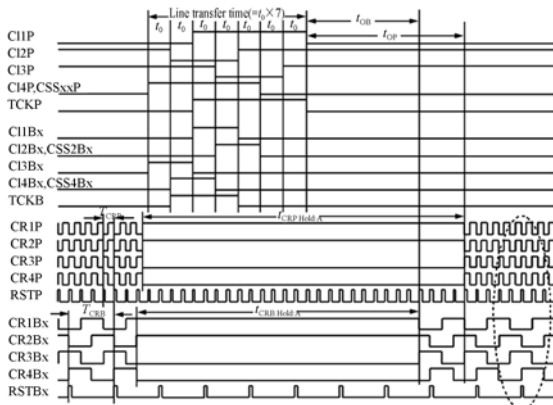


图 5 某型号 TDI CCD 传感器工作时序图

Fig. 5 Timing sequence of a TDI CCD sensor

表 1 某型号 TDI CCD 驱动信号电压要求

Tab. 1 Typical driver clock levels of a TDI CCD sensor

Signal	Low level(V)	Amplitude (V)	Max. capacitance
CIxP	-4(±2)	10(±2)	5.5 nF
CSSxxP	-4(±2)	10(±2)	250 pF
TCKP	-7(±3)	13(±3)	300 pF
CIxBxx, CSSxBx	-13(±5)	14(-6/+4)	12.5 nF
TCKB	-12(±5)	15(-5/+4)	700 pF
CR1P, CR3P	-6.5(±2)	6(±1)	350 pF
CR2P, CR4P	-3(±2)	6(±1)	350 pF
CRxBx	-4(-5/+4)	8(-3/+2)	350 pF
RSTP	0(±3)	10(-3/+4)	50 pF
RSTB	0(±3)	10(-3/+4)	50 pF

表 2 某型号 TDI CCD 传感器偏置电源要求

Tab. 2 Typical bias power level requirements of a TDI CCD sensor

Power name	Description	Nominal bias range(V)
VDDxxP, VDDBx	Amplifier drain bias	+17(±3)
VBB	Substrate bias	-2(-3/+2)
VSETP, VSETB	Set gate bias	-2(±3)
VODP, VODB	Output drain bias	+15(±5)
SSGP, SSGB	Stage selection gate bias	-2(-8/+4)
SSDP, SSDB	Stage selection gate	+15(±5)

a) 偏置电源

星载相机的电源系统已为 CCD 成像系统提供了 5 种二次电源,具体包括: +18 V, ±15 V 和 ±5 V,因此只需利用线性稳压模块将输入的二次电源变换为满足成像电路工作要求的各种正、负三次电源即可。

选择具有低压差特性的线性稳压模块 LM2941 与 LM2991 进行设计,前者最高输入电压为 26 V,用于产生各种正偏置电压,后者最低输入电压为 -26 V,用于产生各种负偏置电压。两种电源芯片需要简单的阻容网络即可输出满足要求的各种偏置电源。LM2941 的电路设计如图 6 所示。

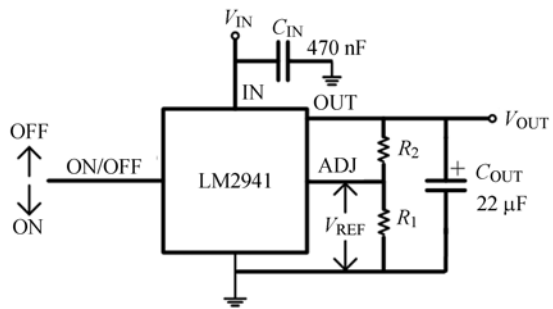


图 6 LM2941 典型电路设计

Fig. 6 Typical circuit design of LM2941

通过调整图 6 中电阻 R_2 的阻值以产生不同的正偏置电源, R_2 选取的具体计算公式如下:

$$R_2 = R_1 \times \left[\frac{V_O}{V_{REF}} - 1 \right], \quad (6)$$

式中, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $V_{REF} = 1.275 \text{ V}$, V_O 表示期望的输出电压,单位为 V。

负电源模块 LM2991 的电路设计与图 6 类似,此处不再赘述。

b) 驱动放大电路

针对所选择的 CCD 传感器,共需要 46 路驱动时序信号,其中有 23 路 7.5 MHz 的高频信号,其余为 10 kHz 的低频信号,各路信号的电压要求及容性负载如表 1 所示,因此选择集成度高、输出电压范围大、驱动能力强的通用驱动器 EL7457 作为本系统的功率驱动器,其单片集成了 4 路驱动电路,2A 的峰值驱动能力,最高的工作频率达到了 40 MHz,其典型的电路设计如图 7 所示。

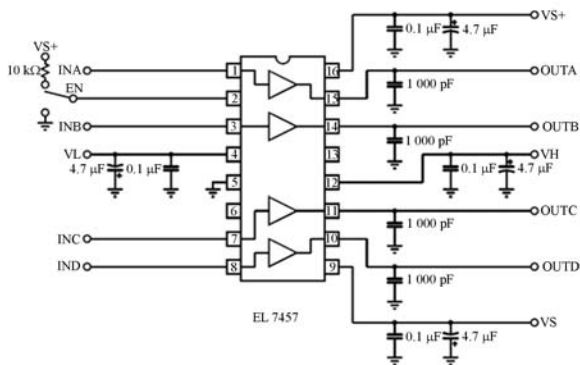


图 7 EL7457 驱动器典型电路设计

Fig. 7 Typical circuit design of EL7457 driver

EL7457 能够对驱动输出端进行使能控制, VS+与 VS-引脚分别为器件的正、负供电端, VH 和 VL 引脚分别为输出信号的正、负电压, 4 个电源引脚均利用 4.7 μF 和 0.1 μF 组合电容进行滤波。根据每路驱动信号的容性负载、压摆与工作频率,可计算出每片驱动器的具体功耗,公式如下:

$$P = \sum_{i=1}^4 C_{Li} \times (V_H - V_L)^2 \times f, \quad (7)$$

式中: C_{Li} 为每路驱动信号所带负载,单位为 F, V_H 为驱动信号的高电压, V_L 为驱动信号的低电压,单位为 V, f 为驱动信号的工作频率,单位为 Hz。

驱动时序的拓扑网络在满足 CCD 工作要求的同时,每片驱动器的功耗也要满足相应的降额要求。同时,在每路驱动信号的输出端处串联端接电阻,以吸收信号的反射等噪声,获得高信号完整性的功率驱动信号。

c) 预放单元

利用集成运算放大器实现对 11 路模拟视频信号的射随与阻抗匹配,选择高集成度、高压摆率的 LMH6722 运算放大器进行预放单元的设计,其单片集成了 4 路运放电路,压摆率达到了 1 800

V/μs,失调电压仅为 0.2 mV,每路输出端的阻抗为 0.06 Ω,其应用电路如图 8 所示。

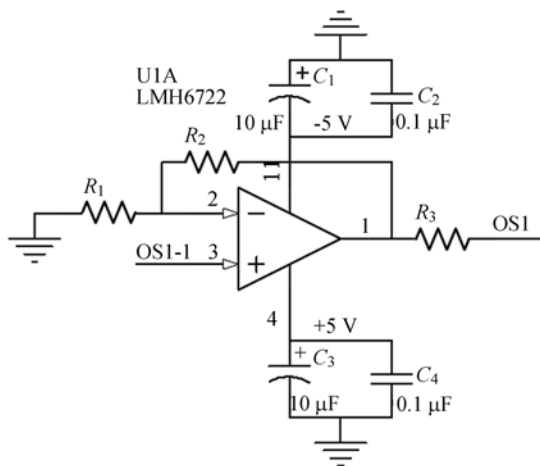


图 8 LMH6722 运放应用电路设计

Fig. 8 Application circuit design of LMH6722 operational amplifier

采用正负双电源的供电方式,并用组合电容进行滤波,以获得高稳定、低噪声的供电电源,输出信号和输入信号的比例由电阻 R_1 、 R_2 的比值来决定,电阻 R_3 用于匹配输出模拟视频信号的阻抗。

d) 视频处理电路

为实现对 3 路多光谱和 8 路全色模拟视频信号的采样、放大与量化处理,选择了一款具有 12 位量化精度的视频处理器 TDA9965,其集成了可调整带宽的采样保持电路,最高采样率达 40 MHz,可编程增益放大 0~36 dB,并具有静默低功耗模式,可通过三线串口灵活设置芯片的工作参数。

该处理器输出端的均方根量化噪声为 0.85 DN(Digital Number),因此其动态范围达到了 73.66 dB。由于视频处理电路是成像系统的模数转换中心,为获得高信噪比的图像数据,每个视频处理器的模拟电源使用独立的供电模块,数字信号利用数字地进行屏蔽,其走线不应穿越模拟布线区域,数字地与模拟地利用磁珠在芯片附近就近连接。

同时为实现 CCD 各抽头的增益设置,解决抽头间可能出现的响应不一致等问题,每个视频处理器使用各自的通信端口与数据总线。

11 路视频处理器输出的量化数字信号共有

132 路,均输入至数字处理电路,另外,数字处理电路还负责输出 CCD 的原始驱动信号与视频处理器的时序控制信号,因此大约需要 350 个 IO 引脚。综上,数字处理电路选择 Xilinx 公司 VIR-TEX2 系列的 FPGA,具体型号为 XC2V3000-728,其只需要 1.5 V 和 3.3 V 两种供电电源,并具有最大 420 MHz 的工作频率,516 个用户 IO 引脚,12 路 DCM 及 1 728 kbits 的块 RAM,以及非常丰富的寄存器资源,完全可以满足整个系统控制与数据缓存的需求。

如图 1 所示,FPGA 在接收到多路图像数据后,需要按照约定的图像传输格式对数据进行整合。利用 FPGA 内部的双端口 RAM 建立两个大小为 190 kbits 的图像数据缓冲区,采用乒乓操作,将每个像素量化后的图像数据存入一个缓冲区中,再从另一个缓冲区中读取图像数据并组帧输出,下一行数据有效时,切换两个缓冲区的读写操作,从而实现连续高速的图像数据缓存与发送。

4.3 吉林一号成像电路系统总体联试

在总体联试阶段,主要对各电路模块进行测试与联试,使各模块间接口匹配,从而使整个成像系统能够正常工作。

对于驱动放大电路,需要根据实测的驱动波形,调整串行端接电阻,针对低频行转移 CI 信号,由于其容性负载较大,端接电阻为 5.1Ω ,其余多数驱动信号的端接电阻在 $10 \sim 22 \Omega$ 之间,从而保证信号的完整性。

当各电路模块功能均正常后,即可进行系统联试,本系统利用特性阻抗为 50Ω 的同轴电缆传输从预放单元至视频处理电路的模拟视频信号,该线缆的长度应尽量短。调试并优化 FPGA 程序,实现整个系统良好运转,即完成了成像电路系统的研制工作。

5 试验测试数据

为测试吉林一号卫星 CCD 成像电路系统的信噪比,在试验室针对该系统进行了辐射定标试验,如图 9 所示。采用积分球作为光源,其输出的光线能够均匀照射到系统焦平面的 CCD 上,然后利用图像采集系统接收并显示所拍摄的图像数据,电源系统为成像电路系统提供各种二次电源,通信控制系统负责成像电路系统参数的设置与

CCD 的上、下电控制。

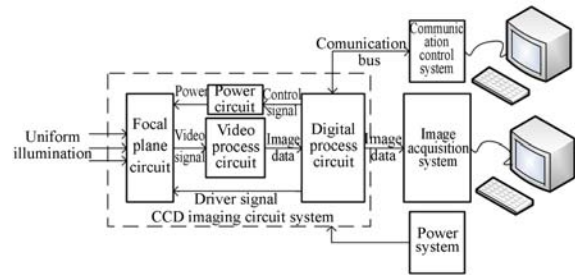


图 9 吉林一号成像电路系统辐射定标试验示意图
Fig. 9 Sketch map of radiometric calibration of Jilin-1 imaging circuit system

成像系统以在轨默认参数拍照,改变均匀光在焦面处的辐射照度,分别采集全色及 3 个多光谱波段在 20%、50%与 80%饱和输出时的图像数据,如图 10 所示。

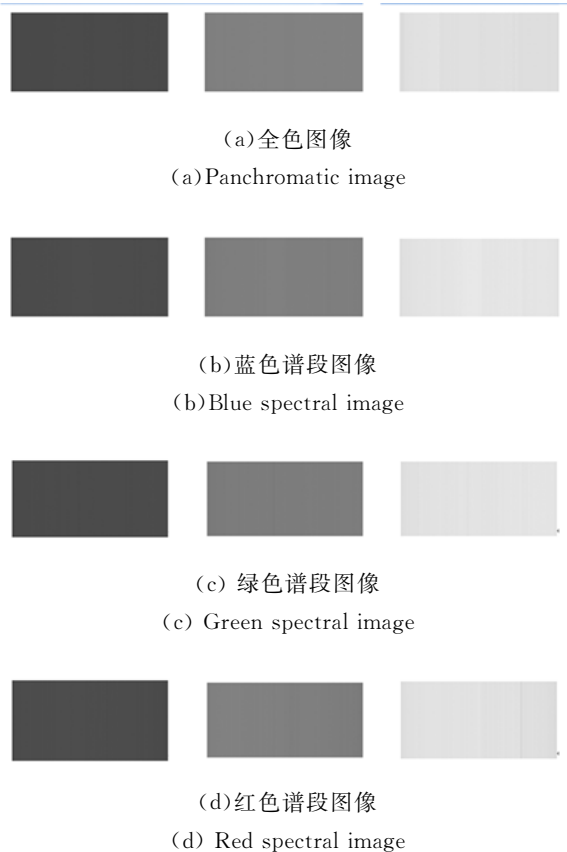


图 10 吉林一号成像电路系统辐射定标图像
Fig. 10 Images of radiometric calibration of Jilin-1 imaging circuit system

利用局部标准差法^[12]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:

$$\text{SNR} = 20 \lg \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i}{\sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (p_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m p_i)^2}}, \quad (8)$$

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

各谱段不同灰度图像的信噪比如表 3 所示。随着图像灰度值的增加,信噪比也随之增大,这主要因为有效视频信号的增大幅度要大于此时噪声的增大幅度。3 个多光谱谱段的图像信噪比基本一致,并比全色谱段高约 2 dB,主要是由于相对于全色谱段,多光谱谱段输出的抽头数少,驱动频率低,所以图像的噪声就略低,因此多光谱图像的信噪比略高。

表 3 吉林一号成像电路系统信噪比数据

Tab. 3 SNRs of Jilin-1 imaging circuit system

Spectrum	Output (% saturation)	SNR/dB
Panchromate	20	46.7
	50	49.7
	80	53.9
Blue	20	49
	50	51.5
	80	55.6
Green	20	49.3
	50	51.9
	80	56.3
Red	20	49.1
	50	51.7
	80	55.7

由表 3 可知,图像灰度在 80% 饱和输出时,全色图像的信噪比可达 53.9 dB,多光谱图像中信噪比最高可达 56.3 dB。因此,该成像电路系统设计方法对 CCD 的片间串扰、片内串扰及相关干扰噪声进行了有效抑制,获得了高信噪比的图像数据。

参考文献:

- [1] ZHANG L F, XIE K, LI T. Based on line scan CCD print image detection system [C]. MIPPR 2015: *Pattern Recognition and Computer Vision*,

图 11 为吉林一号卫星在轨运行时拍摄的一幅经多光谱数据融合的高分辨率图像,其色彩真实、绚丽,实现了预期的设计目标。



图 11 吉林一号卫星在轨拍摄图像

Fig. 11 Image of Jilin-1 satellite acquired in orbit

6 结 论

为获得高信噪比的航天遥感图像,本文根据 CCD 成像系统链路分析了影响图像信噪比的主要因素,结合 CCD 成像系统的响应模型,明确了系统信噪比的表达式,并摆脱了具体 CCD 型号的束缚,提出了一种“总-分-总”的高信噪比成像电路系统的通用设计方法,详细描述了系统从总体设计、底层各电路模块设计再到全系统联试的完整研制方法,并将其应用于吉林一号卫星高分辨率 CCD 相机的成像系统中,详细描述了利用该方法设计的具体实施方案,并对成像系统进行了辐射定标试验,获得了高信噪比的图像数据,在灰度为 80% 饱和输出时,全色图像信噪比达到了 53.9 dB,多光谱图像中最高信噪比达到了 56.3 dB,从而验证了该方法的实用性、灵活性与有效性。

吉林一号卫星的高分辨率相机载荷在轨获得了高质量的图像数据,经多光谱数据融合后的图像色彩真实、绚丽,达到了预期的设计目标。该设计方法同时可以为其他航天遥感载荷的电路设计提供有力参考,也对其他类型载荷的研制有借鉴意义。

SPIE, 2015; 98130Q.

- [2] LI X F, SUI X B. Colorized linear CCD data acquisition system with automatic exposure control [C]. *International Symposium on Optoelectronic Tech-*

- nology and Application, SPIE, 2014:92960E.
- [3] LI L, ZHANG N, LI T T, *et al.*. Design of area CCD image acquisition and display system based on FPGA[C]. *7th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies*, SPIE, 2014:928416.
- [4] 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.
- YANG SH H, GUO M AN, LI B K, *et al.*. Design of digital EMCCD camera with mega pixels [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(12):2970-2976. (in Chinese)
- [5] 许文海, 吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7):1603-1610.
- XU W H, WU H D. Design of ultra-high resolution CCD imaging systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1603-1610. (in Chinese)
- [6] 李亚鹏, 何斌, 付天骄. 行间转移型面阵 CCD 成像系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(8):2602-2606.
- LI Y P, HE B, FU T J. Design of imaging system of interline area CCD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(8):2602-2606. (in Chinese)
- [7] WANG CH, SUI X B. Design of multi-mode compatible image acquisition system for HD area array CCD [C]. *International Symposium on Optoelectronics Technology and Application*, SPIE, 2014:92960A.
- [8] 郑亮亮, 张贵祥, 贺小军, 等. TDI CCD 成像电路系统响应模型的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(11):1104001.
- ZHENG L L, ZHANG G X, HE X J, *et al.*. Research on response model of TDI CCD image system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11):1104001. (in Chinese)
- [9] 马骏, 李少毅, 孙力, 等. CCD 驱动电路设计对航空相机成像质量的影响分析[J]. *测控技术*, 2011, 30(3):5-7.
- MA J, LI SH Y, SUN L, *et al.*. Analysis of the interaction between CCD driving circuit design and image quality [J]. *Measurement and Control Technology*, 2011, 30(3):5-7. (in Chinese)
- [10] 何家维, 何昕, 魏仲慧, 等. 电子倍增 CCD 星相机的设计[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1396-1403.
- HE J W, HE X, WEI ZH H, *et al.*. Design of EMCCD cameras for star detection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1396-1403. (in Chinese)
- [11] 郑亮亮, 张贵祥, 金光. 高速多光谱 TDI CCD 成像电路系统[J]. *中国光学*, 2013, 6(6):939-945.
- ZHENG L L, ZHANG G X, JIN G. High-Speed imaging circuit system for multispectral TDI CCD [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6):939-945. (in Chinese)
- [12] 付强, 相里斌, 景娟娟. 基于多光谱遥感成像链路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,博士研究生,副研究员,2007年于南京航空航天大学获得硕士学位,主要从事光学遥感器成像技术方面的研究。E-mail: adqe@163.com

导师简介:



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得硕士、博士学位,主要从事星载光学仪器、小卫星总体技术方面的研究工作。E-mail: jing@ciomp.ac.cn