

文章编号 1004-924X(2011)11-2800-05

高分辨力遥感相机视频处理的温度适应性设计

曲利新*

(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:对遥感相机成像电子学系统进行了温度适应性设计,以使其在温度大范围变化时或电路存在局部温差时均能实现高质量成像。分析了成像链路中的温度延时因素,提出了温度适应性设计方案和相关双采样(CDS)位置的初始精密对准方法,并进行了实验验证。该方法将 CCD 驱动器的输出经分压整形处理后作为双采样信号的时序基准,从而使双采样信号具备自适应跟踪能力;利用 RC 电路低通滤波特性对双采样初始位置进行精密对准,最后,在 $-35\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 对改进后的遥感相机成像电子学系统进行了高低温实验。结果表明:双采样初始位置的延时调节精度达到了 0.15 ns ;在实验温度范围内,双采样偏离理想位置的延时最大值仅为 0.72 ns ,相机成像质量达到指标要求,满足空间应用需要。

关键词:高分辨力遥感相机;成像系统;温度适应性;相关双采样

中图分类号:V443.5 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111911.2800

Design of temperature adaptability for video processing in high-resolution remote sensing cameras

QU Li-xin*

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

Abstract: To obtain high quality images for remote sensing cameras in a wider temperature change or in the temperature diversity caused by different circuit parts, an adaptive method for imaging electronics was proposed. The time-delay factors of temperature in the imaging system was analyzed, and design methods for temperature adaptability and the initial alignment of Correlated Double Sampling (CDS) positions were given. Several experiments were performed to validate the feasibility of this method. By proposed method, the output of CCD driver was divided and was taken as a benchmark for the CDS signals, so that CDS signals can be used to track the driving signal adaptively. Then, initial positions of CDS were precisely aligned by using the lowpass filtering of a RC net. Finally, a temperature experiment by proposed compensating method was carried out for the imaging system of remote camera in $-35\sim 75\text{ }^{\circ}\text{C}$. Results indicate that the position precision of CDS signals after adjusting is up to 0.2 ns . In the experimental temperature range, the maximal deviation of the CDS signals is only 0.72 ns as comparing with that of ideal one, which satisfies the indicators of image quality and the re-

收稿日期:2011-03-01;修订日期:2011-04-02.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

quirements of space application.

Key words: high resolution remote sensing camera; imaging system; temperature adaptability; Correlated Double Sampling (CDS)

1 引言

空间遥感相机^[1-3]是空间对地观测的重要手段,在军事侦察、资源勘探和测绘等领域发挥着至关重要的作用。空间遥感相机通常由光、机、电、热 4 个分系统组成,其最终成像质量的评价指标主要包括分辨率^[4]、信噪比^[5]和 MTF 等。而上述指标除受光学系统设计参数^[6]约束外,主要由成像电子学^[7]性能决定。作为成像电子学核心功能模块的视频处理主要由低通滤波、相关双采样(CDS)^[8]、数控增益和偏置调整、模数转换 4 个模块构成,其中,相关双采样技术是重中之重。从采样原理来说,它能够有效降低 CCD 复位噪声和 kTC 噪声,从而提高信噪比,但对双采样位置的精确性要求十分苛刻。

目前,为使双采样信号位置能与视频信号位置精确对准,在相机的调试阶段(通常在室温下进行),通常利用软件方法对其进行延时调整对齐,从而获得最佳的成像质量,而采用精密延时线的硬件补偿方法则由于其可靠性较差而通常不被航天工程采用。但软件方法中延时调整的最小步距由成像系统的主时钟周期决定,对于高分辨率相机的成像系统,CCD 输出信号的频率很高,基准电平和信号电平维持时间很短(十几纳秒左右,与系统主时钟周期基本相当),因此,高速情况下的时钟周期级延时调整已无法满足双采样位置对准的要求,必须采用更精细的延时调整手段。同时,成像电路中的器件均具有一定的温度延时特性,工作温度的变化会造成器件对信号延时的变化,从而导致双采样位置的偏离。实验表明,CCD 驱动器件^[9]的延时受温度影响相对最大(其他器件均很小),可达到十几纳秒,且驱动信号的延时将直接导致 CCD 输出信号的延时。而相机在制造阶段需要通过高低温测试^[10];即使在投入使用后,随着开机后工作时间的累积,功耗相对较大的焦平面电路(主要包括 TDICCD、驱动电路和预放电路)处的温度与成像后端电路(视频处理、图像整合和数传等)的温度也会有明显的差异,这些必

将导致双采样位置偏离 CCD 输出的视频信号位置,严重时甚至无法成像。

鉴于此,本文提出了遥感相机成像电子学的温度自适应设计方法,并利用 RC 电路的低通滤波特性对双采样初始位置进行精密调整,使得双采样位置与视频信号能够持续地精确对准,实验结果验证了该方法的有效性。

2 温度适应性设计

在存在温度变化或温差(变化)的工作环境下,为了使相关双采样信号(SHP, SHD)位置能始终与 TDICCD 输出的信号位置精密对准,不受驱动器件温度延时的影响,必须使相关双采样信号具备一定的跟随能力。因此考虑将驱动器的输出信号经过分压和整形调整后送至视频处理时序发生 FPGA 中,作为 SHP 和 SHD 信号的时序发生基准,这样 SHP 和 SHD 信号便可以跟随驱动器输出的驱动信号,从而补偿掉驱动器的温度延时,持续地保证双采样与 CCD 输出信号的精密时序关系,获取理想的成像效果。该温度适应性设计的原理如图 1 所示。

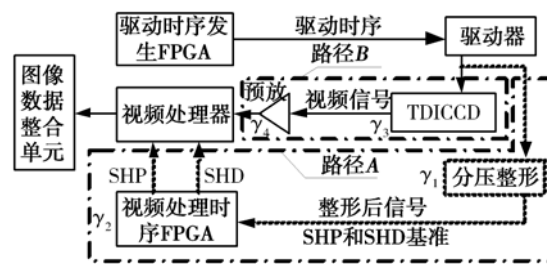


图 1 温度适应性设计原理图

Fig. 1 Design schematic of temperature adaptability

图 1 中,视频处理时序 FPGA 依据分压整形后的驱动信号来确定 SHP 和 SHD 信号的发生时序,这样便建立起了 SHP 和 SHD 信号与 TDICCD 输出的视频信号的自适应跟随相位关系,从而消除驱动器温度漂移引入的绝大部分信号延时。但由于驱动器信号经 A 和 B 两条路径所经过的走线和元器件不同,因此,在视频处理器

位置所接收到的视频信号和双采样信号会存在某个初始时序偏差,该初始偏差可以通过第 3 节的方法消除。同时,需要指出,链路中其它器件也具有一定的温度延时特性,因此温度变化时,A 和 B 两路径中的温度延时之差不一定为零,而是一个温变值,如式(1)所示。

$$\gamma_{\text{Delay}}(T) = |(\gamma_1 + \gamma_2) - (\gamma_3 + \gamma_4)|, \quad (1)$$

其中, $\gamma_1 \sim \gamma_4$ 分别为整形器件温度延时、视频处理时序 FPGA 温度延时、TDICCD 延时和预放大器延时, T 为温度。经查阅各器件手册中的温度延时曲线并计算可知,在 $(-35 \sim 75 \text{ }^\circ\text{C})$ 的温度范围内,该延时最大仅为 0.72 ns ,对采样位置的影响很小,可忽略,后续实验结果可证明该结论。

3 双采样初始位置的精密调节

为获取高质量图像,视频处理器接收到的双采样信号和视频模拟信号的相位须严格满足时序要求。而第 2 节提到,2 者会存在 1 个初始相位偏差。其中,大的偏差(10 ns 左右)可通过主时钟周期量级的软件延时补偿掉;而对于较小的低位残余偏差,本文采用在 SHP 和 SHD 信号线上加 RC 电路的方式(其中,R 串联在信号线上,C 在 R 之后跨接至信号线与地线之间),利用其积分延时特性来降低信号边沿斜率,从而达到延时的目的。

图 2 为未经调整时的视频信号和双采样信号的初始时序关系图。

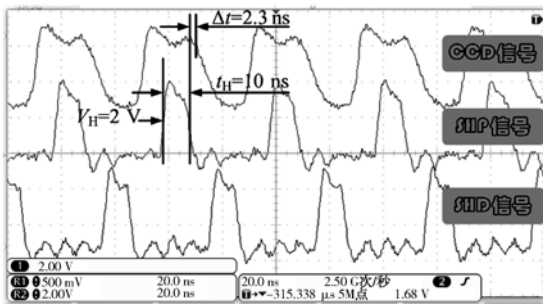


图 2 未调整的双采样位置关系图

Fig. 2 Diagram of unadjusted CDS locations

可以看到,初始相位偏差为 $\Delta t = 2.3 \text{ ns}$ 。为补偿该相位偏差,需要确定 RC 延时电路的阻容值。这里首先通过计算初步确定 RC 值,然后考虑 PCB 和器件封装的实际物理参数,通过仿真来精密选取

阻容值。RC 积分延时电路的公式如式(2)所示。

$$\delta(t) = A \cdot u(t) \cdot (1 - e^{-t/RC}), \quad (2)$$

其中, $\delta(t)$ 为 RC 网络的输出,A 为输入信号(SHP, SHD)的幅度, $u(t)$ 为单位阶跃函数。则要达到 Δt 延时所需的 RC 值如式(3)所示。

$$RC = \Delta t / [1 \ln A - 1 \ln (A - \delta_0)], \quad (3)$$

其中, δ_0 为视频处理器 SHP 和 SHD 信号接收端高电平的下限值。而已知 $A = 3.3 \text{ V}$,且 $\delta_0 = 2 \text{ V}$,延时量 $\Delta t = 2.3 \text{ ns}$,则由式(3)可算出 $RC = 2.46 \text{ } \Omega\text{nF}$ 。

接着,利用 ALLEGRO SI 仿真软件提取 PCB 中 SHP 和 SHD 网络的拓扑,将 PCB 和器件封装参数的影响纳入考虑范围,并依据上述计算结果约束 RC 值的选取。由于 2 者拓扑一致,因此仅以 SHP 为例,仿真试验表明:选取大小为 $100 \text{ } \Omega$ 的电阻和 20 pF 的电容时,对于周期为 40 ns 、占空比为 $1:3$ 的 SHP 信号,可以达到 2.3 ns 的精确延时,如图 3 所示。

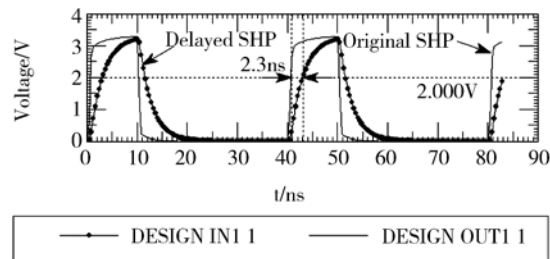


图 3 SHP 信号延时仿真图

Fig. 3 Simulation diagram of time-delay of SHP signal

将上述确定的电阻、电容焊接至实际 PCB 电路板上,这样,在 RC 网络的延时作用下,双采样位置便与视频信号满足严格的相位关系,实际相位偏差仅为 0.15 ns ,如示波器图 4 所示。

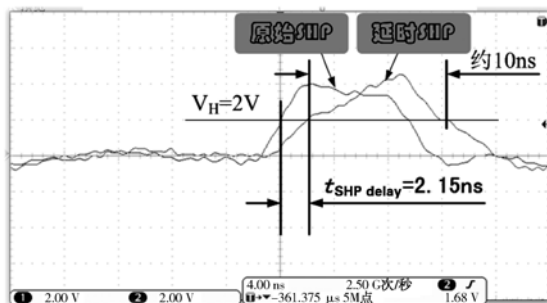


图 4 实际的 SHP 延时图

Fig. 4 Diagram of actual time-delay of SHP

此时,常温下得到的全色推扫图像如图 5 所示。可见,经过初始相位补偿后,成像效果良好。

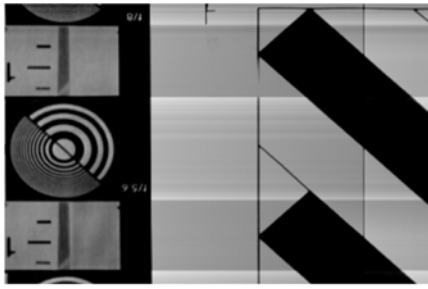


图 5 调整后常温下全色推扫图像

Fig. 5 Adjusted panchromatic image at room temperature

4 温度适应性实验与分析

为验证本文方法的有效性,首先,对采样位置进行初始精确对准。如第 2 节所述,未加任何补偿措施时的双采样初始位置相应误差为 2.3 ns 左右;加入 RC 精密延时电路后,经测量误差缩小至 0.15 ns 左右。在基本消除了初始误差的基础上,利用 FPGA 内部逻辑搭建温度补偿链路,并对加入温度适应性设计后的成像电子学系统进行高低温实验,

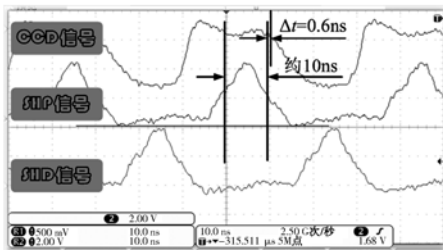


图 6 调整后 60°C 时的双采样位置关系图

Fig. 6 Diagram of adjusted CDS locations at 60 °C



图 7 调整后 60°C 时的全色推扫图像

Fig. 7 Adjusted panchromatic image at 60 °C

温度为 -35~75 °C,成像效果均良好。

以 60°C 时为例,TDICCD 信号与双采样信号相位关系如图 6 所示,推扫图像如图 7 所示。

为作比较,去掉本文提出的温度补偿链路,CCD 信号与双采样信号相位关系如图 8 所示,推扫图像如图 9 所示。

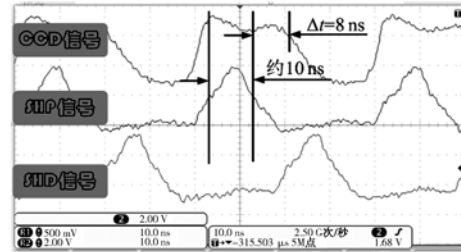


图 8 去掉温度补偿的 60°C 时的双采样位置关系图

Fig. 8 Diagram of unadjusted CDS locations at 60 °C

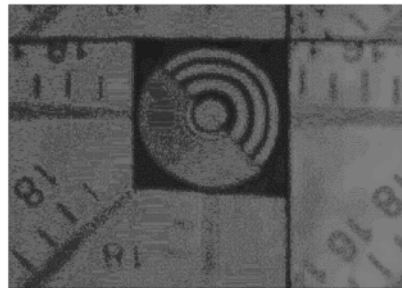


图 9 去掉温度补偿的 60°C 时的全色推扫图像

Fig. 9 Unadjusted panchromatic image at 60 °C

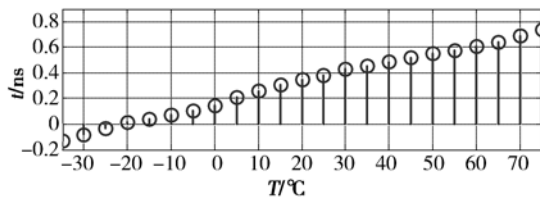


图 10 -35~75 °C 时的双采样延时曲线

Fig. 10 Time-delay curve of CDS in -35~75 °C

可见,本文方法对于温度变化引入的延时的补偿作用是有效的,-35~75 °C 的跟随精度测试曲线如图 10 所示。

5 结 论

本文根据遥感相机大范围温度实验及实际空间应用中的工作需求,提出了遥感相机成像电子学的温度适应性设计方法。分析了成像链路中的

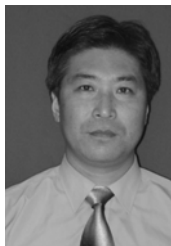
温度延时环节,针对最严重的延时环节给出了温度适应性补偿方法。对双采样位置进行了初始精密对准,达到了 0.15 ns 的精度。最后对本文方法进行了温度适应性实验和分析。实验结果表

明:—35~75 °C 温度下,双采样偏离理想位置的延时最大值仅为 0.72 ns,成像质量在整个温度范围内均良好,能够通过遥感相机的高低温实验,达到了空间实际应用的要求。

参考文献:

- [1] 姚呈康,李庆辉,胡琳. 星载遥感相机像移分析[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5):901-904.
YAO CH K, LI Q H, HU L. Analysis of image motion of satellite remote sensing camera[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5):901-904. (in Chinese)
- [2] 王雪晶,张健,魏仲慧,等. 基于遥感相机模型的遥感图像彩色校正[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(6):443-446.
WANG X J, ZHANG J, WEI ZH H, *et al.*. Color correction for remote sensing images based on remote sensing camera model[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2002, 21(6):443-446. (in Chinese)
- [3] 程芸,李涛. CCD 遥感相机信号处理电路降噪方法[J]. 航天返回与遥感, 2008, 29(4): 36-41.
CHENG Y, LI T. The methods of reducing noise in signal processing circuit of CCD remote camera[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2008, 29(4): 36-41. (in Chinese)
- [4] 韩昌元. 高分辨力空间相机的光学系统研究[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11):2164-2172.
HAN CH Y. Study on optical system of high resolution space camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11):2164-2172. (in Chinese)
- [5] 阮宁娟,苏云,张科科,等. 空间 TDICCD 相机动态信噪比计算方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2009, 6:15-20.
RUAN N J, SU Y, ZHANG K K, *et al.*. Research on calculation method of dynamic SNR of TDICCD camera[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2009, 6:15-20. (in Chinese)
- [6] 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)
- [7] 王文华,何彬,韩双丽,等. 星上 CCD 成像非均匀性实时校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(6): 1420-1428.
WANG W H, HE B, HAN SH L, *et al.*. Real-time correction of nonuniformity in CCD imaging for remote sensing[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1420-1428. (in Chinese)
- [8] 刘国媛,李露瑶,张伯珩,等. CDS 器件在 TDICCD 视频处理电路中的应用[J]. 光子学报, 2000, 29(1):82-86.
LIU G Y, LI L Y, ZHANG B H, *et al.*. The application of device CDS indealing with the vedio signal[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, 29(1):82-86. (in Chinese)
- [9] 焦斌亮,韩志学. 具有积分控制功能的 CCD 驱动电路设计[J]. 光学仪器, 2005, 27(3):51-54.
JIAO B L, HAN ZH X. The design of CCD with integration control function based on CPLD[J]. *Optical Instruments*, 2005, 27(3):51-54. (in Chinese)
- [10] 韩冬,吴清文,陈立恒,等. 多姿态空间相机的热控系统设计与仿真[J]. 微计算机信息, 2009, 25(8):143-144.
HAN D, WU Q W, CHEN L H, *et al.*. Design and simulation for thermal control system of attitude-varied space camera[J]. *Control and Automation Publication Group*, 2009, 25(8):143-144. (in Chinese)

作者简介:



曲利新(1966—),男,吉林长春人,研究员,1989年于长春光学精密机械学院获得学士学位,主要研究方向为空间光学成像技术等。E-mail: qulx2007@163.com