

文章编号 1004-924X(2020)04-0973-06

# 高分辨力遥感相机 CCD 采样位置自适应补偿技术

孙雪晨\*, 吕恒毅, 薛旭成, 石俊霞, 傅 瑶

(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:** 由于受温度变化的影响, 高分辨力遥感相机焦平面 CCD 采样信号的相位会发生变化, 采样位置的温度漂移会严重影响图像的信噪比、动态范围等, 甚至会造成图像无法正常显示。为了解决采样位置随温度漂移的问题, 对高分辨力遥感相机 CCD 采样位置进行了自适应补偿设计, 首先对 CCD 采样信号的初始位置进行精密调节, 然后设计了自适应补偿电路, 通过对功耗的控制使各驱动芯片温度基本一致, CCD 信号与采样信号在温度变化上具有跟踪性, 在动态上保证 CCD 信号采样位置的准确性, 从而保证图像信噪比的稳定性。实验表明, 利用该方法, 相关双采样信号的初始位置调节精度小于 0.039 ns; 在卫星在轨温度范围内, 相关双采样信号延时最大值为 0.46 ns, 保证了相机的高质量成像, 满足航天应用需要。

**关键词:** 高分辨力遥感相机; 相关双采样; 温度; 自适应补偿

中图分类号: V443.5 文献标识码: A doi: 10.3788/OPE.20202804.0973

## Adaptive compensation technique for CCD signal sampling positions in high-resolution remote sensing cameras

SUN Xue-chen\*, LÜ Heng-yi, XUE Xu-cheng, SHI Jun-xia, FU Yao

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

\* Corresponding author, E-mail: jet0409@163.com

**Abstract:** Under the influence of temperature changes, the phase of the CCD sampling signal of a high-resolution remote sensing camera can vary. This can adversely affect the signal-to-noise ratio and dynamic range of the image and may even cause the image to be displayed abnormally. To solve this problem of temperature-related sampling position drift, an adaptive compensation design was developed for the CCD sampling position of a high-resolution remote sensing camera. First, the initial position of the CCD sampling signal was precisely adjusted, and an adaptive compensation circuit was then designed to control the power consumption, which rendered the temperature of each driver chip to be essentially the same. The advantage of this method is that the CCD and sampling signals can be effectively monitored during temperature changes, thus, ensuring the accuracy of the sampling position of the CCD signal and stability of the signal-to-noise ratio of the image. The experiments indicate that with this method, the accuracy of the initial position adjustment of the correlated double-sampling sig-

收稿日期: 2019-09-11; 修订日期: 2019-11-11.

基金项目: 吉林省科技发展计划项目资助 (No. 2019030282GX)

nal improves to less than 0.039 ns. Additionally, the maximum delay of the correlated double-sampling signal in the satellite in-orbit temperature range is 0.46 ns, which ensures high-quality imaging and meets the requirements of space applications.

**Key words:** high-resolution remote sensing cameras; Correlated Double Sampling(CDS); temperature; adaptive compensation

## 1 引言

信噪比、动态范围等是空间光学相机设计<sup>[1-3]</sup>的重要指标,用于表征相机的辐射性能和评价相机图像品质。空间遥感相机电子学系统的性能,会极大程度的影响整个成像系统的成像质量<sup>[4]</sup>、信噪比<sup>[5]</sup>和动态范围等。在航天应用中,通常对 CCD 信号进行相关双采样(Correlated Double Sample, CDS)处理,这样可以消除复位噪声的干扰,对低频噪声也有抑制作用,可以显著改善信噪比,提高信号检测精度<sup>[6-7]</sup>。

为了使相关双采样信号(SHP, SHD)位置<sup>[8]</sup>与 CCD 信号最佳位置对准,通常会在地面实验阶段选取最佳的采样位置,进行固化。但是由于空间环境温度的大范围变化,成像电路的器件会受到温度<sup>[9]</sup>的影响而产生时序上的延时,从而导致采样位置的不准确。为了解决采样位置受到温度的影响而造成的图像质量下降,曲利新<sup>[10]</sup>提出将 CCD 驱动器的输出信号进行分压整形,以此作为采样信号 SHP 与 SHD 的基准,去除 CCD 驱动器受温度影响后的延时,提高采样信号与 CCD 信号之间相位的稳定性。在航天应用上,CCD 驱动信号种类很多,占空比与采样信号不一致,需要的整形电路过于复杂且难于实现,新加入的电路也会带来新的温度延时效应;而且通过 RC(Resistor-Capacitance)电路来调整延迟,精度不足。潘卫军<sup>[11]</sup>提出对 CCD 信号采样位置进行自适应调整,实时监测 CCD 信号的相位变化,在线调整采样时钟相位来保证采样位置,其采样信号的选取依旧利用 CCD 驱动信号进行分压整形,带来了与上述同样的问题。

针对以上问题,本文首先对造成温度延时的链路进行分析,提出高分辨力遥感相机 CCD 采样位置自适应补偿技术;然后将该技术用于 CCD 成像中,并进行了相关实验。实验表明,相关双采样信号的采样位置与 CCD 信号在温度大范围变化

的情况下,仍能精密对准,保证了图像信噪比的稳定性,实现高质量成像。

## 2 CCD 采样位置自适应补偿

成像电子学 CCD 采样电路的设计中,CCD 驱动信号的时序与采样信号(SHP, SHD)的时序均由 FPGA 给出,其中 SHP 对复位区进行采样,SHD 对信号区进行采样。由于复位区与信号区的信号平坦区域非常小(几纳秒),因此采样位置的确定是相关双采样中最重要的工作,一旦采到其他位置会对图像质量有着很大的影响。在整个 CCD 采样链路中,驱动信号经过驱动器与 CCD 从而产生 CCD 视频信号,视频处理器通过采样信号对 CCD 视频信号进行采样从而得到图像数据。传统的设计中,采样时序信号由 FPGA 产生,直接通过视频处理器进行采样,如图 1 所示。实验表明,在两个链路中受温度影响而产生延时最大的是驱动器芯片,FPGA 与 CCD 器件受环境温度变化产生的延时非常小。由于只有驱动时序经过了 CCD 驱动芯片,这就带来了采样信号(SHP、SHD)与 CCD 信号在不同温度下会有不同的延时、信号之间无法跟随的问题。考虑到航天应用的可行性以及稳定性,在不引入过多电路的前提下,在采样信号链路中增加相同的驱动器芯片,使在不同的环境温度下,采样信号与 CCD 信号产生相同的温度偏移量,补偿驱动器产生的温度延时,达到相位动态跟随的效果,从而获取高质量的图像。该自适应补偿技术信号链路图如图 2 所示。

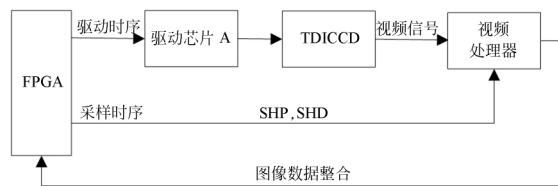


图 1 传统的 CCD 采样链路

Fig. 1 Traditional CCD sampling link

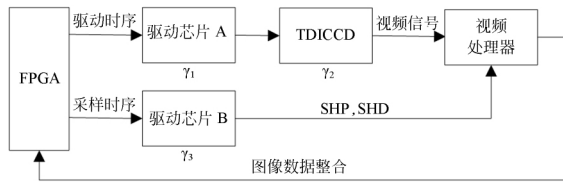


图 2 自适应补偿 CCD 采样链路

Fig. 2 Adaptive compensation CCD Sampling link

图 2 中采样信号与视频信号经过相同型号的驱动芯片,在温度发生大范围变化的时候,可以建立起一定的跟随关系。这里假设驱动时序链路上的驱动器 A 受到温度影响而产生的延时为  $\gamma_1$ ,采样时序链路上的驱动器 B 与 CCD 受到温度影响而产生的延时为  $\gamma_2$  与  $\gamma_3$ ,在温度变化时,两个链路的温度延时之差是一个温变值,将其定义为:

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

其中  $T$  为温度,在设计时将驱动芯片 A 和 B 选用同种类芯片,使得  $\gamma_1$  与  $\gamma_2$  基本一致,而 CCD 受到温度变化产生的信号延迟  $\gamma_3$  非常小,因此该设计使得两个链路之间的延迟  $\gamma_{\text{Delay}}(T)$  达到最小化,在  $(-25 \sim 60^\circ\text{C})$  的温度范围内,该延时最大仅为  $0.46\text{ ns}$ ,具体参见后续实验。

### 3 采样位置精密调节

CCD 采样链路中,驱动时序与采样时序均由一个 FPGA 给出,由于两个链路中的信号经过不同的走线与器件到达视频处理器,这会导致采样时两个信号之间存在一个固定的初始相位差。为了获取高质量的图像,需要对采样位置进行精密调节,使其对准于 CCD 信号的最佳位置。利用 DCM 的 PhaseShift 功能可以实现输入时钟的相位移动,以达到对采样位置的精密调节。DCM 的 PhaseShift 功能包括固定相位移动和可变相位移动,当采用可变相位移动时,可以动态实现输入信号的相位延时,延时时间定义为:

$$\text{PhaseShift}(ns) = \left(\frac{\text{PhaseShift Value}}{256}\right) * \text{CLKINperiod}, \quad (2)$$

其中:PhaseShift Value 的范围为  $-255 \sim 255$ , CLKINperiod 为 CCD 像元时钟周期。

使用相位延时后时钟对采样信号进行同步,即可实现采样位置的高精度延时,如图 3 所示。本文成像系统采用  $100\text{ M}$  时钟,因此调节精度可

达到  $0.039\text{ ns}(10\text{ ns}/256)$ 。在 CCD 的复位区和信号区之内调节采样位置 SHP 与 SHD,调节范围各为  $\pm 1\text{ ns}$ (信号平坦区),在该范围内调节到最佳位置。

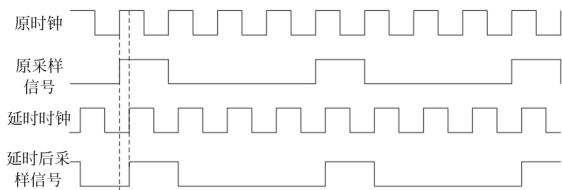


图 3 采样信号同步时序图

Fig. 3 Sampling signal synchronization timing

未进行精密调节时双采样初始相位误差约为  $2.3\text{ ns}$ ,采用本文方法精密调节后误差可小于  $0.039\text{ ns}$ 。

### 4 温度动态适应性实验与分析

为验证该方法的可行性,将带有自适应补偿技术设计与传统方法的两个测试系统进行对比成像。将两个测试系统放于高低温箱中,在常温下  $(25^\circ\text{C})$  分别对两个成像系统的初始采样位置 (SHP, SHD) 进行精密调节,保证两个系统在常温下初始采样位置都处在最佳点,成像质量良好。在  $-25 \sim 60^\circ\text{C}$  (空间相机地面环境试验测试温度) 的温度范围下对两个系统分别进行成像试验,并实时监测 CCD 采样位置。其中每副图像中左右两部分各为全色图像和多光谱图像。

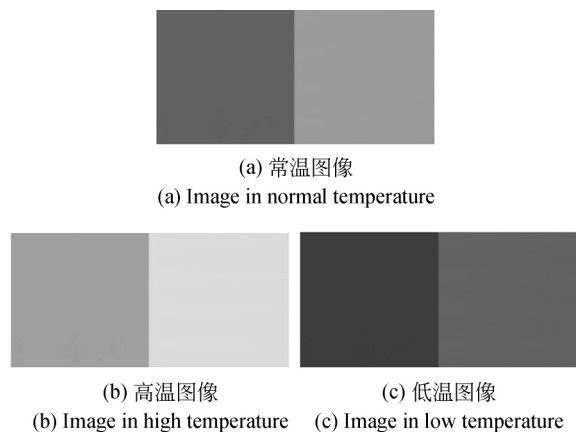


图 4 传统方法图像

Fig. 4 Image with and traditional method

从图 5 高低温图像与常温图像的对比可以看出,带有本文方法的测试系统在高低温下成像效果均良好,全色图像与多光谱图像均与常温对比没有明显变化。而传统方法的测试系统在高温和低温的情况下,图像的均匀性以及成像质量受到了温度的影响,在高温条件下,全色图像与多光谱图像均出现不同程度的饱和现象,低温条件下,图像较常温图像变暗,如图 4 所示。

图 6 是示波器采集的不同温度下传统方法中 CCD 信号与采样信号的相对位置图,高温时 CCD

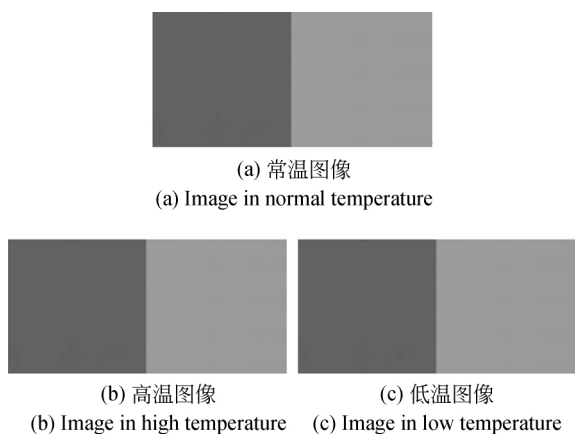


图 5 本文方法图像  
Fig. 5 Image with proposed method

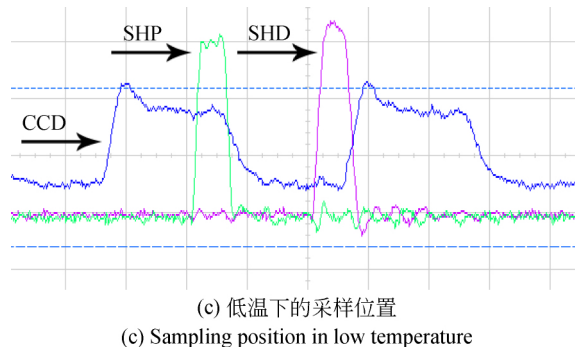
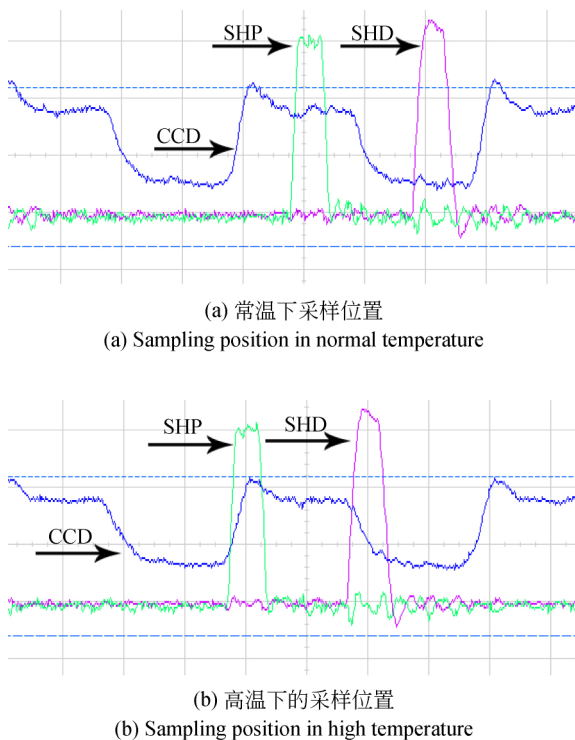


图 6 传统方法采样位置  
Fig. 6 Sampling position with traditional method

信号由于驱动芯片的原因,相位滞后于采样信号,导致采样信号 SHP 采到了 CCD 的复位电平上,图像数据出现错误。低温时 CCD 信号由于受到驱动芯片的影响,相位提前于采样信号,使采样信号 SHD 落在了下一个信号的上升沿,得到的图像偏暗。

在  $-25 \sim 60 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度范围下,对各温度点下的相关双采样信号采样位置与常温下 ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 的最佳位置之间的延时进行了测试,同时与传统方法的采样位置延时进行了对比,结果如图 7 所示。可以很明显的看出,在温度大范围变化时,本文方法的采样位置延时量远小于传统方法。其中采样位置受温度而产生的延时最大值为  $0.46 \text{ ns}$ ,采样信号依然落在 CCD 信号可采样范围之内,不会对成像质量造成影响。

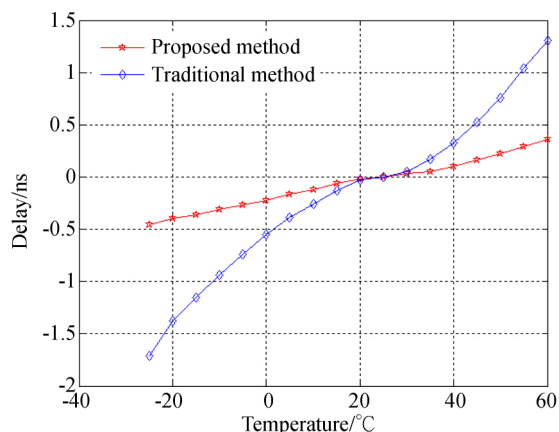


图 7 本文方法采样位置偏移量与传统方法采样位置偏移量  
Fig. 7 Sampling position offset with proposed method and traditional method

## 5 结 论

本文根据遥感相机在空间工作时大范围温度变化的现状,提出了遥感相机 CCD 采样位置自适应补偿技术。文中首先对成像链路中的温度延时进行了分析,针对延时电路给出了航天应用中可以实现的温度补偿方法,并对采样位

置进行初始精密调节。对本文的方法与传统方法进行了高低温试验对比及分析,试验结果表明:相关双采样信号的初始位置调节精度小于 0.039 ns;在-25~60 °C 的温度范围下,相关双采样信号延时最大值为 0.46 ns,保证了准确的采样位置,成像质量均为良好。该方法已在某空间遥感相机上得到了在轨应用,下传图像的质量良好。

### 参考文献:

- [1] 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[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2164-2172. (in Chinese)
- [2] 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.  
ZHENG L L, JIN G, QU H S, *et al.*. Space-borne CCD imagine circuit system with high signal-to-noise ratio[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 2027-2036. (in Chinese)
- [3] 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 came[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 901-904. (in Chinese)
- [4] 王德江, 董斌, 李文明, 等. TDI CCD 电荷转移对遥感相机成像质量的影响[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(10): 2500-2506.  
WANG D J, DONG B, LI W M, *et al.*. Influence of TDICCD charge transfer on imagine quality in remote sensing system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10): 2500-2506.
- [5] 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.  
LIU Z X, WAN ZH, LI X SH, *et al.*. Influence factors on SNR of TDICCD space camera[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 1829-1837. (in Chinese)
- [6] 夏巧桥, 胡正文, 张青林. 遥感相机快视高速可靠传输系统的设计与实现[J]. 光学 精密工程, 2018, 26(4): 971-979.  
XIA Q Q, HU ZH W, ZHANG Q L. Design and implementation of high speed and reliable transmission platform in fast view system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(4): 971-979. (in Chinese)
- [7] 吕恒毅. 遥感相机自动聚焦技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.  
LV H Y. *Autofocus Method for Remote Sensing Cameras* [D]. Changchun; Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, 2017. (in Chinese)
- [8] 牟妍娜, 王鹏, 尹娜. CCD 信号采样位置选取方法的研究[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(1): 45-50.  
MU Y N, WANG P, YIN N. Research on the method of selecting sample location about CCD video signal[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(1): 45-50. (in Chinese)
- [9] 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 & Automation*, 2009, 25(8): 143-144. (in Chinese)
- [10] 曲利新. 高分辨力遥感相机视频处理的温度适应性设计[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(11): 2800-2804.  
QU L X. Design of temperature adaptability for video processing in high-resolution remote sensing cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2800-2804. (in Chinese)
- [11] 潘卫军, 贺强民, 刘涛, 等. CCD 信号自适应采样方法的研究和实现[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(5): 0526003.

PAN W J, HE Q M, LIU T, *et al.*. Study and realization of adaptive sampling method for CCD sig-

nal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(5): 0526003. (in Chinese)

作者简介:



孙雪晨(1985—),男,吉林长春人,硕士,助理研究员,2008年于南京理工大学获得学士学位,2011年于华南农业大学获得硕士学位,主要从事空间遥感相机成像技术的研究。E-mail: jet0409@163.com



吕恒毅(1984—),男,辽宁省庄河市人,博士,副研究员,博士生导师,2007年于大连理工大学获得学士学位,2009年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,2017年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事航天遥感相机成像电子技术等方面的研究。E-mail: 284592423@qq.com