

CCD 信号自适应采样方法的研究和实现

潘卫军, 贺强民, 刘涛, 肖龙

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要: 由于受温度变化和器件老化影响, 空间遥感相机焦平面 CCD 信号的相位会发生变化, 尤其是在高速应用领域, 利用传统方法定标确定并固化的采样点参数不再适用, 极大影响了图像信噪比, 甚至造成图像不能正常显示。提出了一种针对空间相机焦平面 CCD 信号采样位置的自适应调整方法, 通过实时监测 CCD 信号的相位变化, 计算相应的采样位置调整量, 并在线调整了采样时钟的相位, 使 CCD 信号采样位置在其使用寿命期限中不同的温度环境下均能保持最佳状态, 从而保证图像信噪比的稳定。实验表明: 利用该方法, 可以实时测定 CCD 信号 100 ps 的相位变化, 并实时完成采样位置的调整, 即使工作温度大范围变化, CCD 信号采样位置的最佳状态也可得到有效保证。

关键词: 自适应采样; 电荷耦合器件; 相位监测; 遥感相机

中图分类号: TN202 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0526003

Study and realization of adaptive sampling method for CCD signal

Pan Weijun, He Qiangmin, Liu Tao, Xiao Long

(Beijing Institute of Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: The phase of space remote-sensing camera CCD signal varies slightly with the temperature shift and the aging of devices. Especially in the field of high speed applications, the change of analog signal phase is non-negligible so that the sampling positions which are determined and programmed with traditional method are no longer suitable. So the SNR of image drops drastically and even in some worse cases images cannot be displayed normally. To solve the problems mentioned above, an adaptive adjustment method for sampling position of space camera CCD signal was proposed in this paper. With the proposed method, the real-time phase variation of CCD analog signal was monitored and the variation parameters of sampling position were calculated. With the calculated sampling position parameters, the circuit adjusted the phase of sampling clocks on line. The sampling position can remain in optimal state although the temperature varied in large range in the life span of the camera and the SNR of images kept high stably. Tests show that with this method, phase variation of less than 100 ps can be detected and the sampling positions keep in optimal state. So the method is effective and has a good application prospect in the field of high resolution remote sensing cameras.

Key words: adaptive sampling; CCD; phase monitoring; remote-sensing camera

收稿日期: 2015-09-11; 修订日期: 2015-10-20

基金项目: 国防预研项目

作者简介: 潘卫军(1979-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事空间光学成像电路设计方面的研究。Email: jandycool@163.com

0 引言

信噪比(SNR)是影响 CCD 相机性能的重要指标,其受到众多因素的影响,其中 CCD 信号采样位置参数的设定是否合适,直接影响了图像的信噪比,甚至会影响图像的正常显示。因此,CCD 信号采样点位置的确定和设置是相机研制过程中的一项重要内容^[1]。

传统的 CCD 信号采样位置确定方法是通过全采样位置扫描得到相应的信噪比,通过信噪比比较,将信噪比相对平缓的采样点簇的中间位置作为最终确定的采样点位置参数,并将该位置参数进行固化,作为相机整个生命周期中的采样位置参数。传统的 CCD 信号采样位置参数一旦设定,就无法改变,而器件延迟特性会受温度及老化影响,最初设定的最佳采样点位置发生相对偏移,从而影响了图像的信噪比。尤其对于高分辨率空间相机,CCD 信号频率达到数十兆赫,其合适的采样点位置区间仅有数纳秒,一旦发生采样点偏移,很可能造成 CCD 信号的采样错误^[2-3]。

曲利新^[4]提出将驱动器的输出信号经过分压和整形作为采样信号的时序基准,减小链路环节,补偿温度引起的延时变化,提高了采样位置的稳定性,但模拟信号与驱动信号的相位关系,受器件离散特性的严重影响,且通过阻容调整延迟,无法长时间内保持一致的特性。文中提出一种基于 CCD 信号相位实时监测,在线计算采样点位置的方法,通过该方法可以解决传统方法无法在线调整采样点参数的弊端。通过直接监测 CCD 信号的相位调整采样点位置,可以最大限度地消除 CCD 信号链路上的延迟特性影响。其中 CCD 信号的相位监测,采用了高精度飞时(Time of flight, TOF)测量技术,其测量精度可以达到 100 ps。该方法适用范围广,尤其适用于高分辨率相机中高速像元频率的应用领域。

1 CCD 信号自适应采样技术原理概述

图 1 为文中提出的 CCD 信号自适应采样电路的信号链路示意图。

将驱动信号进行分压和整形处理,作为表征 CCD 信号相位的信号——相位信号。

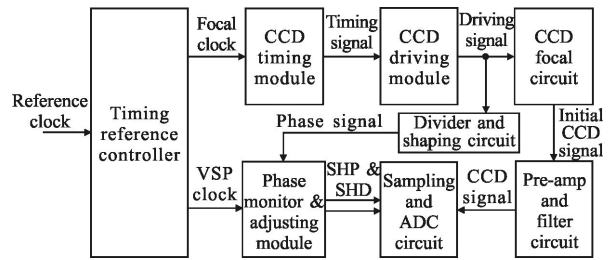


图 1 CCD 信号自适应采样电路的信号链路

Fig.1 Delay chain of CCD signal for adaptively sampling circuit

如图 2 所示,相位信号输入到相位监测及自适应采样调整模块,模块内有基准信号,该信号周期等于像元周期 T 。而相关双采样时钟的位置,是相对于基准信号的相位关系,即 t_{SHP} 和 t_{SHD} 。采样点位置满足以下关系:

$$t_{SHP} = \Delta t + t_2(t, a) \quad (1)$$

$$t_{SHD} = t_{SHP} + \tau = \Delta t + t_2(t, a) + \tau \quad (2)$$

式中: Δt 为基准信号与相位信号的相位差; $t_2(t, a)$ 为采样点位置相对于相位信号的延迟; τ 为相关双采样后采样时钟 SHD 相对前采样时钟 SHP 的相位延迟。对于像元频率确定的 CCD 信号,其最佳采样点位置相对于相位信号的延迟 $t_2(t, a)$ 及相关双采样时钟延迟 τ 是固定的^[5]。

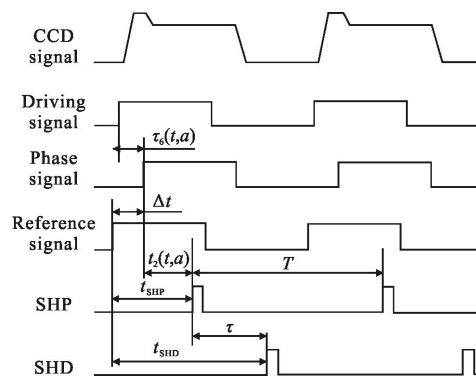


图 2 采样时钟与 CCD 信号相位关系示意图

Fig.2 Phase relationship of sampling clocks and CCD signal

即:

$$\Delta t_{SHP} = \Delta t_{SHD} = \Delta(\Delta t) \quad (3)$$

通过测量基准信号与相位信号的相位差 Δt 的变化量,就确定了采样点 t_{SHP} 和 t_{SHD} 的变化量。 Δt 的变化量采用高精度飞时测量技术。

高精度飞时测量的原理如图 3 所示。 Δt 由 3 个时间参数组成。其一为通过高频时钟得到的计数器

T_{cnt} 为“粗测”时间量,其精度为计时钟周期;其二为内部基准信号到下一个计时钟上升沿的延时 t_a ;其三为相位信号到下一个计时钟上升沿的延时 t_p 。后两个时间参数 t_a 、 t_p 是通过高精度延迟链测量得到的“精细”时间量。

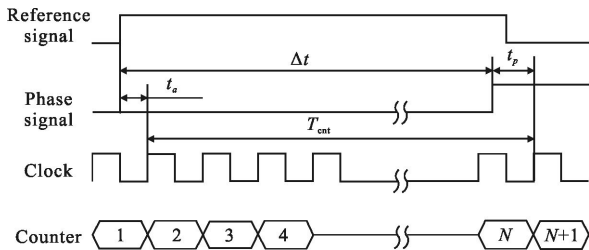


图 3 高精度飞时测量原理示意图

Fig.3 Schematic diagram of high precision measurement for TOF

通过测量得到的 3 个时间参数,通过公式(4)得到基准信号到相位信号的延迟时间 Δt ^[6]。

$$\Delta t = T_{cnt} + t_a - t_p \quad (4)$$

2 CCD 信号自适应采样实现

如图 4 所示,为相位监测及自适应采样调整模块的原理框图。

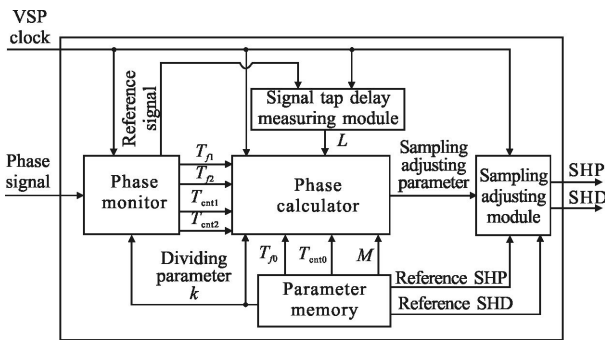


图 4 相位监测及自适应采样调整模块原理框图

Fig.4 Schematic diagram of phase monitoring & adaptive adjusting module

该模块由 5 个功能模块组成,分别为:相位监测模块实时监测相位信号及基准信号的相位量;单环节延迟时间测量模块,用于测量信号在延迟链中单个时钟周期时所传输的延迟节点数;参数存储模块用于存储基本工作参数,包括分频参数 k 、像元周期采样点数 M 、默认粗调参数、默认细调参数、基准 SHP 位置参数以及基准 SHD 位置参数;相位计算模

块通过相位监测模块测量得到的相位量,单周期时钟延迟环节测量模块测量得到的 L 以及参数存储模块存储的各工作参数,计算得到采样位置需要调整的参数量;采样位置调整模块则根据相位关系计算模块得到的调整量,调整采样时钟 SHP 及 SHD 的相位关系,从而完成 CCD 信号的自适应采样调整功能。

2.1 相位监测模块的设计实现

利用 FPGA 实现 CCD 信号采样位置调整,关键在于实现对 CCD 信号的相位变化量的测量,以及相位变化到采样位置参数的转换。如图 5 所示,为实现相位测量的功能模块。其实现原理表述如下:

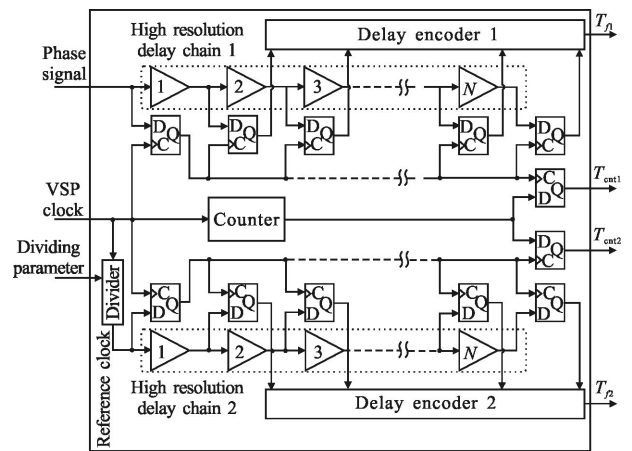


图 5 相位监测模块原理框图

Fig.5 Schematic diagram of phase monitoring module

信号处理时钟经过分频器得到与像元时钟同频的基准信号,同时信号处理时钟驱动计数器进行累加计数。相位信号和基准信号分别通过对应的高精度延迟链,每个延迟链节点分别与寄存器相连接。同时,信号处理时钟分别对相位信号和基准信号进行采样,采样得到的相位信号上升沿,将对应的高精度延迟链各节点寄存器及计数器值进行锁存,分别作为相位信号的精细相位值 T_{r1} 和“粗测”相位值 T_{cnt1} ;同样,在采样得到的基准信号上升沿,将对应的高精度延迟链各节点寄存器及计数器值进行锁存,分别作为基准信号的精细相位值 T_{r2} 和“粗测”相位值 T_{cnt2} 。

2.2 单环节延迟时间测量模块的设计

“粗测”相位量是以信号处理时钟周期为计时单位,而精细相位量是以单节点延迟量为计时单位。要得到精确的相位量,必须得到以上两类不同计时单位之间的转换关系。图 6 即为测量单环节延迟时间的原理示意图。

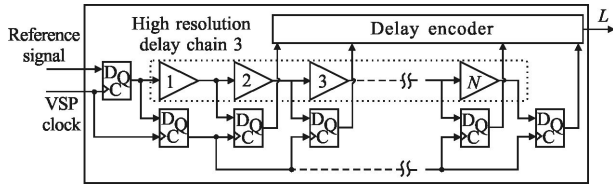


图 6 单环节延迟时间测量原理示意图

Fig.6 Schematic diagram of single tap delay measuring module

基准信号在信号处理时钟驱动下, 经过两级 D 触发器延迟, 第一级延迟信号进入高精度延迟链, 第二级延迟信号的上升沿将各延迟节点寄存器进行锁存, 通过对寄存器进行计算和判断, 可以得到单个信号处理时钟周期内, 信号在高精度延迟链中传输的节点数 L 。

2.3 相位关系计算模块的设计实现

完成“粗测”计时单位与“精细”计时单位之间的转换后, 需要进一步得到相位量与采样位置间的转换关系。这一关系是通过分频系数 k , CCD 信号等分区间数 M 以及单信号处理时钟周期内传输的节点数 L 建立起来的。即一个采样点区间所占的时间与单个延迟节点平均延迟时间的比值关系为: $G_T = kL/M$ 。

根据以上关系, 相位关系计算模块可求出相位变化量后需要调整的采样位置量 ΔP 。

$$\Delta P = [(T_{cn1} - T_{cn2} - T_{cn0}) \times L + (T_{f1} - T_{f2} - T_{f0})] \times \frac{1}{G_T} \quad (5)$$

式中: 默认粗调参数 T_{cn0} 和默认细调 T_{f0} 为定标测得的基准信号与相位信号之间的相位差。定标测得的最佳前、后采样点位置分别作为基准 SHP 位置参数和基准 SHD 位置参数, 并与上述分频参数 k 、CCD 信号等分区间数 M , 默认粗调参数 T_{cn0} 和默认细调 T_{f0} 一起存储于参数存储模块, 以供相位关系计算模块计算时调用。

采样位置调整模块根据相位关系计算模块计算所得的采样位置调整量 ΔP 进行采样位置调整, 从而完成 CCD 信号自适应采样调整。

3 实验验证

如图 7 所示, 为实验验证系统图, 其中 (a) 为测试系统, 包括电源、温控箱、测试电路以及图像采集设备; (b) 为测试电路。

将测试电路放于温控箱内, 常温下 (25 °C), 分别确定 CCD 相位信号与基准信号的延迟参数, 单信号

处理时钟周期传输节点数, 最佳采样点位置, 默认粗调参数、默认细调参数、基准 SHP 位置参数及基准 SHD 位置参数。然后调整温度变化, 利用相位监测模块, 在各温度下采用多次测量取平均值的方式, 分别测量相位信号的相位量均值 \bar{P} 及标准均方差 σ_P , 单信号处理时钟周期传输节点数均值 \bar{L} 及标准均方差 σ_L , 并分别利用传统方法和文中方法, 进行图像采集, 比较相应的信噪比^[7], 如表 1 所示。



(a) 验证测试系统图

(b) 测试电路图

(a) Photo of test system

(b) Photo of test circuit

图 7 实验验证系统实图

Fig.7 Real image of test and verification system

表 1 各温度下 CCD 信号相位及信噪比比较

Tab.1 Comparison of CCD signal phase and SNR

| Temperature / °C | \bar{L}/σ_L /delay tap | \bar{P}/σ_P /delay tap | Traditional method SNR/dB | Proposed method SNR/dB |
|------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|
| -35 | 106.2/0.63 | 2.8/0.42 | 33.1 | 48.7 |
| -25 | 105.3/0.48 | 14.7/0.48 | 38.8 | 48.9 |
| -15 | 104.8/0.42 | 27.1/0.57 | 41.6 | 49.3 |
| -5 | 104.4/0.52 | 36.9/0.57 | 47.6 | 49.3 |
| 5 | 104.0/0.47 | 47.0/0.47 | 49.5 | 49.2 |
| 15 | 103.6/0.52 | 55.1/0.57 | 49.6 | 49.6 |
| 25 | 103.3/0.48 | 64.2/0.42 | 48.7 | 49.3 |
| 35 | 102.9/0.57 | 70.8/0.42 | 54.9 | 49.6 |
| 45 | 102.3/0.48 | 78.2/0.42 | 62.5 | 49.5 |
| 55 | 102.5/0.53 | 86.9/0.57 | 67.9 | 49.3 |
| 65 | 101.4/0.52 | 95.1/0.57 | ∞ | 49.0 |
| 75 | 100.6/0.70 | 103.1/0.74 | ∞ | 48.8 |

经过分析, 高温 75 °C 时, $L=100.6$, 低温 -35 °C 时, $L=106.2$ 。根据信号处理时钟的周期 8.33 ns, 可知高低温其单个节点的平均延迟分别为 82.8 ps 和 78.4 ps, 即随着温度升高, 其单个节点的延迟时间会

略微增加。同时根据表 1 所示,测试数据的标准均方差均在 1 个延迟链延迟时间以内,表明利用高精度延迟链可以测量低于 100 ps 的相位变化。

从图中可以看出:利用文中提出的采样位置自适应调整技术,可以保证在较大的温度范围内,图像均保持清晰,信噪比较高且稳定,图 8(d)、8(e)、8(f)分别

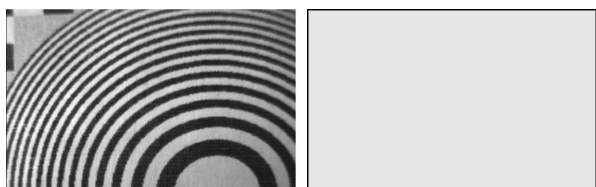
饱和^[8],如图 8(b)所示。低温时,由于 CCD 信号相位相对提前,使采样时钟的相位过于偏后,后采样时钟可能落在了下一个 CCD 信号的复位信号的上升沿,使图像较暗,信噪比偏低,如图 8(c)所示。

4 结 论

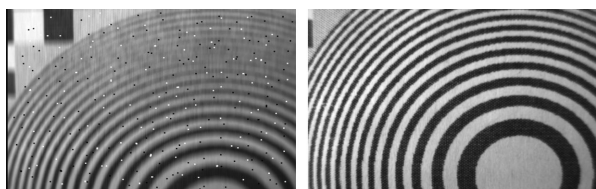
文中提出了一种基于 CCD 信号相位实时监测,并在线自适应调整采样位置参数的方法。文中,首先分析了采样位置和 CCD 信号的相位关系和高精度飞时测量技术原理。并在此基础上,提出了基于 FPGA 采样位置自适应调整技术的实现方法。最后,通过高低温下的测试结果显示,利用该方法,可以监测 CCD 信号 100 ps 的相位变化,在大范围温度变化下,能有效保证采样位置的最佳状态,图像信噪比也得以有效保证。

参考文献:

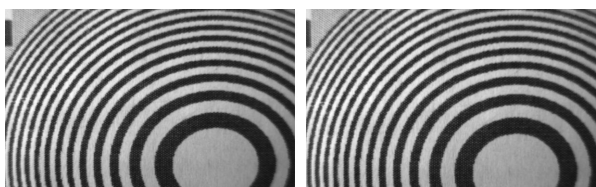
- [1] Xu Xiuzhen, Li Zitian, Xue Lijun. Analysis and processing of CCD noise [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(4): 343-347. (in Chinese)
- [2] Zhang Xiaohui, Han Changyuan, Han Bing. Evaluation of general image quality of transfer optical remote sensing CCD camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 696-698. (in Chinese).
- [3] Wang Shishen, Sui Xiubao, Chen Qian, et al. High speed HD CCD adaptive correlated double sampling technique [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43 (1):155-159. (in Chinese)
- [4] Qu Lixin. Design of temperature adaptability for video processing in high-resolution remote sensing cameras[J]. *Opt Precision Eng*, 2011, 19(11): 2800-2804. (in Chinese)
- [5] Wey H M, Guggenbuhl W. An improved correlated double sampling circuit for low noise charge-coupled devices [J]. *IEEE Transactions on Circuit and Systems*, 1990, 37(12): 1559-1565.
- [6] Feng Zhihui, Liu Enhai. High-accuracy TDC for laser range finder[J]. *Opt Precision Eng*, 2010, 18(12): 2665-2671. (in Chinese)
- [7] 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)
- [8] Brian Kern. Charge-Injection noise in CCDs [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2006, 53(10): 2478-2484.



(a) 传统方法常温采集图像 (b) 传统方法高温采集图像
(a) Image captured in normal temperature with traditional method (b) Image captured in high temperature with method traditional



(c) 传统方法低温采集图像 (d) 文中方法常温采集图像
(c) Image captured in low temperature with traditional method (d) Image captured in normal temperature with proposed method



(e) 本方法高温采集图像 (f) 文中方法低温采集图像
(e) Image captured in high temperature with proposed method (f) Image captured in low temperature with proposed method

图 8 自适应采样方法与传统方法之间的采集图像对比

Fig.8 Comparison of images captured with adaptive adjusting method and traditional method

为采用文中方法,在常温、高温和低温下得到的图像,图像之间没有明显的变化。而用传统方法,图像信噪比差异较大,高温时,信噪比甚至会达到 ∞ ,低温时,信噪比则严重恶化。分析原因,是由于高温时,CCD 信号相位滞后严重,使得前采样时钟 SHP 落在了 CCD 信号的复位电平上,信号超出 AD 的量化范围,图像