

基于 FPGA 的全帧型面阵 CCD 航空相机像移补偿

任 航

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘 要: 通过对全帧型面阵 CCD 像移补偿时序的分析, 利用 FPGA 作为像移补偿时序发生器, 设计了其驱动系统。以全帧型面阵 CCD 芯片 FTF4052M 为例, 给出了利用 FPGA 作为像移补偿时序发生器的设计方法, 并完成了像移补偿时序电路的软件仿真及其硬件电路测试, 在实际 CCD 成像中验证了像移补偿效果。实验证明该方法能够实现全帧型 CCD 相机的像移补偿。

关键词: 像移; FPGA; 全帧型面阵 CCD; 时序

中图分类号: TN386.5 文献标识码: A 文章编号: 1001-5868(2011)05-0740-05

Image Motion Compensation Of Full Frame Focal Plane CCD Camera Based on FPGA

REN Hang

(Changchun Institute of Optics, FineMechanics andPhysics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, CHN)

Abstract: Based on analysing the timing of the image motion compensation of full frame focal plane CCD camera, and using FPGA as the timing device, the design method of the driving system was given. Taking such CCD chip FTF4052M as the subject, software simulations on the timing circuit and tests on the hardware circuit were made, and the compensation result was verified in practical CCD imaging.

Key words: image motion compensation; FPGA full frame focal plane CCD camera; timing

0 引言

目前, 工作中低轨道的空间相机中所使用的可见光成像器件多为线阵 CCD 或 TDICCD, 在每次曝光时间内获得的地面图像信息有限, 同时, 随着面阵 CCD 工艺和应用技术上的逐渐成熟, 使得在中低轨道空间相机中采用面阵 CCD 作为成像器件成为现实。而在使用面阵 CCD 作为中低轨空间相机成像器件时, 由于在曝光时间内, 相机和目标存在相对运动, 目标在焦平面上所成的像是变化的, 即运动像移, 使得运动方向上不同目标的像相互混叠, 从而降低图像品质, 因此需要在曝光时间内进行像移补偿, 减小运动像移对图像品质的影响。

FPGA 因其设计的灵活性和设计简单性已经广泛地应用在 CCD 驱动电路设计上, 用于产生 CCD

的工作时序。如果我们利用 FPGA 产生 CCD 的驱动时钟, 则可以将其设计为频率可变, 当曝光时, 根据像移速度的大小, 让时钟以与像移速度比较接近的频率工作, 即电荷垂直转移的速度与像移的速度一致, 曝光结束后, 恢复到正常的转移速度, 则可以达到更高的行像移补偿精度。

本文以 FTF4052M 全帧型面阵 CCD 为例, 完成了像移补偿时序电路的软件仿真和硬件电路测试, 在实际 CCD 成像电路中验证了像移补偿时序。

1 电子像移补偿的时序分析

在航空相机中常用的像移补偿有光学像移补偿、机械像移补偿、电子像移补偿和软件像移补偿方法。光学像移补偿和机械式像移补偿都需要额外的机械结构进行辅助, 软件像移补偿需要的计算量较大, 还没有做到完全实时补偿; 对于以 CCD 作为成像器件的空间相机而言, 使用电子像移补偿方法不

收稿日期: 2011-04-06.

基金项目: 国防科技基础预研基金项目.

需要额外的机械结构辅助,只需要针对具体 CCD 器件采用电荷转移驱动技术来控制积分时间内 CCD 的电荷转移速度,就可以进行像移补偿。

1.1 全帧型 CCD 器件 FTF4052M 结构特点及驱动要求

如图 1 FTF4052M 是一款具有垂直抗晕结构的高分辨率大面阵全帧 CCD 图像传感器,具有面阵大(36 mm×48 mm)、分辨率高(4008×5344)、填充因子高(100%)、动态范围大(大于 72 dB)、像元输出速度快(最大 27 MHz)、电荷转移效率高(0.999 999)等优点,非常适合作为科学级相机的图像传感器。芯片中占绝大部分面积的区域是光敏区,采用四相电极结构,每个像元由栅极 A1~A4 构成;光敏区上下两端各有 6 个遮光行,左右两边各有 24 个遮光列;芯片上端和下端各有一个水平输出寄存器,采用三相电极结构,每个像元由栅极 C1~C3 构成;水平输出寄存器和图像区之间有一个能独立控制的转移栅极 TG;每个输出寄存器的两端各有一个输出放大器,采用浮置扩散输出结构;输出放大器之前是输出栅 OG 和水平像元合并栅极 SG;输出放大器复位管栅极是 RG^[1]。

FTF4052M 的驱动时钟主要有:图像区电极驱动时钟 A1~A4 和 TG;水平输出寄存器电极驱动时钟 C1~C3 和 SG;复位管栅极驱动脉冲 RG 和全帧复位脉冲 NSCR。其时序从功能上可以分为帧转移、行转移和像素转移三种。帧转移时序用于驱动 CCD 完成一帧图像的转移输出,行转移时序用于驱动 CCD 图像区电荷垂直转移一行,像素转移时序用于驱动 CCD 水平输出寄存器电荷水平转移一个像素,进行光积分时,机械快门开启,首先给 N 衬底施加一个正脉冲 NSCR 实现全帧复位(FTF4052M 具有垂直抗晕结构),然后给栅极 A2~A3 施加高电平,给 A1/TG 施加低电平,使光生电荷被收集到 A2~A3 下面的势阱中,光积分时间为 NSCR 结束时刻到快门完全关闭的时刻;光积分结束后,CCD 进入电荷转移输出阶段,交替进行垂直行转移和水平像素转移,垂直行转移时 A1~A4、TG 交迭变化,水平像素转移时 C1~C3、SG 连续交迭变化,RG 在每次电荷包注入到检测栅之前将检测栅上的电荷清除掉。电荷全部输出完毕后,CCD 进入空闲阶段,等待下一帧的拍摄^[5]。

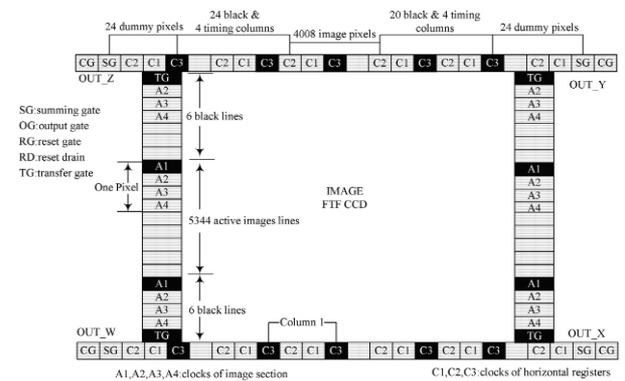


图 1 FTF4052M 结构图

1.2 电子式像移补偿法时序分析

在垂直拍照的面阵 CCD 航拍相机中, CCD 焦平面中心点上的像移速度 v 为: $v = f \frac{V}{H}$, 其中 f 是相机焦距, V 是飞行速度, H 是飞行高度。以像面中心点进行像移补偿, 计算可得像面上任一点像移残差小于 1/3 像元。

传统电子像移补偿是通过修改 CCD 光积分期间的垂直转移驱动时钟实现的: CCD 进行正常光积分时, 光敏区各电极的驱动时钟保持不变, 进行电子像移补偿时, 则每隔一定时间改变一次驱动时钟, 驱动电荷包沿像移方向转移一行, 时间间隔由下式计算: $\Delta t = \frac{w}{v}$ 其中 w 是列方向的像元尺寸, v 是像移速度。

图 2 给出了 FTF4052M 进行传统电子像移补偿时曝光期间垂直转移时钟的时序图, 其中 SHUT 是快门触发信号, 当其为高电平时快门开启; A1~A4、TG、VA high 是垂直转移驱动时钟及转移时钟高电平控制信号。曝光期间驱动时钟 A1~A4^[2] 根据像移速度驱动电荷包以行为步长进行转移, 跟踪像的移动; 每转移完一行, 水平转移驱动时钟驱动输出寄存器中的电荷进行读出。曝光结束后则按照正常的读出时序工作。

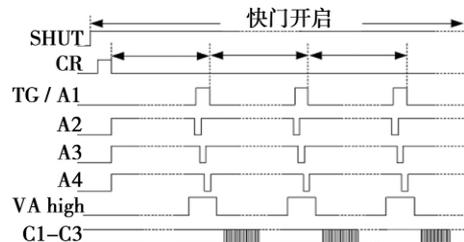


图 2 电子像移补偿曝光期间垂直转移驱动时序

2 像移补偿时序设计

本文以 FPGA 作为时序产生芯片,采用 VHDL 语言设计 CCD 时序,软件平台为 ISE。其中帧转移时序与像移补偿有关,所以只考虑帧转移时序设计

2.1 驱动系统设计

整个驱动系统分为 3 个功能模块来进行分别处理。它们分别为时钟管理模块(模块 1)、电荷复位和转移控制模块(模块 2)和帧转移模块(模块 3),各功能模块的关系如图 3 所示^[1]。模块 2 为光积分时间及快门控制,通过拍照指令产生 CR 脉冲信号,对 CCD 进行初始化,并生成一个在光积分期间保持高电平的使能信号 ENA,此信号将分别发送至模块 1 和模块 3。模块 1 将外部时钟转换为系统所需要的时钟,从而产生帧转移所需频率脉冲信号。

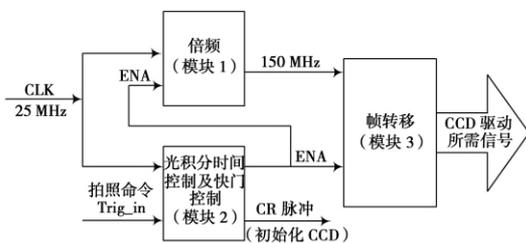


图 3 驱动系统流程

2.2 帧转移模块设计

这也是 3 个模块中最为重要和复杂的模块。其原理主要是利用 3 个计数器进行相互嵌套从而产生所需的驱动信号,如图 4 所示。根据各路时序脉冲和系统检测的要求,在此设计了 3 个计数器分别对基准时钟进行同步计数,实现 C1~C3、A1~A4 的脉冲时序。每个时钟各用一个进程来实现,按照各自时序特点进行编写。这便于后期的调试和修改。3 个计数器(SEL1、SEL2、SEL3)分别对 6、4764 和 6 进行计数。首先是 C 信号的生成,通过 SEL1 和 SEL2 两个计数器的作用,检测 ENA 的值,当其为低电平时,则输出 C 信号均为低电平。反之若 ENA 为高电平,则继续检测 SEL2 的值,当其满足大于等于 683 的情况时(这个值可通过图 3,图 5 得出),则通过 sen 相应的值而得出 C1~C3 的值;相应地,A1~A4 的值也和 C 信号的生成相类似。通过检测 ENA 的值,当其为低电平时,则分别赋予 A1~A4 相应的值^[1]。反之若 ENA 为高电平,则将时钟 6 分频后作为一个进程的时序脉冲,然后根据 SEL2 的变化而赋予 A1~A4 不同时刻的相应值。同样,值得注意

的是,各个计数器是对基准时钟进行同步计数的,在计数器为 0 重新开始计数时,各个计数器还需与初始计数值保持一致,否则会导致 CCD 工作时的不稳定。至此,就完成了对 CCD 各路工作驱动时钟的编写。各路时序之间的对应关系,可通过波形仿真结果,对这 3 个计数器的计数值进行修改即可。CCD 时序的波形仿真结果及分析完成 CCD 的各路工作驱动时序的 VHDL 语言编写后,程序下载到 FPGA 芯片前,进行了波形仿真^[3-4]。

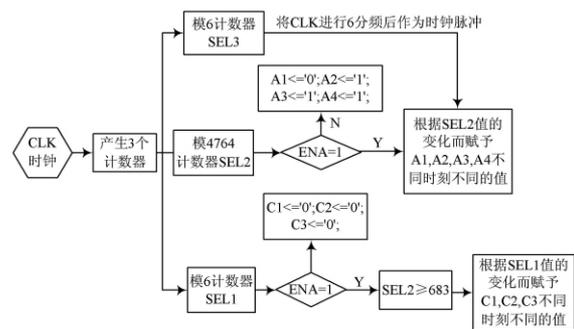


图 4 帧转移模块

2.3 像移补偿实现

通过加入一个调节信号 adjust,从而可以控制曝光过程中 FTF4O52M 垂直转移速度与要求的补偿速度一致,实现像移补偿的目的。当 adjust 为高电平时,FPGA 内部的计数器暂停计数,所有输出信号保持在 adjust 由低电平变为高电平时刻的状态,等 adjust 再由高电平返回低电平时,计数器恢复计数,所有输出信号恢复到进入原来的状态正常输出。它需要机械快门的准确配合和调节信号的准确控制。当主控系统的微处理器接到拍照命令后,读取飞机的速高比值 λ ,并读出测光值确定曝光时间 t ,然后计算调节信号 adjust 变为高电平的次数 N 和每次休眠时间长度 T (即调节信号 adjust 的高电平宽度)^[6]。

根据理想光学系统的成像原理,可以推算出像移补偿的速度 v 移为前向像移速度, $V = f \cdot \frac{V}{H}$, 根据像移补偿速度和曝光时间,可以确定转移一行积分电荷的时间 t ,并算出曝光过程中,暂停脉冲的个数 m ,暂停脉冲的宽度 p ,计算过程分别为式 $t = \frac{\omega}{V}$, t 为转移一行积分电荷的时间,单位为 s, ω 为像元尺寸,单位为 μm ,曝光过程中暂停脉冲的个数为 m , $m = T_{\text{曝光}}/t$, t 为暂停脉冲的个数。 $T_{\text{曝光}}$ 为快门曝光的时间,单位为 s,曝光过程中暂停脉冲的宽度 p

$=t-t_0$, p 为暂停脉冲宽度,单位为 s , t_0 为转移读出一行的时间,单位为 s 。

微处理器控制机械快门打开,发出 Trig-in 信号。当 CR(Charge Reset)脉冲下降沿到来后 CCD 开始曝光,处理器将根据 N 和 T 的值进行处理,在适当的时刻发出一定宽度的调节信号 adjust。当曝光时间结束时,微处理器控制机械快门进行关闭。其仿真时序图如图 5 所示。可看出此时序符合 CCD 芯片的 datasheet 要求。

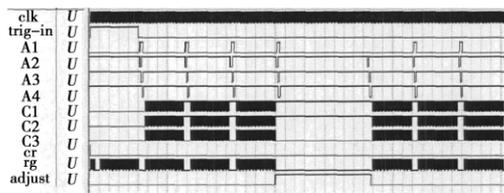


图 5 像移补偿仿真时序图

这种像移补偿的关键在于怎样实现曝光过程中的垂直转移速度的控制,图 6 是曝光控制的时序图。机械快门打开后,输出 CR 脉冲控制光电荷开始曝光。像移补偿时,一行光电荷积累完毕,垂直转移这一行电荷,然后继续曝光停止转移。继续曝光停止转移的时间就是暂停脉冲的宽度,综上所述,合理控制暂停脉冲的宽度,完全可以达到控制。

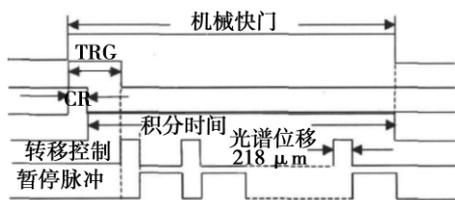


图 6 曝光时序图

3 像移补偿时序验证

完成像移补偿积分时序的设计后,需要对其在实际电路中进行验证。为了验证改进的 CCD 电子像移补偿方法的实际补偿效果,使用所设计的 CCD 驱动电路系统进行了室内实拍实验。在对像移补偿时序进行验证时,采用固定 CCD 成像电路,转动目标图像的方法,将 CCD 成像电路固定,将图像固定在匀速率转动的转台上,随转台一起运动,在转移行数固定的情况下,采用不同的像移补偿速度,采集运动的靶标图像来验证像移补偿时序。验证平台如图 7 所示。

CCD 成像电路和镜头固定在靶标前面的适当位置,调节镜头,使得相机成像最为清晰;CCD 成像

电路与控制计算机连接,控制计算机通过 RS232 串口控制电路工作,然后从图像采集卡接口接收采集的图像。相机电路接收 RS232 串口发送的补偿速度和转移行数的指令数据,产生相应的 CCD 时序信号;控制计算机通过图像采集接口采集图像,利用 Matlab 工具分析采集到的图像数据。

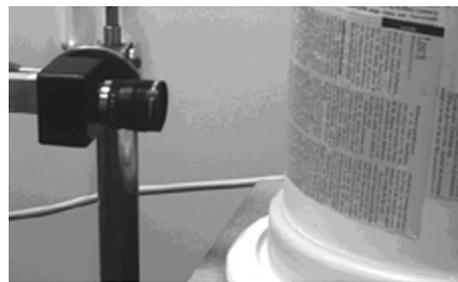
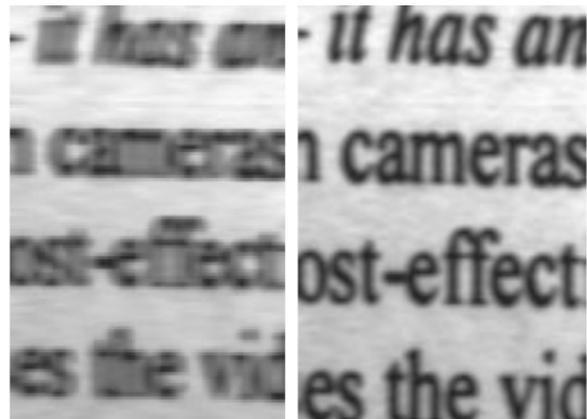


图 7 像移补偿验证平台

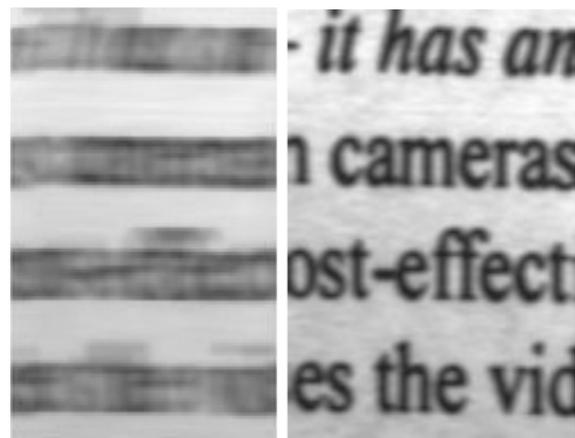
实验时对转动的传送带进行拍摄,分别采集不同转速下未进行像移补偿和进行了像移补偿的图像,图 8 给出了拍摄所得的一系列图像的局部图,拍摄时快门时间为 35 ms。



(a) 没有像移补偿

(b) 像移补偿后

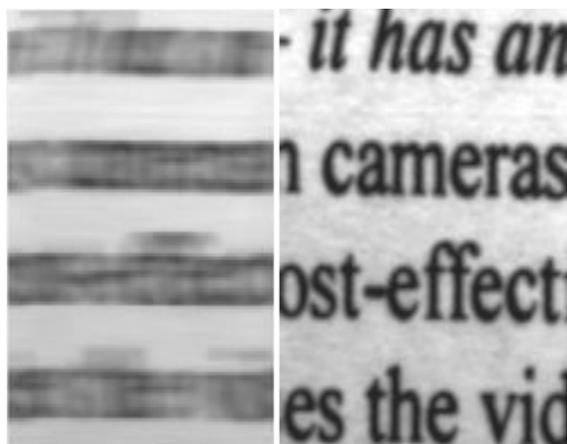
模拟像移速度为 3.868 $\mu\text{m}/\text{ms}$



(c) 没有像移补偿

(d) 像移补偿后

模拟像移速度 12.260 $\mu\text{m}/\text{ms}$



(e) 没有像移补偿 (f) 像移补偿后

模拟像移速度 $33.727 \mu\text{m}/\text{ms}$

图 8 不同像移速度下使用改进的电子像移补偿前后图像对比

图 8(a)和(b)分别是像移速度为 $3.868 \mu\text{m}/\text{ms}$ 时未进行和进行了像移补偿所得的图像;图 8(c)和(d)分别是像移速度为 $12.260 \mu\text{m}/\text{ms}$ 时未进行和进行了像移补偿所得的图像;图 8(e)和(f)分别是像移速度为 $33.727 \mu\text{m}/\text{ms}$ 时未进行和进行了像移补偿所得的图像。

从图 8 可以看出,随着像移速度的逐渐升高,曝光时间内图像的像移量越来越大,图像的拖影模糊越来越严重,图 8(c)和(e)中图像已经完全不可分辨。而使用本文提出的电子像移补偿方法后,在不同的像移速度下都获取了清晰的图像,可见该电子像移补偿方法能取得很好的补偿效果。

4 结语

经过计算机仿真和室内实拍验证,采用本文提出的像移补偿技术能取得很好的补偿效果。该方法实现简便,只需修改曝光期间 CCD 的垂直转移时序,而不必修改 CCD 外围驱动电路,同时避免了使用复杂的光机结构和运动部件,使相机的复杂度大大降低,可靠性增强。该方法为电子像移补偿时序的工程实用奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] 刘凯,刘波,曹剑中,等.基于 CPLD 的全帧型 CCD 图像传感器驱动系统设计[J].现代电子技术,2009,32(6):186-189.
- [2] DALSA. FTF4052. M22M. Full-Frame CCD Image Sensor[EB/OL]. <http://www.dalsa.com>,2007.
- [3] 盛翠霞.高分辨率 CCD 芯片 FTF4052M 的驱动系统设计[J].光学精密工程,2007,15(4):564-569.
- [4] 刘凯.高分辨率 CCD 相机驱动及图像传输研究[D].西安:中国科学院西安光学精密机械与物理研究所.
- [5] 刘光林,杨世洪,吴钦章,等.高分辨率全帧 CCD 相机电路系统的设计[J].中国科学院研究生院学报,2007,24(3):320-324.
- [6] 杜云飞,刘波.一种全帧型 CCD 航空相机像移补偿方法[J].光子学报,2007,36(12):2334-2336.

作者简介:

任航(1982—),男,助理研究员,研究方向为航空相机像移补偿。

E-mail: renhang10@163.com

(上接第 739 页)

参考文献:

- [1] Homola J, Yee S S, Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review[J]. Sensors and Actuators B,1999,54(1/2):3-15.
- [2] Lin W B, Jaffrezic-Renault N. Optical fiber as a whole surface probe for chemical and biological applications [J]. Sensors and Actuators B,2001,74:207-211.
- [3] Lin W B, Lacroix M, Chovelon J M, et al. Development of a fiber-optic sensor based on surface plasmon resonance on silver film for monitoring aqueous media [J]. Sensors and Actuators B,2001,75(3):203-209.
- [4] Kim Y C, Masson J F. Single-crystal sapphire-fiber optic sensors based on surface plasmon resonance spectroscopy for in situ monitoring [J]. Talanta,

2005,67(5):908-917.

- [5] Kretschmann, Raether H. Radiative decay of non-radiative surface plasmons excited by light [J]. Zeitschrift Fuer Naturforschunz, 1968, 23A: 2135-2136.
- [6] Raether H. Surface Plasmon on Smooth and Rough Surfaces and on Gratings [M]. Heidelberg: Springer Verlag,1988.
- [7] Sambles J R, Bradbery G W, Yang F. Optical excitation of surface plasmons: An introduction [J]. Contemporary Phys., 1991,32(3):173-183.

作者简介:

于艳鑫(1979—),男,吉林长春人,硕士,讲师,主要从事自动控制与数字信号处理研究。

E-mail: yuyanxin2002@163.com