

文章编号 1004-924X(2012)05-1110-07

外同步式时间延迟积分 CCD 传感器模拟装置

刘 辉*, 司国良, 郭永飞

(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: 由于时间延迟积分(TDI)CCD传感器在调试阶段易损坏, 本文提出了一种基于外同步信号驱动原理的 TDI CCD 传感器模拟装置。该模拟装置实际尺寸可以达到长 100 mm, 宽 45 mm, 与实际 TDI CCD 传感器的物理尺寸相当, 可根据实际光照度大小精确地模拟 TDI CCD 传感器像元感光程度。该装置可以模拟 TDI CCD 传感器输入引脚的阻容特性并能合成完整的 TDI CCD 视频输出信号, 实现 TDI CCD 传感器的 16、32、48 或 64 级积分级数控制的功能。该装置还可以模拟 CCD 驱动信号和输出视频信号的温度延时特性, 延时时间在 0.5~12.5 ns 间可调, 从而方便了信号采样电路对采样时刻的调试。

关键词: 时间延迟积分(TDI)CCD 模拟装置; 驱动时钟同步; 视频输出; 信号合成; 像元感光度

中图分类号: TN386.5; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122005.1110

TDI CCD simulation instrument synchronized with clocking signals

LIU Hui*, SI Guo-liang, GUO Yong-fei

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

* Corresponding author, E-mail: fubaiqun@yahoo.com.cn

Abstract: To avoid the damage of Time Delay and Integration(TDI) CCD sensors in the experimental process, a TDICCD simulation instrument synchronized with input driving clocks is introduced. The simulation instrument is designed with a simple method to meet its physical size in a length of 100 mm and a width of 45 mm. As the size is same as that of a real TDI CCD sensor, the instrument can simulate the photonic characteristics of the pixels for TDI CCD sensors exactly. Furthermore, it can simulate the electrical characteristics of pins in the TDI CCD sensor and can synthesize a complete video output signal, by which an important function, selectable TDI stages with 16, 32, 48 or 64 stage, is available. Moreover, the instrument can be taken to simulate the thermal delay characteristic between the input driving clock and output OS signals in the temperature adjustable range of 0.5~12.5 ns, which is convenient to the sample time adjustment for the signal circuit.

Key words: Time Delay and Integration(TDI) CCD simulation instrument; driving clock synchronizing; video output; signal synthesis; pixel electro-optical characteristic

收稿日期: 2011-09-23; 修订日期: 2011-11-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61036105)

1 引言

TDI CCD 可以在不牺牲空间分辨率和工作速度的情况下获得高的灵敏度,从而在航空、航天领域具有广泛的应用前景。在实际工作中,出于性能和指标的需求,往往需要定制新型 TDI CCD 器件,这就需要一定的研制周期和供货周期,有时甚至长达一至两年,严重影响科研生产任务的进度;另外,TDI CCD 器件的造价往往很高,工艺复杂,有些新型 TDI CCD 器件的驱动要求很复杂,往往采用多种电源一起供电,并且电源的上下电顺序要满足一定的先后关系,一旦没有满足要求,或者防护不好的话容易引起器件的损坏,造成巨大的损失,这在电路的调试阶段会经常发生。因此,在对 TDI CCD 的驱动电路、放大电路、信号处理电路^[1]的调试中往往需要使用真实 TDI CCD 器件的替代品。另外,在对 TDI CCD 相机进行整机装调时,为了保护 TDI CCD 传感器,也需要使用 TDI CCD 器件的模拟装置。

目前,业界已经开始设计各种 TDI CCD 的波形发生器来解决试验替代品的问题^[2],但是这些模拟装置的缺点是仅能对 TDI CCD 相机的视频图像的模拟,不能实现 TDI CCD 器件感光像元的光电模拟,从而无法将其直接应用在整机装调的过程中。实现 TDI CCD 相机的视频图像模拟所需电路复杂,体积庞大,造价也较高,实际的使用范围和便利性十分有限。

本文介绍了一种外同步式的 TDI CCD 传感器模拟装置,其体积小、功耗低、成本低,不但模拟了 TDI CCD 传感器的引脚电气特性、积分级数^[3]控制和输出视频信号的功能,还模拟了传感器像元的感光特性。

2 结构及原理

2.1 结构框架

本装置需要替代真实的 TDI CCD 传感器安装于焦平面的插座上,因此要求其不但体积小、结构简单、功耗也不能太大,并且还要能够模拟 TDI CCD 传感器的输入输出引脚电气特性、像元感光特性、积分级数可调和输出 TDI CCD 视频信号及其延时特性的功能。

如果采用先高速 ADC 采样 TDI CCD 的驱动信号,然后再使用数字信号处理器(DSP)或者现场可编程门阵列(FPGA)从数字化后的驱动信号中提取有用的驱动时序关系,最后使用高分辨数模转换器(DAC)生成 TDI CCD 视频信号的实现方案^[2-6],必定会使得电路结构复杂,体积庞大,功耗过高,不利于实际环境中的应用。考虑这些技术难点,本系统采用了外同步的方式提取有用的驱动时序直接驱动后级的波形合成电路合成 TDI CCD 输出视频信号的方案,省略了高速 ADC、FPGA 或 DSP 和高分辨 DAC 电路,从而大大降低了电路复杂度、电路功耗和体积。

模拟装置的输入信号来自于 TDI CCD 传感器的驱动引脚,模拟装置的输出信号被引回到 TDI CCD 传感器的封装的输出端。整个装置的系统框图如图 1 所示,包括:引脚电气特性模拟电路、驱动特征提取电路、OS 信号合成电路、延迟特性控制电路、感光度控制电路和积分级数控制电路。

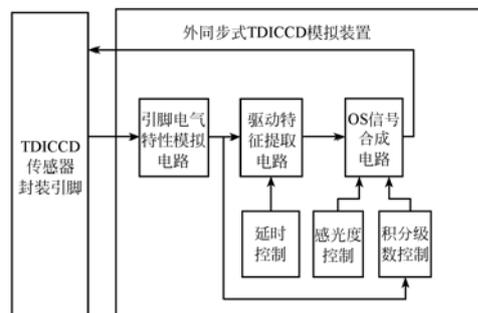


图 1 外同步式 TDI CCD 模拟装置原理框图

Fig. 1 Block diagram of TDI CCD simulation instrument system

引脚电气特性模拟电路实现了对所有的 TDI CCD 引脚的电阻、电容特性的模拟,并完成了对于电源端的输入电压及吸收电流的模拟。

驱动特征提取电路提取了关键的 TDI CCD 驱动信号的时序关系,该电路的输出为后续 TDI CCD 信号合成电路提供了驱动时序。

OS 信号合成电路的功能是根据提取的驱动时序关系合成 TDI CCD 视频输出信号,并且可以根据光照程度自动调节输出波形。如图 2 所示,一个周期的 TDI CCD 输出 OS 信号的构成由三个区间组成,分别为复位脉冲、参考电平和感光

电平。

感光度控制电路完成了通过光电控制手段调整 TDI CCD 模拟 OS 信号的感光电平的功能,需要的调整范围在 0~1.5 V,可以采用光电二极管来完成感光量的测量。

TDI CCD 传感器被安装在相机的焦平面上,工作时由于传感器本身的温度变化或者焦平面环境温度的变化会使输出的 OS 信号与驱动时序发生延时效应,延时控制电路的功能就是模拟实际传感器的这一特性,控制驱动信号与合成的 TDI CCD 输出 OS 信号间的延时时间。

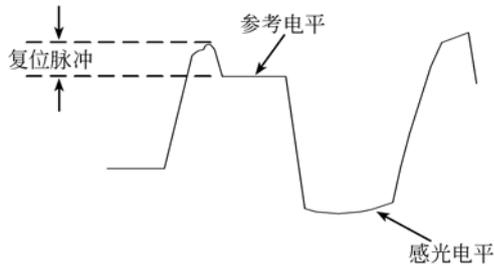


图 2 TDI CCD 输出波形

Fig. 2 Output signal of TDI CCD

积分级数控制是 TDI CCD 传感器模拟装置的主要功能之一,本装置可以根据 TDI CCD 器件的积分级数控制信号控制合成 OS 信号感光电平部分的增益按比例变化。

2.2 精确感光测量方法

本装置使用光电二极管的感光特性来模拟 TDI CCD 传感器的像元感光特性。例如某光电二极管的光电响应如图 3 所示,横坐标为辐照度单位为 mW/cm^2 ,纵坐标为光生电流单位为 μA 。

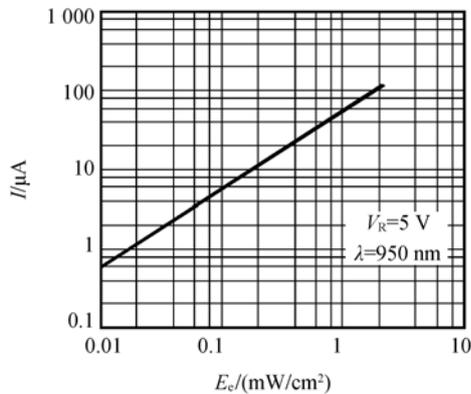


图 3 光电二极管辐照度响应曲线

Fig. 3 Irradiance response curve of a photo-diode

由图 3 可见,光电二极管在谱段响应范围内,一定的反偏压情况下的光生电流与光照响应为线性关系。图 4 中使用等效电阻为 R 的电路将光电二极管 D_1 中线性变化的反偏电流转化为电压量,经缓冲放大器由 A_0 放大后输出,最终的输出电压由式(1)表示

$$V_{\text{diode}} = \frac{E_e}{T_{\text{int}}} K R A_0, \quad (1)$$

其中 V_{diode} 为光电转换模块的输出电压; T_{int} 为像面曝光时间; K 为光电二极管的辐照度—光生电流响应曲线斜率, R 为光电转换模块输出电阻值; A_0 为缓冲放大的增益。

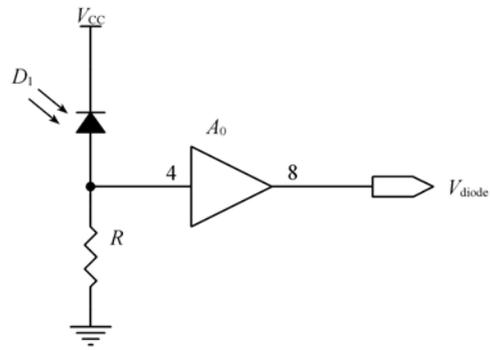


图 4 光电二极管辐照度到电压的转换电路

Fig. 4 Optical-electro convert circuit of photo-diode

又已知 TDI CCD 传感器的一个感光像元的输出信号在积分级数一定和忽略了暗电流的情况下的输出电压值可以用式(2)表达^[6]:

$$V_{\text{CCD}} = T_{\text{di}} R_e E_e, \quad (2)$$

其中 V_{CCD} 为 CCD 器件的光生电荷经片上放大后的输出电压。 T_{di} 为 CCD 器件的积分级数; R_e 为 CCD 器件的光灵敏度(一级积分级数); E_e 为像面辐照量。由式(1)、(2)可得 V_{CCD} 、 V_{diode} 对应关系如下:

$$V_{\text{CCD}} = \frac{T_{\text{di}} R_e T_{\text{int}}}{K R A_0} V_{\text{diode}}, \quad (3)$$

根据式(3)适当地选取 A_0 和电阻 R 的取值可以使等式两端相等。

2.3 驱动时序特征提取方法

图 5 为 TDI CCD 传感器的典型驱动时序关系,其中的 CR_x 信号为 TDI CCD 的水平转移驱动时钟, RST_x 信号为复位驱动脉冲信号, OS_x 为 TDI CCD 视频输出信号。根据时序图可见 RST

信号是与 OS 信号中的复位电平段的时序一一对应的。CR 信号与 OS 信号的有效感光电平的时序具有固定的时序关系,因此提取 RST 信号和 CR 信号的时序特征作为合成 OS 信号时间依据。例如图 5 的驱动时序中可以提取 RST_x 的驱动信号的时间特征同步驱动 OS 信号合成电路发生复位脉冲段和参考电平段的 TDI CCD 视频信号,使用 CR_x 信号的上升沿或者下降沿同步驱动 OS 信号合成电路产生感光电平段的 TDI CCD 视频信号。当然对于不同型号的 TDI CCD 传感器的驱动时序特性可能与图 5 中的不同,因此需要对 RST_x 和 CR_x 调整相位关系后再去同步 OS 信号合成电路工作。

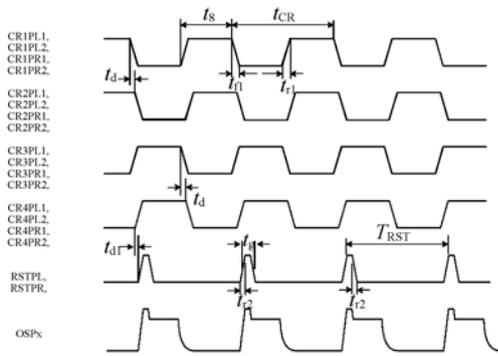


图 5 TDI CCD 水平转移驱动时序

Fig. 5 Horizontal transfer clocking times

对于 TDI CCD 传感器来说由于其本身的工作温升和焦平面环境温度变化通常较大^[4],这些温度变化会使驱动信号和输出 OS 信号间产生时序漂移(相位延迟变化),为了模拟该特性,可以在驱动时序特征提取电路中加上一个温度采样回路来控制 RST 和 CR 的延迟量来控制 OS 信号生成的时间。

2.4 OS 信号波形合成方法

图 6 中描述了 OS 波形合成方法的原理框图。

复位脉冲和参考电平合成电路的输入时驱动时序特征提取电路处理过的复位脉冲信号 RST_x,输出为复位脉冲与参考电平电压的叠加,输出波形如图 7 所示。

感光度合成电路的输入为经过延迟调整后的 CR_x 信号,输出为经过感光度幅值调制后的 CR_x 信号,一般采用 CR_x 的正脉冲部分作为调制部分,其调制幅度反映了实际感光度的情况、传感器

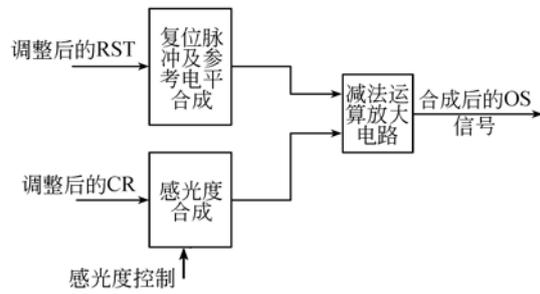


图 6 OS 信号合成电路原理框图

Fig. 6 OS signal synthetic circuit structure

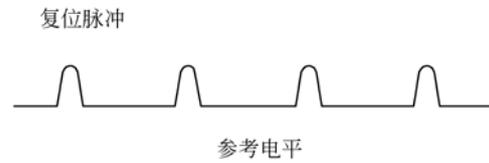


图 7 参考电平叠加复位脉冲波形

Fig. 7 Modulated RST signal by reference level

的积分级数选择和增益情况。例如当光照强时感光电平降低,当光照弱时感光电平向参考电平方向升高。减法运算电路将上面的两个输出信号相减后合成 TDI CCD 传感器的输出信号,过程如图 8 所示。

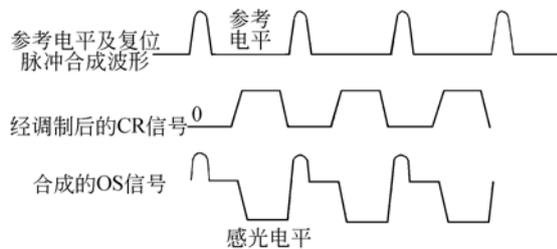


图 8 参考电平及复位脉冲合成波形与 CR 信号相减合成 TDI CCD 信号

Fig. 8 Modulated RST signal subtracts modulated CR signal by the irradiation

3 实现与实验

3.1 精确感光测量电路的实现

本文的模拟目标是加拿大 DALSA 公司生产的 IT-F6-2 048B 型 TDI CCD 图像传感器。该 TDI CCD 的像素结构为 2 048×96,是双向、单路双路可选输出、级数为 96 级的 TDI CCD。TDI CCD 光敏区中光敏元为 N×M 排列结构,N 为

水平方向像元数(为 2 048 个像素), M 为垂直方向的像元数(为 96 个像素)。TDI CCD 不仅在线列方向而且在 TDI 级数方向存在移位时钟驱动,这样才能保证信号电荷包有序地传输到检测单元。

IT-F6-2048B 的 96 级光照灵敏度为 $1\ 920\text{ V}/(\mu\text{J}/\text{cm}^2)$ 。实现光电测量的光电二极管选用 TEMD5010,根据该二极管的光电特性可知其在像面辐照度为 $1\text{ mW}/\text{cm}^2$ 时的光生电流为 $63\ \mu\text{A}$,在图 4 中的 R 取 $50\ \text{k}\Omega$, A_0 取 1,像面曝光时间 T_{int} 为 $1\ \text{s}$ 的情况下式(3)中的

$$K=63 \frac{\mu\text{A cm}^2}{\text{mV}}, \quad (4)$$

因此可得下式

$$V_{\text{CCD}} = \frac{1\ 920 \times 1}{63 \times 10^{-6} \times 1\ 000 \times 50 \times 10^3} V_{\text{diode}}$$

$$V_{\text{CCD}} = 0.6 \cdot V_{\text{diode}}, \quad (5)$$

从而由式(5)可得到精确的感光调制幅度。

3.2 驱动时序特征提取电路的实现

由 2.3 节可知实现驱动时序特征提取电路的关键在于对 RST_x 信号和 CR_x 信号的精确延时。DS1023-50 是由 MAXIM 公司生产的波形延时器件,16 引脚 SOIC 封装,具有高速、长延时甚至是整个周期延时的功能,其最小延时时间单位为 $0.50\ \text{ns}$,最长延时时间为 $12.5\ \text{ns}$,可以完成一个完整周期以上的波形延时。本模拟装置将 DS1023 配置为并行、同相的工作模式,实现了驱动时序特征的提取的功能同时,整个电路无需使用复杂的高速 ADC 和 DSP 器件,从而保证了系统的简洁性和小体积。

3.3 OS 信号波形合成电路的实现

如上 3.2 的介绍,在无高速 ADC 和 DSP 器件的情况下可以实现小体积电路的设计,因此 OS 信号的合成电路仍然采用无大型数字模拟电路的设计原则。本 TDI CCD 传感器模拟装置使用了高速运放^[7]实现了图 7 所示的复位脉冲和参考电平电路合成电路、感光度合成电路和最后的减法运算电路。LMH6715 是由 NATIONAL 生产的双通道高速运放,8 引脚 SOIC 封装,在 $+2\text{V}/\text{V}$ 和 $1\ 300\ \text{V}/\mu\text{s}$ 的情况下可以实现 $400\ \text{MHz}$ 的带宽,在 $\pm 5\ \text{V}$ 的供电下每通道仅消耗电流 $5.8\ \text{mA}$ 。

此外 OS 信号合成电路还完成了 TDI CCD 传感器 IT-F6-2048B 的积分级数选择的功能,基

本原理是使用 4 通道的低导通阻抗的模拟开关 MAX4601 对感光度调整电路的反馈电阻进行控制来实现的,在适当选择反馈电阻阻值的基础上模拟了传感器的 16、32、48 或 64 级积分级数的控制。

4 实验结果

整个系统由 2 层 $100\ \text{mm}$ 长, $45\ \text{mm}$ 宽的 PCB 板叠层在一起,最终厚度仅为 $20\ \text{mm}$,如图 9 所示左边是 TDI CCD 传感器的实物,右边是本模拟装置的印刷电路板(PCB),可见两者的实际尺寸相当。具体的 TDI CCD 传感器引脚电气特性模拟电路配置在最底层 PCB 板,驱动时序特征提取电路和 OS 信号合成电路配置在第 2 层 PCB 板,整个装置由插针形式安装在焦平面 TDI CCD 传感器的安装孔座上。

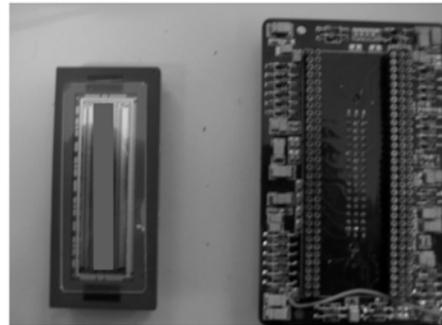


图 9 模拟装置与实际 TDI CCD 外形尺寸的对比
Fig. 9 Simulation instrument vs a real TDI CCD in physical size

图 10 是由安捷伦 DSO9000 记录的由本模拟装置输出的 TDI CCD 视频输出信号 OS 的实测波形,水平分辨率为 $50\ \text{ns}/\text{div}$,垂直分辨率分为 1

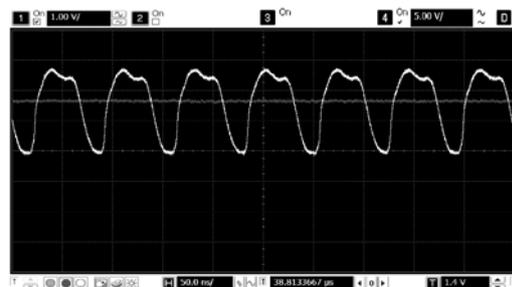


图 10 OS 模拟信号输出
Fig. 10 Output OS signal by simulation instrument

V/div。辐照度调件为 1 mW/cm^2 , 模拟装置处于 96 级积分状态, 由模拟输出波形可见 OS 信号的参考电平为 2.4 V, 感光电平约为 0.5 V, 实际 TDI CCD 有效输出为 1.9 V, 外同步频率为 13.8 MHz。根据该实验结果可见本模拟装置实现了预期的 TDI CCD 传感器的引脚电气特性模拟、积分级数调整、输出视频信号模拟和感光度模拟的功能。

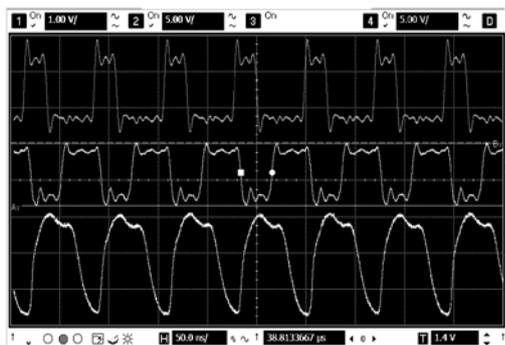


图 11 延时 10 ns 后的 OS 信号模拟输出波形

Fig. 11 Simulated output OS signal with 10 ns delay

图 11 记录了实际外同步式 TDI CCD 模拟装置的 RSTx 驱动信号(上)、CRx 信号(中)和 OS 模拟输出信号(下)的时序关系, 水平分辨率为 50 ns/div, 垂直分辨率分别为 5、5 和 1 V/div。以

RSTx 信号或者 CRx 信号为时间起始基准测量 OS 输出滞后 10 ns, 可见本模拟装置成功地模拟了在某焦平面温度下驱动时序与 OS 信号的延时关系。

5 结 论

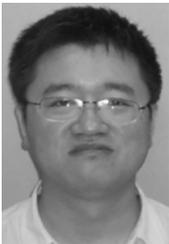
外同步式的 TDI CCD 传感器模拟装置体积小, 可以达到 100 mm 长, 45 mm 宽, 基本上与实际的 TDI CCD 传感器的物理尺寸相当, 因此可以便利地替代实际的传感器安装于焦平面上, 并可根据实际光照度的大小精确地模拟 TDI CCD 传感器单一像元感光程度, 因此适合应用于 TDI CCD 相机整机装调的现场使用。该装置还模拟了 TDI CCD 传感器输入引脚的阻容特性, 实现了完整的模拟传感器的视频输出信号, 可以替代实际的传感器配合后续的驱动、放大和信号处理等后续电路的调试工作^[8-10]。该装置实现了 TDI CCD 传感器的积分级数调整这一重要功能的模拟, 可以选择 16、32、48 或 64 级积分级数控制 CCD 视频信号输出的幅值。它也可以精确地模拟驱动信号和 TDI CCD 输出视频信号的温度延时特性, 延时时间为 0.5~12.5 ns, 从而方便了后续信号采样处理电路的采样时刻的调试。

参考文献:

- [1] 薛旭成, 李云飞, 郭永飞. CCD 成像系统中模拟前端设计[J]. 光学精密工程, 2007, 15(8): 1192-1195. XUE X CH, LI Y F, GUO Y F. Design of analog front end of CCD imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1192-1195. (in Chinese)
- [2] 胡君, 王栋. 空间光学遥感器的多光谱 TDI CCD 信号检测与生成[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1810-1818. HU J, WANG D. Detection and generation of multi-spectral TDI CCD signals for space optical remote sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1810-1818. (in Chinese)
- [3] 龙夫年, 张旺, 刘剑峰. 卫星姿态精度对 TDI CCD 相机的影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2002, 34(3): 382-384. LONG F N, ZHANG W, LIU J F. Effect of satellite attitude control accuracy on TDI CCD cameras[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2002, 34(3): 382-384. (in Chinese)
- [4] 罗志涛, 徐抒岩, 陈立恒. 大功率焦平面器件的热控[J]. 光学精密工程, 2008, 16(11): 2187-2192. LOU ZH T, XU SH Y, CHEN L H. Thermal control of high-power focal plane apparatus[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(11): 2187-2192. (in Chinese)
- [5] 程万胜, 赵杰, 蔡鹤皋. CCD 像素响应非均匀性的校正方法[J]. 光学精密工程, 2008, 16(2): 314-318. CHENG W SH, ZHAO J, CAI H G. Correction method for pixel response nonuniformity of CCD[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(2): 314-318. (in Chinese)
- [6] 黄巧林, 金伟其, 朱敏. 航天 TDICCD 相机视频信号处理中相关双采样技术的研究[J]. 航天返回与遥感, 2002, 23(4): 17-25.

- HUANG Q L , JIN W Q , ZHU M. TDI CCD video data sampling technique for space remote sensing camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2002 ,23 (4) :17-25. (in Chinese)
- [7] 张海陵,陈茹,谭海云. 基于 FPGA 的模拟信号源系统设计[J]. *电子科技大学学报*,2006,35 (4) : 461-463.
ZHANG H L , CHEN J , TAN H Y. Design of FPGA simulated signal source [J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2006 ,35 (4):461-463. (in Chinese)
- [8] DINGRONG Y, LINGHUA K. Instrument an off-self CCD imaging sensor into a handheld multispectral video camera[J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2011,23(10):606.
- [9] MOCHIZUK I, YAMAGUCHI T, YASUI M, *et al.*. A new timing control IC for CCD camera system[C]. *Consumer Electronics, Digest of Technical Papers*, 1993:162-163.
- [10] MISHRA, BANSOD D K. A microcontroller based intelligent instrumentation system for automatic scanning of CCD camera vision system [C]. *TENCON'93. Proceedings of Computer, Communication, Control and Power Engineering*, 1993:526-529.

作者简介:



刘 辉(1974—),男,吉林市人,助理研究员,2010 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间 TDI CCD 相机电子学系统的研制。E-mail: fubaiqun @ yahoo.com.cn



郭永飞(1961—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事 TDI CCD 空间相机电子学系统的研制工作。E-mail: guoyf@ciomp.ac.cn



司国良(1979—),男,吉林长春人,助理研究员,主要从事 TDI CCD 空间相机电子学系统的研制工作。E-mail: siguoliang@ciomp.ac.cn