

文章编号 1004-924X(2009)08-1810-09

空间光学遥感器的多光谱 TDI CCD 信号检测与生成

胡 君,王 栋

(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:为了实现对 TDI CCD 空间光学遥感系统的合理设计及应用,提出了高速并行实时检测 CCD 控制信号的方法和视频图像连续输出的仿真设计方案。利用 CCD 行读出及转移的 $200\ \mu\text{s}$ 周期,对 48 路控制 CCD 驱动信号和 31 路直流偏置信号进行并行实时逻辑分析及检测。同时,把预制的 CCD 模拟图像,从磁盘阵列经 PCI-X 及 LVDS 总线高速传输到由现场可编程门阵列(FPGA)、D/A、放大和滤波电路组成的视频图像生成系统,实现了连续、实时输出各种模拟测试图像。实验结果表明,提出的信号检测和生成方法可同时输出 3 路 6 MHz 频率的彩色图像和 8 路 12 MHz 频率的全色图像像素信号波形,像素信号基准电压为 8 V,振荡幅值为 $0\sim 1.7\ \text{V}$;有效采样时间和信号稳定度均满足成像电路的仿真测试要求。

关键词:空间光学遥感;多光谱 TDI CCD;信号检测;仿真

中图分类号:TP73 **文献标识码:**A

Detection and generation of multi-spectral TDI CCD signals for space optical remote sensors

HU Jun, WANG Dong

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

Abstract: A method to detect high speed and parallel CCD control signals and to simulate sequential video signal outputs is presented to realize reasonable design and applications of a space optical remote sensing system with high-performance and multi-spectral TDI CCD image sensors. At the line readout and transfer period of $200\ \mu\text{s}$, 48 clock drivers and 31 DC bias signals are analyzed and detected simultaneously. At the same time, the prepared image data are fastly transmitted from a disk array to a video image generator consisting of a FPAG, a D/A, an amplifier and a denoise circuit through the PCI-X and LVDS bus, so that the sequential and real-time outputs of diversified testing video images are realized. It is shown in experiments that three simulative chromatic video signals at a frequency of 6 MHz and eight simulative panchromatic video signals at a frequency of 12 MHz are generated synchronously with the reference voltage of a video signal of 8 V and amplitude ranges of $0\sim 1.7\ \text{V}$ and the valid sampling time and the signal stabilization can meet the requirements of the simulation and detection for the imaging circuits.

Key words: space optical remote sensing; multi-spectral TDI CCD; signal detection; simulation

收稿日期:2008-08-12;修订日期:2008-10-09.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60507003)

1 引 言

随着集成电路工艺的高速发展,CCD(Charge Couple Device)成像传感器已经发展成为成像(摄像、照相)领域的重要应用产品和部件,并且在影像传感、信号处理和数字存储三大领域中得到广泛应用,特别是在军事影像传感领域,应用 CCD 的成像探测技术对地面目标进行实时侦察,能有效测定敌方的军事部署,绘制出精确战略地图及地貌环境,为制定精密的作战计划提供可靠的数据和环境资源,充分显示出 CCD 的巨大应用潜力,被视为 70 年代以来最重要的一种器件。

CCD 的基本结构包括感光区、转移区和电荷检测单元 3 个主要部分。CCD 利用其本身所具有的光电转换功能,将投射在 CCD 光敏元上的光学图像转换为电信号“图像”,即电荷量与入射照度成正比地形成大小不等的电荷包空间分布;然后利用移位寄存器将这些电荷包转移到电荷检测区,再经检测后输出,形成幅度不等的实时脉冲序列。

CCD 作为摄像或照相的成像产品时,其成像通透性和明锐度均优于 CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)等其它成像传感器而且能准确地实现色彩还原和曝光。目前,在国际上 CCD 成像传感器已经成为空间光学遥感器的核心部件。多光谱 TDI CCD(Time Delay and Integration CCD, TDI CCD)具有多光谱特性和时间延迟积分的特殊功能,在性能、功能和可靠性上优于一般的 CCD 芯片,属于高性能空间光学遥感领域的专用核心器件,但因其内部结构复杂,对性能、可靠性要求高,从而也导致 TDI CCD 芯片生产周期长、测试手段困难和生产工艺复杂等连锁问题。

在采用 TDI CCD 研制空间光学遥感器的过程中,TDI CCD 到货晚或其它因素都会对调试工作产生影响。因此,合理设计 TDI CCD 对空间光学遥感器的研制至关重要。通过在地面环境下有效地模拟 TDI CCD 图像视频信号和负载工作特性,解决成像系统长时间仿真试验和仿真测试等设计工作中一些相关可靠性试验问题,有助于解

决困扰空间光学传感器研制的难题。

2 检测仿真原理及系统组成

TDI CCD 是一种多光谱高分辨率的组合 CCD 芯片。作为空间光学遥感器的彩色(RGB)和全色探测器,可同时输出 8 路(512 像素/路)全色视频图像数据和 3 路(1024 像素/路)彩色视频图像数据。彩色视频图像的像素点尺寸为 $35 \mu\text{m}$,全色视频图像的像素点尺寸为 $8.75 \mu\text{m}$;彩色行频率为 5 kHz,全色行频率为 20 kHz,彩色像素点尺寸是全色像素点的 4 倍,彩色行频率仅为全色的 1/4;构成全色和彩色视频图像信号行输出速度与像素点尺寸的完全匹配。

2.1 TDI CCD 信号仿真模型

TDI CCD 信号仿真模型如图 1 所示,其中实线表示数据或信号走向,虚线表示控制信号;设:检测电路的输入信号为 $\bar{X} = x_1, x_2, x_3, \dots, x_{79}$,其中 x_i 为 TDI CCD 驱动信号和直流偏置信号;存储在磁盘阵列中的预制模拟图像的图像数据源为 $\bar{D} = d_1, d_2, d_3$;其中 d_i 为预制模拟图像数据传输模块单元;CCD 信号转换和生成系统的输出图像视频信号为 $\bar{Y} = y_1, y_2, y_3, \dots, y_{11}$,其中 y_i 为彩色或全色图像视频信号的某一路;统一输出时钟(简称时统)信号为 \bar{T}_i , \bar{T}_i 表示第 i 图像转移周期的时钟输出。TDI CCD 仿真测试数学模型为:

$$\bar{Y} = F(f(\bar{X}, \bar{T}_{i-1}), \bar{D}, \bar{T}_i), \quad (1)$$

式(1)中的 $f(\bar{X}, \bar{T})$ 为信号源检测系统,即在时统控制下,经检测合格的 \bar{X} 。

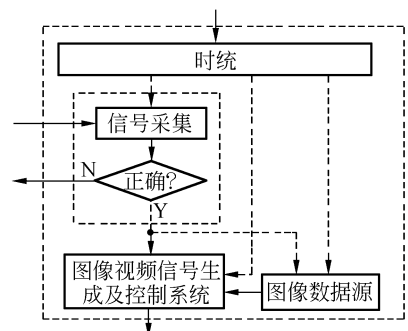


图 1 TDI CCD 信号仿真测试模型

Fig. 1 Model of TDI CCD signal simulation and test

2.2 检测系统组成及仿真工作原理

TDI CCD 信号检测仿真测试系统由 5 部分组成,如图 2 所示,包括(1)DMA(Direct Memory Access)及传输系统,即由 PCI-e 板、带 LVDS (Low Voltage Differential Signaling) 接口的 PCI-X 板、配备 PCI-e 及带 PCI-X 主板插槽的高档计算机和预制模拟图像数据存储介质的磁盘阵列等组成;(2)时统电路;(3)输入信号逻辑比较和检测系统,即由两套驱动信号的采集电路、直流电压偏置的采集电路、模数(A/D)转换电路、逻辑比较电路、电源分压电路和执行统一控制这些电路的基于 Virtex-4 FX 平台的现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)等组成;(4)图像转换及生成系统,即由双倍速内存存储器(Double Data Rate SRAM, 简称 DDR)、D/A 变换、信号放大、滤波处理和承担图像转换及处理的基于 Virtex-4 FX 平台的高档 FPGA 等组成;(5)总控及监控系统,即由千兆以太网卡、工控机系统、串行通讯接口和输出设备等组成。

当 TDI CCD 信号仿真测试系统开始工作后,把磁盘阵列中预制的模拟图像数据,通过 DMA 方式传送到高档计算机内存,再将这些图像数据高速传输给图像转换和生成控制系统中的 DDR;这时在同步时钟的控制下,信号源检测系统 $f(\bar{X}, \bar{T})$ 实时并行检测(相机发送过来的)TDI CCD 信号,若发现是错误状态,停止图像视频信号 \bar{Y} 的输出,总控系统的工控机显示当前工作状态和错误信息;若无错误信息,通过图像转换和生成控制系统的控制与处理,再经视频信号生成及输出电路,把视频图像和相关信号同步发送给空间光学传感器。

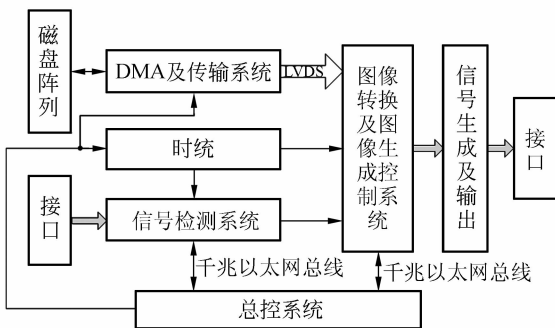


图 2 检测与仿真原理及组成

Fig. 2 Principle and composition of detection and simulation

3 多光谱 TDI CCD 模拟图像预制及转移

3.1 模拟图像预制算法

TDI CCD 预制的模拟全色图像行宽 4 096 像素;彩色图像行宽 1 024 像素,并且应由同一幅图像构造及生成,灰度分别为 1 024 级精度,即 10 bits。

首先选取一幅宽 4 096 像素的 BMP 图像,经技术分色得到宽 4 096 像素的红色、绿色和蓝色 3 幅图像;再把 3 幅图像经综合灰度化获得一幅行宽 4 096 像素全色图像;最后分别将这 3 幅彩色图像通过压缩,获得行宽分别为 1 024 像素的 3 幅三色图像,如图 3 所示。具体算法如下:

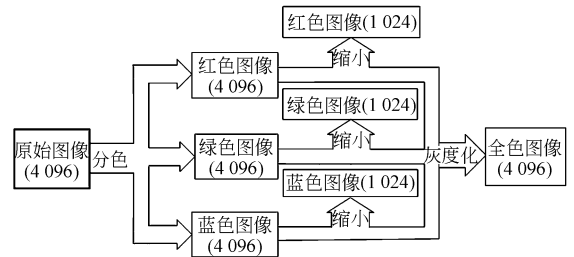


图 3 图像预制算法示意图

Fig. 3 Arithmetic of prepared image

(1)BMP 文件分色法。设原始图像数据阵列矩阵为 S 、图像的行数 h 和列数 w ;设 R, G, B 为分色后的红、绿和蓝真彩色图像矩阵, T_R, T_G 和 T_B 为转换矩阵。

设 S 矩阵的元素 $S_{i,j} = [r_{ij} \ g_{ij} \ b_{ij}]$, $S_{i,j}$ 为第 i 行第 j 列像素的色彩向量,其中 $r_{i,j}, g_{i,j}, b_{i,j}$ 分别为第 i 行第 j 列像素的红、绿、蓝色彩分量; η 为三维 0 向量, $\lambda_r = [1 \ 0 \ 0]^T$, $\lambda_g = [1 \ 0 \ 0]^T$, $\lambda_b = [1 \ 0 \ 0]^T$, T_R, T_G 和 T_B 可以通过矩阵展开表示为:

$$T_R = \begin{bmatrix} \lambda_r & \eta & \eta & \cdots & \eta \\ \eta & \lambda_r & \cdots & \cdots & \cdots \\ \eta & \cdots & \lambda_r & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \eta \\ \eta & \eta & \cdots & \eta & \lambda_r \end{bmatrix}_{w \times h},$$

$$T_G = \begin{bmatrix} \lambda_g & \eta & \eta & \cdots & \eta \\ \eta & \lambda_g & \cdots & \cdots & \cdots \\ \eta & \cdots & \lambda_g & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \eta \\ \eta & \eta & \cdots & \eta & \lambda_g \end{bmatrix}_{w \times h},$$

$$T_B = \begin{bmatrix} \lambda_b & \eta & \eta & \cdots & \eta \\ \eta & \lambda_b & \cdots & \cdots & \cdots \\ \eta & \cdots & \lambda_b & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \eta \\ \eta & \eta & \cdots & \eta & \lambda_b \end{bmatrix}_{w \times h}.$$

显然,由 $R=S \times T_R; G=S \times T_G; B=S \times T_B$ 公式可获得红色、绿色和蓝色图像矩阵。

(2) 图像压缩法。通常图像压缩分为无损压缩技术和有损压缩技术两种,无损压缩技术压缩率受到数据统计冗余度的理论限制,压缩比例较小;有损压缩技术广泛应用于语音、图像和视频数据的压缩,这种压缩技术所损失的部分对原始图像影响较小,却换来了大压缩比。预制的 TDI CCD 模拟图像属于遥感影像领域,显然,应采用有损压缩技术进行数据压缩。而小波变换法是空间光学遥感图像有损数据压缩的最有效方法之一,也称滤波法,采用这种图像压缩方法的优点是:(1)多尺度分解,并且变换后的能量大部分集中在低频部分,方便了对不同尺度下小波系数分别设计、量化和编码的方案,可保持很好的视觉效果和较高的峰值信噪比(Power Signal-to-Noise Ratio, PSNR);(2)小波分解和重构算法是循环使用,易于硬件实现保留低频主要信息,符合设计需要。本文选用的是基于 sinc 小波的离散小波变换法,公式:

$$\begin{cases} \phi(x) = \text{sinc}(\pi x) \\ \varphi(x) = 2\phi(2x) - \phi(x) \\ h_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(2x - k) \bar{\psi}(x) dx, \quad (2) \\ g_k = \sqrt{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(2x - k) \bar{\phi}(x) dx \end{cases}$$

式中 $\phi(x)$ 为尺度函数, $\psi(x)$ 为小波函数, h_k 为带通滤波器, g_k 为低通滤波器, $k \in N$; 根据公式(2) 压缩的步骤:首先做一次滤波,得压缩至原图 1/4 的低频分量图 $C^{(1)}$ 矩阵,其中元素 $C_{m,n}^{(1)} = \sum_{k,l} c_{k,l} g_{k-2m} g_{l-2n}$; 对 $C^{(1)}$ 再次滤波后,得压缩

至原图 1/16 的图像 $C^{(2)}$ 矩阵,其中元素 $C_{m,n}^{(2)} = \sum_{k,l} c_{k,l} g_{k-2m} g_{l-2n}$, 压缩后的图像元素根据最大最小值,重新量化置[0,255]范围。

(3) 图像灰度化法。由灰度化公式 $P=R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.144$, 获得到全色图像阵列。

(4) 图像重新量化法。由于 BMP 图像得到均 8 bits 的红、绿、蓝和全色的图像矩阵,需要把 8 bits 图像矩阵转换为 10 bits 多光谱 CCD 图像。设 8 bits 量化图像阵列 T_8 , 通过公式 $T_{10} = 1023 T_8 / 255$, 求得 10 bits 量化的图像阵列 T_{10} 。

3.2 模拟图像转移方法

根据所用 TDI CCD 的特性,按输出彩色图像信号最大行周期 200 μs , 全色图像信号最大行周期 50 μs 计算,参数详见表 1。依据实时图像更新的通讯速率,在彩色输出一行同时全色要同步输出四行。任意一行彩色或全色数据的数据量计算公式如下:

一行的总数据量(B) = 通道数 \times 每行有效像素数 \times 像素字节数(像素位数/8)

因此彩色一行的数据大小为 $3 \times 1024 \times 10 / 8 = 3840$ B, 全色四行的数据大小为 $4 \times 8 \times 512 \times 10 / 8 = 20480$ B, 以彩色信号最大行周期作为图像数据传输的计算基准,即必须在 200 μs 内为系统预制 $20480 + 3840 = 24320$ B 新的图像数据,也即整个信道的数据传输率不小于 $24320 \text{B} / 200 \mu s \approx 116 \text{MB/s}$ 。由于空间光学遥感器一次摄像周期通常不超过 2 min, 若使输出预制模拟图像数据(图像数据源 \bar{D}) 2 min 内不重复,则预存储图像数据源容量至少在 $116 \text{MB} \times 120 = 13.59 \text{GB}$ 以上。

表 1 彩色和全色信号输出特性参数

Tab. 1 Output properties for color and panchromatic signals

项 目	彩 色	全 色	单 位
像素输出频率	6	12	MHz
像素周期	166.67	83.33	ns
有效像素数/每通道	1024	512	像素
同时输出的通道数	3	8	路
像素位数	10	10	bit
最小行频率	5	20	kHz
最大行周期	200	50	μs

为此,设计模拟图像数据从磁盘阵列传输到高档 FPGA 控制的 DDR 的方法(见图 4)如下:

(1)首先对预选的模拟图像按 TDI CCD 的图像格式进行图像转换及预制,并按预定的格式存储在磁盘阵列(8 块磁盘)中;(2)在高档计算机的控制下,通过 PCI-e 图像数据采集板,以 350 MB/s 的速度采集模拟图像,并存放到计算机内存;(3)采用计算机的 DMA 传输方式,以 250 MB/s 的速率,通过带 LVDS 总线的专用 PCI-X 接口板,把预制模拟图像(图像数据源)发送到 DDR 中。显然,数据传输率高于设计指标一倍以上,完全满足设计的技术指标要求。

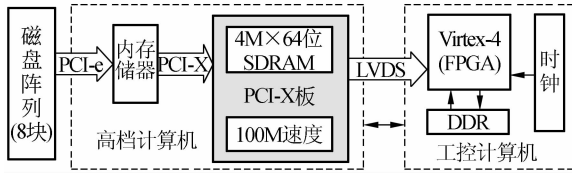


图 4 图像数据传输系统

Fig. 4 Image data transfer system

4 多光谱 TDI CCD 信号实时检测

4.1 TDI CCD 信号检测电路组成及原理

为获取地面的图像信息,空间光学传感器需要有效控制 TDI CCD 信号。因此,系统检测电路需要对这些控制 TDI CCD 的信号进行实时检测,以确定这些信号的正确性。这部分包括电源分压处理电路、电容特性负载电路、电压调整电路、模数转换(A/D)电路、逻辑比较电路、时钟同步电路和 FPGA 信号检测及控制系统等。

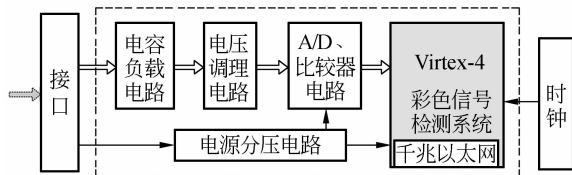


图 5 TDI CCD 信号检测电路原理图

Fig. 5 TDI CCD signal detection circuit

整个检测电路的设计由两块电路板组成,其中全色信号采集及处理板的时钟频率为 12 MHz;彩色信号的采集及处理板的时钟频率为 6MHz。为了实现多光谱的同步输出,采用统一

的时统电路控制。由于两块电路板的结构和控制方法基本相同,现仅给出彩色信号检测电路板的原理图,如图 5 所示。在这两块电路板信号检测系统和时统的控制下,实现信号源检测系统 $f(\bar{X}, \bar{T})$ 对输入信号 \bar{X} 的逻辑分析及检测;同时完成与主控系统通讯等。

4.2 多路并行实时检测方法

由于彩色像素最大行周期为 $200 \mu s$ (全色像素最大行周期 $200 \mu s/4$),根据 TDI CCD 的特性,利用彩色像素前一个最大行周期,信号源检测系统 $f(\bar{X}, \bar{T})$ 对输入的 48 路驱动信号的逻辑关系进行分析和判定,同时对输入的 31 路直流偏置电压进行检测。一旦发现错误信息则立即发送错误状态给工控机,停止预制模拟图像数据(图像数据源 \bar{D})输入;否则继续输入预制模拟图像数据,并且对下一个行周期的信号进行检测,实现对 TDI CCD 信号的并行实时检测的目标。其行周期时序与预制模拟图像数据关系如图 6 所示。

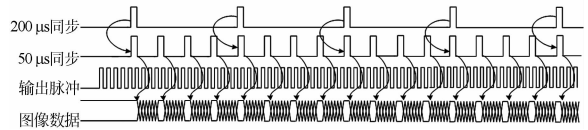


图 6 TDI CCD 信号行周期时序图

Fig. 6 Timing of TDI CCD signal line periods

5 多光谱 TDI CCD 视频图像生成

5.1 视频图像信号生成电路组成

视频信号生成电路由 FPGA、DDR、D/A 转换电路和放大及滤波电路等组成。核心控制芯片 FPGA 选用 Xilinx 高端器件 XC4VFX40,该芯片提供 20 万个的逻辑单元和高达 500 MHz 速率性能、专用的 DSP Slice、高速时钟管理电路和同步接口块,在高速并行处理领域得到了广泛的应用^[5-6]。利用 FPGA 实时接收外部图像数据,并把这些图像数据缓存到 DDR 中,同时控制 D/A 转换芯片工作,实现视频信号实时生成与输出,如图 7 所示。DDR 允许在时钟脉冲的上升沿和下降沿读出数据,数据突发读写速度可达 133 MHz,与 SDRAM 相同的总线频率下达到更高的数据传输率。采用两套 DDR 的设计模式,实现乒乓缓存方式读取,可实时更新图像数据。D/A

转换芯片选用 TI 公司的 12 bits、高速 DA 芯片 DAC5662,达到 275 Ms/s 转换速率;放大器芯片选用 THS3001,带宽 420 MHz,输出阻抗为 10 Ω,输出电流达 100 mA,在放大信号的同时有效地增强驱动能力;为了增强滤波和去噪声能力,一方面在 PCB 布局中按照高频电路的布线准则进行设计,如数字和模拟信号严格分开,单点接地;控制关键高速网络的走线长度,尽量避免传输线效应;采用星型拓扑结构,避免时钟信号对同步的影响等。另一方面在放大器输出端设计了滤波电路,为不影响工作速度,降低设计的复杂度,采用了 LC 低通滤波设计方法。

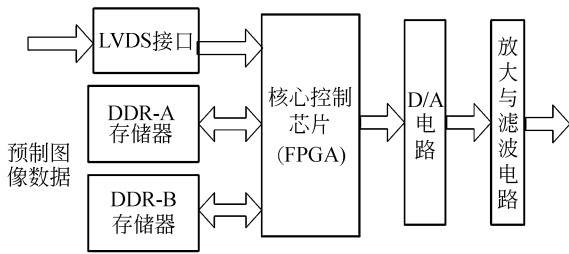


图 7 视频图像信号生成电路逻辑示意图

Fig. 7 Video image signal generator circuit

5.2 视频信号生成方法

TDI CCD 视频像素信号的波形如图 8 所示,根据每一个像素信号周期的特性,分为 3 个时间阶段,首先是输出复位脉冲信号阶段,它的功能主要是清除前一个像素的电荷,迎接下一个像素电荷的到来;其次,由于复位 MOSFET 漏电流影响,复位电平下降到基准电平;最后,CCD 光电转换完成视频信号输出。输出信号的采样方法采用相关双采样法^[9],根据相关双采样原理,分别在第二和第三时间段两次采样,再将两次采样结果相减,得到消除了复位噪声的有效图像视频信号。

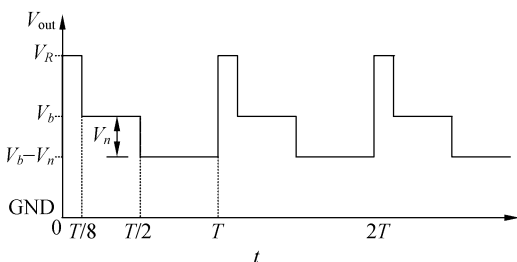


图 8 TDI CCD 像素信号格式

Fig. 8 Format of TDI CCD pixel signal

TDI CCD 视频像素信号的数学表达式:

$$V_{out} = \begin{cases} V_R & nT < t \leq nT + T/8 \\ V_b & nT + T/8 < t \leq nT + T/2 \\ V_b - V_n & nT + T/2 < t \leq (n+1)T \end{cases} \quad (3)$$

式(3) $V_n = \frac{1.7d_n}{1023}$, $n \in \mathbf{N}$, \mathbf{N} 为自然数; d_n 为第 n 个像素周期内输出的像素灰度值,范围 0~1 023; V_b 为 CCD 输出参考电平; V_n 是以 V_b 为基准向下振荡的视频信号电平,振荡幅值为 0~1.7 V; V_R 是 $>V_b$ 的信号复位电平。

生成视频信号的方法:DA 外接 50 Ω 负载电阻,在满量程 20 mA 条件下的幅值 0~1 V,采用 DA 的中间值 10 bits 作为有效值,即设 $D_0 = 0$ 和 $D_{11} = 0$,输出像素的灰度值对应幅值 0~0.5 V,DA 转换后信号再通过放大电路将幅值等比例放大至 0~1.7 V,即放大 3.4 倍; V_R 信号用 DA 满量程时输出表示。放大器输出信号经滤波处理后,叠加一个直流分量 ($V_b - 1.7$ V) 作为最终输出结果(图像视频信号 \bar{Y})。

6 试验结果

在 TDI CCD 信号实时检测电路系统中,利用前一个行读出及转移周期对 TDI CCD 的信号进行检测,再把预制的 CCD 模拟图像,从磁盘阵列经 PCI-X 及 LVDS 总线高速传输到由 FPGA、D/A、放大和滤波电路组成的视频图像生成系统,实现对 CCD 视频图像实时仿真输出。试验证明,提出的信号检测和生成方法可同时输出 3 路 6 MHz 频率的彩色的和 8 路 12 MHz 频率的全色 TDI CCD 视频信号。图 9、图 10、图 11 和图 12 分别给出了彩色和全色信号灰度值取 1 023 和 480 级时的输出波形。其中图 9 和图 10 横向每格为 20 ns,图 11 和图 12 横向每格为 10 ns,纵向每格都为 500 mV,可以计算出彩色信号的周期约 166.67 ns,即 6 MHz 的输出频率;全色信号的周期约 83.33 ns,即 12 MHz 的输出频率。采用示波器可见到彩色、全色输出信号建立时间不超

过 20 ns; 彩色信号(有效)采样时间 ≥ 30 ns; 全色信号(有效)采样时间 ≥ 0 ns, 有效采样时间内信号稳定均在 ± 10 mV 以下。图 13 给出一路彩色图像和一路全色图像的视频信号时序关系图, 图中上组为彩色信号, 下组为全色信号, 全色与彩色是 2 : 1 的时序关系。

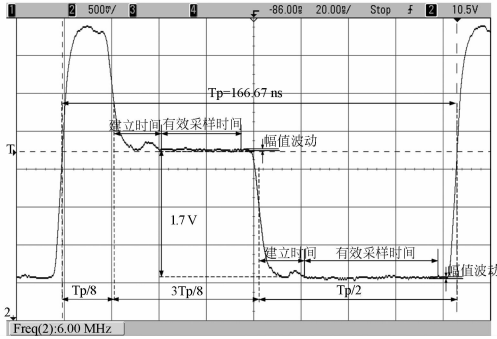


图 9 1 023 级灰度值彩色信号

Fig. 9 Chromatic signal for 1023 gray value

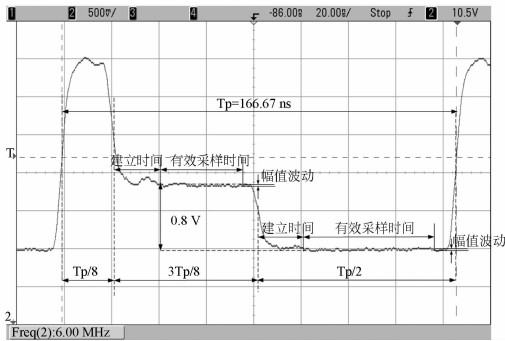


图 10 480 级灰度值彩色信号

Fig. 10 Chromatic signal for 480 gray value

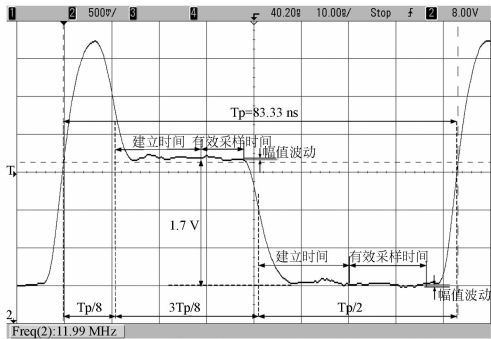


图 11 1 023 级灰度值全色信号

Fig. 11 Panchromatic signal for 1023 gray value

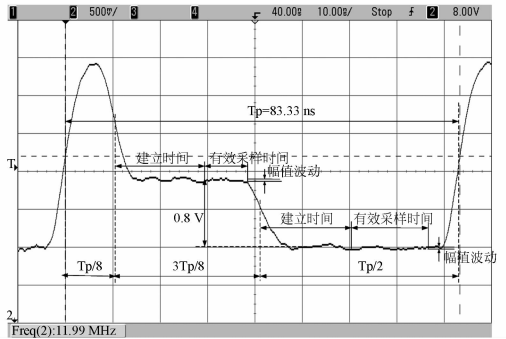


图 12 480 级灰度值全色信号

Fig. 12 Panchromatic signal for 480 gray value



图 13 全色与彩色信号的时序

Fig. 13 Timing of chromatic signal and panchromatic signal

7 结 论

为了有效地实时检测空间光学遥感系统与 TDI CCD 相关系统的性能、功能和可靠度, 实现对空间光学遥感器整体电性系统的仿真测试, 提出了对 TDI CCD 控制信号的高速并行实时检测和视频图像连续输出的仿真测试方案。目前, 已完成了对空间光学遥感系统的高速并行实时检测和视频图像连续输出的仿真设计和部分试验。利用 TDI CCD 控制信号 200 μ s 的最大行周期, 对控制 CCD 48 路驱动信号和 31 路直流偏置信号进行并行实时逻辑分析及检测, 并将检测的信息发送到计算机上进行监控; 同时, 把预制的 CCD 模拟图像, 从磁盘阵列经 PCI-X 及 LVDS 总线高速转移到由 FPGA、D/A、放大和滤波电路组成的视频图像生成系统中, 实现对 CCD 视频图像信号的

输出仿真。实验结果表明,提出的信号检测和生成方法可同时输出 3 路 6 MHz 频率的彩色和 8 路 12 MHz 频率的全色 TDI CCD 视频信号。信号输出稳定可靠,彩色信号有效采样时间 ≥ 30 ns;全色信号有效采样时间 ≥ 10 ns,信号稳定

均在 ± 10 mV 以内,符合空间光学遥感器的设计及技术(采样时间 ≥ 2.6 ns 和信号稳定在 ± 16.6 mV)要求;可连续、实时地输出各种模拟测试图像,满足空间光学传感器成像电路的仿真测试需求。

参考文献:

- [1] 胡君,吴伟平. 光学成像传感器调焦控制电路仿真测试[J]. 光学精密工程,2007,15(10):1503-1508.
HU J, WU W P. Testing and simulation of focusing circuit of optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007,15(10):1503-1508. (in Chinese)
- [2] 崔艳秋,王珂. 基于小波域局部统计模型的图像去噪方法[J]. 光电工程,2007,34(3):93-97.
CUI Y Q, WANG K. Image denoising based on local statistical models in wavelet domain[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007,34(3):93-97. (in Chinese)
- [3] 王易因, Rene van Leuken, Alle-Jan van der Veen, 等. 基于 FPGA 的条时延发射参考系统的基带数字信号处理[J]. 光学精密工程,2006,14(5):876-882. (in Chinese)
WANG Y Y, Rene van Leuken, Alle-Jan van der Veen, *et al.*. DSP implementation for delay hopped transmitted reference system based on FPGA [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 876-882. (in Chinese)
- [4] 宋亚军,许廷发,倪国强,等. 基于 Virtex-4 FPGA 的低功耗图像融合系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(6):935-940.
SONG Y J, XU T F, NI G Q, *et al.*. Low power image fusion system based on Virtex-4 FPGA[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(6): 935-940. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 邓家先. 基于重要系数提升的遥感图像压缩[J]. 光学精密工程,2006,14(5):910-916.
DENG J X. A remote-sensing image coding algorithm based on significant coefficients lifting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5): 910-916. (in Chinese)
- [7] 何江华,郭果敢. 计算机仿真与军事应用[M]. 北京:国防工业出版社,2006.
HE J H, GUO G G. *Computer Simulation and Martial Application*[M]. Beijing: National Defence Industry Press,2006. (in Chinese)
- [8] 王文杰,胡君,王栋,等. 基于小波变换的多光谱光电耦合器件图像仿真[J]. 计算机系统应用,2008,17(10):81-84.
WANG W J, HU J, WANG D, *et al.*. Composing multi-spectral time delay integral charge coupled device image technology based on wavelet transform [J]. *Application of Computer System*, 2008, 17(10):81-84. (in Chinese)
- [9] 黄巧林,金伟其,朱敏. 航天 TDI CCD 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)
- [10] 李建平,杨万年. 小波十讲[M]. 北京:国防工业出版社,2004.
LI J P, YANG W N. *Ten Lectures on Wavelets* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [11] 谨济芳. 小波变换技术与工程实践[M]. 北京:人民邮电出版社,2004.
JIN J F. *Wavelet Transform Technology and Practice of Engineer* [M]. Beijing: Posts and telecom Press,2004. (in Chinese)

作者简介:



胡 君(1952—),男,吉林蛟河人.高级
工程师,硕士研究生导师,1982年毕业
于吉林大学计算机科学系,主要研究方
向为智能控制与信息处理、空间光学遥
感器仿真测试技术。E-mail: huj@ci-
omp. ac. cn



王 栋(1979—),男,山西阳泉人.助理
研究员,2007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
要研究方向为空间相机的地面测试技
术和数字图像处理技术。E-mail:
wangdong983232@yahoo. com. cn

●下期预告

400 mm 薄镜面主动光学试验系统

李宏壮¹,林旭东^{1,2},刘欣悦¹,王富国^{1,2},杨 飞¹,张丽敏¹,王建立¹,韩昌元¹

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

采用 400 mm 口径,12 mm 厚的球面反射镜进行了主动光学实验。实验镜支撑结构由背部 12 个主动支撑点和 3 个固定支撑点组成,主动支撑点由压电陶瓷促动器和压力传感器组成力促动器,用于控制实验镜面形,固定支撑点用于控制实验镜的定位。实验中通过干涉仪测试镜面面形,首先分别测量出反射镜在单独一个促动器施加单位作用力前后的镜面面形,求出这两个面形之差得到该促动器的响应函数,由各促动器的响应函数组成刚度矩阵,然后用阻尼最小二乘法计算各支撑点的校正力。通过 PID 算法闭环控制各促动器施加力的过程。通过校正,将初始状态的 1.22 RMS 的面形误差校正到 0.12 RMS,接近了镜面加工的 0.1 RMS 面形精度,说明所采用的主动校正算法和过程正确可行。