

文章编号 1004-924X(2009)08-2011-06

# 线阵 CCD 成像系统自校图形设计

王文华<sup>1,2</sup>, 何 斌<sup>1</sup>, 任建岳<sup>1</sup>

(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)

**摘要:** 为了便于调试 CCD 成像系统以及检测系统接口的可靠性, 基于 CCD 扫描成像原理设计了功能特点各异的几种自校图形来模拟 CCD 图像数据。作为数据模拟源, 自校图形具有类似线阵 CCD 推扫成像的动态滚动特性, 同时图形灰度等级变化明显, 且在  $x$  和  $y$  方向上均有灰度梯度。以鉴别率图形为例, 阐述了自校图形的设计思想、代码实现及仿真验证过程。设计选用 VHDL 编程通过现场可编程逻辑阵列 (FPGA) 来实现, 应用 TEXTIO 功能通过 Modelsim 仿真将自校图形数据导出到文本, 然后调用 MATLAB 读取文本并显示图形以验证设计的正确性。几个自校图形在 CCD 遥感相机成像系统中得到了应用, 共占用了约 5% 的逻辑资源。应用结果显示, 自校图形能及时检测出通讯和数传模块所出现的异常并能判断分析问题根源。

**关键词:** 线阵 CCD; 成像系统; 自校图形; 鉴别率图; TEXTIO; MATLAB

**中图分类号:** TH703; TP391 **文献标识码:** A

## Design of self-check figures in linear CCD imaging system

WANG Wen-hua<sup>1,2</sup>, HE Bin<sup>1</sup>, REN Jian-yue<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,*  
*Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)*

**Abstract:** With the aim to debug the CCD imaging system and to detect the reliability of a system interface, several kind of self-check figures with different functions are designed to simulate the CCD image data. As image data simulation sources, these figures are characterized by their push-scanning imaging similar to a linear CCD, and have sharp gray variation in the  $x$  direction and  $y$  direction. By taking a distinguishing figure for an example, this paper describes the design ideals, code implementation and simulation procedures for these self-check figures. Moreover, a Field Programming Gate Array (FPGA) is combined with the VHDL programming language to implement the design. Then, the TEXTIO function is used to export figure data to a text through Modelsim simulation, and the text is imported into the MATLAB to show the expected figure. These figures have been applied to the imaging system of a CCD remote sensing camera, the applied results show that designed self-check figures can detect the mistakes from communication and data transmission models and can analyze the error origins.

**Key words:** linear CCD; imaging system; self-check figure; distinguishing figure; TEXTIO; MATLAB

收稿日期: 2008-07-07; 修订日期: 2008-10-09.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 863-2-5-1-13B)

# 1 引言

自从 CCD(Charge Coupled Device)问世以来,传感器成像技术发展迅速,尤其是 TDI-CCD 以其时间延迟积分和推扫成像的特点,在航空航天侦察领域得到广泛的应用。对于 CCD 相机成像系统而言,除了 CCD 还有很多其他重要组成部分,如光学系统、CCD 信号处理模块、通讯模块、数据传输模块、图像压缩系统<sup>[1]</sup>等。由于 CCD 器件非常昂贵,系统联试时不能频繁插拔 CCD,子系统组装测试时也不需要加 CCD,因此必须在 CCD 信号处理模块中设计一系列自校图形作为仿真 CCD 的数据源,一方面可以在子系统组装时测试接口连接是否正确,另一方面可以检测 CCD 时序是否正常,像素输出是否有串行现象。

本文以 CCD 推扫成像原理为出发点,结合成像系统组成结构和调试需求,设计了功能特点各异的几种自校图形,满足了成像系统调试和检测的需要。

# 2 线阵 CCD 推扫成像原理

在星载 TDI-CCD 相机中,线阵 CCD 对物体进行推扫成像,如图 1 所示,为确保目标物体成像的质量,必须使 TDI-CCD 线阵移动方向与目标像移方向一致<sup>[2]</sup>,同时还要使光生电荷包的转移速度与目标的合成像移速度相匹配<sup>[3]</sup>,即在推扫一行目标物体的同时将上一行的电荷包转移出 CCD。经信号处理模块 A/D 量化后,CCD 图像数据在行使能信号有效时输出到显示终端,逐行扫描就可以将目标图像显示出来。

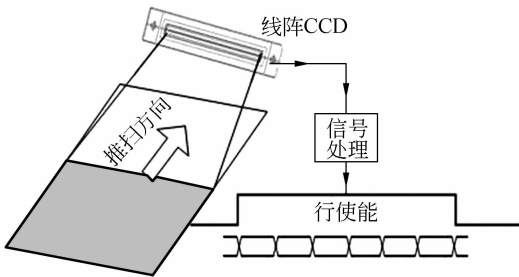


图 1 线阵 CCD 推扫成像原理框图

Fig. 1 Principle of push-scanning with linear CCD

# 3 CCD 成像系统概要组成

为说明自校图形的设计背景,先简要介绍 CCD 成像系统的组成(如图 2 所示)。来自成像物体的光线经由光学系统在 CCD 焦平面上成像,在正常驱动 CCD 的情况下,CCD 感光产生电荷并输出模拟视频信号,在 CCD 信号处理模块中经 A/D 转换量化,由 FPGA 采集量化数据并按照预定格式传送到数传模块,最后图像数据经压缩模块<sup>[1]</sup>和解压缩模块后到达显示终端。其中,图像还可以在压缩前经数传端口直接引出到图像显示终端以便及时观察图像,另外也便于与压缩后的图像作对比。为测试整个相机系统的传递函数 MTF<sup>[4]</sup>,采用鉴别率板<sup>[8]</sup>作为成像物体<sup>[5]</sup>。自校图形的产生由 CCD 信号处理模块中的主处理器 FPGA 产生。

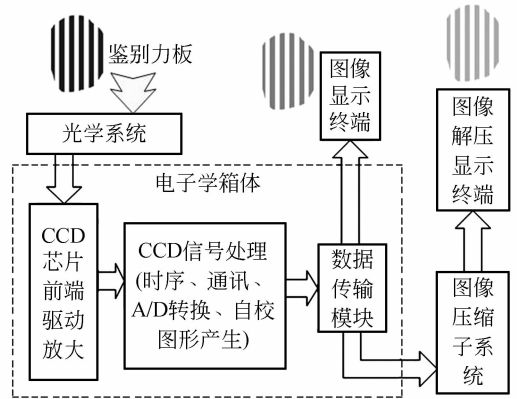


图 2 CCD 成像系统简明框图

Fig. 2 Block diagram of CCD imaging system

# 4 自校图形设计实现

## 4.1 硬件实现

对于不同类型的 CCD,自校图形设计也不尽相同,即使同一类型的 CCD,其自校图形也可能千变万化。自校图形由 CCD 信号处理模块产生,因此完全可以采用具有高度灵活性的 FPGA 来设计实现。FPGA 以其功能强大、开发周期短、可反复编程修改等特性,在数字信号处理领域得到了广泛的应用。

该设计中的 FPGA 芯片选用 Xilinx 公司生产的 XCV300-4PQ240I 芯片,它具有 DLL(数字

延迟时钟锁相环),内部触发器资源约 30 万门,有丰富的 I/O 资源,且管脚配置灵活。CCD 信号处理模块的主要功能是产生 CCD 时序以及采集和上传图像数据,因此要求自校图形设计资源占用不超过 10%。

### 4.2 设计思想

自校图形在 FPGA 采集图像量化数据这一环节产生,在 CCD 不参与调试的情况下代替 CCD 视频信号,来检测通讯系统、时序产生、数传模块以及图像压缩模块的功能是否正常。

自校图形相当于模拟 CCD 图像数据,因此应具有类似线阵 CCD 推扫成像动态滚动的特性,要求图形灰度等级变化明显,且在  $x$  和  $y$  方向上均有灰度梯度。同时硬件设计不应占用太多资源,产生图形要求稳定可靠。为测试数传及压缩模块对系统传递函数的影响,可仿照鉴别率板<sup>[8]</sup>设计自校图形。

下面以鉴别率图形为例,介绍自校图形的设计思想。线阵 CCD 每行输出像元数为 4 096,依据推扫成像原理,对自校图形产生模块而言,需要输入行使能信号 LEN 和像素转移时钟 CLKP,图形  $x$  方向对应 CCD 输出的每一行像素, $y$  方向对应 CCD 像素输出行数。如图 3 所示,LEN 高电平有效时,在 CLKP 时钟的驱动下逐个像素输出,可在像素计数的基础上按一定列宽进行列计数,形成具有不同灰度值的条纹;LEN 低电平时对像素计数和列计数清零,每经过一个 LEN 周期行计数器加 1,并根据行计数值 CountB 改变  $y$  方向图形灰度。

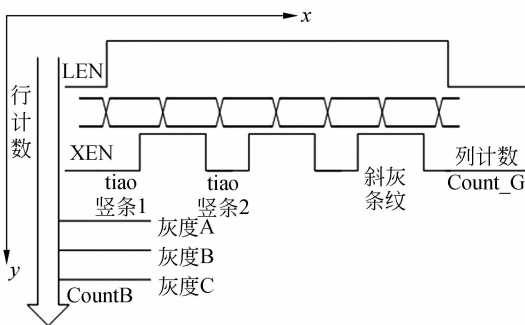


图 3 自校图形设计原理图

Fig. 3 Principle of self-check figure design

### 4.3 代码实现

VHDL 语言依靠其强大的系统硬件描述能

力以及支持广泛、易于修改的优点成为广大电子电路和集成电路设计者必备的工具。与其他的 HDL 相比,VHDL 在语法上更严谨,并且具有更强的行为描述能力,从而使它成为系统设计领域硬件描述语言的最佳选择。

VHDL 编程 RTL 原理图如图 4 所示,设计主要由 5 个模块完成,分别完成  $x$  方向计数、 $y$  方向计数、产生斜灰锯齿条纹、模拟鉴别率板竖条纹、产生  $y$  方向灰度梯度等 5 个功能。其中信号 Count\_G 为竖条的类型计数向量,信号 CountS 控制在某一竖条类型情况下竖条的间距,两者可搭配出不同灰度间隔的竖条类型。

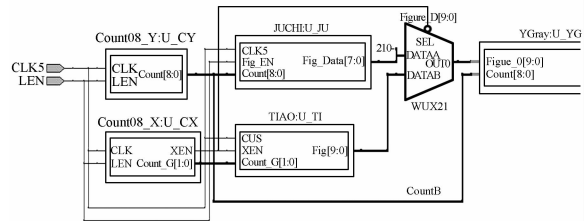


图 4 自校图形设计 RTL 原理图

Fig. 4 RTL schematic designed by self-check figures

```

产生竖条纹的主要 VHDL 代码为:
if CLKPevent and CLKP = '1' then
if XEN = '0' then
if Count_G = 0 then          ——竖条 1
if CountS = 3 then
CountS <= (others => '0');
else
CountS <= CountS + 1;
end if;
if CountS > 1 then
tiao <= '1';
else
tiao <= '0';
end if;
elsif Count_G = 1 then      ——竖条 2
.....
if tiao = '0' then
Fig <= "0000010000"; ——竖条对比度
else
Fig <= "1000000000";
.....

```

信号 CountB 表示  $y$  方向的行计数,依据

CountB 设置  $y$  方向的灰度梯度。产生  $y$  方向灰度渐变的主要 VHDL 代码为:

```

if CountB(8)=1' then
Figure_Data<=Figure_D+"0100000000";
elsif CountB(7)=1' then
Figure_Data<=Figure_D+"0010000000";
elsif CountB(6)=1' then
Figure_Data<=Figure_D+"0001000000";
.....
else
Figure_Data <= "0000000001";
end if;

```

## 5 设计仿真验证

### 5.1 Modelsim 仿真波形

编码初步完成后,需要在软件环境下仿真验证电路的行为和设想中的是否一致。传统的测试向量波形图方法,不仅仿真测试的效率低下,而且工作量巨大。这里我们采用 VHDL 语言编写测试平台激励文件的方法,同时利用 VHDL 语言所特有的 TEXTIO 功能,通过调用 ModelsimXE 6.1e 软件将图形仿真数据输出到文本,然后进行后续处理,这种方法不仅大大提高了设计效率,而且还提高了硬件一次注入程序的成功率<sup>[6]</sup>。输出仿真数据的主要 HDL 代码为:

```

USE std. textio. all;
write: process (clk)
file file_F02 :text open write_mode is
"D:\Figure\fileout\Fig02. txt";
variable oline:line;
variable outd:integer;
begin
if clkEvent and clk=1' then
if FIGURE_EN =1' then
outd:=conv_integer(Figdata_02);
write (oline,outd,right,10);
writeline(file_F02,oline);
end if;
end if;
end process write;

```

下面列出鉴别率图形的功能仿真波形。从图 5 可以看出,在 LEN 信号有效的情况下,自校图

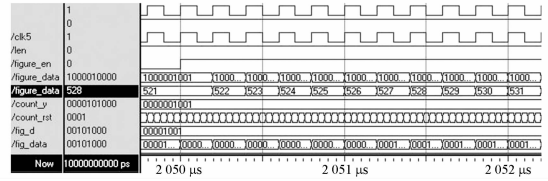


图 5 鉴别率图形  $x$  方向灰度渐变仿真图

Fig. 5 Logic simulation of distinguishing self-check figure in  $x$  direction

形横向灰度值在递增;图 6 中行计数值随着 LEN 周期递增,说明都符合设计预想。Modelsim 仿真的同时,自校图形数据向量随着仿真时间推移全部写入了 Fig02. txt 文本文件中。

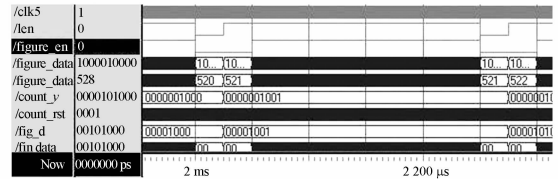


图 6 鉴别率图形  $y$  方向灰度渐变仿真图

Fig. 6 Logic simulation of distinguishing self-check figure in  $y$  direction

### 5.2 MATLAB 图形读取与显示

MATLAB 是一套功能十分强大的工程计算及数据分析软件。在复杂数字系统仿真中,用户可以利用 MATLAB 的强大处理功能生成测试激励文件,还可以利用其图像处理方面的优势将数量庞大的仿真数据以图形的方式显示出来<sup>[7]</sup>。这里我们利用后者读取自校图形的仿真数据文本并显示在屏幕上。下面列出主要的 MATLAB 命令代码:

```

fid = fopen('Fig02. txt','rb');
%打开文本文件
[F01,count] = fscanf(fid,'%g',inf);
%扫描文件内容
fclose(fid);
%关闭文件
image01 = reshape(F01,1000,320);
%重组数据
image1 = image01';
%取转置
subplot(6,1,1);
%画图分区(6行1列)
imshow(image1/1023);
%显示图像

```

将设计的几个典型的自校图形显示在同一个窗口中,如图 7 所示,自上而下依次为锯齿波图

形、嵌套方块图形、宽型竖条纹、圆形、五角星和鉴别率图形。

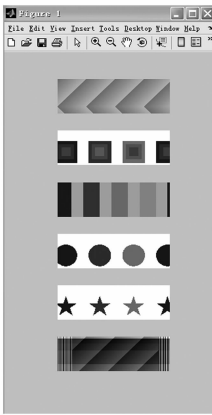


图 7 MATLAB 仿真显示 6 种自校图形

Fig. 7 Image simulation result of self-check figures in MATLAB

当图形设计仿真的测试向量规模很大时,不仅仿真速度慢,输出到 MATLAB 显示也比较困难。解决此问题的一般方法是在 Modelsim 仿真环节将关键信号的仿真时间按一定比例缩短,使得测试向量规模按同样比例减少,但缩短时间可能会导致验证覆盖率的降低。这里我们采取“预测抽样”的方法,即根据预想目标图像的空间频率估计抽样频率,把 write 进程的时钟由像素时钟变为抽样时钟,在 MATLAB 读取显示环节再采取相应的图像复原措施。最简单的就是用相当于像素时钟频率一半的时钟去抽样,在 MATLAB 读取图像数据后,对像素矩阵进行逐列扩展,近似显示图形的轮廓。

#### 4.4 设计实现结果

至此,自校图形的所有设计都经过计算机仿真验证是正确的,然后通过 JTAG 下载接口将程序注入到 FPGA 中,在数传环节将图像数据引

出,通过图像采集卡显示,可以看出自校图形与设计目标完全符合。由于自校图形是通过 FPGA 数字电路设计实现的,因此对模拟信号噪声具有很强的抗干扰能力。为保证自校图形显示的可靠性与连贯性,对像素数据的产生与发送采用同一个时钟,且分别在上升沿和下降沿工作,以满足数字逻辑电路的建立保持时间,避免竞争冒险。对于门控时钟信号比如图像行使能信号 LEN,其周期与占空比不固定,但还需要其触发行计数器来产生纵向灰度变化,其可靠性直接影响自校图形的质量。笔者采取了这样的措施:对 LEN 信号增加一级状态寄存器 LEN\_1,用高速全局时钟采集 LEN 和 LEN\_1 两个状态并判别跳沿,这样既提高了程序的可靠性,也便于统一全局时钟。主要代码如下:

```
if clk_HighEvent and clk_High = '1' then
    LEN_1 <= LEN;
    if LEN_1 = '0' and LEN = '1' then
        .....; —— 判别 LEN 的上升沿
    end if; end if;
```

## 6 结 论

根据 CCD 推扫原理,本文设计了功能不同的几种自校图形,图 7 中所示的锯齿波图形、嵌套方块图形和鉴别率图形在星载 CCD 遥感相机成像系统中得到了应用,共占用了约 5% 的 FPGA 逻辑资源( $3 \times 10^5$  门)。应用结果显示,自校图形能及时检测出通讯和数传模块所出现的异常,并能分析判断问题根源。其中锯齿波图形能检测出 CCD 读出时序的异常,鉴别率图形能测试图像数据经数传、压缩和解压缩后有无差异以及对系统传递函数的影响。综上所述,自校图形在 CCD 成像系统中是非常必要的,其检测作用是有效的。

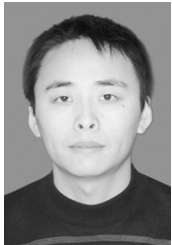
#### 参考文献:

- [1] 赵峰,袁东风,张海霞,等. 多 DSP 图像压缩实时并行处理系统[J]. 光学精密工程, 2007, 15(9): 1451-1454.  
ZHAO F, YUAN D F, ZHANG H X, et al.. Multi-DSP real-time parallel processing system for image compression [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15

- (9): 1451-1454. (in Chinese)  
[2] 杨桦,朱永红,焦文春. TDI-CCD 成像的速度同步分析和实验[J]. 航天返回与遥感, 2003, 24(1): 38-42.  
YANG H, ZHU Y H, JIAO W CH. Synchronization analysis and experiment of TDI CCD dynamic imaging [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2003, 24(1): 38-42. (in Chinese)  
[3] 袁孝康. 星载 TDI-CCD 推扫相机的偏流角计算与补偿[J]. 上海航天, 2006(6): 10-13.

- YUAN X K. Calculation and compensation for the deviant angle of satellite borne TDI-CCD push scan camera[J]. *Aerospace Shanghai*, 2006(6): 10-13. (in Chinese)
- [4] 赵贵军, 陈长征, 万志, 等. 推扫型 TDI-CCD 光学遥感器动态成像研究[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(4): 291-296.
- ZHAO G J, CHEN CH ZH, WAN ZH, *et al.*. Study on dynamic imaging on push-broom TDI-CCD optical remote sensor[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(4): 291-296. (in Chinese)
- [5] 王庆有. CCD 应用技术[M]. 天津: 天津大学出版社, 2006: 30-70, 207-209.
- WANG Q Y. *The Application Technology of CCD* [M]. Tianjin: Publishing House of Tianjin University, 2006: 30-70, 207-209. (in Chinese)
- [6] 张望, 常青, 喻小虎. 应用 TEXTIO 和 MATLAB 进行复杂数字系统仿真[J]. *国外电子元器件*, 2006(1): 4-7.
- ZHANG W, CHANG Q, YU X H. Application of TEXTIO and MATLAB in simulation of complicated digital system [J]. *International Electronic Elements*, 2006(1): 4-7. (in Chinese)
- [7] 杜勇, 刘帝英. MATLAB 在 FPGA 设计中的应用[J]. *电子工程师*, 2007, 33(1): 9-11.
- DU Y, LIU D Y. Application of MATLAB in FPGA design [J]. *Electronic Engineer*, 2007, 33(1): 9-11. (in Chinese)
- [8] 李云飞, 李敏杰, 司国良, 等. TDI-CCD 图像传感器的噪声分析与处理[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(8): 1198-1202.
- LI Y F, LI M J, SI G L, *et al.*. Noise analyzing and processing of TDI-CCD image sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(8): 1198-1202. (in Chinese)

#### 作者简介:



王文华(1982—), 男, 山东泰安人, 博士研究生, 主要研究方向为光电成像与图像处理。E-mail: wangwh900@yahoo.com.cn



任建岳(1952—), 男, 吉林长春人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为空间相机光机电一体化。E-mail: renjy@ciomp.ac.cn



何 斌(1961—), 男, 吉林长春人, 研究员, 主要研究方向为空间遥感图像处理技术。E-mail: hbemail@163.com