

文章编号 1004-924X(2012)11-2559-11

## 遥感卫星 CCD 相机模拟源的研制

王 譔<sup>1</sup>, 陈 曦<sup>2\*</sup>, 张立国<sup>3</sup>, 邓德祥<sup>1</sup>, 范赐恩<sup>1</sup>

- (1. 武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072;
2. 武汉大学 微电子与信息技术研究院, 湖北 武汉 430072;
3. 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:**针对遥感卫星上存在多种 CCD 相机组合, 相机模拟源在地面电测系统及星上遥测数据链存在 3 种不同模拟任务的需求, 利用大规模可编程器件、高速阵列存取技术、锁相环(PLL)频率调整技术和软硬件可编程图像处理技术, 研制了一种适用于不同 CCD 相机模拟任务的模拟源系统。该系统支持多台设备级联, 单台设备能够模拟输出 4 通道的并行 16 bit LVDS 信号、4 路串行 LVDS 信号和 4 路串行 NECL 信号, 其单通道并行 LVDS 数据像素频率为 0.3~200 MHz, 以 0.1 MHz 步进可调, 且单次循环输出容量最大可达 8 TB。通过简单配置, 可产生符合 CCSDS 协议的遥感相机回放数据, 并可对实时输出信号的行频和数据时钟相位进行调整。本系统已成功运用于多个型号空间相机的研制测试中, 提高了空间相机的研制效率和设备利用率, 改善了研制遥感卫星及 CCD 相机系统的测试验证手段。

**关键词:**遥感卫星; CCD 相机; 模拟源; CCSDS 协议

**中图分类号:** V447.3; TP73 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122011.2559

## Development of CCD camera simulation source for remote sensing satellite

WANG Xuan<sup>1</sup>, CHEN Xi<sup>2\*</sup>, ZHANG Li-guo<sup>3</sup>, DENG De-xiang<sup>1</sup>, FAN Ci-en<sup>1</sup>

- (1. School of Electronic Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
  2. Institute of Microelectronics and Information Technology,  
Wuhan University, Wuhan 430072, China;
  3. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- \* Corresponding author, E-mail: robertcx@whu.edu.cn

**Abstract:** For a variety of simulation needs of the CCD camera combination in a remote sensing satellite and for three different simulation tasks in ground electronic measurement systems and telemetry data link on board, a type of camera simulation source for different types of CCD cameras is developed with programmable logic devices, high speed array storage technology, Phase Locked Loop(PLL) frequency adjustment technology and the software and hardware programmable image processing technology. The system supports cascading multiple devices, 4-channel parallel 16 bit LVDS, 4 serial LVDS and 4 serial NECL signals, in which the pixel frequency of parallel LVDS data in per channel can be

收稿日期: 2012-05-11; 修订日期: 2012-06-13.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 61072135)

ranged from 0.3 MHz to 200 MHz in a step of 0.1 MHz and the capacity of single cycle output is up to 8 TB. In addition, through a simple configuration, the system can produce the play back data of the remote sensing camera according to the CCSDS protocol and can adjust the output signal frequency and data clock phase in real time. The system has been successfully applied in many types of space camera development tests, and it enhances the efficiency of space CCD camera development, equipment utilization and testing certification means.

**Key words:** remote sensing satellite; CCD camera; simulation source; CCSDS protocol

## 1 引言

采用科学级 CCD (Charge-Coupled Device) 的空间光学遥感器是目前高分辨率遥感卫星的重要载荷,相机自身及其相关星上处理设备的研制与测试过程复杂,需要用相机信号进行大量实验来充分验证各系统的功能和可靠性。为避免 CCD 供货和其它调试因素的影响,减少实际信号获取的昂贵费用,研制星上处理及遥测相关设备时,需要研制专用的模拟器代替实际 CCD 相机产生的各种数据以检验数据处理和前端通讯等星上遥测系统的工作及各子系统接口的正确性。

国内外在空间相机信号和相应分系统数据的模拟上主要有 3 种设计架构:一是基于 PC 架构的传统设计方法,该方法通过由 PCI 接口芯片+复杂可编程逻辑器件(CPLD)器件构成的板卡模拟星上数据流<sup>[1-2]</sup>,其灵活性较强,可实现像素时钟的连续调整,但受限于 PC 总线读写架构与设备驱动性能而不能实时同步并行输出多路高速数字信号,输出接口单一且不能完全模拟相机数据。二是采用以现场可编程门阵列(FPGA)为核心控制器的设计架构,该方案用高速 FLASH 存储模拟图像,用静态随机存储器(SRAM)作数据发送缓冲<sup>[3-4]</sup>,其同步输出和接口扩展能力较强,但数据模拟量和应用灵活性受限,不适应目前高分辨率宽覆盖成像遥感的数据要求。例如,当由 10 片量化深度为 12 bit 的 CCD 传感器拼接焦面而成的相机以 100 MHz 的数字信号同时进行高速传输,相机模拟源输出的数据吞吐率需高达 2 000 MByte/s,一次耗时 1 min 的未压缩成像遥感图片模拟数据所占空间就高达 120 GByte,以 FLASH 为介质将捉襟见肘。三是 20 世纪 90 年代美国国家宇航局(NASA)提出的基于 VME 总

线架构搭建的 COTS 系统<sup>[5]</sup>,该方案结合 FPGA 和 VxWORKs 系统实现了符合 CCSDS 下 AOS 协议<sup>[6-7]</sup>的各数据源模拟及系统集成测试,为遥感卫星多个 CCD 数据源的模拟实现提供了参考,但受限于当时的硬件水平,每通道发送速率和板载测试数据大小均不足。

目前国内的相机模拟源仅对相机信号在遥测数据链的一个应用方向进行模拟<sup>[1,3-4,8]</sup>,尚未见兼具仿真灵活性和高数据吞吐率,适用于研发测试不同模拟任务的相机模拟系统。本文针对 3 类模拟任务的不同应用目的和数据特性,从遥感卫星 CCD 相机输出信号特性出发,结合遥感成像模型的仿真和 CCSDS-AOS 协议源包结构,采用高速阵列存取技术、锁相环(PLL)频率调整技术和软硬件可编程图像处理技术,设计了一种通过简单设置就能适用不同模拟任务,可产生高速率同步多路多通道多格式 CCD 数据信号的模拟源系统。

## 2 遥感卫星 CCD 相机输出特性分析

### 2.1 遥感相机模拟源的任务分析

遥感相机模拟源的应用包含面向测试和面向研发两方面。为方便分析,以 CCD 相机模拟源在遥感卫星电测系统的工作环境为例,它主要由中央设备总控、专用测试设备、测试数据库、测控主干网及通信服务器等组成<sup>[9]</sup>。进行 CCD 有效载荷测试时<sup>[9]</sup>各单元联试的配置图 1 所示,图中标示了主要数据流向而省略了总控设备向各单元的控制信号。本文将 CCD 相机模拟源在其中完成的模拟任务按输出对象的不同分为 3 类,用任务 A、B、C 表示。

模拟任务 A,信号输出到预处理单元(IM-FU)和压缩单元(DCU)<sup>[10]</sup>。当该任务面向测试时,为验证下行通路,侧重各种 CCD 的多通道模

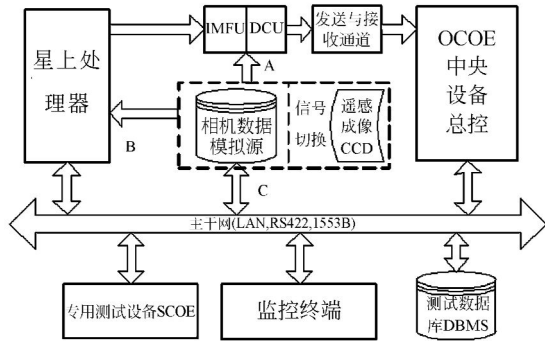


图 1 相机模拟源与卫星电测系统组成

Fig. 1 Framework of satellite electrical measurement system

拟,要求信号数据具有实时性和同步性。当该任务面向研发及参数测定的应用时,更侧重标准图像或数据的生成与光学成像模型下的系统仿真,以测定相机的各种物理学模型参数,验证相机成像品质和系统性能。特别对于星载图像压缩器的研发,需要符合星上原始高分辨率遥感多光谱图像的特性,以特定格式和速率发送。

模拟任务 B,可用来替代 CCD 成像系统向星上数据处理器发送经采样、量化、预处理和压缩后的光学信息,可自定义接口,侧重模拟卫星实际运行中相机输出时序的编排,速率连续可调整。

模拟任务 C 主要在卫星地面电测系统中接受单机或主干网测试控制命令,向主干网其它设备输出 CCSDS 标准 AOS 建议书<sup>[6]</sup>下成像 CCD 对应的虚拟遥测信道(Virtual Channel)数据,模拟标准化的科学数据业务。

现有的模拟源系统只能完成某一类模拟任务,或只针对某个指标设计。为提高设计利用率和研制效率,丰富测试验证手段,设计了可完成 3 类任务的遥感卫星 CCD 的模拟源系统。

## 2.2 设计思路与模型

遥感 CCD 相机模拟与仿真的目的在于最大程度的实现与实际系统的等效输出。由于要满足 3 类模拟任务的设计需求,并考虑可扩展性和通用性,系统的模拟与仿真模型采用半物理半数学的方式,以软件实现任务 A 与 C 中的数学模型和 AOS 数据帧格式,以硬件实现任务 A 与 B 中的控制过程、相机时序和物理接口模型,兼顾了可靠性和灵活性。

为实现实际星上 CCD 数据的仿真,系统引入

传感器模型。设真实物体  $f(x, y)$  经过地面反射、大气传输、卫星接收、光学成像等过程的作用最终退化成相机成像景像  $g(x, y)$ , 设其中整个系统叠加噪声为  $\eta(x, y)$ 。经简化的传感器信息退化模型如下图 2 所示。

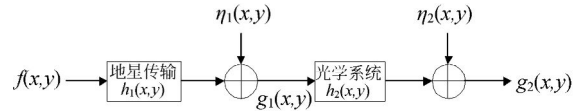


图 2 简化的遥感相机地物退化模型

Fig. 2 Brief degradation model of ground objects in optical payload

其中星地传输  $h_1(x, y)$  包含卫星姿态轨道对原始物体数据的影响、大气传输特性和传感器接收时相对运动所产生的退化过程,  $\eta_1(x, y)$  为传输过程中叠加的如云雾风沙等传输通道噪声。  $h_2(x, y)$  为光学系统的系统转移函数, 包含 CCD 传感器的光电模数转换、采样量化和传感器相对运动等。  $\eta_2(x, y)$  代表卫星 CCD 相机系统内在产生供压缩下传的观测景物时所叠加的各种噪声。典型的包含 CCD 暗像元响应的不一致性、载流子热噪声、散粒噪声、读出噪声和强暗电流噪声等等<sup>[11]</sup>。

在面向研发的任务 A 中按照图 2 所示模型, 将连续属性通过传感器采用并量化为二维离散数组, 最终观测图像为

$$g_2(x, y) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} g_1(m, n) \times h_2(x - m, y - n) + \eta_2(x, y), \quad (1)$$

式中:  $x=0, 1, 2, \dots, M-1; y=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。

将地星传输响应  $g_1(x, y)$  代入, 并取频域观察得

$$G_2(X, Y) = F(X, Y) H_1(X, Y) H_2(X, Y) + N_1(X, Y) H_2(X, Y) + N_2(X, Y), \quad (2)$$

因此要得到  $f(x, y)$ , 需建立合理的大气传输模型、卫星运动模型、光学成像模型以及各种噪声模型并确定响应函数  $h_1(x, y)$  和  $h_2(x, y)$ 。

在进行模拟任务 A 时, 系统所做的工作是为了给相机设计研制反馈逼近现实或边界条件下的数据参考, 通过实验样本测试确定相机各种物理模型参数, 于是设  $H_1(X, Y)$  为已知, 忽略传输噪声  $\eta_1(x, y)$ , 则最终输出由不同模型  $H_2$ 、 $N_1$  和  $N_2$  得到。此时模拟源将标准图像经成像模型和噪声

叠加后的仿真图像按相应的 CCD 接口时序输出。

### 2.3 遥感卫星 CCD 相机的数据格式与时序

遥感 CCD 相机模拟源应能够输出具有典型 CCD 相机时序结构的信号,以完成模拟任务 A 和 B。图 3 是一种典型的遥感 CCD 相机输出时序结构,各信号分别为:帧同步信号/使能信号(SYNC);像素转移时钟(CLK),数据通道 A 和 B。多 CCD 拼接面阵相机、线阵 CCD 相机和多光谱 CCD 相机的量化输出均可符合该结构,具体相机种类和输出接口的不同,数据可以是并行 2~16 bit 或高速多通道串行数据。

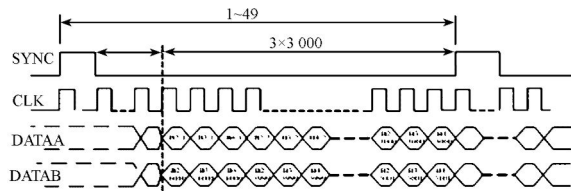


图 3 典型图像输出格式

Fig. 3 Output format of typical remote image

设 CCD 相机输出门控时钟等于光电传感器行使能时钟,为保证相机像元靶面上每推扫过一行景物时成像单元也在行使能信号驱动下处理完一行像素,成像单元的 FPGA 应根据星上处理器和传感器控制单元由实时姿轨参数计算出的行频参量调整使能的频率。星上 CCD 的行频和成像速度的匹配涉及传感器姿态、多种坐标系转换及运动矢量计算等<sup>[12]</sup>,模拟 CCD 相机动态成像可通过搭建光机电一体的物理平台实现<sup>[13]</sup>,而本系统将以采样量化后的信号时序模拟行频的近似调整。

同时,遥感相机的电子系统实际运行时由于各种传感器的成像特性及实时数据处理会产生像素时钟相位噪声,数据相对时钟发生时延即相移。而模拟源系统本身也存在这种相移,因此系统也应具备像素时钟与数据相位关系的调整能力。

## 3 遥感 CCD 相机模拟系统的设计

### 3.1 系统结构设计

以本系统在某卫星相机图像压缩与检测中的应用为例,整个模拟系统由数据生成与处理软件模块和多个高分辨率图像发送设备组成,图 4 为系统结构及数据流向示意图。数据生成与处理模

块在 PC 服务器上由软件结合仿真遥感模型实现数据的打包、编码和格式转换,将任务 A、B 所需的实时模拟数据、相机回放或压缩数据下载到发送设备,或直接作为任务 C 的模拟数据输出到主干网。后者由硬件实现高速多路 CCD 输出信号的模拟。

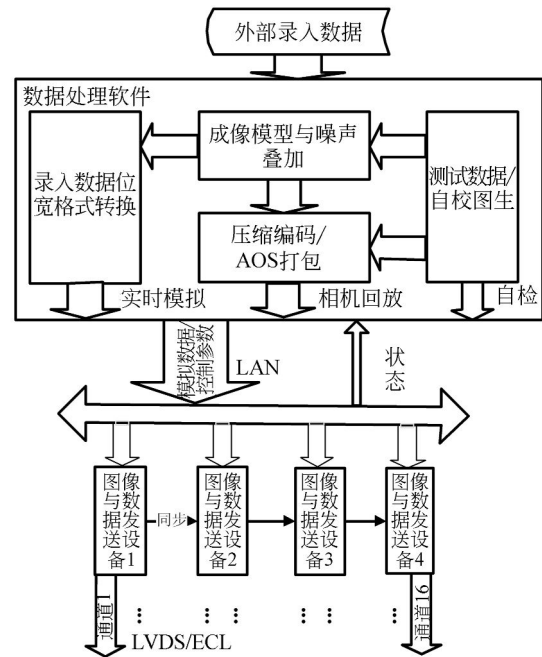


图 4 遥感 CCD 相机模拟源数据流向示意图

Fig. 4 Data flow of simulation system

为满足同时模拟多种 CCD 相机的需要,系统中每台发送设备可提供主备份共 64 位并行 LVDS 信号。通过同步信号和同步时钟将 4 台图像发送设备级联在一起,每台发送设备将输出 4 路并行 16 bit 位宽的 LVDS 数据、4 路串行 LVDS 信号和 4 路串行 NECL 信号。

由于不同型号 CCD 相机输出数据的格式是不同的,其图像数据与辅助数据在行同步正程和行同步逆程间输出的排列不同;不同 CCD 相机输出信号时序的位宽、串并、同步极性等也有很大差别;多片 CCD 拼接的大视场相机在一个正程内多片 CCD 的个数和输出顺序也不同。

处理这些差异的方法是:图像数据的格式差别在数据生成与处理模块中处理,在图像发送设备中通过 FPGA 和接口转换电路实现辅助数据和图像数据排放、正逆程、串并行等时序变化。

而在任务 A 中,相对于文献<sup>[14]</sup>中由 FPGA 编程实现成像系统自校图,本设计方案将图形的程序

设计工作转移到 PC 软件上, 设备负责信号输出。

### 3.2 图像与数据发送设备的硬件设计

高速图像与数据发送设备在功能上分为相机信号模拟和接口扩展两块, 在结构上由高分辨率信号发送模块, 接收与显示模块, 人机交互与时钟生成模块 3 个部分组成。图 5 为设备两种工作模式的实物图。相对于以往的模拟源, 本系统既能通过 PC 服务器接收测试流程和控制命令, 扩展模拟内容, 又利用基于 ARM 和 NIOS II 的嵌入式系统交互控制, 使发送设备成为能单独工作和配置的单元。

发送设备的核心为信号发送模块, 如图 6 所示它在结构上分为 2 块信源控制板和 2 块信源板, 共输出 4 路图像。其中信源板负责读取设备

内已存储数据, 输出主份图像; 信源控制板用于接收命令和输出备份图像。备份图像是主份图像经过拼接、反序或灰度调整等处理后的图像, 两者的速率和格式一致。这些处理由 FPGA 编程实现。

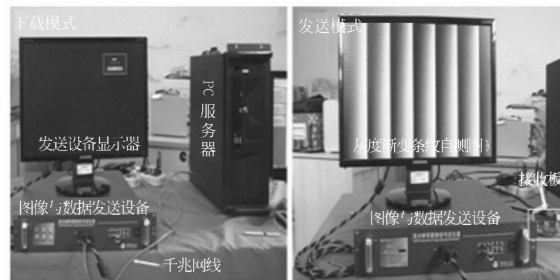


图 5 发送设备下载与发送模式

Fig. 5 Image and data transmission equipment

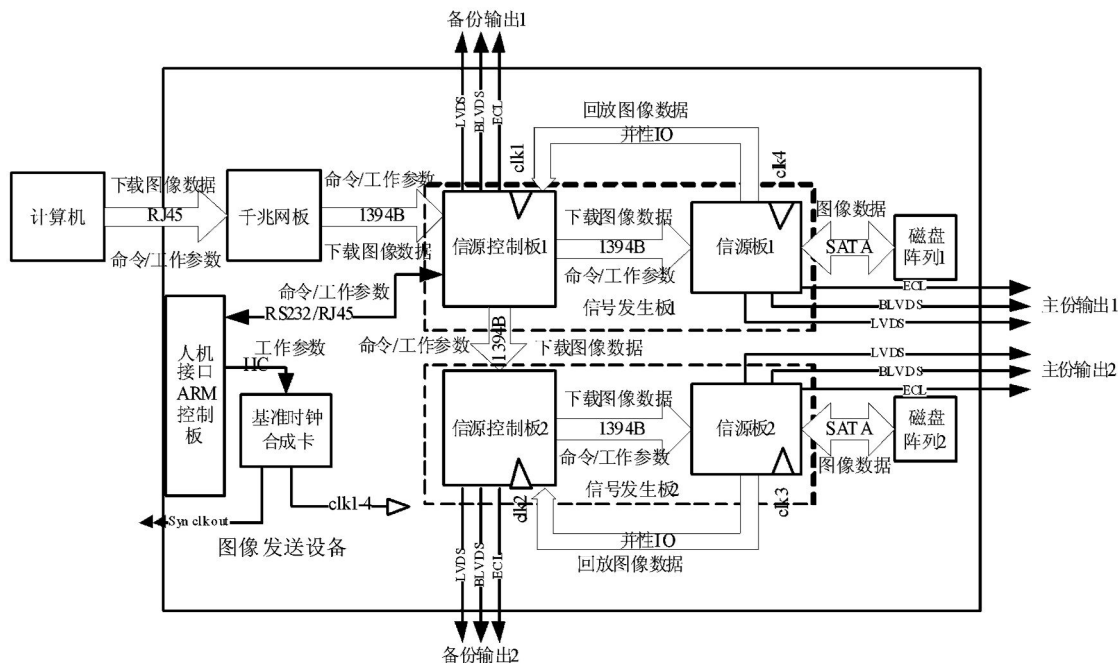


图 6 信源发送设备构成及内部数据流

Fig. 6 Internal data flow & structure of signal source

其中信源控制板电路主要由 FPGA、配置电路、并串转换电路、1394B 接口电路、RS232 接口电路、并行 IO 电路组成。FPGA 采用具有高速 IO 接口的 Stratix II GX 系列 EP2SGX60EF1152C5 直接输出 LVDS 信号, 同时内嵌 NIOS II 处理器。并串转换电路将 TTL 和 LVDS 信号分别转换成符合相机格式的串行 LVDS 信号。1394B 接口电路传输 4 路数据, 其中 3 路分别连接千兆网板、DVI 显示板和信源板, 第 4 个连接另一相机数据

通道的信源控制板。RS232 接口电路用于与人机交互时钟生成模块的 ARM 主控制器通讯, 传输设置参数。并行 IO 电路与信源板通信。在信号源模式下, 接收来自信源板的图像数据。其 FPGA 内部处理框图如图 7 所示。

信源板电路组成与信源控制板电路组成类似, 只是减少了 RS232 接口电路, 增加了硬盘接口电路, 并利用 FPGA 构建了 RAID 控制器控制由 4 块 SATA 硬盘组成的固态盘阵列, 以并行方式读

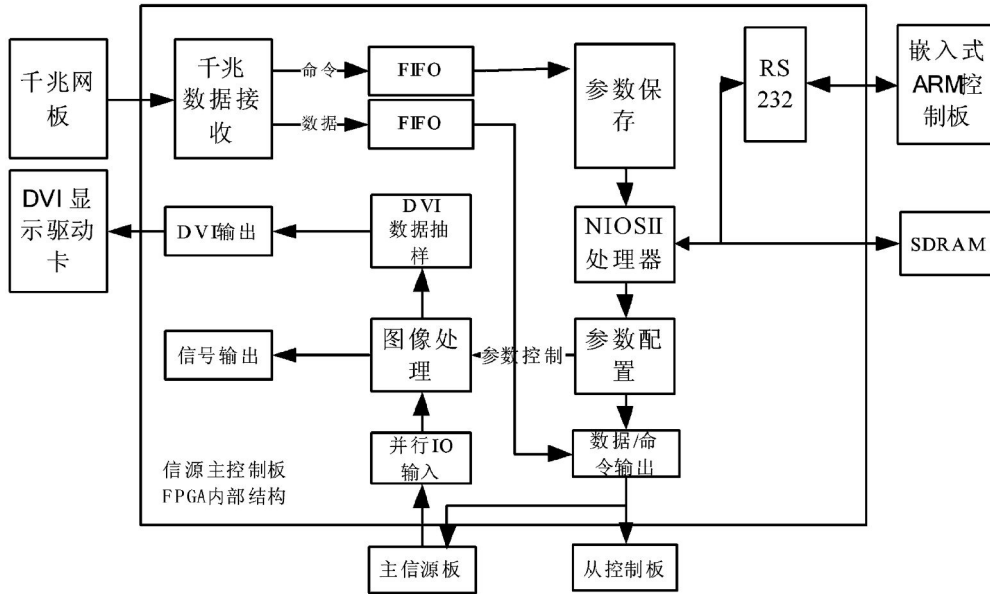


图 7 信源控制板 FPGA 内部处理框图

Fig. 7 Internal processing framework of FPGA

写图像数据。

接收与显示模块由千兆网 phy 芯片 88E1111, 数据链路层芯片 PM3386 以及 FPGA 芯片构成, 用于接收远程 PC 机通过千兆网口发送出来的数据和命令。人机交互与时钟生成模块, 采用低抖动

锁相技术的频率发生芯片 Si5338 构成了基准时钟合成卡, 输出可调的高稳定时钟信号以供设备内部和级联同步使用, 同时 ARM 板接受人机交互并向设备内各板卡发送和转发控制命令。图 8 为 ARM 板和信源控制板的命令处理流程。

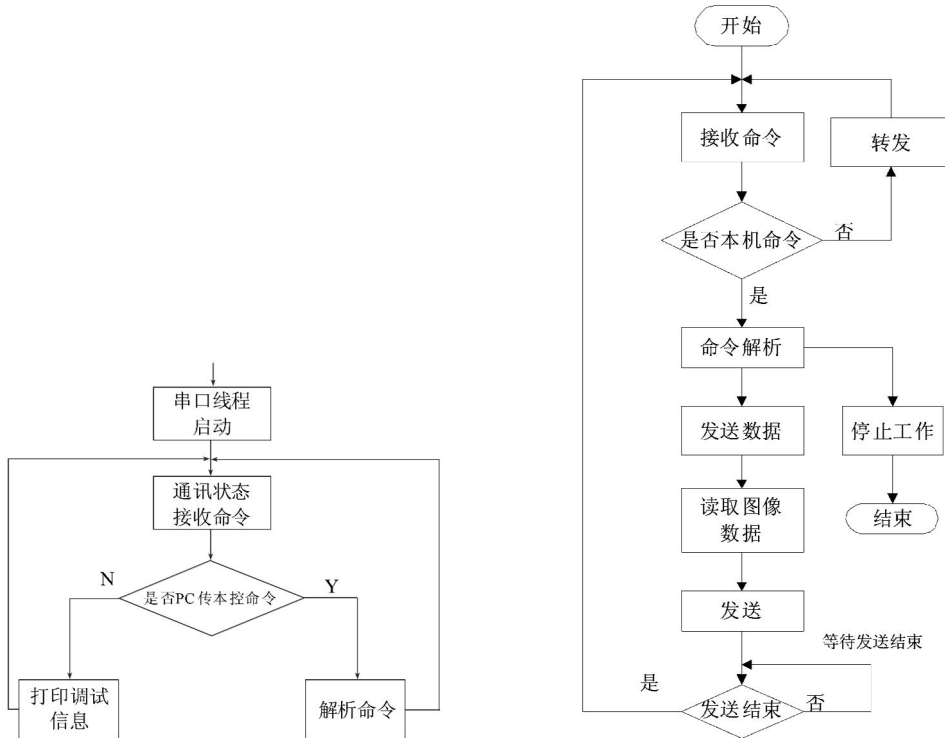


图 8 ARM 板和信源控制板的命令处理流程

Fig. 8 Processing flow of ARM board and source control panel

为实现 2.3 节所述的行频及钟码关系调整,设备用 FPGA 编程调整输出门控使能 SYNC 和数据码流 DATA,并结合信源板 FPGA 内置的可配置的 PLL 调节输出像素时钟 CLK 和码流 DATA 的相对相位。

在完成模拟任务 A 时,设模拟源输出每一行有  $a$  个有效像元,数据文件共有  $b$  行,门控使能逆程为  $e$  个有效时钟,则时钟合成板输出  $f_{clk}$  时,对 SYNC 信号频率  $f_l$  一个输出周期内有:

$$\frac{1}{f_l} = (a + e) * \frac{1}{f_{clk}} \Rightarrow f_l = \frac{f_{clk}}{a + e} \quad (3)$$

为达到模拟 CCD 相机成像输出行频变化与调整过程的目的,本系统设计可调模式,用最小逆程  $E_m$  最大逆程  $E_s$  和逆程步进  $s$  替代  $e$ ,  $E_s - E_m$  可被  $s$  整除,则输出第  $N$  行的  $f_l$  为:

$$f_l = \frac{f_{clk}}{a + E_m + (N - 1)s}, 1 \leq N < b, \\ s = \frac{E_s - E_m}{n}, n = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

当时序正程为 1 336,像素时钟为 50 MHz 时,  $E_m = 50, E_s = 500$  个像元,  $s$  为 5,则行频由 36.075 kHz 经 90 次行扫描调整至 27.233 kHz。行周期调整精度由像素时钟决定(当前为 20 ns),当  $f < 5$  MHz 时,可为  $s$  以  $f$  的倍频(如  $10f$ )计数来提高调整精度。

实际工作时,发送设备有数据下载、信号模拟和参数设置等 3 种工作模式,其内部数据流见图 6。各模式下可供设置和解析的参数包括:时钟频率和相位调整值,正程长度、逆程长、步进大小、总帧数、数据位宽、使能有效类型和图像灰度的调整等。

在数据下载模式下,PC 机通过网络接口 RJ45 将图像数据发送到千兆网板,再通过 1394B 接口将图像数据发送给信源控制板 1。根据数据下载目标为硬盘阵列 1 还是 2,信源控制板 1 将图像数据给信源板 1 或者通过信源控制板 2 转发给信源板 2,最终将数据通过 SATA 接口写入对应的硬盘阵列。

在参数设置模式下,本地控制时,人机接口 ARM 控制板通过 IIC 接口控制基准时钟合成卡输出相应的设备工作时钟 CLK1-4,将命令/工作参数由 RS232 发给信源控制板 1。远程控制时,PC 机通过网络接口 RJ45 将命令/工作参数发送到千兆网板,再通过 1394B 接口将命令/工作参数发送

给信源控制板 1。根据控制目标是信源板 1 还是 2,信源控制板 1 就将命令/工作参数发送给信源板 1 或者通过信源控制板 2 转发给信源板 2,同时两者均通过 RS232 接口转发给人机接口 ARM 控制板。

在信号模拟模式下,信源板 1 或 2 从各自的硬盘阵列中读出图像数据,将数据通过并行 IO 接口转发给各自对应的信源控制板,同时对读入的数据进行封装和格式转换,然后通过并行 LVDS、串行 LVDS 和串行 ECL 接口输出 1 路主份图像。1 路备份图像由信源控制板 1 或 2 通过并行 IO 接口接收图像,对数据进行处理、封装和格式转换后输出。

发送设备通过时钟合成卡和信源控制板输出的同步时钟和同步信号进行级联,连接方式如图 9。当发送设备 2、3 设置“开始发送”后,等待基准模拟源的同步信号有效沿触发本设备输出。

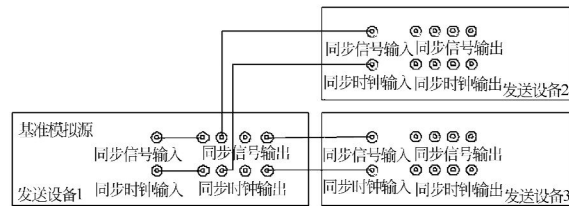


图 9 多台发送设备级联示意图

Fig.9 Schematic of sending device cascade

### 3.3 数据生成与处理模块的设计

该模块分为发送设备控制和仿真数据生成两部分。后者实现图 2 所示的成像与噪声模型加工生成模拟数据,并通过 C++ 编程实现 CCD 遥测信道符合 CCSDS 源包格式<sup>[6]</sup>要求的卫星存档数据和不带特定格式的自检测试图像。这些数据再由应用程序编辑、位宽和排序转换后下载到图像发送设备的内置磁盘阵列中,以模拟 CCD 相机数据输出。

在面向测试的任务 A 和 B 中设计自检图如图 10(b)(c)所示,图中(a)为按模拟任务 C 中 AOS 源包协议打包带帧头和计数的斜向灰度条,每行为一个符合空间链路子网(SLS)二级业务不含 RS 编码、帧长 892 字节的 VCDU(虚拟信道数据单元)。经任意组合和格式转换,3 幅图具备 8~16 bit 量化深度,分别满足 3 类模拟任务或系统自测需要。

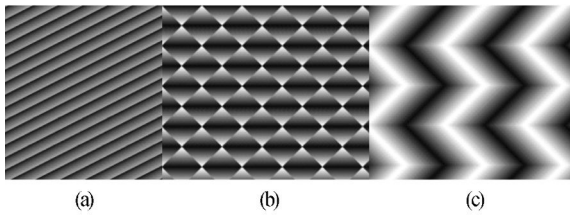


图 10 设计的 3 种自测图

Fig. 10 Three types of self test images

多光谱多 CCD 相机的组合目前已经普遍应用。由外部录入数据时,为研发遥感相机的星上预处理器和压缩器,模块可直接采用如图 11 所示的单独各波段样图,再经退化模型处理后模拟星上多光谱原始数据,或将一副已经过配准与校正后的合成彩色图像分色成 RGB 三通道再压缩合成一幅同分辨率灰度图,由此构成 3 通道多光谱+1 路全色图像<sup>[8]</sup>。

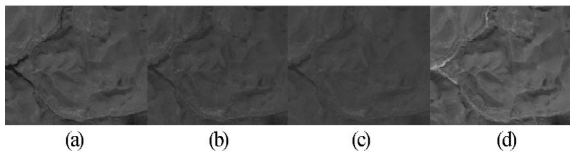


图 11 外部录入 Worldview 4 波段遥感样图,(a)(b)(c)(d)分别为红、绿、蓝和 NIR 通道,分辨率为  $1\ 336 \times 1\ 121$

Fig. 11 Remote images of worldview satellite for R, G, B and NIR channel samples

如图 4 所示,根据 3 类任务的需求不同,经成像模型叠加、格式和位宽转换下载到发送设备作为实时模拟 CCD 输出数据,或经压缩编码和 AOS 打包后直接由千兆以太网作为回放数据输出。

#### 4 测量实验与结果

为了对系统可能的数据流向和设计实现的模拟任务进行测试,编程生成的自测数据如图 5 所示,录入的 8~16 bit 真实遥感图像来自图 11 和 CCSDS 的官方网站<sup>[15]</sup>。

以每波段遥感图作为本系统单通道输入,经传感器模型分别叠加了:均值  $e=0$  方差  $d=0.008 \pm \epsilon$  高斯分布的暗电流/热噪声,泊松分布的散粒噪声/读出噪声,以及强暗电流/CCD 器件工艺产生的概率密度  $p=0.001 \pm \delta$  的椒盐噪声级联叠加,并以积分时间内像移量为  $m$ ,相对推扫方向运动角度

$\theta$  作运动模糊,得到模拟测试数据。经软件下载到高速图像发送设备后,分别按照像素速率 100 kHz~2 MHz, 2~100 MHz, 100~200 MHz 3 个区间以 0.1 MHz 间隔调整并发送。

设某次遥感图像在曝光积分时间之内像移量为  $m=5$ ,卫星运动方向同成像方向  $\theta=45^\circ$ ,则水平运动退化算子  $h_m(x, y)$  经旋转投影和双线性插值后得点扩散矩阵:

$$\text{PSF} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.050 & 1 & 0.030 & 4 \\ 0 & 0 & 0.051 & 9 & 0.177 & 1 & 0.050 & 1 \\ 0 & 0.051 & 9 & 0.177 & 1 & 0.051 & 9 & 0 \\ 0.050 & 1 & 0.177 & 1 & 0.051 & 9 & 0 & 0 \\ 0.030 & 4 & 0.050 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

对图 11 经模型参数按上述值取  $\epsilon=0, \delta=0$ ,则各通道数据输出如图 12 所示。试验证明研制的系统能完成 ABC 3 类模拟任务,适用于如图 3 所示时序结构的面阵 CCD、普通线阵 CCD 相机和多光谱 CCD 相机的模拟。

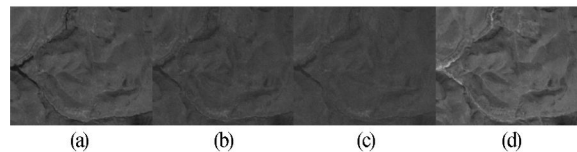


图 12 各通道经遥感模型后的图像,(a)(b)(c)(d)分别为 R G B 和 NIR 通道叠加噪声与模糊

Fig. 12 All channel image with noise & blur after optical data model

工程应用前,设备经自校正调整默认数据与像素时钟相移,使之在未控制前为 0,再按照任务需要,时钟数据相对像移  $0^\circ, 36^\circ, 90^\circ, 145^\circ, 180^\circ$  进行输出,此时时钟上升沿对数据跳变,下降沿采集数据,时钟和图像均符合设计要求。经测试,默认信源输出 50 MHz 时,需要正向调整 2.25 ns 可使数据与时钟完全对齐,通过建立时钟和校正值得对照表,可使每次调整后默认时钟相对无像移。

图 13 为模拟平台对输出像素时钟和数据码流进行相位调整后,示波器的实测波形输出。相位调整时,调整输出像素时钟(绿色)相移,不调整数据(基准时钟,黄色),当前频率 100 MHz,每调整 1 ns 相当于相移  $36^\circ$ ,图中为调整 2 ns 后,测量点相差  $108^\circ$ 。图 14 为系统工作在 200 MHz 输出 16 bit 位深度的自测数据时示波器所测,黄色为像素

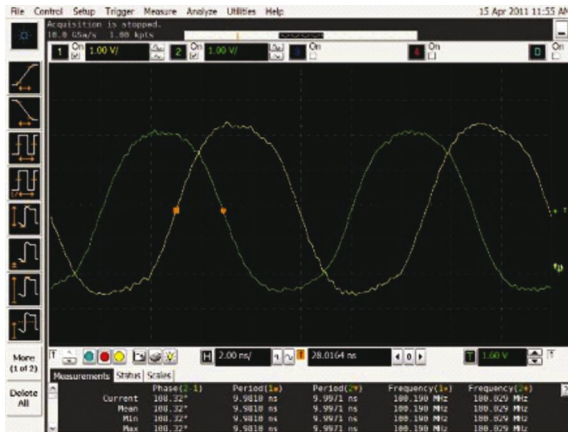


图 13 时钟相对数据相移调整的波形图

Fig. 13 Wave form of phase shift adjustment between clock and data

时钟, 绿色为门控, 8 路蓝色为低 8 位的数据位输出波形。图 15 为系统工作在 6.27 MHz 输出 12 bit 位深度的自测数据时逻辑分析仪所测, 输出使能为低电平有效, 时钟上升沿、数据上升沿和输出使能下降沿已对齐。(彩图 13~15 见本刊网刊)

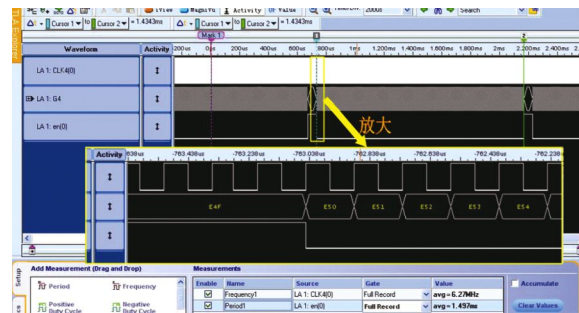


图 15 12 bit 自测数据输出的时序

Fig. 15 Output timing of 12 bit self-test data

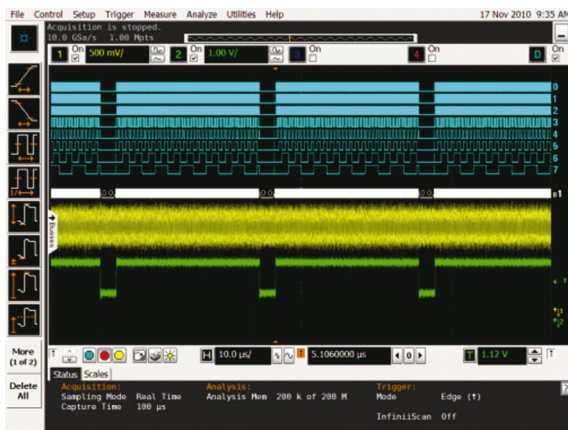


图 14 灰度条自测图输出的波形(显示 16 bit 的低 8 bit)

Fig. 14 Out put waveform of self-test grayscale

经试验证明, 单台设备能够模拟 4 通道的并行 16 bit 在 0.3~200 MHz 内以 0.1 MHz 步进可调的 LVDS 信号、4 路串行 LVDS 信号和 0.3~600 MHz 的 4 路串行 NECL 信号。

对比已知文献的各个模拟源/平台, 综合各设备的指标和系统模拟的完整性, 得出表 1 所示的数据结果, 从表 1 可看出本文设计的系统性能更加出色。单台设备下, 比现有文献 [3] 85 MHz 的 LVDS 并行发送速率提高了 135%, 数据位宽达到 16, 比文献 [1] 400 MHz 的串行 ECL 提高了 50.0%, 持续循环发送容量提高到了 8 TB。

表 1 遥感卫星模拟平台对比

Tab. 1 Comparison of remote sensing simulation platform

文献	工作容量/ Byte	发送频率 MHz	数据位 宽/bit	通道数	输出种类	应用能力
[1]	PC	1~400	8	—	ECL	记录系统
[3]	125M	20~85	8	6	LVDS	相机电子学
[4]	512M	2.9, 4.5	10	17	LVDS	图像压缩研制与测试
[5]	4M	150	—	8	串行	
[13]	PC/DDR	6, 12	10	11	ECL/RJ45	AOS 体系模拟与测试
本文单 台设备	8T	并行 LVDS	1~16	4 路	LVDS;	AOS 测试;
		ECL		4 路	ECL;	CCD 研制;
		0.3~600	可调	ECL	RJ45	行频调整; DCU 研制

注: “工作数据容量”仅指设备运行时测试数据单次最大容量, “PC”表示容量取决于 PC 系统, “DDR”表示取决于内存容量; “发送频率”指像素扫描频率, 串行 ECL 取单位 bps, 像素时钟=帧频×(有效像素+暗像素+辅助数据); “—”表示指标未提及。

## 5 结 论

本文讨论了国内外相机模拟测试系统,结合遥感成像信息模型和 AOS 协议结构,分析并阐述了遥感卫星相机模拟的应用方向,设计了 CCD 相机的通用数据图像模拟源。经测试和工程实践证明,相机图像模拟源能够高速、实时同步、稳定灵活地模拟输出各种带辅助数据的校验自测图和经各仿真模型处理的高分辨率多光谱多通道遥感图像。

与现有文献中提及的现行模拟源相比,并行发送速率提高了 135%,串行提高了 50.0%,单次持续循环发送容量提高到 8 TB。多台设备间支持级联工作,大大扩充了模拟输出的 CCD 通道,从而满足遥感卫星 CCD 相机电测模拟及设计研制的各种需求。目前该系统已成功应用于多个型号卫星地面测试系统、数据预处理与图像压缩设备研制、CCD 相机电子学验证等航天工程中。在后续工作中,可增加同步时钟信号以更好地适应对 TDI-CCD 不同积分级数的模拟支持,完善系统的适用范围。

### 参考文献:

- [1] 伍尚智,杨仁忠. 高速可编程遥感卫星数据模拟源的设计与实现[J]. 微计算机信息, 2005, 21(19): 97-98.  
WU SHANG ZH, YANG R ZH. Design and realization of high speed programmable remote sensing satellite data simulator[J]. *Control & Automation*, 2005, 21(19): 97-98. (in Chinese)
- [2] 冯文全,张晓林. 基于 Compact-PCI 的多路遥测信号模拟源的设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2005, 31(9): 1036-1039.  
FENG W Q, ZHANG X L. Design and realization of multiplex telemetry signal simulate source based on Compact PCI bus [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 31(9): 1036-1039. (in Chinese)
- [3] 张贵祥,金光. 星载光学遥感相机图像模拟源的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(7): 1368-1370+1374.  
ZHANG G X, JIN G. Design and realization of image simulator of space vehicle borne optical remote sensing camera [J]. *Aerospace Technology and Civilian Products*, 2009, 17(7): 1368-1370. (in Chinese)
- [4] 鲁琴,杜列波,魏鹏. 基于 FPGA 的卫星图像模拟源系统设计[J]. 测试技术学报, 2009, 23(3): 261-265.  
LU Q, DU LI B, WEI P. Design of simulative satellite image resource system based on FPGA [J]. *Spacecraft Engineering*, 2009, 23(3): 261-265. (in Chinese)
- [5] JEFF S, COSTENBADER J. A COTS system solution for CCSDS spacecraft integration and test[C]. *IEEE Aerospace Conference, Aspen, CO; UNITED STATES*; 6-13 Mar, 1999. 313-324.
- [6] CCSDS 701. 0-B-3. Advanced Orbiting Systems, Networks and Data Links Architectural Specification [S]. Blue Book, June 2001.
- [7] CCSDS 131. 0-B-1. TM Synchronization and Channel Coding[S]. Blue Book, Sept 2003.
- [8] 马天波,郭永飞,李云飞. 科学级 TDICCD 相机的行频精度[J]. 光学精密工程, 2010, 18(9): 2028-2035.  
MA T B, GUO Y F, LI Y F. Precision of row frequency of scientific grade TDICCD camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9): 2028-2035. (in Chinese)
- [9] 于志坚. 航天测控系统工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.  
YU Z J. *TT & C System Engineering*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [10] 刘飞飞,程灏波,王景宇. 科学卫星有效载荷 EGSE 平台的研究与应用[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(2): 214-219.  
LIU F F, CHENG H B, WANG J Y. A CCSDS 660.0 Compatible EGSE Platform and Its Application [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(2): 214-219. (in Chinese)
- [11] 吴强,迟耀斌,王智勇. CCD 传感器噪声对遥感影像无损压缩的影响[J]. 光电工程, 2010, 37(3): 72-78.  
WU Q, CHI Y B, WANG ZH Y. Effect of CCD noise on lossless compression of remote sensing images [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, 37(3): 72-78. (in Chinese)
- [12] 郑耿峰,张柯,韩双丽,等. 空间 TDICCD 相机动态成像地面检测系统的设计[J]. 光学精密工程, 2010, 18(3): 623-629.  
ZHENG G F, ZHANG K, HAN SH L, et al. De-

sign of test system for motion images of space TDICCD cameras [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3):623-629. (in Chinese)

- [13] 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):2011-2016. (in Chinese)

- [14] 王文华, 何斌, 任建岳. 线阵 CCD 成像系统自校图形设计[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(8): 2011-2016.

WANG W H, HE B, REN J Y. Design of self-check figures in linear CCD imaging system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1810-1818. (in Chinese)

- [15] ImageLib [online] available: <http://cwe.ccsds.org/sls/docs/SLS-DC/BB122TestImage/ImageLib.zip>.

#### 作者简介:



王 讓(1983—), 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 2008 年于武汉大学获得硕士学位, 主要从事空间数据系统与图像处理方面的研究。E-mail: sidneywang@163.com



范赐恩(1975—), 女, 浙江慈溪人, 博士研究生, 讲师, 2001 年于武汉大学获得硕士学位, 主要从事图像处理、机器视觉等方面的研究。E-mail: fce@whu.edu.cn



陈 曦(1980—), 男, 湖北宜昌人, 博士, 副教授, 2007 年于武汉大学获得博士学位, 主要从事人工智能、信号处理、现代电路设计等方面的研究。E-mail: robertcx@whu.edu.cn

#### 导师简介:



邓德祥(1961—), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士生导师, 主要从事空间图像处理、片上系统方面的研究。E-mail: ddx@whu.edu.cn



张立国(1961—), 男, 吉林长春人, 研究员, 研究生导师, 主要从事空间光学遥感器方面的研究。E-mail: zlgxx9@163.com

(本栏目编辑: 李自乐)