文章编号:1001-5078(2011)01-0058-05

・红外技术・

红外动态目标模拟器驱动及控制系统设计

张 凯,马 骏,孙嗣良 (西北工业大学航天学院,陕西西安710072)

摘 要:红外动态目标模拟器系统是红外制导武器半实物仿真系统中的关键设备。以某型空 地导弹导引头半实物仿真系统为应用对象,以微反射镜阵列(DMD)为核心器件,针对 DMD 型 红外目标模拟器的对比度、灰度等级和分辨率等关键技术指标,设计开发了基于 DMD 的动态 红外目标模拟器系统。首先介绍了 DMD 芯片的工作原理和灰度成像原理,其次对同步驱动、 数据加载和脉宽调制等关键电路进行详细设计,开发完成了 DMD 驱动及控制系统电路,设计 完成了基于 DMD 的红外动外目标模拟系统。该模拟器目前已经成功应用于某型红外成像导 引头半实物仿真测试系统中,逼真度和实时性高,涉及的关键指标得到了改进和提高。 关键词:红外成像;目标模拟器;微反射镜阵列;半实物仿真

中图分类号:TN215 文献标识码:B

Dynamic infrared target simulator driving and controlling system design

ZHANG Kai, MA Jun, SUN Si-liang

(College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Dynamic infrared target simulator is one of the crucial equipments for infrared guidance weapon's hardwarein-the-loop simulation platform. With the Digital Micro-mirror Device (DMD) as the key component, a dynamic infrared target simulation system was developed which will be used as the hardware-in-loop simulation platform for a certain type of air-to-ground missile seeker. DMD fundamental operating principle and gray imaging theory are explained thoroughly. Various key DMD subsystems such as DMD operating core, synchronization driving, data loading and PWM are designed elaborately and a dynamic infrared target simulator based on DMD has been developed. The practical experiment results prove that the above simulation system can satisfy all the design specification requirements and ideal simulation effects were obtained.

Key words: infrared imaging; IR target projector; digital micro mirror device; hardware-in-the-loop simulation

1 引 言

在过去的几十年中,美国和欧洲大量使用半实物仿真系统完成红外制导系统的仿真试验,并且针对红外成像系统以及采用红外成像系统的各类先进武器发展了多种类型的红外动态目标模拟器系统。 红外动态目标模拟器也已经成功应用以美国三大仿 真实验室^[1-2](美国导弹指挥仿真中心、Eglin 空军 基地测试研究中心、海军空军中心仿真实验室)为 代表的欧美各个先进的半实物仿真中心。 而国内在该领域的研究方兴未艾,近年来取得 了一定的进步,其中 MOS 电阻阵^[3-4]和数字微镜阵 列^[5-6](digital micro-mirror device, DMD)得到了广 泛的应用。DMD 系统因为其图像具有分辨率高(目 前最高可达 1920 × 1440 像元)、能量输出集中、图像 稳定、图像亮度非均匀性小、几何畸变小,可分辨温

作者简介:张 凯(1979-),男,博士,讲师,主要从事红外仿真 技术及红外目标模拟器技术研究。E-mail:singlechip@163.com 收稿日期:2010-07-09;修订日期:2010-09-19

差小等优点,逐渐成为红外复杂地面目标仿真的主 要红外成像模拟器。

基于国内当前研究现状,结合某型空地导弹具体目标仿真需要,本文以 DMD 芯片为核心,针对 DMD 红外目标模拟器的刷新频率、灰度等级和对比 等关键技术指标,采用脉宽调制方式完成了动态红 外目标模拟器控制系统设计,改进并提高了上述关 键指标,配合相应的红外成像仿真软件,完成了红外 成像制导系统的半实物仿真试验,给出了设计和试 验结果,最终的灰度等级可达到 256 级,对比度可达 到 35:1,系统刷新频率 45~150 连续可调。

2 系统设计

针对动态红外目标模拟器系统的刷新频率、灰 度等级和对比等关键技术指标,本文采用脉宽调制 方式设计 DMD 驱动及控制系统。

DMD 硬件系统结构框图如图 1 所示,主要包括 以下部分:①红外 DMD 芯片,本方案采用 TI 公司的 数字微镜(DMD)产生红外图像,该器件规模为 1280×1024,投射波长为 3~5 µm 中波红外;②信 号调理电路,信号调理系统包括信号解码、同步调 整、图像规格化、脉宽调制变换和像素驱动;③高低 温黑体照片系统;④光学准直部件,完成对 DMD 芯 片的光学合成与准直;光学准直部件与被测设备的 光学系统相匹配,对红外场景产生子系统产生的红 外光线进行准直,产生平行光,实验室内模拟无穷远 目标。





图 1 红外图像动态目标模拟器系统结构图

3 DMD 工作原理及灰度等级

DMD 是一种基于半导体基底的快速反射式数 字光开关,它是一组集成在 CMOS 存储器上的可旋 转的铝制微镜面阵列。每个微反射镜都相当于一个 数字光开关,能够旋转±12°。微镜的转动是由微镜 本身与下面存储单元之间电压差所产生的静电吸引 来完成。当存储器单元处于"开"状态时,微镜转到 +12°,使入射照明光被反射到投影光学系统视场内,相应地在屏幕上产生亮像素点;当处于"关"状态时,微镜转到-12°,使入射照明光被反射到投影光学系统视场外,相应地产生暗像素点^[7-8]。

DMD 器件输入代表亮度灰度等级的图像数据, 而输出代表图像信息的光学信息。它的灰度等级是 通过二进制脉冲宽度调制(PWM)实现的。当采用 24 位表示一个像素点的颜色信息时(R-G-B 信息各 用8位表示或者256种灰度等级),对于分别用8位 表示的颜色信息,信息的每一个位代表了光开启或 中断 $(1 ext{ o} 0)$ 的时间间隔,其间隔值相应地为 2° , 2¹....,2⁷。每一图像的时间域(255)被分成8个不 同的时间间 1/255,2/255,…,128/255。所以在将 图像数据传输到 DMD 之前,需要对其进行数据格 式转换,使其符合 PWM 机制^[8]。对于计算机中的 黑白图像,其颜色信息用1位表示(1-白,0-黑), 恰好对应光开关的状态,故不需多余的转换。对于 有256种灰度等级的图像, 选任一颜色信息的8位 表示值(灰度图像 R,G,B 值都相等),采用位分离 法,从最低有效位(LSB)到最高有效位(MSB)将一 张图拆成8张位面图,连续产生每一个位面图对应 的光开启的时间间隔,从而得到原图对应的灰度等 级^[8-9]。

4 DMD 系统驱动系统设计及开发

DMD 信号处理电路是红外目标模拟器控制、驱动及数据传输电路。DMD 的图像信号处理关键技术主要包括信号解码、同步调整、图像规格化、脉宽调制变换和像素驱动等技术,其组成如图 2 所示。本文完成该系统的脉宽调制及驱动系统设计,下面详细介绍驱动及控制系统设计及实现。



图 2 DMD 图像信号流程

4.1 脉宽调制及驱动系统

脉宽调制灰度变换电路主要作用是将像素灰度 值转变为 DMD 器件可接收的并与像素开关操作对 应的脉宽调制信号,最终由微镜像素的偏转实现图 像灰度显示。本文针对单片 XGA DMD 芯片进行设 计,采用脉宽调制方式实现灰度转换并驱动芯片显 示灰度图像。 如图 3 所示,驱动控制模块选用 DDC4100 和 DAD2000 芯片实现对 DMD 的控制。DDC4100 将主 控 FPGA 传输的数据转换成相应的 DMD 高速数据 和控制命令或者返回 DMD 和 DDC4100 的相关信息 给 FPGA,并负责提供 DMD 复位和时序信息给 DAD2000,再由 DAD2000 复位驱动 DMD。

图 3 DMD 控制系统结构框图

4.2 主控 FPGA 与 DDC4100 接口设计

主控 FPGA 与 DDC4100 之间硬件连接:DIN_A/ B 两个 16 位差分信号对总线,DCLKIN_A/B 两个总 线的输出数据时钟,DVALID_A/B 两个总线的输出 数据确认,ROW 包括输出行模式和输出行地址, BLK 包括输出块模式和输出块地址,DMD_TYPE 为 DMD 类型信息,RST_ACTIVE 微镜复位正在执行, INT_ACTIVE 为 DDC4100 正在初始化,VLED 为系 统工作正常和初始化完成指示信号。主控 FPGA 功 能实现结构如图 4 所示。

图 4 主控 FPGA 模块层次框图

FPGA 时钟模块主要实现了为 DDC4100 产生系 统时钟和输出 DDR (double data rate)数据驱动 DDC4100; FPGA 内核模块包括 3 个子模块: USB 控 制子模块、寄存器子模块、DMD 控制子模块。USB 控制子模块解码 CTL0, CTL1 和 CTL2 控制信号,发 送 16 位数据到 FPGA 的数据 FIFOs 或者控制寄存 器中。从数据 FIFOs 中以 200 MHz 每次读 128 位 数据,对于 AB 通道同时允许足够的数据通过 4:1 400 MHz 的 SERDES(并串行与串并行转换器) 提供给 DDC4100。寄存器子模块包括一组控制 DMD 的 USB R/W 寄存器,读/写寄存器分为两个步 骤,先根据传输的要读或写的寄存器地址建立地址 映射,再通过读/写寄存器中的数据命令控制 DMD 的操作或是返回相关信息。DMD 控制子模块通过 一个状态机控制要发送给 DMD 的数据时序,以匹 配 DDC4100 要求的数据格式。每个时钟上升沿和 下降沿 A,B 总线各加载 16 位数据,16 个时钟周期 加载一行数据,DDC4100 LVDS 输入数据总线数据 格式如图 5 所示。

图 5 DDC4100 LVDS 输入数据总线数据格式

4.3 DDC4100 及 DAD2000 与 DMD 接口设计及功 能实现

DDC4100, DAD2000 和 DMD 之间的硬件连接 如图 3 右半部分所示, DOUT_A/B 为 LVDS DDR 输 出到 DMD 的数据总线, SCTRL_A/B 为 LVDS DDR 输出数据控制, DCLKOUTL_A/B 为 LVDS DDR 输出 数据时钟。两个输出数据总线 DOUT_A/B 传输数 据(从 DDC4100 到 DMD), 有单独的数据时钟和控 制信号。

4.3.1 DDC4100 的数据加载和时序控制

DDC4100的时钟和复位输入有3个重要的信号:ARSTZ,参考时钟CLKIN_R和DCLKIN_[A,B]。 其中ARSTZ是一个电压监控器或上位机输入的低 电平有效,异步复位信号。需要特别注意的是,如果 任意一个DDC4100电源电压在复位有效时间中没 在允许的范围之内,芯片组将无法正常运行。 CLKIN_R的参考时钟源为50 MHz晶振,这个时钟 将提供用于驱动DMD的微镜复位,所以必须是很 精确的,而且它应该在ARSTZ信号有效之前被释 放。数据时钟DDC_DCLKIN必须是连续的,且有关 的所有信号都应该与其同步。

DDC4100 在 DDR 数据时钟 DCLKOUTL_A/B 的上升沿和下降沿输出数据和控制命令到 DMD,对 于每个行周期,#CLKS/ROW 个周期 32 位数据线加载#COLS 位到 DMD。XGA DMD 被分成 1024(列) × 768(行),16 个块,每块 48 行,16 个时钟周期加载

一行 1024 位。在加载每行数据的开始,通过块控制 信号 RST2BLKZ,BLK_MD 和 BLK_AD 来指定对应 的块复位(单块复位、双块复位、四块复位及全局复 位)、清除(单块清除)或者悬浮(全局悬浮)。当微 镜开始复位时,RST_ACTIVE 保持高电平大概 4.5 μs,表明复位正在进行,这期间其他复位不能开 始,直到 RST_ACTIVE 变成低电平,图6显示了典型 的连续块加载和复位时序。

DIN_A/B	Load Block0) Load Block1 (Load Block2)
BLK_MD/	X (Reset Block0) Reset Block1
BLK_AD	
RST_ACTIVE	

图 6 典型的连续块加载和复位时序

对于那些没有加载数据而有复位或者清除块操 作的情况,用户接口必须发空操作行周期,这可以通 过使 DVALID 有效,保持 ROWMD 为"00",BLKMD 为"00"#CLKS/ROW 个周期。至少一个行周期被完 成以开始复位。如图7所示为全局加载和复位。

4.3.2 DAD2000 复位驱动功能的实现

控制 DAD2000 和 DMD 的操作是 DDC4100 的 主要功能之一。在系统初始化时,DDC4100释放 DAD_INIT, 通过 SCP 与 DAD2000 通信来配置设备。 当这个过程完成时,高电压输出使能,通过产生适合 的 SEL, STROB, MODE, ADDR 信号控制微镜复位。 VBIAS, VRESET 和 VOFFSET 通过复位驱动功能来 提供给 DMD 不同顺序的复位信号, VBIAS 直接控 制 DMD 边缘的反射镜偏转到关闭状态。逻辑控制 输入包括 OEZ, MODE [1:0], SEL [1:0], A [3:0] 和 STROBE 这几个命令信号。STROBE 输入信号锁存 控制信息,然后在设备输出引脚输出新状态。复位 驱动功能包括 5V 选择、锁存、输出逻辑选择,以此 控制16个高电压输出FET开关,通过在三个电压 水平之间进行切换选择来生成某一个特定的复位波 形。复位波形产生的顺序由内部逻辑和 STROBE 信 号控制。选择的输出在 STROBE 信号的上升沿三 态,短暂延时之后被锁存到选择的电压水平,输出会 一直保持锁存最后一个复位波形,直到下一个复位 波形周期。

5 设计结果

本文采用的基于脉宽调制的 DMD 控制及驱动 方式改善并提高 DMD 的刷新频率、灰度等级和对 比度关键指标,并且温度稳定度和最小可分辨温差 也得到提高,系统可达到的主要指标如下:

- 1)像元数:1280×1024;
- 2)频率:45~150 Hz;
- 3) 灰度级:≥256(对热像仪积分时间3 ms);
- 4)目标背景最高对比度为35:1;
- 5) 最小温度分辨率:0.1 ℃(温度为 25 ℃);
- 6)温度稳定性: <0.1 ℃/h;

DMD 驱动设计电路入图 8 所示,其中图 8(a) 为 DMD 外围电路开发,图 8(b) 为 DMD 芯片显示场 景,采用摄像头拍摄户外建筑并直接传输给 DMD 解码和规格化电路并显示。

 (a)
 (b)

 图 8 DMD 驱动电路及显示场景

图 9 为基于 DMD 的红外目标模拟器整机与红 外热像仪形成观测采集回路,通过监视器显示输出, DMD 红外目标模拟器图像输入采用视频摄像头实 时采集输入模型,采集背景为实验室环境。

图 9 基于 DMD 红外目标模拟器整机及成像采集系统

6 结束语

本文针对中波成像波段,提出了基于 DMD 红 外目标模拟器的设计方法,对红外目标模拟器的核 心 DMD 芯片的外围电路进行研究、设计和开发,完 成了芯片的信号解码、图像规格化、同步驱动和脉宽 调制等关键外围电路的设计和开发,并且实际应用 于红外目标模拟器系统,完成了基于 DMD 的红外 目标模拟器系统的结构性设计和开发。

应用本文研究组装了红外目标模拟器整机并进 行了试验和测试。在试验和测试过程中,红外仿真 图像清晰,无闪烁现象,具有良好的实时性和真实 感。产生的红外辐射场能量分布均匀,对比度较高, 经测试各项参数均符合要求。

应用本文的设计研究,结合红外图像生成软件, 设计完成了基于 DMD 的红外目标模拟器系统,目 前主要用于与中波低温 HgCdTe 凝视成像探测器和 长波非制冷面阵探测器匹配,进行半实物仿真试验。 该系统取得了较好的仿真效果,并针对某型导弹建 立了半实物仿真系统,对该弹的快速立项起到了积 极的推动作用,受到用户单位的好评。

参考文献:

- [1] Li Y, Han S, Yu T. Infrared scene projector [J]. Infrared Technology (S1001 - 8891), 2006, 28(11):661 - 664.
- [2] Boeing B B. Current status of IR scene projection at the US. army aviation and missile command [C]// Proceedings of SPIE. USA: SPIE, 2001, 4366:147 - 158.
- [3] Zhang L, Feng X C, Zhang Y. Real-time IR image generation and displaying system based on resistor array projector[J]. Journal of System Simulation (S1004 - 731X), 2006,18(2):460-462.
- [4] Zhang Kai, Huang Yong, Sun Li, et al. Non-uniformity characterization and correction of MOS resistor array[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2007, 25(1):108-112.

张凯,黄勇,孙力,等. MOS 电阻阵的非均匀性测量及
补偿方法研究[J].西北工业大学学报,2007,25(1):
108-112.

- [5] Chen E Z, Liang P Z. Dmd dynamic infrared scene projection technology [J]. Infrared and Laser Engineering (S1007-2276), 2003, 32(4):331-334.
- [6] William R. Folks, dan mullally, guy zummo, arthur weeks. DMD-based infrared scene projection: A comparison of MWIR and LWIR modulation transfer function [J]. Proceedings of SPIE, 2004 (5408):199 - 202.
- Jia H Zhang, J Yang J, Li X, et al. A novel optical digital processor based on digital micromirror device [C]// Proceedings of SPIE Information Optics and Photonics Technologies II (S0277 786X). USA: SPIE, 2007, 6837, 68370C:1-6.
- Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Advancements in the micromirror array projector technology [C]// Proceedings of SPIE Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing VIII (S0277 - 786X). USA: SPIE, 2003, 5092:71 - 82.
- [9] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Advancements in the micromirror array projector technology II [C]// Proceedings of SPIE Technologies for Synthetic Environments:Hardware-in-the-Loop Testing X (S0277 - 786X), Bellingham, WA. USA:SPIE,2005,5785:68 - 79.