

基于 DMD 的红外场景模拟器图像数据传输和分割存储方法

许家林^{1,2}, 王晓东¹, 李丙玉¹, 王鹤¹, 孙强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. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 分析了 DMD 型红外场景模拟器相较电阻阵型在半实物仿真实验中没有广泛应用的原因。通过分析发现 DMD 型模拟器的数据传输带宽的大小和外同步触发延时长短对系统的实时性都有影响, 并且指出图像接口的数据传输带宽高于有效带宽 2 倍时才能满足系统仿真的高实时性要求。设计了满足实时性要求的专用千兆网的硬件, 具有极小的延时时间并且满足 UDP/IP 协议的数据传输软件和有利于 DMD 灰度显示高实时性的图像分割和存储的方法。实验验证了该方法能够传输 100 Hz 以上的分辨率为 1024×768 的 8 位灰度图像, 而外同步触发信号与系统播放开始信号延时仅为 70 μs, 并具有良好的稳定性。

关键词: 半实物仿真; 红外场景模拟器; DMD; 千兆网; 位平面

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2622-05

Method to transfer and store image data of infrared scene projector based on DMD

Xu Jialin^{1,2}, Wang Xiaodong¹, Li Bingyu¹, Wang He¹, Sun Qiang¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The reason why it is the resistor array but not the Digital Micro-mirror Device(DMD) that the widely used infrared scene projector was based on real time hardware-in-the-loop simulations (HILS) was pointed out. It was found that both image data transmission bandwidth of the interface and latency of external synchronization signal had impact on real-time performance. Analysis proved that only when the image data transfer bandwidth was 2 times higher than the effective bandwidth, it will meet the critical requirement of real-time simulation system. Dedicated Gigabit Ethernet hardware which meets this requirement was designed, and its software was compliant with UDP/IP protocol. The image transfer delay was only last for one MAC frame. The image data was reordered and stored in a particular way. Experiments proved that with great stability the speed of transferring 8-bit image data with 1024×768 resolutions was above 100 Hz and the latency between external synchronization signal and starting signal of projecting was only 70 μs.

Key words: HILS; infrared scene projector; DMD; giga ethernet; bit plane

收稿日期: 2015-01-11; 修订日期: 2015-02-12

基金项目: 国家科技重大专项(2013ZX04007021)

作者简介: 许家林(1984-), 男, 博士生, 主要从事 DMD 的应用和运动控制方面的研究。Email: xujialinseu@163.com

导师简介: 孙强(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事红外光电仪器方面的研究。Email: sunq@ciomp.ac.cn

0 引言

在红外成像制导半实物仿真系统中,红外景象生成器是核心的关键技术^[1]。目前红外场景生成的核心器件主要有电阻阵和数字微镜器件(Digital Micro-mirror Device, DMD)两种^[2]。电阻阵的出现早于 DMD,基于 DMD 的景象模拟器有着众多的优势,如模拟的温度分辨率高、场景的图像分辨率高等等,目前在国内进行的仿真实验所使用的红外景象模拟器却以电阻阵为主,原因之一是电阻阵出现的时间早于 DMD,但是 DMD 应用于投影也已经十多年了,说明这不是主要原因。主要原因在于 DMD 本身的同步问题和对数据传输与图像显示的实时性要求上。

电阻阵不存在同步问题,因为电阻阵加载图像后,可以连续保持图像,DMD 存在同步问题,但是只要将导引头的积分开始信号发送给 DMD 的驱动系统,使得 DMD 的显示时间包络在积分时间之内,可以解决这个问题^[3]。而对图像传输带宽的要求上,电阻阵由于其分辨率小,数据传输带宽要求低,有着一定的优势。目前正在使用的电阻阵的像元主要为 128×128,一幅 8 位灰度图像包含的数据为 131 072 bit,传输速度要求 50 幅/s 时,带宽为 6.553 6 Mb/s。但是对于基于 DMD 的红外目标模拟器,DMD 的像元数目是 1 024×768,传输 50 Hz 的 8 位灰度图像,带宽为 314.57 Mb/s,原有的图像传输接口的带宽已经不能满足要求。并且,由于显示原理的原因,DMD 系统需要先存储图像,当外同步信号到来时才开始投影图像,由此引入了另外一个滞后时间,即外部同步触发信号和系统开始投射红外场景的延时时间。

由此可知,解决模拟器的图像传输接口的速度和触发延时时间的问题关系到基于 DMD 的模拟器能否应用在整个仿真系统中。为了解决这两个问题,文中分析了半实物仿真系统对红外模拟器的实时性要求,设计了满足这个要求的专用千兆网方案和减少触发延时的数据分割存储方法。

1 DMD 型红外场景模拟器实时性要求

图 1 是简化的半实物仿真结构图,在半实物仿真系统中,红外制导武器采集红外模拟器生成的红外景象,并且以此来控制导弹的飞行姿态,5 轴转台

中的三维运动来模拟导弹在飞行过程中的姿态,二维运动来保证场景模拟器投射的红外场景的方向使其能够被导弹采集到^[2,4];仿真计算机有多台计算机构成,它主要采集导弹的制导指令,根据空气动力学模型计算导弹的速度、方位、姿态等信息,控制 5 轴转台,同时根据这些信息生成新的红外场景。

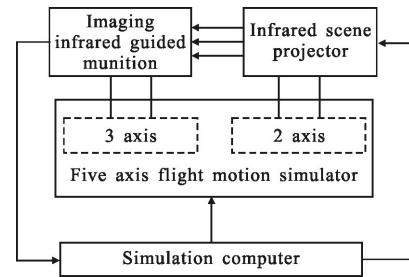


图 1 半实物仿真系统结构图

Fig.1 Hardware-in-the-loop simulations diagram

将系统的控制周期分为 3 个部分组成,如图 2 所示,a 是导弹的控制周期,主要图像采集,图像传输并且生成制导指令;b 是仿真计算机的控制周期,主要根据制导指令控制转台,生成新的红外场景图像,并且在接收到下一个制导指令之前将图像传输给景象模拟器;c 是景象模拟器的控制周期,它接收场景图像,并且在导引头采集图像时,同步将图像投射出来。理想的情况下,按照图 1 中的系统控制和数据传输方法,整个控制系统滞后 2 个周期,对于 50 Hz 的仿真系统,滞后 40 ms。如果使用 DVI 类似的占空比为 100% 的传输方式,这是较为常见的图像传输接口^[5-6],这种接口在一帧图像数据传输周期内,数据一直填充着数据线,数据的占空比基本上是 100%。那么将导致仿真计算机产生的图像要隔一个周期才能在模拟器中显示出来,并且被导引头采集到,这样整个仿真系统的延时由 2 个周期变成了 3 个周期,严重影响了系统的实时性,影响了仿真的真实性。在参考文献[7]中,使用电阻阵来产生场景,系统的仿真周期为 30 Hz,图像传输的时间为 33 ms,和 DVI 原理一样,是 100% 的占空比方法传输数据。系统总的滞后周期为 80 ms,延迟大于 2 个周期。而在图中,仿真计算机产生的图像,在下一个周期即被导引头采集到,这提升了整个仿真系统的实时性。但这就要求图像传输的带宽足够高,从图 b 中可以看出,图像传输的时间越短,仿真计算机用于计算的时间就越

长。对于 50 Hz 周期 20 ms 的仿真系统,1 帧图像传输的时间最好在 10 ms 以内。这样就要求 50 Hz 的系统具有 100 Hz 以上的传输能力,即 2 倍以上的接口带宽,数据带宽在 630 Mbit/s 以上。在常用的图像传输总线中, Camera Link 和千兆网都可以达到,但是

千兆网的电缆对数较少,并且,千兆网可以使用光纤传输数据,光纤对电磁干扰的承受能力较强,稳定性好,特别是 5 轴转台上这种电磁环境不好的场合。这里设计了专用千兆网的传输方案,支持光纤传输数据。

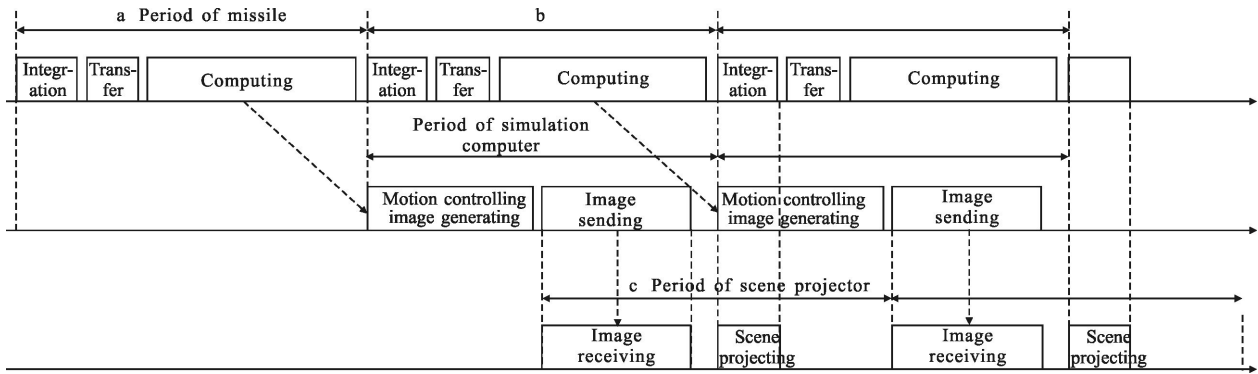


图 2 周期图

Fig.2 Periods diagram

2 硬件方案

图像数据从仿真计算机传输到 DMD 驱动板上,并且储存在 DDRII 的存储器上,在接收到播放指令后立即按照灰度图像显示的时序将图案显示在 DMD 上。驱动板的硬件如图 3 所示,图像数据经过千兆网模块数据解码后,使用并行的 LVDS 数据线传输到 FPGA, FPGA 将数据存储在内存上。

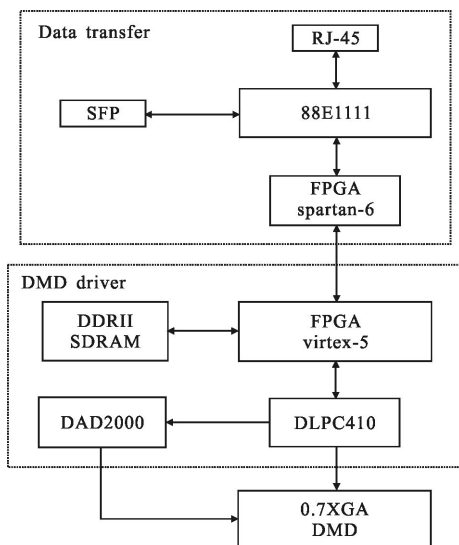


图 3 基于 DMD 的红外模拟器图像数据传输硬件框图

Fig.3 Hardware diagram of infrared scene projector based on DMD

千兆网数据传输模块的硬件主要包括物理层、MAC 层和实现协议栈的处理器等组成。物理层实现信号在物理介质中的编码和解码,比如使用双绞线传输和使用光纤传输等,这里需要选择物理层芯片。可供选择的物理层协议的芯片有 Marvell 公司的 88E1111,支持双绞线和光纤传输,Vitesse 公司的 VSC8601,支持双绞线。MAC 层方案可以选用 GMII 的集成芯片,如 AX88180,这款芯片采用双口 RAM 数据接口,但是数据带宽甚至到不了 700 Mbps,该方案选择 Xilinx 的 FPGA 的 IP 核解决方案,使用 IP 核直接和 GMII 接口连接。IP 核直接支持 802.3 的数据帧的收发,并且基本没有数据缓冲所带来的延迟。

3 应用协议设计和实现

数据从 MAC 层逐层传递到应用层的,该方法中设计了支持 UDP/IP 协议的软件协议,并且在应用层设计了表 1 数据包的格式。

表 1 数据包的格式

Tab.1 Data packet format

Item	Value
Total_size	2Bytes
Record_ID	2Bytes
Payload	0-8145

数据包由 3 个部分组成:数据长度、负载类型和

负载。负载类型涉及两大类:一类是图像数据,一类是运行状态查询。图像数据不做应答,并且直接转换成并行数据发送到下一个模块,而运行状态查询类型的数据包做应答,并返回相应的参数。使用 FPGA 实现此通讯协议的程序结构图如图 4 所示。

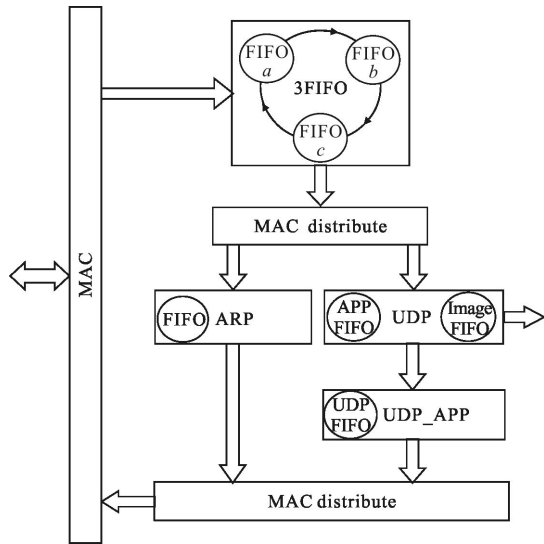


图 4 千兆网软件协议框图

Fig.4 Software diagram of giga ethernet protocol

MAC 使用的是 Xilinx 的 Spartan-6 系列的 FPGA IP 核 TEMAC。它与 PHY 接口采用 GM II, 与用户的接口采用 AXI4-Stream。软件中采用 3 个 FIFO 缓冲接收 MAC 数据帧,支持巨帧,最大为9 kB。在接收到一个数据帧的最后一个字节,可以知道这个数据帧是否无效,是则丢弃,否则继续向下传递。在此处,引入了方案中唯一的延时,即缓冲一个 MAC 帧的延时。在 MAC Distribute 模块中,将数据包分成 ARP 数据包和 UDP 数据包,并且分别解码,ARP 数据包返回相应的 ARP 请求。UDP 数据分两种情况,一种是图像数据,这是最主要的请求类型,主要的传输图像数据的功能就由它来实现。图像数据直接传递到下一个模块。另一种是 UDP 其他的请求,主要用于仿真计算机来查询数据传输的状态,包括当前数据的帧号、行号、数据传输的速度、数据的丢包率等参数。对于状态查询请求,程序获取当前的状态并且将数据按照数据格式打包并且返回给仿真计算机。

4 数据存储方法

对于基于 DMD 红外场景模拟器,由于显示原

理的原因,图像数据需要缓存,并且在同步触发信号,即导引头的采集开始信号到来时,开始投射图像,所以在存储时需要按照位平面的格式存储,这样在图像载入到 DMD 时,可以极大的缩小延时。这里设计了基于 DDR2 存储器的位平面存储方法来减小图像读取带来的同步延时。

图像数据经过千兆网后,重新转换成 8 bit 并行数据,同时有帧使能,行使能,时钟,和数据。将这 8 位数据按照 8 个位平面分别存储为 8 数据块,每条数据线的的数据对应着一个位平面的数据,一帧图像每一个数据线一个用 1 024×768 个数据,并且有行使能和帧使能控制数据是否有效。在 FPGA 内部,接收到数据之后,首先将每条数据线上的数据按照位 64 位格式做串并转换,并且缓存在 FIFO 中,一行数据传输完成后,分 8 次写入 SDRAM 中。在 SDRAM 中,一幅图像的 8 个位平面数据存储在不同的 RAM 块中,每个 RAM 块的地址的大小为 0x3 000,一幅图像分 8 个 RAM 块存储。

在导引头的同步触发信号到来之前,新一帧图像数据必然要准备好,在到来之后,立即开始将数据导入到 DMD 之中进行图像显示,并且在导引头的积分时间之内显示完成。

5 实验

为了测试传输和存储方案的时间特性,仿真计算机使用 PCI-E x8 接口的光纤网卡和红外场景模拟器进行图像传输,仿真机按照 50Hz 的帧频只发送简单的 0~255 灰度纯色图案,灰度值逐次增加。设置模拟器的图像的接口为光纤接口,外部触发接口设置为 TTL 触发。图 5 为实物图,使用的接口包括 TTL 同步触发,TTL 同步输出接口,光纤数据接口,RS-485 控制参数接口,以及相同内部的电路板上的测试点。



图 5 红外场景模拟器

Fig.5 Infrared scene projector

测试结果如图 6 所示, 图中信号 1 是模拟器的同步输出, 高电平为 8 位灰度图像显示时间, 为 3.96 ms, 信号 2 是外部 TTL 同步输入信号, 上升沿触发; 信号 3 是图像数据传输信号, 低电平表示一帧数据传输时间。

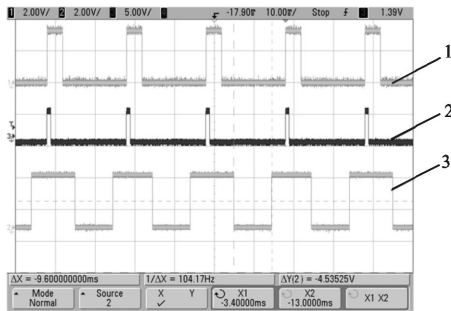


图 6 信号波形

Fig.6 Waveform of tested signals

6 结论

通过测试, 可以得出以下结论:

(1) 使用位平面的存储方法可以大幅减小外部同步触发信号和灰度图像显示时间的上升沿之间延时时间, 实测值信号 1 与信号 2 之间的时间延时约为 $70 \mu\text{s}$; (2) 一帧图像传输的时间约为 9.6 ms , 图像传输的最大帧频超过 100 Hz 。图像传输上数据的时间占空比小于 50% , 为提高整个系统的实时性做好了准备。(3) 仿真机定时获取数据传输的丢包率, 经过 8 h 以上的测试, 丢包率始终为 0。有效证明了传输的可靠性。

在考虑仿真系统的实时性的前提下, 在基于 DMD 的红外模拟器中, 设计了基于光纤传输的专用千兆网传输方案和基于 DDR2 的位平面存储方法, 可以极大的提高整个仿真系统的实时性, 为整个红外半实物仿真做好了准备。

参考文献:

[1] Ding Quanxin, Liu Hua. Current development and thought on

simulation, test and evaluation of the infrared imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38 (5): 753–758. (in Chinese)

丁全心, 刘华. 红外成像系统仿真、测试与评价的发展与思考[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(5): 753–758.

- [2] Chen Haiyan, Zhao Songqing, Wu Genshui, et al. Development of infrared dynamic scene simulator and its importance in hardware-in-the-loop simulation [C]// Proceedings of the Annual Conference of China Association for Science and Technology, 2008 :356–365. (in Chinese)
陈海燕, 赵松庆, 吴根水, 等. 红外动态场景模拟器发展现状及其在半实物仿真中的作用[C]//2008年(第十届)中国科协年会论文集, 2008: 356–365.
- [3] Xu Jialin, Li Bingyu, Liu Yang, et al. Gray scale modulation and synchronization of Infrared scene projector based on DMD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(4): 1062–1067. (in Chinese)
许家林, 李丙玉, 刘阳, 等. 基于 DMD 的红外景象投影机灰度调制与同步技术 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1062–1067.
- [4] Xie Yanwu. Design of hardware-in-the-loop simulation system for infrared imaging homing missile [J]. *Computer Measurement & Control*, 2013, 21(2): 394–395. (in Chinese)
谢燕武. 红外成像寻的导弹半实物仿真系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(2): 394–395.
- [5] Liang Yong, Zhao Xiaobei, Ma Jun, et al. Design of infrared scene simulator hardware system based on DMD[J]. *Infrared Technology*, 2011, 33(12): 683–686. (in Chinese)
梁勇, 赵晓蓓, 马骏, 等. 基于 DMD 的红外场景仿真器硬件系统设计[J]. 红外技术, 2011, 33(12): 683–686.
- [6] Beasley D Brett, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]//SPIE, 2009, 7210: 72100I/1–72100I/2.
- [7] Goldsmith II George C, Amick Mary A, Jones Lawrence E. Integration, calibration, and testing of resistor array dynamic infrared scene projector on the outer axis of a five axis flight motion simulator for real time hardware-in-the-loop simulations [C]//Technologies for Synthetic Environments: Hardware-in-the-Loop Testing, 1996, 2741: 119–130.