**文章编号:** 1672-8785(2016)05-0010-07

# 基于DMD 的高帧频红外 场景仿真系统设计

# 张 宁 汤心溢 张 昊

(中国科学院上海技术物理研究所,上海200083)

**摘 要:** 红外动态场景仿真技术在红外成像、跟踪和制导武器等系统的性能评估中起 着重要的作用,基于数字微镜器件 (Digital Micromirror Device, DMD) 的红外场景产生方 案是红外场景仿真技术中最具研究价值的一种方案。介绍了 DMD 的灰度调制原理和工 作方式,在此技术基础上设计了基于 TI 公司的 0.7XGA 开发平台的 DMD 驱动程序。通 过放大原图像,提高了仿真红外图像的对比度。最后根据探测器输出的积分时间信号 和帧同步信号,提出了一种提高 DMD 投影频率的方案。该方案投影出的灰度图像的对 比度有所提高,红外成像仪可以采集到清晰的灰度图像,且每一帧灰度图像的显示时 间缩短至 1.12 ms,相比于常规方式的 7.87 ms 有了很大的提高。

关键词:数字微镜器件;红外场景仿真;灰度调制;同步设计

中图分类号: TN216 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2016.05.003

# Design of High Frame Frequency Infrared Scene Simulation System Based on DMD

#### ZHANG Ning, TANG Xin-yi, ZHANG Hao

#### (Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** Dynamic infrared scene simulation technologies play important roles in the performance evaluation of infrared imaging, tracking and guided weapon systems. The infrared scene simulation technology based on Digital Micromirror Device (DMD) is of most research value among infrared scene generation schemes. The gray modulation principle and operation mode of DMD are presented. On this basis, the DMD driver based on TI's 0.7 XGA DMD driver development platform is designed. The contrast of the infrared image is improved by magnifying the original image. Finally, a scheme for improving DMD projection frequency is proposed according to the integration time of detector output signals and the frame synchronization signals. The contrast of the gray level image projected by using this scheme is improved. The infrared imager can collect distinct gray images. Moreover, the display time of each gray image is reduced to 1.12 ms which is improved greatly compared with the 7.87 ms of conventional ways.

Key words: DMD; infrared scene simulation; gray modulation; synchronous design

## 0 引言

随着红外成像技术的发展与应用,基于红 外成像技术的探测、跟踪和制导武器得到了高速 发展。为了对红外成像系统的性能进行评估,通 常需要进行大量的外场试验。而外场试验费钱 耗时,可重复性差,且系统不可能经历所有的场

**收稿日期:** 2016-03-29

作者简介:张宁(1990-),男,河南焦作人,硕士研究生,主要从事红外图像处理研究。 E-mail:xiyangshuguang@163.com 目前常用的红外成像仪所采集到的真实应 用场景下的红外图像的分辨率一般低于 DMD 的 可用分辨率。如果将此类红外图像作为仿真图 像源,需要对输入图像进行放大,以匹配 DMD 的分辨率和提高投影红外图像的对比度<sup>[3]</sup>。在 DMD 红外仿真系统对红外成像系统进行测试的 实际应用中,需要讨论 DMD 仿真系统和红外成 像系统的同步<sup>[4]</sup>,使 DMD 仿真系统能够在红外 成像系统的积分时间内有效地显示完一帧灰度 图像。用常规的 DMD 驱动方式产生的红外灰度 图像。用常规的 DMD 驱动方式产生的红外灰度 图像的帧频比较低,无法满足高帧频红外成像 系统的要求。合理利用探测器的积分时间和读出 时间,缩短仿真系统在探测器积分时间内的显 示时间是提高红外仿真系统帧频的关键。

## 1 DMD 灰度调制与工作方式

#### 1.1 DMD 灰度调制原理

DMD 的一次翻转可以表示两种状态,1(亮) 或 0(暗), DMD 微镜单元的 CMOS 存储结构也 只能存储这两种状态。也就是说, DMD 的所 有微镜翻转一次只可以显示一幅二值图像。那 么,要显示一幅红外灰度图像就需要进行灰度 调制,用到的方法是脉冲宽度调制 (Pulse Width Modulation, PWM)<sup>[5]</sup>。PWM 调制的原理是将一 幅灰度图像 (系统设计为 8 位灰度图像)进行比 特位面分层,一幅 8 比特灰度图像可考虑为 8 个 1 比特位面叠加而成,其中位面 0 包含图像中所 有像素的最低阶比特,而位面 7 包含图像中所 有像素的最高阶比特。设置每个位面的显示时间, 由这 8 个位面显示叠加,根据人眼的视觉暂留或 探测器的积分时间,最后得出一幅人眼能看的灰 度图像或者探测器可以探测到的灰度图像。

一帧 8 位的灰度图像表示在最亮和最暗之 间分为 256 个灰度等级。在 0~(2<sup>8</sup>-1) 之间, 0 表 示最暗, 255 表示最亮, 在最暗和最亮之间的灰 度可以用 2<sup>0</sup>、 2<sup>1</sup>、 2<sup>2</sup>、 2<sup>3</sup>、 2<sup>4</sup>、 2<sup>5</sup>、 2<sup>6</sup> 和 2<sup>7</sup> 这 8 个值的线性和组成。假设最低位面的 显示时间为 *t*, 那么依次每个高位面的显示时间 是前一个位面的 2 倍。一帧灰度图像的显示时间 *T* 可以表示为

$$T = \sum_{i=0}^{7} 2^i \times t \tag{1}$$

以4位灰度图像为例,每个位面的显示时间 依次为t、2t、4t和8t。时序图如图1所示。



图 1 4 位面 PWM 调制的时序图

因此,作为时间基数的位面0的显示时间决 定了一幅8位灰度图像的整体显示时间。合理控 制位面0的显示时间是使整幅灰度图像的显示 时间满足系统设计需求的关键。

#### 1.2 DMD 工作方式

DMD 显示一个位面需要数据加载、微镜翻转("Reset")和保持翻转状态这三个过程。本设计使用的 DMD 是 0.7XGA 规格,分辨率为1024×768。设计采用 DMD 串行工作模式,即在一个位面的所有数据被加载完成以后再进行微镜翻转,其时序如图 2 所示。



图 2 DMD 串行工作模式的时序图

根据系统的工作时钟,加载完整个位面的数 据需要 30.72 μs。微镜的翻转操作("Reset")是 在数据加载完成后根据每个微镜对应的 CMOS 中存储的数据进行翻转。这个"Reset"操作需 要 5 μs 时间。保持翻转状态是在微镜翻转之后, 需要 8 μs 的稳定时间,如图 3 所示。也就是说



Mirror trajectory for both "same state" and "state transition" mirrors

图 3 DMD 微镜的翻转和保持示意图

DMD 微镜显示时间最短不得小于 8 μs。在完成 5 μs 的"Reset"操作以后,在 DMD 稳定显示 8 μs 的过程中, DMD 可以继续加载下一个位面; 当前一个位面显示完以后可以直接显示已经加 载过的下一个位面,也就是说,位面的数据加载 和微镜的翻转是两个相互独立的过程。合理利 用两者的工作顺序,就可以最有效地利用时间。

通过 DMD 的块清除方式,可以将 DMD 恢 复到平状态。数据清除可直接通过向 DMD 发送 "Block Clear"指令来完成,所需时间仅为 1.92 μs<sup>[6]</sup>;再经过 5 μs 的"Reset"操作,就可以把 DMD 微镜复位到全 0 状态。这种方式对降低 DMD 在 积分时间内的显示时间有很大的帮助。

## 2 系统设计

#### 2.1 DMD 驱动设计

DMD 驱动设计是采用 TI 公司的 DLP4100 平台进行的,该平台支持 720P 的 DMD 器件, 系统框图如图 4 所示。用户可编程的部分是一块 Xilinx 公司产的 Virtex 5 FPGA,在这块 FPGA 上编写程序,先让其接收来自上位机的图像数 据,然后通过脉冲宽度调制将图像位面展开,并 将数据输入到 DDC4100 中。后者为 DMD 提供高 速数据和控制命令,同时为 DAD2000 提供微镜 复位指令和时序信息,各部分协同实现图像的 加载和刷新,从而控制 DMD 的显示。

系统采用 0.7XGA 规格的 DMD,分辨率 为 1024×768。整个系统通过 PC 机上的上位机 软件对图像数据进行位面转换,并将得到的位 面数据通过 USB2.0 传输给 FPGA,并存储在 DDR2 SDRAM 中。FPGA 根据灰度调制原理, 依次读取存储的 8 个位面,按照从左到右、从 上到下的顺序将每个位面的所有数据传输给 DDC4100,DDC4100 再对数据进行编码,并将其 传输给 DAD2000 控制芯片,DAD2000 通过 LVDS 将数据传输到 DMD 显示模块,DMD 显示模块 对准后端的光学通路,实现最终的红外投影显 示。系统的数据流图如图 5 所示。



图 4 D4100 控制板的系统框图





FPGA 以行为单位加载位面数据,在每个时 钟周期的上升沿和下降沿各加载 32 位数据。加 载完一行共 1024 位数据,需要 16 个时钟周期。 DMD 工作时钟的频率是 400 MHz,加载完一个 位面共需要 30.72 μs。利用每个位面的数据加载 时间作为 PWM 调制的时间基数,可算出下一帧 8bit 灰度图像的显示时间为 7873.6 μs,帧频为 127 Hz。

#### 2.2 图像放大

实际使用的由中波和长波红外成像仪采集 到的红外图像数据的分辨率通常为 320×256, 而 的图像行与列各放大 3 倍,分辨率可以达到 960×768。这一做法相当于原图像的一个像素 点在 DMD 中被 9 个微镜进行了翻转投影,从而 可以提高单个像素的对比度和亮度,实现 DMD 的有效利用。图像的放大采用线性拼接方式,如 图 6 所示。在上位机中进行位面转换之前先将图 像拼接完成,具体的做法是在生成新的图像时 将每一行的前 32 个像素和最后 32 个像素置为 0,将中间 960 个像素点中的每 3 个像素置为原 图像对应的一个像素;新图像的每 3 行数据相

使用的 DMD 的分辨率是 1024×768。将 320×256

http://journal.sitp.ac.cn/hw

INFRARED (MONTHLY)/VOL.37, NO.5, MAY 2016

同;从而可得到一幅变换之后的 1024×768 分辨 率的图像。



图 6 图像拼接示意图

#### 2.3 利用帧同步提高 DMD 帧频

红外成像仪的一帧时间包括两个部分, 一是

探测器的积分时间, 二是数据的读出时间。探测器的有效探测数据是在积分时间内探测到的数据, 也就是说, DMD 需要在探测器的一个积分时间内显示完一帧完整的灰度图像, 或慢或快都有可能产生图像混叠现象<sup>[7]</sup>。这就要求 DMD 的显示时间和探测器的积分时间保持同步。引入红外成像系统帧同步信号的目的是为了保证在DMD 和探测器保持同步的前提下, 尽可能缩短DMD 在探测器积分时间内显示完整灰度图像的时间。具体的时序如图 7 所示。



图 7 帧同步下的最有效显示

根据对 DMD 的 PWM 调制原理的介绍,一 帧灰度图像所需时间长短的关键在于 PWM 调制 的时间基数,也就是第一个位面的显示时间。如 果在积分时间信号到来之后才开始对 DMD 进行 操作,那么 PWM 调制的时间基数就无法做到很 小,因为每个位面的数据加载时间为 30.72 μs。 所以位面 0 的显示时间不得低于 30.72 μs,以此 作为时间基数,得到常规方式的下一帧灰度图像 的显示时间为 7.87 ms,帧频为 127 Hz,无法达 到高帧频红外探测器的仿真要求。

积分时间信号到来之前,探测器在进行相应的读出操作。DMD 可以在积分时间上升沿到 来之前提前完成第一个位面的加载,可先利用 积分时间信号到来之前的空余时间完成位面 0 的数据加载以及翻转(也就是"Reset"操作), 并且完成位面 1 的数据加载。然后通过 DMD 块 的清除操作控制位面 0 的显示时间,以灵活控制 PWM 调制的时间基数。DMD 器件决定, DMD 翻转以后的稳定时间是 8 μs,那么每个位面的 实际显示时间应不少于 8 μs。位面 0 在积分时 间到来之前已经完成翻转,位面 1 的数据也已经 加载完成。当积分时间信号上升沿到来之后,位 面 0 需要先显示一段时间,因此可以将这个时间 作为 PWM 调制的时间基数。而每个位面的实际 显示时间应不少于 8 μs,且位面 0 在积分时间 内的显示时间可以任意长。那么,可以把位面 1 的显示时间设为 8 μs,也就是位面 0 在积分时 间到来之后显示 4 μs。这样既可以满足 PWM 调 制原理,同时也能最大程度地减小 DMD 在积分 时间之内的显示时间。

以 4 μs 作为时间基数,要在积分时间到来 前 26.32 μs 开始显示位面 0,并且加载位面 1。 在位面 1 加载完成以后,经过 5 μs 的"Reset"操 作后显示,上面提到了只有在"Reset"操作之 后才可以加载下一个位面的数据。按照 PWM 调 制的原理,位面 1 的显示时间应该是 8 μs,这个 时间小于位面 2 的数据加载时间,因此必须通过 DMD 的清除操作将数据清零,使其正好显示 8 μs。需要在位面 1 翻转之后 6.08 μs 通过 DMD 块的清除操作(耗时 1.92 μs),将整个 DMD 置 0,

"Reset"再把DMD翻转到0状态。在DMD块 清除操作的"Reset"操作之后才可以进行位面 2的数据加载。

根据 PWM 的调制原理, 位面 2 的显示时间 应该为 16 μs,小于位面 3 的数据加载时间,因 此也需要像位面 1 那样对其进行处理。当数据加 载完成以后显示 14.08 μs,然后再进行 DMD 块 清除操作和"Reset"操作,再加载位面 3 的数 据。

位面 3 的显示时间应该为 32 µs,大于位面 4 的数据加载时间,因此不需要进行 DMD 块清 除操作,可以在位面 3 "Reset"操作之后加载位 面 4 的数据, 32 µs 之后对位面 4 "Reset"。同 理,位面 4 之后的每个位面显示时间均大于位面 加载时间,可以在当前位面的显示时间均大于位面 加载时间,可以在当前位面的显示时间内加载 下一个位面的数据。在积分时间下降沿到来之 前完成最后一个位面(显示时间为 512 µs)的显 示。通过计算得到在积分时间之内显示完整的 8 位灰度图像需要 1116.44 µs。这个时间远小于常 规的 DMD 显示方式的时间(7.87 ms),可以满足 中长波探测器的积分时间要求。

#### **3** 实验结果

完成 DMD 驱动设计后,通过上位机将图像 信息输入到 DMD 驱动板中,在 DMD 上投影出 灰度图像,再通过光学系统投影,红外成像仪就 可以采集到红外图像。整个硬件系统如图 8 所 示,其中,1 为红外成像仪的硬件部分,2 为红 外成像仪的软件部分,3 为红外仿真系统的光 学部分,4 为 DMD 的驱动开发板,5 为分辨率 为1024×768 的 DMD,6 为红外热源。具体实验 结果如图 9 所示,通过仿真系统和红外成像仪的 帧频同步,可以采集到稳定、清晰的高帧频红外 灰度图像。



#### 图 8 系统硬件实物图



图 9 通过红外热像仪成像的结果图

## 4 结束语

基于 DMD 的红外图像仿真技术一直是红外 仿真研究的热门领域,它能够在实验室实现对 红外成像系统的测试,大大降低红外成像系统 的研发成本。本设计能够实现 8 位灰度图像的无 损失投射,并提高原图像的对比度。通过合理利 用探测器的积分时间信号和帧同步信号,可以使 红外仿真系统的一帧显示时间缩短到 1.2 ms, 比常规方式的 7.87 ms 的单帧显示时间有了很大 的提高。

#### 参考文献

- [1] 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.
- (上接第9页)

- [2] 陈建华,朱明,黄德天.数字微镜器件动态红外场 景投影技术 [J].中国光学与应用光学,2010,3(4):325-336.
- [3] Rentz J D, Mansur D. Contrast Analysis for DMD-Based IR Scene Projector[J].SPIE, 2011, 8015: 801501-801510.
- [4] 许家林,李丙玉,刘阳,等.基于 DMD 的红外场景 象投射器灰度调制与同步技术 [J].红外与激光工程 ,2014,43(4):1062-1067.
- [5] 何永强, 耿达, 张冬晓, 等. DMD 灰度调制特性及其 在场景仿真中的应用 [J].**红外技术**,2014,36(12):997-1002.
- [6] 梁勇,赵晓蓓,马俊,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.
- [7] 耿达,何永强,唐德帅,等.基于 DMD 的红外场景仿 真系统实验分析 [J].激光与红外, 2014,44(10):1105– 1109.

设定距离值 $X_0$ /m	实测距离均值 $E_x/m$	标准差σ/m
15	14.990	0.017
50	49.999	0.016
100	99.983	0.014
200	199.975	0.016
400	399.991	0.015
800	800.022	0.017
2000	2000.003	0.020
4000	4000.005	0.016
10000	10000.015	0.028
20000	20000.003	0.031
30000	30000.022	0.035

表1 模拟距离结果

## 4 结束语

高精度动态距离模拟器的研制成功将会极 大改进目前脉冲式激光测距仪的测试校准方 法。我们可以从几十米到几十千米的距离上对 激光测距仪的测距精度进行测量,因而具有极 高的测试精度,且可满足不同测程激光测距仪 的测试需求。实验结果表明,这种测试系统具有 良好的稳定性和重复性,界面友好,操作简单。 此外,该系统还不受天气和场地条件的限制,因 此具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] 李真珠, 元洪兴, 黄庚华, 等. 一种带有自修正功能的高精度动态距离模拟器 [J]. 激光与红外, 2012, 42(11): 1273–1277.
- [2] 孙亚伟,张虎城,赵辉.高精度数字式距离模拟系统设计 [J]. 电光与控制, 2004, 11(1): 60-62.
- [3] 冯国旭,常保成.高精度激光测距技术研究 [J]. 激 光与红外, 2007, 37(11): 1137-1140.
- [4] 林盈侃,郭颖,黄庚华,等.激光测距仪距离模拟 源技术研究与精度分析 [J]. 红外与激光工程,2009, 38(6): 1089–1093.