

## DMD 的红外动态场景模拟器时间性能测试

许振领, 杨淼淼, 刘艳芳, 樊宏杰, 刘连伟

(中国人民解放军 63892 部队, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** DMD 红外动态场景模拟器是红外半实物仿真系统的重要组成部分, 其时间性能参数决定了模拟器能否将仿真图像正确投射到被测系统。介绍了 DMD 红外动态场景模拟器工作原理, 深入分析了 DMD 驱动方式和工作时序。讨论了半实物仿真实验对 DMD 红外动态场景模拟器调制时间、同步和帧频等时间性能参数的需求。提出了 DMD 红外动态场景模拟器调制时间、同步和帧频测试方法, 搭建了测试平台。对现有 DMD 红外动态场景模拟器调制时间、同步和帧频进行了测试, 分析了测试中发现的模拟器相关问题, 并提出了改进建议。为模拟器的研制、应用及性能评价提供一定的依据。

**关键词:** DMD; 红外动态场景模拟器; 调制时间; 帧频; 同步

**中图分类号:** TN216; V448.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)02-0417-07

## Time performance testing of DMD dynamic infrared scene projector

Xu Zhenling, Yang Miaomiao, Liu Yanfang, Fan Hongjie, Liu Lianwei

(Unit 63892 PLA, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The DMD dynamic infrared scene projector is an integral component of the hardware-in-loop IR simulation system. The time performance parameters of the projector directly affect the accuracy of images projected to the unit under test. The working principle, driving mode and working sequence of the DMD projector were introduced. The demands for time performance parameters such as modulation time, synchronization and frame frequency in the hardware-in-loop IR simulation were discussed. The testing methods of time performance parameters were put forward, and the experimental platform were set up. The time performance parameters of our projector were tested, some problems of the projector were analyzed, and some suggestions for improvement were put forward. These results would provide some reference for DMD projector design, application and performance evaluation.

**Key words:** DMD; IR scene projector; modulation time; frame frequency; synchronization

收稿日期: 2013-06-05; 修订日期: 2013-07-10

基金项目: 总装预研基金(51303040203)

作者简介: 许振领(1985-), 男, 硕士, 主要从事光电对抗及光电对抗仿真技术方面的研究。Email: xuzhenling@163.com

## 0 引言

在红外半实物仿真系统中, 红外动态场景模拟器将计算机图像生成器生成的目标和背景红外数字图像转换为物理红外热像, 模拟远距离红外动态场景, 为红外成像系统提供红外环境, 是红外半实物仿真系统的关键设备。在众红外动态场景模拟技术中, 基于数字微镜器件(DMD)的红外动态场景模拟器具有分辨率高、帧频快、动态范围大等突出优点而备受关注<sup>[1-3]</sup>。

DMD 红外动态景象模拟器是一种基于时间调制原理的空间光能量调制器, 其时间特性参数主要有调制时间、帧频和同步<sup>[3]</sup>。其中调制时间和帧频决定了模拟器的辐射信号样式及应用范围, 同步性能决定了被测红外成像系统能否正确接收模拟器辐射图像。因此, 需要掌握模拟器调制时序, 并对模拟器时间性能参数进行测试, 为调整模拟器与被测系统信号匹配提供依据, 进而保证半实物仿真实验的逼真度。

文中在介绍 DMD 红外动态场景模拟器工作原理的基础上, 深入分析了 DMD 器件驱动命令及执行时间, 以及 DMD 红外动态场景模拟器从图像接收至图像调制的工作时序。讨论了模拟器调制时间、同步和帧频等时间性能参数对半实物仿真试验的影响, 分析了模拟器与被测系统信号匹配对时间性能参数的需求。研究了模拟器调制时间、帧频和同步性能测试方法和需求, 根据测试需求设计了测试方案, 搭建了测试平台。对现有 DMD 红外动态场景模拟器的时间性能进行了测试, 并对测试中发现的问题进行了分析。

## 1 DMD 红外动态场景模拟器工作原理

### 1.1 模拟器结构及成像原理

DMD 红外场景模拟器主要由 DMD 器件、视频处理电路、DMD 驱动电路、照明黑体、照明光学系统和准直光学系统等组成<sup>[3]</sup>。视频处理电路用于接收计算机图像生成器发送的视频图像。DMD 驱动电路用于驱动 DMD 器件工作。照明光学系统收集照明黑体的辐射, 并汇聚到 DMD 器件上, 准直光学系统将经过 DMD 器件调制的辐射信号投射到被测系统入瞳处。

DMD 器件是 DMD 红外场景模拟器的核心器件, 由一组二维微镜阵列组成。每个微镜由存储单元、微反射镜以及支撑微镜的支柱和转动铰链、镜架、电极等组成<sup>[4]</sup>。每个存储单元可存储一位二进制数, 当存储单元为 1 时, 微镜偏转 $+12^\circ$ , 反射光线全部通过准直光学系统投射出去, 对应像素处于“开”态。当存储单元数据为 0 时, 微镜偏转 $-12^\circ$ , 反射光线偏离准直光学系统, 被吸收装置吸收, 对应像素处于“关”态。没有寻址信号时, 微镜的偏转角度为 $0^\circ$ , 对应像素处于“平”态。因此, 通过控制存储单元的二进制数据流, 可对微镜“开”态时间占空比进行控制, 从而实现灰度等级的调制。

### 1.2 DMD 器件驱动方式

DMD 驱动电路通过数据传输线和复位控制线驱动 DMD 器件工作, 驱动命令主要有: 装载(Load)、复位(Reset)和清零(Block Clear)<sup>[5]</sup>。

装载是通过数据传输线对 DMD 存储单元传输二进制数, 此操作只针对存储单元, 不改变微镜机械状态。装载时间主要由驱动电路传输速率和象元数决定。对于目前常用的 XGA 型(1024×768)DMD 器件, 数据传输速率可达 25.6 Gb/s, 装载所有存储单元耗时约 30.72  $\mu\text{s}$ <sup>[5]</sup>。

复位是通过复位控制线控制微镜机械状态, 将微镜状态翻转到存储单元所指定的状态上。复位时间不能小于微镜最小机械稳定时间(约 15  $\mu\text{s}$ )<sup>[3,6]</sup>, 在复位时间内不允许对微镜进行其它任何操作。

清零是通过数据传输线对 DMD 器件存储单元快速装载数据“0”, 该命令与对微镜装载“0”效果相同, 但耗时较小, 对 DMD 所有微镜存储器清零耗时约 1.92  $\mu\text{s}$ 。

### 1.3 模拟器工作时序

DMD 红外场景模拟器在实际工作时, 首先利用视频处理电路接收计算机图像生成器输出的视频图像, 并转换为 DMD 驱动电路需要的格式, 存储在缓存上。DMD 驱动电路根据外同步信号、同步触发延时, 将缓存上的图像数据逐位装载至 DMD 器件存储单元, 同时产生系列复位信号控制 DMD 各微镜的翻转状态, 从而完成图像的调制。工作时序如图 1 所示。

其中, 调制时间是完成辐射信号调制所需的时间, 由模拟器灰度等级调制模式、灰度等级和 DMD 器件驱动命令执行时间决定。目前灰度等级调制模

式通常采用脉宽调制法(PWM),即将图像调制时间划分为若干个二进制时间间隔,分别与二进制图像数据的每一位相对应。图像数据最高有效位(MSB)对应的维持时间最长,最低有效位(LSB)对应的维持时间最短。

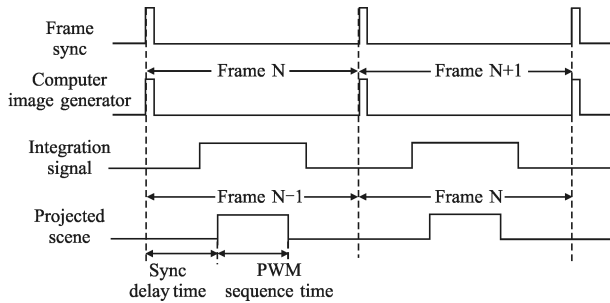


图1 DMD 工作时序图

Fig.1 Illumination of DMD working sequence

在进行图像调制时,首先对 DMD 所有存储单元装载相应的最低有效位数据,装载完成后进行复位操作,最小稳定时间过后,进行清零操作;之后再再次进行复位操作,使所有微镜处于“关”态。第二、三位驱动顺序与第一位相同,但两次复位的时间间隔有所增加,分别使相应的维持时间为第一位的 2 倍和 4 倍。进行第四位驱动时,由于第三位的维持时间大于装载与复位的时间和,可在第三位维持时间内,装载第四位数据,当第三位维持时间结束后,直接对第四位进行复位。具体调制时序如图 2 所示。如果二进制位数大于四位,则后几位的驱动方式同第四位。

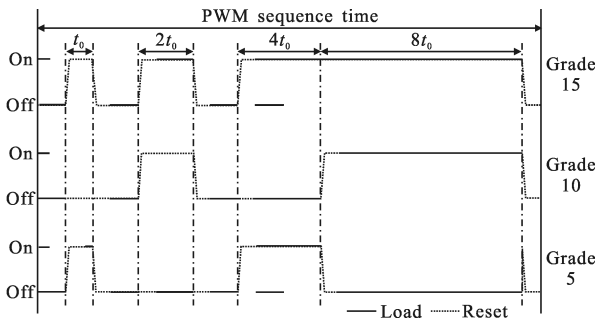


图2 PWM 调制时序示图

Fig.2 Illumination of PWM modulation timing sequence time

综上,完成单位灰度等级调制所需的最小时间为复位和清零的时间和,完成  $N$  位二进制脉宽调制所需的最小调制时间为:

$$t_N = (t_0) \times 2^N + 3 \times t_R + 3 \times t_L \quad (1)$$

式中:  $t_0 = t_R + t_C$ ,  $t_L$ ,  $t_R$ ,  $t_C$  分别为装载、复位和清零时间。

可见,实现八位 256 级灰度图像所需最小调制时间约为 4.4 ms。

## 2 时间特性需求分析

### 2.1 调制时间

由于被测红外成像系统只能在探测器积分时间内探测到光信号,模拟器调制时间与被测系统积分时间的相对关系决定了被测系统能否完全接收模拟器调制产生的辐射信号。

若调制时间大于积分时间,则模拟器无法在探测器积分时间内完成图像调制,被测系统不能正确接收模拟器辐射图像;此时,可通过降低灰度等级或优化灰度等级调制模式的方式减小调制时间<sup>[7]</sup>。若调制时间等于积分时间,模拟器能够在探测器积分时间内完成图像调制,被测系统能够正确接收模拟器辐射图像,但很难调整模拟器调制时间完全处于被测系统积分时间内。随着调制时间的降低,模拟器调制辐射信号在积分时间内的占空比将减小,导致模拟器能量转换效率降低。因此,在进行半实物仿真实验时,要求模拟器调制时间略小于被测系统探测器积分时间。

### 2.2 同步

被测红外成像系统一般是在自身时序电路的控制下进行光积分,而不同系统工作时序有所不同。因此,为了使计算机图像生成器和模拟器按照被测系统的工作时序进行图像仿真和调制,需要使 DMD 红外动态场景模拟器和计算机图像生成器与被测系统保持同步。

模拟器与被测系统同步是指模拟器帧频与被测系统帧频同步,使模拟器按照被测系统帧频辐射图像;且模拟器调制时间处于被测系统积分时间内,使被测系统正确接收模拟器辐射信号。因此,在进行半实物仿真实验时,要求模拟器能够接收被测系统同步信号,使自身图像调制帧频与被测系统帧频保持同步;且能够在一定范围内调整同步触发延时,使调制时间处于积分时间内。若模拟器与被测系统帧频不同步,模拟器调制时间与探测器积分时间的相位将逐渐变化,被测系统不能稳定接收模拟器辐射信号,从而产生闪烁效应<sup>[8]</sup>。若调制时间与积分时间不同步,被测系统将不能完全接收模拟器辐射信号,从而产生假灰度现象<sup>[9]</sup>。

计算机图像生成器与被测系统同步是指计算机图像生成器帧频与被测系统帧频相同,使计算机图像生成器按照被测系统帧频向模拟器发送视频图像。若计算机图像生成器帧频大于被测系统帧频,则模拟器无法将所有图像辐射出去,将产生漏帧现象;反之,将产生重帧现象。漏帧和重帧都将导致被测系统接收的图像序列不同于计算机图像生成器输出的图像序列,进而影响被测系统对目标的识别和跟踪。

### 2.3 帧 频

模拟器帧频包括视频输入帧频和图像显示帧频<sup>[3]</sup>。模拟器的有效帧频范围是由视频输入帧频和图像显示帧频共同决定的最小可变范围。

视频输入帧频由模拟器视频处理电路决定,模拟器视频处理电路主要用于被动接收计算机图像生成器输出的视频图像。因此,视频处理电路应该能够自适应接收计算机图像生成器按照不同帧频输出的视频信号,且自适应频率范围能够包含红外成像系统常用帧频。

图像显示帧频由 DMD 驱动电路决定,受调制时间限制,不能大于调制时间的倒数。在实际工作时,图像显示帧频要与被测系统帧频保持同步。因此,DMD 驱动电路应该能够与被测系统帧频保持同步,且自适应频率范围能够包含外成像系统常用帧频。

## 3 时间特性测试方法

### 3.1 调制时间测试方法

根据 DMD 红外动态场景模拟器的工作时序可知,模拟器输出最高灰度图像时的辐射脉冲宽度即为调制时间。为了精确测量模拟器调制时间,需要使模拟器持续输出最高灰度的均匀图像,利用响应时间远小于调制时间的红外探测器对模拟器辐射信号进行探测,且探测器响应波段应包含模拟器工作波段。为此,选择响应时间较小的红外单元探测器对模拟器辐射信号进行探测,利用示波器对探测器输出信号进行测量。此外,由于模拟器辐射信号为平行光束,其能量密度较低,需要在红外单元探测器和模拟器之间安装光学系统,用于汇聚模拟器的辐射信号,并投射到单元探测器上,以提高进入探测器的能量。测试装置如图 3 所示。其中信号发生器用于产生同步信号驱动模拟器工作。

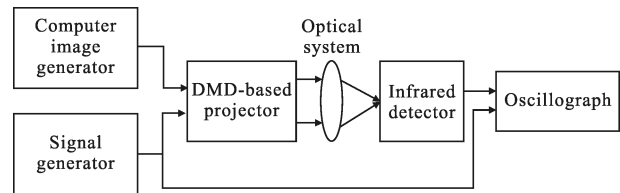


图 3 调制时间测试装置示意图

Fig.3 Schematic of modulation time test equipment

由计算机图像生成器按照一定的帧频向模拟器发送最高灰度的均匀图像,设置信号发生器帧频与计算机图像生成器帧频相同,使模拟器同步辐射图像。调整红外单元探测器和光学系统相对于模拟器的位置,使模拟器辐射脉冲信号幅值最大,通过示波器测量辐射脉冲持续时间,即为模拟器在改帧频下的调制时间。

### 3.2 同步性能测试方法

同步性能测试包含两部分内容,一是测量模拟器能否接收外同步信号,且使图像显示帧频与外同步信号保持同步;二是测量模拟器同步触发延时是否稳定且可调,使模拟器调制时间稳定地处于被测系统积分时间内。可利用红外单元探测器和热像仪对同步性能进行测试,其中红外单元探测器可直接测量调制时间与同步信号之间的对应关系,但不能探测模拟器辐射图像;热像仪可以测量模拟器辐射图像亮度变化,但不能直观地测量调制时间与同步信号的对应关系。因此,可同时利用以上两种方法对同步性能进行充分的测试。

基于单元探测器的同步性能测试装置与调制时间测试装置相同,设置计算机图像生成器与信号发生器帧频相同,利用示波器同时接收单元探测器和信号发射器输出信号。逐步调整模拟器同步触发延时从零增加到最大,利用示波器实时测量调制时间与同步信号之间的实际延时。若实际测量延时随着同步触发延时的变化而在一个帧周期内逐渐变化,且在每种同步触发延时下,实际测量延时保持稳定,则模拟器在改帧频下具有良好的同步性能。

基于热像仪的同步性能测试装置如图 3 所示。设置热像仪积分时间略大于模拟器调制时间,利用热像仪视频信号驱动模拟器工作。由计算机图像生成器向模拟器输出灰度值最大的均匀图像。调整热像仪与模拟器的相对位置,使模拟器出瞳和视场与热像仪入瞳和视场相匹配。逐步调整模拟器同步触

发延时从零增加到最大。若随着同步触发延时的增加,模拟器辐射图像能够从最暗逐渐变为最亮,之后保持最亮不变,最后从最亮逐渐变为最暗;并且在每种同步触发延时下,模拟器辐射图像保持稳定,则模拟器具有良好的同步性能。模拟器辐射图像最亮时,表明模拟器与被测系统同步。

### 3.3 帧频测试方法

帧频的理想测试方法是在计算机图像生成器和模拟器与热像仪同步的基础上,利用热像仪对模拟器辐射图像进行测试,要求热像仪帧频可调,以测试模拟器帧频范围。但现有热像仪帧频不可调,只能分别对视频输入帧频和图像显示帧频进行测试。

视频输入帧频测试就是测量模拟器视频处理电路能够适应的帧频范围。可在保证热像仪能够正确接收模拟器辐射图像的前提下,由计算机图像生成器以不同的帧频向模拟器发送图像,利用热像仪接收模拟器辐射图像,从而判断视频处理电路接收图像是否正确。测试装置如图4所示。由于热像仪与计算机图像生成器帧频不同,可能产生漏帧或重帧现象,但不会影响每帧图像的测试结果。因此,该方法可行。

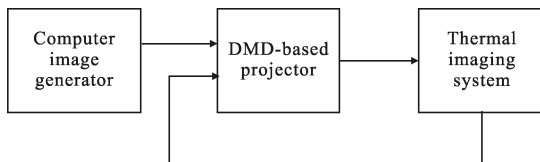


图4 同步性能测试装置示意图

Fig.4 Schematic of synchronization test equipment

调整热像仪积分时间略大于调制时间,且测试前调整模拟器与热像仪同步,使热像仪正确接收模拟器辐射图像。为了便于判断模拟器辐射图像是否正确,计算机图像生成器需输出带有标记且灰度不相同的图像序列。为此,制作了16幅图像,如图5所示。

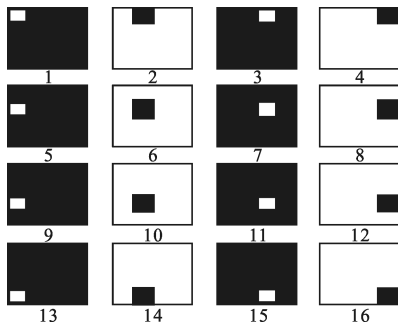


图5 帧频测试图

Fig.5 Images of frame frequency test

由计算机图像生成器按照一定的帧频向模拟器循环输出图5中的16幅图像,热像仪实时探测模拟器辐射图像。若模拟器辐射的每幅图像都正确,则能够实现该帧频。逐步改变计算机图像生成器帧频,测试模拟器视频输入帧频范围。

图像显示帧频测试就是测量模拟器DMD驱动电路能够适应的帧频范围。可在保证视频处理电路正确接收视频图像的前提下,由信号发生器以不同频率触发模拟器工作,利用单元探测器和示波器测试模拟器辐射信号样式,从而判断同步信号与模拟器辐射信号是否一一对应。测试装置如图3所示。

设置计算机图像生成器和信号发生器帧频相同,且在模拟器视频输入帧频范围内,使模拟器同步正确接收图像。为了判断模拟器辐射信号与同步信号的对应关系,计算机图像生成器需输出不同灰度的均匀图像。为此,制作4幅均匀图像,图像灰度值分别为0、130、200、255。由计算机图像生成器循环输出以上4幅图像。若在每个同步周期内都有稳定的辐射脉冲信号,且不同帧之间辐射信号强度变化规律与输入图像灰度值变化规律相同,则模拟器能够实现该帧频。逐步改变计算机图像生成器和信号发生器帧频,对图像显示帧频范围进行测试。

## 4 测试结果

### 4.1 调制时间测试结果

采用的红外单元探测器响应时间约0.1 ms,响应波段包含模拟器工作波段,满足测试要求。在进行调制时间测试时,发现该模拟器灰度等级调制模式为商用DLP灰度调制模式,即在一帧时间内实现RGBWRGBW八色调制,且每色调制时间随着帧频的变化而改变。

在50 Hz帧频下,向模拟器输入灰度值为255的纯红图像,对调制时间进行了测试。结果表明,模拟器在一个帧周期内调制产生两个相同的辐射脉冲,每个辐射脉冲宽度约为1.9 ms,如图6所示。而在典型PWM模式下,实现256级灰度等级最少需要约4.4 ms<sup>[4]</sup>。因此,该模拟器可能没有采用PWM模式或以损失灰度等级、分辨率等方式缩短调制时间<sup>[7]</sup>。因此,需要进一步改进灰度等级调制模式,以准确控制模拟器调制时间、灰度等级及分辨率等参数。

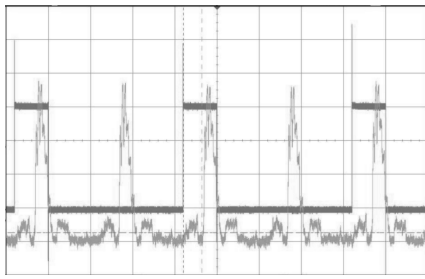


图 6 调制时间测试结果

Fig.6 Modulation time test result

#### 4.2 同步性能测试结果

采用单元探测器对模拟器同步性能进行了测试,分别设置信号发生器和计算机图像生成器帧频为 25 Hz、50 Hz 和 100 Hz,向模拟器输出 255 级纯红图像。在每种频率下,模拟器同步触发延时依次设置为  $0$ 、 $0.05T_0$ 、 $\dots$ 、 $0.5T_0$  ( $T_0$  为帧周期)。结果表明,在每种同步触发延时下,辐射信号与同步信号的实际延时保持稳定;同步触发延时每增加  $0.05T_0$ ,实际延时线性增加帧周期的 0.05 倍,如图 7 所示。由于该模拟器在一个帧周期内调制产生了两个相同的辐射信号。因此,模拟器可以在帧周期任意位置产生辐射信号,具有良好的同步能力。

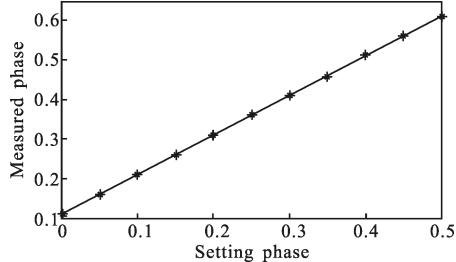


图 7 实测延时随同步触发延时的变化曲线

Fig.7 Relation between set delay time and measured delay time

#### 4.3 帧频测试结果

首先对模拟器视频输入帧频进行测试,热像仪帧频为 50 Hz,计算机图像生成器帧频分别设置为 25 Hz、50 Hz 和 100 Hz。结果表明,模拟器输出图像错误,典型测试结果如图 8 所示。由图可见,模拟器输入图像应该是图 5 中的第 9 帧图像,但模拟器实际输出图像由相邻图像组合而成。

为了找到图像错误根源,首先利用图像采集卡对计算机图像生成器输出的图像进行采集,结果表明,计算机图像生成器输出图像正确。之后,分别设置计算机图像生成器帧频为 60 Hz 和 70 Hz,对模拟

器输出图像进行测试。结果表明,在 60 Hz 和 70 Hz 频率下,模拟器输出图像正确。因此,初步判断模拟器视频处理电路采用商用 DLP 视频处理电路,其自适应频率为可见光常用频率范围,而不能正确接收其它帧频的视频。因此,需要对模拟器视频处理电路重新设计,以适应红外成像系统常用帧频。

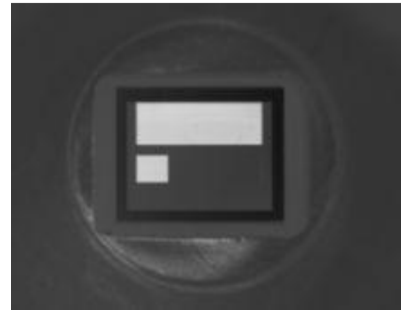


图 8 视频输入帧频测试结果

Fig.8 Video input frame frequency test result

其次对模拟器图像转换频率进行了测试,计算机图像生成器帧频和热像仪帧频依次设置为 25 Hz、50 Hz 和 100 Hz,其中 50 Hz 测试结果如图 9 所示。结果表明,在不同频率下,模拟器都能在一个帧周期内产生两个相同的辐射信号。由于模拟器接收图像错误,辐射信号强度不能准确反映输入图像灰度变化趋势。

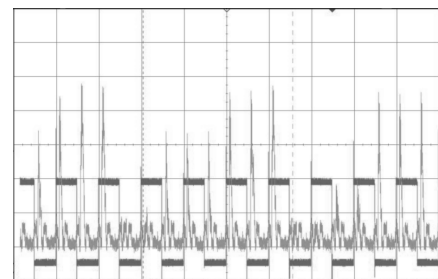


图 9 图像显示帧频测试结果

Fig.9 Display frame frequency test result

## 5 结论

文中根据 DMD 红外动态场景模拟器灰度等级调制模式和 DMD 器件驱动原理,深入分析了 DMD 器件的工作流程和工作时序。讨论了模拟器时间性能参数的技术内涵,以及半实物仿真实验对时间性能参数的需求。提出了模拟器时间性能参数测试方法,并对现有 DMD 红外动态场景模拟器的时间性能进行了测试。针对测试中发现的模拟器相关问题,

设计了实验方案,对问题根源进行了实验研究,并提出了改进意见。为 DMD 红外动态场景模拟器的研制、性能测试和应用提供一定的依据。下一步将深入开展 DMD 红外动态场景模拟器空间性能和辐射性能测试工作。

#### 参考文献:

- [1] Wang Yunping, Zhao Changming. Dynamic infrared scene simulation system based on the digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 966-970. (in Chinese)  
王云萍, 赵长明. 基于 DMD 的动态红外场景仿真系统[J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(6): 966-970.
- [2] Beasley D B, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Advancements in the micromirror array projector technology II [C]//SPIE, 2005, 5785: 68-79.
- [3] Beasley D B, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]//SPIE, 2009, 7210: 7210I/1-7210I/12.
- [4] Chen Erzhu. DMD dynamic infrared scene projection technology [J]. *Infrared*, 2004, 2: 28-35. (in Chinese)  
陈二柱. DMD 动态红外景象投影技术 [J]. *红外*, 2004, 2: 28-35.
- [5] Zhang Kai, Ma Jun, Sun Siliang. Dynamic infrared target simulator driving and controlling system design [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(1):58-62.(In Chinese)
- [6] Knipe R L. Challenges of a digital micromirror device TM: modeling and design[C]//SPIE, 2783: 135-145.
- [7] Chen Jianhua, Zhu Ming, Huang Detian. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micromirror device [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, 3(4): 325-336. (in Chinese)  
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.
- [8] Kang Weimin, Li Yanbin, Gao Weizhi. Dynamic IR scene projector using a digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 753-756. (in Chinese)  
康为民, 李延彬, 高伟志. 数字微镜阵列红外动态场景模拟器的研制[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(5): 753-756.