

# DMD 灰度调制特性及其在场景仿真中的应用

何永强, 耿达, 张冬晓, 元雄, 胡文刚, 陈一超

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

**摘要:** 基于数字微镜器件 (DMD) 的红外场景仿真系统中图像显示是采用灰度调制技术实现的。介绍了 DMD 灰度调制技术的原理。分析了在探测器帧频不变的情况下, 调整 DMD 显示帧频, 图像灰度调制与探测器帧频之间的关系, 得出如果 DMD 显示帧频与探测器帧频满足一定关系, 不外接同步信号探测器也可以得到完整的图像, 并通过实验进行了验证。

**关键词:** 数字微镜器件; 灰度调制; 显示帧频; 同步

**中图分类号:** O438    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-8891(2014)12-0997-06

## Gray Modulation Characteristics of DMD and Its Applications in Scene Simulation

HE Yong-qiang, GENG Da, ZHANG Dong-xiao, YUAN Xiong, HU Wen-gang, CHEN Yi-chao

(Department of Optics and Electronic Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003)

**Abstract:** In the dynamic infrared scene simulation system based on digital micro-mirror device (DMD), gray modulation technique is adopted to realize image display. The principle of gray modulation technology of DMD is introduced. With the premise of the invariant detector frame frequency, with the analysis of the relationship between image gray modulation and detector frame frequency, experiment verifies that if DMD display frame frequency and detector frame frequency satisfy a certain relation, the detector also can get the unbroken image without external synchronization signal.

**Key words:** DMD, gray Modulation, display frame frequency, synchronization

## 0 引言

近年来随着以美国三大仿真实验中心为代表的欧美各仿真实验室对以数字微镜器件 (DMD) 为核心的红外场景仿真系统的成功使用, 国内也对 DMD 进行了大量的研究及应用, 并取得了显著效果<sup>[1]</sup>。

由于红外场景仿真系统需要提供清晰完整的灰度图像给红外成像设备, 因此 DMD 显示帧频与红外成像设备帧频需要满足一定的关系。红外成像设备的帧频一般不可调, 只能调整 DMD 显示帧频来实现图像的完整显示。本文分析了 DMD 成像原理, 运用示意图直观地分析了 DMD 灰度调制成像与红外成像设备采集图像之间的对应关系, 制作了一幅特征图像, 利用现有的 DMD 开发系统及探测器进行实验, 验证了理论分析结论。

## 1 DMD 灰度调制原理

在 DMD 场景仿真系统中实现灰度等级的主要

收稿日期: 2014-08-17; 修订日期: 2014-10-29.

作者简介: 何永强 (1966-), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为光电对抗和信息处理。E-mail: yongqianghe@sohu.com。

方法是灰度调制, 灰度调制的方法主要包括 3 种分别是空间调制、帧调制和脉宽调制<sup>[2]</sup>。由于前两种方法在提高灰度等级时会导致图像分辨率下降, 因此系统中采用脉宽调制。

DMD 是依靠成千上万个铝制微镜片对光反射的不同角度来实现亮暗的区别, 通过控制镜片复位时间的长短实现不同灰度等级<sup>[3]</sup>。脉冲宽度的大小表示微镜所在位置反射时间的长短, 决定该处灰度值的大小, 从而完成图像各像素的灰度调制<sup>[4]</sup>。如图 1 所示, 以 10 灰度值的 4 bit 图像为例, 它具有  $2^4$  个灰度等级即 0~15 个灰度值, 10 灰度值的二进制数表示为 1010。灰度等级调制的过程相当于把这幅 4 bit 图像分成 4 幅二进制图像, 从最低有效位 (LSB) 到最高有效位 (MSB) 依次调制, 4 幅二进制图像在显示屏上叠加完成这幅 4 bit 图像的显示<sup>[5-6]</sup>。8 bit, 12 bit 图像同样可以实现, 这主要取决于镜片的复位时间和每帧图像的场时间。

若设一幅图像的灰度等级为  $M$ , 则每幅图像在

DMD 显示时间内都可以分成  $m = \log_2 M$  个位时间段。这样一幅图像就转换成  $m$  幅二进制黑白图像,  $f(x,y)$  表示灰度图像, 则:

$$f(x,y) = \sum_{i=1}^m 2^{i-1} b_i(x,y) \quad (1)$$

式中: 表  $b_i(x,y)$  示在第  $i$  个位时间段内 DMD 显示的二值图像<sup>[7]</sup>。因此, 调整 DMD 显示帧频, 即调整每个位时间段的长短, 也就是调整微镜片的稳定时间。综上所述, 调整 DMD 显示帧频的过程, 其实就是对 DMD 灰度调制的过程即控制 PWM。

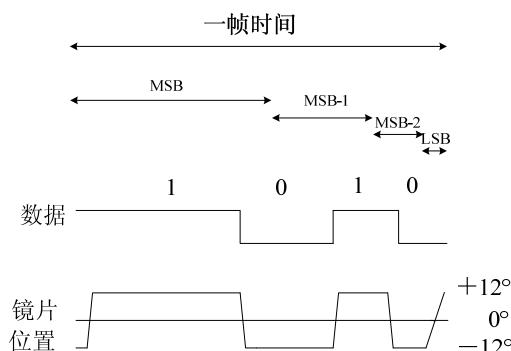


图 1 4 bit 脉宽调制示意图

Fig.1 Pulse width modulation of 4 bit

## 2 帧频关系分析

整个系统的帧频包括 3 部分, 分别为视频输入帧频、DMD 显示帧频和探测器帧频。视频输入帧频是由视频处理电路决定的, 该电路可以自适应被

动接收计算机图像生成器输出的不同帧频的视频图像<sup>[8]</sup>。DMD 显示帧频是由 DMD 驱动电路决定的, 它要与探测器帧频保持同步才能避免图像混淆得到完整的图像。目前解决同步的办法是从探测器引出一路同步信号, 外接到 DMD 驱动电路。以 8 bit 灰度图像为例, 在同步信号作用下的成像示意图如图 2 所示。

图中上半部分为探测器帧频, 下半部分为在同步信号作用下, DMD 显示一帧 8 bit 图像的位时间段。外接同步信号且探测器帧频与 DMD 显示帧频相等, 则能得到清晰完整的图像。

当 DMD 显示单幅静态图像时, 在相邻 DMD 显示时间内显示内容是相同的, 如图 3 所示。

上述都是在外接同步信号情况下, DMD 显示帧频与探测器帧频的对应关系, 实际应用中, 外接同步信号需要对红外探测器进行电路改动, 并接入 DMD 驱动电路, 不利于仿真系统的推广利用。若解决这一问题首先要分析在没有同步信号下的灰度图像成像, 且 DMD 显示帧频与探测器帧频的大小关系也会对成像有影响。探测器帧频一般是不可调的, 只能调整 DMD 显示帧频进行分析。

若两者相等, 在未加载同步信号的成像示意图如图 4 所示。在探测器积分时间内可以得到一帧完整的图像信息。

若探测器积分时间大于 DMD 显示时间, 为了方便分析, 假定探测器积分时间为 20 ms, DMD 显示时间为 10 ms、15 ms、19 ms。如图 5 所示的成像



图 2 同步信号下的成像示意图

Fig.2 Principle with sync signal load on

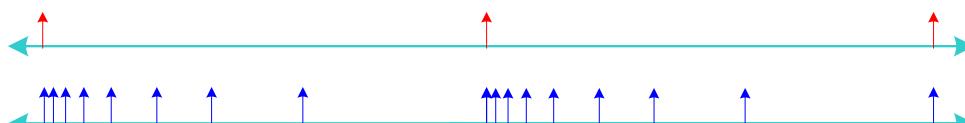


图 3 单幅图像连续两帧成像示意图

Fig.3 The imaging schematic of single image for two consecutive frames

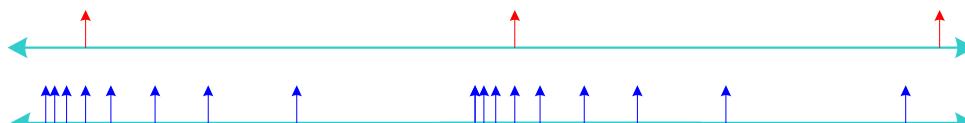


图 4 DMD 与探测器帧频相等的成像示意图

Fig.4 The imaging schematic of DMD with the same frame frequency of the detector

示意图,从图中可以看出在探测器积分时间内完成了两次完整的图像显示,因此可以得到清晰完整的图像。而在 15 ms 和 19 ms 时,探测器积分时间内采集到的图像信息不完整,图像出现混淆。

若探测器积分时间小于 DMD 显示时间,以 DMD 显示时间是 25 ms、30 ms 和 40 ms 为例进行分析。其成像示意图如图 6 所示。从图中可以看出,在探测器积分时间内,DMD 没有完成一帧图像的显示,导致了灰度缺失,得到的图像不完整。

通过上述分析可知,在仿真系统显示静态图像时,若不外接同步信号,当探测器积分时间与 DMD 显示时间相等或满足整数倍关系时,能得到清晰完整的图像;当探测器积分时间大于 DMD 显示时间时,图像会出现混淆;当探测器积分时间小于 DMD 显示时间时,图像会出现灰度缺失,得到的信息不完整。

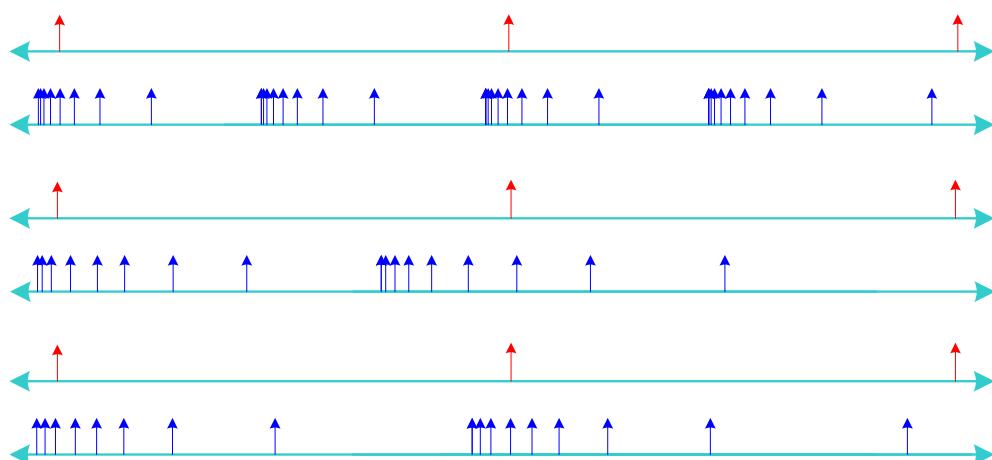


图 5 DMD 显示时间为 10 ms、15 ms 和 19 ms 的成像示意图  
Fig.5 The imaging schematic when display time is 10 ms, 15 ms and 19 ms

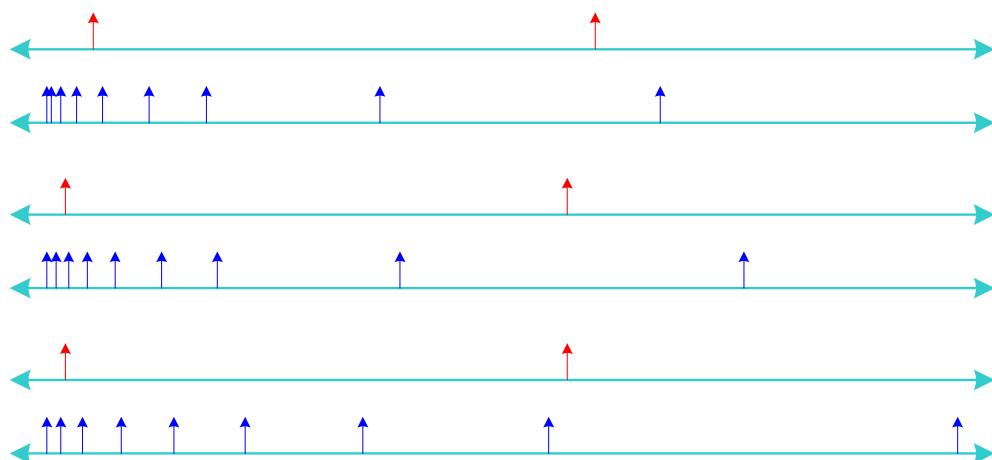


图 6 DMD 显示时间为 25 ms、30 ms 和 40 ms 的成像示意图  
Fig.6 The imaging schematic when display time is 25 ms, 30 ms and 40 ms

### 3 实验分析

通过上述理论设计了实验内容,为了直观地表现出在未加载同步信号时,图像出现的混淆现象,制作了一幅特征图像,如图 7 所示。该图像被划分成 8 部分,每部分填充不同的灰度值。灰度值的大小根据 8 bit 图像脉宽调制时每个位时间内的灰度值大小设定的。图像从上到下灰度值依次为 1、128、16、2、64、4、32、8,为了便于实验中图像的观察分析,填充相邻两部分的灰度值相差比较大。

由上述理论可知,以图 7 作为原始图像,在没有同步信号时,改变 DMD 显示时间,探测器采集到的图像灰度是有变化的。且图像中的每一部分灰度也会发生变化。实验分成 3 种情况进行,实验前把探测器积分时间调为 20 ms,调整 DMD 显示时间使其分别为探测器积分时间的一半、小于和大于探测器积分时间。

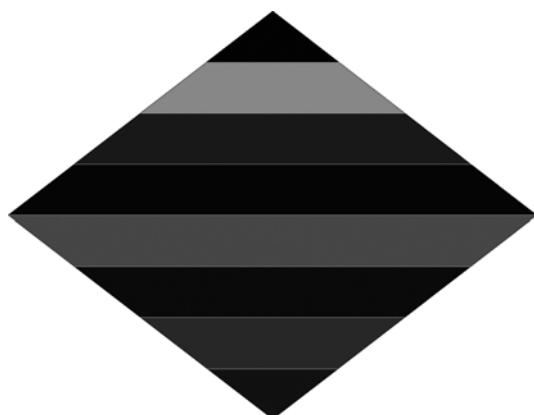
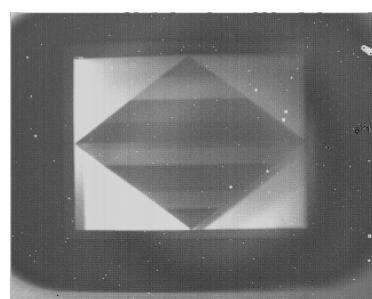


图7 自制特征图像

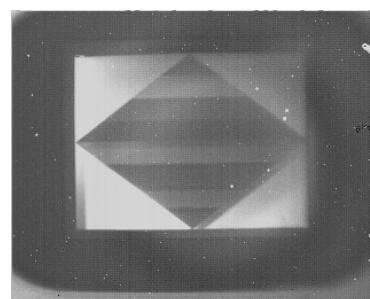
Fig.7 Homemade feature image

设置 DMD 显示时间为 10 ms, 20 ms, 实验结果如图 8 所示。

设置 DMD 显示时间为 15 ms, 19 ms, 实验结果如图 9 所示。



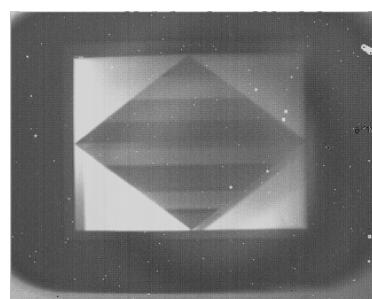
(a) 10 ms



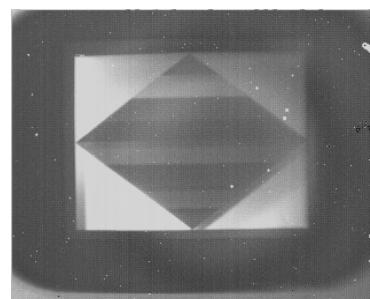
(b) 20 ms

图8 10 ms 与 20 ms 的实验图像

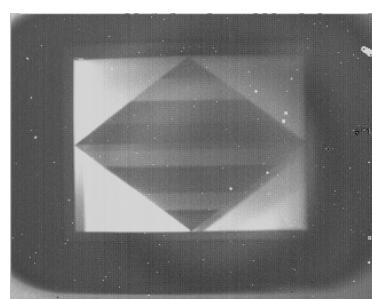
Fig.8 The experimental images when display time is 10 ms and 20 ms



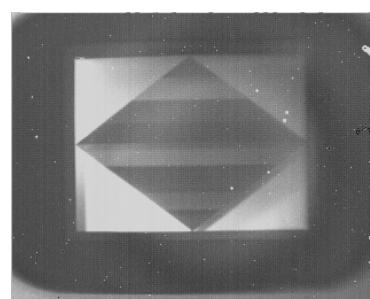
(a) 15 ms (一)



(b) 15 ms (二)



(c) 19 ms (一)



(d) 19 ms (二)

图9 15 ms 与 19 ms 的实验图像

Fig.9 The experimental images when display time is 15 ms and 19 ms

设置 DMD 显示时间为 25 ms, 30 ms, 40 ms, 实验结果如图 10 所示。

由上述图像可以看出, 不同 DMD 显示时间探测器采集到的图像灰度是有变化的, 尤其图 10 中图像的灰度变化更为明显。且同一 DMD 显示时间采集到的相邻两幅图像灰度也有明显的变化。在图 8, 图 9 中, 由于 DMD 显示时间与探测器积分时间比较接近, 人眼直接观察的效果不如图 10 明显。因此, 计算各图的信息熵, 进行数据对比。

表 1 中 10 ms 与 20 ms 的信息熵几乎相等, 因此图 8 中的两幅图像信息相同, 表 1 与表 2 中相同 DMD 显示时间的不同时刻采样到的图像信息熵有差别, 说明图像灰度有变化且其他显示时间的图像信息熵的值在 6.5901 (显示时间为 20 ms 时的图像信息熵) 左右波动。符合上述理论。

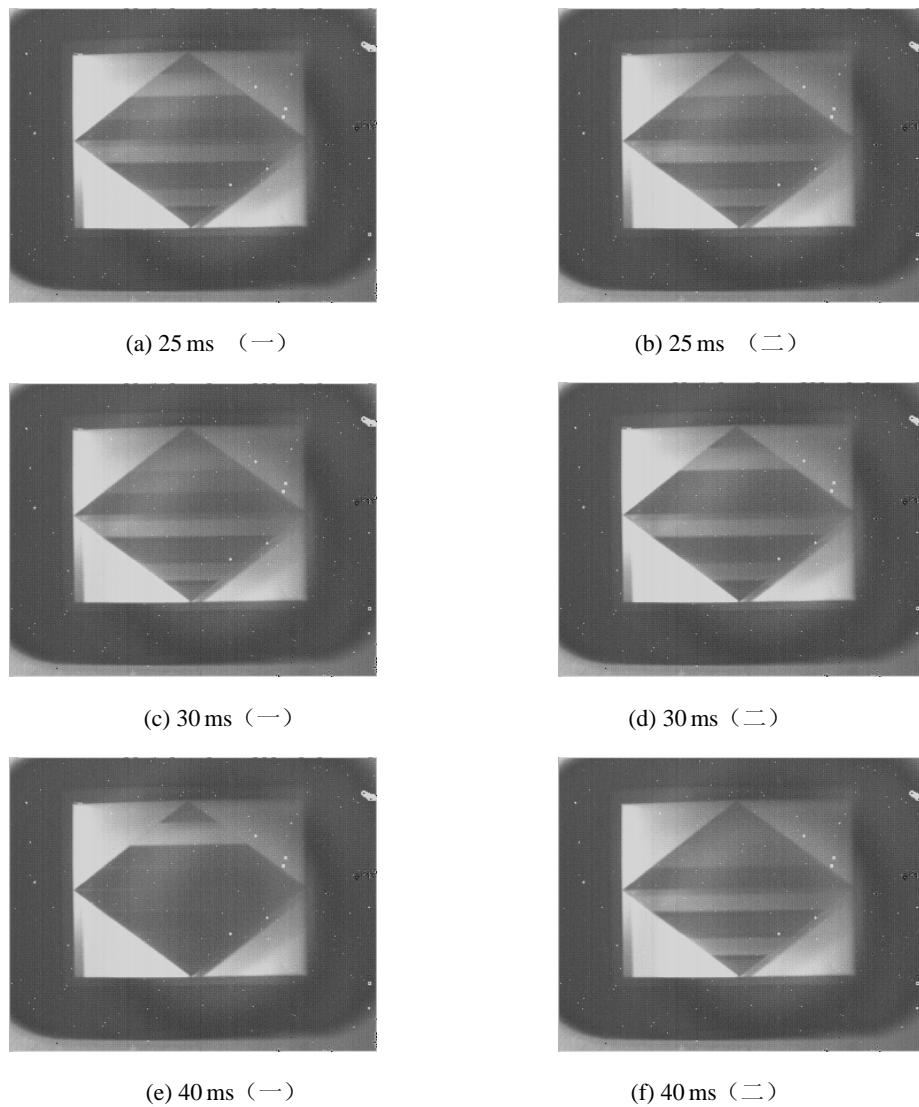


图 10 25 ms、30 ms 与 40 ms 的实验图像

Fig.10 The experimental images when display time is 25 ms, 30 ms and 40 ms

表 1 10 ms、15 ms、19 ms 与 20 ms 时的图像信息熵

Table 1 Image information entropy when display time is 10 ms, 15 ms, 19 ms and 20 ms

DMD display frame frequency	10 ms	15 ms (一)	15 ms (二)	19 ms (一)	19 ms (二)	20 ms
Image information entropy	6.5902	6.6013	6.5729	6.5848	6.5923	6.5901

表 2 25 ms 30 ms 与 40 ms 时的图像信息熵

Table 2 Image information entropy when display time is 25 ms, 30 ms and 40 ms

DMD display frame frequency	25 ms (一)	25 ms (二)	30 ms (一)	30 ms (二)	40 ms (一)	40 ms (二)
Image information entropy	6.5712	6.6107	6.6273	6.5705	6.5446	6.6552

#### 4 结论

文中根据 DMD 成像特点设计了实验, 改变

DMD 显示帧频, 探测器采集到图像有明显的区别, 并运用 Matlab 计算其信息熵进行数据对比, 得出不外接同步信号时, 调整 DMD 显示帧频也可以得到

清晰完整的图像。这样避免了外接同步信号时电路的改动，降低了工程实践的难度。根据文中的实验分析，利用一种图像评价函数，自适应调整 DMD 显示帧频，实现图像完整地显示，成为下一步工作的重要内容。

### 参考文献：

- [1] 张凯, 康静洁. 基于 DMD 的动态红外成像仿真系统设计及实现[J]. 计算机测量与控制, 2010, **18**(11): 2646-2648.  
ZHANG Kai, KANG Jing-jie. Realization and design of dynamic infrared scene simulator based on DMD[J]. *Computer Measurement And Control*, 2010, **18**(11): 2646-2648.
- [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.  
CHEN Jian-hua, ZHU Ming, HAUNG De-tian. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micromirror device[J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2010, **3**(4): 325-336.
- [3] 张运波, 侯文政, 郑继红, 等. 采用数字微镜的共焦显微镜的研制[J]. 光电工程, 2011, **38**(6): 65-70.  
ZHANG Yun-bo, HOU Wen-mei, ZHENG Ji-hong et al. The development of parallel confocal microscope employing digital micromirror device[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(6): 65-70.
- [4] Easley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic infrared scene projectors based on DMD[J]. *SPIE*, 2009, **7210**:72100I/1-72100I/2.
- [5] 唐德帅, 何永强, 黄富瑜, 等. 基于 DMD 的动态红外场景仿真技术研究[J]. 红外技术, 2012, **34**(8): 476-481.  
TANG De-shuai, HE Yong-qiang, HAUNG Fu-yu, et al. Study on dynamic infrared scene simulation technique based on digital micro-mirror device[J]. *Infrared Technology*, 2012, **34**(8): 476-481.
- [6] 张健, 李明卓, 王春晖. 激光成像雷达 DMD 目标模拟器图像灰度级控制方法[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**: 363-367.  
ZHANG Jian, LI Ming-zhuo, WANG Chun-hui. Control method of image gray level of laser imaging radar DMD object simulation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, **35**: 363-367.
- [7] 张凯, 黄勇, 孙力, 等. 动态红外场景仿真的灰度调制成像技术[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(9): 2283-2287.  
ZHANG Kai, HUANG Yong, SUN Li, et al. Dynamic infrared scene simulation using grayscale modulation imaging[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(9): 2283-2287.
- [8] 许振领, 杨森森, 刘艳芳, 等. DMD 的红外动态场景模拟器时间性能测试[J]. 红外与激光工程, 2014, **43**(2): 417-423.  
XU Zhen-ling, YANG Miao-miao, LIU Yan-fang, et al. Time performance testing of DMD dynamic infrared scene projector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(2): 417-423.