光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2021120301

基于数字微反射镜与光源复合编码的高帧频显示方法

宋睿博[1,2*]，张　涛[1]，崔文楠[1]

（1. 中国科学院上海技术物理研究所，上海 200083；2. 上海科技大学 信息科学与技术学院，上海 200120）

摘　要： 作为常用显示器件，数字微镜器件（DMD）使用传统的脉冲宽度调制（PWM）显示方法受最小脉冲宽度限制，无法满足高帧频显示的需求。文章提出基于光源与 DMD 复合编码的高帧频显示技术，利用光源调制解决脉冲宽度调制导致的位平面显示时间随位平面等级指数增长的问题。通过构建包含驱动模块、光源和 DMD 的显示系统，采用低 4 位光源脉冲宽度调制与高 4 位 DMD 显示时间宽度调制相结合的方法，将 8 位灰度图像的显示帧频提高至 2 461 Hz。

关键词： 数字微镜器件；高帧频；复合编码；光源调制；脉冲宽度调制

中图分类号： TP391.41　**文章编号：** 1001－5868(2022)03－0613－06

High Frame Rate Display Method Based on Composite Coding of Digital Micro Mirror and Illuminant

SONG Ruibo[1,2], ZHANG Tao[1], CUI Wennan[1]

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, CHN; 2. School of Information Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 200120, CHN)

Abstract: As a commonly used display device, digital micromirror device (DMD) uses the traditional pulse width modulation (PWM) method to display grayscale images, which can not meet the demand of high frame rate display due to the limitation of minimum pulse width. Thus we proposed a high frame rate display technology based on composite coding of illuminant and DMD in this paper. By adding the modulation of illuminant, the problem of exponential growth of bit plane display time with bit plane level caused by pulse width modulation is avoided. A display system consists of driver module, illuminant and DMD was built. In our test, by applying the illuminant modulation to lower 4 bit and pulse width modulation to higher 4 bit, the display system can achieve 2 461 Hz frame rate displaying 8 bit grayscale image.

Key words: digital micromirror device; high frame frequency; composite coding; illuminant modulation; pulse width modulation

0　引言

光电探测系统在研发过程中需要通过实验对产品的各项功能和性能指标进行验证，最准确的方法是在实际应用场景中进行测试。然而实际应用场景实验需要耗费大量人力、物力、财力，且受到实际环境因素的制约，覆盖各种工况需要较长的实验周期。此外，实际场景中的实验结果虽然具备较高可靠性，但是在测试覆盖率上较为欠缺，无法完全遍历各种实验条件。基于上述原因，能够在实验室条件下模拟动态场景对系统的各项指标进行全面测试的半物理仿真系统对于缩短研制周期，降低实验风险具有重要意义[1-6]。

随着高帧频探测器的广泛应用和帧频的逐步提升，且探测目标具备高速动态等特点，传统仿真系统难以满足高帧频探测器对于高帧频景象模拟的实验需求。基于此，本课题着眼研究应用于半物理仿真系统的高帧频显示技术。在诸多技术方案中，数字

收稿日期：2021－12－03.

* 通信作者：宋睿博　E-mail：1977300609@qq.com

微反射镜器件(DMD)具有波段广、帧频高、经济便携等优点[7],故选择其作为显示器件。

1 DMD 工作原理

DMD 是由数百万个可旋转铝制微镜集成在 CMOS 存储器上的微电子机械系统,每个微镜都独立受控于 CMOS 存储器上的数据。微镜作为光开关,初始状态为平态,当存储器上的值为"1"并受控翻转时,反射镜由平态顺时针偏转 12°使入射光经反射镜反射并通过投影物镜,像素显示为"亮"的状态。当存储器上的值为"0"时,反射镜逆时针偏转 12°,光束被吸收介质吸收,像素显示为"暗"的状态[8],工作原理如图 1 所示。

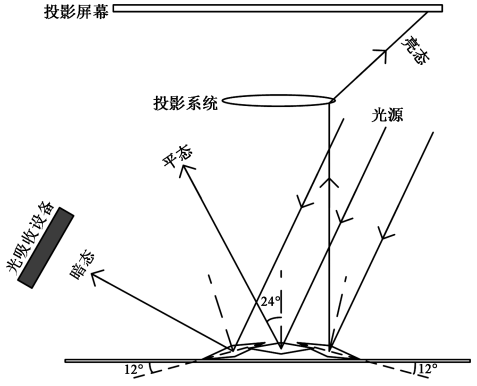


图 1 DMD 光开关原理示意图

DMD 显示二值图像的过程分为三个阶段:数据加载阶段、微镜翻转阶段和显示保持阶段。数据加载阶段将二值图像数据经 32 位宽度 LVDS 数据线写入 DMD 的存储器中。以本文采用的 0.7XGA 型 DMD 能够承载的最高时钟频率 400 MHz 计算,对于 1 024×768 像素的二值图像,加载一行需要 32 个时钟边沿,加载完整二值图像耗时 30.72 μs。图像加载完成后主控控制 DMD 全局重置,此时微镜根据存储器上的数据进行翻转,耗时 5 μs。翻转完成后微镜需要 8 μs 稳定时间,在此期间微镜翻转状态变化会对器件造成损坏[9]。

2 PWM 灰度调制方法

常用的灰度调制方法有空间灰度调制、帧灰度调制和脉冲宽度调制。三种技术方案中,空间灰度调制的灰度等级与图像分辨率成反比,帧灰度调制方法显示帧频低,而脉冲宽度调制可实现高分辨率图像的高帧频显示[10,6],因此本方案将采用脉冲宽度调制方法。作为时间灰度调制的类型之一,脉冲宽度调制利用探测器的"视觉暂留"特性[11-12],在探测器的积分时间内控制光照占空比实现灰度调制,高位光脉冲宽度为次高位的两倍,对于 N 比特灰度调制,最高有效位的光脉冲宽度为最低有效位光脉冲宽度的 2^{N-1} 倍。如图 2 所示,在一个显示周期内,像素点的光照时间为灰度值二进制数 $b_{N-1}b_{N-2}\cdots b_1b_0$ 与最低有效位光脉冲宽度的乘积:

$$T=(2^{N-1}b_{N-1}+2^{N-2}b_{N-2}+\cdots+2b_1+b_0)\,t_{\text{base}} \tag{1}$$

像素灰度值为帧周期内的光照时间与最低有效位光脉冲宽度的比值,根据灰度值二进制数的不同取值,像素可显示 2^N 个灰度值[13]。

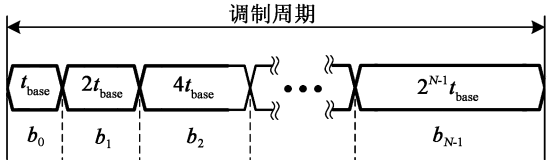


图 2 N-bit 灰度脉冲宽度调制

对 N 比特灰度图像中全部像素进行脉冲宽度调制,则要将图像信息根据灰度等级分为 N 个二值图像,即位平面。如图 3 所示,$b_{N-1,x}b_{N-2,x}\cdots b_{1,x}b_{0,x}$ 是图像像素 x 的灰度值,位平面 N 是由图像灰度值二进制数的第 N 位组成的平面。当 N 个位平面根据灰度等级经对应光脉冲宽度显示叠加,则完成了对灰度图像所有像素的脉冲宽度调制。

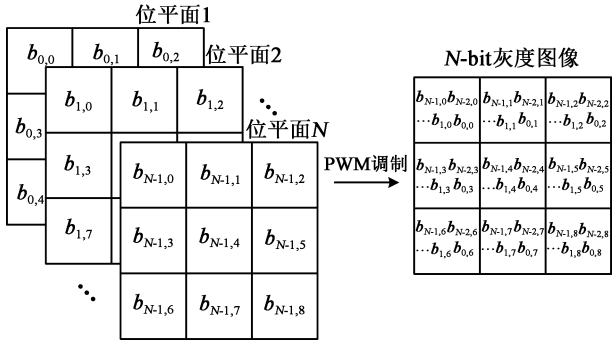


图 3 位平面脉冲宽度调制合成灰度图像

DMD 使用 PWM 灰度调制方法显示一帧灰度图像需要对 N 个位平面分别进行数据加载。镜片翻转和显示保持步骤,位平面的光脉冲宽度即位平面的显示保持时间。

由图 4 所示的时序图可以看出,完成数据加载和翻转后的显示保持阶段可以对下一位平面的数据进行加载,因此脉宽调制的时间基数 t_{base} 不小于数

据加载时间 30.72 μs。通过时序分析可以计算出传统 PWM 灰度调制方法的帧周期：

$$T=(2^8-1)t_{\text{base}}+8t_{\text{reset}}=7\,873.6\ \mu\text{s} \quad (2)$$

传统 PWM 灰度调制方法可以达到的最高帧频为 127 Hz。由于位平面显示时间为时间基数 t_{base} 的 255 倍，故减小时间基数 t_{base} 是提高帧频的一种有效方法。时间基数 t_{base} 的最小值为微镜翻转后的稳定时间 8 μs，为了实现最小时间基数，可在 DMD 显示了最小时间基数后对位平面进行清零操作[14-15]。DMD 支持“Block Clear”指令对 DMD 中的存储单元进行清零，该指令清除位平面需 1.92 μs。

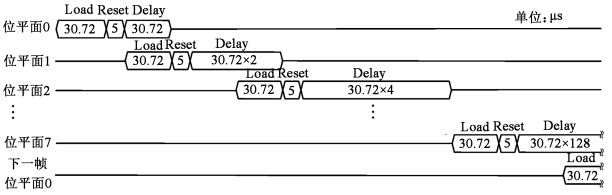


图 4　DMD 传统 PWM 灰度调制方法时序图

采用最小时间基数的高帧频 PWM 灰度调制方法的时序图如图 5 所示，在高帧频 PWM 灰度调制方法中，最低位和次低位的位平面显示时间由 t_{wait} 和 t_{clear} 共同构成，分别为 8 和 16 μs；其余位平面的显示时间均大于数据加载时间 30.72 μs。因此只有最低位和次低位位平面的显示需要进行“Block Clear”操作，其余位平面的显示步骤与传统 PWM 灰度调制方法相同。采用最小时间基数的 PWM 灰度调制方法的帧周期计算如下：

$$T=2t_{\text{load}}+(2^8-1)t_{\text{base}}+10t_{\text{reset}}=2\,151.44\ \mu\text{s} \quad (3)$$

可以看出，通过“Block Clear”指令减小时间基数的方法显著缩短了帧周期，显示帧频提升至 464.8 Hz。

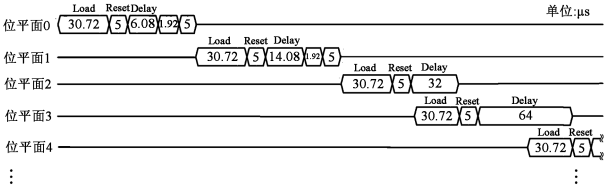


图 5　减小时间基数的 PWM 灰度调制方法时序图

3　基于光源与 DMD 复合编码的显示方法

3.1　基于光源的灰度调制方法

上述高帧频 PWM 灰度调制方法已达到单一调制方法可实现范围内的帧频极限。在 PWM 灰度调制中，位平面显示时间以 t_{base} 为基数随灰度等级指数增长，因此考虑采用显示时间不变而调制光源亮度的方法，避免位平面显示时间指数增长。

基于光源的灰度调制在位平面显示时间相同的情况下，通过改变各位平面显示时间内的光源亮度来实现不同灰度等级。该方法具体实现如表 1 所示：将光源亮度进行归一化表示，以亮度 l 为最高亮度，位平面显示时的光源照度由最高位的 l 依次减半到最低位的 $l/128$，位平面显示时间均为时间基数 t_{base}。光源亮度的控制通过改变光源在显示时间内的占空比实现。以最低位的光源亮度 $l/128$ 为例，其实现方法是在位平面显示时间 t_{base} 内产生一个宽度为 $t_{\text{base}}/128$ 的光源脉冲。调制的复合效果即根据灰度等级产生宽度为 $t_{\text{base}}/128\sim t_{\text{base}}$ 的光脉冲。

表 1　基于光源的灰度调制方法

位平面	0	1	2	3	4	5	6	7
显示时间	t	t	t	t	t	t	t	t
光源编码	1/128	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	1/2	1
复合效果	$t/128$	$t/64$	$t/32$	$t/16$	$t/8$	$t/4$	$t/2$	t

由表 1 中显示时间与光源亮度编码的复合效果可以看出，不改变位平面显示时间只改变光源亮度可以达到与脉冲宽度调制相同的灰度调制效果，且每个位平面的显示时间均为最小时间基数 8 μs。基于光源的灰度调制方法的帧周期计算如下：

$$T=8\times(t_{\text{load}}+2t_{\text{reset}}+t_{\text{base}})=389.76\ \mu\text{s} \quad (4)$$

DMD 使用光源调制显示 8 位灰度图像可达到的帧频极限为 2 565.7 Hz。然而该方法在可用性方面具有显著缺陷：1）最低位位平面的光源亮度仅为最高位位平面亮度的 1/128，由于光源亮度控制通过调制光源的脉冲宽度实现，最小时间基数 t_{base} 的 1/128 仅为 62.5 ns，难以实现高精度控制；2）此方法会导致显示亮度大幅衰减；补偿显示亮度损失需使用更大功率的光源，而大功率 LED 光源的响应特性相对较差，进一步增加了光源脉冲控制的难度。基于以上两点原因，单一光源灰度调制难以在实际系统中实现。

3.2　基于光源与 DMD 复合编码的灰度调制方法

为了平衡高帧频、工程可行性及显示亮度的要求，结合光源灰度调制与脉冲宽度调制的优点，本文提出一种基于光源与 DMD 复合编码的显示方法，显示时间与光源亮度的关系如表 2 所示。

低四比特位平面采用位平面显示时间不变而改

变光照强度的方法调制，位平面显示时间均为时间基数 t_{base} 的最小值 8 μs，光源亮度由最低位位平面的 $l/16$ 逐位增倍到 l；高四比特的位平面采用时间灰度调制的方法，在光源强度保持 l 不变的情况下，位平面显示时间由时间基数 t 逐位增倍到 $8t$。复合编码的方式相较于单一光源灰度调制虽然在帧周期上有所增加，但是提高了光源调制的可行性，并且将显示画面的整体亮度提高了 16 倍。

表 2 光源与 DMD 复合编码

位平面	0	1	2	3	4	5	6	7
显示时间	t	t	t	t	t	$2t$	$4t$	$8t$
光源编码	1/16	1/8	1/4	1/2	1	1	1	1
复合效果	$t/16$	$t/8$	$t/4$	$t/2$	t	$2t$	$4t$	$8t$

光源与 DMD 复合调制的时序如图 6 所示，对于位平面 0～3，位平面显示时间均为时间基数 t_{base}，通过调制光脉冲的宽度在时间基数内的占比实现灰度等级的调制。对于位平面 4～7，光源在位平面显示时间内处于常亮的状态，通过位平面间的显示时间变化来达到灰度等级的调制。根据以上时序图可以计算出复合调制方法所能达到的帧周期：

$$T = 6t_{load} + 14t_{reset} + 19t_{base} = 406.32\ \mu s \quad (5)$$

计算可得显示帧频为 2 461 Hz。使用光源与 DMD 复合编码的方法相较于单一的光源灰度调制方法，帧频仅下降了 4%，工程可行性和显示亮度却显著提高。

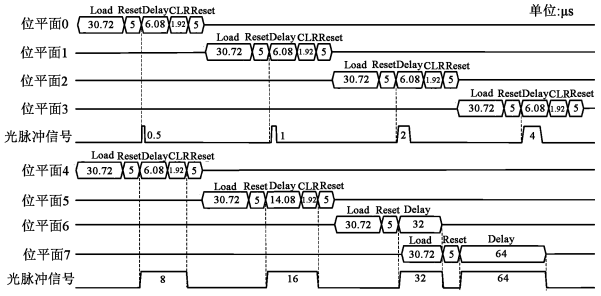


图 6 光源与 DMD 复合调制时序图

4 系统设计与实现

4.1 系统设计

投影系统由主控 FPGA 板卡、DMD、光源以及投影系统构成。DMD 与 FPGA 板卡通过 LVDS 排线连接用于传输数据和控制信号，FPGA 板卡通过 GPIO 口输出光脉冲信号到光源驱动模块。光源采用多芯片白光 LED，以避免常用的蓝光激发白光 LED 由于荧光延迟造成的光脉冲缓升缓降的问题。

系统设计框图如图 7 所示。FPGA 连接的设备主要有以下模块：USB 控制器、DDR2、DMD 以及光源驱动。USB 的传输带宽不足以支持 DMD 的高速显示，因此在显示前需要将图像数据由 USB 写入 DDR2 中存储，显示时以 DDR2 的高带宽读出数据。主控负责产生 DMD 内存储器的行地址信号 rowad 和行模式信号 rowmd，用于控制数据写入；块地址信号 blkad 和块模式信号 blkmd 用于控制微镜的翻转、存储器的清零，以及光源脉冲信号 pwm_out。FPGA 通过状态机控制显示不同阶段的信号生成和数据传输，状态转换图如图 8 所示。

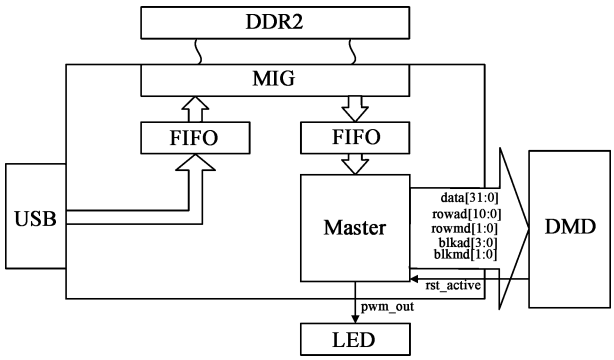


图 7 系统设计框图

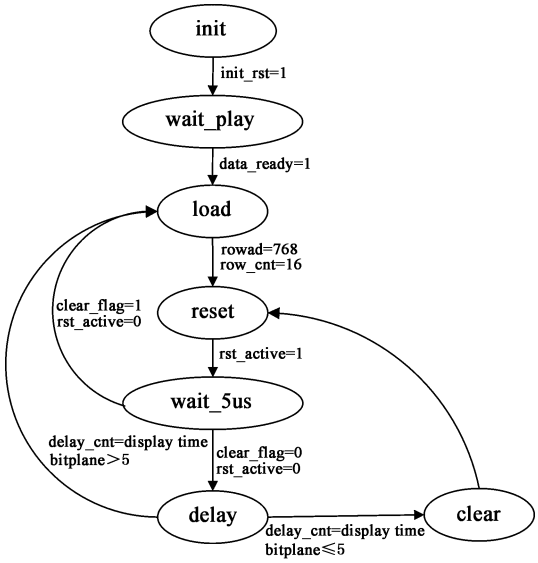


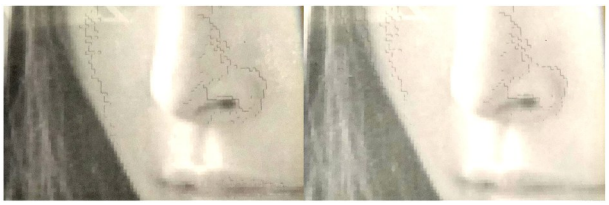
图 8 Master 模块状态转换图

FPGA 在完成初始复位后进入等待播放状态，该阶段等待数据传输模块将显示图像数据载入 DDR 以及第一幅位平面数据载入 FIFO 后进入 load 状态。load 状态下会生成持续自加的地址信号 rowad，并根据时钟读出 FIFO 数据。当行计数 rowad 为 768，行内计数 row_cnt 为 16 时，表明位平面数据传输完成，进入 reset 状态控制 DMD 全局翻转。此时 DMD 产生持续 5 μs 的高电平 rst_active

信号，表示微镜正在翻转。rst_active 信号恢复低电平，表示微镜翻转完成，状态机跳转到 delay 状态并根据位平面延迟等待不同的时间，同时根据位平面的光源编码产生不同长度的光源控制脉冲 pwm_out。位平面 0～5 在延迟时间结束后需进入 clear 状态将存储单元数据清 0 并将 clear_flag 寄存器置 1，而后再次 reset 翻转微镜使 DMD 恢复暗态。等待 5 μs 翻转完成后进入 load 状态加载下一位平面的数据。位平面 6 和位平面 7 在 delay 状态完成延迟后即可立即开始下一位平面数据的加载。

4.2　系统测试

系统搭建完成后分别对脉冲宽度调制方法和复合编码方法进行静态图像的显示测试。实验结果表明复合编码方式可正确实现灰度图像的显示，但图像亮度低于脉冲宽度调制方法，如图 9 所示。



(a)　复合编码方法　　(b)　脉宽调制方法

图 9　静态图像显示对比

帧频测试可通过显示特殊的静态图像来实现。如图 10 所示，测试图像的每个像素灰度值均为 128，在对图像进行位平面分割后，位平面 0～6 的像素数据为全 0，位平面 7 的像素数据为全 1，因此在显示测试图像时会在每一帧的显示中产生一次光脉冲，光脉冲的频率即复合调制的显示帧率。

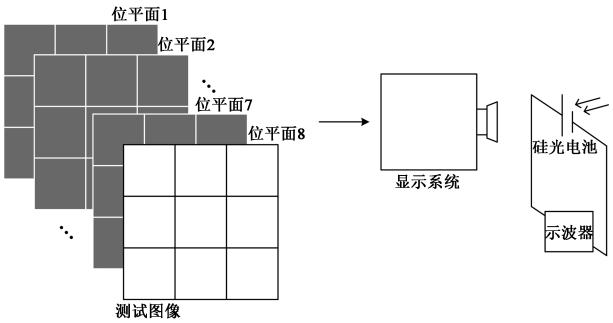


图 10　帧频测试方法

帧频测试实验首先将测试图案写入主控板的存储器中显示测试图像，再将硅光电池对准投影系统，通过检测硅光电池两端的电压即可得到显示图像的亮度变化情况。从图 11 中可以看出，光脉冲的频率为 2 459 Hz，即复合编码调制的显示帧频达到 2 459 Hz，与理论帧率相差 2 Hz 是由测试系统误差导致的，因此可以认为系统显示帧频达到理论预期。

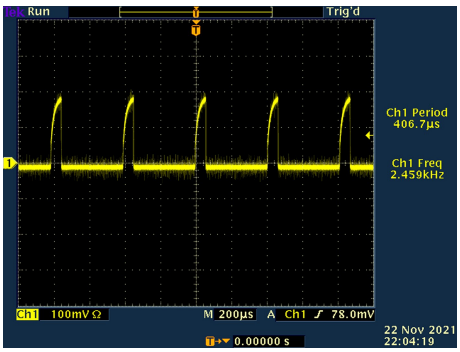


图 11　硅光电池电压波形

5　结论

本文分析了 DMD 传统脉冲宽度调制显示帧频受限的原因，并提出通过增加光源调制进一步缩短帧周期来提高帧频。在分析了基于光源的灰度调制的性能及其在实际工程应用上的困难后，根据工程实际提出了 DMD 与光源复合编码的灰度调制方式，对 8 bit 灰度图像的低四位位平面采用光源亮度调制，高四位位平面采用脉冲宽度调制的方法，在不显著降低光源调制带来的高帧频性能下，提高了显示亮度和工程可行性。经实验验证，系统能够以 2 461 Hz 的帧率显示 8 bit 灰度图像。

参考文献：

[1]　王　霞，汪　昊，徐　超，等. 红外场景仿真技术发展综述[J]. 红外技术，2015，37(7)：537-543.
Wang Xia，Wang Hao，XU Chao，et al. Overview on development of infrared scene simulation [J]. Infrared Technol.，2015，37(7)：537-543.

[2]　马丽华，乔卫东，赵尚弘，等. 红外制导半实物仿真及目标模拟器研究[J]. 计算机仿真，2007，24(6)：42-44，52.
Ma Lihua，Qiao Weidong，Zhao Shanghong，et al. Infrared seeker hardware-in-the-loop simulation and target silulator[J]. Computer Simulation，2007，24(6)：42-44，52.

[3]　范世鹏，林德福，路宇龙，等. 激光制导武器半实物仿真系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程，2014，43(2)：394-397.
Fan Shipeng，Lin Defu，Lu Yulong，et al. Design and achievement of hardware-in-the-loop simulation system for guided shell based on laser semi-active seeker[J]. Infrared and Laser Engineering，2014，43(2)：394-397.

[4]　孙永雪. 基于 DMD 的红外双波段目标仿真器研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2013.
Sun Yongxue. Research of dual-band infrared target simulator based on digital-micromirror device [D]. Harbin：Harbin Institute of Technol.，2013.

[5] 张建忠. 红外双波段视景仿真器光学系统的研究[D]. 长春：中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所)，2013.
Zhang Jianzhong. Study on the optical system of an infrared dual-band scene simulator [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences, 2013.

[6] 武 迪，施 蕊，蔡本睿. 一种红外场景/点源目标模拟器技术研究[J]. 光学技术，2015，41(1)：48-51.
Wu Di, Shi Rui, Cai Benrui. An IR scene/point target simulator[J]. Optial Technique, 2015, 41(1): 48-51.

[7] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Advancements in the micromirror array projector technology[J]. Proc. of SPIE, 2003, 5785(1): 68-79.

[8] Texas Instrument. DMD 101: Introduction to Digital Micromirror Device (DMD) Technology [EB/OL]. 2008 [2021-12-01]. http://www.ti.com.cn/.

[9] Texas Instrument. DLP® Discovery™ Digital Controller (DDC4100)[EB/OL]. 2009[2021-12-01]. http://www.ti.com.cn/.

[10] 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 Jianhua, Zhu Ming, Huang Detian. Dynamic infrared scene projection technology based upon digital micromirror device[J]. Chinese J. of Optics and Appl. Optics, 2010, 3(4): 325-336.

[11] 张永骞，张 涛，崔文楠，等. 基于DMD的高动态图像超高帧频显示方法[J]. 半导体光电，2017，38(1)：122-125，130.
Zhang Yongqian, Zhang Tao, Cui Wennan, et al. Ultrahigh frame rate display method of high dynamic range images based on DMD[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 122-125, 130.

[12] 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.
He Yongqiang, Geng Da, Zhang Dongxiao, et al. Gray modulation characteristics of DMD and its applications in scene simulation[J]. Infrared Technol., 2014, 36(12): 997-1002.

[13] 陈雪旗，姜爱民，莫小范. 基于DMD的时变目标模拟研究[J]. 天文研究与技术，2020，17(3)：357-365.
Chen Xueqi, Jiang Aimin, Mo Xiaofan. Time-varying source simulation research based on digital micromirror device[J]. Astronomical Research and Technology, 2020, 17(3): 357-365.

[14] 周 浩，张 涛，崔文楠. 基于数字微反射镜器件(DMD)灰度显示帧频提高技术研究[J]. 科学技术与工程，2014，14(21)：257-261.
Zhou Hao, Zhang Tao, Cui Wennan. Research on improving display frame rate of gray scale image based on digital micromirror device[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(21): 257-261.

[15] 张 林，胡丹峰，朱鹏飞. 激光直写系统中DMD控制方法的设计与改进[J]. 半导体光电，2021，42(5)：741-746，759.
Zhang Lin, Hu Danfeng, Zhu Pengfei. Design and improvement of DMD control methods in direct laser writing system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 741-746, 759.

[16] 刘 龙. 基于DMD的动态同步高帧频投影技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2020.
Liu Long. Research on dynamic synchronous high frame rate projection based on DMD[D]. Xi'an: Xidian University, 2020.

作者简介：

宋睿博(1997—)，男，湖北省武汉市人，硕士研究生，主要研究方向为高帧频显示技术；

张 涛(1966—)，男，陕西省西安市人，博士，研究员，博士生导师，主要研究方向为空间科学实验仪器与技术。