文章编号:1001-5078(2014)07-0728-05

·红外技术及应用·

基于DMD的高帧频红外灰度图像播放器设计

王晓东,朱小明
(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

摘 要:由于红外系统复杂度越来越高,用靶场实验方式测试系统的性能指标已变得十分高昂,甚至无法实现。利用红外图像模拟器来测试红外系统的性能指标是一种经济、实用的办法。本文设计了一款基于DMD的8位灰度红外图像播放器,详细阐述了系统各功能模块的作用,并使用自制的红外热像仪测试了系统的相关性能指标。经测试播放器线性相关度为0.99997,图像非均匀性优于1.7%(含热像仪),图像帧频为252.5 f/s,能够满足大多数红外成像系统仿真与测试的需求。

关键词:DMD;红外播放器;高帧频;灰度图像
中图分类号:TN216 **文献标识码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1001-5078.2014.07.005

Design of high frame frequency gray-scale infrared image player based on DMD

WANG Xiao-dong, ZHU Xiao-ming
(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: For the increasing of infrared system's complexity, it's a costly, even impossible thing to test various performances of infrared systems in field. Fortunately, there is an economical and practical way to test those indexes by using infrared image simulator. An 8bit gray-scale infrared image player based on DMD is designed, functions of every model are elaborated in detail, and related performance indexes of the system are tested by using thermal infrared imager designed by the lab. According to the tests, its linear correlation is 0.99997, the non-uniformity of image is better than 1.7% (including thermal imager), and the image frame rate of it is up to 252.5 f/s. It can meet the needs of most simulation and tests for infrared imaging systems.

Key words: DMD; infrared player; high frame frequency; gray-scale image

1 引 言

传统上,红外目标捕获系统检测包括实验室硬件性能参数测试,如调制传递函数(MTF)、噪声等效温差(NETD)、最小可分辨温差(MRTD),以及外场测试,如搜索能力、捕获能力、识别能力、探测距离等。硬件性能测试,通常用大型通用设备来完成,其不足是不能在捕获系统的工作状态下进行测试。外场测试能直接检验目标捕获系统的性能,但实验复杂度很高,实验会耗费巨大的人力和物力,且受环境和测试条件局限,难以完成对系统更全面的分析,诸如目标与干扰的光谱特征差异、目标运动特征差异、图像特征差异、不同环境条件对捕获系统的影响等。

红外景象模拟器能在工作波段内模拟真实目标和背景的红外辐射,供红外成像系统进行探测和识别,进而对系统的捕获概率、跟踪精度及抗干扰能力等各项性能进行测试,为系统的研发提供可重复、可控的试验条件[1]。采用景象模拟器可以有效降低成本和周期,据统计,采用仿真试验技术可以使外场

作者简介:王晓东(1970-),男,研究员,博士生导师。主要研究方向为光电探测与检测及信息处理。E-mail:wangxd@ciomp.ac.com
收稿日期:2013-10-24

测试减少 30% ~50%，研制经费节省 10% ~40%，研制周期缩短 30% ~40%[2]。

DMD(Digital Micro-mirror Device)是德州仪器公司开发，用于数字光处理(DLP，Digital Light Procession)的关键元件。DLP 是一项新兴的投影技术，如果将所要模拟的可见光或者红外图像通过 DLP 技术进行播放，再用相应的系统进行采集，可以方便地获得图像目标，供检测系统使用[3-4]。这便是我们设计这套 DMD 播放器的初衷。

2　DMD 播放器系统设计

DMD 播放器主要由五部分构成：照明光源、光学系统、DMD 及驱动电路、结构支撑系统和电源模块。①由于播放器工作在中波红外波段，因此需要使用红外波段透过型的光学材料替换玻璃窗口，并专门设计工作在红外波段的光学系统；②提供红外照明光源，要求光源具有较高的温度稳定性、空间辐射均匀性以及光能利用率，并能够均匀照射 DMD 芯片；③为了能够播放高帧频的灰度图像，需要设计专门的时序来驱动 DMD 工作，并保证 DMD 复位信号与采样系统积分信号的同步[5-6]。系统结构如图 1 所示。

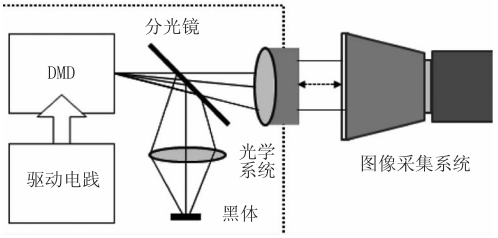

图 1　系统结构示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the system

2.1　照明光源和光学系统设计

DMD 是一种反射型空间光调制元件，本身并不能产生图像，因此需要照明光源。黑体因其发射率高、温控精度高、并能均匀照射 DMD 芯片的特点，成为红外照明光源的最佳选择。照明光源选用腔式黑体，参数如表 1 所示。照明系统设计中需要重点解决倾斜 DMD 面的均匀照明、照明能量利用效率、照明与投影系统的光瞳匹配等问题。

表 1　腔式黑体参数表

Tab. 1　Parameter of cavity blackbody

项　目	参　数
照明温度范围	室温 ~1023 K(可调)
最小可控温差	0.1 K
温差调节步长	0.1 K
腔口直径	12 mm

目前在红外波段，可供选择的材料极其有限。通常只有锗、硒化锌、硫化锌、锗玻璃。锗化学性质稳定，常温下不与空气和水蒸气作用，并且高纯锗单晶具有很高的折射系数，对红外线透明，不透过可见光和紫外线，是一种非常理想的红外透过性材料，因此光学系统的透镜均采用锗透镜。

2.2　DMD 及驱动时序

DMD 是单片集成的微机电系统，其微镜及运动机构均制作在 CMOS 静态存储器上，如图 2 所示。每块微反射镜都有独立的支撑架，并可绕斜轴做 ±12°的偏转。如果定义 +12°为开状态，-12°为关状态，0°为 float 态，也是 DMD 芯片初始化状态。由于存储器只能存储‘0’和‘1’两个值，因此 DMD 也只能在 +12°和 -12°两个状态(复位时才能位于 float 态)[7-8]，光线也就根据开关状态的不同而被调制，达到播放图像的目的。

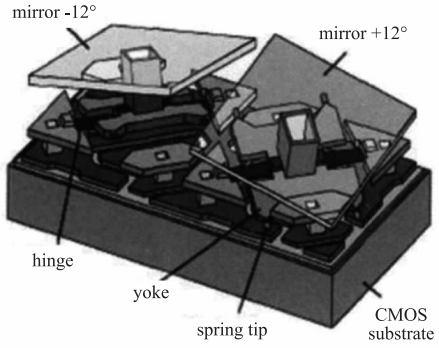

图 2　DMD 结构示意图

Fig. 2　Structure diagram of DMD

DMD 有多种型号供用户选择，本系统使用 DLP7000 DMD，参数如表 2 所示[9]。768 行像元被分成 16 块，每块 48 行，每个块被作为一个整体进行刷新操作。共有四种刷新模式：Single block mode，Dual block mode，Quad block mode 和 Global mode，分别对应一次刷新一行，一次刷新两行，一次刷新四行和整幅图像刷新。

表 2　DLP7000 参数表

Tab. 2　Parameter of DLP7000

项　目	参　数
尺　寸	0.7 inch
像元数	1024 × 768
像元尺寸	13.68 μm × 13.68 μm
分辨率等级	XGA

由于我们设计的是图像播放器，采用了整幅图像刷新模式，这样既可以提高播放图像的帧频，又可以避免画面积分时间不一致。整幅图像刷新模式如

图 3 所示,首先加载所有数据,然后全局复位,镜子翻转后即可得到所需图像。

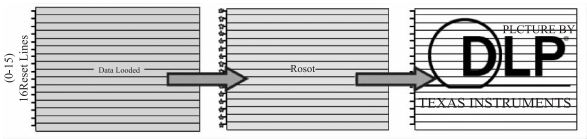

图 3 整幅图像刷新模式示意图

Fig. 3 Diagram of full frame refresh model

2.3 信号源与图像采集系统

DMD 播放器播放的是大小为 1024 × 768 的 256 位灰度图像,图像信号通过 LVDS 传输到 DLP 控制芯片,再由 DLP 控制芯片根据图像信号控制数字微镜的开关状态,达到播放图像的目的。256 位灰度图像是通过脉宽灰度调制法实现的,即 DLP 控制芯片根据图像比特位的二进制数值对显示屏幕进行扫描,其输出驱动的高低电平直接反应了像素比特值的大小,输出驱动脉冲的占空比体现了像素的灰度等级。首先,根据要显示的灰度等级以及所选器件能够实现的最快翻转时间确定最低有效位(LSB)的持续时间;然后按权值等比例排列其它位。若图像数据为 n 位,则从低到高权值位、数据持续时间依次为: $2^0:2^1:\cdots:2^{n-1}$,其中 2^0 对应 LSB 持续时间。当图像比特位数据为“1”时,对应的脉冲等级为高电平;当图像比特位数据为“0”时,对应的脉冲等级为低电平,这样就可以使选通的像素以不同灰度显示。本设计选用的 DMD 芯片,微镜完成一次翻转最快需要 15.47 μs,即 LSB 所需时间。本系统要实现 256 位灰度图像,即 2^8,需要用时 3.96 ms。播放图像的频率与播放时间的关系如式(1):

$$f_{\max} = \frac{1}{t_{2^n}} = \frac{1}{3.96\ \text{ms}} = 252.5\ \text{Hz} \qquad (1)$$

本播放器所能达到的最高频率即为 252.5 f/s。

图像采集系统是为了测试 DMD 播放器的性能而研制的。能够实时采集中波红外图像数据,并将数据通过 Camera Link 接口传送到上位机,同时还能在自带的液晶显示器上播放采集到的图像数据,便于调试。

在红外景象模拟中,如果播放和采集系统不能同步工作,则采集到的图像将会出现假灰度或闪烁现象。为同步播放和采集系统,设计了一块播放控制板,主要实现四个功能:①接收采样系统给出的每帧图像播放命令;②如果播放系统不产生命令,则自动(或外接信号源)产生每一帧播放命令;③当前帧播放过程中,屏蔽外来播放命令(保护器件);④调节延迟时间,使播放和采集同步,并显示该延迟时间。

2.4 软件开发

美国光科技公司开发的 DMD 投影设备的标准电路帧频为 60 ~ 85 Hz,而红外成像系统的工作频率通常为 50 ~ 100 Hz,或者更高,需要开发专用的 DMD 驱动程序。在图像源数据传输过程中,会出现传输速率低于或高于播放速率的情况,这时需要数据缓存。本系统能缓存三幅图像,分别为上一帧,当前帧和下一帧。若传输和播放速率匹配则播放当前帧;传输速率低于播放速率则重复播放上一帧;如传输速率高于播放速率则播放当前帧,而数据存入下一帧。

软件由系统复位、数据接收、数据缓存,灰度二值变换、数据装载和播放控制等模块组成,此处不展开介绍。

3 DMD 播放器性能测试

3.1 测试条件

本系统工作波段为 3 ~ 5 μm,DMD 像元尺寸为 13.68 μm × 13.68 μm,像元数为 1024 × 768,系统出瞳直径 120 mm,出瞳距 150 mm,出射光为平行光,DMD 位于采样系统(红外热像仪)的焦平面上[10]。红外热像仪参数如表 3 所示。

表 3 红外热像仪参数表

Tab. 3 Parameter of infrared thermal imager

项 目	参 数
工作波段	3.7 ~ 4.8 μm
F 数	2(冷光阑)
镜头平均透过率	94%
探测器像元数	320 × 256
积分时间	3.5 ms
测温范围	15 ~ 160 ℃
测温精度	±0.05 ℃
像素大小	30 μm × 30 μm

3.2 测试内容

1)图像帧频测试

由于本系统能缓存三幅图像,故有两种测试帧频的方式:①通过生成不同帧频的数据源,并给出对应的播放命令;②使用低频率的数据源(如 52 f/s),但给出较高频率的播放命令。第二种方式更容易实现,也是我们采用的方式。随着播放频率的提高,图像亮度增强。在图像最亮时,信号源产生的播放频率恰好为 252.5 Hz,与设计值相等。当播放命令的频率高于最大播放频率时,播放控制板会屏蔽在播放过程中出现的信号,以保护 DMD 芯片,此时图像

会变暗。

2)图像线性度测试

在图像帧频为 52 f/s,黑体照明温度为 130 ℃,循环播放灰度值为 0 ~255 的纯色图像,使用热像仪同步采集数据,并计算整幅图像的平均值,描点绘图,并使用 origin 线性拟合所得数据,数据如图 4 所示。可见其线性相关度为 0. 99997,图像的线性度很好(包括了热像仪的非线性),说明随着播放频率地提高,DMD 反射的总能量线性增加。

3)图像的非均匀性测试

在图像帧频为52 f/s,黑体照明温度为150 ℃,播放灰度值为 130 的图像,使用热像仪采集图像 3 分钟,随机选取一幅图像,如图 5 所示(实际上我们选择了数十幅图像,结果基本一致,故只取其中一幅)。

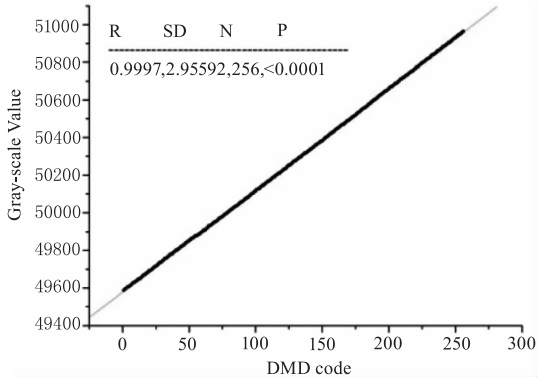

图 4 数据的线性相关曲线

Fig. 4 Linear correlation of data

数据在 5. 32 ~ 5. 41 × 10^4 之间,图像非均匀性为:

$$C = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max}} \times 100\% = \frac{5.41 - 5.32}{5.41} \times 100\% = 1.7\% \quad (2)$$

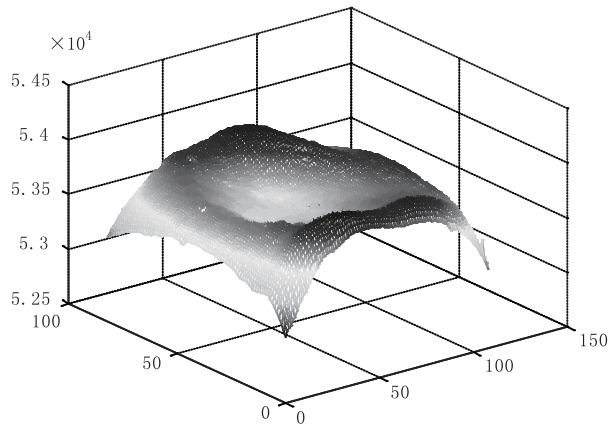

图 5 matlab 显示热像仪数据

Fig. 5 data of infrared imager displayed in matlab

4 结 论

本文介绍的 DMD 图像播放器能够方便地给出红外探测器测试需要的 8 位灰度红外目标图像,并可通过延时器调节延迟时间,使播放与采集同步。灰度图像具有重复性好,线性度高,非均匀性优于 1. 7%,帧频可由外触发信号连续可调,最高达到 252. 5 f/s。该播放器能够满足大多数红外成像系统测试的需要。经过进一步优化后,该系统有望在红外仿真与测试领域广泛使用。

参考文献:

[1] LÜ Junjie. The study of target simulator for infrared imaging guided system[J]. Journal of System Simulation. 1994,6(3):9 - 15. (in Chinese)
吕俊杰. 红外成像制导系统目标模拟器的研究[J]. 系统仿真学报,1994,6(3):9 - 15.

[2] TIAN Wenchao, JIA Jianyuan. Digital micro-mirror devices and digital light processing technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2005,26(8):358 - 360. (in Chinese)
田文超,贾建援. DMD 及 DLP 显示技术[J]. 仪器仪表学报,2005,26(8):358 - 360.

[3] CHEN Tao, LI Zhengwei, WANG Jianli, et al. Imaging system of single pixel camera based of compressed sensing [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(11): 2523 - 2529. (in Chinese)
陈涛,李正炜,王建立,等. 应用压缩传感理论的单像素相机成像系统[J]. 光学精密工程,2012,20(11):2523 - 2529.

[4] XÜ Qixin, HOU Wenmei, SHENG Shijie, et al. 3-dimensional profiler based on digital micro mirror device[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(5): 1138 - 1144. (in Chinese)
许琦欣,侯文玫,盛世杰,等. 基于数字微镜器件的三维轮廓测量及其性能分析[J]. 仪器仪表学报,2011,32(5):1138 - 1144.

[5] YANG Le, SUN Qiang, WANG Jian, et al. Athermalization for mid-wave infrared scene projector optical system[J]. Acta Optica Sinica. 2011, 40(10): 1521 - 1525 (in Chinese)
杨乐,孙强,王健,等. 中波红外景象投影光学系统消热差设计[J]. 光子学报,2011,40(10):1521 - 1525.

[6] HU Chuqiang, MU Da, CHEN Lingzhi. Design of infrared target simulator's optical splitting system based on digital-mirror device [J]. Laser & Infrared, 2012 42(6): 655 - 658. (in Chinese)
胡初强,牟达,陈灵芝. 基于 DMD 的红外目标模拟器

分光系统设计[J]. 激光与红外, 2012, 42(6): 655 - 658.

[7] YU Qing, YU Xiaofen, LIU Wenwen, et al. Restudies on parallel confocal measurement system with digital micro mirror device[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 12, 38(6): 966 - 970. (in Chinese)
余卿,余晓芬,刘文文,等. 数字微镜器件用于并行共焦测量的再研究[J]. 光学学报, 2009, 38(6): 966 - 970.

[8] HE Yongqiang, TANG Deshuai, WANG Long, et al. Diffractive characteristics of DMD and its pplications in infrared scene simulation[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(8): 935 - 938. (in Chinese)
何永强,唐德帅,王龙,等. DMD 衍射特性及其在红外场景仿真中的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 935 - 938.

[9] Texas Instruments Inc. DLP discovery 4100 chipset data sheet[EB/OL]. DLPU008, 2012, 12.

[10] WANG Yunping, ZHAO Changming. Dynamic infrared scene simulation system based of 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 的动态红外景象仿真系统[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 966 - 970.