

〈系统与设计〉

基于数字微镜器件的红外场景仿真系统设计

何永强, 耿达, 唐德帅, 元雄, 胡文刚, 任宏岩

(军械工程学院 光学与电子工程系, 河北 石家庄 050003)

摘要: 利用红外场景仿真技术对红外成像系统进行测试已成为各国研究的热点。提出了一种基于数字微镜器件(DMD)的红外场景仿真系统设计方案, 对系统设计过程中各个组成部分进行了详细介绍, 并对系统的部分性能参数进行了分析, 如微镜片的衍射特性、能量转换效率、显示帧频等。最后, 结合系统的应用背景和存在的问题, 对下一步的研究工作做了展望。

关键字: 数字微镜器件; 红外场景; 仿真系统设计; 性能分析

中图分类号: O438 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2014)05-0384-05

Design of the IR Scene Simulation System Based on DMD

HE Yong-qiang, GENG Da, TANG De-shuai, HU Wen-gang, YUAN Xiong

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

Abstract: It has become a research hotspot that infrared scene simulation is used to test the infrared imaging system. A design scheme of infrared scene simulation system based on DMD has been put forward, some major matters of the process of system design has been introduced in detail, and the optical performance of system has been analyzed, such as the diffraction characteristic of the DMD, the transfer efficiency of the system and the frame frequency of display. At last, with the background of application and the existent problems considered, next work has been planned.

Key words: DMD, infrared scene, simulation system design, performance analysis

0 引言

随着红外成像技术的发展, 红外成像系统在探测、跟踪、制导武器等领域得到了飞速发展^[1-2]。为了评估红外成像系统的性能, 需要进行大量的外场试验。现有的外场试验耗时耗力且受时间、气候等条件的影响效果也不太理想。

近年来, 在室内利用半实物仿真的方法进行红外成像测试系统性能成为研究的热点^[2]。本文提出一种基于数字微镜器件(DMD)的红外场景仿真系统设计方案, 对系统设计过程中各个组成部分进行了介绍, 并对系统的性能指标, 如微镜片衍射特性、能量转换的效率及显示帧频等进行了分析。

1 DMD 及其工作原理

美国德州仪器(TI)公司在20世纪70年代意识

到DMD的巨大应用价值, 经过十多年的研制和改进, 在20世纪80年代末研制成功。DMD是一种空间光调制器件, 是DLP显示系统的枢纽环节, 它采用微机械加工技术, 将成千上万个可偏转的铝合金微镜固定在半导体硅片上, 一个微镜片控制图像上的一个像素, 且每个微镜片能够快速的“点亮”和“熄灭”该像素, 从而来显示图像信息^[3]。

图1^[2]是DMD单元结构图, 如图所示, DMD微反射镜主要包括CMOS SRAM、几大电极、支柱、铰链和反射镜几大部分。

每个DMD像素单元最底层的SRAM存有0或1, 以控制反射镜的偏转角度($-\theta$ 或 θ), 支撑反射镜的支柱与下层的一个偏转机构相连接, 再依次受到两个扭力铰链的支撑, 从而将支撑立柱铰链在一起^[4]。微镜和镜架寻址电极分别与SRAM两侧的输出端相连, 微镜与微镜寻址电极之间以及镜架与镜架寻址电极

收稿日期: 2013-12-02; 修订日期: 2014-02-19。

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。

通讯作者: 耿达(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光电对抗和光学设计, E-mail: gdjxgc@126.com

之间的静电引力产生有效的静电扭矩, 而铰链产生的扭矩与其作用相反, 微镜的转动就是通过这两个扭矩的作用来实现的。

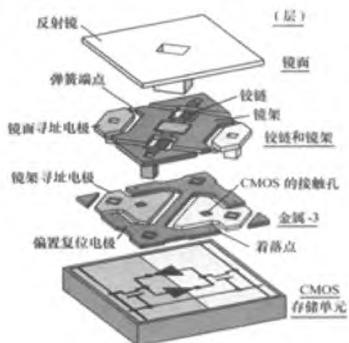


图1 单个微反射镜的结构示意图
Fig.1 Structure of single DMD

2 系统设计方案

基于 DMD 的红外场景仿真系统通过对 CMOS SRAM 输入二进制信号, 控制微镜片的偏转方向实现空间光调制, 利用 PWM 技术实现灰度图像的显示。

仿真系统由投影系统和计算机两大部分组成, 它们之间通过 RS232 串口连接。投影系统包括 DMD 阵列、驱动电路、主板电路、照明光源和光学系统等^[4], 其作用是通过投影光路投射计算机输出的红外场景; 计算机通过软件控制仿真系统的状态, 设置照明光源的温度及其它系统参数等^[4]。如图 2 是仿真系统结构框图。

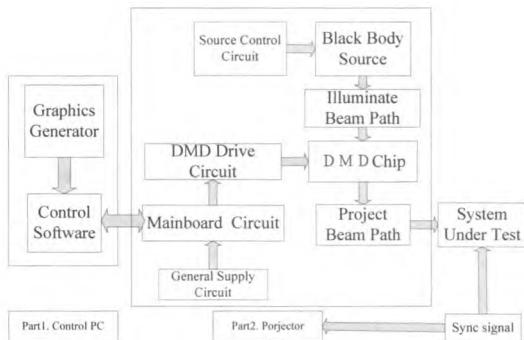


图2 仿真系统结构框图

Fig.2 Block diagram of Simulation System

光学系统的性能决定了红外场景仿真的效果, 需要专门对其进行设计, 使其能够在不同的工作温度下具有良好的成像性能。

3 可行性分析

3.1 投影机部分

3.1.1 DMD 芯片

DMD 芯片根据分辨率标准的不同分为 SVGA、

XGA、SXGA 等几种型号。SVGA (Super Video Graphics Array) 其分辨率为 800×600 , 每个像素 4bit 表示, 16 种颜色。XGA (eXtended Graphics Array) 其分辨率为 1024×768 , 每个像素 24 bit 表示。SXGA (Super eXtended Graphics Array) 其分辨率为 1280×1024 , 每个像素 32 bit 表示。

仿真系统采用的是 0.7 英寸 XGA 格式的 DMD 芯片, 微镜片中心距为 $13.7 \mu\text{m}$, 可偏转角度为 $\pm 12^\circ$ 。XGA 格式的 DMD 芯片, 有超过 786000 个独立控制的微反射镜片, 比 SVGA 格式增加了 33.3%, 仿真系统采用二进制调制时, 最高帧频可达 20 kHz, 比 SVGA 格式最高帧频 4065 Hz 有相当大的提高。同时增加了定相复位功能, 使镜片可以单独复位, 而不是 SVGA 格式的必须整个微镜阵列全部同时复位^[5]。

3.1.2 DMD 驱动电路

DMD 控制系统安装在一块 PCB 板上, 除了一片 DMD 芯片之外, TI 公司还为用户提供了专用的配套芯片组, 包括一块 DMD 控制器 DLPC410、一块微镜驱动器 DLPA200 和一块配置 PROM 即 DLPR410 构成驱动控制电路, 主要完成以下功能:

- 1) 从支持电路接收数字视频信号;
- 2) 转换为 DMD 芯片显示格式, 并贮存在二端口 RAM 中;
- 3) 由同步信号触发视频信号输入 DMD;
- 4) 产生 DMD 需要的模拟信号;
- 5) 通过串行口发送状态和接收控制命令。

3.1.3 黑体光源

系统采用双光源设计。一个高温黑体作为目标光源, 一个低温黑体作为背景光源, 同时吸收“关”状态镜片反射的辐射, 降低呈“关”状态的镜片的表面温度, 提高图像的对比度。

3.1.4 支持电路

支持电路包括: 视屏转换电路、同步信号控制器、供电电路等, 采用独立封装。主要完成以下功能:

- 1) 从视频源处接收视频信号, 可以是 DVI、DVP、RS-170 等格式;
- 2) 将视频信号数字化, 并送到 DMD 驱动电路;
- 3) 接收同步信号, 并送到 DMD 驱动电路;
- 4) 为封装电路和投影机头部分供电;
- 5) 通过串行口发送状态和接收控制命令。

3.1.5 光学系统

通常将仿真系统的光学部分分为照明部分和投影部分。

照明部分的设计一方面要使得光能量利用率尽可能高, 另一方面要保证照明光场足够的均匀度, 且

具有较小的发散角。光场均匀度可以利用蝇眼透镜来实现,由一系列相同的小透镜拼合而成。其优点是光束经过的光学元件较少、光程较短、光能量利用率高。投影部分将 DMD 芯片上的图像信号投射到探测器接收面上,是仿真系统的关键部分,其光学性能决定了仿真的效果。红外系统近几年相继有人提出基于 DMD 的红外场景仿真系统投影光路的设计方案,但大多未考虑光学系统受温度变化产生的影响^[6-7]。红外系统的接收器是光电器件,分辨率不是其主要评定依据,需要具备较大的通光孔径和相对孔径以收集更多的红外辐射。红外物镜片的增加会导致衍射极限和光学传递函数下降,因此在设计中应减少镜片的数量。通过采用二元面设计,可以较好地实现消热差,在一20℃~60℃的温度范围内成像质量接近衍射极限,投影光路具有较好的 MTF 曲线,能量透过率高。下图为利用 ZEMAX 软件设计的投影光路结构图。投影光路体积小、结构简单,具有良好的成像效果,可以广泛应用于红外场景仿真系统。

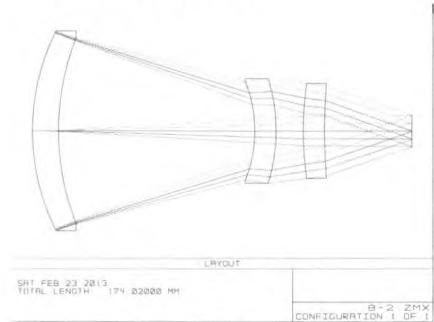


图 3 投影系统结构图

Fig.3 Structure of the projection system

3.2 控制计算机部分

控制计算机主要完成两部分功能:模拟生成红外目标及场景,通过控制软件实现对仿真系统的控制。

计算机模拟生成红外目标及场景就是根据实际测试的图像数据利用图像生成软件,如 Vega Prime、3DS MAX 等,生成各种不同环境及背景下的动态红外目标^[3]。

通过控制软件可以导入传输给投影机的视频信号,并且通过参数设置,控制投影机部分黑体光源的温度;可以在软件界面实时显示传输给投影机部分的视频内容,以及投影机各部分的实时工作状态。

4 系统性能分析

受 DMD 微镜片衍射现象影响,仿真系统对比度会下降,同时系统的能力转换效率和显示帧频决定了仿真图像的成像质量,下面将进行详细分析。

4.1 微镜片的衍射

由 DMD 的结构和工作原理可知, DMD 是一个由微反射镜构成的周期性阵列。对 DMD 进行仿真建模如图 4 所示。

以图 4 中 X, Y 轴建立坐标系, Z 轴垂直于 XOY 平面指向外,单色平行光以与 Z 轴夹角 α 斜入射。建立 DMD 窗口表面复振幅分布一维模型为:

$$f(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \exp(i2\pi u_0 x) * \sum_{m=0}^{M-1} \delta(x + md) \quad (1)$$

式中: m 为微镜片个数; b 为微镜片尺寸; d 为微镜片中心间距; $u_0 = \sin\alpha/\lambda$ 为入射光频率; $\text{rect}()$ 为矩形函数,表示单个边长为 b 的矩孔; $\sum \delta(x + md)$ 为梳状函数,表示共有 M 个矩孔。

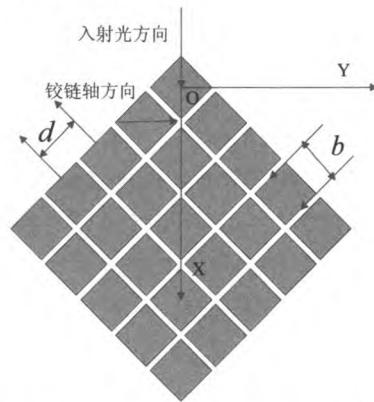


图 4 DMD 模型 Fig.4 Model of DMD

由傅里叶光学可知, $f(x)$ 的夫琅禾费衍射图样的光强分布可由它的傅里叶变换求得:

$$\begin{aligned} F(\xi) = \mathcal{F}[f(x)] &= \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \exp(i2\pi u_0 x) * \sum_{m=0}^{M-1} \delta(x + md)\right] = \\ &= \mathcal{F}\left[\text{rect}\left(\frac{x}{b}\right) \exp(i2\pi u_0 x)\right] \cdot \mathcal{F}\left[\sum_{m=0}^{M-1} \delta(x + md)\right] = \\ &= \text{sinc}[(\xi - u_0)b] \cdot \frac{\sin(M\pi d\xi)}{\sin\pi d\xi} \cdot \exp[i(M-1)\pi d\xi] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $\xi = \frac{\sin\theta}{\lambda}$ 为频谱坐标,将 $\xi = \frac{\sin\theta}{\lambda}$ 、 $u_0 = \frac{\sin\alpha}{\lambda}$

代入上式,求得其衍射光强分布为:

$$\begin{aligned} I &= |F(\xi)|^2 = I_0 \sin^2\left[\left(\sin\theta - \sin\alpha\right) \frac{b}{\lambda}\right] \cdot \\ &\quad \frac{\sin^2\left(\frac{M\pi d \sin\theta}{\lambda}\right)}{\sin^2\left(\frac{\pi d \sin\theta}{\lambda}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: I_0 为单个微镜产生的光强度。

通过上式可以发现, DMD 衍射光强分布函数类似光栅衍射光强分布但又区别于普通衍射光栅,

所以, 也有学者把 DMD 看作是复杂光栅模型进行分析^[8-9]。随着波长与微镜片尺寸接近, 微镜片的衍射现象越来越严重, 系统投射出的图像对比度将有一定程度的下降。

4.2 能量转换效率

系统转换效率的高低是衡量一个系统的重要指标^[3]。如图 5^[4]所示, 可以计算出转换效率的大小。

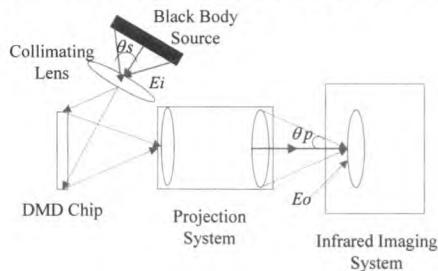


图 5 系统转换效率计算模型

Fig.5 Calculate modulate of system transform efficiency

如式(4)所示, 投影系统的输入相对辐照度 E_i 决定了输出相对辐照度 E_o 的值^[10]:

$$E_o = rE_i \quad (4)$$

式中: r 为系统的转换效率因子; E_i 表达式为:

$$E_i = C_s(T_s) \sin^2 \theta_s \quad (5)$$

式中: $C_s(T_s)$ 表示温度为 T_s 的黑体辐照度, θ_s 表示黑体光源相对系统入射角的半角角度^[4]; E_o 表达式为:

$$E_o = C_p \sin^2 \theta_p \quad (6)$$

式中: θ_s 表示系统输出的辐照度; θ_p 表示仿真系统相对被测系统输入角的半角角度;

则式(4)可以表示为:

$$C_p = g C_s(T_s) \quad (7)$$

式中: $g = r \frac{(\sin^2 \theta_s)}{(\sin^2 \theta_p)}$ 。

转换效率因子 r 与传递效率 τ_c 、DMD 芯片的反射效率 $R_{DMD}(x, y)$ 、填充因子 ϕ_{DMD} 以及中继透镜的传递效率 τ_t 成正比^[4], 即:

$$r = \tau_c \cdot R_{DMD}(x, y) \cdot \phi_{DMD} \cdot \tau_t \quad (8)$$

光学系统传递效率的高低与透镜的数量及其透光率有关, 对于镀有消反射敷层的单片透镜, 其透光率在 3~5 μm 波段大于 95%; 对于分辨率为 1024 \times 768, 微镜尺寸为 16 $\mu\text{m} \times$ 16 μm , 其间隔 1 μm 的 DMD 芯片, 其填充因子约为 0.9^[11]; DMD 芯片的反射率约为 90%^[12]。

由上可知, 光学器件确定后, 要想计算出仿真系统的转换效率, 需测出黑体光源相对系统入射角的半角角度 θ_s 以及仿真系统相对被测系统输入角的半角角度 θ_p ^[4]。

4.3 显示帧频

通过采用脉冲宽度调制 (PWM) 的方式实现灰度图像的显示, 其原理是通过控制每个像素, 每一位时间内镜片呈“开”状态的时间长短来实现不同灰度等级的调制。驱动电路设计和探测器积分时间限制了所能达到的最大灰度等级。

TI 将生产的 DMD 芯片分为 4 个等级, 0.7XGA 格式 A 类芯片的极限显示速率为 20000 Hz, 目前驱动电路不能达到这么快的响应速度, 8 bit 灰度图像显示帧频最快达到 100 Hz, 对于积分时间较短的探测器, 所能达到的灰度级受限。

5 总结

本文较系统地介绍了一种基于 DMD 芯片的红外场景仿真系统的设计方案。随着需求的增加和仿真技术的不断提高, 仿真内容不断丰富和发展, 仿真系统也逐渐应用到国民经济发展的各个方面, 如大型工业、运输行业等。

对于基于 DMD 的红外场景仿真技术下一步的研究, 作者认为应该从如何提高系统的图像对比度、显示帧频等方面入手, 这些因素决定了仿真系统对场景仿真的逼真程度。由于该项技术在国内研究仍处于起步阶段, 依然存在很大的研究和发展空间。

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.
Ding Quan-xin, Liu Hua. Current development and thought on simulation, test and evaluation of the infrared imaging system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 753-758.
- [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, Huang 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] 唐德帅, 何永强, 黄富瑜. 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, Huang Fu-yu. Study on Dynamic Infrared Scene Simulation Technique Based on Digital Micro-mirror Device[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(8): 476-481.
- [4] 何永强, 唐德帅, 胡文刚. 基于 DMD 的红外场景仿真系统光学性能分析[J]. 红外技术, 2013, 35(2): 97-101.
He Yong-qiang, Tang De-shuai, Hu Wen-gang. Optical Performance Analysis of Infrared Scene Simulation System Based on Digital

- Micro-mirror Device[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(2): 97-101.
- [5] D. Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosbys etc. Advancements in the Micromirror Array Projector Technology[J]. *SPIE*, 2003, 5092: 71-82.
- [6] 贾辛, 廖志杰, 刑廷文, 等. 基于 DMD 的动态红外场景投影光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 692-696.
Jia Xin, Liao Zhijie, Xing Tingwen, et al. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micromirror device[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4):692-696.
- [7] 关英姿, 杨亮. 数字微镜阵列动态红外景象投射器光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 245-248.
Guan Yingzi, Yang Liang. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on DMD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2): 245-248.
- [8] Joseph P. Rice, Jorge E. Neira, Michael Kehoe, et al.. DMD diffraction measurements to support design of projectors for test and evaluation of multispectral and hyperspectral imaging sensors[J]. *SPIE*, 2009, 7210: 72100D(1-9)
- [9] 许富洋, 李勇, 高志强. 数字微镜器件闪耀特性及其在全息显示中的应用[J]. 光子学报, 2011, 40(3): 332-335.
Xu Fuyang, Li Yong, Gao Zhiqiang. Blazing Characteristics of DMD and Its Applications in Holographic Display[J]. *ACTA Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 332-335.
- [10] Dennis R. Page and James A. Carter III .Digital Mirror Device infrared scene projector[J]. *SPIE*, 2223:75-86.
- [11] Julia Rentz Dupuis, David Mansur. Contrast Analysis for DMD-Based IR Scene Projector[J]. *SPIE*, 8015: 801505 (1-10) .
- [12] Easley D B, Bender M, Crosby J. Dynamic infrared scene projectors based on DMD[J]. *SPIE*, 2009, 72100I (1-2) .

(上接第 380 页)

- [2] 夏清, 张振鑫, 王婷婷, 等. 基于改进 Sobel 算子的红外图像边缘提取算法[J]. 激光与红外, 2013, 43(10): 1158-1161.
- [3] 齐英剑, 李青, 吴正朋. 基于灰色相对关联度的图像边缘检测算法[J]. 中国传媒大学学报: 自然科学版, 2010, 17(3): 46-49.
- [4] Huang Ho Chao, Wu J L. Grey system theory on image processing and lossless data compression for HD-media[J]. *The Journal of Grey System Theory and Practice*, 1993, 3(2): 9-15.
- [5] Hsieh ChengHsiung, Shen MengCheng. A grey approach to image hiding based on GDFM model[C]//Proceedings of the 4th National Conference on Grey Theory and Application, Taiwan Kaohsiung, 1999: 161-163.
- [6] 王康泰, 戴文战. 一种基于 Sobel 算子和灰色关联度的图像边缘检测方法[J]. 计算机应用, 2006, 26(5): 1035-1036.
- [7] Jing Xiao-Jun, Ma Yi-Xia, Qu En. Morphological filter based on genetic learning[J]. *Communication and Information Technology*, 2005, 1(12/14): 749-752.
- [8] 陈爱军. 数学形态学及其在图像分析中的应用[J]. 红外与激光工程, 2006, 35: 465-468.
- [9] 王卜堂, 杨善林. 基于 Gauss-Laplace 算子的灰度图像边缘检测[J]. 计算机工程与应用, 2003, 26: 132-134.
- [10] 马苗, 田红鹏, 张艳宁. 灰色理论在图像工程中的应用研究进展[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(11): 1943-1951.
- [11] 胡鹏, 傅仲良, 陈楠. 利用灰色理论进行图像边缘检测[J]. 武汉大学学报: 信息科学版, 2006, 31(5): 411-414.
- [12] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.