

文章编号 1004-924X(2014)09-2508-10

## 数字微镜器件在高动态辐射场景成像探测系统中的应用

王延杰<sup>1,3</sup>, 陈怀章<sup>1,2\*</sup>, 刘艳滢<sup>1,3</sup>, 孙宏海<sup>1,3</sup>, 杨振永<sup>1,2</sup>, 何舒文<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所

中国科学院航空光学成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033)

**摘要:** 由于数字微镜器件(DMD)空间光调制器结合图像传感器能同时探测高动态场景中的亮暗目标, 本文研究了 DMD 在高动态辐射场景成像探测系统中的应用。首先, 介绍了 DMD 实现成像探测的原理, 分析了 DMD 在高动态场景成像探测系统中的驱动控制方法。然后, 根据 DMD 在高动态辐射场景成像探测系统中的工作特性, 设计了能使光电成像设备提高 66 dB 的 DMD 的驱动控制。文中阐述了系统的主要设计模块和工作参数, 并结合实验验证了系统设计的正确性。实验结果表明: 该驱动控制方法能够实现对高动态场景中亮暗目标的同时探测, 满足对光电成像设备动态范围提高 66 dB 的要求。若光电成像设备采用 11 位高灵敏高动态科学级图像传感器, 则系统动态范围可达 130 dB 以上。

**关键词:** 成像探测; 数字微镜器件; 高动态场景; 驱动控制; 调光

**中图分类号:** TP73; TN76 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20142209.2508

## Application of DMD to high dynamic scene image detection system

WANG Yan-jie<sup>1,3</sup>, CHEN Huai-zhang<sup>1,2\*</sup>, LIU Yan-ying<sup>1,3</sup>, SUN Hong-hai<sup>1,3</sup>,  
YANG Zhen-yong<sup>1,2</sup>, HE Shu-wen<sup>1,2</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics,  
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: 294403707@qq.com*

**Abstract:** As spatial light modulators based on Digital Micro-mirror Devices (DMDs) combined with image sensors could detect strong and weak targets in high dynamic scenes and get high dynamic images, this paper researches the application of DMDs to high dynamic scene image detection systems. Firstly, the application principle of the DMD was introduced, and how to control and drive the DMD in the high dynamic scene image detection system was analyzed. Then, based on DMD's working

收稿日期: 2013-07-10; 修订日期: 2013-08-21.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2012AA7031010B)

characteristics, a control driver was designed to make optoelectronic image equipment improve its dynamic range by 66 dB. The main modules were described and working parameters in the system were given. Finally, the feasibility of the system was verified experimentally. The result shows that the control driver detects the strong and weak targets simultaneously in the high dynamic scene, and improves the dynamic range of 66 dB. When a 11 bit higher sensitive imaging sensor is used in the system, the dynamic scene will be over 130 dB.

**Key words:** imaging detection; Digital Mirror Device (DMD); high dynamic scene; control driver; dimming

## 1 引言

在高动态辐射场景的成像探测中,需要同时探测亮暗目标,但当视场内存在高亮物体时,图像传感器容易产生局部饱和,从而丢失该区域的信息,造成光电成像设备无法正常工作。如光电经纬仪在工作过程中,高动态场景下需要捕获的亮目标与暗目标之间的光照强度之比一般在一百万以上,通常要求成像设备具有很大的动态范围;在深空星体观测中,如果在视场内存在两颗星,星等相差达到 10 等以上,普通成像系统就不能同时准确观测到两颗星体;在航天侦查、观测等领域,当星载光电成像设备的指向与太阳夹角比较小时,会造成图像传感器的大面积饱和,形成日晕、blooming 等现象,使光电成像设备失灵。

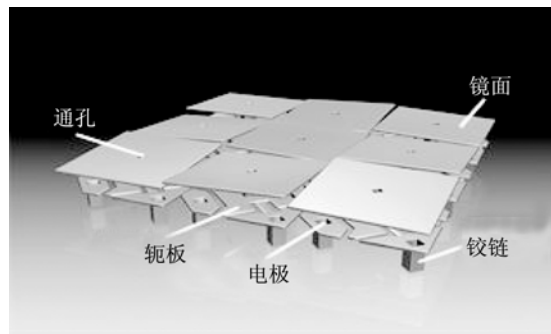
目前,提高高动态辐射场景成像探测能力的主要手段有<sup>[1-3]</sup>:(1)增大图像传感器的像元尺寸;(2)采用双图像传感器成像方法,其中一个积分时间长,另一个积分时间短;(3)改变 CMOS 图像传感器的读出结构,将图像传感器的信号输出幅度与接收的光电子数由线性关系变为对数关系;(4)采用设定多帧不同积分时间的高帧频的图像传感器进行连续快速成像,再通过多帧不同感光程度合成图像。但上述方法的成像动态范围较小(60~80 dB),而且某些图像为非同—时刻获得的图像,需要进行图像增强后处理。因此,这些技术手段无法满足实时成像观察测量多个高亮度目标的要求。

数字微透镜(Digital Micromirror Device, DMD)为 TI 公司生产的一种空间光调制器,主要用于投影或仿真系统<sup>[4-9]</sup>。DMD 结合图像传感器能够解决高动态场景中同时探测强弱目标的问题,该方法中视场光线通过一个由图像传感器的像素值控制的 DMD 空间光调制器,使得图像传感器上每个像素的曝光时间由此像素探测到的场

景光强控制。本文针对高动态辐射场景的成像探测,设计了能使探测系统的探测动态范围扩增 66 dB 的 DMD 驱动控制<sup>[10-11]</sup>,并对主要设计模块以及参数进行了分析,最后通过实验验证了此控制设计的正确性。

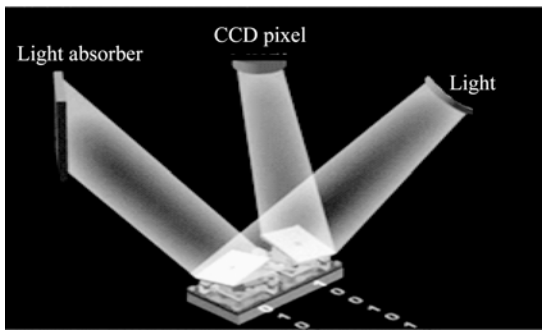
## 2 DMD 光强调制原理及优势

DMD 是一种被集成在寻址集成芯片上的快速数字光开关反射阵列,由许多小型铝制反射镜面构成(见图 1(a)),镜片的数量由显示分辨率决定,一个小镜片对应一个像素。数以百万计的微镜面用铰链结构建造在由硅片衬托的 CMOS 存储器上,每个微小镜面单元下的一对寻址电极与其下方 SRAM 单元 CMOS 电路的电压互补端通过导电通道连接。系统依靠 SRAM 单元对每个微镜寻址,通过改变每个微镜面在 CMOS 下的地址电压,可以产生静电力驱动 DMD 的每个微镜的旋转,微镜的旋转角度有两种稳定的镜片状态(+12°和-12°)。如图 1(b)所示,当 DMD 受到光源照射时,微镜面的正负两态将入射光分别以不同角度反射,调整入射光线角度,将这两态的微镜面对应成系统的亮暗两种像素,从而使投射到 DMD 上的光线有选择地反射而形成黑白点像素。



(a) DMD 结构图

(a) Structure of DMD



(b) DMD 反射示意图

(b) Principle of DMD reflection

图 1 DMD 结构及其工作原理

Fig. 1 Structure and principle of DMD reflection

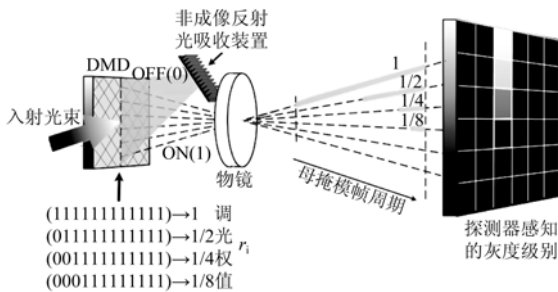


图 2 调光示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dimming

在高动态辐射场景成像探测系统中(如图 2 所示),目标光线通过 DMD 光调制器后,反射到图像探测器上。根据探测器获得的图像数据产生掩模数据,用此数据去调整 DMD 上相应位置的微反射镜的开关状态以及开关时间,以达到调整像面局部区域光强的目的。掩模数据(一帧母掩模由  $n$  帧二进制子掩模组成,每个子掩模的作用时间不同)即为图 2 中的二进制数据,其对应的调光权值如表 1 所示。通过调节光强控制权值  $r_i$  可以实现对图像传感器上对应像素点不同层次的光强控制,从而提高光电成像设备的可探测动态范围。

作为光强调制器件, DMD 的优点为: (1) DMD 光强调制器件采用反射式结构, 光能利用率高, 可达 68% 以上; (2) DMD 所有微镜的控制可以同步完成, 保证光能可同一时刻到达图像传感器; (3) 利用微镜摆动次数实现光强调制, 线性度高, 有利于原始图像数据的恢复; (4) 其光强调制的动态范围依赖于刷新频率, 当刷新频率较低时(10c), 其动态范围可以很高, 达到 66+dB。帧频更低时可以得到更高的动态范围; (5) DMD

的像元尺寸与 CCD 相机像素相匹配, 能够对像面进行像素级的空间调制; (6) 响应速度快, 最高可达 2 万多帧, 48 dB 光强调制帧频可达 80 frame/s, 66 dB 光强调制帧频可达 10 frame/s。

### 3 DMD 在高动态辐射场景探测系统中的控制

#### 3.1 动态范围及控制分析

为使高动态成像系统的动态范围扩增 66 dB, 将 DMD 的主要参数指标设为: (1) 分辨率 1 024×768 VGA; (2) 帧周期 10 frame/s; (3) 最小光强调制权值 1/2 048。

成像系统的动态范围可以看作是探测到的最大光强与最小光强之比。如图 2 所示, 若调光系统中的图像探测器为 CCD, CCD 的动态范围定义为它的满势阱电荷  $I_{\max}$  和最小噪声电荷  $I_{\min}$  之比, DMD 的动态范围由最大与最小光强控制权值  $r_{\max}$ ,  $r_{\min}$  的比值决定, 有:

$$DR_{\text{CCD}} = 20 \log \frac{I_{\max}}{I_{\min}},$$

$$DR_{\text{DMD}} = 20 \log \frac{r_{\max}}{r_{\min}}. \quad (1)$$

DMD 结合 CCD 的成像系统的动态范围为:

$$DR_{\text{sys}} = 20 \log \frac{I_{\max} r_{\max}}{I_{\min} r_{\min}}, \quad (2)$$

其中:  $r_{\max}$  为最大调光权值 1; 若  $r_{\min} = \frac{1}{2\,048}$ , 则有:

$$DR_{\text{sys}} = DR_{\text{CCD}} + 20 \log(2\,048) = DR_{\text{CCD}} + 66.23 \text{ dB}. \quad (3)$$

与传统成像系统相比, 系统的动态范围得到了明显的提高。若系统采用 11 位高灵敏、动态范围为 66+dB 的科学级图像传感器, 则整个系统的动态范围可达 130 dB。

DMD 数据加载以行为单位, 16 个时钟周期(32 个时钟边沿)加载一行 1 024 位数据。1 024×768 规格 DMD 的二进制子掩模加载时间的计算公式为:

$$\text{子帧加载时间} = \text{时钟周期} \times \text{每行时钟数} \times \text{行数}.$$

在 400 MHz 的 DMD 时钟条件下, 采用双沿采样, 可得单子帧加载的时间为:  $0.002\,5 \mu\text{s} \times 16 \times 768 = 30.72 \mu\text{s}$ 。

DMD 复位模式为全局复位的情况下, 二进

制子掩模的最短作用时间为:子帧加载时间+复位信号保持+微镜状态稳定等待时间=30.72+4.5+8=43.22 μs,即一帧二进制子掩模的最短时间为 43.22 μs。支持的最大 11 阶灰度显示帧频为:

$$1 \div (2^{11} \times 43.22 \times 10^{-6}) \approx 11.30 \text{ frame/s.}$$

因此 DMD 可以实现 10 frame/s、11 阶灰度的灰度调制,即达到最小光强调制权值 1/2 048,使成像探测系统的探测动态范围增大了 66 dB。

在时钟频率为 400 MHz、DMD 模式为全局复位的情况下,DDC4100 向 DMD 传输数据的峰值带宽为:

$$\text{子帧数据量/最小时间帧} = 1\ 024 \times 768 \times 1 \text{ bit} / 48.83 \mu\text{s} \approx 16.1 \text{ Gbit/s} \approx 2.01 \text{ GB/s.}$$

帧缓存器采用三星 DDR2 SODIMMs MT8HTF12864HY-667 内存芯片,其容量为 1 GB,位宽 64 bit,DDR2 时钟频率设计为 200 MHz,双沿采样,则缓存器的最大带宽为:

$$\text{数据总线宽度} \times \text{时钟频率} \times 2 \text{ bit} = 64 \times 200 \text{ MHz} \times 2 \text{ bit} \approx 25.6 \text{ Gbit/s} \approx 3.2 \text{ GB/s,}$$

大于 DDC4100 向 DMD 传输数据的峰值带宽 2.01 GB/s,考虑带宽余量,此设计满足要求。

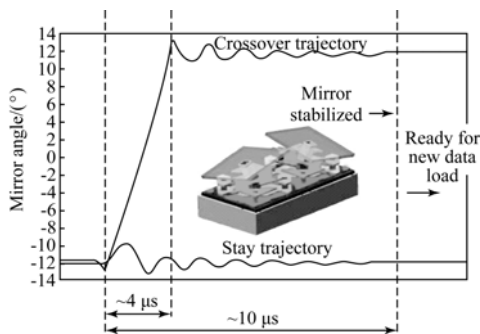


图 3 微镜翻转过程示意图  
Fig. 3 Flipping process of the DMD

图 3 为 DMD 的翻转过程,在 DMD 母掩模帧周期为 10 frame/s 的情况下,最小子帧的作用时间为 48.83 μs,由于翻转耗时 4 μs 以及翻转后的 6 μs 阻尼振荡时间会干扰调光精度,因此需要最大程度地减小微镜翻转带来的影响。

由于像素调光只需要将某饱和像素值调节到图像传感器自身较敏感的响应区段内(一般为图像传感器的临界饱和值与 1/2 临界饱和值之间),因此调光权值的步进较大,而且可以设为固定的几个调光权值。本设计采用二倍关系,见表 1 中

的  $r_i$ 。调光权值由母掩模中各个子掩模的作用时间决定,  $t_i$  的取值方式只需要让小于等于  $i$  的子帧的对应像素为‘1’,大于  $i$  的子帧对应的像素为‘0’即可得到对应调光权值  $r_i$ ,从而使一帧母掩模内的某个像素最多只在某一帧子掩模上发生像素值的改变,达到让 DMD 阵列某个微镜在一帧母掩模内最多发生一次翻转,从而减小微镜摆动次数,使其摆动所带来的影响降到最低。

表 1 基本参数  
Tab. 1 Basic parameters

$i$	$t_i$	$r_i$	$T/\mu\text{s}$	DMD 帧频 /(frame · s <sup>-1</sup> )
1	T	1/2048		
2	T	1/1024		
3	2T	1/512		
4	4T	1/256		
5	8T	1/128		
6	16T	1/64	48.83	10
7	32T	1/32		
8	64T	1/16		
9	128T	1/8		
10	256T	1/4		
11	512T	1/2		
12	1 024T	1		

### 3.2 高动态场景成像探测系统

高动态场景成像探测系统如图 4 所示。图像探测器 CCD 获取场景图像数据,再通过数据处理板生成对应的 DMD 调光控制的母掩模数据,并由 EXP 接口导入 DMD 驱动控制板。母掩模数据控制 DMD 每个微镜的翻转状态及稳定时间,达到调节光强的目的。

DMD 驱动控制板主要由现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)、DDC4100 数字控制器和 DAD2000 DMD 电源复位驱动器组成。FPGA 用于 DMD 驱动逻辑控制;DDC4100 提供高速 2×LVDS 数据和控制接口,为 DAD2000 提供镜片复位和时序信息,支持随机行寻址;DAD2000 生成 16 组 DMD 镜片的复位控制。

CCD 与 DMD 组成的光学系统如图 5 所示。当 DMD 上的微反射镜处于开的状态时,微透镜将成像物镜上的光反射到 CCD 成像探测器上,形成对应像素的亮态;当 DMD 上的微反射镜处于关的状态时,入射到 DMD 上的光线被反射到非

成像反射吸光装置内,光线不能到达图像传感器,从而形成对应像素的暗态。

对 DMD 控制器进行配置后,将数据传入数据格式转换模块,最终写入 DMD4100 以及 DMD。

数据包分发模块解析来自 EXP 接口的控制命令包,并将包内的数据及寄存器号送至 FIFO 缓存,最后 DMD 控制模块根据 FIFO 中的内容对控制寄存器进行配置。DMD 寄存器的控制命令用于控制 DMD 帧频、DMD 数据加载方式及信息查询等。

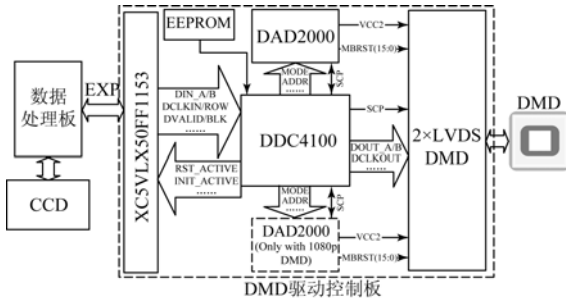


图 4 高动态场景成像系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of high dynamic scene imaging system

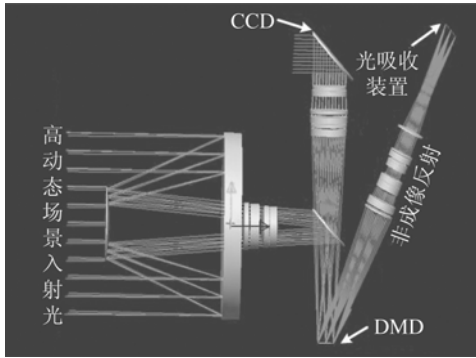


图 5 高动态场景成像探测的光学系统

Fig. 5 Optical system of high dynamic scene image detection

### 3.3 DMD 光强控制总体模块结构

根据 DMD 在高动态场景成像探测系统中的工作特性以及指标要求,设计的 DMD 驱动控制总体模块结构如图 6 所示。数据接收模块接收由 EXP 传入的位宽为 128 bit 数据,数据经过缓存流入数据包分发模块。此模块分析来自 EXP 接口的数据包,如果是 DDR 内存写入数据包,则从数据包中提取写入地址和数据,并分别写入 DDR2 数据写入缓存模块。当检测到有数据等待写入时,DDR2 读写控制模块将数据写入 DDR2 内存。

在 DMD 控制模块内部插入子帧计数器,当计数器完成当前子帧数据周期计数时,会触发一个信号通知 DDR2 读写控制模块停止当前的数据写入操作,转而执行 DDR 数据读取操作,读出的数据经过 FIFO 数据缓存。DMD 控制模块在

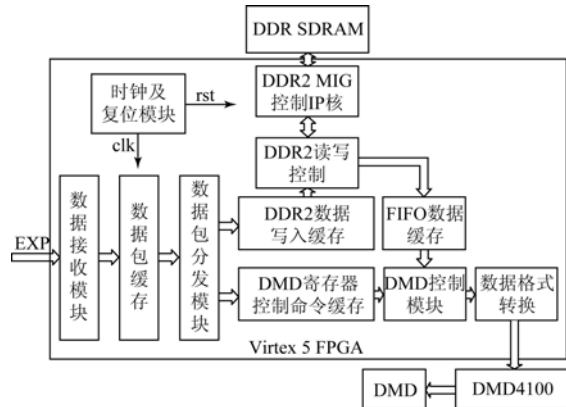


图 6 DMD 驱动控制总体模块

Fig. 6 Schematic diagram of DMD drive and control modules

### 3.4 系统核心模块

#### 3.4.1 数据接收及数据与子掩模关系

EXP 接口的数据接收和发送采用 16 通道、DDR 源同步差分低压信号。发送模块(TX)使用 16 对低压差分信号传送数据,一对低压差分信号驱动时钟。发送端的 16 个数据通道工作于 8:1 的并串变换。接收模块(RX)使用 16 对低压差分信号接收数据,一对低压差分信号源同步时钟输入。接收端的 16 个数据通道工作于 1:8 的串并变换。

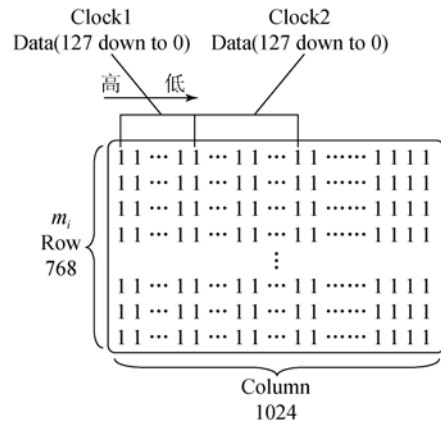


图 7 子掩模数据组织方式

Fig. 7 Data organization of sub-mask

数据接收模块接收的数据最终采用 128 位数据总线,数据的组织方式如图 7 所示。二进制子掩模按行相邻的 128 位二进制数据从左至右分别对应于 128 位数据总线的高低位,以此组织方式写入 DDR 缓存,最后在数据格式转换模块再次进行数据格式转换,最终将数据写入 DMD 的 SDRAM 内进行数据加载。

### 3.4.2 数据包分发模块

建立控制 DMD 的通信协议,其设计思想是外部输入数据与 DMD 之间进行点对点的传输,中途的介质不需要了解传输协议。

从外部接口传输到 DMD 的数据分为 2 种,一种是掩模数据,一种是对 DMD 寄存器的操作,分别把掩模数据和对 DMD 的操作看成是数据和指令。这 2 部分都是由 EXP 端口输入,并传输到 DMD 的缓存中,分别存在不同的位置。数据以数据块为单位存储,不同的数据块是变长的,指令是定长的。包定义如表 2 所示。

表 2 包定义

Tab. 2 Defination of package

字段	长度/bit	说明
包头	32	每个包的开始,0xFFFFFA501
序号	16	0~255 循环,识别包的连贯性
类型	8	01=读寄存器,02=写寄存器,03=写数据,04=返回值
优先级	8	00=普通,01=优先,02=极高
长度	32	数据的长度,以字节为单位
可变信息	32	根据类型字段决定此字段的内容
数据体	变长	根据类型字段决定此字段的内容

### 3.4.3 DDR 读写控制

DDR2 内存为图像数据的读写缓冲,相当于计算机显卡内存。该内存采用读优先,读写共享策略为 ring\_buffer,读写端数据分别为来自 EXP 图像及写入 DMD 的图像。

将 DDR2 分 8 个区,每个区域存一帧母掩模,共可存 8 帧母掩模,母掩模中的各个子掩模依顺序按地址增存于同一个区。读取数据时,依次读出,当读完一帧母掩模后,DDR 地址跳到下一帧母掩模存储区。

### 3.4.4 DMD 微镜翻转控制

#### 3.4.4.1 DMD 的主要操作步骤

(1)加载(Load):Load 就是将要显示的二进

制图像数据装载到 DMD 各微镜下对应的 CMOS 存储单元里。对 DMD 各微镜所对应的 CMOS 存储单元进行数据加载不会改变微镜的机械状态;但是新数据的加载会导致微镜发生很小角度的偏移,大概会使微镜偏转角度减小  $0.15^\circ$ ,这个微小的角度在正常偏转 ( $|12| \pm 1^\circ$ ) 所允许的偏差范围内。

(2)复位(Reset):为了使存储器装载后改变微镜的机械位置,必须给出复位信号。复位信号给出后,块区域中那些被改变了数据的像元所对应的微镜将反方向偏转,否则将保持不动。

(3)Mirror Settling Time:在全局复位模式下,当 DMD 正在复位时,不能立即进行数据装载。复位到可以进行数据装载的这段等待时间称作 Mirror Settling Time。

#### 3.4.4.2 DMD 复位控制

本高动态场景成像探测系统采用 0.7 XGA DMD,其  $1024 \times 768$  像素单元被划分为 16 块(16 Blocks),每块为  $1024 \times 48$ 。在块操作中,DMD 微镜和其所对应的 SRAM 被划分为不同块,这些 Block 被编址使其能够在 Block 控制信号下进行复位和清零操作。各个 Block 的复位和清零由 RST2BLKZ、dmd\_blk\_md(1:0)和 dmd\_blk\_ad(3:0)控制。RST2BLKZ 不适用于全局复位。此设计采用全局复位模式,所对应的 dmd\_blk\_md(1:0)与 dmd\_blk\_ad(3:0)分别为“11”、“1000”。全局复位模式下所有的块被绑定为一个组,然后一起复位,即所有的 DMD 存储器被装载后给出一个全局复位信号使微镜偏向所需要的状态。微镜复位操作的执行开始于对 dmd\_blk\_md(1:0)和 dmd\_blk\_ad(3:0)进行赋值,在很短的时间过后,DDC4100 将通过反馈给 FPGA 的信号 RST\_ACTIVE 变高并持续  $4.5 \mu\text{s}$  来标示 DMD 的复位过程。

微镜按照复位信号进行翻转,在复位信号过后的  $8 \mu\text{s}$  内属于微镜的不稳定时间,即 Mirror Settling Time。在这段时间内,被复位的 DMD 所对应的存储器内的数据不能改变,但其它块内的数据可以进行加载。此外,全局复位后必须加入 DMD NO-OP ROW CYCLE 来激活 RST\_ACTIVE 信号。

#### 3.4.4.3 DMD 行写入操作

当初始化完成,用户可以自由地写数据信息

到 DDC4100。当  $DVALID = 1$ ，DDC 开始对 LVDS 数据进行采样，同时把行地址信息传递给 DMD；当  $DVALID = 0$ ，DDC 停止加载数据和控制信息直到  $DVALID = 1$ 。对于 0.7 XGA DMD，每个时钟沿写入 32 bit 数据，共需 32 个时钟延写入一行数据 1 024 bit。

$dmd\_row\_md(1:0)$  决定行写入数据的行地址计数的工作模式， $dmd\_row\_ad(10:0)$  为写入的行地址信号， $dmd\_row\_md(1:0)$  和  $dmd\_row\_ad(10:0)$  必须和  $DVALID$  同步。DMD 的数据加载是以行为单位，行地址的操作同时依赖于 North/SouthFlip Flag (NS\_FLIP)。TI 的相关资料列出了  $dmd\_row\_md(1:0)$ 、 $dmd\_row\_ad(10:0)$  以及 North/SouthFlip Flag 的关系表，本设计采用  $N/S\ Flip\ Flag = 0$ 、 $dmd\_row\_md(1:0) = 10$  的模式。

#### 3.4.4.4 二进制子掩模数据加载控制

图 8 为 DMD 二进制子掩模数据加载和复位状态机。状态  $wait\_bmp\_frame$  触发 DDR 进入读取数据模式， $dmd\_row\_write$  每次向 DMD 写一行数据 (1 024 bit)；然后进入  $dmd\_load$ ，检测数据缓存 FIFO 是否存满一行数据 (1 024 bit)，若是则再次进入  $dmd\_row\_write$  向 DMD 写一行数据 (1 024 bit)，如此循环。每写一行数据则 DMD 行地址  $dmd\_row\_ad(10:0)$  加 1，当  $dmd\_row\_ad(10:0)$  大于 768 时，表示加载完一个子

帧数据，进入  $load\_error\_detect$ 。 $bin\_frame\_timer$  为子帧作用时间计数器，当子帧作用时间大于最小子帧作用时间  $43.22\ \mu s$  时，直接进入  $dmd\_grst$  进行全局复位；相反，则进入  $set\_pwm\_timer$ ，采用  $clear$  快速清屏方式来达到快速显示的目的。全局复位过后，不能立即加载数据，需要进入复位延时  $dmd\_grst\_delay$  进行  $12.5\ \mu s$  的延时等待。图 9 为一帧二进制子掩模数据的复位和行写入放大时序图。

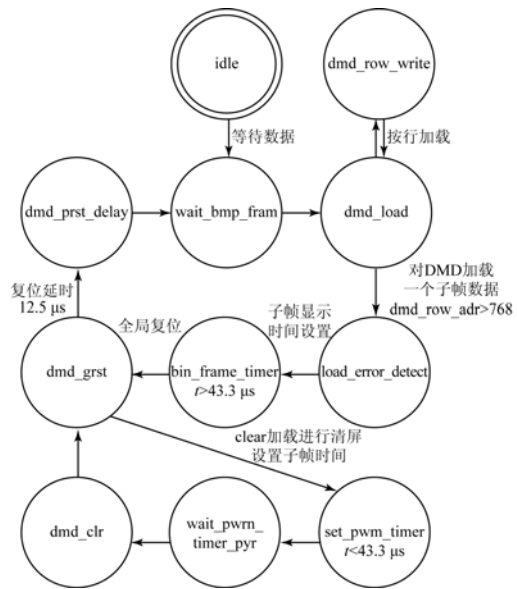


图 8 DMD 控制状态机

Fig. 8 DMD control state machine

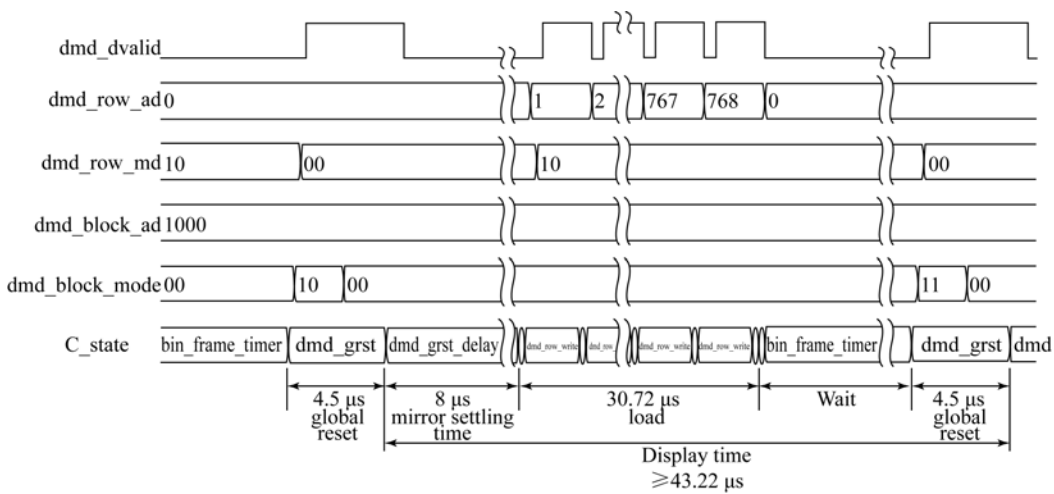


图 9 一帧二进制子掩模的放大时序图

Fig. 9 Sequence diagram of a binary sub-mask

### 4 原始场景数据恢复

根据图像传感器采集的图像数据  $E_{\text{sensor}}(x, y)$  和与其对应时刻的 DMD 调光权值  $r(x, y)$ , 可以恢复原始场景的图像数据。恢复的图像数据为:

$$P(x, y) = KE_{\text{sensor}}(x, y)/r(x, y) + C. \quad (4)$$

其中:  $K$  为校正系数,  $C$  为常量。

设 DMD 具有精确的光强控制等级, 即可不考虑光强控制权值  $r(x, y)$  的误差, 因此可视为通过图像传感器采集的图像数据  $E_{\text{sensor}}(x, y)$  来恢复原始场景图像数据, 则相对误差为:

$$\frac{\delta_P}{P} = \frac{dP}{P} = \frac{\frac{K/r(x, y)}{KE_{\text{sensor}}(x, y)/r(x, y) + C} dE_{\text{sensor}}(x, y)}{E_{\text{sensor}}(x, y) + \frac{C}{K}r(x, y)}. \quad (5)$$

当  $C=0$  时,

$$\frac{\delta_P}{P} = \frac{dE_{\text{sensor}}(x, y)}{E_{\text{sensor}}(x, y)} = \frac{\delta_{E_{\text{sensor}}}}{E_{\text{sensor}}}, \quad (6)$$

即此时的相对误差由图像传感器的相对误差决定。图像传感器采集的图像数据  $E_{\text{sensor}}$  越大, 误差越小。因此, 光强控制应尽量使图像传感器探测值靠近图像传感器的饱和阈值。

绝对误差为:

$$dP = dE_{\text{sensor}}(x, y) K/r(x, y). \quad (7)$$

随着调光权值的减小, 绝对误差增大。因此在光强一定的情况下, 尽量选取较大的调光权值, 以减小恢复图像数据的绝对误差。

### 5 实验验证

高动态场景成像探测系统中, DMD 选取 0.7 XGA, 其最小调光权值设为  $1/2048$ , 其它参数设置如表 1 所示, ISE 仿真波形如图 10 所示。图中 bin\_frame\_idx(3:0) 为子帧序列计数, bin\_frame\_timer\_over 为子帧作用时间计数器的触发信号, c\_state 为状态机, dmd\_blk\_md, dmd\_blk\_ad, dmd\_row\_md, dmd\_row\_ad 为复位和行写入操作控制信号。

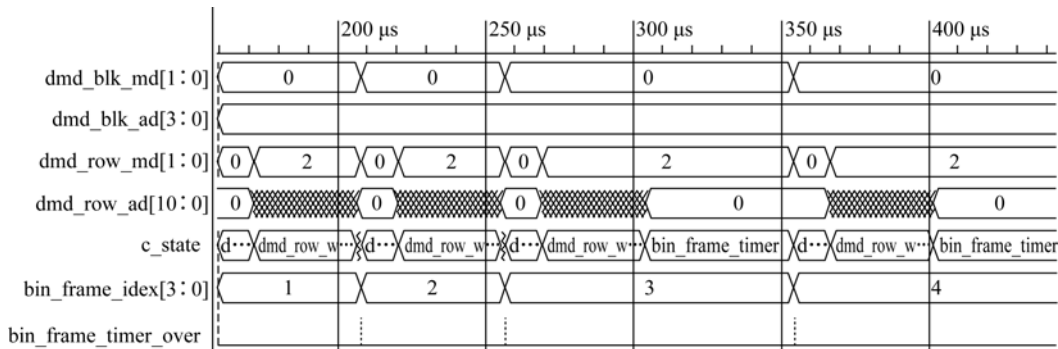


图 10 仿真时序图

Fig. 10 Diagram of intensity modulation timing

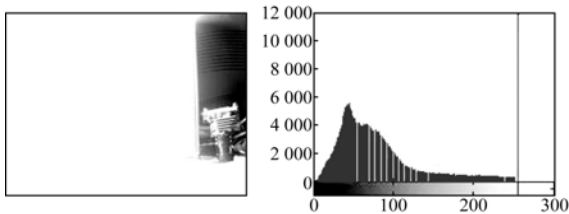
本实验系统的图像探测器采用 8 位 CCD。实验中, CCD 工作帧频与 DMD 母掩模帧频同步, 采用强光源照射视场局部区域, 以模拟出视场中同时存在亮暗目标的场景。实验结果如图 11 所示。

图 11(a) 为 DMD 微镜阵列处于全 ON 状态下 CCD 采集到的图像及其灰度直方图, 即此时 DMD 未对入射光线进行光强调制。由于强光源的区域照射导致部分场景成像饱和, 致使饱和区域的图像信息丢失。

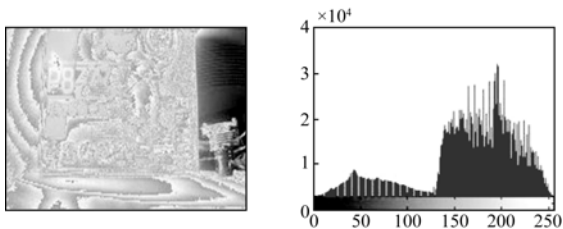
图 11(b) 为 DMD 对成像饱和区域进行像素级调光后 CCD 采集到的 8 位灰度图像及其灰度直方图。从灰度直方图可以看出, 经过 DMD 调光后, 所有饱和区域的像素值基本都被调节到 CCD 饱和自身较敏感的响应区域内, 即图像传感器的临界饱和值与  $1/2$  临界饱和值之间。

图 11(c) 为向 DMD 加载调光母掩模的图像, 母掩模为 12 位二进制控制数据。为便于展示, 本文只显示了高 8 位。

根据 CCD 采集的图像数据图 11(b)和 DMD 调光母掩模数据图 11(c)以及式(4),恢复原始场景数据。由于恢复后的图像数据为 19 位,为方便展示分别显示高 8 位和低 8 位,分别如图 11(d)和 11(e)(e 为部分区域)所示,图 11(f)为恢复后的高动态图像数据的灰度直方图。可以看出,恢复的图像数据弥补了由于 CCD 动态范围不足,强光成像中局部信息饱和丢失的部分,具有较好的成像质量,同时也保留了较暗目标区域的图像信息。从灰度直方图可以看出,恢复后的图像数据的动态范围与预期相符(在  $0 \sim 524\ 287$ ),实现了 CCD 成像系统 66 dB 的动态范围提升。



(a)DMD 全 ON 状态下 CCD 采集图像及其灰度直方图  
(a) Image captured by CCD with DMD in full ON mode and its histogram



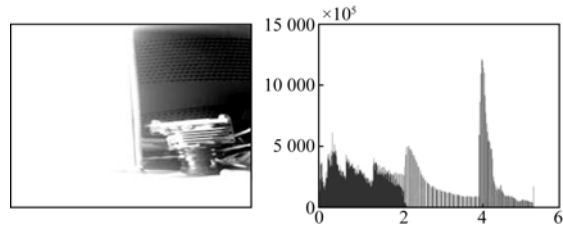
(b)区域调光后 CCD 采集图像及其灰度直方图  
(b) Image after area dimming and its histogram

## 参考文献:

- [1] 修吉宏,黄浦,李军,等. 大面阵彩色 CCD 航测相机的辐射定标[J]. 光学精密工程, 2012, 20(6): 1365-1373.  
XIU J H, HUANG P, LI J, *et al.*. Radiometric calibration of large area array color CCD aerial mapping camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(6):1365-1373. (in Chinese)
- [2] 冯奇斌,何会杰,张伟伟,等. 用于侧出式发光二



(c)DMD 加载的母掩模 高 8 位显示  
(d)恢复后的图像 高 8 位显示  
(c) Display of 8 upper bits of image with mask (d) Eight upper bits of image after retrieval



(e)恢复后的图像低 8 位显示 (f)恢复图像灰度直方图  
(e)Eight lower bits of image after retrieval (f)Histogram of retrieval image

图 11 测试结果

Fig. 11 Test results

## 6 结 论

DMD 数字微镜阵列的反射优势使它具有较高的光效率,另外它还具有区域控制灵活、可靠性高、光强调节等级精确以及响应快速等优势,但其控制具有一定的复杂性。本文从系统总体模块结构到具体实现,仔细分析了 DMD 在高动态场景成像探测系统中的驱动控制方法,将成像系统动态范围提高了 66 dB,并结合实验验证了 DMD 驱动的正确性。若光电成像设备采用 11 位高灵敏高动态科学级图像传感器,则系统的动态范围可达 130 dB 以上。

极管背光的全局动态调光算法[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7):1455-1462.

FENG Q B, HE H J, ZHANG W W, *et al.*. Global dimming algorithm for side-lit LED backlights [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1455-1462. (in Chinese)

[3] 张雷,丁亚林,张洪文,等. 基于单帘快门的数字相机调光系统[J]. 光学精密工程, 2013, 5(21): 1265-1271.

ZHANG L, DING Y D, ZHANG H W, *et al.*. Adjustable exposure system for digital camera based

- on signal curtain type shutter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 5(21):1265-1271. (in Chinese)
- [4] 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 Y Z, YANG L. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on DMD [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(2):245-248. (in Chinese)
- [5] 党东妮,季轶群,沈为民. 宽波段 DMD 动态红外景象仿真器投影光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4):1017-1021.  
DANG D N, JI Y Q, SHEN W M. Projection lens design of wide band dynamic infrared scene simulator with digital micromirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 1017-1021. (in Chinese)
- [6] 贾辛,廖志杰,邢廷文,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, 4(37):692-696.  
JIA X, LIAO ZH J, XING T W, *et al.*. Optical system design of dynamic infrared scene projector based on digital-micromirror device[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 4(37):692-696. (in Chinese)
- [7] ZORZOS A N, SCHOLVIN J, BOYDEN E S, *et al.*. Three-dimensional multiwaveguide probe array for light delivery to distributed brain circuits [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(23):4841-4843.
- [8] DUPUIS J R, MANSUR D J, VAILLANCOURT R, *et al.*. High-dynamic range DMD-based IR scene projector [J]. *SPIE*, 2013, 8618:86180R-86180R-9.
- [9] QIBIN F, HAO T, TAO L, *et al.*. Single-DMD based solid-state volumetric true 3D display [C]. *International Conference on Audio Language and Image Processing (ICALIP)*, IEEE, 2010: 552-556.
- [10] 罗通顶,李斌康,郭明安,等. 科学级 CCD 远程图像采集系统[J]. *光学精密工程*, 2013, 2(21): 496-502.  
LUO T D, LI B K, GUO M A, *et al.*. Remote image acquisition system with scientific grade CCD [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 2(21):496-502. (in Chinese)
- [11] 许文海,吴厚德. 超高分辨率 CCD 成像系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(7):1603-1610.  
XU W H, WU H D. Design of ultra-high resolution CCD imaging systems [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7):1603-1610. (in Chinese)

#### 作者简介:



陈怀章(1988—),男,四川南充人,硕士研究生,主要从事高动态图像数据探测的研究。E-mail:294403707@qq.com

#### 导师简介:



王延杰(1963—),男,吉林长春人,博士生导师,研究员,主要从事实时图像处理方面的研究。E-mail:wyjciomp@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)