

## 红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验技术研究

许振领<sup>1,2</sup>, 杨淼淼<sup>1,2</sup>, 王 敏<sup>1,2</sup>, 刘连伟<sup>1,2</sup>, 郭正红<sup>1,2</sup>

- (1. 洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003;
2. 光电对抗测试评估技术重点实验室, 河南 洛阳 471003)

**摘要:** 介绍了基于 DMD 红外动态场景投射器的红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验系统。分析了 DMD 场景投射器成像原理, 研究了其与被测系统光学匹配条件及调整方法。分析了 DMD 场景投射器灰度等级调制原理, 研究了其与被测系统信号同步条件及调整方法, 并对信号同步过程中可能出现的现象进行了分析。分析了影响 DMD 场景投射器至被测系统探测器能量传输的主要因素, 研究了 DMD 场景投射器辐射特性定标方法、及与被测系统能量匹配方法。利用所设计的仿真试验系统及试验方法, 针对某型红外捕获跟踪设备开展了辐射式仿真实验, 对被测系统部分性能指标进行了初步的考核。

**关键词:** DMD 红外动态场景投射器; 辐射式仿真; 光学匹配; 同步; 定标

**中图分类号:** TN216; V448.15 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S104003

## Radiation simulation technology for IR capture and tracking device

Xu Zhenling<sup>1,2</sup>, Yang Miaomiao<sup>1,2</sup>, Wang Min<sup>1,2</sup>, Liu Lianwei<sup>1,2</sup>, Guo Zhenghong<sup>1,2</sup>

- (1. Luoyang Electronic Equipment Test Center of China, Luoyang 471003, China;
2. Laboratory of Electro-Optical Countermeasures Test & Evaluation Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** The radiation simulation system for IR acquisition and tracking device were introduced based on the DMD dynamic infrared scene projector. The optical principle of the DMD projector was introduced. The requirements and methods of the optical matching between the DMD projector and system under tested were analyzed. The time modulation of the DMD projector was introduced, and the requirements and methods of the synchronization between the DMD projector and system under tested were analyzed. The factors which influence on the energy transmission between DMD projector and system under tested were analyzed, and the methods of calibration and energy matching between DMD projector and system under tested were analyzed. The experiments were carried out for certain IR acquisition and tracking device using the simulation system, and some performance of the device were simply assessed.

**Key words:** DMD infrared dynamic scene projector; radiation simulation; optical matching; synchronization; calibration

收稿日期: 2016-01-10; 修订日期: 2016-02-15

作者简介: 许振领(1985-), 男, 硕士, 主要从事光电对抗及光电对抗仿真技术方面的研究。Email: xuzhenling@163.com

## 0 引言

红外捕获跟踪设备具有跟踪精度高、可昼夜工作等优点,被广泛应用于激光定向干扰系统等光电对抗装备<sup>[1]</sup>,红外捕获跟踪设备的性能指标直接影响光电对抗装备的作战效能。目前,红外捕获跟踪设备性能指标检测方法主要有光学动态靶标检测、实装飞行试验及半实物仿真试验等。半实物仿真试验具有态势想定灵活、易于实施边界能力考核及试验消耗低等优势<sup>[2]</sup>,可在红外捕获跟踪设备性能指标的考核评估中发挥重要的作用。根据仿真图像信号介入形式的不同,半实物仿真试验可分为注入式和辐射式两种试验模式。在进行辐射式仿真试验时,由于红外捕获跟踪设备具有较大的体积和回转半径,难以将场景投射器安装于两轴转台上跟随红外捕获跟踪设备成像系统(以下简称被测系统)运动,无法开展严格意义上的闭环辐射式仿真试验。但被测系统视场一般较小,可利用较大视场的场景投射器模拟一定空域内的场景,使被测系统对该空域内的目标进行闭环捕获与跟踪,从而对被测系统性能指标进行考核。

文中介绍了红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验系统组成,分析了红外图像仿真计算机、DMD 红外动态场景投射器等仿真试验系统关键器件的工作原理。基于 DMD 场景投射器成像原理,研究了 DMD 场景投射器与被测系统光学匹配原理、光学匹配条件及光学匹配方法。基于 DMD 场景投射器信号调制原理,研究了 DMD 场景投射器与被测系统信号同步条件及调整方法,并对信号同步过程中可能出现的现象进行了深入分析。基于 DMD 场景投射器能量调制原理,分析了 DMD 场景投射器至被测系统探测器的能量传输过程,研究了 DMD 场景投射器辐射特性定标方法及黑体温度设置方法。结合某型红外捕获跟踪设备试验任务,开展了辐射式仿真试验,对其部分性能指标进行了考核。

## 1 辐射式仿真试验系统

红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验系统主要由红外图像仿真计算机、图像注入接口设备、DMD 红外动态场景投射器及六维调整架等设备组成,如图 1 所示。

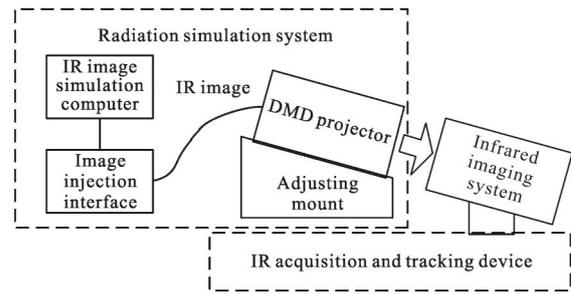


图 1 辐射式仿真试验系统组成

Fig. 1 Component of the radiation simulation system

红外图像仿真计算机用于红外数字图像的仿真,主要由战情规划模块、目标几何与红外辐射特性模型、大气传输模型、背景红外辐射特性模型及图像仿真软件等组成。由于 DMD 场景投射器不跟随被测系统运动,可采用预先生成的方式进行图像仿真。首先,根据装备和作战对象战术使用规则,利用战情规划模块想定气象条件、目标运动轨迹等战情参数。其次,根据战情想定参数、DMD 场景投射器参数,利用图像仿真软件及相关模型,对战情想定空域内的场景进行仿真,生成场景红外数字图像。最后,利用图像注入接口设备将红外数字图像发送到 DMD 场景投射器进行试验。

DMD 红外动态场景投射器用于将红外数字图像转换为红外辐射信号,并投射到被测系统<sup>[3-4]</sup>。主要由 DMD 阵列、视频处理电路、同步电路、DMD 驱动电路、照明黑体(包括高温黑体和低温黑体)、照明光学系统和准直光学系统等组成。视频处理电路用于接收红外图像仿真计算机发送的红外数字图像,并转换为 DMD 驱动电路所需格式;照明光学系统收集黑体的辐射能量,并汇聚到 DMD 器件上;同步电路接收外同步信号,延时一定时间后,触发 DMD 驱动电路工作;DMD 驱动电路在同步电路的控制下,根据仿真图像的灰度值,通过控制 DMD 阵列各微镜反射高温黑体和低温黑体的时间占空比,实现辐射场的空间和能量调制;准直光学系统将经过 DMD 器件调制的辐射信号投射到被测系统入瞳处。

## 2 DMD 场景投射器与被测系统光学匹配方法

为了保证被测系统探测器接收到的辐射信号全部来自于 DMD 阵列,需要保证场景投射器光学系统参数及位置与被测系统相匹配。DMD 场景投射器

辐射信号光路如图 2 所示,图中阴影区域为场景投射器辐射信号的均匀区域, $D$ 、 $d$ 、 $\omega$  分别为场景投射器出瞳直径、出瞳距和视场角, $D'$ 、 $\omega'$  分别为红外成像系统入瞳直径、视场角, $L$  为被测系统的回转半径。

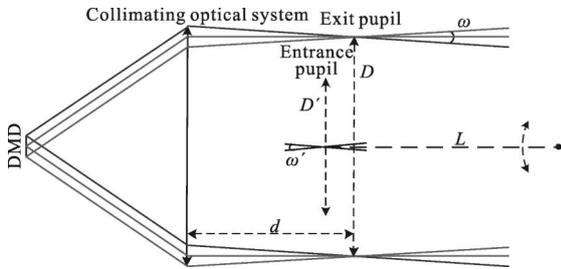


图 2 光学匹配原理图

Fig.2 Illumination of optical matching principle

由图 2 可见,为了使被测系统探测器接收的辐射信号全部来自于 DMD 阵列,需要满足以下条件:

(1)光瞳匹配,DMD 场景投射器出瞳大于被测系统入瞳,且满足公式(1)要求,以保证被测系统在预定空域转动时,场景投射器辐射均匀区完全覆盖被测系统入瞳。

$$D > D' + L \cdot \tan(\omega - \omega') \quad (1)$$

(2)视场匹配,在 DMD 场景投射器视场大于被测系统视场的条件下,使场景投射器视场完全覆盖被测系统视场、且被测系统探测器阵列方位、俯仰方向与 DMD 阵列方位、俯仰平行;

(3)分辨率匹配,模拟器角度分辨率小于被测系统角度分辨率,根据尼奎斯特采样定律,一般要求模拟器角度分辨率小于被测系统角度分辨率的一半。

在调整 DMD 场景投射器与被测系统光学匹配时,将 DMD 场景投射器放置于可调节前后、左右、上下、方位、俯仰、滚转的六维调整架上。利用红外图像仿真计算机生成一幅带有横向、竖向标志的图像,其中标志区外的灰度均匀分布,并发送给 DMD 场景投射器。逐渐调整场景投射器相对于被测系统的位置及方位俯仰角度,使被测系统能够探测到场景投射器调制产生的图像信号,直至被测系统输出图像中标志区域外的部分最亮、且最均匀。最后,逐渐调整场景投射器相对于被测系统的滚转角,当探测器横向、竖向视场边缘分别与场景投射器辐射图像横向、竖向标志线平行时,则被测系统与场景投射器处于最佳光学匹配状态,如图 3 所示。

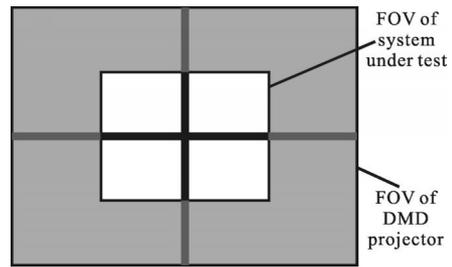


图 3 光学匹配示意图

Fig.3 Illumination of optical matching

### 3 DMD 场景投射器与被测系统信号同步方法

由于被测系统探测器只能有效探测积分时间内的辐射信号,需要使 DMD 场景投射器在被测系统探测器积分时间内完成灰度等级的调制。DMD 场景投射器一般采用二进制脉宽调制法(PWM)进行灰度等级调制,即将图像调制时间划分为若干个二进制时间间隔,根据输入图像灰度值对应的二进制数,控制微镜在各时间段的偏转状态,从而实现灰度等级的调制。为了使 DMD 场景投射器与被测系统信号同步,需要满足以下条件:

(1)帧频同步,即 DMD 场景投射器帧频与被测系统帧频相同;

(2)调制时间与积分时间同步,即 DMD 场景投射器图像调制时间小于被测系统积分时间,且在被测系统积分时间内完成图像调制<sup>[5]</sup>,如图 4 所示。若场景投射器调制时间大于积分时间,需要降低场景投射器灰度等级,以使其调制时间小于被测系统积分时间。

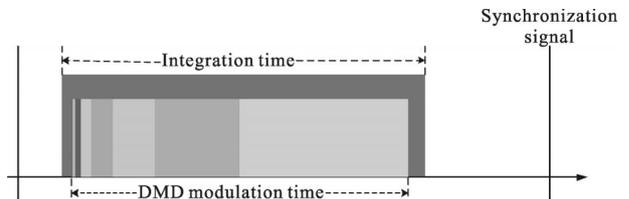


图 4 信号同步原理图

Fig.4 Signal of synchronization principle

在调整 DMD 场景投射器与被测系统信号同步时,首先,利用红外图像仿真计算机生成一幅灰度渐变的图像,如图 5(a)所示,并发送给 DMD 场景投射器。其次,从被测系统提取探测器帧同步信号,并触发 DMD 场景投射器工作,使二者帧频相同。然后,

逐渐调整场景投射器图像开始调制时刻与帧同步信号之间的相位,若场景投射器开始调制时刻超前于被测系统开始积分时刻,则被测系统不能探测场景投射器低位调制光信号,导致实际探测图像的灰度级呈“阶梯”变化<sup>[6]</sup>,如图 5(b)所示;若场景投射器结束调制时刻滞后于被测系统结束积分时刻,则被测系统不能探测场景投射器高位调制光信号,导致被测系统探测的灰度级出现“逆转”现象,如图 5(c)所示。只有场景投射器调制时间完全处于被测系统积分时间内时,才能使被测系统完全接收场景投射器调制产生的辐射信号,从而保证探测图像的正确性,如图 5(d)所示。

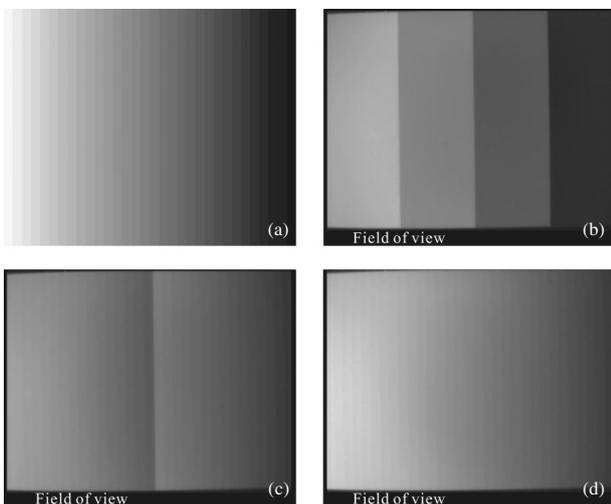


图 5 信号同步原理图

Fig.5 Signal of signal synchronization principle

#### 4 DMD 场景投射器与被测系统能量匹配方法

为了保证被测系统探测图像与仿真图像辐射亮度一致,需要调整 DMD 场景投射器与被测系统能量匹配。根据 DMD 场景投射器灰度等级调制及能量传输原理,在光学匹配、信号同步的条件下,DMD 场景投射器在被测系统探测器上产生的辐照度为:

$$E = \frac{K \cdot (\tau_1 \cdot t_1 \cdot L_1 + (t_2 - \tau \cdot t_1) \cdot L_0)}{t_2} = \left( \tau \cdot \frac{t_1}{t_2} (L_1 - L_0) + L_0 \right) \quad (2)$$

式中: $\tau$  为场景投射器调制时间内 DMD 处于开态的时间占比,即仿真图像灰度值与总灰度值的比值; $L_0$ 、 $L_1$  分别为场景投射器低温黑体亮度和高温黑体亮度; $t_1$ 、 $t_2$  分别为场景投射器总调制时间、被测系统

积分时间; $K$  为场景投射器的能量转换效率,与场景投射器光学系统透过率、DMD 阵列反射率、被测系统透过率等因素相关,当场景投射器和被测系统参数确定后, $K$  值为常数。可见,当黑体温度、总调制时间及积分时间一定时,场景投射器辐射图像的亮度与输入图像灰度值呈线性关系。

在调整 DMD 场景投射器与被测系统能量匹配时,首先,需要对不同黑体温度下场景投射器的辐射特性进行标定。利用红外图像仿真计算机向场景投射器循环发送灰度依次为 0、1、...、 $N$ (场景投射器最大灰度值)的均匀图像,使被测系统探测场景投射器输出的辐射信号,利用被测系统定标系数,得到场景投射器辐射图像亮度值,并根据相应输入图像的灰度值,得到场景投射器辐射图像亮度与输入图像灰度之间的转换系数。

其次,根据仿真图像亮度范围、被测系统亮度范围,确定 DMD 场景投射器黑体温度值。在理想情况下,设置合适的场景投射器黑体温度,使场景投射器辐射亮度范围略大于仿真图像亮度范围,以保证图像不失真的情况下,尽量获得较好的层次感。但受限于 DMD 场景投射器性能,其最小模拟温度一般较大,很难准确模拟较低温度的天空背景。由于红外捕获跟踪设备一般基于目标与背景的亮度差进行目标识别,因此,可利用场景投射器等效模拟目标与背景的亮度差,即将仿真图像亮度整体叠加一定的亮度值,使其亮度范围与某黑体温度下场景投射器的亮度范围吻合,如图 6 所示。图中  $L_{D1}(T_i)$ 、 $L_{D2}(T_i)$  是场景投射器在  $T_i$  黑体温度下辐射亮度的最小和最大值,  $L_{S1}$ 、 $L_{S2}$  为仿真图像亮度的最小和最大值,  $L_{S1}'$ 、 $L_{S2}'$  为

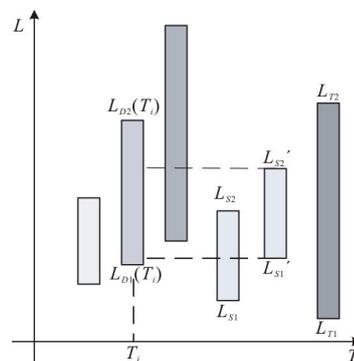


图 6 能量匹配示意图

Fig.6 Illumination of energy matching

等效处理后仿真图像亮度的最小和最大值,  $L_{n1}$ 、 $L_{n2}$  为被测系统亮度范围的最小值和最大值。

最后, 利用场景投射器辐射图像亮度与输入图像灰度之间的转换系数, 将图像仿真计算机生成的仿真亮度图像转换为灰度图像, 利用图像注入接口设备将灰度图像发送到场景投射器, 从而驱动场景投射器完成图像调制。

### 5 辐射式仿真试验

结合某型红外捕获跟踪设备试验任务, 开展了红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验, 对红外捕获跟踪多目标处理能力、弹机分离识别能力、跟踪精度等性能指标进行了初步的考核。

由于红外捕获跟踪设备作战对象一般迎头逼近飞行, 其俯仰视线角变化范围较大, 而方位视线角变化范围较小。为模拟更大范围的场景, 在试验时, 将 DMD 场景投射器侧向放置, 使其较大的视场模拟目标的俯仰运动。

为了保证仿真试验过程中, 场景投射器的视场完全覆盖被测系统视场, 在进行战情设计时, 需要根据试验项目特点, 合理设计目标运动航迹, 在保证有效考核被测系统性能指标的前提下, 使每次试验中目标的方位、俯仰角运动范围小于场景投射器方位、俯仰视场与被测系统方位、俯仰视之差, 如图 7 所示。图中  $A$ 、 $E$  为目标方位、俯仰视线角变化范围,  $A_0$ 、 $E_0$  为目标运动过程中的中心方位、俯仰视线角,  $A_D$ 、 $E_D$  为场景投射器方位、俯仰视场角,  $A_T$ 、 $E_T$  为被测系统方位、俯仰视场角。

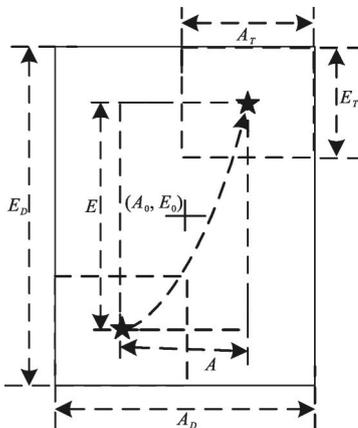


图 7 目标航迹规划示意图

Fig.7 Schematic diagram of target trajectory planning

在进行图像仿真时, 根据战情想定的相关参数, 利用红外图像仿真计算机预先生成场景红外亮度图像, 使仿真图像中心方位、俯仰角度值与目标运动过程中的中心方位、俯仰视线角相同; 合理设置场景投射器的黑体温度, 利用该温度下的定标结果, 将仿真亮度图转换为灰度图像。

在进行仿真试验时, 将被测系统光轴预置于目标运动过程中的中心方位、俯仰视线角度, 调整 DMD 场景投射器与被测系统光学匹配、信号同步、能量匹配, 使场景投射器光轴与被测系统光轴重合, 以保证场景投射器模拟的空域范围与战情想定的空域范围相同。利用图像注入接口设备将仿真图像发送到场景投射器, 操控红外捕获跟踪设备对模拟场景中的目标进行捕获跟踪。

图 8 为辐射式仿真试验过程中, 红外捕获跟踪设备视频截图。其中图 8(a)、(b) 分别为跟踪精度、多目标处理能力试验截图, 图 8(c)、(d) 为弹机分离识别能力试验截图。在辐射式仿真试验过程中, 被测系统能够对场景投射器辐射场景中的目标进行捕获、稳定跟踪, 且能够在不同目标之间来回切换。试验结果表明, 利用所设计的辐射式仿真试验系统和试验方法, 能够为红外捕获跟踪设备提供逼真的战场环境, 从而对其性能指标进行有效的考核。

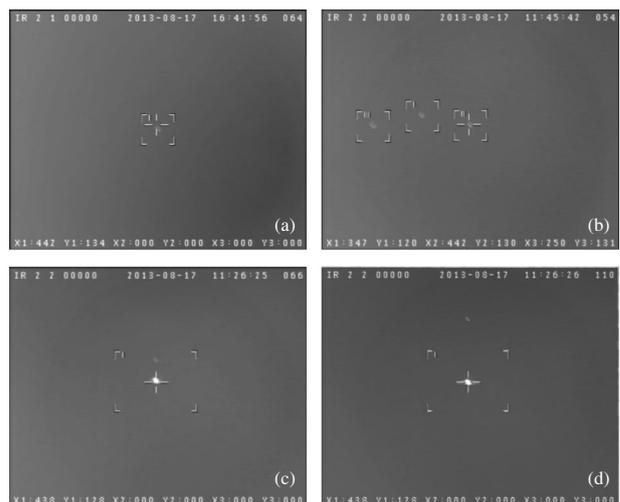


图 8 辐射式仿真试验截图

Fig.8 Screenshots of the radiation simulation result

### 6 结论

文中基于 DMD 红外动态场景投射器, 搭建了红

外捕获跟踪设备辐射式仿真试验系统,研究了 DMD 场景投射器与被测系统光学匹配、信号同步及能量匹配等辐射式仿真试验关键技术,并对场景投射器与被测系统匹配过程中可能出现的现象进行了深入分析。根据 DMD 场景投射器性能特点,合理设计了红外捕获跟踪设备辐射式仿真试验方案,针对某型红外捕获跟踪设备开展了多目标处理能力、弹机分离识别能力、跟踪精度等试验项目,结果表明,利用所设计的试验系统和试验方法能够对红外捕获跟踪设备的相关性能指标进行考核。

#### 参考文献:

- [1] Ma Jianguang. The technology of acquisition tracking and pointing system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1989, 3(2): 1-42. (in Chinese)
- [2] Wu Junhui, Zhu Zhen. Study on loop-locked IR capturing and tracking simulation based on digital image injection[J]. *Journal of System Simulation*, 2004, 16(9): 2067-2070. (in Chinese)
- [3] 吴军辉, 朱震. 数字图像注入式红外捕获跟踪闭环仿真试验探讨[J]. *系统仿真学报*, 2004, 16(9): 2067-2070.
- [4] D Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Advancements in the micromirror array projector technology II [C]//SPIE, 2005, 5785: 68-79.
- [5] D Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]//SPIE, 2009, 7210: 72100I/1-72100I/12.
- [6] Xu Zhenling, Yang Miaomiao. Time performance measurements of DMD-based dynamic infrared scene projector[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 417-423. (in Chinese)
- [7] 许振领, 杨淼淼. 基于 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.
- [8] Kang Weimin, Li Yanbin, Gao Weizhi. Dynamic IR scene projector using a digital micro-mirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(5): 753-756. (in Chinese)