

文章编号: 1672-8785(2022)02-0007-08

国外半实物仿真红外多波段 目标模拟技术综述

郝燕云¹ 赵松庆^{1,2}

(1. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009;

2. 航空制导武器航空科技重点实验室, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 为了准确地对红外多波段成像制导武器作出评估, 红外多波段目标模拟技术成为国内外的研究热点。从系统组成、工作原理、技术指标和特点等方面, 详细介绍了国外半实物仿真红外多波段目标模拟系统近年来的发展状况。这对后续国内红外多波段目标模拟技术的发展具有一定的参考借鉴意义。

关键词: 半实物仿真; 红外; 多波段; 目标模拟

中图分类号: TJ **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.02.002

Overview of Hardware-in-the-loop Infrared Multi-band Target Simulation Technologies Abroad

HAO Yan-yun¹, ZHAO Song-qing^{1,2}

(1. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Airborne Guided Weapons, Luoyang 471009, China)

Abstract: In order to evaluate the infrared multi-band imaging-guided weapon accurately, the infrared multi-band target simulation technology has become a research hotspot at home and abroad. In this paper, the development status of hardware-in-the-loop infrared multi-band target simulation system abroad in recent years is introduced in detail from the aspects of the composition, working principle, technical indicators and characteristics, which has a certain reference significance for the subsequent development of the domestic infrared multi-band target simulation technology.

Key words: hardware-in-the-loop simulation; infrared; multi-band; target simulation

0 引言

随着光电对抗技术的发展, 战场环境日益复杂。单波段红外成像制导武器系统受到红外多点源干扰、面源干扰等多种新型干扰的挑

战, 命中概率也受到了严重影响。基于技术发展的需求和新武器装备的牵引, 目前国内外都在开展红外多波段成像制导技术研究, 即通过导弹对目标环境多波段特性的识别来实现对多

收稿日期: 2021-08-21

作者简介: 郝燕云(1991-), 女, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事红外目标与环境特性半实物仿真研究。

E-mail: haoyanyun93@163.com

种红外干扰的对抗^[1]。

半实物仿真在武器研制过程中具有重要作用,能够准确地对制导武器进行性能评估和验证。目标模拟系统是其核心之一^[2]。因此,红外多波段成像目标模拟技术成为国内外的研究热点。

国外对红外多波段成像目标模拟器技术的研究起步较早。早在 20 世纪 60 年代,美国红石基地陆军防空司令部高级仿真中心就研制了红外多波段半实物仿真系统。经过多年的发展,包括美国在内的多个国家相继对红外多波段目标模拟系统进行了深入研究,并取得了重大进步。其中具有代表性的研究中心包括法国国防部导弹与导航评估中心、德国国防部电子与通信技术研究机构以及美国空军电子战评估仿真中心等。

1 美国红石基地陆军防空司令部高级仿真中心

20 世纪 60 年代,美国红石基地陆军防空司令部高级仿真中心研制了一套红外多波段半实物仿真系统(结构及光路原理见图 1)^[3]。该系统在一个单轴转台上放置多个目标形体模拟子单元,使其分别模拟尾喷口、尾气流、太阳等。每个模拟子单元以超高压短弧氙灯为辐射源,照亮用于模拟目标与环境特征部位形体的特殊形状的光阑片。经光学准直系统准直形成

的平行光束,被二自由度平面反射镜反射至球面准直镜,然后聚焦成像在微坑镜表面上。目标干扰场景在这里进行图像融合。经这块特殊的反光镜反射后,被球面反射镜准直形成的平行光束最终经平面镜视线运动系统射入武器系统入瞳^[3]。

这种系统的建造时间比较早,当时既没有电阻阵列,也没有数字微镜阵列(Digital Micromirror Device, DMD)和 Bly Cell 薄膜阵列动态红外图像生成装置,而是采用多套高温灯和平行光管组成的目标特征部位模拟单元来进行图像复合,因此不能模拟机身和面干扰特性^[3]。

2 法国国防部导弹与导航评估中心

2001 年,法国国防部导弹与导航评估中心研制了一种基于低成本高分辨率 Bly Cell 薄膜图像转换器的红外多波段半实物仿真系统^[4]。该系统采用薄膜图像转换器和包含两个 1900℃ 高温黑体的光机组件来模拟空中目标。其中,薄膜图像转换器(后改用 MOS 电阻阵列)用于模拟空中目标机身(最高温度为 115℃);包含两个高温黑体的光机组件分别用于模拟尾喷口和尾气流。图 2 为空中目标投影系统的实物图。图 3 为该系统生成的空中目标红外辐射图像。这种系统可以绝对地模拟机身、尾喷口和尾气流波段辐射特性,但不能模拟诱饵干扰^[4]。

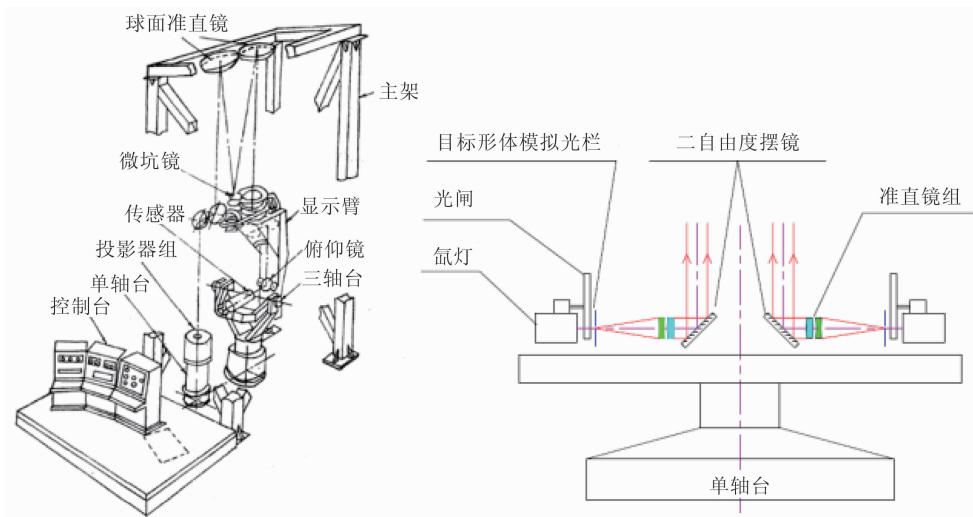
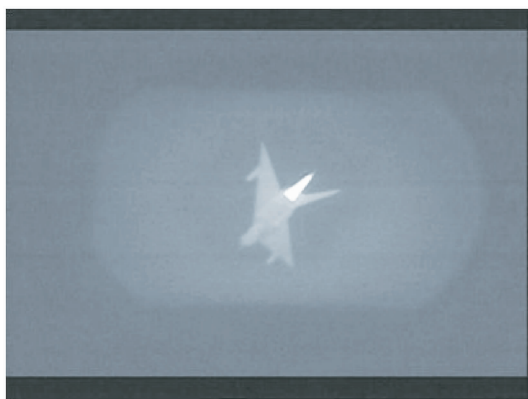


图 1 美国高级仿真中心的红外多波段仿真系统的结构及光路示意图^[3]

图 2 法国国防部空中目标投影系统的实物图^[4]图 3 生成的空中目标红外辐射图像^[4]图 4 德国国防部建成的基于球形屏幕的半实物仿真系统^[5]

3 德国国防部电子与通信技术研究机构

2004 年, 德国国防部电子与通信技术研究机构建成世界上最大的基于先进圆顶的半实物仿真系统(见图 4)。建筑直径为 50 m, 目标模拟系统包括一块 2200 m² 大小的特殊屏幕表面、一个直径为 40 m 的圆顶和若干高分辨率多波段红外/可见光景像投影系统, 能够模拟 500~5000 m 的具有可见光/红外特性的典型飞行器及诱饵干扰^[5]。

图 5 为球形大屏幕金属支架安装实物图及反射屏元件局部放大图。反射屏元件共超过 80000 块, 是组成屏幕表面的六边形和五边形微镜元素。其中包含 200 种不同的形状, 以确保球形圆顶的几何完整性和一个无缝的表面。每一组件都经过规定的反射和均匀性测试, 并都有各自的测试要求和位置编号。该工程采用了许多特殊的生产和安装技术, 每一个六边形、五边形组件都可以被单独替换^[5]。

在反射屏元件表面印制有特殊的微镜

单元图案, 屏幕材料的反射特性在可见光与红外波段有明显的区别。屏幕表面的理论像素分辨率优于 2 mm, 反射率高于 99%; 在视角锥范围内反射率保持恒定, 大于 20%^[5]。

目标模拟子系统被安装在二自由度转台上(见图 6)。生成的红外动态场景投射到球面反射屏幕表面, 经过反射后被位于球面反射屏幕球心的导弹武器系统接收。图 7 为目标投影系统的实物图^[5]。

目标投影系统包括:

(1) 一个可见光定焦投影系统(可电动变焦, 具有 3000 lm 的亮度)。

(2) 三个 10 μm 高能量可变焦激光点投影系统。动态范围为 1:1000, 可伺服控制光束偏转 20°。这些投影系统照亮目标形体上的点, 或者在实时控制下扮演从目标上分离的火球。这些投影系统的功率足够模拟 500 m 距离上温度达 1000℃ 的 10 μm 目标。

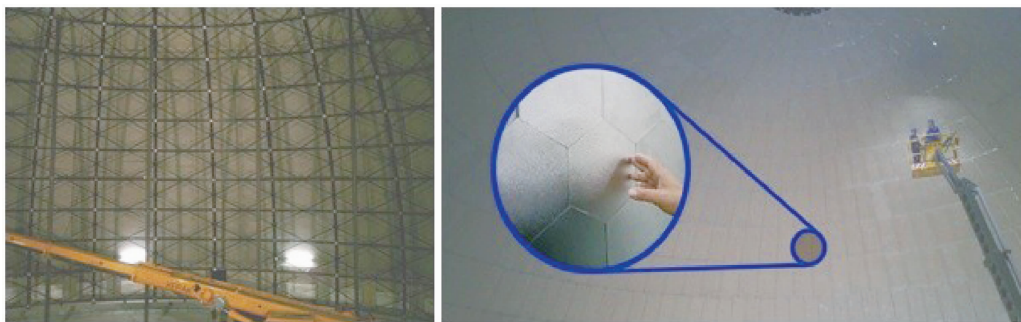


图 5 金属支架安装实物图及反射屏元件局部放大图^[5]



图 6 二自由度转台上的目标模拟器实物前后向图片^[5]

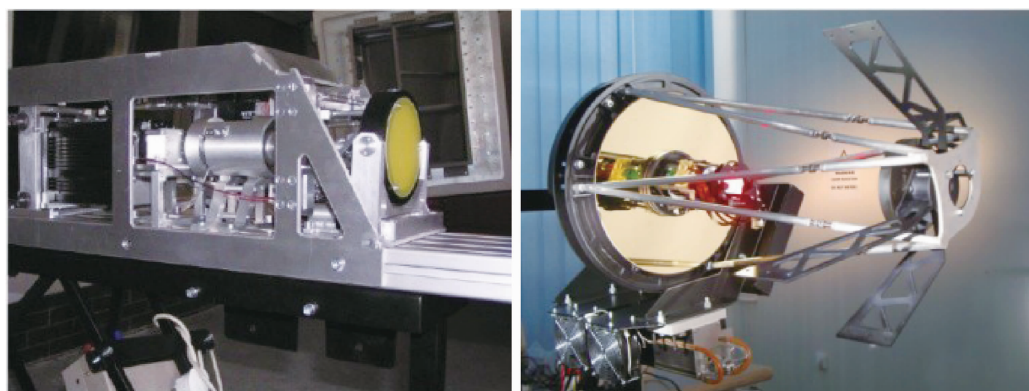


图 7 10 μm 高能量激光点投影系统和 3~5 μm 阵列投影系统^[5]

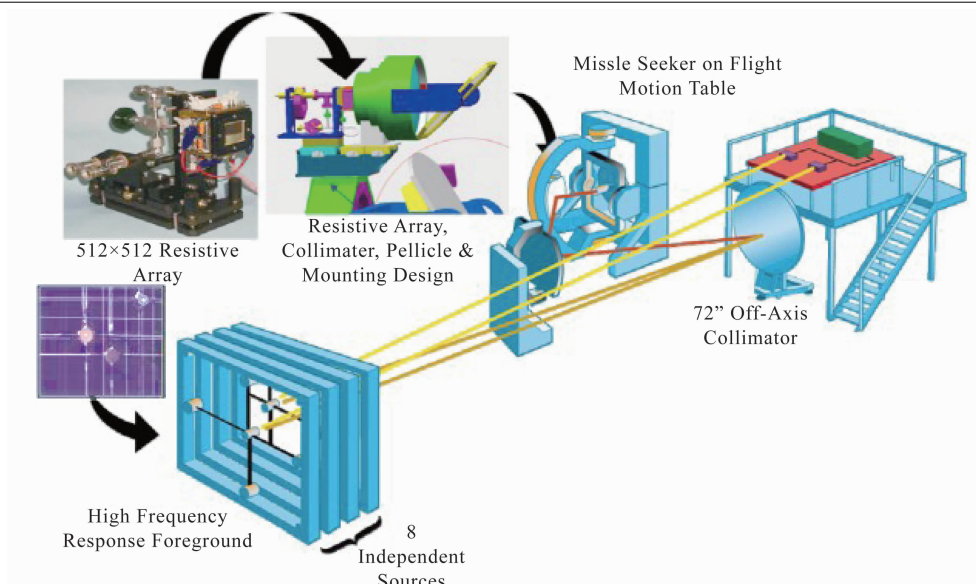
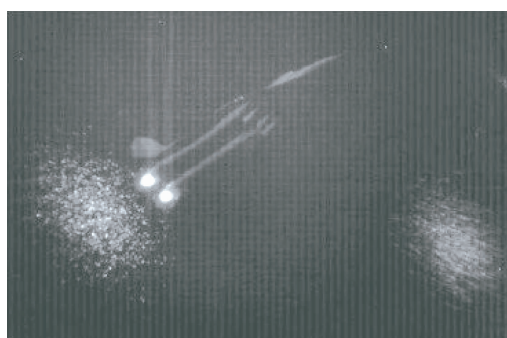
(3)一个可缩放、变焦、动态亮度控制的电阻阵(3~5 μm)。它可以线扫和快闪产生目标的形状,并可将其叠加在其他投影的图像上,还可以在 1000 m 距离上模拟 100℃ 的温度。

这种系统以球面反射屏幕为基础,用电阻阵列模拟 3~5 μm 目标形体,用长波激光束模拟诱饵干扰和机身特征部位,并用二自由度目标视线转台来配合球形反射屏幕,从而模拟目标视线运动。该系统不受目标模拟

器重量的限制,扩充能力较强^[5]。

4 美国空军电子战评估仿真中心

2008 年,美国空军电子战评估仿真中心研制了图 8 所示的红外光电对抗测试系统。目标采用 512×512 元 MOS 电阻阵列,干扰采用 2 个波段的激光器和 8 路两自由度运动的黑体或弧光灯,可模拟目标动态场景、多点源诱饵干扰、面源干扰、干扰机和激光定向干扰。图 9 为区域照明弹和激光干扰的模拟图像^[6]。

图 8 红外光电对抗仿真系统^[6]图 9 区域照明弹和激光干扰的模拟图像^[6]

这种系统采用五轴转台和干扰随动转台来模拟导弹姿态运动和弹目相对视线；采用 512×512 元 MOS 电阻阵列模拟机身和地物背景的热辐射特性；采用 2 个波段的激光器和 8 路两自由度运动的黑体或弧光灯来模拟诱饵干扰、干扰机和激光定向干扰等的波段特性。该系统功能较全面，能量利用率较高^[6]。

5 美国陆军微光子学研究实验室

2010 年，美国陆军微光子学研究实验室开展了发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 阵列红外双波段图像生成技术研究：阵列规模达到 256×256 ，波段覆盖 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 和 $8 \sim 9 \mu\text{m}$ ，图像帧频达 1000 Hz。基于垂直共振腔表面发射激光 (Vertical Cavity Surface Emitting Laser, VCSEL) 结构的 LED 阵列的像元等效黑体温度已达到 3000 K (单元结构见图

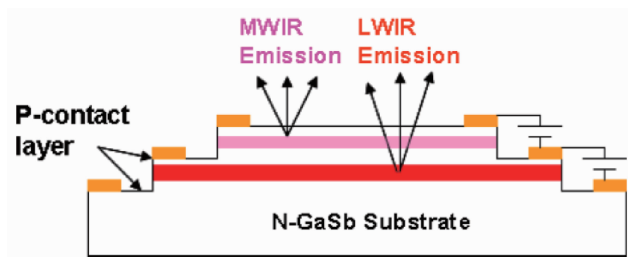
10)^[7]。

双色 LED 阵列红外双波段图像生成装置体积小，重量轻，像元亮度高。由于采用两束单色光，可相对模拟中长波双波段目标和诱饵干扰环境特性，适合基于五轴转台的半实物仿真系统^[7]。

6 美国光科公司和 OPTRA 公司

2009 年，美国光科公司研制了基于双 DMD 微镜阵列的红外双波段成像目标模拟器 (光路示意图和实物图见图 11)^[8]。

2013 年，美国 OPTRA 公司采用两个 DMD 器件研制了双色景像投射器。两个波段分别是 $3.4 \sim 4.2 \mu\text{m}$ (Blue DMD) 和 $4.2 \sim 5.0 \mu\text{m}$ (Red DMD)。图 12 为双色景像投射器的实物图。表 1 列出了其技术指标。图 13 为所生成的红外双波段辐射图像^[9]。

图 10 LED 阵列红外双波段图像生成装置的单元结构示意图^[7]

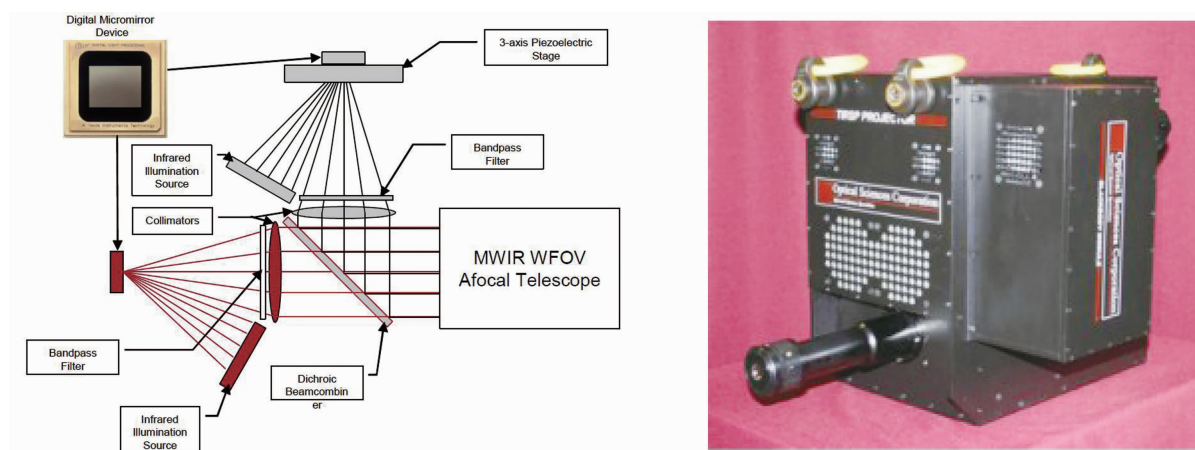


图 11 美国光科公司研制的红外双波段成像目标模拟器的光路示意图及实物图^[8]

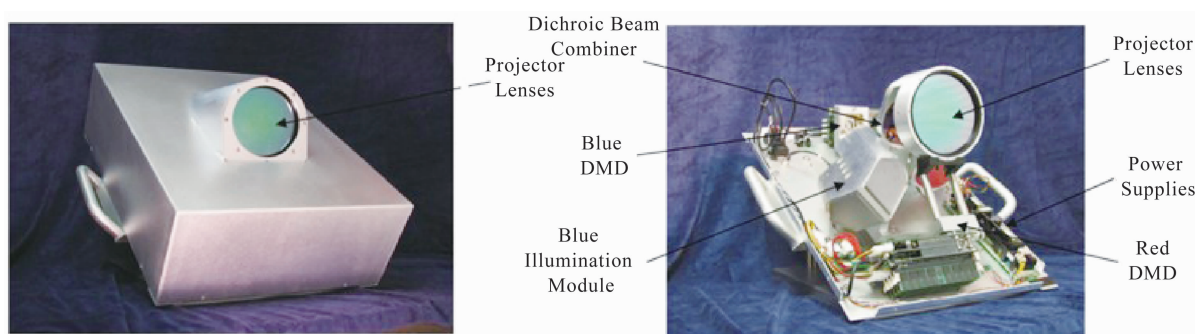


图 12 美国 OPTRA 公司研制的双色景像投射器的实物图^[9]

表 1 美国 OPTRA 公司研制的双色景像投射器的技术指标^[9]

指标名称	技术参数
波段范围	3.4~4.2 μm 4.2~5.0 μm
最大辐射强度 (4.2~5.0 μm 波段)	$\geq 1 \text{ W/sr}$
灰度分辨率	10 bit
最大更新速率	40 Hz
像元数	直径为 768
场景最长持续时间	54 s
角分辨率	225 μrad
图像配准	一个角分辨率元素

美国 OPTRA 公司研制的基于双 DMD 微镜阵列的双色景像投射器结构紧凑, 适合五轴转台仿真环境, 无法绝对模拟短波和长波目标环境特性。

7 美国 SBIR 公司

2013 年, 美国 SBIR 公司研制了两个规格

均为 1024×1024 的基于 MIRAGE-XL 电阻阵列的红外双波段目标模拟器。图 14 所示为 SBIR 公司研制的目标模拟器的结构及实物图^[10]。

MIRAGE-XL 电阻阵列的工作频率为 200 Hz, 在中波红外波段的温度达到 675 K, 在长波红外波段的温度达到 550 K。每个 MIRAGE-XL 电阻阵列包含数字辐射器、温度支持系统和控制电子系统三个部分。各部分的实物图如图 15 所示^[11]。

这种基于双电阻阵列的双色景像投射器能够相对模拟中长波双波段目标环境特性且结构紧凑, 适合五轴转台仿真环境, 但无法模拟目标环境短波特性。

此后, SBIR 公司开展了高动态电阻阵列 (High Dynamic Resistive Array, HDRA) 发展项目^[11]。该项目要求提高基于电阻阵列的红外场景生成系统 (Infrared Scene Projector, IRSP) 的全部性能指标: 将中波红外最高表观温度从

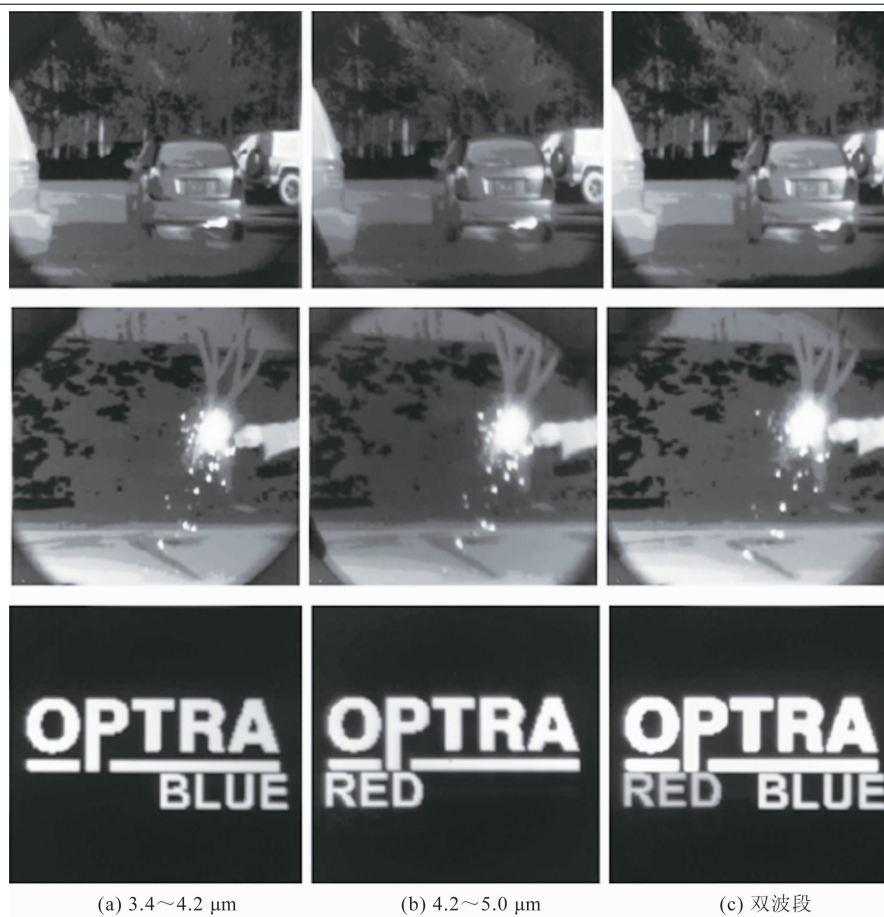
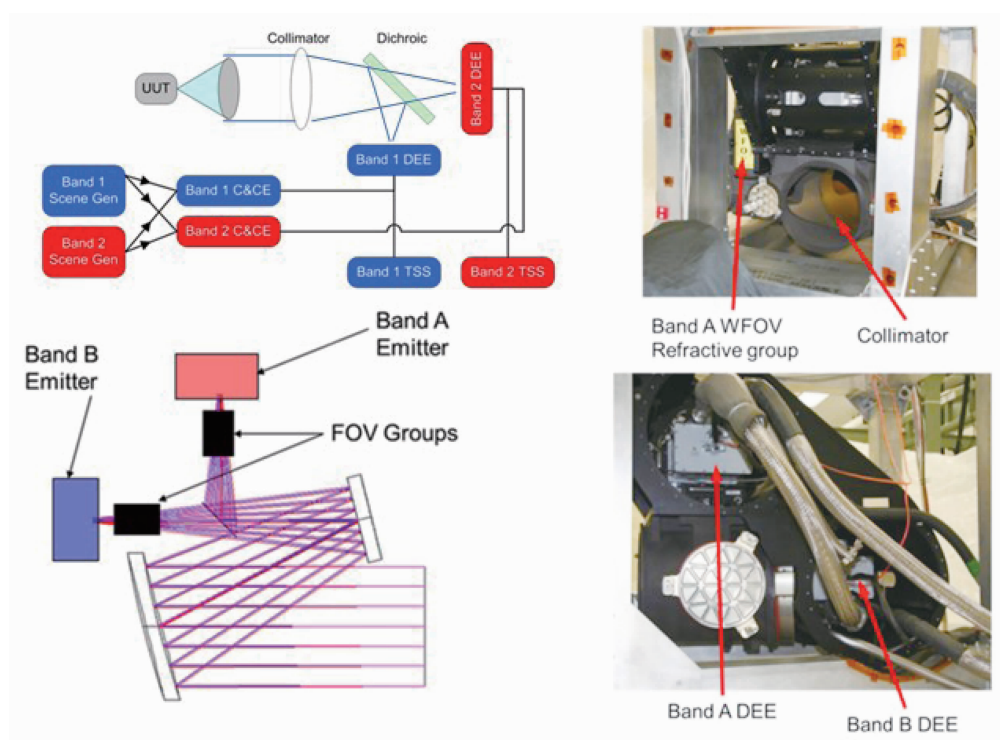
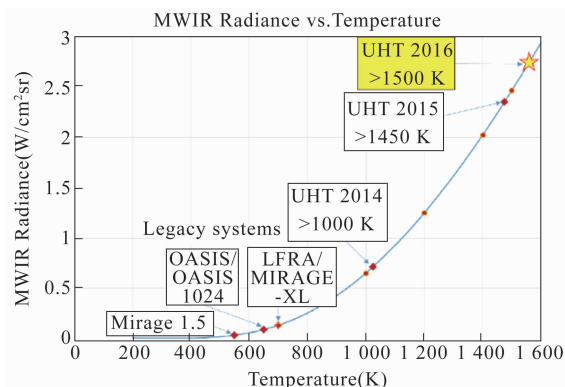
图 13 生成的红外双波段辐射图像^[9]图 14 美国 SBIR 公司研制的目标模拟器的结构及实物图^[10]

图 15 MIRAGE-XL 电阻阵列主要组成部分的实物图^[11]图 16 传统红外场景生成系统的最大中波红外辐射亮度和表观温度以及跨项目阶段 HDRA 像素性能的演化过程^[11]

700 K 提高到超过 1500 K；将最大帧频从 200 Hz 提高到 500 Hz；阵列规模可高达 2048 × 2048 元。在项目的第一阶段，他们研制并测试了结合新材料和几何结构的发射像素单元。它们产生了比传统像素单元更高的辐射亮度，而且积累的数据帮助项目第二阶段实现了额外的设计改进，即根据第一阶段的经验对发射像素单元材料进行了改进(经测试达到 1500 K 以上)。图 16 所示为传统红外场景生成系统的最大中波红外辐射亮度和表观温度以及跨项目阶段 HDRA 像素性能的演化过程^[11]。

8 结束语

国外的半实物仿真红外多波段成像目标模拟技术研究起步早、投入多、发展快，积累了大量的技术基础，建成了多套不同性能的红外多波段成像制导半实物仿真试验系统，并成功将其应用于武器研制当中。此外，近年来还在红外多波段目标模拟系统的结构改进和成像质量提升等方面进行了深入研究。本文详细介绍

了国外半实物仿真红外多波段目标模拟技术的发展过程，包括系统组成、工作原理、技术指标等，并在此基础上对各系统进行了分析。这样可以比较清楚地了解该技术的发展过程以及不同技术途径的特点，对国内多波段成像制导半实物仿真红外多波段目标模拟技术的后续发展和系统建设有一定的参考借鉴作用。

参考文献

- [1] 钱育龙, 王治乐, 张成标. 红外双波段目标模拟器的国内外发展现状 [J]. 航空兵器, 2014, 50(5): 23-27.
- [2] 赵西帅, 赵松庆, 吴根水. 基于电阻阵的多谱段目标模拟器设计 [J]. 测控技术, 2018, 37(3): 155-158.
- [3] 吕俊杰, 赵松庆. 现有红外目标模拟器方案的分析 [J]. 航空兵器, 1992, 28(5): 27-30.
- [4] Frédéric M, Olivier D. Advancements in the hardware in-the-loop simulation facilities at LRBA[C]. SPIE, 2001, 4366: 436608.
- [5] Joseph M. Multispectral target simulation dome for hardware-in-the-loop simulation of fire control and optronic seeker systems [C]. SPIE, 2004, 5408: 22-32.
- [6] Jackson II H D, Blair T L, Ensor B A, et al. Air force electronic warfare evaluation simulator (AFEWES) infrared test and evaluation capabilities [C]. SPIE, 2007, 6544: 654408.
- [7] Das N C, Towner F. Two color IR LED array [C]. SPIE, 2010, 7663: 766308.
- [8] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]. SPIE, 2009, 7210: 721001.

(下转第 43 页)

两焊点间的高度差继续增大后, 在第二焊点键合时, 引线弧线最高点至第二焊点的引线陶瓷基板之间的夹角接近 90° 。在键合时引线容易与劈刀接触, 导致超声能量不能完全传递到焊点处。此外, 由于劈刀带动引线发生振动, 引线陶瓷基板焊盘之间没有形成足够的原子间结合力, 导致键合后拉力急剧下降, 在可靠性实验过程中容易发生第二焊点与陶瓷基板焊盘脱落的情况。

4 结论

对于 $25\ \mu\text{m}$ 金丝楔焊而言, 当电路焊盘与陶瓷基板间无垫片时, 引线强度较高, 工艺稳定性较好。但如果组件对引线键合强度要求不是过高, 那么从现有的工艺及仿真结果来看, 增加垫片厚度有助于达到降低芯片应力的效果。若对引线强度有较高要求, 则可在设计之初考虑焊点间高度差来实现键合焊盘高度匹配。这样可以减小引线长度并提高引线工艺质量和组件的可靠性。

在本文的实验条件下, 引线键合强度与陶

瓷垫片厚度之间存在线性变化关系。增加陶瓷垫片的厚度会降低引线强度和工艺稳定性。但在实施具体工艺时, 引线键合强度由于受温度、焊盘、工艺参数等多种因素的影响而有待深入研究。

参考文献

- [1] 赵振力, 孙闻. 超声功率对 $25\ \mu\text{m}$ 铂金丝球形键合强度的影响及键合点质量评价 [J]. 电子与封装, 2019, 19(11): 4-8.
 - [2] 朱炳金, 林磊, 宋开臣, 等. InSb 红外探测器芯片金丝引线键合工艺研究 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1): 46-50.
 - [3] 廖小平, 杨兵. 线弧参数对铝丝楔焊键合强度的影响研究 [J]. 电子与封装, 2013, 13(9): 14-17.
 - [4] 汪洋, 赵振力, 莫德锋, 等. 红外探测器组件封装中的引线特性研究 [J]. 红外, 2018, 39(2): 8-13.
 - [5] 刘媛萍, 任联锋. 高度落差对引线键合拉力的影响分析 [J]. 电子工艺技术, 2016, 37(1): 40-42.
-
- (上接第 14 页)
- [9] Dupuis J R, Mansur D J, Vaillancourt R, et al. High dynamic range DMD-based IR scene projector [C]. SPIE, 2013, 8618: 86180R.
 - [10] Laveigne J, Franks G, Prewarski M. A two-color 1024×1024 Dynamic infrared scene projection system [C]. SPIE, 2013, 8707: 870703.
 - [11] Mchugh S, Franks G, Laveigne J. High temperature MIRAGE XL (LFRA) IRSP system development [C]. SPIE, 2017, 10178: 1017809.