

高对比度中/长波红外双波段视景仿真系统光学设计及测试实验

张建忠^{1,2}, 郭帮辉^{1,2}, 谭向全¹, 孙强¹

(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)

摘要: 为了实现中/长波红外双波段制导系统的性能测试与评估, 设计了一套基于数字微镜器件的红外双波段视景仿真光学系统, 系统包括投影镜头和照明系统。利用非球面技术和大出瞳距、无穷远投影系统的像差特性, 采用常规的红外材料, 通过光焦度的合理分配与非球面像差校正的优势相结合, 解决了双波段、大出瞳距离带来的彗差、像散、畸变和色差的平衡问题。采用阿贝式直接照明的方案, 解决了斜入射情况下均匀照明的问题, 有效地控制了杂光的影响, 提高了光能利用率。设计结果显示: 最终仿真系统全视场角为 $\pm 2^\circ$, 出瞳距离为 250 mm, 出瞳直径为 70 mm, 系统畸变小于 0.2%, 系统双波段的调制传递函数曲线均接近衍射极限; 照明均匀性高于 95%。系统实验测试表明: 在黑体温度为 300 °C 时, 模拟温度最低为 31.6 °C, 最高为 250 °C, 温差为 215.4 °C, 系统的对比度达到 0.98, 像面均匀性高于 98.1%。仿真系统具有高对比度, 宽温差和图像逼真的特点。

关键词: 光学设计; 红外双波段; 视景仿真; 数字微镜器件

中图分类号: O435.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2894-07

Design and testing of high contrast ratio MW/LW infrared dual-bands scene simulation system

Zhang Jianzhong^{1,2}, Guo Banghui^{1,2}, Tan Xiangquan¹, Sun Qiang¹

(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)

Abstract: For the requirements of performance testing and evaluation of IR guidance system which works in dual-bands of MW/LW, a DMD based dual-bands infrared scene simulation system was designed, including a projection lens and illumination optical system. The aberration characteristics of the aspherical surface and the projection system with long exit pupil relief and infinity projection was taken into account. Using common infrared materials with reasonable distribution of power and aspherical surface, it balanced the coma, astigmatism, distortion and chromatic aberration, introduced by the dual-bands and long exit pupil relief. In the design of the illumination system, directly irradiation combined with the Abbe illumination principle was adopted to achieve an uniform illumination in the case of oblique

收稿日期: 2013-03-20; 修订日期: 2013-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(60977001); 吉林省与中国科学院合作长吉图开发开放先导区科技创新合作专项资金(2011CJT0004); 吉林省科技厅项目(20106015, 20100310)

作者简介: 张建忠(1986-), 男, 博士生, 主要从事红外系统仿真等方面的研究。Email: zhang_ciomp@126.com

导师简介: 孙强(1971-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事现代红外光学仪器、二元光学、红外系统仿真等方面的研究。

Email: sunq@ciomp.an.cn

incidence, also the improvement of light energy utilization and suppression of the stray light as well. The design result shows that IR MW/LW scene simulator has a full field of view of $\pm 2^\circ$, exit pupil relief of 190 mm, and exit pupil diameter of 70 mm. The distortion of the lens is less than 0.2%, the modulation transfer function (MTF) is close to the diffraction limitation at all the field of view in both the MWIR and LWIR; meanwhile, the relative illumination is higher than 95%. The test result shows, when blackbody temperature is 300 °C, the lowest simulated temperature is 31.6 °C, the highest temperature is 250 °C, and the temperature difference reaches to 215.4 °C, the system contrast ratio is higher than 0.98, and the relative illumination is higher than 98.1%. The simulation system has the characteristics of high contrast, wide temperature difference and realistic image.

Key words: optical design; IR dual-bands; scene simulator; digital micromirror device

0 引言

中/长波红外双波段制导系统正被越来越广泛地应用于军事领域以提高对伪装目标的识别能力,研发针对红外双波段制导系统的测试设备便提上了日程。红外视景仿真系统利用计算机产生实时的动态场景,模拟目标与背景红外辐射的空间分布与时间变化,通过投影系统进入被测系统的光瞳,供待测系统探测和识别,进而评估待测系统目标识别能力、目标捕获概率、跟踪精度以及抗干扰能力等性能指标。这种方法能够全面模拟不同战场环境,并且能够重复测试感兴趣环境下系统工作状态,而测试中的变量都能够便捷地设定,这些优点是外场试验中所不具备的,半实物仿真实验已经成为红外系统有效检测和性能评估的主要手段^[1-2]。

数字微镜器件(DMD)由 TI 公司出品,具有宽响应波段、分辨率高、响应快、价格便宜易于得到的特点,在 2001 年被 OSC 公司引入到红外视景仿真器的研制,生产了型号为 MAPS 的样机,并被美国多个军事单位采用^[3-5]。OPTRA 公司的 David J.Mansur^[6]等更进一步,采用两片 DMD 分别调制 3~4 μm 和 4~5 μm 两个通道的双通道的红外仿真系统。然而,以上两种产品都只能应用于中波波段的场景仿真,无法完成双波段制导系统的仿真任务。

先进的军用仿真仪器无法从国外获得,国内各研究单位也对 DMD 型红外目标模拟器进行了研究。其中哈工大的常虹^[7]和姚园^[8]对这方面的系统进行了研究:常虹设计了双波段系统视场角为 $2 \times 1.3^\circ$,照明系统采用锗材料的平行平板代替一般认为的半

透半反镜作为分光元件,一部分反射起转折光路的作用、另一部分透射,最终整个宽波段内能量利用率约为 15%,限制了系统模拟的温度范围;姚园的设计为文中的设计提供了很好的借鉴,只是系统为单波段,没有相关样机性能的报道。贾辛^[9]和钟都都^[10]的论文中也有此类设计,工作波段局限在中波范围,分辨率为 0.25 mrad,对比度较低仅为 0.2,而且角落偏暗的状况很明显。

文中从 DMD 工作原理出发,旨在研制一款结构简单紧凑的双波段红外目标模拟器,并具有高对比度和宽温差范围的特点。文中采用直射照明的方法,研制了双波段、大出瞳距离下远心投影光学系统和相应的照明系统。投影光学系统为简单的“- + -”结构,仅使用三种常规红外材料通过光焦度合理分布以及非球面的引入,实现了双波段下彗差、像散、畸变以及色差的平衡;照明系统采用阿贝式直接照明的方法,有效控制了杂光,提高了光能利用率,解决了斜入射情况下均匀照明的问题。最终系统视场 $\pm 2^\circ$,在 3~5 μm 和 8~12 μm 波段的角分辨率分别为 0.069 mrad 和 0.17 mrad,系统的传递函数曲线接近衍射极限;像面的均匀性达到了 98.5%,在黑体温度为 300 °C 时,模拟温度最低 31.6 °C,最高 250 °C,温差达到了 215.4 °C,对比度高于 0.98,能量利用率也显著提高。

1 DMD 型仿真器工作原理

红外视景仿真器的结构组成如图 1 所示,照明系统将黑体发出的红外光束均匀照射到微镜表面,DMD 作为红外光束调制的核心器件,在计算机控制下生成红外分布图像,投影物镜将动态红外图像投

影到无穷远,实现视景仿真。

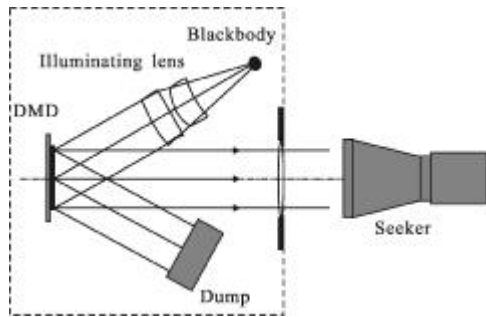


图 1 光学系统示意图

Fig.1 Schematic of optical system

2 光学系统设计

2.1 投影物镜参数确定

系统工作原理为:黑体发出的红外辐射投射到 DMD 表面,经过微镜的调制,通过系统出瞳投影到无穷远。因此,系统的设计需要考虑三个方面的问题:

(1) 仿真与待测系统配合需要满足光瞳衔接原则,设计时,仿真系统出瞳略大于待测系统入瞳;(2) 仿真系统的视场略大于待测系统瞬时视场;(3) DMD 反射式的工作方式决定了照明和投影的光路位于芯片的同侧,因而后工作距要保证两光路的器件不发生干涉。

该设计选用目前主流的 XGA0.7"型号的 DMD 芯片,经过计算投影物镜参数如表 1 所示。

表 1 光学设计参数

Tab.1 Optical design parameters

Parameter	Value
Waveband/ μm	3-5; 8-12
Effective focal length/mm	250
F number	3.57
Field of view/($^\circ$)	± 2
Entrance pupil distance/mm	250
Back focal length/mm	≥ 230
Entrance pupil diameter/mm	70
Resolution/mrad	0.069; 0.17

2.2 投影系统设计

2.2.1 设计思想

投影系统大出瞳距的特点决定了系统主面远离

孔径光阑,会使主光线的入射位置偏向透镜边缘,增大入射高度 h_p 。由参考文献[11]可知,设计的难点在于平衡与 h_p^3 成正比的畸变,以及与 h_p 关系密切的彗差、像散;而系统的球差和场曲不受入射高度变化的影响。

平行光束入射到第一片透镜,为了减小入射角度,面形弯曲朝向入瞳的方向;为了使系统满足后工作距 $L \geq 230 \text{ mm}$ 的设计要求,前组光焦度为负值,以达到镜头像方主面后移的目的;中组采用正透镜,使系统光焦度满足设计要求,而最后一组透镜实现光焦度的调配以及残余像差的校正。根据像差的分析,系统仅有六个曲面,难以实现五种单色像差的校正,特别在其中三种像差较为突出的情形下。目前,红外镜片多采用金刚石车削的方法来加工,偶次非球面也易于实现。偶次非球面的表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (k-1)c^2r^2}} + a_2r^4 + a_3r^6 \dots \quad (1)$$

式中: c 为顶点曲率; k 为圆锥系数; a_2 和 a_3 为高次项系数。第一面和第三面都有较大的入射高度,设置为非球面,高次项系数的作用会较为明显,有利于球差的校正。最后一面距离光阑最远,有利于轴外像差的校正,为了减小像差校正作用相互抵消的几率,非球面之间没有相邻。

系统工作在 MW 和 LW 两个波段,材料折射率会随着工作波段不同而变化,色差随之产生。色差的平衡可以通过材料的选择以及光焦度的分配来实现,满足的关系如下:

$$\sum_1^i h_i \Phi_i = \Phi \quad (2)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \Phi}\right)^2 \sum_1^i (h_i^2 w_i \Phi_i) = 0 \quad (3)$$

公式(2)保证了系统的总光焦度,式中 Φ_i 为单个透镜的光焦度; h_i 为第 i 面上光线入射高度; Φ 为系统的总光焦度。公式(3)为消色差方程, w_i 为材料的色散因子,满足方程则光学元件的色散所引起的离焦为零。

常规可选红外材料范围有限,硅无法用于长波,这里采用 Ge 和 ZnSe 和 ZnS 进行设计。使用三组透镜,通过公式(2)~(3)的计算,各组的光焦度。前、中、后组采用“- + -”的配置方式,并且分别引入偶次非球面,增加变量,来平衡彗差、像散和畸变。而场曲和

轴向色差的校正则通过公式(4)、(5)来求解。

$$\frac{\phi_1}{n_1} + \frac{\phi_2}{n_2} = \sum S_{IV} \quad (4)$$

$$\frac{h_1^2 \phi_1}{v_1} + \frac{h_2^2 \phi_2}{v_2} = \sum C_1 \quad (5)$$

孔径光阑远离系统使系统的对称性变差,然而,合理调整光焦距,通过非球面的引入,使各个像差得到足够的变量进行平衡。据此建立系统的初始结构,并结合照明光学系统对系统总体进行优化设计。

2.2.2 投影系统像质评价

投影光学系统由三组透镜组成,结构如图 2 所示。

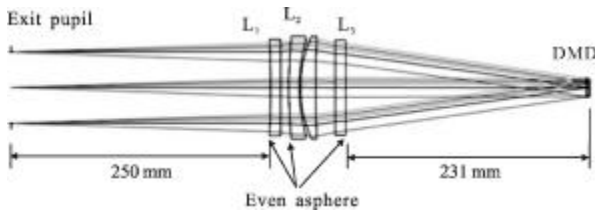


图 2 投影物镜结构图

Fig.2 Schematic of projector structure

前组 L₁ 为 Ge 材料的负透镜,中组 L₂ 为分别使用 ZnSe 和 ZnS 的正负透镜组合,后组 L₃ 材料为 ZnS。三组透镜中都有偶次非球面的引入,由于三个面的曲率半径都比较大,仅使用了高次项系数作为变量,通过优化,像差得到了很好的校正。

图 3 和图 4 分别为该系统中波和长波的点列图,RMS 半径均小于爱里斑半径;图 5 和图 6 分别为双波段下的调制传递函数曲线。系统两个波段下

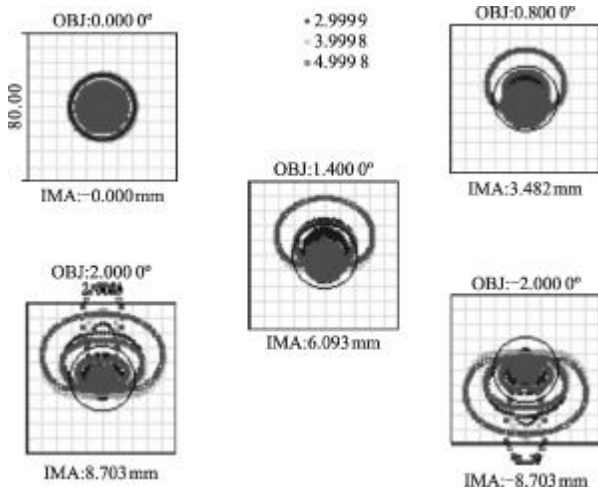


图 3 MWIR 点列图

Fig.3 Spot diagram at MWIR

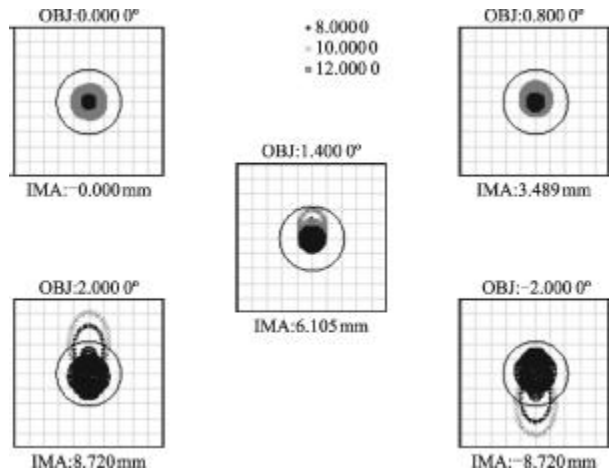


图 4 LWIR 点列图

Fig.4 Spot diagram at LWIR

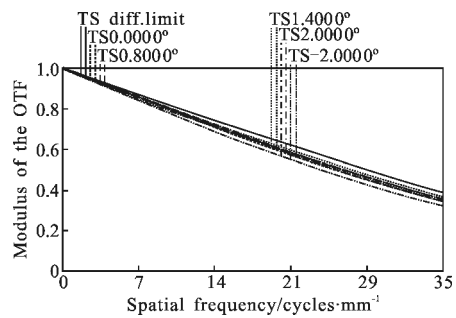


图 5 MWIR 调制传递函数曲线

Fig.5 MTF vs spatial frequency at image plane at MWIR

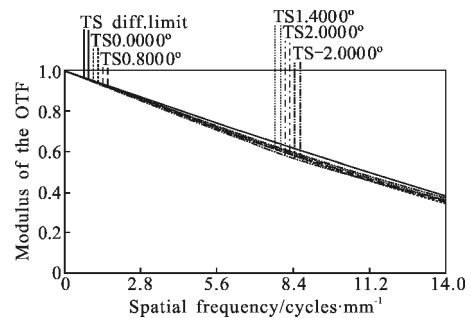


图 6 LWIR 调制传递函数曲线

Fig.6 MTF vs spatial frequency at image plane at LWIR

爱里斑半径均小于像元尺寸,为衍射受限系统。笔者考察了系统中频率下的传递函数情况。从图上可见,在 MW 波段的中间频率 35 lp/mm 下,各视场的 MTF ≥ 0.35,而在频率 17 lp/mm 下各视场的 MTF ≥ 0.65;LW 波段时中间频率 14 lp/mm 下,各视场的 MTF ≥ 0.38;均接近衍射极限。图 7 为中波/长波时系统的畸变曲线,在两个波段内,畸变均小于 0.2%。

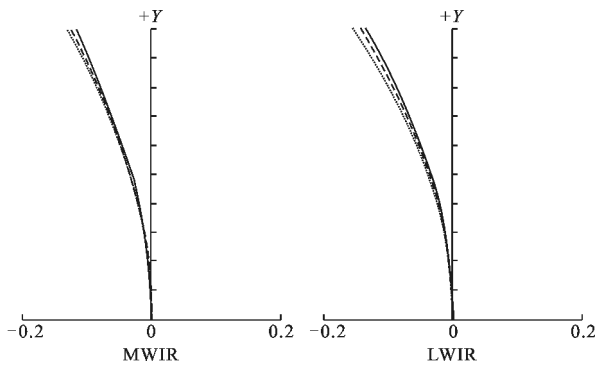


图 7 中波/长波的畸变曲线
Fig.7 Distortion at MWIR/LWIR

2.3 照明系统设计

照明系统的作用在于将黑体出射的不规则的光束整形约束,均匀高效地照射到微镜阵列的表面。

针对 DMD 反射式的调制工作方式,照明的入射光束与调制后的出射光束都位于 DMD 的同一侧,为了使两者的光学元件不发生干涉,可以采用半透半反镜分光、棱镜分光和直接照明三种方法。由于红外棱镜的价格较高,极少采用。采用半透半反镜分光时,照明光束首先通过半透半反镜,透过率减半,而投影光束出射时同样通过该镜,在不考虑其他元件透过率情况下,能量变为原来的 1/4;另一方面,DMD 处于 ON、OFF、Flat 状态时产生的杂光也都有可能通过半透半反镜多次反射而进入投影系统,影响模拟图像的对比度。半透半反镜会的引入会造成像散的出现,并伴有鬼像产生。文中采用直接照明的方法,解除了由于半透半反镜而带来的杂光的影响,同时很大地提高了光能的利用率。

经典均匀照明的方式有两种:阿贝照明和柯勒照明原理。系统采用腔式黑体,在出射孔的局部区域可以保证辐射的均匀性,因而该设计采用较为简单的阿贝照明的设计方法,直接将黑体腔孔成像到 DMD 面,同时保证数值孔径与投影系统出射光束相一致。

系统结构如图 8 所示。黑体出射的红外光束,经中继镜头 L₁ 和 L₂ 成像到 DMD 面上。由于是斜入射照明,黑体的放置需要加入倾斜的调整量,尽量降低斜照明中 cos⁴ 效应的影响。

设计完成后利用光学分析软件 TracePro 进行大量光束的追迹,并在微镜阵列表面进行能量统计,来评价照明均匀性。定义 DMD 接收照明非均匀性指标^[12]:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}{N\bar{E}^2}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: E_i 为第 i 采样区域的照度值; \bar{E} 为辐射照度平均值。在照明仿真中,追迹光线光线,在全视场范围内采样数为 10×10 的情况下进行考察,仿真结果如图 9 所示,均匀性达到了 95.3%。图 9(a)为 TracePro 软件模拟仿真照度图,图 9(b)为子午和弧矢两个方向的照度曲线图。图 10 为照明系统与投影物镜组合的光路图。

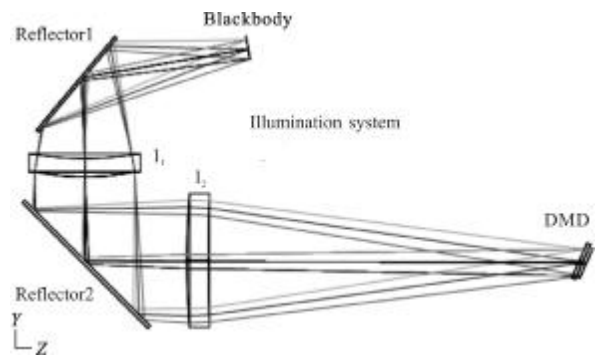


图 8 照明系统光路图
Fig.8 Schematic of projection optical system

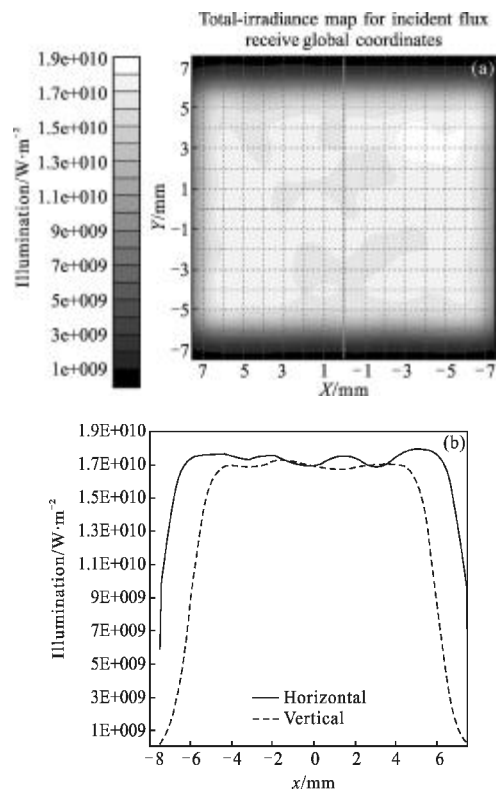


图 9 照度分布图
Fig.9 Illuminance mesh

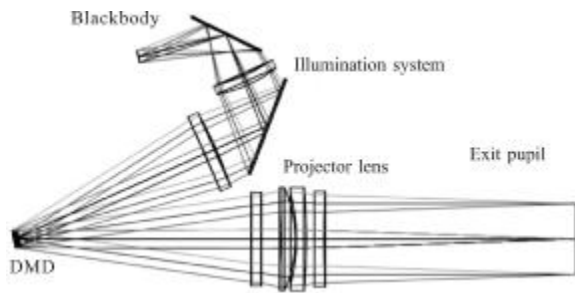


图 10 光学结构图
Fig.10 Optical structure

3 实验结果分析

系统装调完成后,采用型号为 LAIRD-S270A 的红外热像仪对模拟器进行了初步测试,该热像仪的最高测温为 250℃,精度为 0.1℃。可模拟温度与照明黑体温度的关系表征了系统能够模拟的温度范围,以及目标与背景最大可以达到的温差范围。如图 11

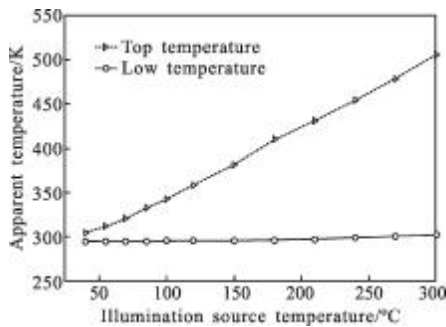


图 11 模拟温度与黑体温度对应曲线
Fig.11 Apparent temperature vs blackbody temperature

所示,在当黑体设置为 40℃时,可模拟最高温度为 31.8℃,低温为 22.3℃,温差为 9.5℃;黑体(最高 650℃)设置为 300℃时,模拟的温度最高达到 250℃,低温为 31.6℃。温差为 215.4℃,而在这个过程中背景温度漂移了 9.3℃,仅为模拟温差的 4.3%,表明杂光的影响很小,使系统容易达到较高的对比度,对比度是任何类型空间光调制系统的重要参数,定义为:

$$\text{Contrast ratio} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} \quad (7)$$

式中: E_{\max} 为微镜全部处于 ON 状态时的辐射出射度; E_{\min} 为微镜处于 OFF 状态时的辐射出射度。图 12 为系统对比度与黑体设置温度的变化关系。由于采用直接照明,避免了分光过程中杂光的产生,使得在黑体温度持续升高 260℃,暗背景的温度变化仅为

9.3℃,黑体温度为 300℃时,对比度为 0.981。图13为灰度 255 情况下中波的图像,其均匀性为 98.1%,图 14 为中波下的由热像仪得到的模拟图像,左图为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的标志,右图为美国 A10 攻击机的模拟图像;图 15 为长波下的模拟图像,左图为黑白对比图,右图为一辆坦克照片。在长波情况下,艾利斑半径为 43.5 μm,远大于 DMD 像元尺寸,由于衍射的影响,边缘较中波锐度下降。

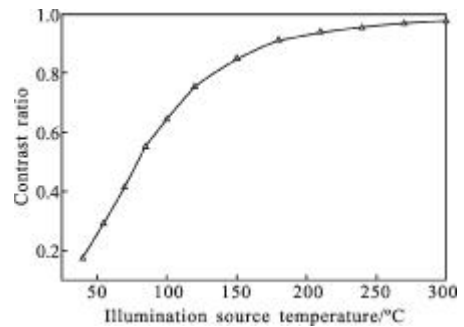


图 12 对比度随黑体温度变化曲线

Fig.12 Contrast ratio vs blackbody temperature



图 13 灰度为 255 时图像

Fig.13 Image in condition of 255 grayscale

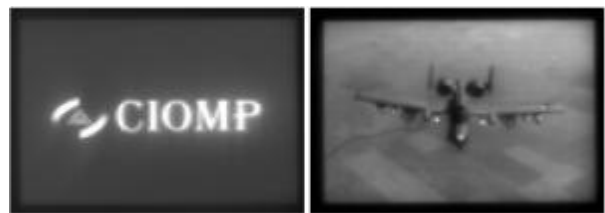


图 14 中波红外模拟图像

Fig.14 Image generated at MWIR

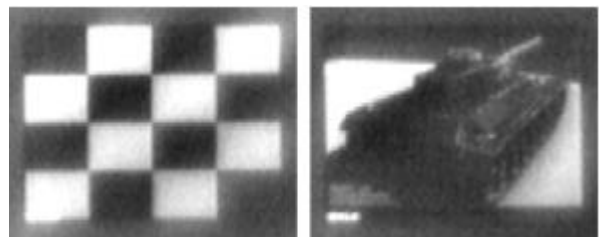


图 15 长波红外模拟图像

Fig.15 Image generated at LWIR

4 结 论

文中采用简单的“- + -”结构,仅使用三种普通红外材料,通过光焦度合理分配与非球面结合的方法实现了双波段、大出瞳距下彗差、像散以及色差的矫正,给出了设计思想、设计指标、像质评价;照明系统采用了阿贝式直接照明的方法,在保证均匀的前提下,有效抑制了杂光,提高了能量利用率。设计结果为:DMD型红外双波段视景仿真器在出瞳距离 250 mm、视场为 $\pm 2^\circ$ 情况下,MW波段的中间频率 35 lp/mm下,各视场的 $MTF \geq 0.35$,而在频率 17 lp/mm下各视场的 $MTF \geq 0.65$;LW波段时中间频率 14 lp/mm下,各视场的 $MTF \geq 0.38$;均接近衍射极限。中波和长波下点斑 RMS半径均小于艾利斑半径,系统畸变小于0.2%。照明系统计算机仿真的均匀性为 95.3%。最后对系统进行初步的实验,结果表明系统照明的均匀性达到了 98.15%;在黑体温度仅为 300 °C时,模拟最高温度达到了 250 °C;而在模拟温度由 31.8 °C上升到 250 °C的过程中,背景温度漂移了 9.3 °C,仅为模拟温差的 4.3%,表明直接照明对于杂光的抑制效果明显,而系统在黑体温度为 300 °C时即达到 0.98。从中波和长波的仿真图像表明,系统具有高对比度,宽温差和图像逼真的技术特点。

参考文献:

- [1] Toole B E O. Real-time infrared scene simulator (RISS)[C]// SPIE, 1996, 2741: 209-218.
- [2] Folks W R, Alonso J M, Monacelli B, et al. Characterization of digital-micromirror device-based infrared scene projector [J]. Optical Engineering, 2005, 44(8), 086402: 1-7.
- [3] D Brett Beasley, Matt Bender, Jay Crosby, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the DMD [C]//SPIE, 2009, 7210(01): 1-12.
- [4] Beasley D B, Bender M, Crosby J, et al. Dynamic infrared scene projectors based upon the digital micromirror device [C]//SPIE, 2001, 4366: 96-102.
- [5] Saylor D A, Beasley D B, Braselton B, et al. Overview of dynamic scene projectors at the US: army aviation and missile command[C]//SPIE, 2002, 4717: 136-147.
- [6] Julia Rentz Dupuis, David J Mansur, Robert Vaillancourt, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator[C]//SPIE, 2010, 7663(02): 1-10.
- [7] Chang Hong. Research on DMD-based dual band infrared imaging guidance simulation system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 1-51. (in Chinese)
- [8] Yao Yuan. Optical design of target simulator for infrared imaging guided system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 1-68.
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] Zhong Dudu, Yu Weiwei, Zhang Kai, et al. Design and test of DMD dynamic IR scene simulator [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(19): 5214-5218. (in Chinese)
- [11] Wang Zhijiang. Handbook of Practical Optical Techniques[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 389-406. (in Chinese)
- [12] Zhang Wei, Gong Yan. Design of diffractive optical elements for off-axis illumination in projection lithography [J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16 (11): 2081-2086. (in Chinese)