

## 像素融合方法的红外双波段目标模拟器设计

王治乐,周程灏,林菲,钱育龙

(哈尔滨工业大学 航天学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种基于像素融合法的双波段红外目标模拟器设计方案。方案采用双波段亚波长光栅代替光学薄膜作为滤光片,仅使用了一套景象生成器和投影系统完成双波段红外目标模拟。该方案解决了传统双波段红外目标模拟器结构复杂,生产成本大,能量比无法调谐的问题。首先介绍了该设计方案的工作原理并说明了其可行性,然后基于严格耦合波理论分析了不同参数下亚波长光栅的滤波特性,最后根据双波段探测需求完成了光栅设计。

**关键词:**红外双波段; 目标模拟器; 像素融合法; 双波段亚波长光栅

**中图分类号:** O436; TP21 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1104003

## Design of infrared dual-band target simulator based on pixel fusion method

Wang Zhile, Zhou Chenghao, Lin Fei, Qian Yulong

(School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A method based on pixel-based fusion method was proposed for infrared dual-band target simulator. The dual-band subwavelength grating instead of optical thin film was used as a filter, only a set of scene generator and projection system was used to complete the dual-band infrared target simulation. This method solved the traditional dual band infrared target simulator's problem of relatively complex structure, high cost and untunable energy ratio. Firstly, the working principle of the method was introduced and its feasibility was illustrated. Then, based on the rigorous coupled-wave theory, subwavelength grating filter's characteristics under different parameters were analyzed. Finally, the design of grating was completed according to the dual wavelength detection needs.

**Key words:** infrared dual-band; target simulator; pixel fusion method; dual-band subwavelength grating

收稿日期:2017-03-05; 修订日期:2017-04-03

基金项目:航空科学基金(20160177007)

作者简介:王治乐(1975-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事光学合成孔径方面的研究。Email:wangzhile@hit.edu.cn

通讯作者:林菲(1995-),女,硕士生,主要从事红外目标探测方面的研究。Email:15776897686@163.com

## 0 引言

为保证导弹导引头探测的准确性和可靠性,双波段探测系统逐步取代了传统的单色探测系统。为了对红外双色制导系统做出准确评估,红外双波段目标模拟器系统成为国内外研究热点。红外双波段目标模拟器系统能够为导弹导引头提供逼真的目标及背景的红外热图像,其核心问题在于目标模拟器能够生成被探测器接收到的景象。

20 世纪后期双波段目标模拟器的研究才开始起步。美国的 Julia 博士等人于 2008 年在红外双波段目标模拟器的设计上提出了使用单一 DMD 作为景象生成器的设计结构,但该设计系统复杂,难以实现高精度的空间分辨率。为了实现更高分辨率,2009 年美国的 David 博士在此基础上采用了双 DMD 器件结构,用来产生两个不同波段的红外图像,然后耦合光学系统将两幅图像进行图像融合,但这种设计结构复杂且对比度下降严重。国内对红外双波段目标模拟器的研究从 21 世纪才开始。2013 年中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研制出只用一套光学系统来实现双波段成像的模拟器,该结构采用了 DMD 器件并引入了二元光学元件,但它在同时校正同一系统中的两个波段图像像差的问题上有很大困难。目前国内的多个院所和仿真中心都在此方向进行着不断的摸索,紧跟世界最先进的技术思想。

文中提出了一种使用单一景象生成器的基于双波段亚波长光栅的双波段目标模拟器的设计方案。该方案具有结构简单,制造成本低等特点,且双波段图像能量比可调谐。

## 1 方案设计

红外双色目标识别主要是根据两者物体之间的光谱特征差异,通过信号幅度鉴别、脉宽识别、双色比率以及图像信息鉴别等方法识别目标。因此红外双波段目标模拟器的主要问题在于生成目标在两波段内景象,且两波段内的能量比可调谐。

为了解决传统模拟器存在的问题,文中提出了基于像素融合法的红外双波段目标模拟器的设计方案。像素融合的方法是当前比较前沿的双波段图像生成方法。该方案使用一套投影系统。其景象生成器

件为电阻阵列或者数字微镜阵列(DMD)。由计算机控制的景象生成器生成全波段的红外图像,然后图像经过放置在景象生成器件前的亚波长光栅的调制后再通过投影系统投射到出瞳。其中根据探测要求而特制的亚波长光栅可实现对红外辐射波段的选择和调制,从而将景象生成器生成的全波段图像转化双波段图像。其系统原理图如图 1 所示。

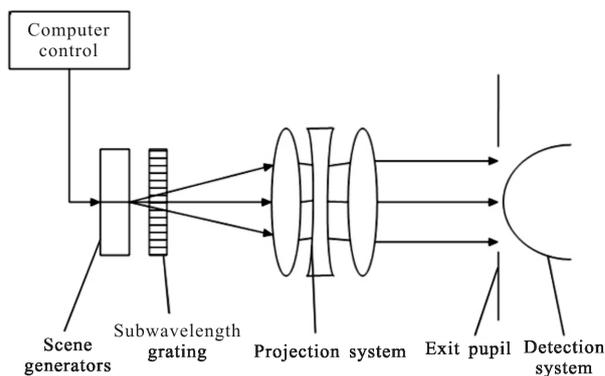


图 1 系统整体结构示意图

Fig.1 System structure schematic

该系统中的双波段亚波长光栅上依次刻上分别只能透过某一波段的两种浮雕结构,从而实现双波段的选择和调制,其结构如图 2 所示。在实际工作时,亚

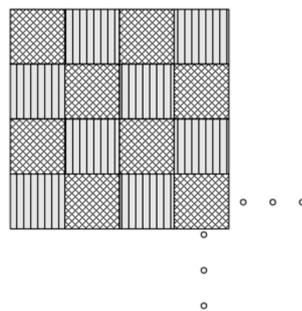


图 2 亚波长光栅滤光片示意图

Fig.2 Subwavelength grating filter schematic

波长光栅滤光片紧贴在 DMD 前表面。光栅滤光片的单个滤光单元与微镜阵列的一个发光元大小相等,每个滤光单元都对一个微镜阵列发光元滤波。为了实现双波段能量的调节,方案采用牺牲微镜阵列分辨率的方式,即将微镜阵列的四个发光元组成一个实际的工作元。由于亚波长光栅滤光片相邻单元选择性透过的波长不同,在一个工作单元中,对角线上的两个单元属于同一波段,而探测器的一个探测单元对应着微镜

阵列的一个工作单元即四个发光单元。因此只要通过计算机对每个景象生成器件的发光元进行适当调节,就可以实现每一个工作元在特定波段下的能量比可任意调谐的双波段仿真图像。

由于在像素大小(15 μm×15 μm)进行光学镀膜在技术上难度很大,每个像素的膜层缝隙处很难均匀过度。此外,普通光学薄膜在高温较高(模拟器应用在 1 000 K 左右环境中)且在温度会剧烈变化的条件下,会因其与光学玻璃的热膨胀系数不同而很容易变形损坏甚至脱落。因此该方案中的双波段亚波长光栅拟采用在每个像素区域刻蚀不同结构的矩形凹槽的方法制备。采用直接刻蚀的方法,滤光片就不会存在薄膜与基片材料热膨胀系数不同的问题。因此这种方法制备的光栅结构稳定,不易损坏。目前,国外 DMD 器件分辨率可高达 4 096×4 096,国内 DMD 器件的分辨率也可做到 1 024×768。虽然该方案将景象生成器件的分辨率变为原来的四分之一,但仍可达到 512×384 的分辨率水平。该方案的图像分辨率满足许多场合的设计使用要求。

## 2 双波段亚波长光栅设计

### 2.1 严格耦合波法

在设计方案中拟采用马赛克结构的亚波长光栅器件,即相邻的两个滤光单元分别实现某特定波段的滤光作用。因此根据实际红外双波段的要求,相邻的两个滤光单元要交替采用两种不同的光栅结构,即完成两种特定波段的窄带滤光光栅结构的设计工作,如图 3 所示。

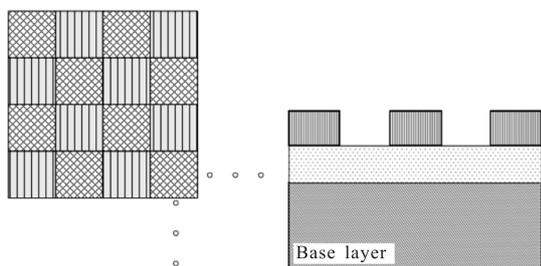


图 3 亚波长光栅马赛克结构和光栅剖面示意图

Fig.3 Subwavelength grating Mosaic structure and schematic of grating section

文中所使用的亚波长光栅周期与入射波长相近,因此必须采用矢量衍射理论。其中模态理论和严

格耦合波理论的运用最为广泛。文中运用严格耦合波法对亚波长光栅进行分析。严格耦合波法是没有近似的严格方法,它将光栅当做周期的平面波导进行处理,运用麦克斯韦方程组和边界条件方程求解波导模式的本征方程。主要包括三个步骤:

(1) 将入射光波和光栅的数学表达式运用电磁场方程组求解,得到入射介质层和基底层的解关于变量的表达式;

(2) 求解耦合波方程组,并将光栅层的介电常数利用傅里叶级数展开;

(3) 运用边界方程,使用变量替换和矩阵分析的方法对展开的衍射级次求解,得到衍射振幅和衍射效率。

将矩形光栅分为光栅层、基底层和介质层三部分。图 4 为一维矩形亚波长光栅图,光栅周期为  $d$ ,光栅突起高度为  $H$ ,  $\epsilon_i$  和  $\epsilon_r$  分别对应介质的介电常数。光栅的傅里叶表达式可以表示为:

$$\epsilon_r(x) = \sum_p c_p \exp\left(i \frac{2\pi p x}{d}\right) \quad (1)$$

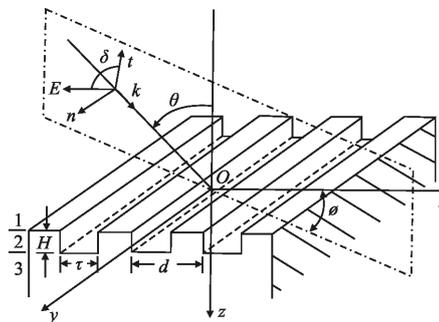


图 4 一维矩形亚波长光栅

Fig.4 One dimensional rectangular subwavelength grating

作为矩形光栅,它的傅里叶级数为:

$$C_p = \begin{cases} n_s^2 f + n_i^2 (1-f) & p=0 \\ (n_s^2 - n_i^2) \frac{\sin(\pi p f)}{\pi p} \exp(-i\pi p f) & p \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

当一束线偏振光入射到光栅表面时,设置  $K_i$  为波矢量,水平平面与入射光所在平面夹角为  $\Phi$ ,  $z$  轴与入射光之间夹角为  $\theta$ ,入射面与偏振方向之间夹角为  $\psi$ 。入射电磁波的归一化电场矢量可以表示为:  $E_{inc}(x, y, z) = u \exp[-ik n_i (\sin\theta \cos\phi x + \sin\theta \cos\psi y + \cos\theta z)]$  (3) 式中:  $u$  为归一化的电场矢量振幅。

光波在入射介质层和基底层的电场表达式为:

$$E_1(x, y, z) = E_{inc}(x, y, z) + \sum_m R_m \exp[-i(k_{xm} + k_y y - k_{1,zm} z)]$$

$$E_3(x, y, z) = \sum_m T_m \exp\{-i[k_{xm} x + k_y y - k_{3,zm}(z-h)]\} \quad (4)$$

其中光矢量的表达式为:

$$k_{xm} = k_0 n_i \sin \theta \cos \phi - \frac{2\pi m}{d}$$

$$k_y = k_0 n_i \sin \theta \sin \phi$$

$$k_{1,zm} = \begin{cases} \sqrt{k_0^2 n_1^2 - k_{xm}^2 - k_y^2} & k_{xm}^2 + k_y^2 \leq k_0^2 n_1^2 \\ -i\sqrt{k_{xm}^2 - k_y^2 - k_0^2 n_1^2} & k_y^2 + k_0^2 n_1^2 > k_0^2 n_1^2 \end{cases} \quad (5)$$

根据麦克斯韦方程组和边界条件对电磁场矢量进行求解。又因为电场矢量与波矢正交,有:

$$\begin{cases} K_x R_x + K_y R_y - K_{1,z} R_z = 0 \\ K_x T_x + K_y R_y - K_{3,z} T_z = 0 \end{cases} \quad (6)$$

由上,可以得到光栅透过率和反射率为:

$$\eta_{Rm} = \text{Re} \left( \frac{k_{1,zm}}{k_0 n_i \cos \theta} \right) (|R_{x_m}|^2 + |R_{y_m}|^2 + |R_{z_m}|^2)$$

$$\eta_{Tm} = \text{Re} \left( \frac{k_{3,zm}}{k_0 n_i \cos \theta} \right) (|T_{x_m}|^2 + |T_{y_m}|^2 + |T_{z_m}|^2) \quad (7)$$

### 2.2 亚波长光栅衍射特性分析

该节基于严格耦合波理论,采用数值分析的方法分析亚波长光栅衍射特性。根据上节内容,对光栅的特性分析主要包括以下三部分内容:

(1) 电场、磁场表达式的编制;(2) 介电常数傅里叶展开矩阵的编制;(3) 光栅衍射效率求解。

实际计算中光栅衍射级次不能取到无穷多,为了节约时间提高运算速度需要对衍射级次进行适当的截断,因此文中将衍射级次保留到 $\pm 2$ (如图 5 所示)。此外计算过程中没有考虑介质的吸收,所有衍射效率之和为 1。对于该设计中的滤波特性拟采用两层

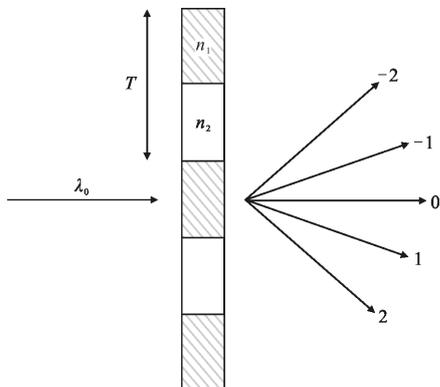


图 5 光栅衍射级次截断

Fig.5 Schematic of gating diffraction classes truncation

非金属的设计结构,初始结构如图 6 所示。设置初始参数: $T$ 为光栅周期, $n_1, n_2$ 分别为两层折射率, $h_1, h_2$ 分别为两层厚度。光栅基底采用材料 Si,第二层光栅材料折射率假定为 3,第一层折射率为 1.6,两层厚度皆为  $0.75 \mu\text{m}$ ,占空比为 0.5。为了使亚波长光栅只存在零级衍射,亚波长光栅的周期应满足  $T < \lambda/n_1$ 。因此初步设定光栅周期为  $2.0 \mu\text{m}$ 。

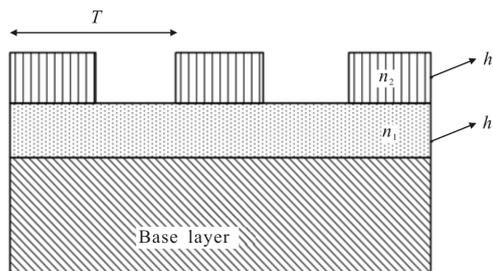
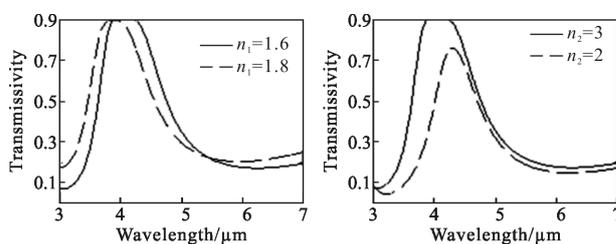


图 6 光栅的初始结构

Fig.6 Initial structure of the grating

采用控制变量法,改变一些参数,观察光栅光谱透过率曲线的变化情况,得到不同情况下光谱透过率曲线如图 7 所示。

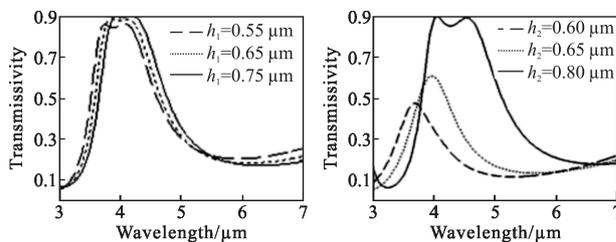


(a) 改变  $n_1$  时的光谱透过率曲线

(b) 改变  $n_2$  时的光谱透过率曲线

(a) Spectral transmittance curve with changing  $n_1$

(b) Spectral transmittance curve with changing  $n_2$

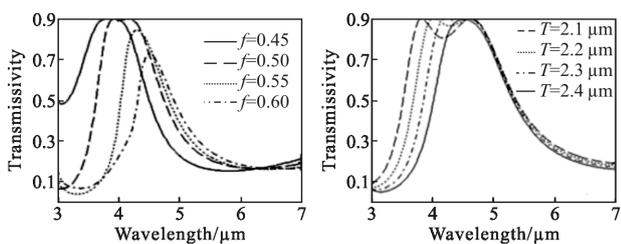


(c) 改变介质厚度  $h_1$  时的光谱透过率曲线

(d) 改变介质厚度  $h_2$  时的光谱透过率曲线

(c) Spectral transmittance curve with changing medium thickness  $h_1$

(d) Spectral transmittance curve with changing medium thickness  $h_2$



(e) 改变占空比  $f$  时的光谱透过率曲线  
(f) 改变周期  $T$  时的光谱透过率曲线  
(e) Spectral transmittance curve with changing duty ratio  $f$   
(f) Spectral transmittance curve with changing period  $T$

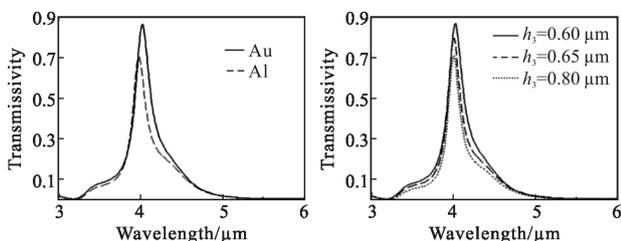
图 7 改变光栅变量后的光谱透过率曲线

Fig.7 Spectral transmittance curves with changing grating variables

通过以上结果,对光栅透过率特性进行分析,可以总结出以下几点:

- (1) 光栅第一层与第二层折射率差别越大,滤光片滤波性能越好。
- (2) 光栅第一层厚度增大,滤波片透射光谱峰值向右缓慢移动。
- (3) 光栅第二层厚度增大,滤波片透射光谱峰值向右快速移动,同时峰值透射率增大,带宽增大。
- (4) 光栅占空比增大,滤波片透射光谱峰值向右移动,同时峰值透射率减小,带宽减小。
- (5) 光栅周期增大,滤波片透射光谱峰值向右移动。

考虑到窄带滤波,因此应在原有结构上覆盖一层金属光栅。该金属光栅层要对介质光栅层有很好的附着力,同时还要求在高温条件下要有良好的化学稳定性,因此可选用的金属材料有 Au 和 Al。继续采用控制变量法,分别改变材料和介质厚度,得到结果如图 8 所示。由图 8 可以看出 Au 的效果优于 Al,并且随着金属光栅层厚度的减小,滤波片透射率峰值增大。



(a) 改变金属材料时光谱透过率曲线  
(b) 改变光栅层厚度时的光谱透过率曲线  
(a) Spectral transmittance curves with changing metal materials  
(b) Spectral transmittance curves with changing grating thickness

图 8 改变光栅变量后的光谱透过率曲线

Fig.8 Spectral transmittance curves with changing grating variables

### 2.3 亚波长光栅设计结果

根据 2.1 节选定了马赛克结构的亚波长光栅,其每个单元为像素大小为  $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$  的正方形。每个单元仅透过双波段中的一个波段,且每两个相邻单元透过的波段不同。单元一只通过  $2.45 \sim 2.55\ \mu\text{m}$  波段,单元二只通过  $3.55 \sim 3.65\ \mu\text{m}$  波段,单元一和单元二交错排列。单元一和单元二的硅基底、氧化镁介质层、硅介质光栅、金材料的金属光栅的厚度、材料,占空比均相同为  $a/T$ 。单元一和单元二唯一不同点在于周期  $T$  的大小,单元一的周期  $T$  为  $1.51\ \mu\text{m}$ ,单元二的周期  $T$  为  $2.70\ \mu\text{m}$ 。

将上述红外双波段马赛克阵列滤光片安装在图像电阻阵列表面上,滤光片的每个单元要与图像电阻阵的每个电阻单元对准,从而使滤光片的每个单元都能对图像电阻阵的每个电阻单元进行窄带滤光。

该设计中的滤光片光刻掩模板的一个单元的结构如图 9 所示。波段一和波段二的掩模板单元中的周期  $T$  分别为  $1.51\ \mu$  和  $2.70\ \mu$ ,占空比均为 0.5。整个掩模板的两种图案交错排列,形成马赛克图案。

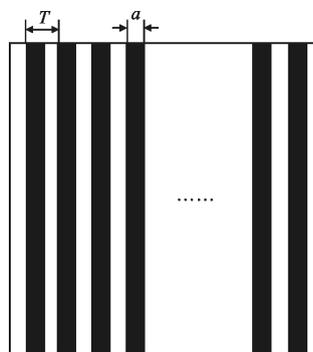


图 9 双波段亚波长光栅单元结构图

Fig.9 Dual-band subwavelength grating unit structure

根据以上设计,不断优化调整光栅参数,得到单元一和二的透射率与波长关系曲线如图 10、11 所示。由图可知: $2.5\ \mu\text{m}$  中心波长的透过率分别为 0.86, $2.45 \sim 2.55\ \mu\text{m}$  波段的透过率均为 62% 以上; $3.6\ \mu\text{m}$  中心波长的透过率分别为 0.85, $3.55 \sim 3.65\ \mu\text{m}$  波段的透过率均为 64% 以上。据此,由该方案设计的双波段亚波长光栅透过率性能良好,满足探测需求。该亚波长光栅的主要作用是滤波,对辐射光线的波段进行选择,然后形成新的像元,因此不会对波前造成影响,在设计镜头时不需要将其考虑在内。

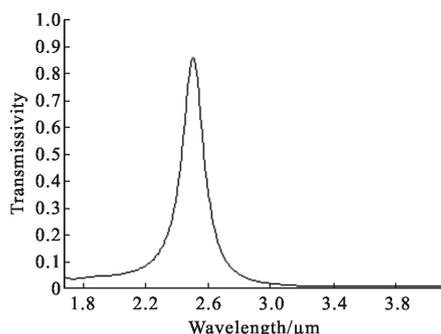


图 10 单元一的波长透过曲线

Fig.10 Wavelength transmittance curves of unit one

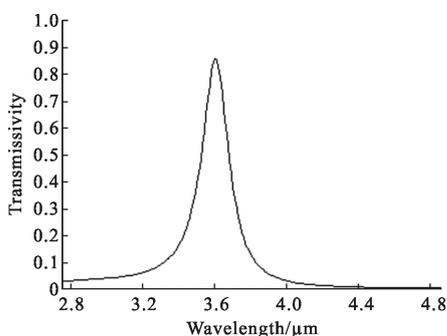


图 11 单元二的波长透过曲线

Fig.11 Wavelength transmittance curves of unit two

### 3 结论

文中提出了基于像素融合法的红外双波段目标模拟器的设计方案,该方案采用双波段亚波长光栅对单一景象生成器投射的全波段景象进行滤波和能量调谐,从而模拟双波段目标景物。方案中详细介绍了单元为像素大小,整体为马赛克结构的双波段亚波长光栅的滤波特性,以及满足模拟器性能要求的光栅设计过程。该设计方案采用的结构相对简单且稳定,不易损坏,通过控制发光元可以实现两波段能量比的任意调节,解决了传统目标模拟器存在的问题。由于在传统光学镜头中,在同一系统内同时校正两波段图像的像差十分困难,因此笔者等下一步打算研究使用二元光学元件改进模拟器中投影系统的光学镜头,以校正系统像差。

### 参考文献:

- [1] Dupuis J R, Mansur D J, Vaillancourt R, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator[C]//SPIE, 2009, 7301: 730105.
- [2] Dupuis J R, Mansur D J, Vaillancourt R, et al. Two-band DMD-based infrared scene simulator[C]//SPIE, 2010, 7663: 766302.
- [3] Dupuis J R, Mansur D J, Genetti G. Two-band DMD-based IR scene simulator[C]//SPIE, 2008, 6942: 694208.
- [4] Dupuis J R, Mansur D J. Contrast analysis for DMD-based IR scene projector[C]//SPIE, 2011, 8015: 801505.
- [5] Daniel A Saylor, John Terry, Joseph Morris. The infrared and semi-active laser simulation capabilities at the multi-spectral system simulation (MSS) HWIL facility [C]//SPIE, 2008, 6942: 694209.
- [6] Qian Yulong, Hou Qingyu, Wang Zhile, et al. Design for scheme of infrared dual-band target simulator and projection optical system [J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(5): 761-765. (in Chinese)  
钱育龙, 侯晴宇, 王治乐, 等. 红外双色目标模拟器方案与光学系统设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(5): 761-765.
- [7] Qian Yulong, Wang Zhile, Zhang Chengbiao. Domestic and international developing status of the dual-band IR target simulator[J]. *Aero Weaponry*, 2014, 5: 23-27, 36. (in Chinese)  
钱育龙, 王治乐, 张成标. 红外双色目标模拟器的国内外发展现状[J]. *航空兵器*, 2014, 5: 23-27, 36.
- [8] Yang Le, Sun Qiang, Guo Banghui. Optical design of off-axis three-mirror system for infrared dual-band scene simulator[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(6): 1212-1216. (in Chinese)  
杨乐, 孙强, 郭邦辉. 离轴三反红外双波段景象模拟器光学系统设计[J]. *应用光学*, 2011, 32(6):1212-1216.
- [9] Fan Yongjie, Jin Weiqi, Zhu Lihong. Development of dynamic infrared scene projection technique [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(3): 133-138. (in Chinese)  
范永杰, 金伟其, 朱丽红. 红外场景辐射模拟技术发展[J]. *红外技术*, 2013, 35(3): 133-138.
- [10] Sieglinger B A, Marlow S A, Sisko R B, et al. Procedures and recent results for two-color infrared projection [C]// Defense and Security Symposium, 2006, 6208: 62080Z.
- [11] Yu Hong, Lei Jie, Gao Yang, et al. Multi-spectral optical simulation system applied in hardware-in-the-loop [C]//SPIE, 2009, 7383: 73831D.