

用于长波红外目标模拟器的 DMD 衍射特性分析

韩庆^{1,2}, 王健¹, 熊峥^{1,2}, 张建忠¹, 马俊林¹, 刘英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: 基于 DMD 的目标模拟器应用于长波红外波段(8~12 μm)时, DMD 的衍射效应对系统的成像对比度造成较大影响。为使系统获得高对比度的红外图像, 需要对 DMD 的衍射特性进行分析。首先根据 DMD 的结构和工作原理, 将 DMD 等效为一特殊的二维闪耀光栅, 并利用光栅衍射理论和傅里叶变换, 推导出 DMD 二维光栅衍射模型; 然后利用 MATLAB 对 DMD 在 8~12 μm 波段的衍射模型进行仿真计算; 最后对仿真结果进行了实验验证。通过仿真计算和实验分析得出结论: 基于 DMD 的目标模拟器应用于长波红外波段时, 照明光束需要选取合适的入射角; 当入射空间方位角为 0° , 入射天顶角为 $44^\circ\sim 48^\circ$ 时, 目标模拟器生成的红外图像对比度达到最佳, 系统成像质量最好。

关键词: 衍射特性; 数字微镜器件; 红外目标模拟器; 二维光栅

中图分类号: TN21; O436.1 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0504006

Diffraction characteristics analysis for DMD-based scene projectors in the long-wave infrared

Han Qing^{1,2}, Wang Jian¹, Xiong Zheng^{1,2}, Zhang Jianzhong¹, Ma Junlin¹, Liu Ying¹, 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: Diffraction effects play a significant role in DMD-based scene projection in the long-wave infrared band (8–12 μm). The contrast provided by these projector systems can become noticeably worse because of the diffraction effect of the DMD. So it is necessary to analyze the diffraction characteristics of DMD when it is applied to DMD-based scene projector in this wavelength band. Firstly, DMD was treated as a special blazed grating, and a grating diffraction model of DMD was constructed by diffraction theory and Fourier transform. Then, simulation calculation was conducted in MATLAB environment. Finally, the simulation result was verified by experiment of scene projection. It is shown that there exists a suitable illuminating incident angle range to achieve high contrast image in the long-wave infrared (8–12 μm) band. When incident azimuth angle is 0° and incident zenith angle is between 44° and 48° , the scene projector will have a good imaging contrast.

Key words: diffraction characteristics; DMD; IR scene projector; two dimension grating

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20140204030GX)

作者简介: 韩庆(1990-), 男, 博士生, 主要从事红外光学仿真和光学设计方面的研究。Email: zheyuanhan@163.com

导师简介: 孙强(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事精密光电测量、红外光学等方面的研究。Email: sunq@ciomp.ac.cn

0 引言

数字微镜器件 (Digital Micro-mirror Device, DMD), 是美国德州仪器(TI)公司于 1987 年发明的一种反射式空间光调制器件。它采用微机电系统工艺将数十万个反射微镜片集成在同一块芯片上, 每个微镜片均是可控的数字化光反射开关。实际应用时, 通过对 DMD 的光反射开关进行电寻址并采用二进制脉宽调制技术来实现光束灰度调制。目前, DMD 器件主要应用于数字投影、目标场景仿真、三维显示、医学成像、激光光刻等领域^[1-3], 并且随着 DMD 器件产品性能的改进和提高, 应用范围越来越广泛。

基于 DMD 的红外目标模拟器采用红外辐射调制法生成红外场景图像, 并且因其具有高帧频、高分辨率的特点而在红外仿真系统中得到了越来越深入的研究^[4-11]。对于 DMD 型红外目标模拟器来说, DMD 器件的衍射效应对系统的成像质量有很大影响, 并且随着入射光波长的增加, 衍射效应的影响越大。在长波红外波段, 系统甚至无法正常成像。针对 DMD 的衍射问题, Dana Dudley 等人将 DMD 微镜片的倾斜角等效为闪耀角, 建立 DMD 的闪耀光栅模型^[9]。Joseph Rice 等人在 2009 提出了 DMD 的二维平面光栅模型, 并根据该模型设计了一种 DMD 衍射效率测量系统^[10]。许富洋等人在 2011 年提出了 DMD 的一维光栅模型, 并利用实验验证了 DMD 的非完全闪耀状态^[11]。上述文献对于 DMD 衍射模型的研究与分析分别在可见光 (0.4~0.7 μm)、近红外 (0.8~1.6 μm) 和中波红外 (3~5 μm) 波段, 并不适用于分析 DMD 在长波红外 (8~12 μm) 波段的衍射特性。因此, 为提高 DMD 型目标模拟器的成像质量, 需要建立 DMD 在长波红外波段的衍射模型, 对其衍射特性进行计算分析。

文中根据 DMD 器件的结构特性和工作原理, 建立 DMD 在 8~12 μm 波段的二维衍射光栅模型, 并利用该二维光栅模型对 DMD 的衍射特性进行了仿真分析, 得出不同入射角度下, DMD 型目标模拟器的成像对比度; 然后对仿真分析进行了实验验证。实验结果表明: 在长波红外波段 (8~12 μm), 当入射光束的空间方位角为 0° , 入射天顶角为 $44^\circ\sim 48^\circ$ 时, 基于 DMD 的目标模拟器能获得最好的成像对比度。

1 DMD 结构和工作原理

DMD 作为一种快速、反射式的数字光开关, 通过微镜片偏转完成开关态的控制, 其微观平面结构示意图如图 1 所示。DMD 由成千上万个微镜片组成, 单个微镜片的尺寸大小为 $a \times a$ (13.68 $\mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$), 像元个数为 1024×768 , 微镜片间距 b 小于 $1 \mu\text{m}$, 偏转角度 w 为 $\pm 12^\circ$ 。每个微镜片对应两种不同的工作状态, 即“开”态、和“关”态, 分别对应 $+12^\circ$ 、 -12° 的偏转角。如图 2 所示, 处于非工作态的 DMD, 微镜片不发生偏转, 无反射光进入投影系统; 处于工作态的 DMD, 当微镜片偏转 $+12^\circ$ (即处于“开”态) 时, 经过微镜片的反射光线全部进入投影系统, 探测器上对应的像元即呈现亮态; 当微镜片偏转 -12° (即处于“关”态) 时, 反射光线偏离投影系统, 被吸收装置吸收, 探测器上对应的像元呈现暗态。因此, 通过控制 DMD 微镜片的“开”、“关”状态, 就可以控制进入投影系统的光束状态, 在探测器像面上得到对应的红外场景图像^[8,12]。

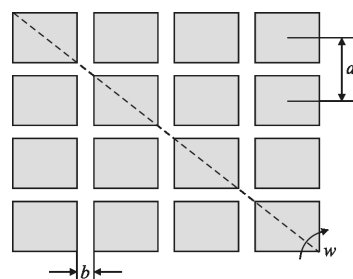


图 1 DMD 结构示意图

Fig.1 Structure view of DMD

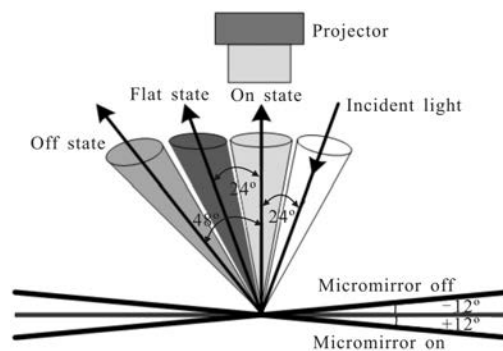


图 2 DMD 微镜片工作原理示意图

Fig.2 Operating principle of DMD

2 DMD 衍射光栅模型

结合 DMD 的微观结构和工作原理,将 DMD 等效为特殊的二维闪耀光栅,当 DMD 处于工作状态时,所有微镜片均沿着主对角线偏转,偏转角度为 $\pm 12^\circ$,对应 DMD 的光栅模型闪耀角为 $\pm 12^\circ$,微镜片尺寸 a 为 $13.68 \mu\text{m}$,微镜片间距 b 小于 $1 \mu\text{m}$,在 DMD 等效二维光栅模型中,间距 b 可以忽略不计,微镜片尺寸 a 即为 DMD 光栅模型的光栅常数^[11-12]。由一维光栅衍射理论可知^[13],光栅衍射能级分布是由入射光波长 λ 、入射角度 θ 以及光栅常数 d 决定。对于 λ 和 d 已定的闪耀光栅,衍射级次的分布由入射角度 θ 决定。当 θ 满足光栅闪耀条件时,则大量的能量将落在某一主闪耀级上, θ 不满足闪耀条件时,则无主闪耀级次的出现。

2.1 单镜元的反射函数

设 DMD 单个微镜片的反射率为 1,其有效的反射面积为 $a \times a$ 。如图 3 所示,建立直角坐标系 $x_1y_1z_1$,

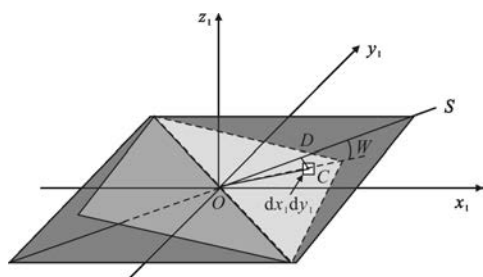


图 3 DMD 单个微镜片工作示意图

Fig.3 Operating principle of single micro-mirror of DMD

可得单个微镜片的孔径函数为 $\text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right)\text{rect}\left(\frac{y_1}{a}\right)$ 。当微镜片处于工作状态时,微镜片绕其对角线偏转 w 角,导致微镜片不同点反射光的位相不同,即微镜片不同点的反射光对应不同的位相因子。由图 3 单个微镜片工作示意图可知,处于主对角线上或者与主对角线平行的微镜片均处于同一平面上,在相干平行照明条件下,各微镜片反射光波无相位差,而在异面的主对角线上的微镜片之间存在相位差,因此,可将各微镜片相位关系均在副对角线方向来考虑^[13]。将任意位置 (x_1, y_1) 微元 dx_1dy_1 离坐标原点 O 的距离 OC 投影至副对角线方向,得到长度 OD 。副对角线方向矢量 $\vec{A}$ 为 $\left(\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}\right)$, $\vec{OC}$ 为 (x_1, y_1) ,

可得:

$$OD = \vec{OC} \cdot \vec{A} = \frac{\sqrt{2}}{2}(x_1 + y_1) \quad (1)$$

图 4 为单个微镜片沿副对角线方向的侧视图, OD 方向即为其副对角线方向,沿微镜片 OD 所在的直线上各点出射光的位相因子相同,则经过任意一微镜片点 C 的反射光与 O 点的反射光位相差为:

$$\Phi = K\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}(AC + CB) \quad (2)$$

$$AC = DC \cdot \cos\theta_i = OD \cdot \tan w \cdot \cos\theta_i \quad (3)$$

$$CB = DC \cdot \cos\theta_r = OD \cdot \tan w \cdot \cos\theta_r \quad (4)$$

式中: k 为波矢; Δ 为光程差; θ_i 为光束入射角; θ_r 为光束偏转角; w 为微镜片偏转角。将公式(1)代入公式(2)、(3)和(4),得到经任意一点 C 的反射光的相位差:

$$\Phi = K\Delta = \frac{2\pi}{\lambda} \tan w (\cos\theta_i + \cos\theta_r)(x_1 + y_1) \quad (5)$$

令 $\xi = \frac{1}{\lambda} \tan w (\cos\theta_i + \cos\theta_r)$,得单个微镜片的反

射函数为:

$$r(x_1 + y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1 - a/2}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - a/2}{a}\right) e^{i\phi} = \text{rect}\left(\frac{x_1 - a/2}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - a/2}{a}\right) e^{i\sqrt{2}\pi\xi(x_1 + y_1)} \quad (6)$$

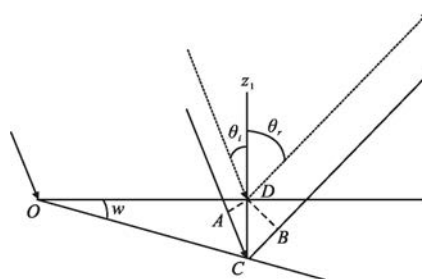


图 4 DMD 单个微镜片工作侧视图

Fig.4 Lateral view of single micro-mirror of DMD

2.2 整个 DMD 镜面的总反射函数

如图 5 所示,在 DMD 镜面区域建立坐标系 $x_1y_1z_1$,微镜片之间间距为 a (忽略镜元间隙),设 O 点处镜元为坐标原点,则其他微镜片位置相当于 O 点处的微镜片进行坐标平移, (m, n) 为图中每个微镜片对应的编号, O 点处微镜片对应的编号为 $m=0, n=0$ 。 M 和 N 表示 DMD 镜面沿 x 轴和 y 轴方向对应的微镜片个数,即沿 x 轴和 y 轴方向对应的微镜片个数分别为 $M+1$ 和 $N+1$ 。单个微镜片反射函数 $r_{m,n}(x_1, y_1)$ 的表达式为:

$$r_{m,n}(x_1, y_1) = \text{rect}\left(\frac{x_1 - a/2}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - a/2}{a}\right) e^{i\phi_{m,n}} \otimes \delta(x_1 - ma) \otimes \delta(y_1 - na) \quad (7)$$

整个 DMD 镜面的总反射函数为:

$$R(x_1, y_1) = r_{0,0} + r_{1,0} + r_{0,1} + \dots + r_{M,N} = \text{rect}\left(\frac{x_1 - a/2}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1 - a/2}{a}\right) e^{i\sqrt{2} \pi \xi(x_1 + y_1)} \otimes \sum_{m=0}^M \delta(x_1 - ma) \otimes \sum_{n=0}^N \delta(y_1 - na) \quad (8)$$

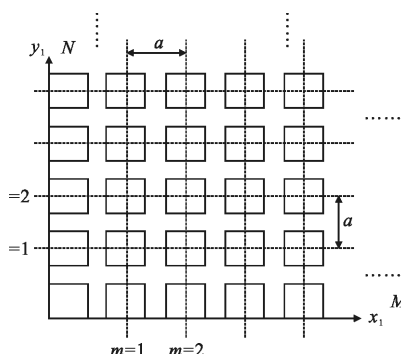


图 5 DMD 微镜片平面示意图

Fig.5 Schematic plane of micro-mirror of DMD

2.3 照明光的函数表示式

设照明光为振幅为 1 的单色平面波, 光波入射方向如图 6 所示。光波入射面与 x_1Oy_1 平面的夹角为

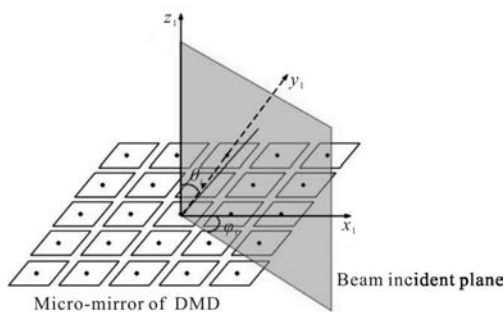


图 6 任意角度入射的平面波光源

Fig.6 Plane light wave with arbitrarily incident angle

ϕ , 该角度为光束空间方位角, 与 z_1 轴夹角为 θ_i , 为光束入射天顶角。入射光线 OA 的方向向量 $(\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma)$ 即为 $(\cos\theta_i \cos\phi_i, \sin\theta_i \sin\phi_i, -\cos\theta_i)$, 入射光的照明函数为:

$$e(x_1, y_1) = e^{i\vec{K} \cdot \vec{r}} = e^{iK(\cos\alpha x_1 + \cos\beta y_1)} = e^{i2\pi\left(\frac{\cos\alpha}{\lambda} x_1 + \frac{\cos\beta}{\lambda} y_1\right)} = e^{i2\pi\left[\frac{\sin\theta_i \cos\phi_i}{\lambda} x_1 + \frac{\sin\theta_i \sin\phi_i}{\lambda} y_1\right]} \quad (9)$$

令 $\frac{\cos\alpha}{\lambda} = u_0, \frac{\cos\beta}{\lambda} = v_0$, 可得:

$$e(x_1, y_1) = e^{i\vec{K} \cdot \vec{r}} = e^{i2\pi(u_0 x_1 + v_0 y_1)} \quad (10)$$

2.4 衍射光强分布

由 2.2 节中公式(8)的 DMD 镜面总反射函数与 2.3 节中公式(10)的照明函数, 可得 DMD 镜面的光振动分布为:

$$U(x_1, y_1) = R(x_1, y_1) e(x_1, y_1) = \left\{ \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{a}\right) \cdot e^{i\sqrt{2} \pi \xi(x_1 + y_1)} \otimes \sum_{m=0}^M \delta(x_1 - ma) \otimes \sum_{n=0}^N \delta(y_1 - na) \right\} \cdot e^{i2\pi(u_0 x_1 + v_0 y_1)} \quad (11)$$

利用傅里叶变换, 可得衍射光振动分布为:

$$U(x_2, y_2) = cF\{U(x_1, y_1)\} = ca^2 \text{sinc}\left[a\left(u - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - u_0\right)\right] \cdot \text{sinc}\left[a\left(v - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - v_0\right)\right] \times \sum_{m=0}^M e^{-i2\pi ma(u - u_0)} \sum_{n=0}^N e^{-i2\pi na(v - v_0)} \quad (12)$$

将式中 $\sum_{m=0}^M e^{-i2\pi ma(u - u_0)}, \sum_{n=0}^N e^{-i2\pi na(v - v_0)}$ 进行计算简化, 有:

$$U(x_2, y_2) = ca^2 \text{sinc}\left[a\left(u - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - u_0\right)\right] \text{sinc}\left[a\left(v - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - v_0\right)\right] \times e^{-i\frac{M}{2}\delta} \frac{\sin\left(\frac{M+1}{2}\delta\right)}{\sin\left(\frac{\delta}{2}\right)} e^{-i\frac{N}{2}\varepsilon} \frac{\sin\left(\frac{N+1}{2}\varepsilon\right)}{\sin\left(\frac{\varepsilon}{2}\right)} \quad (13)$$

可得相对衍射光强分布为:

$$I(x_2, y_2) = I_0 \text{sinc}^2\left[a\left(u - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - u_0\right)\right] \text{sinc}^2\left[a\left(v - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - v_0\right)\right] \times \left| \frac{\sin[\pi a(M+1)(u - u_0)]}{\sin[\pi a(u - u_0)]} \right|^2 \left| \frac{\sin[\pi a(N+1)(v - v_0)]}{\sin[\pi a(v - v_0)]} \right|^2 \quad (14)$$

式中: $u = \frac{\sin\theta_i \cos\phi_i}{\lambda}; v = \frac{\sin\theta_i \sin\phi_i}{\lambda}; u_0 = \frac{\sin\theta_i \cos\phi_i}{\lambda}; v_0 = \frac{\sin\theta_i \sin\phi_i}{\lambda}; \xi = \frac{1}{\lambda} \tan w(\cos\theta_i + \cos\theta_r)$ 。

2.5 衍射级次和衍射效率

利用公式(14)的衍射光强分布和一维光栅衍射理论^[13-14], 可得 DMD 二维光栅模型光栅方程:

$$u - u_0 = \frac{\sin\theta_i \cos\phi_i}{\lambda} - \frac{\sin\theta_r \cos\phi_r}{\lambda} = \frac{p}{a} \\ v - v_0 = \frac{\sin\theta_i \sin\phi_i}{\lambda} - \frac{\sin\theta_r \sin\phi_r}{\lambda} = \frac{q}{a} \quad (15)$$

式中: p, q 均为整数; (p, q) 表示不同的衍射主极大级次。因此, 各衍射主极大的光强分布:

$$I_{(m,n)}=I'\text{sinc}^2\left[a\left(\frac{p}{a}-\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right)\right]\text{sinc}^2\left[a\left(\frac{q}{a}-\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right)\right] \quad (16)$$

式中: $I'=(M+1)^2(N+1)^2I_0$ 。根据衍射效率的定义,各主极大级次的衍射效率为:

$$\eta=\frac{I_{(p,q)}}{I'}=\text{sinc}^2\left[a\left(\frac{p}{a}-\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right)\right]\text{sinc}^2\left[a\left(\frac{q}{a}-\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right)\right] \quad (17)$$

3 仿真分析

3.1 仿真计算

根据第 2 节推导的 DMD 二维光栅的数学模型,利用 MATLAB 建立 DMD 二维光栅模型。其中,入射光波长 λ 为 8~12 μm ,入射光束的空间方位角 φ_i 为 0~90°,入射天顶角 θ_i 为 0~90°。将 DMD 二维光栅模型参数代入方程(15),可得在 8~12 μm 波段,经二维光栅反射后出射的衍射光只有(-1,-1),(-1,0),(0,0),(0,-1)四个衍射级次,因此在仿真分析 DMD 的二维光栅模型时,只需计算光束不同入射角下,以上 4 个衍射级次的衍射角度和衍射效率^[14]。为便于表述,在此只列举了 $\lambda=10 \mu\text{m}$, φ_i 分别为 0°、45°、90°, θ_i 分别为 24°、36°、48°,DMD 微镜片分别处于全开和全关状态时,各衍射能级分布情况,如表 1、2 所示。

表 1 $\lambda=10 \mu\text{m}$,微镜片处于全开状态,各衍射能级衍射角及衍射效率

Tab.1 Diffraction angles and efficiencies at $\lambda=10 \mu\text{m}$ with all mirrors on states

Incident angle (φ_i, θ_i)	Diffraction angles (φ_r, θ_r) and efficiencies (η) for different orders			
	(-1,-1)	(-1,0)	(0,-1)	(0,0)
(0°,24°)	(66°, -53°;3%)	(0°, -19°;22%)	(-61°,57°;15%)	(0°,24°;60%)
(0°,36°)	(79°, -48°;4%)	(0°,8.8°;23%)	(-51°,70°;9%)	(0°,36°;64%)
(0°,48°)	(-89°,47°;2%)	(0°,0°;21%)	——	(0°,48°;77%)
(45°,24°)	(45°, -39°;6%)	(-33°, -32°;19%)	(-57°,32°;19%)	(45°,24°;56%)
(45°,36°)	(45°, -27°;4%)	(-53°, -31°;16%)	(-37°,31°;16%)	(45°,36°;64%)
(45°,48°)	(45°, -17°;4%)	(-69°, -34°;12%)	(-21°,34°;12%)	(45°,48°;72%)
(90°,24°)	(24°, -53°;3%)	(-29°, -57°;16%)	(-90°,19°;22%)	(90°,24°;59%)
(90°,36°)	(11°, -48°;3%)	(-39°, -70°;10%)	(-90°,8°;19%)	(90°,36°;68%)
(90°,48°)	(-1°, -47°;1%)	——	(90°,1°;16%)	(90°,48°;82%)

表 2 $\lambda=10 \mu\text{m}$,微镜片处于全关状态,各衍射能级衍射角及衍射效率

Tab.2 Diffraction angles and efficiencies

at $\lambda=10 \mu\text{m}$ with all mirrors off states

Incident angle (φ_i, θ_i)	Diffraction angles (φ_r, θ_r) and efficiencies (η) for different orders			
	(-1,-1)	(-1,0)	(0,-1)	(0,0)
(0°,24°)	(66°, -53°;1%)	(0°, -19°;7%)	(-61°,57°;6%)	(0°,24°;86%)
(0°,36°)	(79°, -48°;0.5%)	(0°,8.8°;6%)	(-51°,70°;5.5%)	(0°,36°;88%)
(0°,48°)	(-89°,47°;0.2%)	(0°,0°;4.8%)	——	(0°,48°;95%)
(45°,24°)	(45°, -39°;0.5%)	(-33°, -32°;6.8%)	(-57°,32°;6.7%)	(45°,24°;86%)
(45°,36°)	(45°, -27°;0.4%)	(-53°, -31°;5.6%)	(-37°,31°;6%)	(45°,36°;88%)
(45°,48°)	(45°, -17°;0.3%)	(-69°, -34°;4.5%)	(-21°,34°;5.2%)	(45°,48°;90%)
(90°,24°)	(24°, -53°;0.5%)	(-29°, -57°;6.8%)	(-90°,19°;6.7%)	(90°,24°;86%)
(90°,36°)	(11°, -48°;0.3%)	(-3°, -70°;5.4%)	(-90°,8°;6.3%)	(90°,36°;88%)
(90°,48°)	(-1°, -47°;0.4%)	——	(90°,1°;4.6%)	(90°,48°;95%)

由第 1 节中的 DMD 结构和工作原理可知,对于 DMD 型红外目标模拟器,为保证出射光束进入投影系统,出射光束空间方位角 φ_r 应与入射光空间方位角 φ_i 相同,出射光束天顶角 θ_r 应不大于目标模拟器投影系统的光束孔径角。此类红外目标模拟器投影系统的 F 数通常在 2.4~3 之间,对应的光束孔径角为 9.4~11.7°。在文中的仿真分析中,选取投影系统的 F 数为 2.8,对应的出射光束天顶角 θ_r 应小于 10.8°,才能保证出射光束进入投影系统。由表 1 和 2 可以看出:出射光束的 4 个衍射级次中,(-1,-1)和(0,0)级次的光束无法进入投影系统,只有(-1,0)和(0,-1)级次的光束进入投影系统;当光束入射角(φ_i, θ_i)为(0°,48°),DMD 微镜片全部处于开态时,有 21%的衍射光能量进入投影系统;当 DMD 微镜片全部处于关态时,有 4.8%的衍射光能量进入投影系统。当光束入射角(φ_i, θ_i)为(90°,48°)时,DMD 微镜片全部处于开态时,有 16%的衍射光能量进入投影系统;当 DMD 微镜片全部处于关态时,有 4.6%的衍射光能量进入投影系统。更详细的仿真计算表明:目标模拟器的照明光束入射空间方位角 φ_i 为 0°或 90°,入射天顶角 θ_i 为 38~50°时,处于开态的 DMD 微镜片,有 20%左右的衍射光进入投影系统,处于关态的 DMD 微镜片,有 4%左右的衍射光进入投影系统。

3.2 对比度分析

对于红外目标模拟器系统,其成像对比度定义为:

$$C=\frac{I_{\max}-I_{\min}}{I_{\max}+I_{\min}} \quad (18)$$

式中: $I_{\max}$ 表示 DMD 微镜片处于开态时,进入投影系统的最大光能量; $I_{\min}$ 表示 DMD 微镜片处于关态时,

进入投影系统的光能量, 将 3.1 节的仿真计算结果代入公式(18), 可得系统在不同入射角度下的成像对比度, 为便于表述, 列举部分入射角下目标模拟器系统成像对比度如表 3 所示。

表 3 $\lambda=10\ \mu\text{m}$, 不同入射角度下系统对比度

Tab.3 Contrast of scene projector system at

$\lambda=10\ \mu\text{m}$ with different incident angles

Incident angle(φ_i, θ_i)	Projector contrast (C)
($0^\circ, 38^\circ$)	0.53
($0^\circ, 42^\circ$)	0.68
($0^\circ, 46^\circ$)	0.74
($0^\circ, 50^\circ$)	0.51
($90^\circ, 38^\circ$)	0.48
($90^\circ, 42^\circ$)	0.62
($90^\circ, 46^\circ$)	0.66
($90^\circ, 50^\circ$)	0.42

由表 3 可以看出, 当光束入射角 θ_i 相同时, φ_i 为 0° 比 φ_i 为 90° 时系统的成像对比度高; 并且当入射角 θ_i 为 $42^\circ\sim 46^\circ$ 时, 系统的成像对比度达到最佳。

4 实验验证

实验室研制的红外目标模拟器结构如图 7 所示, 图 7(a)为目标模拟器光路设计图, 图 7(b)为装配后的目标模拟器光学系统结构图。在综合考虑了光学系统体积, 系统结构空间布局以及照明均匀性等因素的情况下, 照明系统光路采用阿贝照明方式, 既能保证入射到 DMD 表面照明光束的均匀性, 又实

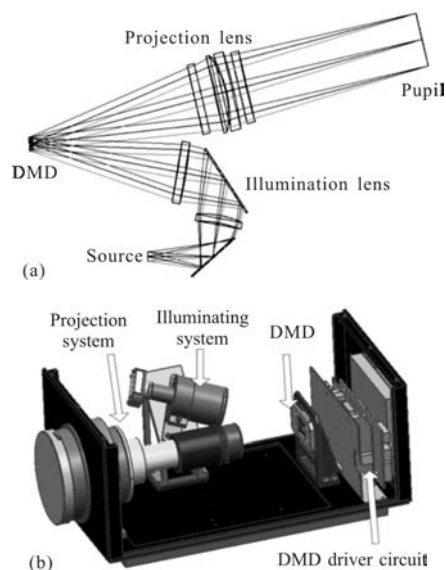


图 7 基于 DMD 的红外目标模拟器光学系统结构图

Fig.7 Optical system structure for DMD-based IR scene projector

现了远心照明; 投影系统光路采用反望远结构设计, F 数为 2.8, 满足系统大出瞳距和出射平行光的要求。根据第 2、3 节的 DMD 二维光栅衍射模型及其计算仿真结果, 利用实验室已研制的红外目标模拟器对模型结果进行验证分析。在红外仿真系中, 利用 DMD 控制系统输入红外图像, 调整目标模拟器照明系统光束入射角, 利用实验验证照明光束入射方位角 φ_i 为 0° 和 90° , 入射天顶角 θ_i 为 $38^\circ\sim 50^\circ$ 时, DMD 型目标模拟器系统生成的红外场景图像如图 8 所示; 图 8 为某城市部分区域航拍红外图像, 图 8(a)~(d)

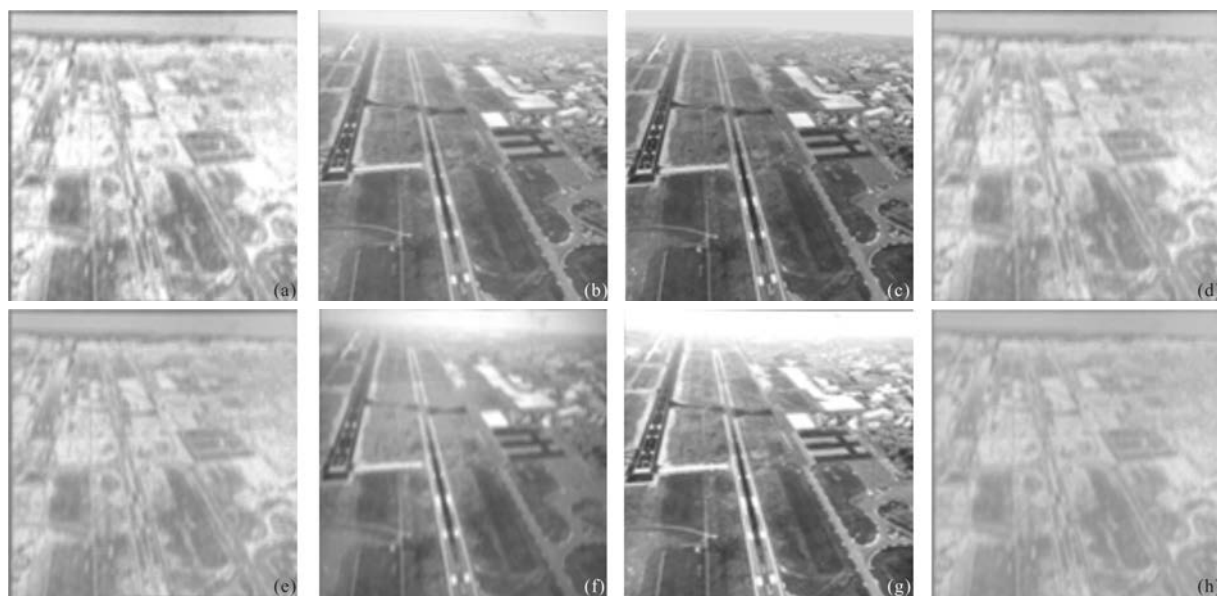


图 8 不同入射方位角和天顶角下, DMD 目标模拟器生成红外场景图

Fig.8 Infrared scene generated by DMD-based IR scene projector with different incident angles and zenith angles

对应照明光束入射空间方位角 φ_i 为 0° , 入射天顶角 θ_i 分别为 38° 、 42° 、 46° 、 50° 。图 8(e)~(h) 对应照明光束入射空间方位角 φ_i 为 90° , 入射天顶角 θ_i 分别为 38° 、 42° 、 46° 、 50° 。由图 8(c) 组和 (d) 组图片对比可以看出: 入射天顶角 θ_i 相同时, 照明光束以 0° 方位角入射时, DMD 型目标模拟器生成的红外场景图像质量更好。而对于相同入射方位角, 入射天顶角为 42° 和 46° 时, 生成的图像质量更好。更详细的实验结果表明: 当入射天顶角 θ_i 为 44° ~ 48° 时, DMD 型目标模拟器生成的红外场景图像对比度最好。由此可知, 实验结果与第 2、3 节 DMD 二维光栅模型仿真计算结果一致, 证明该二维光栅模型可用于分析 DMD 在长波红外波段的衍射特性。

5 结 论

针对 DMD 型目标模拟器应用于长波红外波段时, DMD 衍射效应严重、系统成像对比度较差的问题, 文中首先利用光栅衍射理论和傅里叶变化推导出 DMD 二维光栅衍射的数学模型, 然后对 DMD 在长波红外波段的衍射特性进行了仿真计算和实验分析。最后得出结论: 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段, 照明光束的入射方位角 φ_i 为 0° , 入射天顶角 θ_i 为 44° ~ 48° 时, 目标模拟器生成的红外场景图像对比度达到最佳, 系统的成像质量最好。

文中建立的 DMD 二维光栅模型, 为分析 DMD 在长波红外波段的衍射特性提供了很好的理论依据和仿真计算模型。该光栅模型对 DMD 型目标模拟器应用于长波红外波段具有重要的参考价值和指导意义。同时文中由仿真计算得出: 在 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 波段, 只有 20% 左右的衍射光被目标模拟器利用, 如何提高 DMD 衍射光能量效率是下一步需开展研究的工作。

参考文献:

- [1] Zhang Li, Tian Yi, Li Qi, et al. Research status and prospect of dynamic infrared scene projector [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1423–1431. (in Chinese)
- [2] Xu Jialin, Wang Xiaodong, Li Bingyu, et al. Method to transfer and store image data of infrared scene projector based on DMD[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2622–2626. (in Chinese)
- [3] Sun Yongxue, Long Funian, Meng Qingyu, et al. Infrared target simulator's polarizing beamsplitter system based on digital-micromirror device [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(6): 1423–1431. (in Chinese)
- [4] Zhang Shuqing, Wang Jingyang, Wang Zhile, et al. Design of infrared optical system for multi-target compounded simulator [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1454–1460. (in Chinese)
- [5] Zhang Jianzhong. Study on the optical system of an infrared dual-band scene simulator [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics & Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [6] Dupuis J R, Mansur D J. Considerations for DMDs operating in the infrared[C]//SPIE, 2012, 8254: 0J–1–0J–12.
- [7] Chen Erzhu, Liang Pingzhi. DMD dynamic infrared scene projection technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(4): 331–334. (in Chinese)
- [8] Dupuis J R, Mansur D, Vaillancourt R, et al. High-dynamic range DMD-based IR scene projector[C]//SPIE, 2013, 8618: 0R–1–0R–9.
- [9] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micro-mirror device(DMD) applications[C]//SPIE, 2003, 4985: 14–25.
- [10] Rice J P, Jorge E, Michael K, et al. DMD diffraction measurements to support design of projectors for test and evaluation of multispectral and hyperspectral imaging sensors [C]//SPIE, 2009, 7210: 0D–1–0D–9.
- [11] Xu Fuyang, Li Yong, Gao Zhiqiang, et al. Diffraction characteristics of DMD and its applications in holographic display[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(3): 332–335. (in Chinese)
- [12] Meuret Y, De Visschere P. Contrast-improving methods for Digital Micro-mirror Device projectors [J]. *Optical Engineering*, 2003, 42(3): 840–845.
- [13] Hutley M H. Diffraction Gratings [M]. New York: Academic Press, 1982: 36–38.
- [14] O'Shea D C. Elements of Modern Optical Design [M]. New York: Wiley, 1985: 327–328.