

引用格式: ZHAO Duo, ZHANG Guoyu, XU Da, et al. A Diffraction Correction Method Based on Digital Mirror Device Star Simulator[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(9):0912005

赵铎, 张国玉, 徐达, 等. 一种基于数字微镜星模拟器的衍射校正方法[J]. 光子学报, 2021, 50(9):0912005

## 一种基于数字微镜星模拟器的衍射校正方法

赵铎<sup>1,3</sup>, 张国玉<sup>1,2,3</sup>, 徐达<sup>1,2,3</sup>, 王立<sup>4</sup>, 孙高飞<sup>1,2,3</sup>, 钟俊<sup>4</sup>, 梁士通<sup>4</sup>, 吴凌昊<sup>1,3</sup>

(1 长春理工大学 光电工程学院, 长春 130022)

(2 吉林省光电测控仪器工程技术研究中心, 长春 130022)

(3 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 长春 130022)

(4 北京控制工程研究所, 北京 100190)

**摘要:**为解决星模拟器在光谱模拟时存在的衍射问题,提出一种消除数字微镜设备衍射效应的方法。建立标量衍射模型,将数字微镜设备等效为二维闪耀光栅,以光栅衍射理论为基础寻找影响衍射能级的因素,并推导出入射角与衍射效应的耦合关系。当光束沿数字微镜设备对角线入射,高度角为 $24^\circ$ 时,衍射效率达到最大化提高,衍射效率提高近12%,此时衍射损耗能量最少,数字微镜设备反射时存在衍射效应达到最小,通过ZEMAX优化设计出Czerny-Turner光学结构,校正系统像差。优化结果表明,在500~900 nm谱段内,光谱模拟精度优于5%,全谱段的光谱分辨率优于5 nm,可有效提升星敏感器地面标定精度。

**关键词:**星模拟器;衍射效应;光谱模拟;光学设计;Czerny-Turner结构

中图分类号:V524.3;TH744

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20215009.0912005

## A Diffraction Correction Method Based on Digital Mirror Device Star Simulator

ZHAO Duo<sup>1,3</sup>, ZHANG Guoyu<sup>1,2,3</sup>, XU Da<sup>1,2,3</sup>, WANG Li<sup>4</sup>, SUN Gaofei<sup>1,2,3</sup>, ZHONG Jun<sup>4</sup>, LIANG Shitong<sup>4</sup>, WU Linghao<sup>1,3</sup>

(1 College of Opto-electrical Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

(2 Jilin Engineering Research Centre of Photoelectric Measurement and Control Instruments, Changchun 130022, China)

(3 Key Laboratory of Optical Control and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun 130022, China)

(4 Beijing Control Engineering Research Institute, Beijing 100190, China)

**Abstract:** In order to solve the diffraction problem in the spectrum simulation of the star simulator, a method to eliminate the diffraction effect of the Digital Mirror Device (DMD) is proposed. A scalar diffraction model is established, and the DMD is equivalent to a two-dimensional blazed grating. Based on the grating diffraction theory, the factors affecting the diffraction energy level are searched for, and the coupling relationship between the incident angle and the diffraction effect is deduced. When the light beam is incident along the diagonal of the DMD and the height angle is equal to the angle of height, the diffraction efficiency is maximized, and the diffraction efficiency is increased by nearly 12%. At this time,

基金项目:吉林省科技厅项目(No.20200401046GX)

第一作者:赵铎(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为星模拟器。Email:1094688132@qq.com

导师(通讯作者):张国玉(1962—),男,教授,博士,主要研究方向为航天器模拟实验与标定技术。Email:zh\_guoyu@163.com

收稿日期:2021-04-08;录用日期:2021-06-08

<http://www.photon.ac.cn>

the diffraction loss energy is the least, and the diffraction effect when the DMD reflects is minimized. Through ZEMAX Optimal design of Czerny-Turner optical structure to correct system aberrations. The optimization results show that the spectral simulation accuracy is better than 5% in the 500~900 nm spectral range, and the spectral resolution of the full spectral range is better than 5 nm, which can effectively improve the ground calibration accuracy of the star sensor.

**Key words:** Star simulator; Diffraction effect; Spectral simulation; Optical design; Czerny-Turner structure

**OCIS Codes:** 120.4800; 050.1950; 220.3620; 260.1960

## 0 引言

近年来,随着航天事业的迅速发展,对空间飞行器的姿态导航精度要求越来越高。星敏传感器作为一种精度最高的空间姿态导航敏感器,对其测量精度和测试条件也提出了越来越高的需求<sup>[1-2]</sup>。目前,星敏传感器的姿态导航精度已经达到角秒级别,随着星敏传感器精度的提高,由恒星色温引起的星点位置精度和极限星等的探测造成的误差越来越不可忽略。因此,星敏传感器地面定标设备的精度需进一步提高来满足我国未来航天事业的发展。

安徽光机所翟文超等设计的场景光谱模拟定标光源,运用色散棱镜进行色散,但色散的非线性严重影响整个光谱模拟的拟合精度<sup>[3]</sup>。长春理工大学张晓娟等采用氙灯和卤钨灯混合形成的积分球光源的星模拟器系统,使得光谱模拟误差小于10%<sup>[4]</sup>。西安光学精密机械研究所李晓妮等采用双积分球法,设计以白色发光二极管(Light Emitting Diode,LED)光源为基底光源,多种不同峰值波长的窄带LED光源对光谱进行补偿,使星模拟器光谱点模拟误差控制在10%以内,星等误差达到5%<sup>[5]</sup>。目前国内外对光谱模拟系统所使用光源的研究主要有三个方向;首先是氙灯积分球光源,以氙灯或者卤素灯为基底,光源模拟精度依赖于滤光片的制作水平,整体光谱模拟精度较低;其次以多种LED作为光源,通过积分球匀光来模拟光谱,其整体结构复杂,光谱模拟精度低;最后是以分光棱镜或光栅和空间光调制器件组成光谱可调光源,其辐照度较低且结构相对复杂,但具有体积小、光谱分布可控和光谱模拟精度高等优点<sup>[6]</sup>。在高精度光谱模拟的过程中,空间光调制器与光栅共同参加光谱调制,在可见光和近红外光在反射时都会存在衍射能量损耗问题,使得光谱模拟精度下降。为解决此问题,本文在高精度光谱模拟时,采用光栅和数字微镜设备(Digital Mirror Device, DMD)组成的光谱可调星模拟器光源,并消除DMD调制光谱时存在的衍射效应,减少了空间光调制器在反射时的能量损耗,从而达到光谱模拟更高精度的标准。

本文针对基于DMD恒星光谱模拟技术中模拟精度受DMD衍射效应影响进行研究,通过建立DMD标量衍射模型,推导出DMD衍射效应与光束入射角之间的关系,减少衍射能量损耗,提高了光谱模拟精度。

## 1 基于DMD星模拟器总体设计

基于DMD星模拟器总体设计方案如下,其主要由光源、光谱调制系统、准直光学系统和计算机控制系统组成,工作原理如图1。

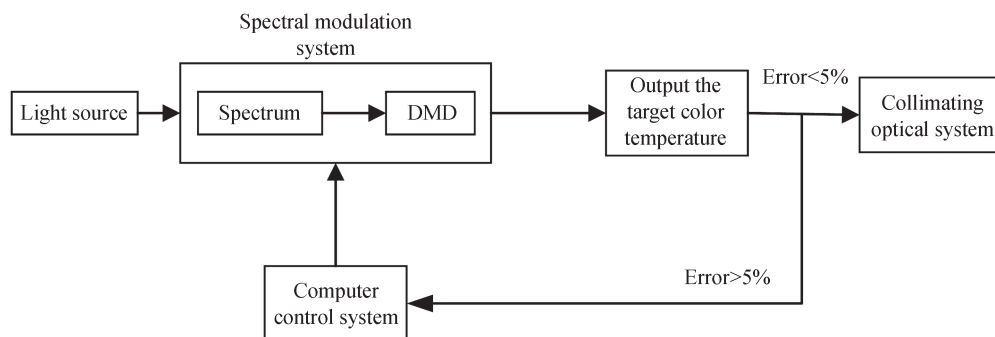


图1 基于DMD星模拟器总体流程  
Fig.1 Based on the overall process of the DMD star simulator

其中光源的作用是为光谱调制系统提供可以进行调制的宽光谱光束,光谱调制系统将已知色温宽光谱光束的各个谱段的光线进行精确细分,细分后的各个谱段的光线依次排列在DMD上,通过控制数字微镜的偏折方向对光谱曲线进行调制。当光谱模拟误差大于5%时,由计算机系统控制返回到光谱调制系统进行光谱调制,当光谱模拟误差小于5%时,将模拟的目标色温通过准直光学系统投射出去。

光谱调制系统包含了DMD以及光栅,其中DMD存在衍射效应,其衍射效应使得整个系统最后输出的光场分布发生变化,导致光谱模拟精度下降;光栅具有分光作用,光源发出的光可通过光栅进行分光,使得不同波段的光排布到DMD上,然后进行目标色温的输出。

## 2 DMD标量衍射模型

DMD是基于微机械加工技术的反射式空间光调制器,通过控制DMD微镜片的偏转来实现对入射光束的调制<sup>[7]</sup>。由于DMD本身存在衍射特性,可将DMD等效为特殊的二维闪耀光栅<sup>[8]</sup>。建立标量衍射模型来具体分析衍射效应。

当DMD处于工作状态时,对应微镜沿着其对角线进行偏转,偏转角度为 $\pm 12^\circ$ ,此时DMD微镜等效的二维光栅模型闪耀角为 $\pm 12^\circ$ <sup>[9]</sup>,在DMD等效二维光栅模型中,其微镜间距小于 $1\ \mu\text{m}$ ,可以忽略不计。如图2,微镜边界尺寸为 $a \times b$ ,微镜尺寸等效为光栅常数 $d$ 。由光栅衍射理论<sup>[10]</sup>可得

$$d \sin\theta = \pm k\lambda \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

由式(1)可知,光栅衍射能级分布是由光束入射波长 $\lambda$ 、光入射角度 $\theta$ 以及光栅常数 $d$ 共同决定。对于已知入射波长和已定光栅常数的闪耀光栅,衍射级次的分布由入射角度 $\theta$ 决定<sup>[11]</sup>。当入射角度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,入射角度不满足闪耀条件时,则无主闪耀级次的出现<sup>[12]</sup>。

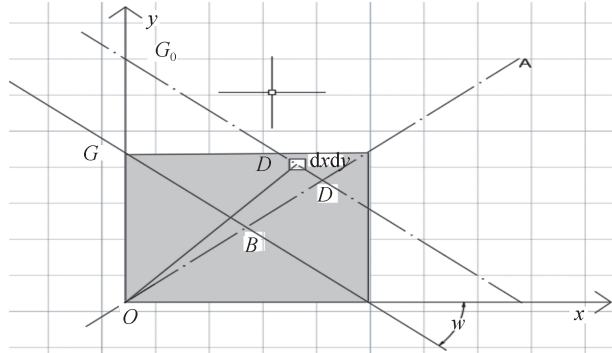


图2 DMD单个微镜示意  
Fig.2 Schematic of single DMD single mirror

由图可知,处于同一个主对角焦线 $G$ (以及与主对角线的平行线,如 $G_0$ )上的各微镜 $dx dy$ 之间没有位相差。当光束是沿着副对角线方向 $A$ 入射,沿着副对角线方向,处于不同平行线的各微镜之间有位相差,将该位相差的关系沿着副对角线方向考虑。考虑到如图2所示的几何关系,可以得到微镜 $dx dy$ 相对于原点 $O$ 的位相差,即反射光存在位相差<sup>[13]</sup>,存在的相位差可表示为

$$\varphi(x, y) = K\Delta(x, y) = \sqrt{2} \pi / \lambda \tan\omega (\cos\theta_i + \cos\theta_r)(x + y) \quad (2)$$

令 $\xi = \frac{1}{\lambda} \tan\omega (\cos\theta_i + \cos\theta_r)$ ,经过简化可得

$$\varphi = \sqrt{2} \pi \xi (x + y) \quad (3)$$

式中, $\varphi$ 为相位差, $K$ 为光波波矢, $\Delta$ 为光程差, $\theta_i$ 为光束入射角, $\theta_r$ 为光束偏转角, $\omega$ 为微镜片偏转角。

单个微镜的反射原理如图3,当单色光入射到DMD上,微镜发生偏转,DMD单个微镜发生反射,则DMD单个微镜反射率函数为

$$r(x_1, y_1) = \left[ \text{rect}\left(\frac{x_1}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y_1}{b}\right) \right] e^{i\varphi} \quad (4)$$

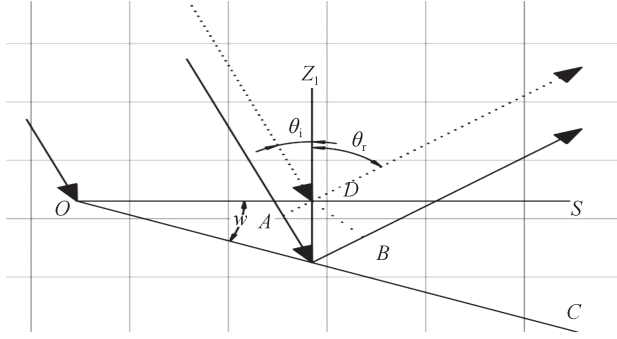


图3 DMD单个微镜反射原理  
Fig.3 Reflection schematic of DMD single mirror

DMD总体结构由  $m \times n$  个微镜构成,则DMD总体微镜反射函数也是由单个微镜合并而成,则DMD总体微镜反射率函数为

$$R(x, y) = r_{1,1} + r_{1,2} + r_{2,1} + r_{2,2} + \dots + r_{m,n} = \text{rect}\left(\frac{x}{a}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{b}\right) e^{i\phi} \otimes \sum_m^M \xi(x - ma) \otimes \sum_n^N \xi(y - nb) \quad (5)$$

设照明光源为单色平行光,当光束从副对角线方向入射,则可表示为

$$e(x, y) = e^{ikr} = e^{i2\pi(x \cos\alpha + y \cos\beta)} = \exp\left[i2\pi\left(\frac{\sin\theta_i \cos\phi_i}{\lambda} x + \frac{\sin\theta_i \sin\phi_i}{\lambda} y\right)\right] \quad (6)$$

式中,  $\theta_i$  为入射高度角(即光束入射面与  $z$  轴或法线夹角),  $\phi_i$  为入射光空间方位角(即光束入射面与  $x-o-y$  夹角)。

由DMD微镜总反射函数和入射光线照明函数可以得到光振动函数分布  $U(x, y) = R(x, y)e(x, y)$ , 经傅里叶变换,则DMD衍射振幅分布为

$$U(x, y) = cF[u(x, y)] = ca^2 \text{sinc}\left[a\left(u - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - u_0\right)\right] \text{sinc}\left[b\left(v - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - v_0\right)\right] \times \sum_{i=0}^m e^{-i2\pi ma(u - u_0)} \sum_{i=0}^n e^{-i2\pi na(v - v_0)} \quad (7)$$

令  $u = \frac{\sin\theta_r \sin\phi_r}{\lambda}$ ,  $v = \frac{\sin\theta_r \sin\phi_r}{\lambda}$ ,  $u_0 = \frac{\sin\theta_i \cos\phi_i}{\lambda}$ ,  $v_0 = \frac{\sin\theta_i \sin\phi_i}{\lambda}$ , 其中  $\phi_r$  为衍射方位角(即衍射方向与  $x$  轴的夹角)。则衍射光强为

$$I(x, y) = I_0 \text{sinc}^2\left[a\left(u - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - u_0\right)\right] \text{sinc}^2\left[b\left(v - \frac{\xi}{\sqrt{2}} - v_0\right)\right] \times \left|\frac{\sin[m\pi a(u - u_0)]}{\sin[\pi a(u - u_0)]}\right|^2 \left|\frac{\sin[n\pi b(v - v_0)]}{\sin[\pi b(v - v_0)]}\right|^2 \quad (8)$$

由于DMD的抽样特性,输入图像的频谱被多重复制,出现在每一个衍射级次上,同时整体衍射强度分布受到  $\text{sinc}$  函数的调制<sup>[14]</sup>,主级衍射光强与入射光强的比值为衍射效率,衍射光强改变则衍射效率随之改变。经理论推导得出,在500~900 nm波段内,入射方位角对衍射效率影响较小,因此选取入射方位角为45°来研究入射高度角对衍射效率影响。

对于DMD型光谱可调星模拟器,为保证出射光束进入投影系统,出射光的衍射角度  $\phi$  需要与入射空间方位角  $\phi_i$  相同,并对投影系统的  $F$  数以及光束的入射高度角  $\theta$  要求较高。选用500 nm、650 nm、900 nm波长为例,探究衍射效率与入射高度角之间的关系。控制入射光束沿对角线方向入射,其入射方位角为45°,选取12°~30°的入射高度角为变量。由图4可知,当  $\lambda=500$  nm时衍射效率提高了近2%;  $\lambda=650$  nm时衍射效率提高了近7%;当  $\lambda=900$  nm时衍射效率提高了近12%。由此可知,当改变入射高度角,其衍射效率会逐渐提高,对应衍射效应逐渐减小。由实验数据可知,当入射高度角在24°到30°时对应衍射效率变化较小,当入射高度角大于24°并持续增加时,光谱可调星模拟器光学系统的设计难度大大提高。综合考虑,选取入射高度角为24°,此时DMD存在衍射效应较小,同时模拟出光谱的模拟精度较好。

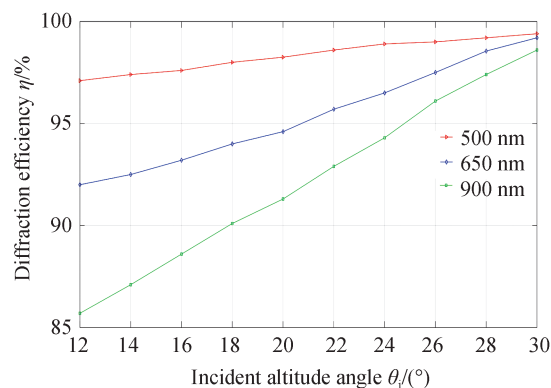


图4 DMD入射高度角与衍射效率关系

Fig.4 Relationship between DMD incident altitude angle and diffraction efficiency

### 3 基于DMD星模拟器光学系统设计

光谱调制系统采用Czerny-Turner<sup>[15]</sup>结构,如图5。在Czerny-Turner系统光路图中,入射光束通过狭缝入射到球面反射镜上,光束经球面反射镜反射到光栅上,光栅具有色散作用,可将宽光谱光束进行细分,细分后的光束经过聚焦反射镜反射到DMD上,由于DMD器件具有特殊性,其衍射效应使得整个系统的最后输出的光场分布发生变化,影响光谱调制精度和模拟精度。以DMD衍射效应与DMD光束入射角度耦合关系为基础,通过优化聚焦镜到DMD阵列面的光束入射角度,减小DMD衍射效应。

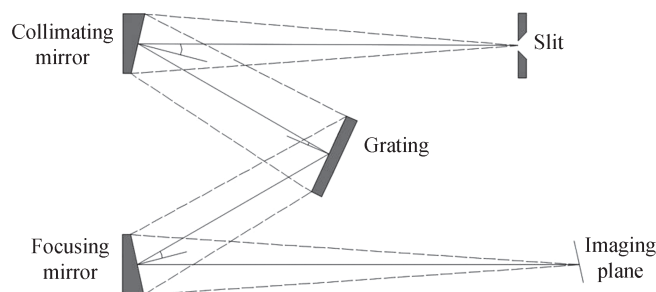


图5 Czerny-Turner系统光路

Fig.5 Schematic of Czerny-Turner optical system

设计后光谱调制光学系统光路如图6。

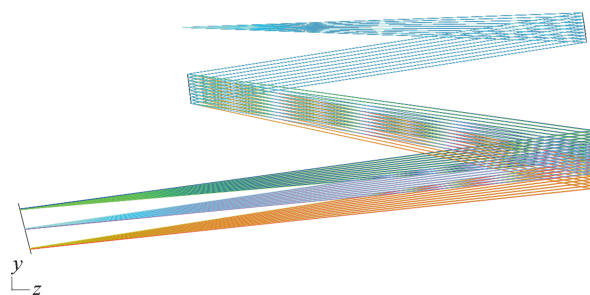


图6 光谱调制光学系统光路

Fig.6 Optical path of the optical system modulated by spectrum

光谱调制光学系统的成像质量如图7和图8。图7为光学系统点列图,由图7可以看出,整个光谱范围内彗差校正良好,并且光学系统全波段的光谱分辨率优于5 nm;由图8光学系统RMS半径随波长的变化曲线可以看出,在整个谱段范围内,沿y方向的光斑大小均小于7  $\mu\text{m}$ ,满足设计要求。

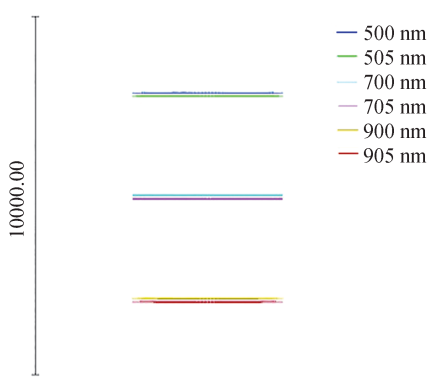


图7 光学系统点列图  
Fig.7 Spot diagram of optical system

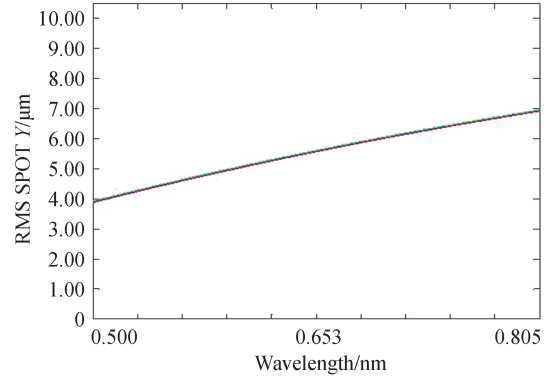


图8 光学系统RMS半径随波长的变化  
Fig.8 Change of optical system RMS with wavelength

## 4 测试

对基于DMD星模拟器光源系统进行试验验证,分别测试优化前后系统输出全光谱和模拟光谱。首先,对基于DMD星模拟器光源系统的输出的全光谱进行测试,测试结果如图9。

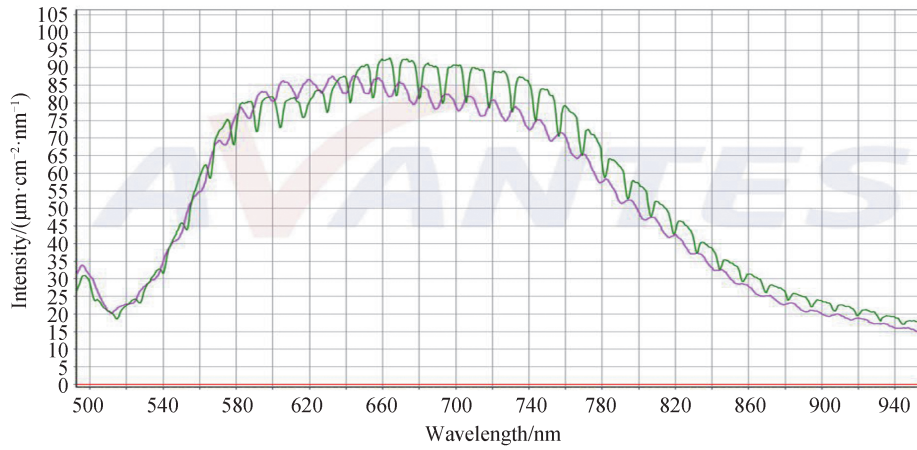


图9 光源系统输出全光谱  
Fig.9 The light source system outputs the full spectrum

由图9可知,图中绿色线段代表优化前光源系统输出光谱曲线,粉色线代表DMD消衍射后光源系统输

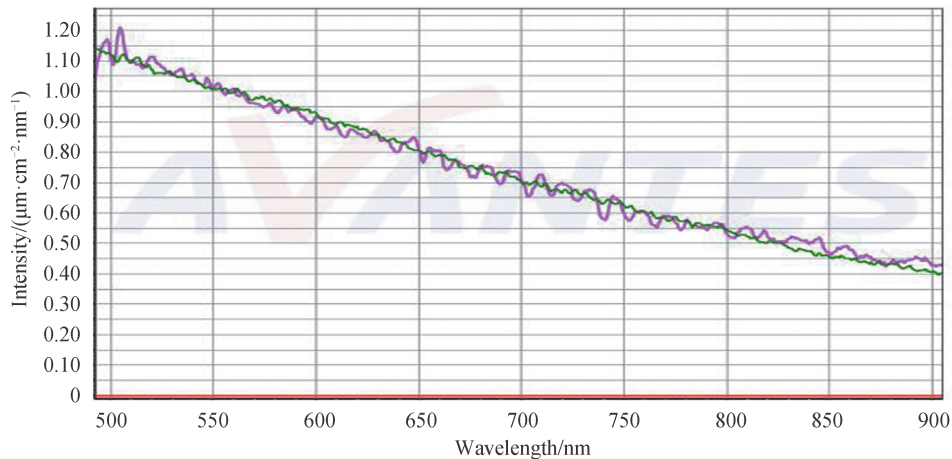


图10 光谱优化前曲线  
Fig.10 Curve before spectrum optimization

出光谱曲线,经过优化后的基于DMD星模拟器光源系统的DMD衍射效应明显降低。并以 $T=7\ 000\ \text{K}$ 色温为例,对优化前后的目标光谱进行调制。图10为优化前光谱曲线,光谱曲线在衍射效应的影响下,曲线波动较大。图11为优化后光谱曲线,消除衍射效应后,其光谱调制曲线波动明显减弱。由图12可知,通过优化前后可使光谱调制曲线波动明显减弱,其光谱模拟精度也可有效提高,通过光谱调制曲线的对比,消除衍射效应后可达到光谱高精度模拟的标准。由此可知,当控制入射光束空间方位角为 $45^\circ$ 时,入射高度角为 $24^\circ$ 时,光谱模拟精度明显提高。测试结果表明,通过控制聚焦镜到DMD阵列面的光束入射角度,可以减少DMD存在的衍射效应,有效提升光谱模拟精度。实现了恒星光谱高精度模拟,并减小光谱不匹配带来的标定误差。

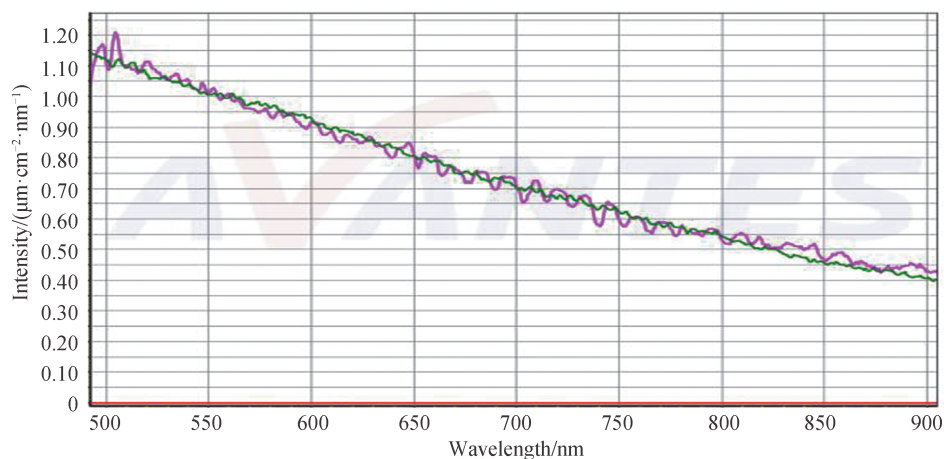


图11 光谱优化后曲线

Fig.11 Optimized spectral curve

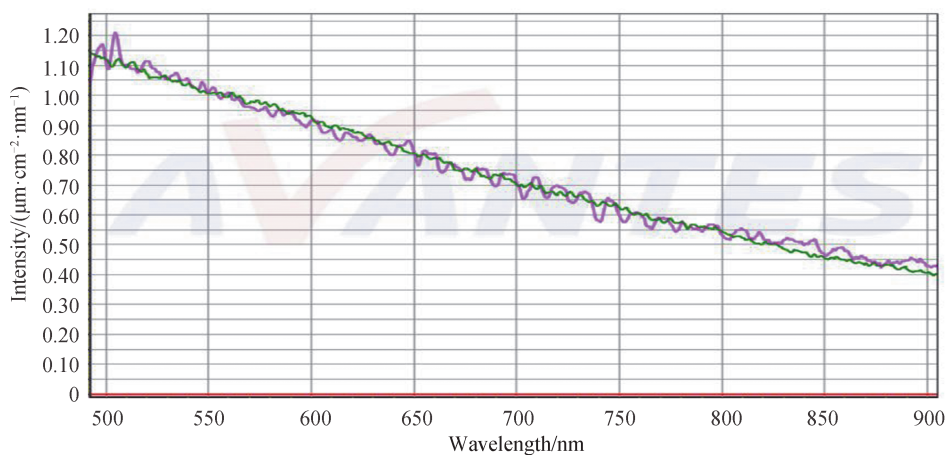


图12 光谱调制曲线

Fig.12 Spectral modulation curve

## 5 结论

本文针对星模拟器在光谱模拟中存在的衍射问题,提出了一种消除DMD衍射效应的解决方法,使光谱模拟精度有效提高。从DMD衍射效应与光束入射角度耦合关系开始分析,运用标量衍射模型,并以耦合关系为基础设计出Czerny-Turner光学结构。通过消除衍射效应,可有效降低光谱精度低带来的标定误差。通过综合数据可知,当DMD光束入射光束空间方位角为 $45^\circ$ ,入射高度角为 $24^\circ$ ,DMD反射时存在衍射效应较小。因此消除DMD存在的衍射效应,可提升光谱模拟精度。通过实验数据可知,消除衍射效应后,光谱调制准确性可优于5%。消除DMD衍射效应对光谱模拟以及对航天地面标定具有重要意义。

## 参考文献

- [1] SUN Gaofei. Research on very high precision star simulator and its key technology[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.  
孙高飞. 甚高精度星模拟器及其关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [2] DAI Yu. Design and research of optical system of large field of view and high dynamic star simulator [D]. Chengdu: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences), 2020.  
代雨. 大视场高动态星模拟器光学系统的设计与研究[D]. 成都: 中国科学院大学(中国科学院光电技术研究所), 2020.
- [3] ZHAI Wenchao, ZHENG Xiaobing. Calibration light source system and characteristic analysis based on digital micromirror device[C]. Small Satellite Technology Exchange Conference, 2015.  
翟文超, 郑小兵. 基于数字微镜器件的定标光源系统及特性分析[C]. 小卫星技术交流会, 2015.
- [4] ZHANG Xiaojuan, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Study on the spectrum of star simulator based on mixed light source[J]. Acta Photonica Sinica, 2014, 43(2): 39-44.  
张晓娟, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于混合光源的星模拟器光谱研究[J]. 光子学报, 2014, 43(2): 39-44.
- [5] LI Xiaoni, WU Cuigang, ZHAO Xi, et al. Automatic calibration type spectrum adjustable star simulator light source system [J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(5): 179-184.  
李晓妮, 吴璀罡, 赵晞, 等. 自动标定型光谱可调星模拟器光源系统[J]. 光子学报, 2015, 44(5): 179-184.
- [6] LIU Hongxing, SUN Jinghong, LIU Zexun, et al. Integrating sphere solar spectrum simulator with xenon lamp and light emitting diode as light source[J]. Optical Precision Engineering, 2012, 20(7): 1447-1454.  
刘洪兴, 孙景旭, 刘则洵, 等. 氙灯和发光二极管作光源的积分球太阳光谱模拟器[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1447-1454.
- [7] HAN Qing, WANG Jian, XIONG Zheng, et al. Analysis of DMD diffraction characteristics of infrared target simulator[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(5): 101-107.  
韩庆, 王健, 熊峥, 等. 红外目标模拟器的DMD衍射特性分析[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(5): 101-107.
- [8] HE Yongqiang, TANG Delong, WANG Long, et al. DMD diffraction characteristics and its application in infrared scene simulation[J]. Laser and Infrared, 2013, 43(8): 935-938.  
何永强, 唐德帅, 王龙, 等. DMD衍射特性及其在红外场景仿真中的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(8): 935-938.
- [9] RYOO H, KANGD W, HAHN J. Analysis of the effective reflectance of digital micromirror devices and process parameters for maskless photolithography, 2011, 88(3): 235-239.
- [10] XU Meijia, WANG Hailin, TAN Weishi. Theoretical analysis and experimental study of grating diffraction characteristics at oblique incidence[J]. College Physics Experiment, 2014, 27(4): 34-37.  
徐美嘉, 王海林, 谭伟石. 斜入射时光栅衍射特性的理论分析及实验研究[J]. 大学物理实验, 2014, 27(4): 34-37.
- [11] DMITRY V, ANTON T, MANUEL A Q, et al. Measurements of the reflectance, contrast ratio, and scattering properties of digital micromirror devices (DMDs)[C]. SPIE, 2016, 9912: 99125U.
- [12] PANG Guangning. Research on key technology of infrared target simulation system based on DMD [D]. Changchun : Changchun University of Science and Technology, 2018.  
庞广宁. 基于DMD的红外目标模拟系统关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018.
- [13] CHEN Xiao, YAN Fenfen, SONG Feijun, et al. Diffraction characteristics of DMD grating and its application in tunable laser[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 66-72.  
陈笑, 颜纷纷, 宋菲君, 等. DMD光栅的衍射特性及其在可调谐激光中的应用[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 66-72.
- [14] XIONG Zheng. Research on digital lithography technology based on DMD [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016.  
熊峥. 基于DMD的数字光刻技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016.
- [15] XU Da, ZHANG Guoyu, SUN Gaofei, et al. Design of the optical system of the star simulator light source based on the adjustable DMD spectrum[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(7): 0722002.  
徐达, 张国玉, 孙高飞, 等. 基于DMD光谱可调的星模拟器光源光学系统设计[J]. 光子学报, 2017, 46(7): 0722002.