

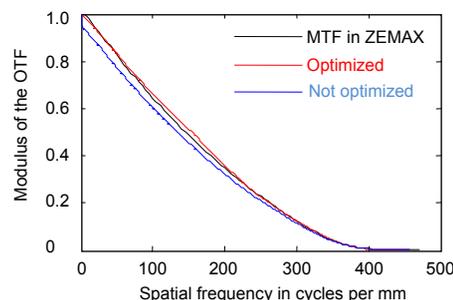


## 主镜台阶数目对衍射成像系统传递函数的影响分析

刘盾<sup>1,2\*</sup>, 杨伟<sup>1</sup>, 吴时彬<sup>1</sup>, 伍凡<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院光电技术研究所, 成都 610209;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049



**摘要:** 为研究位相型菲涅尔透镜台阶近似引起的衍射杂散光对衍射成像系统调制传递函数(MTF)的影响, 本文运用波动光学仿真分析方法模拟光波的传播。通过有限个级次的衍射波面在系统像面上相干叠加, 得到系统的点扩散函数(PSF); 对其进行傅里叶变换, 得到系统的 MTF。以菲涅尔主镜口径为 80 mm 的衍射成像系统为样机, 分析了衍射主镜台阶数目为二、四、八时, 系统 MTF 与设计值的差异。结果表明, 随着衍射主镜台阶数目的增加, 衍射杂散光对系统 MTF 的影响减小; 并且四台阶时, 与设计值的偏差已经小于 0.5%。最后结合几何光线追迹仿真分析, 提出将衍射主镜加工成中心区域多台阶、边缘部分为二台阶的思路, 降低了衍射杂散光的影响。

**关键词:** 衍射成像系统; 二元位相型菲涅尔透镜; 衍射杂散光; 调制传递函数

中图分类号: O436.1

文献标志码: A

## Effect of the number of primary lens level on the MTF of diffractive imaging system

Dun Liu<sup>1,2\*</sup>, Wei Yang<sup>1</sup>, Shibin Wu<sup>1</sup> and Fan Wu<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; <sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** In order to study the effect of diffractive stray light on the modulation transfer function (MTF) caused by the binary phase-type Fresnel lens, the wave propagation method was used to simulate the propagation of light waves. The point spread function (PSF) of the system was obtained by coherent superposition of infinite diffractive orders, and the MTF was obtained by the Fourier transform of the PSF. The differences between the modified values and the theoretical design values were analyzed when the number of level was 2, 4 and 8 at the diffraction imaging system with an 80 mm Fresnel lens as primary lens. The results show that the effect of diffractive stray light on the MTF of the system decreases with the increase of the number of level. However, the deviation from the design value is less than 0.5% when the level is 4. Finally, we put forward the idea that the central region of the lens is processed into several levels and the edge part is 2-level to reduce the effect of diffractive stray light. The results show that the idea can achieve the purpose of suppressing effect of diffractive stray light.

**Keywords:** diffractive imaging system; binary phase-type Fresnel lenses; diffractive stray light; MTF

**DOI:** 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.08.004

**Citation:** *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(8): 786–790

收稿日期: 2017-03-04; 收到修改稿日期: 2017-04-30

\*E-mail: 1102444622@qq.com

## 1 引言

二元相位型菲涅尔衍射透镜通过在薄型平面基底上制作微结构菲涅尔环带实现光波调制,具有体积小、重量轻的特点。越来越多的研究者开始探索使用这类衍射透镜作为大口径望远系统的主镜<sup>[1-6]</sup>,通常称这一类系统为衍射成像系统。然而在成像系统中引入二元相位型菲涅尔透镜后,由于存在多个衍射级次,目标物体发出的光经过非设计级次衍射直接到达像面后形成本征杂散光,会对系统的调制传递函数(modulation transfer function, MTF)产生影响<sup>[7,8]</sup>。增加台阶数目有利于提高设计级次的衍射效率,使非设计级次的衍射效率相应减少。但是台阶数目增加后,加工成本和难度也将增加,同时微结构的最小尺寸将逐渐达到波长量级,基于标量衍射理论分析带来的误差也不容忽视。因此在实际应用中需要综合考虑系统性能和加工难度,选择最优的台阶数目。

本文以 MTF 作为系统性能的评价指标,研究了衍射主镜台阶数目不同时衍射杂散光对 MTF 的影响大小。采用波动光学仿真分析方法模拟光波在衍射成像系统中的传播,实现衍射元件分束后衍射波面在系统像面的相干叠加。文章首先介绍了衍射透镜在波动光学仿真分析中的建模以及由仿真结果计算衍射成像系统 MTF 的方法。然后以衍射主镜口径为 80 mm 的衍射成像系统为样机,研究了衍射主镜台阶数目为二、四、八时,衍射杂散光对 MTF 的影响,并结合几何光线追迹方法探索了抑制本征杂散光影响的措施。

## 2 衍射成像系统 MTF 计算方法

由于多级衍射现象的存在,含有衍射元件的光学系统的 MTF 与设计值有差异。Buralli 等人建立了系统出瞳处的积分衍射效率与 MTF 的关系<sup>[7]</sup>,但精确获取积分衍射效率比较困难。殷功杰等人将衍射透镜等效为若干个折射率无穷大的薄透镜,推导出菲涅尔衍射透镜各级衍射波对总的光学调制传递函数贡献的加权公式<sup>[9]</sup>。但是 Simon Thibault 等人认为衍射成像系统中衍射波面的相干叠加是更精确的仿真分析方法<sup>[10-12]</sup>。本文使用这一方法分析衍射成像系统,下面描述计算调制传递函数的具体过程。

在光学设计软件中通常使用相位函数描述旋转对称型衍射透镜,如式(1)所示:

$$\varphi(r) = \sum_{i=1}^n a_i r^{2i}, \quad (1)$$

式中:  $\varphi(r)$  是在半径  $r$  处的相位,  $a_i$  为相位多项式系数,一般取  $n \leq 5$ 。在进行光线追迹时根据光栅方程模型计算光线方向的变化:

$$l' = l + \frac{n\lambda}{2\pi} \frac{\partial \varphi(r)}{\partial x}, \quad m' = m + \frac{n\lambda}{2\pi} \frac{\partial \varphi(r)}{\partial y}, \quad (2)$$

式中:  $l, m$  表示光线沿  $x, y$  方向的方向余弦,  $n$  为衍射级次。在光学设计时只考虑主衍射级次,忽略了其他非设计级次的影响。为准确模拟衍射元件的衍射性质,使用基于高斯光束传播原理的波动光学仿真方法进行分析<sup>[13]</sup>。单色平面波光源由多束相干高斯光束模拟,高斯光束经过衍射透镜后分裂为若干高斯光束继续向前传播。各衍射级次的衍射效率作为高斯光束经过衍射元件后的分束比,下面给出了二元衍射透镜的衍射效率计算公式<sup>[14]</sup>:

$$\eta_n^L = \left\{ \frac{\sin[\pi(n-\phi)]}{\sin[\pi(n-\phi)/L]} \times \frac{\sin(\pi n/L)}{\pi n} \right\}^2, \quad (3)$$

$$\phi = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \times \frac{\sqrt{n_1^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta}{n_0 - 1},$$

式中:  $L$  为台阶数目,  $n$  为衍射级次,  $\lambda_0, \lambda_1$  分别为中心设计波长和入射波长,  $n_0, n_1$  为衍射元件基底材料在设计波长和入射波长的折射率,  $\theta$  为入射角。

借助光学仿真软件 ASAP, 在系统像面上计算各级次衍射波面的相干叠加,得到光强分布。根据信息光学理论,对点扩散函数(point spread function, PSF)进行傅里叶变换并求模即得到系统的 MTF。对于复色成像系统,PSF 由不同光谱权重波长下的 PSF 叠加得到,则复色成像系统的 MTF 为

$$MTF_{\text{poly}} = FFT \left( \frac{\sum_{j=1}^N W_j \cdot PSF_j}{\sum_{j=1}^N W_j} \right), \quad (4)$$

其中  $W_j$  表示波长为  $\lambda_j$  的光谱权重。

## 3 样机仿真分析

本文的分析以衍射主镜口径为 80 mm 的衍射成像系统为样机,其基本设计参数如表 1 所示。

图 1 为样机的光学系统示意图。主镜是直径为 80 mm 的二元相位型菲涅尔透镜,+1 级为设计级次,主要实现光线的汇聚。在 Zemax 中使用式(1)中的相位多项式描述,相位系数分别为  $a_1 = -7.14$ ,  $a_2 = 2.789 \times 10^{-6}$ ,  $a_3 = -2.179 \times 10^{-12}$ ,  $a_4 = 2.278 \times 10^{-18}$ ,  $a_5 = -4.365 \times 10^{-23}$ 。实际加工过程中使用两台阶近似时,最小线宽为 5.9  $\mu\text{m}$ 。

基于 Schupmann 消色差原理<sup>[1]</sup>,在主镜关于中继镜共轭的位置使用了一块衍射元件,+1 级为设计级

次。相位系数分别为  $a_1=-57.476$ ,  $a_2=2.393 \times 10^{-3}$ ,  $a_3=-3.404 \times 10^{-6}$ ,  $a_4=-4.340 \times 10^{-9}$ ,  $a_5=-1.443 \times 10^{-12}$ 。使用两台阶近似时,最小线宽为  $1.9 \mu\text{m}$ 。用光学设计软件 ZEMAX 仿真计算了样机系统在  $0^\circ$ 、 $0.14^\circ$ 、 $0.2^\circ$  三个视场下的调制传递函数曲线,结果如图 2 所示。从图中曲线可以看出,各个视场下的调制传递函数在  $100 \text{ cycle/mm}$  处均大于 0.5。

下文的分析中,只考虑衍射元件-3级到+3级共 7 个衍射级次,衍射元件的衍射效率按照式(3)计算。借助光学仿真分析软件 ASAP,实现了样机系统的波动光学仿真分析,将得到系统的点扩散函数导入 Matlab 进行傅里叶变换,得到 MTF。其中系统的点扩散函数由平均分布在工作波段的 17 个单波长点扩散函数叠加得到,光谱权重与光源特性有关,本文只考虑系统的特性,按等权重处理。

图 3(a)给出了考虑二台阶衍射透镜高级次衍射后的调制传递函数。黑色曲线表示 ZEMAX 中的设计值,蓝色曲线为只考虑衍射元件单一设计级次的 MTF,红色曲线表示考虑 7 个衍射级次叠加后的 MTF 修正值。只考虑单一设计级次时的 MTF 略低于设计值,因为在光学设计软件中假定所有衍射元件的衍射效率为 100%,而本文计算时按照实际衍射效率处理。在考虑衍射透镜的多级衍射影响后 MTF 与设计值差异明显,主要表现在低频部分,与设计值的最大偏离为 6.6%,而在高频区间与 ZEMAX 软件中的设计值趋于重合。

衍射主镜的台阶数目为四、八时样机系统的 MTF 分别如图 3(b), 3(c)所示。从图中可以看出,衍射主镜为四台阶时系统 MTF 与只考虑单一设计级次得到的设计值趋向重合,与 ZEMAX 中的 MTF 最大偏离为 0.5%。而主镜台阶数为八时,系统 MTF 与设计值重合。

表 1 样机系统的基本参数列表。

Table 1 The basic specification of prototype.

Primary lens diameter	Effective focal length	Field	Spectral range	Design wavelength
80 mm	361.5 mm	$\pm 0.2^\circ$	486 nm~656 nm	550 nm

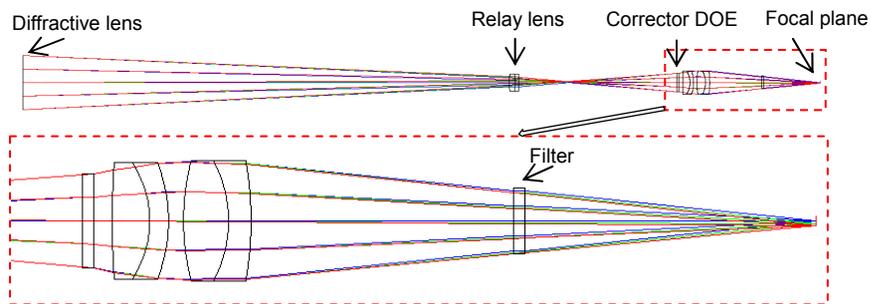


图 1 样机光路示意图。

Fig. 1 The layout of the prototype.

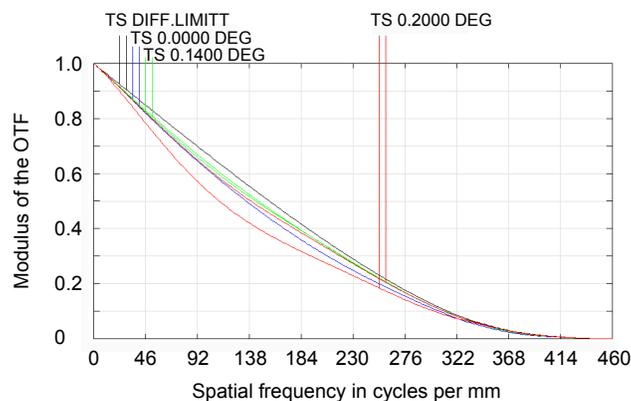


图 2 样机系统调制传递函数的设计值。

Fig. 2 The design MTF of the prototype.

说明衍射主镜台阶数目越多, 衍射杂散光对调制传递函数的影响越小; 当主镜台阶数为四时, 台阶近似引起的衍射杂散光对 MTF 的影响已可忽略。

二元位相型菲涅尔透镜的环带从中心向边缘逐渐减小, 增加台阶数目后, 衍射透镜边缘的微结构线宽变窄, 一方面不易于加工, 另一方面线宽接近光波长

后标量衍射理论带来的误差增大。所以本文提出将衍射主镜的中心区域加工成多台阶, 而边缘部分仍为二台阶的思路, 以优化衍射主镜的环带结构。为寻找最优的中心区域范围, 使用几何光线追迹模拟携带能量的光线在样机系统中的传播, 统计出未经散射直接到达像面的光通量信息, 如表 2 所示。

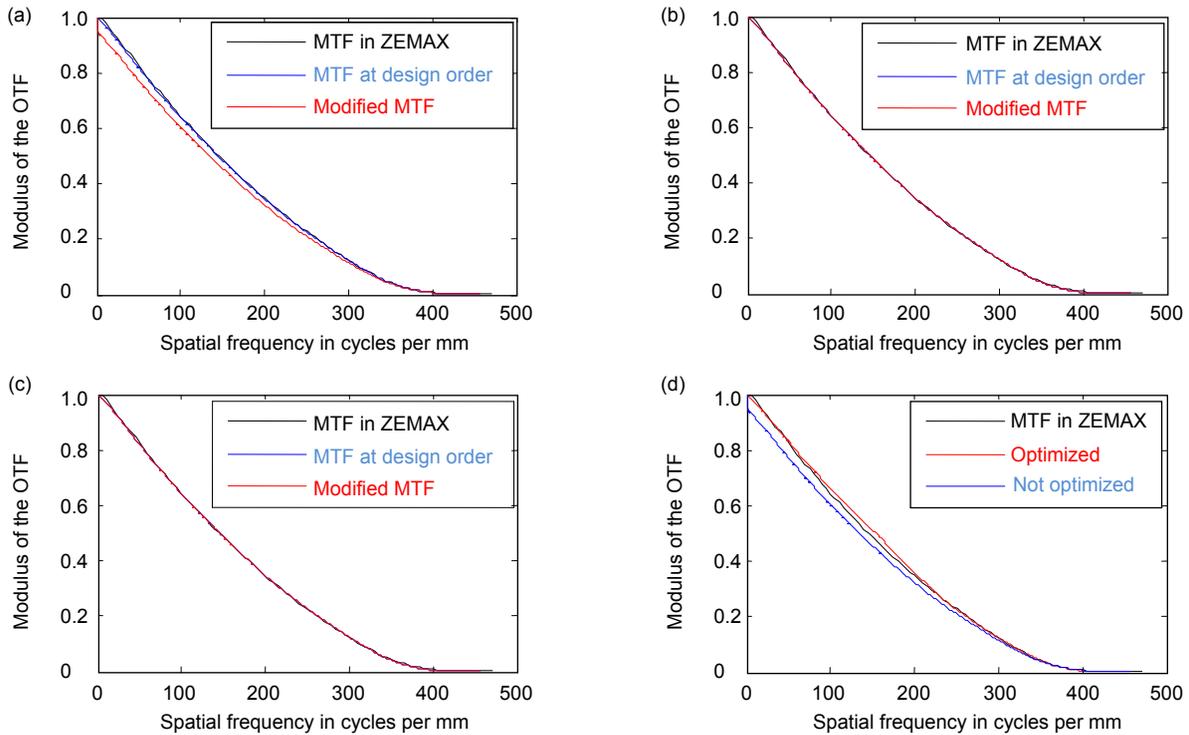


图 3 样机系统的轴上调制传递函数. (a) 二台阶衍射主镜. (b) 四台阶衍射主镜. (c) 八台阶衍射主镜. (d) 最优化衍射主镜.

Fig. 3 The on-axis MTF of the prototype. (a) 2-level primary diffractive lens. (b) 4-level primary diffractive lens. (c) 8-level primary diffractive lens. (d) Optimized primary diffractive lens.

表 2 直接到达像面的光通量信息统计.

Table 2 The flux reached on the image of system through different paths.

Path	Rays	SumFlux	Percent/%	Split
1	70929	1.41E-01	96.16	+1 +1
2	137	3.02E-05	0.02	+1 +3
3	137	2.72E-04	0.19	+1 -1
4	121	2.66E-05	0.02	+3 +1
5	121	2.40E-04	0.16	-1 +1
6	37	8.15E-06	0.01	+1 -3
7	29	6.39E-06	0	-3 +1
8	3577	8.75E-05	0.06	+3 +3
9	2449	4.85E-03	3.32	-1 -1
10	673	1.65E-05	0.01	-3 -3
11	161	3.55E-05	0.02	-1 -3
12	101	2.22E-05	0.02	-3 -1
13	37	8.15E-06	0.01	+3 -1
14	37	8.15E-06	0.01	-1 +3
15	13	3.18E-07	0	-3 +3
16	13	3.18E-07	0	+3 -3

表中最后一列表示光线经过衍射主镜和色差矫正 DOE 的衍射级次。表中结果表明,除了成像光线占总光通量的 96.16%,经过主镜-1 级衍射、消色差衍射透镜-1 级衍射这一路径下的光通量占总光通量的 3.32%,其他路径下的光通量均小于 0.2%。因此有理由认为这一路径下的杂散光对系统的 MTF 影响最大。

图 4 为主镜-1 级衍射光线传播示意图,由图可知只有入射到衍射主镜中心区域的光线经过-1 级衍射才能进入次镜系统(图 4 中主镜中心红色区域)。主镜到中继镜的距离为 661.8 mm,中继镜口径为 30 mm,主镜-1 级衍射对应一个虚焦点,焦距在主镜前方 800 mm 处。按照三角形相似计算出主镜中心红色区域半径为 8.21 mm。而考虑到不同波长和不同视场角,这一区域大小略有变化,因此在本样机系统中取这一中心区域半径为 10 mm。按照半径在 10 mm 以内的区域为四台阶,而以外区域仍为二台阶的思路优化衍射主镜台阶数目。使用本文描述的方法,计算得到了系统的调制传递函数如图 3(d)所示。从图中结果来看,主镜优化后系统的 MTF 相比于二台阶主镜提升显著,说明该优化方法能够降低衍射杂散光对 MTF 的影响。

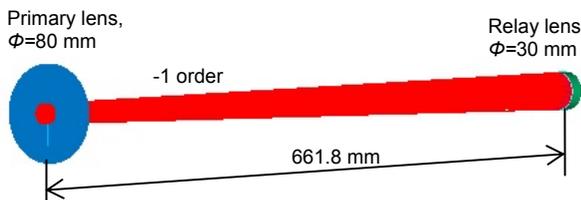


图 4 主镜-1 级衍射光传播示意图。

Fig. 4 The -1 order diffraction of the primary lens.

## 4 结论

以波动光学仿真分析方法实现有限级次衍射波面在系统像面上的相干叠加,得到系统的 PSF,通过对 PSF 进行傅里叶变换得到系统的 MTF。分析了样机系统中衍射主镜台阶数目为二、四、八时,系统修正后的 MTF 与设计值的差异。结果表明,MTF 在二台阶时有一定程度的下降,与设计值的最大偏差为 6.6%;四台阶时与设计值的最大偏差小于 0.5%;八台阶时与设计值重合。这说明增加衍射主镜的台阶数目有利于衍射效率的提高,降低衍射杂散光对系统 MTF 的影响。结合几何光线追迹仿真分析,提出了将衍射主镜的中心区域加工成多台阶、边缘部分为二台阶的优化思路,结果表明,该方法可以达到抑制衍射杂散光的目的。

## 基金项目

国家重点研发计划地球观测与导航重点专项(2016YFB0500200)。

## 参考文献

- Hyde R A. Eyeglass. 1. Very large aperture diffractive telescopes[J]. *Applied Optics*, 1999, **38**(19): 4198–4212.
- Zhang Nan, Lu Zhenwu, Li Fengyou. Optical design of diffractive telescope[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, **36**(1): 106–108.  
张楠, 卢振武, 李凤有. 衍射望远镜光学系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(1): 106–108.
- Zhu Wei, Xu Yan, Yan Shuhua. Design of broad bandwidth reflective-diffractive hybrid telescope with super large aperture[J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, **29**(1): 40–44.  
朱威, 徐琰, 颜树华. 宽光谱超大孔径反衍射望远镜系统设计[J]. *应用光学*, 2008, **29**(1): 40–44.
- Atcheson P D, Stewart C, Domber J, et al. MOIRE: initial demonstration of a transmissive diffractive membrane optic for large lightweight optical telescopes[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, **8442**: 844221.
- Zhang Zhoufeng, Xie Yongjun, Yin Qinye, et al. Design and testing of infrared diffractive telescope imaging optical systems[J]. *Optik*, 2015, **126**: 5740–5743.
- Wang Ruoqiu, Zhang Zhiyu, Guo Chengli, et al. Design/fabrication and performance test of a diffractive telescope system with high diffraction efficiency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(3): 114–122.  
王若秋, 张志宇, 国成立, 等. 高衍射效率衍射望远镜系统的设计/加工及成像性能测试[J]. *光子学报*, 2017, **46**(3): 114–122.
- Buralli D A, Morris G M. Effects of diffraction efficiency on the modulation transfer function of diffractive lenses[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(22): 4389–4396.
- Londoño C, Clark P P. Modeling diffraction efficiency effects when designing hybrid diffractive lens systems[J]. *Applied Optics*, 1992, **31**(13): 2248–2252.
- Yin Gongjie, Xue Mingqiu. Diffractive efficiency of diffractive lenses and its effects on MTF[J]. *Laser Technology*, 1997, **21**(6): 369–371.  
殷功杰, 薛鸣球. 衍射透镜衍射效率及光学传递函数[J]. *激光技术*, 1997, **21**(6): 369–371.
- Simon Thibault, Nathalie Renaud, Min Wang. Effects and prediction of stray light produced by diffractive lenses[J]. *Proceedings of SPIE*, 1999, **3779**: 334–343.
- Zhang Hu, Liu Hua, Lu Zhenwu, et al. Modified phase function model for kinoform lenses[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(22): 4055–4060.
- Yue Jinyin, Liu Hua, Lu Zhenwu, et al. Modified Compound diffractive telescope system: design, stray light analysis, and optical test[J]. *Chinese Physics B*, 2010(01): 234–240.
- Breault Research Organization. ASAP technical guide[EB/OL]. (2004-09-08) [2017.04.11]. <http://www.breault.com>.
- Swanson G J. Binary optics technology: theoretical limits on the diffraction efficiency of multilevel diffractive optical elements[R]. Lexington, Massachusetts, USA: Lincoln Laboratory, 1991: 5–8.