

文章编号:1001-5078(2023)07-1087-08

· 光学技术 ·

微透镜阵列扫描成像系统的衍射分析与研究

陈 卉

(中国电子科技集团第十一研究所,北京 100015)

摘要:微透镜阵列是微光学元件典型器件之一,广泛的应用于光束整形、精密测量、光学成像等场景。本文研究了微透镜阵列扫描成像系统的工作机理,并重点分析了影响成像质量的光场衍射效应和杂散光串扰,完成了微透镜阵列扫描成像系统衍射效应的推导与仿真,揭示了衍射效应与焦距及子单元孔径之间的关系,为微透镜阵列扫描成像系统的实际应用提供了导向,并为微透镜阵列的光束控制应用提供理论支撑,为微透镜阵列的建模、设计等提供依据。

关键词:微光学;微透镜阵列;衍射效应;扫描成像;杂散光

中图分类号: O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2023.07.016

Diffraction analysis and research of microlens array scanning imaging system

CHEN Hui

(The 11th Research Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: Microlens array is one of the typical devices of micro-optical components, which is widely used in beam shaping, precision measurement, optical imaging and other scenarios. In this paper, the working mechanism of the microlens array scanning imaging system is studied, and the light field diffraction effect and stray light crosstalk that affect the imaging effect, are analyzed with emphasis. The derivation and simulation of the diffraction effect of the microlens array scanning imaging system is completed, and the relationship between diffraction effect and the focal length and subunit aperture is revealed, which provides guidance for the practical application of the microlens array scanning imaging system, theoretical support for the beam control application of the microlens array, and a basis for modeling and design of the microlens array.

Keywords: micro-optics; microlens array; diffraction effect; scan imaging; stray light

1 引言

自1980年后,微光学技术出现在大众视野,从此以机械、力学、光学、电子学等领域为代表的仪器,快速朝着微小集成化方向发展,实现了从器件到系统的转变^[1-2]。代表性的微小光学元件阵列包括微透镜阵列、微反射镜阵列等,它们已在各自的领域起着重要的作用^[3]。

微透镜阵列(Micro Lens Array, MLA)主要是由尺寸很小的子透镜单元有规律地排列而成,也是光

学元器件微型化、阵列化和集成化的重要代表之一,具有体积小、重量轻、可集成等特点。目前在市面上售卖的MLA的子单元孔径形状主要分为矩形、圆形和六边形,尺寸也通常在1 mm以下^[4-5]。MLA的应用广泛,按照其应用类型可以分为成像型和非成像型MLA系统,它们均被广泛应用于光扫描系统、光互联、光束整形等领域。

本文分析并推导了MLA扫描成像系统的衍射效应,基于MATLAB软件,数值模拟并分析了衍射

图案,探索子单元孔径、焦距之间的规律,揭示了衍射效应与焦距及子单元孔径之间的关系,揭示其中的物理基础,可进一步完善微小光学理论模型、设计方法、测试手段,对于微小光学的发展及应用领域的扩展具有重要意义。

2 微透镜阵列扫描成像系统的工作原理

2.1 伽利略式望远结构

MLA 实现扫描成像的结构原型是望远结构,而传统的望远结构分为开普勒式和伽利略式^[6],伽利略式结构如图 1 所示。

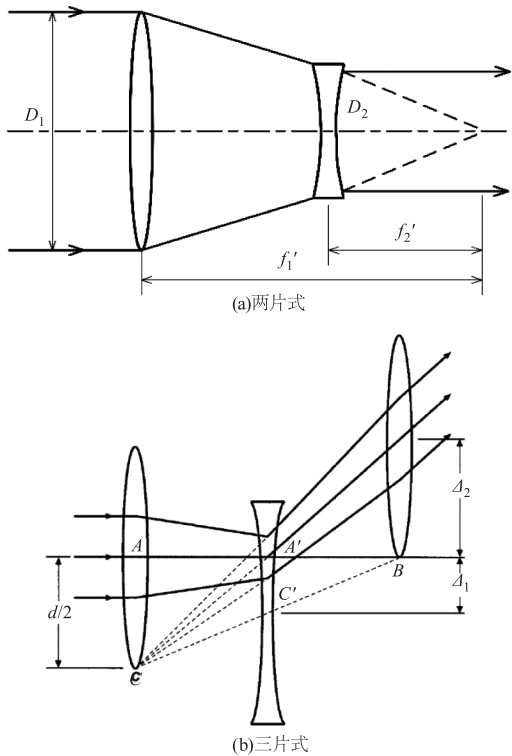


图 1 伽利略结构

Fig. 1 Galileo structure

伽利略结构的特点是:中间没有聚焦点,并成正立的像,使得前后两片 MLA 的通光孔径不可能相等。然而本文中的 MLA 要求通光孔径相等,因此,此结构不适用于本文中的系统。

2.2 开普勒式

本文所研究 MLA 扫描成像系统采用开普勒结构为原型,其整体结构原理图如图 2 所示,系统的两片 MLA 的设计的子单元口径相等,为 0.7 mm。

开普勒式 MLA 扫描成像系统的工作原理如图 3 所示。第一片微透镜阵列 (MLA₁) 固定,第二片微透镜阵列 (MLA₂) 可以沿着垂直光轴的方向做微小位移,通过两片 MLA 之间的微小位移来约束

并控制光束的上下偏转,再通过一个理想透镜接收成像,达到对目标场景一定角度范围内的扫描成像的效果。

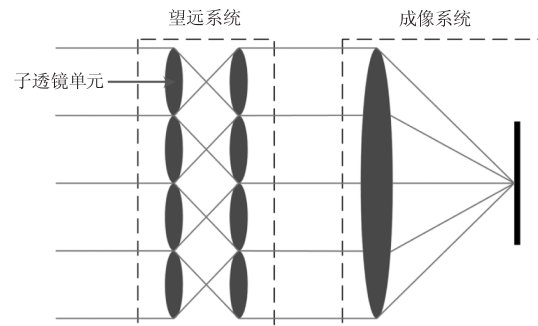


图 2 开普勒结构扫描成像示意图

Fig. 2 Kepler structure schematic diagram of scanning imaging

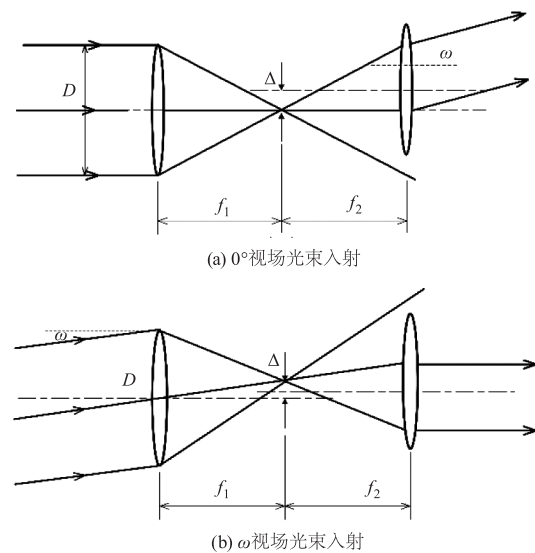


图 3 MLA 扫描成像原理图

Fig. 3 Schematic diagram of MLA scanning imaging

因受到 MLA 子单元透镜尺寸的限制,横向位移量存在一个最大位移量 Δ_{\max} , 定义 d 为子透镜单元的孔径,则 Δ_{\max} 满足以下关系^[7]:

$$\Delta_{\max} = \pm \frac{D}{2} \left(1 - \frac{f_2}{f_1} \right) \quad (1)$$

偏折角为扫描成像系统的扫描角,与之对应的横向偏移量为 Δ_d 。根据几何计算,扫描角满足以下三角关系:

$$\tan \theta = \frac{\Delta_d}{f_2} \quad (2)$$

由公式(2)可以看出,当 f_2 固定不变时, θ 将随着横向位移量值增大而增大。同样地,扫描角度也是存在极限值。

3 影响微透镜阵列扫描成像系统的主要因素

如图 4 所示,在理想情况下,平面波入射到 MLA_1 上,经 MLA_2 出射的仍为准直光束。但是由于加工精度、装配误差等因素,光线传输位置会发生颠覆性的变化^[8],对系统引入杂散光或产生衍射效应,会严重影响光束的传输效率和系统的清晰度等。因此,需要对其中一些主要的影响因素进行深入的探索和研究,为 MLA 系统的设计和测试手段的提供参考。

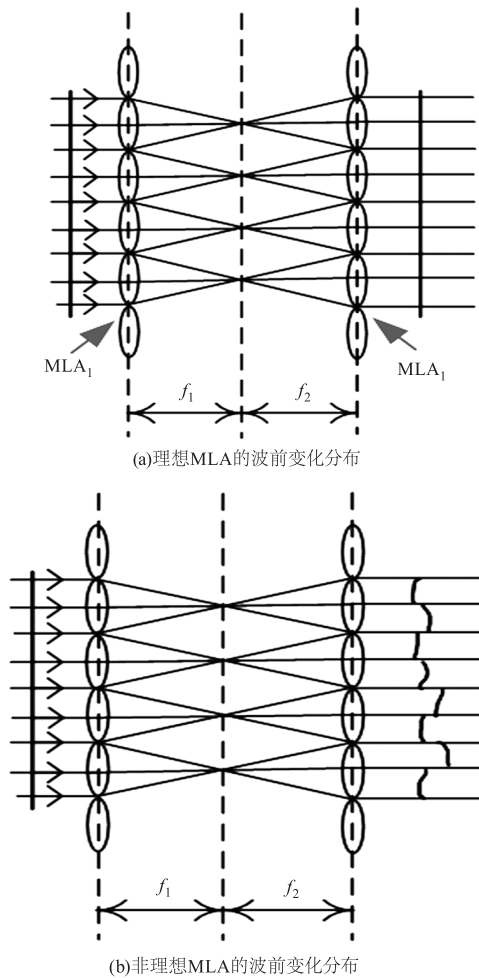


图 4 MLA 系统的波前变化分布

Fig. 4 Distribution of wavefront variation in MLA system

3.1 衍射效应

当光学元件的尺寸降低到亚毫米量级及以下时,已经不能用传统的几何光学对其成像性能进行分析^[9]。由于 MLA 子单元孔径较小,实际误差导致光场易在子单元孔径上发生衍射,影响光束传输效率和准确性,进而影响系统成像的清晰度,导致系统分辨率大大降低。

3.2 杂散光

在常见的光学系统中,除了正常传输的所需成

像光以外,往往还夹杂一些严重影响系统成像质量的非成像光束,这些非成像光束被称为杂散光。在实际的系统中,由于两片 MLA 之间的间距、相对偏心 and 倾斜等因素都会引入杂散光串扰,严重影响系统的成像质量,降低像面的对比度和调制传递函数,其原理如图 5 所示,下面将对两片 MLA 之间的间距和相对偏心、倾斜进行详细的分析。

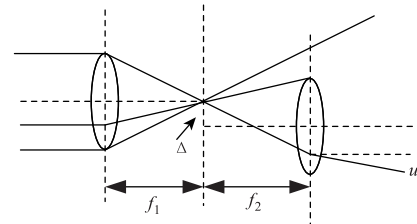


图 5 微透镜阵列光束偏转示意图

Fig. 5 Schematic diagram of beam deflection of micro-lens array

3.2.1 间距

透镜阵列因为单元口径小、焦距短,所以对间距非常敏感。通过 CODEV 软件仿真,由图 6 可见,两片 MLA 的间距为 1.78 mm,当两片 MLA 间距变化 0.01 mm,在 5° 扫描视场平行光入射不再是平行光出射,导致系统的分辨率大大降低,成像质量变差。



图 6 MLA 空气间距变化仿真

Fig. 6 MLA air spacing variation simulation

3.2.2 相对偏心和倾斜

图 7(a)、(b)分别表示两片 MLA 的相对偏斜和倾斜的示意图。设 MLA_2 相对于 MLA_1 的偏心角为 $\Delta\alpha$,理想状态的两片 MLA 彼此之间所允许的偏心公差可以表示为:

$$|\Delta\alpha| \approx \frac{\lambda F\#}{2\sqrt{2}D} \tag{3}$$

两片 MLA 的相对倾斜产生一个离散的焦斑:

$$|\Delta\beta_d| \approx \frac{4\lambda (F\#)^2}{D} \tag{4}$$

同时产生一个倾斜的波阵面:

$$|\Delta\beta_t| \approx \sqrt{\left(\frac{4\lambda F\#}{D}\right)} \tag{5}$$

当系统中两片 MLA 的相对偏心倾斜公差较大时,系统会产生离散的焦斑,增加像面上的噪声,影响系统的成像质量。因此应当严格的保证两片

MLA 的相对位置。

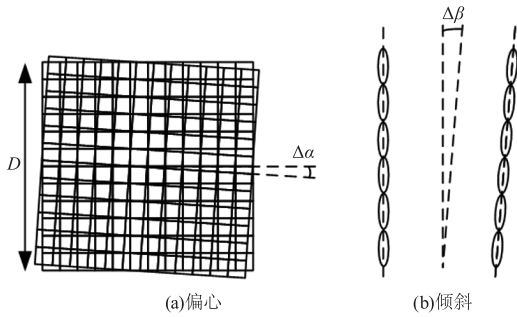


图 7 非理想化 MLA 相对位置

Fig. 7 Relative position of non-idealized MLA

4 微透镜阵列扫描系统衍射效应的推导与仿真

4.1 微透镜阵列扫描成像系统衍射效应的推导分析

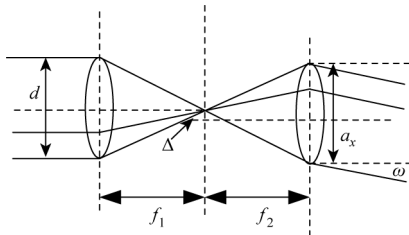


图 8 系统无杂散光传输示意图

Fig. 8 Schematic diagram of system-free stray light transmission

如图 8 所示,系统无杂散光时,入射到 MLA₂ 的光束宽度完全被限制在相应的子单元的直径内。 a_x 为 MLA₂ 子单元的通光孔径,利用两个角度相等,可列等式:

$$\frac{a_x}{f_2} = \frac{d}{f_1} \quad (6)$$

$$a_x = d \frac{f_2}{f_1} \quad (7)$$

此时, $a_x = d$, MLA₂ 相对于 MLA₁ 光轴的位移量 $\Delta_x \leq \frac{d}{2} - d \frac{f_2}{f_1}$ 。MLA₂ 对应部分的中心位置分别为 $x' = \Delta_x, y' = \Delta_y$ 。

当系统存在杂散光时,如图 9 所示,由几何关系可得,入射到 MLA₂ 每个子单元的光束宽度为:

$$a_{x,y} = \begin{cases} d \frac{f_2}{f_1}, \Delta_{x,y} \leq \frac{d}{2} \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \\ \frac{d}{2} \left(1 + \frac{f_2}{f_1}\right) - \Delta_{x,y}, \frac{d}{2} \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) \leq \Delta_{x,y} \leq \frac{d}{2} \end{cases} \quad (8)$$

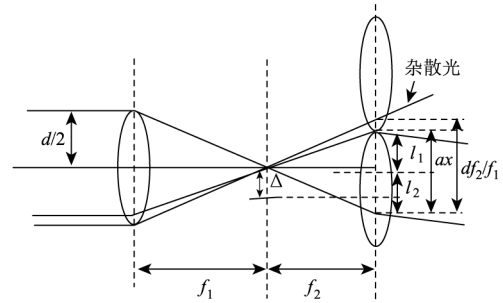


图 9 系统存在杂散光传输示意图

Fig. 9 Schematic diagram of transmission of stray light in the system

如图 10 所示,为了简化计算,周期性结构的 MLA 的衍射效应可以考虑用矩形周期结构的基本单元函数与 comb 函数的卷积表示,对 MLA₂ 每一个子单元透镜进行单独分析,最后再求和,得到系统整体的衍射效应分析。

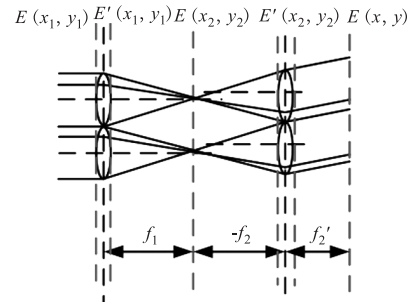


图 10 MLA 扫描成像系统复振幅分布模型

Fig. 10 Complex amplitude distribution model of MLA scanning imaging system

设入射的平面波为单位复振幅,则:

$$t_i(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right) \left[\frac{1}{d^2} \text{comb}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \right] \quad (9)$$

其中, D 为 MLA 的长度, d 为 MLA 的子单元的长度。 $t_i(x_1, y_1)$ 为每个子单元对图像函数进行等间隔采样后,求和所得的复振幅透射系数,即整个 MLA₁ 的复振幅透射系数。

当光波从 MLA₁ 出射后,在 MLA₁ 后表面的复振幅分布为 $E'(x, y)$,对于 MLA₁ 的复透过率可以表示为:

$$\widehat{E'}(x_1, y_1) = \widehat{E}(x_1, y_1) \times t_i(x_1, y_1) = t_i(x_1, y_1) \quad (10)$$

MLA₂ 与 MLA₁ 之间的距离为 $L = f_1 + f_2$,整个系统模型考虑为衍射屏放置于透镜前一段距离,类似于一个二维振幅型光栅后接一个透镜,如图 11

所示。

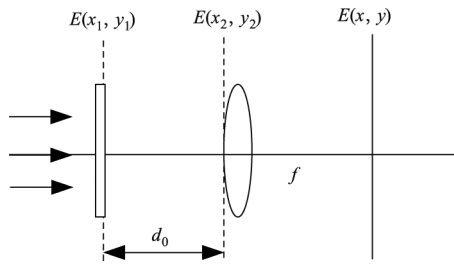


图 11 系统模型原理

Fig. 11 System model principles

根据公式：

$$\widehat{E}^r(x, y) = \frac{\exp(ikf_2)}{i\lambda f_2} \exp\left[\frac{ik}{2f_2}(x^2 + y^2)\right] F \left\{ \widehat{E}^r(x_2, y_2) \right\}_{u'=\frac{x}{\lambda f}, v'=\frac{y}{\lambda f}} \quad (11)$$

可以推导出 MLA₂ 子透镜后焦面上的复振幅分布为：

$$\widehat{E}^r(x, y) = \frac{\exp(ikf_2)}{i\lambda f_2} \exp\left[\frac{ik}{2f_2}\left(1 - \frac{L}{f}\right)(x^2 + y^2)\right] \times F \left\{ \widehat{E}^r(x_2, y_2) \times \text{rect}\left(\frac{x_2 - x'}{a_x}, \frac{y_2 - y'}{a_y}\right) \right\}_{u'=\frac{x}{\lambda f}, v'=\frac{y}{\lambda f}} \quad (12)$$

由此可以推导出 MLA₂ 子透镜后焦面上的复振幅分布为：

$$\widehat{E}^r(x, y) = \frac{\exp(ikf_2)}{i\lambda f_2} \exp\left[\frac{ik}{2f_2}\left(1 - \frac{L}{f}\right)(x^2 + y^2)\right] \times F \left\{ \widehat{E}^r(x_2, y_2) \times \text{rect}\left(\frac{x_2 - x'}{a_x}, \frac{y_2 - y'}{a_y}\right) \right\}_{u'=\frac{x}{\lambda f}, v'=\frac{y}{\lambda f}} \quad (13)$$

计算得知，整个 MLA₁ 作用在 MLA₂ 单一子透镜上，其后焦面的衍射效率为：

$$E'(x, y) = \frac{\exp(ikf_2)}{i\lambda f_2} \exp\left[\frac{ik}{2f_2}\left(-\frac{f_1}{f_2}\right)(x^2 + y^2)\right] F \left\{ \text{rect}\left(\frac{x}{D}, \frac{y}{D}\right) \left[\frac{1}{d^2} \text{comb}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \otimes \text{rect}\left(\frac{x}{d}, \frac{y}{d}\right) \right] \times \text{rect}\left(\frac{x_2 - x'}{a_x}, \frac{y_2 - y'}{a_y}\right) \right\} \quad (14)$$

经过傅里叶变换后得：

$$\widehat{E}^r(x, y) = \frac{\exp(ikf_2)}{i\lambda f_2} \exp\left[\frac{ik}{2f_2}\left(-\frac{f_1}{f_2}\right)(x^2 + y^2)\right] \times D^2 \times d^2 \times a_x a_y \times \{ \text{sinc}(Du', Dv') \otimes \text{comb}(du'_2, dv'_2) \times \text{sinc}$$

$$(du', dv') \otimes \text{sinc}\left[a_x \left(u' - \frac{x'}{\lambda f_2} \right), a_y \left(v' - \frac{y'}{\lambda f_2} \right) \right] \}_{u'=\frac{x}{\lambda f_2}, v'=\frac{y}{\lambda f_2}} \quad (15)$$

由叠加原理可知，系统总的复振幅分布与单个子单元的复振幅分布成正比。则整个 MLA₂ 后焦面上的复振幅分布：

$$\widehat{E}^r_A(x, y) \propto \widehat{E}^r(x, y) \quad (16)$$

光强分布：

$$I(x, y) = |\widehat{E}^r(x, y)|^2 \quad (17)$$

光强分布 $I(x, y)$ 反应了 MLA 扫描成像时，系统的后焦面上点 (x, y) 的衍射光斑的光强分布， I_{\max} 表示系统扫描成像时的衍射光斑的光强分布最大时的情况，则可用 $\frac{I}{I_{\max}}$ 表示系统在扫描成像过程中衍射效应的强弱。在由于复振幅分布函数由多个函数组成，受多个因素的影响，因此其最大值较难从理论分析中推导出来，还需要用程序仿真进行进一步的分析。

4.2 MLA 扫描成像系统衍射效应的仿真分析

根据表 1 中的参数，正方形子单元的排布情况为紧密排布，在理论情况下，当通光孔径增大时，出射的光强越多，衍射效应就越小。

表 1 MLA 扫描成像系统参数

Tab. 1 MLA scanning imaging system parameters

| Parameters | Indicators |
|---------------------------------------|------------|
| Working wavelength/nm | 1064 ± 4 |
| MLA subunit aperture/min ² | 0.7 × 0.7 |
| MLA size/min ² | 60 × 60 |
| Fixed field of view/(°) | ± 1.06 |
| Scanning field of view/(°) | ± 8 |

4.2.1 衍射效应与子单元孔径的关系

当改变 MLA₂ 子单元孔径，图 12 表示了后焦面的光强分布 I 和出射光强相对于最大光强 I_{\max} 的比值情况，即 $\frac{I}{I_{\max}}$ 表示系统在扫描成像过程中衍射效应的强弱。其中每一列，即图 12(a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)、(i) 分别表示 MLA₂ 子单元矩形孔径边长 d 分别为 0.5 mm、0.7 mm 和 0.9 mm，每一行，即 (a)、(d)、(g)、(b)、(e)、(h)、(c)、(f)、(i) 分别表示相对位移量 Δ_d 为 0、0.1 mm、0.2 mm。

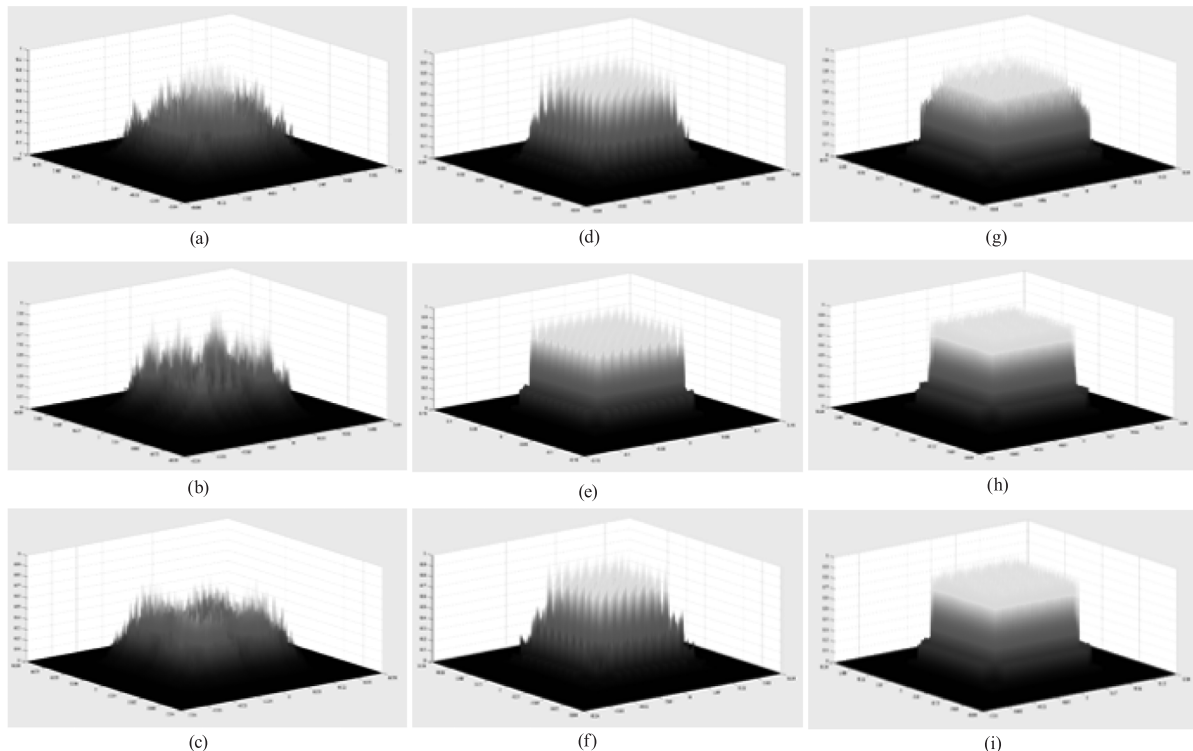


图 12 改变孔径时 MLA_2 后方焦面出射光强与最大衍射光强的比值

Fig. 12 The ratio of outgoing light intensity at the rear focal plane of the MLA_2 to the maximum light intensity when changing the aperture

$\frac{I}{I_{max}}$ 值越大,表示系统的衍射效应越强,则系统的成像质量越低。由图 12 可以得知当子单元孔径逐渐增大时,成像逐渐清晰,衍射效应逐渐减小。然而,MLA 的子单元应小于 1 mm,超过这个范围,则脱离了微光学的范畴。

4.2.2 衍射效应与微透镜阵列焦距的关系

1. 焦距比改变情况下的系统衍射效应分析

如图 13 所示,其中每一列分别表示 f_2 为 0.5 mm、1 mm 和 2 mm,每一行分别表示 Δ_d 为 0、0.05 mm、0.1 mm。

表 2 改变焦距比后的结构参数

Tab. 2 Structural parameters after changing the focal length ratio

| Parameters | Indicators |
|--|--------------|
| MLA_1 focal length/mm | 1 |
| MLA_1 MLA_2 subunit aperture/ mm^2 | 0.7 × 0.7 |
| MLA_2 focal length/mm | 0.5; 1; 2 |
| Lateral displacement/mm | 0; 0.05; 0.1 |

由图 13 可以得知,当 MLA_2 和 MLA_1 的焦距比逐渐增大时,衍射效应就逐渐减小,成像效果也得到了明显的提升,因此为了降低系统的衍射效应,可以

在保持固定镜 MLA_1 的焦距不变的前提下,适当增加 MLA_2 的焦距。

2. 焦距比不变情况下的系统衍射效应分析

在同时改变 MLA_1 和 MLA_2 子透镜焦距,以保持 MLA 间的焦距比不变时,根据公式 (15),衍射图样会发生改变,系统结构参数如表 3 表示。

表 3 改变 MLA 的焦距的系统参数

Tab. 3 System parameters to change the focal length of MLA

| Parameters | Indicators |
|--|--------------|
| MLA_1 focal length/mm | 1; 1.5; 1.8 |
| MLA_1 MLA_2 subunit aperture/ mm^2 | 0.7 × 0.7 |
| MLA_2 focal length/mm | 1; 1.5; 1.8 |
| Lateral displacement/mm | 0; 0.05; 0.1 |

当 MLA 子单元焦距分别为 0.5 mm、1 mm 和 1.8 mm 时,分别在相对位移 Δ_d 为 0、0.05 mm、0.1 mm 的情况下观察 MLA_2 后焦面的光强分布和出射光强相对于最大光强的比值情况,如图 14 所示,其中每一列分别表示 MLA_1 和 MLA_2 焦距 f_1 和 f_2 为 1 mm、1.5 mm 和 1.8 mm,每一行分别表示 Δ_d 为 0、0.05 mm、0.1 mm。

由图 14 可知,当 MLA_1 与 MLA_2 的焦距比不变

的情况下,较小的 MLA 的焦距,会使出射光束的总能量减少,图像偏暗;较大的 MLA 焦距会使边缘的

视场变暗。因此在焦距比不变的情况下,需选择合适居中的焦距以减小系统的衍射效应。

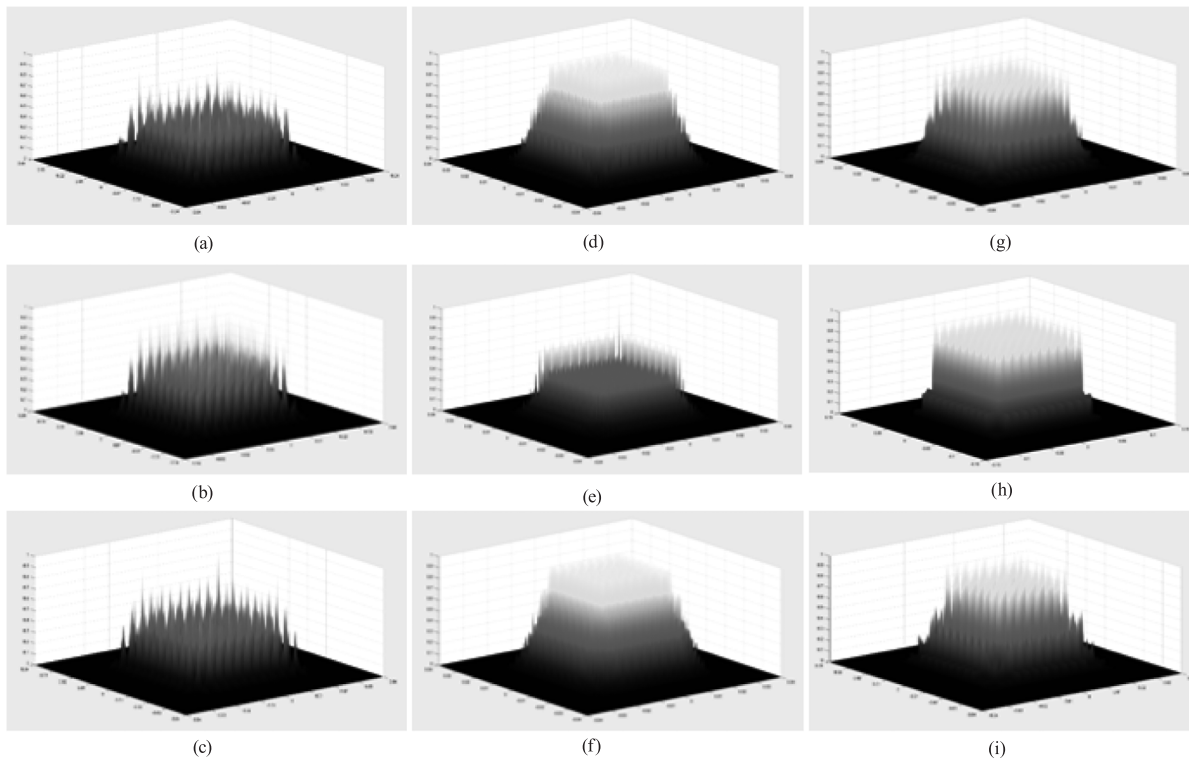


图 13 焦距比变化时 MLA_2 后方焦面出射光强与最大光强的比值

Fig. 13 When the focal length ratio changes, the ratio of the outgoing light intensity at the rear focal plane of the MLA_2 to the maximum light intensity

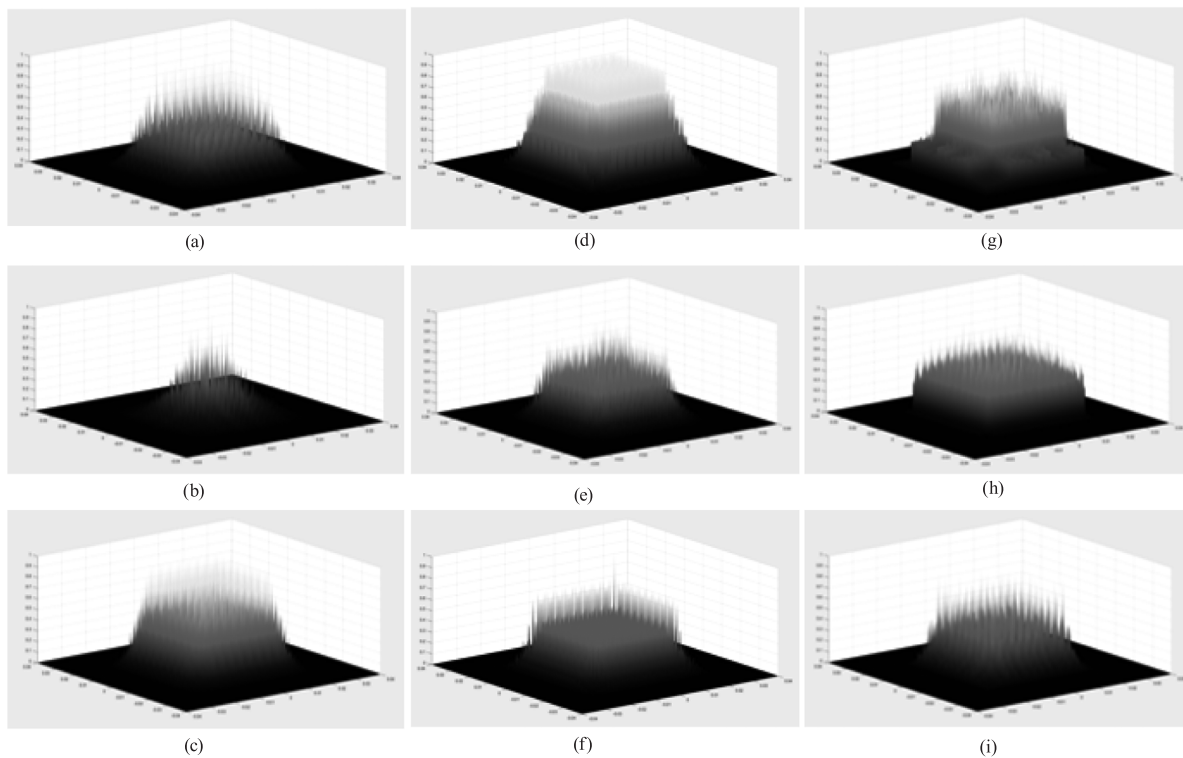


图 14 焦距比不变时 MLA_2 后方焦面出射光强与最大光强的比值

Fig. 14 When the focal length ratio is constant, the ratio of the light intensity emitted from the focal surface behind MLA_2 to the maximum light intensity

5 结 论

本文对影响 MLA 扫描成像的主要因素进行了仿真和分析,同时重点对系统的衍射过程进行理论分析和仿真。结合傅里叶光学的频谱分析法,建立系统的复振幅分布模型并进行了理论推导,经过推导发现,出射复振幅不是简单的线性叠加,利用 MATLAB 程序模拟了系统在不同的扫描状态、孔径、焦距下,后焦面的衍射图样,并得出结论:在微光学范畴内,当焦距比越大,每块 MLA 的焦距在 1 mm 到 3 mm,且孔径越大时,系统的衍射效应就越小,为微透镜阵列的光束控制应用提供理论支撑,为微透镜阵列的建模、设计等提供依据。

参考文献:

- [1] Iga K, Kokubun K, Oikawa M. Fundamentals of microoptics[J]. Academic Press, 1984.
- [2] Zhu Chuangui, Xue Mingqiu, Liu Desen. Comprehensive imaging research on optical array elements[J]. Journal of Photonics, 1992, 21(5): 175 - 178. (in Chinese)
朱传贵, 薛鸣球, 刘德森. 光学阵列元件综合成像研究[J]. 光子学报, 1992, 21(5): 175 - 178.
- [3] Zhou Xianhai. Tiny optics, systems and applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [4] Kitano I, Koizumi K, Matsumura H, et al. A light-focusing fiber guide prepared by ion-exchange techniques[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1969, 39: 63 - 70.
- [5] Personick S D. Fiber optics: technology and applications [M]. Springer, 1985.
- [6] Huang Ying, Xiang Sihua, Chen Sihai, et al. Miniature light scanner research[J]. Journal of Infrared and Millimeter Wave, 2007, (1): 26 - 29. (in Chinese)
黄鹰, 向思桦, 陈四海, 等. 微型光扫描器研究[J]. 红外与毫米波学报, 2007, (1): 26 - 29.
- [7] Wang Yao. Application of microlens array in scanning optical systems [D]. Tianjin: TianJin University, 2018. (in Chinese)
王瑶. 微透镜阵列在扫描光学系统中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
- [8] Glöckner S, Göring R. Investigation of statistical variations between lenslets of microlens arrays[J]. Applied Optics, 1997, 36(19): 4438 - 4454.
- [9] Jenkins F A, White H E. Fundamentals of optics (Electromagnetics) 4th Edition [M]. 4th ed. McGraw-Hill Higher Education, 1976.