

# 基于填充因子的微透镜阵列扫描光学系统性能分析

葛增辉, 黄蕴涵, 刘智颖\*

长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022

**摘要** 针对通过微透镜阵列通光孔径的光束在不同条件下的填充问题, 利用填充因子来表征微透镜阵列系统光瞳位置处光束的填充率, 并分析其对系统探测距离、点扩散函数和光学传递函数的影响。基于近轴光学模型, 构建了快速计算微透镜阵列扫描光学系统填充因子的数学模型, 并提出一种系统设计方法。利用该方法设计了微透镜阵列扫描光学系统, 所设计系统的实验结果与理论计算结果吻合, 表明该系统的性能良好。

**关键词** 成像系统; 光束扫描; 微透镜阵列; 填充因子; 探测距离; 点扩散函数; 光学传递函数

中图分类号 O435.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222113

## 1 引言

光束扫描被广泛应用于激光雷达、光通信和立体显示等领域, 随着无人驾驶汽车等商业应用的急剧增加, 光学系统的光束扫描变得更加重要<sup>[1-4]</sup>。传统的机械式扫描装置主要基于万向节、快速转向镜、棱镜等实现光束扫描, 这些装置存在体积大、扫描速度慢、能耗高等问题<sup>[5-7]</sup>。基于液晶、光波导和电光晶体等相位调制器件的电光式扫描装置虽然体积较小, 但存在响应速度较慢、扫描角度小、大口径光束扫描需要庞大的控制电路等缺陷<sup>[8-13]</sup>。随着光学仪器性能要求的不断提高以及应用领域的不断扩展, 这些扫描装置的缺点限制了其在一些领域中的应用。

基于微透镜阵列 (MLA) 的扫描光学系统是一种相对较新的光束扫描解决方案<sup>[14-17]</sup>, 一般包含两组独立的微透镜阵列, 实现光束扫描需要一组透镜阵列相对于另一组透镜阵列灵活移动。光束扫描所需的机械位移量与微透镜的直径成正比, 而微透镜的尺寸往往在几微米或者更小, 因此与传统机械式扫描装置相比, 其机械位移量也很小。每个微透镜阵列作为一个整体, 不需要使用复杂的控制电路对每一个单元进行单独控制, 因此可以实现大口径光束扫描<sup>[18-20]</sup>。近些年, 微纳制造技术的快速发展促进了微光学元件的广泛应用, 微光学元件具有体积小、质量轻、集成化等优点<sup>[21]</sup>, 这使微透镜阵列扫描光学系统在大口径、小型化、轻量化的前提下, 能够以很快的扫描速度实现光束

扫描<sup>[22-24]</sup>。

随着扫描角度的增大, 微透镜阵列之间的光束与后方相邻微透镜的重叠面积增大, 导致期望的成像光束无法填满微透镜阵列的通光孔径, 综合考虑扫描角度与系统中微透镜阵列结构形式等因素, 针对微透镜阵列通光孔径光束的填充问题, 本文利用填充因子表征微透镜阵列系统光瞳位置处光束的填充率, 并分析了其对系统性能的影响。在此基础上, 提出一种基于近轴光学模型的填充因子计算方法, 利用该方法优化设计了一个微透镜阵列扫描光学系统。

## 2 基本原理

### 2.1 填充因子

基于开普勒结构的微透镜阵列扫描成像光学系统如图 1 所示, 系统由微透镜阵列单元和后置成像单元构成。系统工作时, 来自零度视场的平行光束聚焦到阵列 1 中微透镜相应的后焦点处, 阵列 2 中微透镜的前焦点与阵列 1 中对应微透镜的后焦点重合, 此时阵列 2 中的微透镜将光束重新准直。如果两个微透镜阵列之间存在偏移, 则阵列 2 中微透镜的前焦点相当于阵列 1 中相应微透镜后焦平面上的离轴点, 这种情况来自非零度视场的光束将被准直。随着扫描角度的增大, 进入到阵列 2 相邻微透镜中的串扰光束增加, 导致光束无法填满微透镜阵列的通光孔径, 同时由于系统中微透镜阵列单元结构形式不同, 根据两个阵列中微透镜焦距之间的关系, 入射光束面积  $S_m$  与出射光束面积

收稿日期: 2022-12-07; 修回日期: 2023-01-22; 录用日期: 2023-02-21; 网络首发日期: 2023-03-09

基金项目: 国家自然科学基金 (617050183)、吉林省科技发展计划 (202002037jc)

通信作者: \*lzy@cust.edu.cn

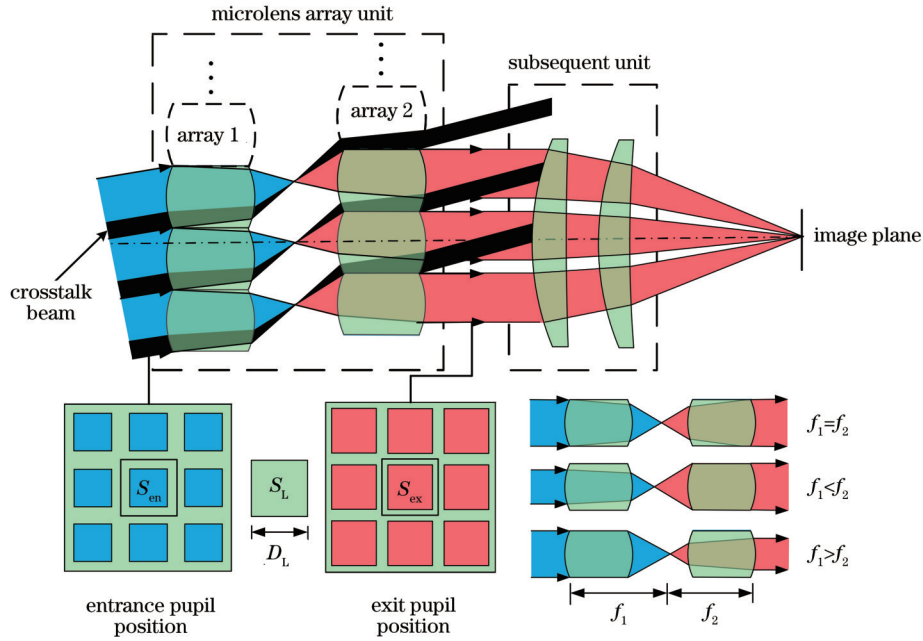


图 1 微透镜阵列扫描成像光学系统  
Fig. 1 Microlens array scanning imaging optical system

$S_{ex}$ 也未必相等。

针对通过微透镜阵列通光孔径的光束在不同条件下的填充问题,采用填充因子来表征微透镜阵列单元光瞳位置处光束的填充率,入瞳与出瞳位置处的填充因子  $\alpha_{en}$  和  $\alpha_{ex}$  定义为

$$\alpha_{en} = \frac{S_{en}}{S_L}, \tag{1}$$

$$\alpha_{ex} = \frac{S_{ex}}{S_L}, \tag{2}$$

式中:  $S_L$  为单个微透镜的通光孔径面积;  $S_{en}$  和  $S_{ex}$  分别为通过单个微透镜的入射光束和出射光束面积。当微透镜阵列的通光孔径固定不变时,改变微透镜的焦距会影响填充因子。其中:入瞳处的填充因子  $\alpha_{en}$  决定了系统接收的能量,影响系统的探测距离;出瞳处的填充因子  $\alpha_{ex}$  决定了系统的点扩散函数(PSF)和调制传递函数(MTF),影响系统的成像分辨率。两者都对系统的性能产生重要影响。

### 2.2 探测距离

作用距离是依据系统的基本性能参数,在已知目标与背景辐射特性和大气气象条件的情况下系统可能达到的最大观察距离。在许多应用尤其是在红外探测系统中,作用距离是评价系统性能的重要指标。探测器信号的输出电压与光敏面上的光照度成正比,而光敏面上的光照度又与物镜相对孔径的平方成正比,为了在探测器的光敏面上获得更大的照度以提高系统的探测能力,要求光学系统的接收口径要大,红外环境中微透镜阵列扫描光学系统点目标探测距离的方程<sup>[25]</sup>可以表示为

$$R = \frac{\sqrt{\alpha_{en} \cdot A_{en} \cdot J \cdot \tau_a \cdot \tau_o \cdot E}}{\sqrt{A_D \cdot G \cdot R_{SN}}}, \tag{3}$$

式中:  $R$  为探测距离;  $A_{en}$  为微透镜阵列的通光孔径面积;  $J$  为目标的辐射强度;  $\tau_a$  为大气的平均透过率;  $\tau_o$  为光学系统的透过率;  $E$  为探测器的平均光谱比探测率;  $A_D$  为探测器的有效面积;  $G$  为系统的噪声等效带宽;  $R_{SN}$  为探测系统的信噪比。由式(3)可知,对于特定的探测目标,除大气透过率  $\tau_a$ 、光学系统的有效入瞳面积  $A_{en}$  和光学系统的透过率  $\tau_o$  外,其他参数值是固定的,因此其他条件不变时,增加光学系统的有效入瞳面积可以相应地增加探测距离。当微透镜阵列的通光孔径面积不变时,改变阵列 1 中微透镜的焦距,可以改变入瞳位置处的填充因子  $\alpha_{en}$ ,进而影响系统的有效入瞳面积和接收能量,最终改变系统的探测距离。探测距离的仿真参数如表 1 所示,不同大气透过率下,探测距离与入瞳位置处的填充因子  $\alpha_{en}$  的关系曲线如图 2 所示。

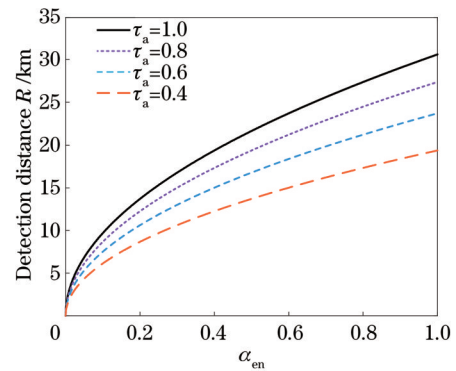


图 2 探测距离随入瞳位置处填充因子  $\alpha_{en}$  的变化曲线  
Fig. 2 Variation curves of detection distance with fill factor  $\alpha_{en}$

表 1 探测距离仿真参数  
Table 1 Simulation parameters of the detection distance

Parameter	Radiation intensity $J / (\text{W} \cdot \text{sr}^{-1})$	Optical system transmittance $\tau_o$	Pixel size $A_D / \mu\text{m}$	Average spectral specific detectivity $E / (\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	Noise equivalent bandwidth $G / \text{Hz}$	Signal to noise ratio $R_{\text{SN}}$	Clear aperture of MLA $A_{\text{en}} / \text{cm}^2$
Value	0.5	0.9	30×30	3×10 <sup>11</sup>	100	5.5	11.5

由图 2 可知,在一定的微透镜阵列通光孔径下,当入瞳处的填充因子  $\alpha_{\text{en}}$  固定,光学系统的有效入瞳面积不变时,探测距离随着大气透过率的增大而增加,这意味着同一个光学系统在不同的环境中探测能力也是不同的,由于大气透过率等客观因素往往无法人为改变,因此要想提高系统的探测能力,较好的解决方法是提升光学系统的性能。在同一大气透过率下,光学系统的探测距离随着  $\alpha_{\text{en}}$  的增大而增加,大的有效入瞳面积意味着微透镜阵列系统接收到更多的能量,进而增加了系统的探测距离,并且没有以牺牲微透镜阵列系统的成像分辨率为代价。图 2 所示曲线的斜率逐渐递减,意味着增加  $\alpha_{\text{en}}$  带来的探测距离收益将会逐渐降低,因此,在满足其他性能要求时,适当地增大有效入瞳面积,即入瞳处的填充因子  $\alpha_{\text{en}}$ ,可以增加系统的探测距离。

### 2.3 点扩散函数

根据信息光学理论,一个光学成像系统可近似等效为一个线性空间不变系统。在空域中用点扩散函数来表征光学系统的特性和分辨本领,点扩散函数是目标点源经过光学系统后在像面的强度分布。调制传递函数描述了系统在频域响应,它反映了系统传递物

体不同频率分量对比度的能力。本研究主要关注微透镜阵列系统出瞳处的衍射效应,并假设系统在成像过程中具有线性空间不变性。

微透镜阵列系统的一个特性是:离开微透镜阵列的波前将不再是连续的。此外,阵列 2 中的微透镜不会被来自阵列 1 中相应微透镜的光束填满。在矩形排列的微透镜阵列系统中,连续入射光波通过微透镜阵列系统被分割成多束子光束,它的光强远场分布应是多束子光束的干涉叠加。对于由  $n$  个边长为  $D_L$  的正方形微透镜组成的微透镜阵列成像系统,其光瞳函数在数学上可以表示为一个子孔径光瞳函数与一个狄拉克  $\delta$  分布函数阵列的卷积,每一个  $\delta$  函数的位置表示一个子孔径的位置。当单位强度的零度平行光入射时,包含  $n$  个正方形子孔径的微透镜阵列光学系统的光瞳函数可以表示为

$$T(x, y) = \text{rect}\left(\frac{x}{\alpha_{\text{ex}} D_L}\right) \text{rect}\left(\frac{y}{\alpha_{\text{ex}} D_L}\right) * \sum_{n=1}^N \delta(x - x_n, y - y_n), \quad (4)$$

式中:  $(x_n, y_n)$  为第  $n$  个矩形孔径的坐标; \* 表示卷积运算。对式 (4) 进行傅里叶变换并取模的平方,可以得到系统的点扩散函数:

$$P(x, y) = \left| \mathcal{F}[T(x, y)] \right|^2 = \text{sinc}^2\left(\frac{\alpha_{\text{ex}} D_L x}{\lambda z}\right) \text{sinc}^2\left(\frac{\alpha_{\text{ex}} D_L y}{\lambda z}\right) \cdot \left| \sum_{n=1}^N \exp\left[-\frac{2\pi j}{\lambda z}(xx_n + yy_n)\right] \right|^2. \quad (5)$$

由 5×5 微透镜阵列组成的微透镜阵列扫描光学系统在不同填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  下的点扩散函数的二维剖面图如图 3 所示,其中曲线数值相对于每个状态下光强的最大值作了归一化处理。

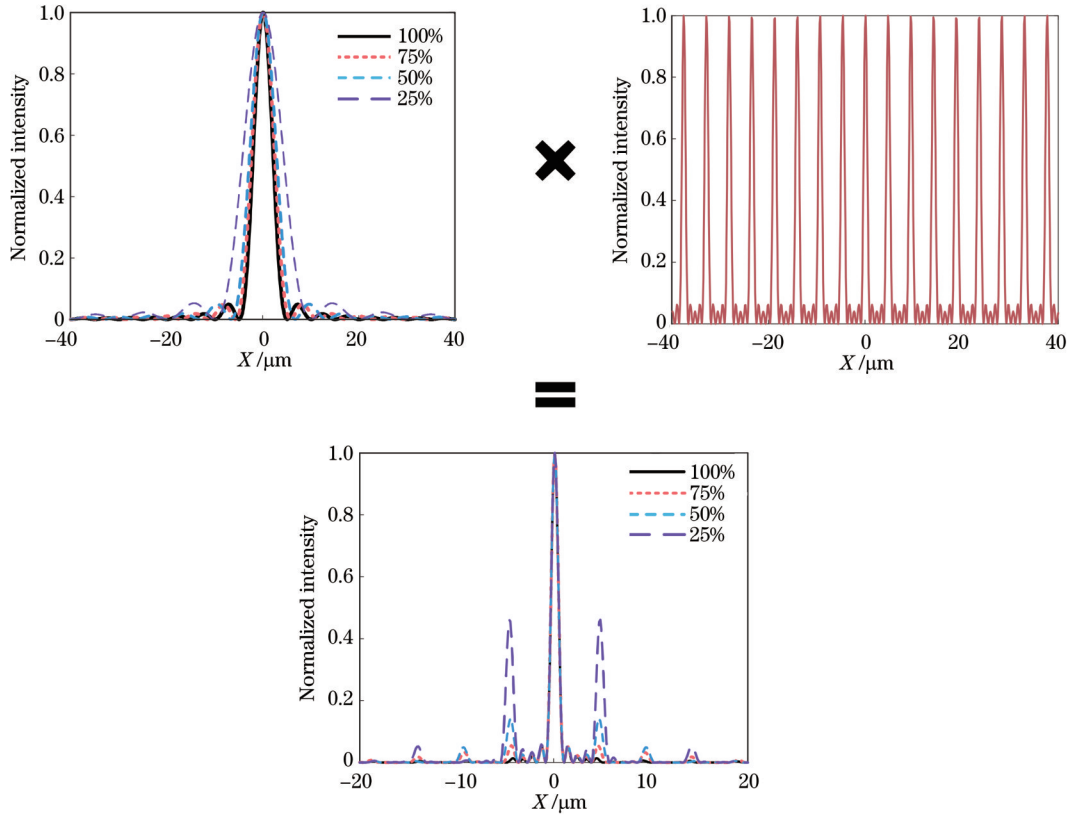
当入射光波长、矩形微透镜的宽度和微透镜阵列中微透镜的数量确定后,微透镜阵列扫描光学系统的点扩散函数由两个因素决定,即单个微透镜子系统的衍射光强分布与微透镜阵列结构所决定的固定周期网格光强分布。微透镜阵列结构所决定的固定周期网格光强分布受矩形孔径位置,即微透镜阵列中微透镜的排布方式影响,当微透镜阵列的结构固定不变时,由微透镜阵列结构所确定的固定周期网格光强分布不发生变化,其不受填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  的影响。而单个微透

镜子系统的衍射光强分布受填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  的影响,随着填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  的减小,单个微透镜子系统的衍射光斑弥散程度增大。微透镜阵列系统的点扩散函数则是两者的乘积,随着填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  的减小,点扩散函数中零级主极大的能量占比降低,更多的能量进入其他级主极大中,最终导致光斑弥散程度增加,微透镜阵列系统的分辨率降低。

### 2.4 调制传递函数

调制传递函数描述了系统在频域的响应,反映了系统传递物体不同频率分量对比度的能力。本研究中调制传递函数由点扩散函数的傅里叶变换得到,它可以表示为

$$M(f_x, f_y) = \text{Re}\left\{ \mathcal{F}[P(x, y)] \right\} = M_{\text{sub}} + \frac{M_{\text{sub}}}{N} * \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \delta\left(f_x - \frac{x_m - x_n}{\lambda z}, f_y - \frac{y_m - y_n}{\lambda z}\right), \quad (6)$$

图 3 不同  $\alpha_{\text{ex}}$  下微透镜阵列系统的点扩散函数 ( $z=80 \text{ mm}$ ,  $\lambda=4 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $D_L=6.8 \text{ mm}$ )Fig. 3 PSF of microlens array system with different  $\alpha_{\text{ex}}$  ( $z=80 \text{ mm}$ ,  $\lambda=4 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $D_L=6.8 \text{ mm}$ )

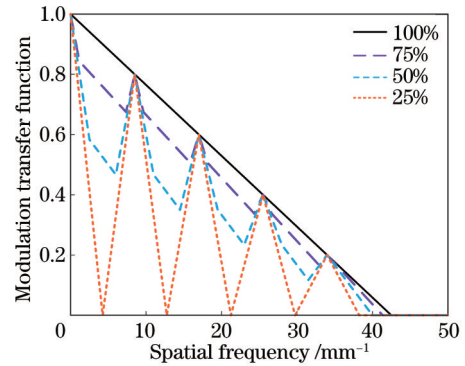
$$M_{\text{sub}}(\rho) = \begin{cases} \frac{2}{\pi} \left[ \arccos(\rho_n) - \rho_n(1 - \rho_n^2)^{\frac{1}{2}} \right], & 0 \leq \rho_n \leq 1 \\ 0, & \rho_n > 1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为频谱面上任意矢量的半径,  $\rho_c = \alpha_{\text{ex}} D_L / (\lambda z)$ ,  $\rho_n = \rho / \rho_c$ 。由式(6)可知, 微透镜阵列系统的调制传递函数是微透镜子系统的调制传递函数复制叠加的结果, 微透镜子系统的调制传递函数被复制到空间频谱的多个位置并相互叠加, 中心零频处  $N$  个  $M_{\text{sub}}$  重叠, 其余位置的峰值强度为零频率处峰值强度的  $1/N$ 。在同样的模拟条件下, 不同填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  的微透镜阵列系统调制传递函数曲线如图 4 所示, 可见调制传递函数曲线也有类似的周期特性。随着填充因子的降低, 对比度并非单调递减, 中间空间频率处的对比度下降明显, 当填充因子  $\alpha_{\text{ex}}$  下降至 25% 时, 某些空间频率处的对比度降为 0, 这就意味着较小的填充因子会导致微透镜阵列系统会丢失目标的部分中频信息。可以预测, 当填充因子进一步降低时, 零对比度空间频率的范围将随着填充因子的降低而增大。

### 3 模型建立与仿真分析

#### 3.1 基于近轴模型的填充因子计算

为了方便, 选取其中一个单独的子系统进行分析,

图 4 不同  $\alpha_{\text{ex}}$  下微透镜阵列系统的调制传递函数Fig. 4 MTF of microlens array system with different  $\alpha_{\text{ex}}$ 

静止状态与扫描状态下的微透镜阵列子单元的近轴模型如图 5 所示, 孔径光阑放在第二个微透镜的焦平面处。两个正透镜具有相同的通光孔径  $D_L$ , 焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$  且均为正值, 入射光束宽度为  $D_1$ , 出射光束宽度为  $D_2$ 。由图 5 可知, 当两个透镜的相对横向位移为  $\Delta$  时, 来自入射角度为  $I_t$  的平行光束将被准直, 系统参数满足如下关系

$$\tan I_t = \frac{\Delta}{f_1}. \quad (8)$$

系统扫描时会存在凝视视场, 凝视视场是相对较小的视场范围, 即系统每次都对一定角度范围内的光束进行扫描, 目的是缩短扫描时间, 提高系统的扫描效

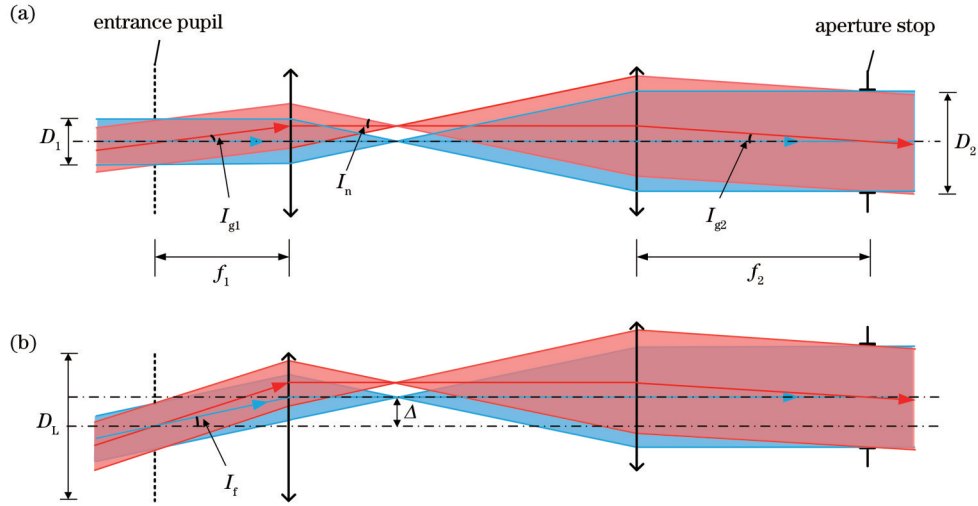


图 5 微透镜阵列子单元的近轴模型。(a) 静止状态；(b) 扫描状态

Fig. 5 Paraxial model of microlens array subunit. (a) Static state; (b) scanning state

率。由图 5 可知,来自凝视视场的光束也会占用一部分通光孔径,假设系统的凝视视场为  $\pm I_{g1}$ ,当角度  $I_t$  达到最大时,入射光束中的下边缘光线入射至透镜 2 的上边缘,入射光束宽度  $D_1$ 、出射光束宽度  $D_2$  与通光孔径  $D_L$  满足

$$\frac{D_1}{2} + f_1 \cdot \tan I_{g1} + f_1 \cdot \tan I_t = \frac{D_L}{2}, \quad (9)$$

$$\frac{D_2}{2} + f_2 \cdot \tan I_{g2} = \frac{D_L}{2}. \quad (10)$$

定义一次像面处的数值孔径角为  $I_n$ ,那么有

$$D_1 = 2 \cdot f_1 \cdot I_n, \quad (11)$$

将式(11)代入式(9),得到

$$D_L = 2f_1 \cdot (I_n + \tan I_{g1} + \tan I_t). \quad (12)$$

根据拉格朗日不变定理,有

$$f_1 \cdot \tan I_{g1} = f_2 \cdot \tan I_{g2}. \quad (13)$$

结合式(9)、(10)和(13)可以得到

$$D_2 = 2f_1 \cdot (I_n + \tan I_t). \quad (14)$$

基于式(11)和式(12)得到入瞳处的填充因子

$$\alpha_{en} = \left( \frac{D_1}{D_L} \right)^2 = \left( \frac{I_n}{I_n + \tan I_{g1} + \tan I_t} \right)^2, \quad (15)$$

基于式(12)和式(14)得到出瞳处的填充因子

$$\alpha_{ex} = \left( \frac{D_2}{D_L} \right)^2 = \left( \frac{I_n + \tan I_t}{I_n + \tan I_{g1} + \tan I_t} \right)^2. \quad (16)$$

式(15)和式(16)为近轴模型下系统填充因子的计算公式,利用这两个公式可以完成填充因子的快速计算。

### 3.2 参数对填充因子的影响

根据式(15)和式(16),填充因子受最大扫描视场角  $I_t$ 、凝视视场角  $I_{g1}$  和一次像面处的数值孔径角  $I_n$  的影响,因此分析了各参数对填充因子的影响。图 6(a)~(c)所示分别为  $I_n$ 、 $I_t$ 、 $I_{g1}$  随  $\alpha_{en}$ 、 $\alpha_{ex}$  的变化关系。

在  $I_t = 1.0^\circ$ 、 $I_{g1} = 0.5^\circ$  的条件下,填充因子随  $I_n$  的变化曲线如图 6(a) 所示。 $I_n = 0^\circ$  表示没有光束进入光学系统,此时两个填充因子都等于 0;  $I_n$  增大,意味着入射光束与出射光束宽度增大。因此,适量增大  $I_n$ ,有利于同时增大  $\alpha_{en}$  和  $\alpha_{ex}$ 。图 6(b) 所示为在  $I_n = 3.0^\circ$ 、 $I_{g1} = 0.5^\circ$  的条件下,填充因子随  $I_t$  的变化曲线。 $I_t$  对出瞳处填充因子  $\alpha_{ex}$  的影响较不明显,但  $\alpha_{en}$  随着  $I_t$  的增大而减小,这表明系统扫描角度与探测距离相互制约,增大扫描视场角度需要牺牲探测距离。在  $I_n = 3.0^\circ$ 、 $I_t = 1.0^\circ$  的条件下,  $I_{g1}$  对填充因子的影响如图 6(c) 所示,增大  $I_{g1}$  会导致  $\alpha_{en}$  和  $\alpha_{ex}$  同时降低,  $I_{g1}$  的增大意味着来自凝视视场的光束会占用更大的通光孔径,此时入射光束和出射光束的宽度均会变小,导致  $\alpha_{en}$  和  $\alpha_{ex}$  减小。由以上分析可知,适当增大  $I_n$ 、减小  $I_{g1}$ ,有利于提高系统的填充因子。

### 3.3 设计与分析

基于近轴模型的微透镜阵列扫描光学系统的设计流程如图 7 所示。首先,定义系统的参数  $I_n$ 、 $I_t$  和  $I_{g1}$ ,利用式(15)和式(16)计算出填充因子  $\alpha_{en}$  和  $\alpha_{ex}$ 。系统中微透镜阵列的通光孔径面积已知,基于填充因子  $\alpha_{en}$  计算并判断系统的探测距离是否满足要求。如果满足要求,则进一步基于填充因子  $\alpha_{ex}$  计算系统衍射受限条件下的点扩散函数和调制传递函数;当以上任何一个要求未满足时,重新赋值参数  $I_n$ 、 $I_t$  和  $I_{g1}$  并反复迭代,直至满足要求为止。其次,将近轴透镜转换成实际透镜,根据系统参数给出实际透镜的焦距、曲率半径和厚度等结构参数的初始值,通过点列图等方式对系统的成像质量进行分析与评价。如果系统的成像质量未达到要求,则对透镜的结构参数进行优化;当系统的成像质量满足要求时,整个系统的设计结束。

基于上述设计流程设计了一款微透镜阵列光学系统,图 8 为整个系统的结构示意图,在微透镜阵列单元后面放置一个焦距为 80 mm 的理想透镜。

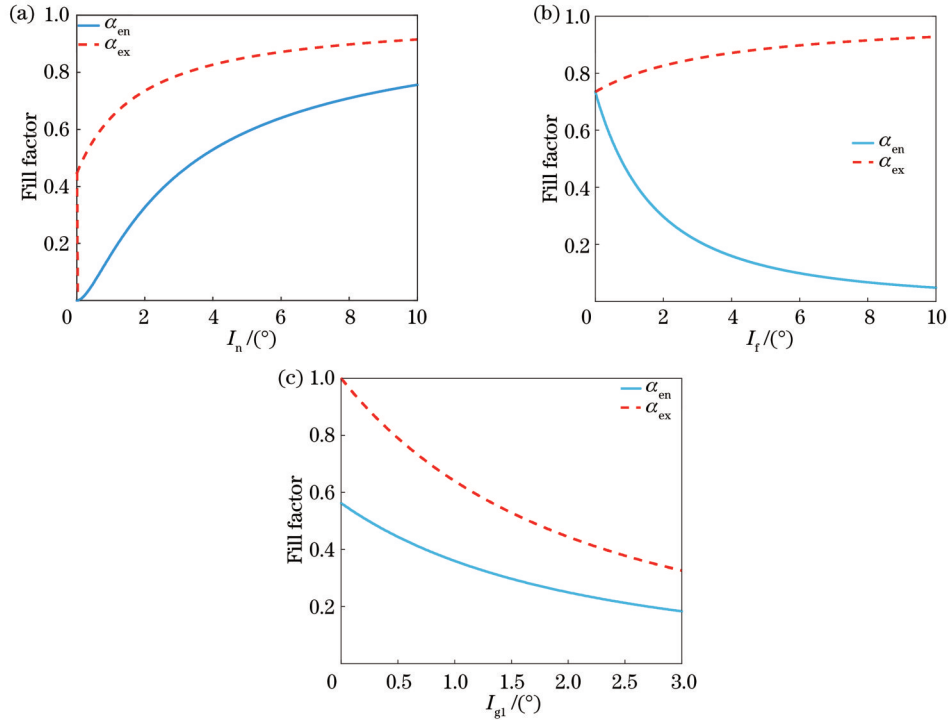


图 6 参数对填充因子的影响。(a)数值孔径角;(b)扫描视场角;(c)凝视视场角

Fig. 6 Effect of parameters on fill factors. (a) Numerical aperture angle; (b) scanning field angle; (c) staring field angle

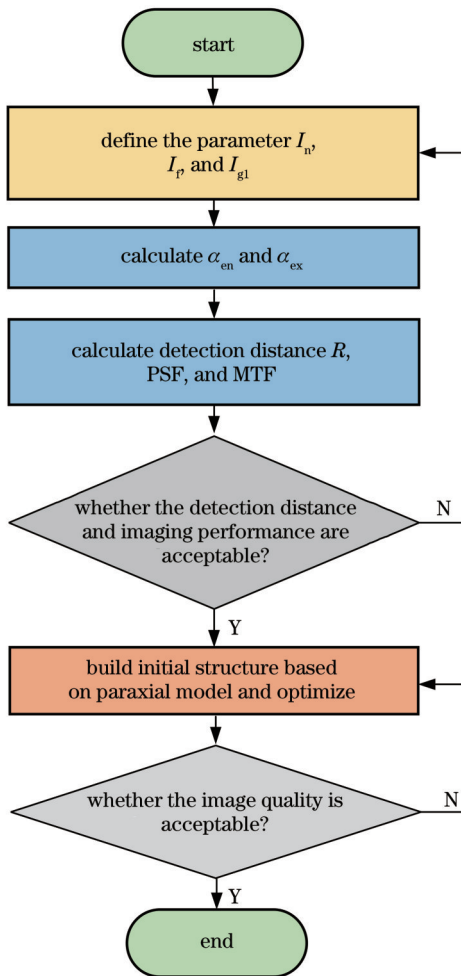


图 7 系统设计流程

Fig. 7 System design flow

所设计的微透镜阵列系统包括两个  $5 \times 5$  的正方形微透镜阵列,其中单个微透镜的宽度为  $6.8 \text{ mm}$ ,在大气透过率为  $0.4$  的环境中,对于辐射强度为  $0.5 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$  的点目标,探测距离约为  $7.8 \text{ km}$ 。系统的扫描角度  $I_s$  为  $\pm 4^\circ$ ,凝视视场角  $I_{gl}$  为  $\pm 0.23^\circ$ ,一次像面处的数值孔径角  $I_n$  为  $2.72^\circ$ ,工作波长为  $4 \text{ }\mu\text{m}$ ,入瞳处的填充因子  $\alpha_{en}$  为  $0.16$ ,出瞳处的填充因子  $\alpha_{ex}$  为  $0.87$ 。微透镜阵列 1 与阵列 2 的材料为锗,微透镜的厚度为  $14 \text{ mm}$ ;阵列 1 中微透镜前表面的曲率半径  $r_1 = 97.22 \text{ mm}$ ,后表面的曲率半径  $r_2 = -870 \text{ mm}$ ;阵列 2 中微透镜前表面的曲率半径  $r_3 = -147.43 \text{ mm}$ ,后表面的曲率半径  $r_4 = -85.57 \text{ mm}$ 。图 9(a)、(b)所示分别为优化后系统的点扩散函数与调制传递函数曲线,各视场的点列图如图 9(c)所示。

系统出瞳处的填充因子  $\alpha_{ex}$  为  $0.87$ ,此时  $\alpha_{ex}$  的值较大,由图 9(a)可知,点扩散函数中大部分能量集中在零级主极大中,其他级主极大的能量所占的比例较低,因此衍射光斑的弥散程度较低。图 9(b)所示的传递函数曲线中频处对比度有所下降,由于  $\alpha_{ex}$  保持在较高的水平,中频处对比度的降低并不明显,但调制传递函数曲线仍具有周期性,模拟计算结果与理论分析结果吻合。各视场的点列图中最大光斑的几何半径  $R_{GEO}$  为  $4.76 \text{ }\mu\text{m}$ ,说明经过微透镜阵列的各个扫描视场,出射光束平行度较高,系统性能良好。

## 4 结 论

针对受到大扫描视场与微透镜阵列结构的影响,

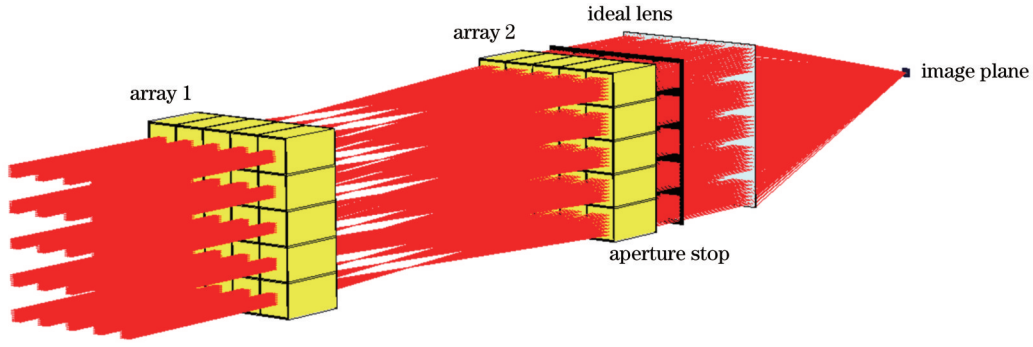


图 8 微透镜阵列系统结构示意图  
Fig. 8 Structure diagram of MLA system

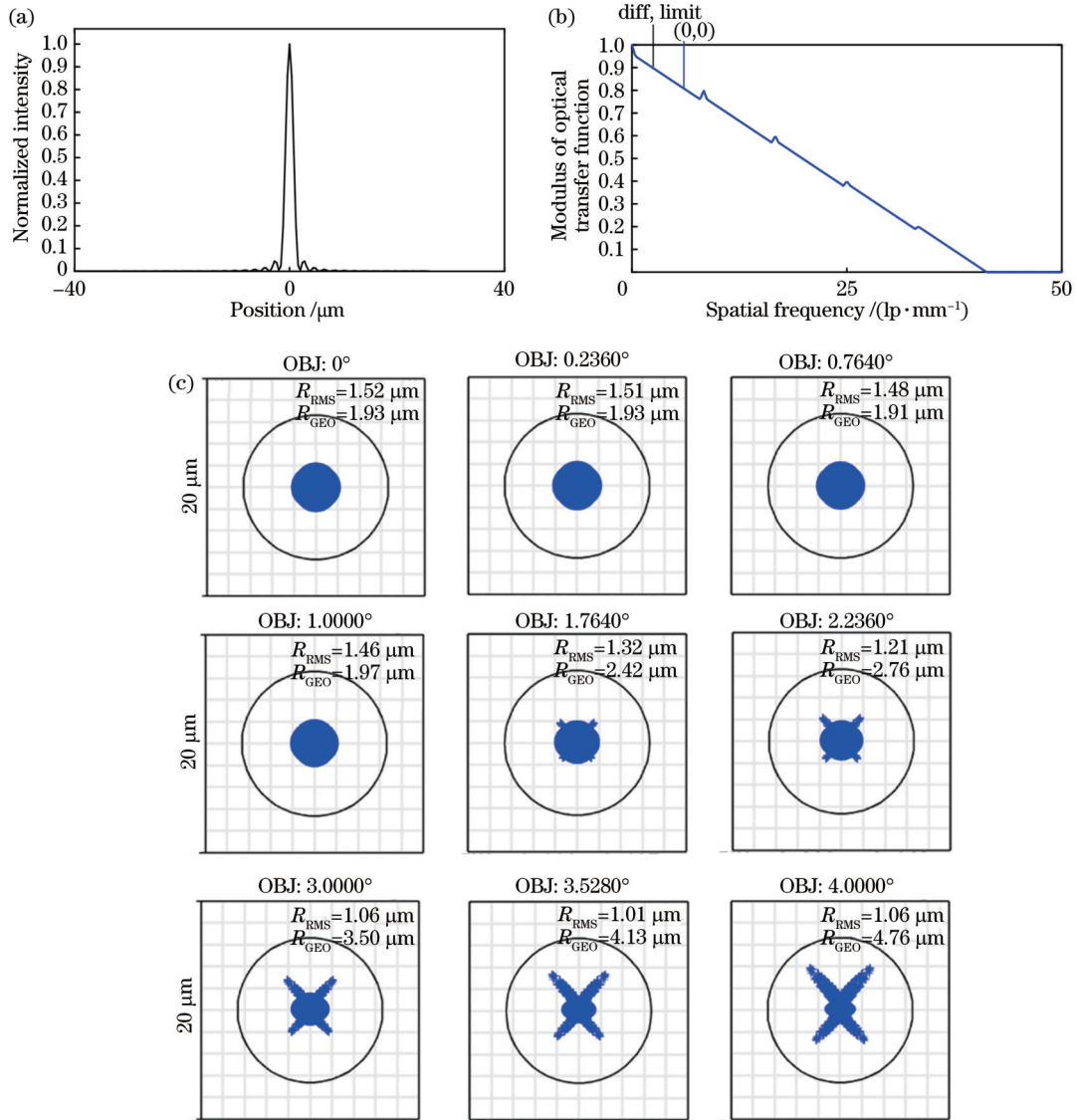


图 9 所设计系统的测试结果。(a)点扩散函数;(b)调制传递函数;(c)点列图  
Fig. 9 Test results of design system. (a) PSF; (b) MTF; (c) spot diagrams

光束不能填满微透镜阵列通光孔径的问题,利用填充因子表征光瞳位置处光束的填充率,并结合微透镜阵列系统的特性,探讨了填充因子与微透镜阵列系统接收的能量即探测距离之间的关系。同时研究了填充因

子对系统点扩散函数以及调制传递函数的影响,利用填充因子评估微透镜阵列系统的性能。在此基础上,基于近轴光学模型,提出一种快速计算微透镜阵列光学系统填充因子的方法,并设计了一款微透镜阵列扫

描光学系统,系统的仿真结果与理论分析结果吻合,研究结果表明所设计系统的性能良好,可为微透镜阵列系统的设计和评估提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Johnsen H J D, Aksnes A, Torgersen J. High-performance stationary solar tracking through multi-objective optimization of beam-steering lens arrays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(14): 20503-20522.
- [2] Duparré J, Götz B, Göring R. Micro-optical 1×4 fiber switch for multimode fibers with 600- $\mu\text{m}$  core diameters[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(34): 6889-6896.
- [3] 邱高峰, 吴佩, 曹先益, 等. 基于 FPGA 电控的二维快速光束扫描雷达系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1101001.  
Qiu G F, Wu K, Cao X Y, et al. Two-dimensional fast beam scanning lidar system based on FPGA control[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1101001.
- [4] Bogaert L, Meuret Y, Roelandt S, et al. Demonstration of a multiview projection display using decentered microlens arrays[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26092-26106.
- [5] Li A H, Wang W, Bian Y M, et al. Dynamic characteristics analysis of a large-aperture rotating prism with adjustable radial support[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2220-2228.
- [6] 邢振冲, 王伟. 基于双光楔棱镜的激光通信光端机设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(11): 1123001.  
Xing Z C, Wang W. Design of laser communication optical transceiver based on double wedge prisms[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(11): 1123001.
- [7] Li A H, Jiang X C, Sun J F, et al. Laser coarse-fine coupling scanning method by steering double prisms[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 356-364.
- [8] McManamon P F, Ataei A. Progress and opportunities in the development of nonmechanical beam steering for electro-optical systems[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(12): 120901.
- [9] Li Y Z, Chen B S, Na Q X, et al. Wide-steering-angle high-resolution optical phased array[J]. *Photonics Research*, 2021, 9(12): 2511-2518.
- [10] 王晓斌, 曹阳, 刘春波, 等. 硅基光学相控阵芯片相位噪声补偿研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(23): 2323001.  
Wang X B, Cao Y, Liu C B, et al. Phase noise compensation of silicon-based optical phased array chip[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(23): 2323001.
- [11] 王琦, 高旭峰, 张大伟, 等. 液晶光学相控阵技术的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(17): 1700007.  
Wang Q, Gao X F, Zhang D W, et al. Research progress in liquid crystal optical phased array technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(17): 1700007.
- [12] Miller S A, Chang Y C, Phare C T, et al. Large-scale optical phased array using a low-power multi-pass silicon photonic platform[J]. *Optica*, 2020, 7(1): 3-6.
- [13] You Q, Chen D G, Xiao X, et al. 10 Gb/s free space optical interconnect with broadcasting capability enabled by a silicon integrated optical phased array[J]. *Chinese Optics Letters*, 2021, 19(12): 120602.
- [14] Goltsov W C, Holz M. Agile beam steering using binary optics microlens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1990, 29(11): 1392-1397.
- [15] Watson E A. Analysis of beam steering with decentered microlens arrays[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(11): 2665-2670.
- [16] Akatay A, Urey H. Design and optimization of microlens array based high resolution beam steering system[J]. *Optics Express*, 2007, 15(8): 4523-4529.
- [17] Yang X, Geng C, Li X Y, et al. Theory analysis and experimental demonstration of a microlens array scanner with Kepler structure[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(34): 10754-10760.
- [18] Duparré J, Radtke D, Dannberg P. Implementation of field lens arrays in beam-deflecting microlens array telescopes[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(25): 4854-4861.
- [19] Akatay A, Ataman C, Urey H. High-resolution beam steering using microlens arrays[J]. *Optics Letters*, 2006, 31(19): 2861-2863.
- [20] Gibson J L, Duncan B D, Watson E A, et al. Wide-angle decentered lens beam steering for infrared countermeasures applications[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(10): 2312-2321.
- [21] 李建军, 褚春艳, 卢玮彤, 等. 微透镜阵列的制备与应用研究进展[J]. *光学学报*, 2021, 41(21): 2100001.  
Li J J, Chu C Y, Lu W T, et al. Development of microlens arrays: from fabrication to photonic applications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(21): 2100001.
- [22] Motamedi M E, Andrews A P, Gunning W J, et al. Miniaturized micro-optical scanners[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3616-3623.
- [23] Duparré J, Göring R. Numerical wave optical analysis of microlens array telescopes and comparison with experimental results[J]. *Applied Optics*, 2003, 42(19): 3992-4001.
- [24] Yang X, Geng C, Li F, et al. High-resolution beam scanning technique with microlens array and adaptive fiber-optics collimator[J]. *Optics Express*, 2021, 29(1): 359-367.
- [25] Hudson R D. *Infrared system engineering*[M]. New York: Wiley-Interscience, 1969.

## Performance Analysis of Scanning Optical System with Microlens Array Based on Fill Factor

Ge Zenghui, Huang Yunhan, Liu Zhiying\*

*School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China*

### Abstract

**Objective** Beam scanning has been widely used in laser radar and optical communications. Conventional beam scanning methods with mechanical structures suffer from many limitations, such as large volumes, low switching speeds, and high



powers. Optical phased array is a new technique that enables beam scanning, and phase modulator components used in optical phased array scanning technology mainly include liquid crystal, optical waveguide, electro-optical crystal, microlens array, and micromirror array. Electro-optical scanning device has some problems, such as low response speed, high driving voltage, and difficult large-aperture beam scanning. The scanning technology with a microlens array has the advantages of simple structure, miniaturization, lightweight, high scanning speed, and large aperture. Scanning imaging optical system with a microlens array includes microlens array elements, and the rays do not fill the clear aperture of the microlens array owing to the effect of scanning angle and microlens array structure. One property of the microlens array system is that the wavefront exiting the microlens array is no longer continuous, and the motion of the microlens array results in non-rotational symmetry of the system, which brings new challenges to the traditional design methods and performance evaluation of optical systems. In this paper, a preliminary theoretical study is conducted on the performance and imaging models of imaging optical systems based on optical phased array scanning technology with a microlens array, which can benefit the design and evaluation of microlens array systems.

**Methods** The scanning imaging optical system with a microlens array is a combined optical system, and the scanning function is accomplished by the motion of the microlens array. Firstly, the performance of the system is affected by the discontinuity and periodicity of the beam passing through the pupil, and the fill factor is adopted in this study to characterize the fill rate of rays at the pupil position of the microlens array system. The effect of the fill rate of the beam at the entrance pupil position on the detection distance of the system is analyzed according to the formula of the detection distance of the point target of the optical system in the infrared environment, and that at the exit pupil position on the point spread function and the modulation transfer function of the system are analyzed according to the information optics theory. Secondly, the paraxial optical model of a scanning optical system with a microlens array is constructed, and a calculation method of the fill factor based on the paraxial optical model is proposed. The effect of the system structure parameters on the fill factor is analyzed, and a design method of the scanning optical system with a microlens array is proposed based on the calculation method. Finally, a scanning imaging optical system with a microlens array is designed by using the proposed design method, and the design result verifies the theoretical analysis and design method.

**Results and Discussions** Several important results are obtained as follows. Firstly, the detection distance simulation results (Fig. 2) show that appropriately increasing the effective entrance pupil area is beneficial to increase the detection distance of the system. The point spread function of the scanning optical system with a microlens array (Fig. 3) is the product of the diffractive optical intensity distribution of a single microlens unit and the fixed periodic optical intensity distribution with a grid pattern determined by the microlens array structure. The energy proportion of the zero-order principal maximum in the point spread function reduces with the decrease in  $\alpha_{\text{ex}}$ , and more energy enters the other-order principal maxima. Therefore, the resolution of the system degrades owing to the increased diffusion of the light spot. A similar periodicity is observed in the modulation transfer function curve that does not decrease monotonically, and the reduction in the fill factor  $\alpha_{\text{ex}}$  decreases the contrast at the middle spatial frequency. When the fill factor  $\alpha_{\text{ex}}$  decreases to 25%, multiple zeros are observed before the true cutoff frequency, which indicates that a very small fill factor can cause the microlens array system to lose a part of the object information in the middle frequencies. Secondly, the effects of different parameters on the fill factor are analyzed. The results show that the system scanning angle and detection distance are mutually constrained, and increasing the scanning angle needs to be accomplished by reducing the detection distance [Fig. 6 (b)]. Increasing the value of  $I_n$  [Fig. 6(a)] and decreasing the value of  $I_{g1}$  [Fig. 6(c)] are beneficial to increase the fill factor of the system. Finally, an optical system consisting of two square microlens arrays of  $5 \times 5$  is designed, with a fill factor  $\alpha_{\text{en}}$  of 0.16,  $\alpha_{\text{ex}}$  of 0.87, and scanning angle of  $\pm 4^\circ$ . For a point target with a radiation intensity of  $0.5 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ , the detection distance is 7.8 km when the average transmittance of the atmosphere is 0.4. The simulation results show that most energy of the point spread function of the design system is concentrated in the zero-order principal maximum, and the dispersion degree of the diffracted spot is low [Fig. 9(a)]. The contrast decreases in the middle spatial frequency of the modulation transfer function curve [Fig. 9(b)], but it is not obvious. The geometric radius of the maximum spot in the spot diagram is  $4.76 \mu\text{m}$  [Fig. 9(c)], and the performance of the designed system is excellent.

**Conclusions** The scanning imaging optical system with a microlens array is lightweight, and the displacement of the mechanical movements is small. The rays do not fill the clear aperture of the microlens arrays during the scanning process, which affects the detection distance and imaging resolution of the system. The fill factor is proposed for characterizing the fill rate of rays at the entrance and exit pupil positions of the microlens arrays system, and its effect on the detection distance, point spread function, and modulation transfer function are analyzed. On the basis of the paraxial optical model, a method to fast calculate the fill factor is proposed, and a scanning imaging optical system with microlens

arrays is designed. The simulation results and theoretical calculations are in good agreement, and the design results show that the performance of the system is excellent. This work can benefit the design and evaluation of microlens array systems.

**Key words** imaging systems; beam scanning; microlens array; fill factor; detection distance; point spread function; optical transfer function