

〈系统与amp;设计〉

扫描式微透镜阵列系统的角放大率特性研究

苏晓琴¹, 杨童¹, 周岩², 穆郁², 杨磊¹, 谢洪波¹

(1. 天津大学 精密仪器与amp;光电子工程学院, 光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 天津津航技术物理研究所, 天津 300308)

摘要: 扫描式微透镜阵列系统通过微动扫描成像, 能够有效解决小行程与大视场之间的矛盾。扫描式微透镜阵列一般采用开普勒式望远结构, 通过镜片横向相对位移实现视场扫描。本文提出了一种基于开普勒式望远结构的四片式微透镜阵列, 探究了微透镜阵列的角放大率对于3~5 μm 波段的扫描式微透镜阵列系统的影响。当角放大率小于1时, 经过串扰产生的杂散光较多, 系统的能量利用率上限受到限制, 导致衍射极限受到限制。角放大率越大, 能量利用率上限越高, 当角放大率从 $0.67\times$ 改变为 $0.83\times$, 能量利用率可以从43%提升到69%。当角放大率大于1时, 系统的能量利用率不再受到结构限制, 在抑制串扰的条件下, 优化得到角放大率为 $1.5\times$ 的结构。对其像质进行评价, 各扫描视场RMS半径达到探测器像元尺寸, MTF达到 $0.6@171\text{lp/mm}$ 。角放大率作为表征微透镜阵列结构特点的参数, 与系统能量利用率相关, 从而影响像质, 因此对于角放大率的分析与研究可为扫描式微透镜阵列系统的设计与实现提供依据。

关键词: 微透镜阵列; 光学扫描系统; 杂散光; 角放大率; 能量利用率

中图分类号: TN202

文献标识码: A

文章编号: 1001-8891(2024)04-0392-08

Characterizing the Angular Magnification of Scanning Microlens Array System

SU Xiaojin¹, YANG Tong¹, ZHOU Yan², MU Yu², YANG Lei¹, XIE Hongbo¹

(1. Key Lab of Optoelectronic Information Technology of Education Ministry of China, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Tianjin Jinhang Institute of Technical Physics, Tianjin 300308, China)

Abstract: Scanning microlens array systems can effectively resolve the contradiction between small strokes and large fields of view using micromotion scanning imaging. They generally adopt the Keplerian telescope structure and perform field-of-view scanning through the relative lateral displacement of the lenses. In this paper, we propose a four-piece microlens array based on the Keplerian telescope structure and evaluate the effect of the angular magnification of the microlens array on the scanning microlens array system in the 3–5 μm band. When the angular magnification is less than 1, more stray light is generated after crosstalk and the upper limit of the energy utilization of the system is limited, resulting in a restricted diffraction limit. Higher angular magnifications increase the upper limit of energy utilization. When the angular magnification is changed from $0.67\times$ to $0.83\times$, the energy utilization increases from 43% to 69%. When the angular magnification is greater than 1, the energy utilization of the system is no longer limited by the structure, and the structure with an angular magnification of $1.5\times$ is optimized under the condition of suppressing crosstalk. The results of the image quality evaluation are as follows: the RMS radius of each scanning field reaches the pixel size of the detector, and the MTF reaches $0.6@171\text{p/mm}$. As a parameter characterizing the structure of

收稿日期: 2022-08-11; 修订日期: 2022-12-05.

作者简介: 苏晓琴(1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事微透镜阵列扫描、光学设计方面的研究。E-mail: suxqjy@tju.edu.cn.

通信作者: 杨磊(1982-), 男, 博士, 副教授, 主要从事光学设计、光电检测与成像方面的研究。E-mail: yanglei@tju.edu.cn.

the microlens array, the angular magnification is related to the energy utilization of the system, which affects the image quality. Therefore, the analysis and study of angular magnification can provide a basis for the design and implementation of the scanning microlens array system.

Key words: microlens array, optical scanning system, stray light, angular magnification, energy utilization

0 引言

红外成像系统受限于焦平面阵列等因素,往往空间分辨率较低,扫描光学系统可以有效解决大视场与高分辨率之间的矛盾^[1]。在传统扫描光学系统中,扫描的方式主要有机械式和电子式扫描。机械式扫描主要有利用 $f-\theta$ 镜头^[2]和五角棱镜^[3]进行的激光扫描以及利用振镜进行的谐振扫描^[4]。在光机扫描中更加成熟的是利用伽利略望远镜结构进行扫描^[5],通过正负透镜的横向相对位移实现光线的偏折,从而达到视场扫描的目的。但此种结构扫描行程与透镜口径数量级相当,很难实现快速、微动的扫描^[6]。电子式扫描常用全息和声光扫描方式,体积小扫描速度快,但是扫描角度有限且透过率低导致能量损耗较大。

微光学的发展为小行程、高效率的扫描方式提供了思路。微透镜阵列作为扫描光学系统的主体部分,以望远结构实现平行光扫描,通过光机扫描实现全视场的覆盖^[7-8]。由于微透镜阵列的子单元孔径较小,通过微小的移动就能够达到视场扫描的目的,实现小行程大视场的扫描。

微扫描具有体积小、质量轻、灵活扫描等优势,并且由于微加工的发展,微透镜阵列在扫描光学中受到越来越广泛的关注^[9-10]。但是由于加工和安装的限制,微透镜阵列通常不会采用太复杂的结构。结构复杂度的限制直接导致微透镜阵列扫描系统成像质量受到制约。本文基于开普勒式望远结构设计了四片式的微透镜阵列,探究了角放大率对于扫描式微透镜阵列系统成像效果的影响,并实现大视场的扫描。

1 原理与模型

1.1 微透镜阵列扫描原理

扫描式微透镜阵列系统主要包括两部分,望远子系统和成像子系统^[11]。在望远子系统中,微透镜阵列负责视场扫描,在成像子系统中,红外物镜负责对平行光汇聚成像,如图1所示。通过改变两组微透镜阵列之间的横向微小位移量 Δ 选择入射视场,并将其转换为以 0° 为中心的近似平行光出射,经过物镜成像在探测器上。此时的入射视场即为 Δ 对应的凝视视场,在 Δ 逐渐增大的过程中,微透镜阵列选择的视场角度

也逐渐增大,能够覆盖到的最大视场范围即为微透镜阵列的扫描视场范围。

扫描式微透镜阵列系统不同于一般的成像系统,由于阵列的重复性,当一定角度的光线在传播过程中超过了对应子单元的范围时,光线并不会被机械结构阻挡,而是会通过相邻单元继续传播,因此这部分光线偏离了理想的传播路线,也就形成了串扰光线。当串扰光线通过物镜成像在探测器像面上,就会对最终的成像效果造成影响^[12]。串扰光线原理图如图2所示。

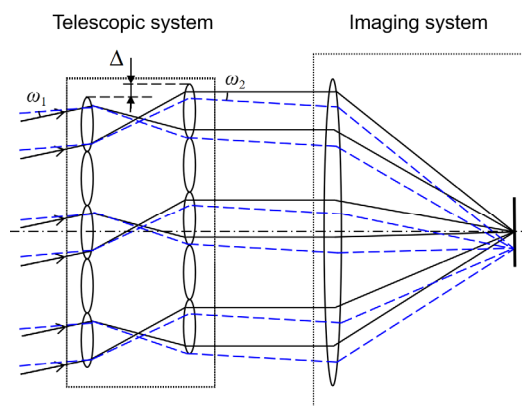


图1 扫描式微透镜阵列系统成像原理

Fig.1 Imaging schematic of scanning microlens array system

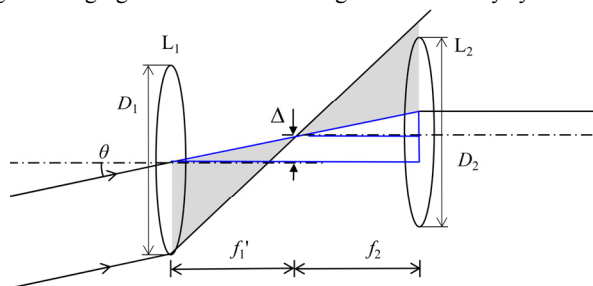


图2 串扰光线产生原理

Fig.2 The principle of crosstalk light generation

对于扫描视场入射角 θ 与相对位移量 Δ 有如下对应关系:

$$\Delta = f_1' \cdot \tan \theta \quad (1)$$

图2所示的结构中,满足 $D_1 = D_2$, $f_1' = f_2$ 。根据几何相似三角关系可知, L_1 的边缘光线在经过 L_2 时,必然会超过 L_2 的边缘高度,从而导致 L_1 的边缘光线在 L_2 上发生串扰。随着扫描视场角的增大, Δ 随之增加,串扰会越发严重,影响系统的成像质量及能量利用率。根据图2中几何关系可以得到 Δ 的表达式:

$$|\Delta| \leq \frac{1}{2} \left(\frac{f_1'}{f_2'} D_2 - D_1 \right) \tag{2}$$

由式(2)可得,在不发生串扰的条件,需要满足 $D_1 \leq D_2$ 或 $f_1' \geq f_2'$ 的情况,位移量 Δ 才有意义。由于本系统采用的微透镜阵列为子单元紧密排布,因此要求满足 $D_1 = D_2$,则必须使 $f_1' \geq f_2'$,如图3所示。此时,所有通过 L_1 的光线能够被 L_2 完整接收,抑制串扰光线。

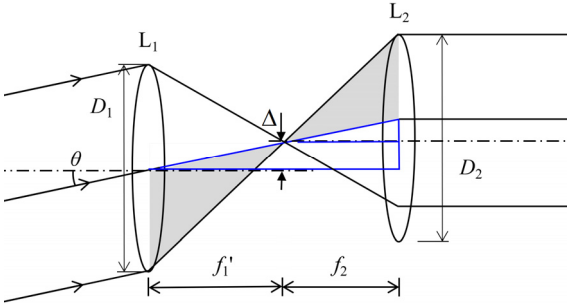


图3 焦距 $f_1' \geq f_2'$ 的结构
Fig.3 Structure with focal length $f_1' \geq f_2'$

由以上分析可知,通过改变 f_1' 与 f_2' 的比值可以调整微透镜阵列的结构从而达到抑制串扰的目的。根据式(1)可知,焦距与视场存在对应关系,可以通过角放大率 γ 等效表示 f_1' 与 f_2' 的比值:

$$\gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{f_1'}{f_2'} \tag{3}$$

式中: ω_1 为微透镜阵列的入射凝视视场; ω_2 为微透镜阵列的出射凝视视场。凝视视场是当微透镜阵列不发生相对位移时,能够覆盖到的视场范围。在红外物镜参数确定的情况下,微透镜阵列要与其匹配,因此出射视场即被确定,此时入射视场则通过角放大率进行调节^[13]。通过对角放大率的讨论不仅可以探究不同结构的串扰情况,分析其能量利用率,还可以对入射凝视视场进行调节,从而进行像质分析。因此探究角放大率对扫描式微透镜阵列系统的影响对系统设计而言十分重要。

此外,对于存在一次像面的开普勒式结构,可以通过在一次像面处添加场镜的方式使光线高度降低,从而使其能够完全通过对应的子单元,达到抑制串扰的目的。如图4所示,图中 θ 为扫描视场角度。通过加入场镜与调整角放大率对系统结构进行初始设计,达到大视场扫描的目的。

1.2 微透镜阵列结构

根据以上分析,本文结合设计结果,探究角放大率的具体影响,主要系统参数如表1所示。

本文设计的扫描式微透镜阵列系统应用于 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ 的中波红外物体的扫描成像。在宽波段的系统要求下,要考虑到色差的校正问题^[14]。除了中波红外波段

可用于色差校正的材料较少外,仅通过两片微透镜阵列也难以实现色差的校正,因此考虑通过增加镜片的方式优化设计。首先将镜片增加为3片,即加入场镜,如图5所示。阵列中每个单元成像过程相同,对子单元进行优化,可以简化优化过程。大角度视场的扫描通过阵列间的横向相对位移实现,如图5(b)中,将 10° 的视场转换为 0° 平行光输出。由于此时角放大率为1,一次成像面前后焦距相同,结构具有对称性,同时要保证微透镜阵列边厚比满足加工条件,最终导致光线在镜片中心汇聚。在成像系统中,一次成像面位于镜片中心,像质会受到镜片内杂质的影响。

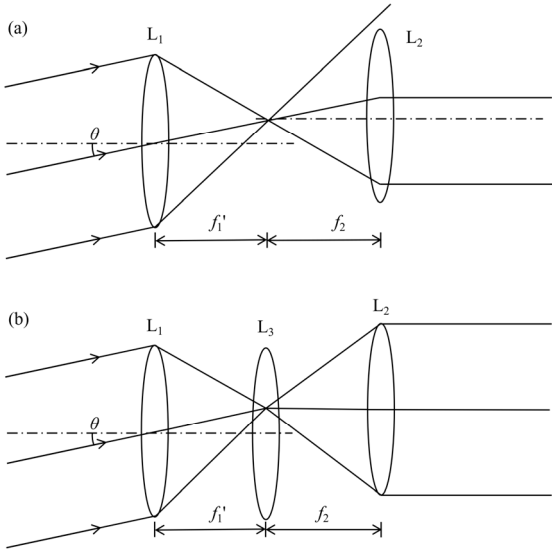


图4 大视场光路图: (a) 加入场镜前; (b) 加入场镜后
Fig.4 Large field of view optical path diagram: (a) Before adding field lens; (b) After adding the field lens

表1 系统参数
Table 1 System parameters

System parameters	Value
Waveband	3–5 μm
Scan field of view	±10°
Total clear aperture	35 mm
Unit clear aperture	0.7 mm
Detector size	9.6 mm×7.68 mm
Resolution	320×256
F #	2

为了把一次成像面从镜片内部移出,将中间场镜分裂为两片,如图6所示,形成四片式结构。与开普勒式结构原理相同,前两片为一组,将光线聚焦于一次像面处;后两片为一组,将不同视场角度的光线以 0° 平行光出射。两两一组,形成微透镜组之间的相对移动。

1.3 红外物镜参数及结构

根据红外探测器 F 数为 2, 以及系统孔径 D 为 35 mm, 可以得到像方焦距 f' :

$$f'=F\cdot D=70\text{ mm}\tag{4}$$

从而得到红外物镜的入射视场角 ω :

$$\omega=\arctan\left(\frac{y'}{f'}\right)=\arctan\frac{6.15}{70}=5^{\circ}\tag{5}$$

式中: y' 为像面的大小, 即探测器尺寸。

红外物镜采用二次成像结构进行设计, 如图 7 所示, 共计使用 6 片透镜。物镜的出瞳位于探测器冷阑处, 且大小与冷阑尺寸相等, 此时只有成像光线能够通过冷阑, 即冷阑效率达到 100%^[15]。红外物镜的入瞳与微透镜阵列的出瞳衔接^[16], 保证系统的光瞳匹配。

2 分析与讨论

2.1 角放大率等于 1

在理想情况下, 当角放大率为 1 时, 入射视场角与出射视场角相同, 根据拉赫不变量, 能够保证入射端和出射端的子单元通光孔径一致。此时微透镜阵列将所有入射光转换后输出, 能够达到能量利用率为 1, 且不产生串扰。但在进行微透镜阵列设计时发现, 由于子单元尺寸固定, 实际通光孔径只能根据子单元尺寸进行设计。一旦子单元的出射通光孔径大于入射通光孔径, 在出射端口总会发生光线串扰到其他单元的情况。同时, 由于微透镜阵列的可调整参数较少并且加工时阵列单元间存在边界效应, 经过边界处的光线不能得到有效控制, 无法精准地将出射孔径充满且不产生串扰。因此, 令子单元出射端的有效孔径略小于子单元尺寸可以有效减少串扰。此时改变的参数为微透镜阵列的出射通光孔径与入射通光孔径的比值, 即导致微透镜阵列的角放大率改变。本文以 $0.67\times$ 、 $0.83\times$ 、 $1.5\times$ 几种倍率为例研究了不同角放大率对系统像质的影响。

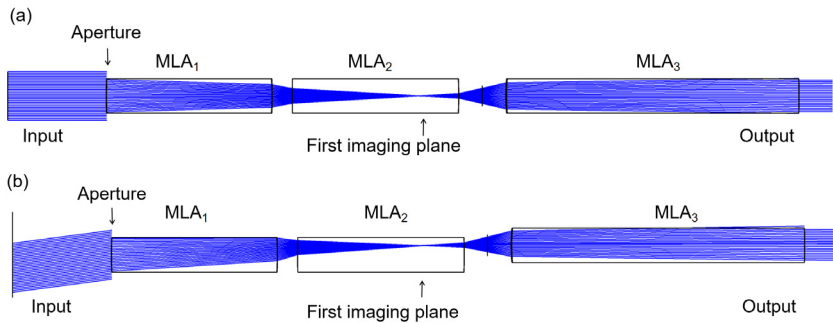


图 5 MLA 三片式结构。(a) $\theta=0^{\circ}$; (b) $\theta=10^{\circ}$
Fig.5 MLA three-piece structure. (a) $\theta=0^{\circ}$; (b) $\theta=10^{\circ}$

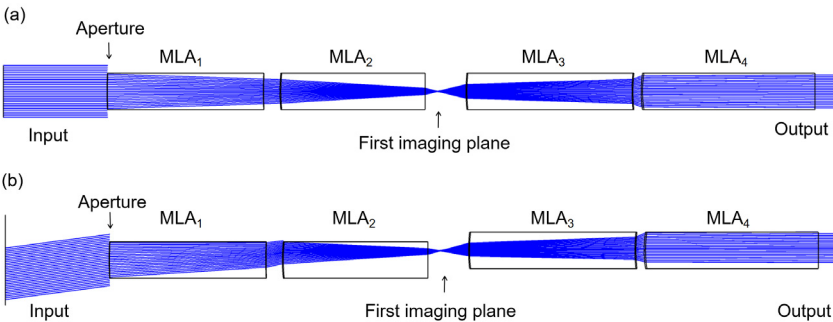


图 6 MLA 四片式结构。(a) $\theta=0^{\circ}$; (b) $\theta=10^{\circ}$
Fig.6 MLA four-piece structure. (a) $\theta=0^{\circ}$; (b) $\theta=10^{\circ}$

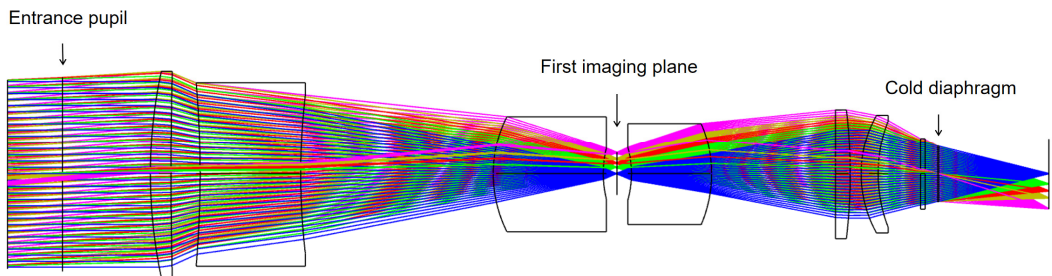


图 7 红外物镜结构
Fig.7 Infrared objective structure

2.2 角放大率小于1

根据拉赫不变量可知,在角放大率小于1时,微透镜阵列单元的入射通光孔径小于出射通光孔径,为了使能量利用率最大化,应使出射通光孔径最大,也就是要将子单元出射端口填满,即设计时光阑位于微透镜阵列的出射端,如图8所示。

当角放大率为 $0.67\times$ 时,入射视场角为出射视场角的1.5倍,根据拉赫不变量,得到微透镜子单元入射通光孔径的尺寸 y :

$$y = \frac{n' y' u'}{n u} = 0.46 \quad (6)$$

式中: n 为物方折射率; n' 为像方折射率; u 为入射视场角; u' 为出射视场角; y' 为出射通光孔径的尺寸。

能量利用率 η 即有效通光孔径 A_{eff} 与总孔径 A_t 的面积之比:

$$\eta = \frac{A_{\text{eff}}}{A_t} = \frac{0.46^2}{0.7^2} = 43\% \quad (7)$$

角放大率小于1的方案,由于结构的限制,能量利用率必定会小于1。为了使能量利用率最大化,在兼顾设计的同时角放大率要尽可能地接近1。角放大率为 $0.67\times$ 这种方案,设计较为轻松,但是能量利用率只有43%。探究能量利用率与角放大率的关系,如图9所示,图中横坐标为角放大率。可以看到角放大率越接近1,能量利用率越高,同时设计难度也逐渐增加。对于角放大率为 $0.83\times$ 的方案,计算可得能量利用率能够达到69%。相比角放大率为 $0.67\times$ 的方案,能量利用率有了大幅度提高,但是依然低于80%,对探测效果会产生严重影响。

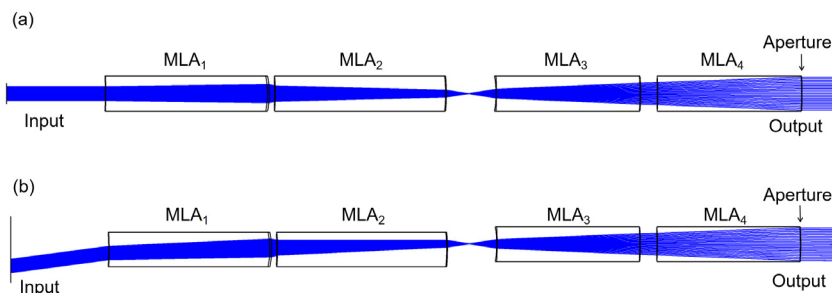


图8 后光阑结构。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=10^\circ$

Fig.8 Rear aperture structure. (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=10^\circ$

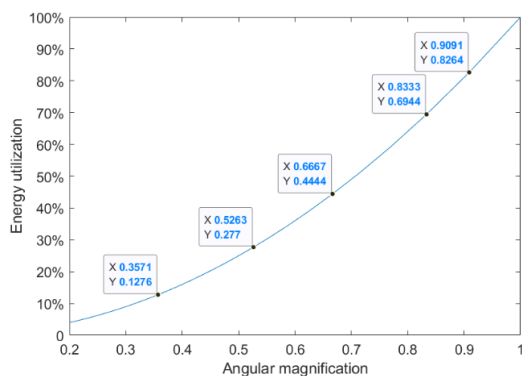


图9 能量利用率与角放大率的关系

Fig.9 Relationship between energy utilization and angular magnification

角放大率小于1的结构将光阑设置在微透镜阵列的出射端,可以与二次成像的红外物镜进行光瞳衔接。由于红外物镜采用二次成像结构,光线能够均匀地分布在系统的出瞳处,即红外探测器冷阑处,并且达到100%的冷阑效率。但是,由于微透镜阵列的入射通光孔径未完全利用,只有一部分光线参与成像,未利用部分的光线无法参与成像,导致系统的能量利用率有所降低。

一个理想光学系统的分辨率可以用衍射极限进行评价,衍射极限 ξ_c 可表示为:

$$\xi_c = \frac{1}{\lambda \cdot (F_{\text{Working}} / \#)} \quad (8)$$

理想情况下,能量利用率为1,工作 F 数与理想 F 数相同。由于 F 数表征了系统的实际进光量,因此可用来衡量能量利用率。理想 F 数为:

$$F / \# = \frac{f}{D} \quad (9)$$

当角放大率为 $0.67\times$ 时,计算得到其能量利用率为43%,相当于缩小了进光口径。实际的工作 F 数可表示为:

$$F_{\text{Working}} / \# = \frac{F / \#}{0.67} \quad (10)$$

因此,实际的衍射极限降低为理想情况的0.67倍,从而降低了光学系统的分辨率。

2.3 角放大率大于1

角放大率大于1时,前通光孔径要大于后通光孔径,为使能量利用率最大化,要保证前通光孔径填满,即光阑位于微透镜阵列的入射端,如图10所示。

采用角放大率大于1的结构进行设计时,要保证光线在出射端能够全部通过对应子单元传输,不会产生串扰到其他单元的光线,才能避免串扰光线对像质及能量利用率的影响。在此基础上,要优化出合适的角放大率,保证既能抑制串扰光线,又能达到较好的像质。

在设计过程中,将光线在每一个面上的高度设置为约束条件,保证光线通过对应子单元而减少串扰。将出射平行光线的角度设置为变量,通过对像质的评价进行优化。在优化的同时调整视场角,使结构逐渐匹配红外物镜,出射视场角度能够与红外物镜衔接。微透镜阵列采取四片式结构,面型均为高阶偶次非球面,采用Ge和Si材料的结合进行优化。

优化结果中,固定组中 MLA_1 和 MLA_2 的组合焦距 $f_g=1.62$,扫描组中 MLA_3 和 MLA_4 的组合焦距 $f_s=1.11$,确定角放大率为 $1.5\times$ 。微透镜阵列凝视视场

为 $\pm 3.33^\circ$,出射视场角度为 $\pm 5^\circ$,与红外物镜 ω 优化结果中,固定组中 MLA_1 和 MLA_2 的组合焦距 $f_g=1.62$,扫描组中 MLA_3 和 MLA_4 的组合焦距 $f_s=1.11$,确定角放大率为 $1.5\times$ 。微透镜阵列凝视视场为 $\pm 3.33^\circ$,出射视场角度为 $\pm 5^\circ$,与红外物镜 $\omega=\pm 5^\circ$ 相匹配。

对该结构进行像质评价,点列图如图11所示。RMS半径最小为 $18\mu m$,最大为 $30\mu m$ 。RMS半径在各个视场均达到探测器子单元尺寸,基本满足成像要求。

由于扫描式微透镜阵列系统不同于传统的成像系统,不能满足FFT MTF的前提,选择了惠更斯MTF对其进行评价。根据不同的扫描视场,设置不同的结构,得到结果如图12所示。在各扫描视场角度下,MTF均能够达到 $0.6@17\text{lp/mm}$,成像质量较好。

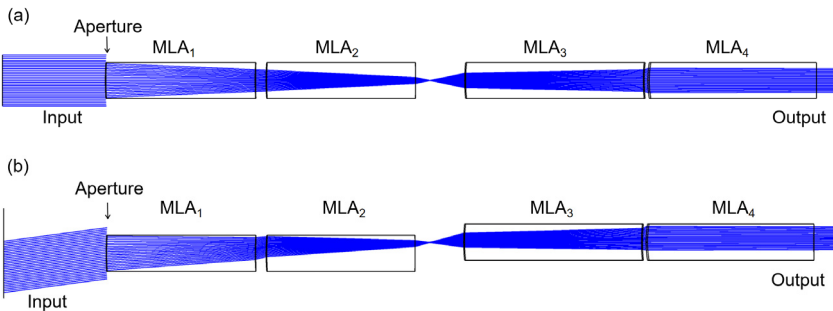


图 10 前光阑结构。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=10^\circ$
Fig.10 Front diaphragm structure. (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=10^\circ$

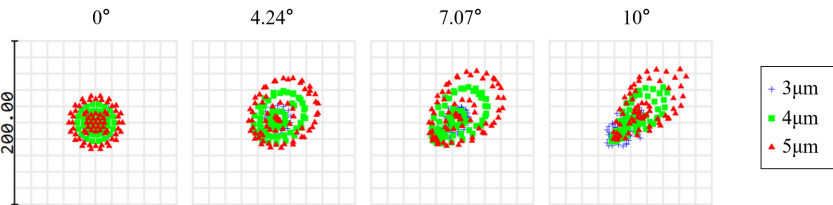
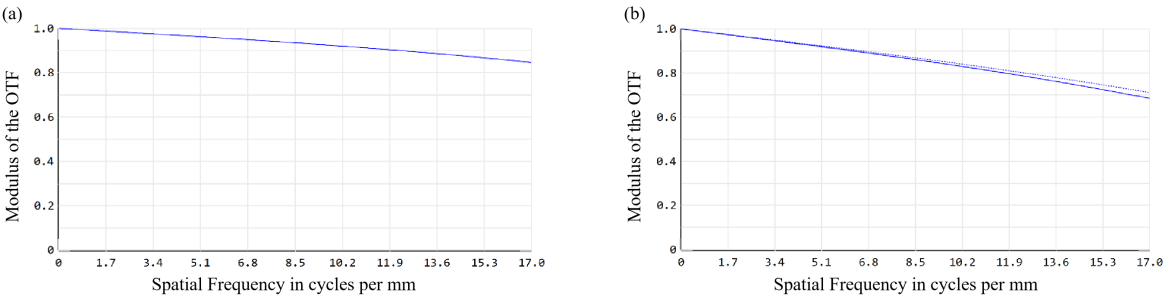


图 11 角放大率 $1.5\times$ 结构的点列图
Fig.11 Spot diagram of a structure with an angular magnification of $1.5\times$



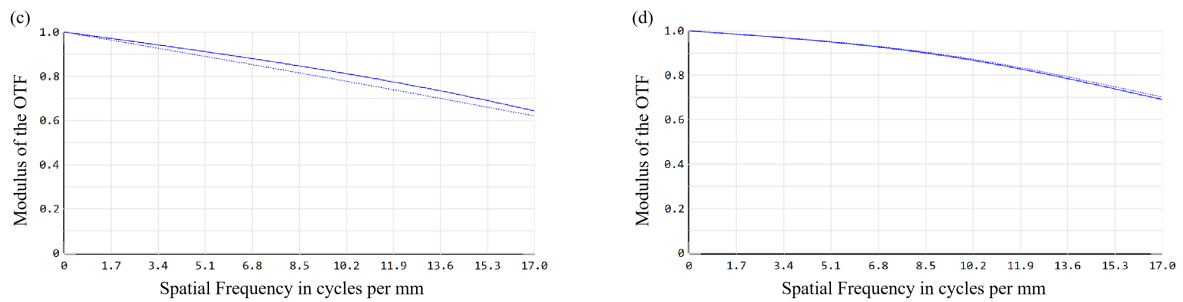


图 12 各扫描视场的惠更斯 MTF。(a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=4.24^\circ$; (c) $\theta=7.07^\circ$; (d) $\theta=10^\circ$
Fig.12 Huygens MTF for each scanning field of view. (a) $\theta=0^\circ$; (b) $\theta=4.24^\circ$; (c) $\theta=7.07^\circ$; (d) $\theta=10^\circ$

对串扰抑制情况进行评价，角放大率大于 1 的系统在小角度扫描视场范围内，能量利用率接近 1。扫描视场角度越大，光线高度越高，则发生串扰的可能性越大，因此评价串扰抑制情况要看最大扫描视场角度的情况。在角放大率为 $1.5\times$ 的设计中，当扫描视场达到 10° 时，光线通过对应单元传播时几乎没有因发生串扰而产生的杂散光，也就减小了产生能量损失的可能性，如图 13 所示，以 11×11 单元阵列为例。与角放大率小于 1 的结构相比，该结构在得到较好像质的情况下，能量利用率方面有很大提升。

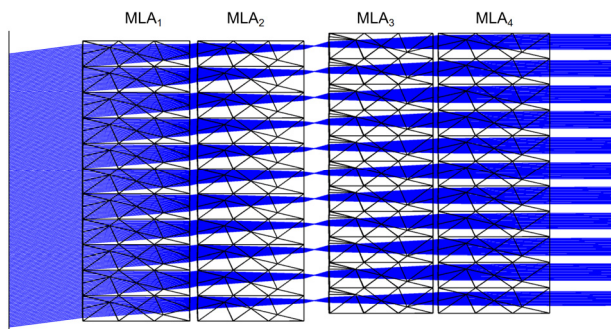


图 13 微透镜阵列大视场光路

Fig.13 Large field of view optical path of microlens array

3 结论

本文基于开普勒式望远结构对微透镜阵列的结构进行了调整，对比了不同片数的结构。在两片式的基础上加入了场镜，且将场镜分为两片形成四片式结构。四片式结构的一次成像面位于空气中，避免了材料杂质对成像质量的影响，并且增强了对边缘视场光线的控制，使大视场扫描时无串扰光线产生。

本文重点探究了角放大率对扫描式微透镜阵列系统的影响。当微透镜阵列组的角放大率小于 1 时，微透镜阵列的入射孔径利用率较低，系统的能量利用率上限受到限制，实际的衍射极限受到限制。当角放大率为 $0.67\times$ 时，能量利用率最高只有 43%。当角放大率为 $0.83\times$ 时，能量利用率可以提升到 69%。角放

大率越接近 1，能量利用率上限越接近 100%。当微透镜阵列组的角放大率大于 1 时，由于入射孔径被全部利用，系统的能量利用率理论上可以达到 100%。结合串扰抑制与成像质量优化出角放大率为 $1.5\times$ 的结构，并对其进行像质评价及串扰抑制评价。其 RMS 半径大小在 $18\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ 之间，MTF 达到 $0.6@17\text{ lp/mm}$ 。其串扰抑制效果在扫描视场 10° 以下较好。本文对微透镜阵列结构的改良以及角放大率的研究为后续系统的设计提供了理论基础。

参考文献：

[1] 白俊奇, 陈钱, 屈惠明. 红外凝视成像光学微扫描重建技术研究[J]. 红外与毫米波学报, 2008, 27(4): 257-260.
BAI J Q, CHEN Q, QU H M. Research on optical microscanning reconstruction for infrared staring imaging[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(4): 257-260.

[2] 李圆圆, 王春艳, 王志强. 高精度半导体激光打标机 F- θ 镜头设计[J]. 应用光学, 2020, 41(1): 202-208.
LI Y Y, WANG C Y, WANG Z Q. F- θ lens design for high-precision semiconductor laser marking machine[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(1): 202-208.

[3] 郑猛, 邵双运, 冯其波. CR 扫描仪激光扫描光学系统设计及理论分析[J]. 光学学报, 2010, 30(8): 2393-2400.
ZHENG M, SHAO S Y, FENG Q B. Design and theoretical analysis of laser scanning optical system for computed radiography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2393-2400.

[4] 钱立勇, 吴德成, 刘东, 等. 高光谱成像激光雷达扫描镜的分析与设计[J]. 光学学报, 2021, 41(9): 0928002.
QIAN L Y, WU D C, LIU D, et al. Analysis and design of hyperspectral imaging LiDAR scanning mirror[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 0928002.

[5] 董珊. 微透镜扫描器的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
DONG S. Research on Beam Steering with Microlens Arrays[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

[6] 刘冉. 微光学扫描器研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2007.
LIU R. Research on Micro-optical Scanner[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.

[7] 杨旭, 耿超, 李小阳, 等. 微透镜阵列光学相控阵扫描技术研究进展[J]. 强激光与粒子束, 2021, **33**(8): 65-75.
YANG X, GENG C, LI X Y, et al. Review of microlens array optical phased array beam scanning technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2021, **33**(8): 65-75.

[8] WANG Y Z, LI D H, LUO C G, et al. Viewing angle enhanced integral imaging display based on double-micro-lens array[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2013, **21**(7): 289-294

[9] 赵浩光, 曲涵石, 王鑫, 等. 高速微扫描图像超分辨重建[J]. 光学精密工程, 2021, **29**(10): 2456-2464.
ZHAO H G, QU H S, WANG X. Super-resolution reconstruction of micro-scanning images[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, **29**(10): 2456-2464.

[10] 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.

[11] YANG X, GENG C, LI X, et al. Theory analysis and experimental demonstration of a microlens array scanner with Kepler structure[J]. *Applied Optics*, 2020, **59**(34): 10754-10760.

[12] 赵迎, 接长伟. 激光通信终端光学系统杂散光抑制技术研究[J]. 激光与红外, 2021, **51**(10): 1378-1382.
ZHAO Y, JIE C W. Research on stray light suppression technology of optical system of laser communication terminal[J]. *Laser & Infrared*, 2021, **51**(10): 1378-1382.

[13] 王吉晖, 金伟其, 王岭雪, 等. 基于最小可分辨对比度的CCD成像系统最佳角放大率研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(11): 2125-2130.
WANG J H, JIN W Q, WANG L X, et al. Optimal angle magnification for CCD imaging systems based on minimum resolvable contrast[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2125-2130.

[14] 范哲源, 杨洪涛, 屈恩世, 等. 大视场大相对孔径长波红外扫描光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, **41**(10): 2740-2744.
FAN Z Y, YANG H T, QU E S, et al. Design of long-wave infrared scan system with large field and large aperture[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, **41**(10): 2740-2744.

[15] 单秋莎, 谢梅林, 刘朝晖, 等. 制冷型长波红外光学系统设计[J]. 中国光学, 2022, **15**(1): 72-78.
SHAN Q S, XIE M L, LIU Z H, et al. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2022, **15**(1): 72-78.

[16] 王保华, 刘志敏, 唐绍凡, 等. 星载高分辨率红外双谱段遥感器光学系统设计[J]. 激光与红外, 2022, **52**(1): 102-109.
WANG B H, LIU Z M, TANG S F, et al. Optical system design of high resolution dual-band IR remote sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2022, **52**(1): 102-109.