

## 光子集成干涉阵列视场拼接子孔径光路设计

韩耀辉 王鹍 朱友强 刘欣悦

### Photonic-integrated interferometric array field-of-view splicing subaperture optical path design

HAN Yao-hui, WANG Kun, ZHU You-qiang, LIU Xin-yue

引用本文:

韩耀辉, 王鹍, 朱友强, 刘欣悦. 光子集成干涉阵列视场拼接子孔径光路设计[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1458–1466. doi: 10.37188/CO.2024-0030

HAN Yao-hui, WANG Kun, ZHU You-qiang, LIU Xin-yue. Photonic-integrated interferometric array field-of-view splicing subaperture optical path design[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1458-1466. doi: 10.37188/CO.2024-0030

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024-0030>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 天基平台宽谱段成像光学系统设计

Optical design of visual and infrared imaging system based on space-based platform

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(6): 1495 <https://doi.org/10.37188/CO.2019-0255>

#### 超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计

Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(5): 1029 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0125>

#### 星模拟器光学系统视场拼接方法的研究

A field-of-view splicing method for the optical system of a star simulator

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(6): 1468 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0221>

#### 基于一种透镜材料的宽谱段紫外成像仪光学设计

Optical design of a wide-spectrum ultraviolet imager based on a single material

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(1): 65 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0127>

#### 折反式变形光学系统设计

Design of catadioptric anamorphic optical system

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(6): 1376 <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0035>

#### 六边形环带排布的共光路复眼光学系统设计

Design of compound eye optical system with hexagonal band arrangement and common optical path

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 158 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0116>

文章编号 2097-1842(2024)06-1458-09

# 光子集成干涉阵列视场拼接子孔径光路设计

韩耀辉<sup>1,2</sup>, 王 鹏<sup>1</sup>, 朱友强<sup>1</sup>, 刘欣悦<sup>1,2\*</sup>

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 光子集成干涉成像系统一般是在子孔径焦平面处加单模光纤阵列, 通过接收不同视场角的光束完成大视场拼接成像, 但直接采用光纤阵列会导致成像视场不连续、子孔径焦距变长、厚度大幅度增加。针对以上问题, 本文提出了一种结合微透镜阵列和光纤阵列对子孔径像面细分的方法以实现视场无缝拼接, 并通过摄远物镜和三透镜空间压缩板组合大幅度降低了子孔径阵列的整体厚度。设计结果表明: 通过在光纤阵列前加 65×65 的微透镜阵列对光束进行二次聚焦能够实现系统视场无缝拼接, 视场扩大 65 倍后, 全视场为 0.0489°; 可见光入射时单模光纤阵列中各光纤中心空间光耦合效率不低于 40%; 在加入空间压缩板压缩自由空间光路后, 系统的整体厚度压缩了 1 个数量级。该系统在实现光子集成干涉成像系统大视场无缝拼接成像的同时, 为解决超长焦距镜头过厚的问题提供了新的思路。

**关键词:** 光学设计; 合成孔径; 长焦距; 可见光成像; 光纤耦合

中图分类号: O439; TN256

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0030

CSTR: 32171.14.CO.2024-0030

## Photonic-integrated interferometric array field-of-view splicing subaperture optical path design

HAN Yao-hui<sup>1,2</sup>, WANG Kun<sup>1</sup>, ZHU You-qiang<sup>1</sup>, LIU Xin-yue<sup>1,2\*</sup>

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuxinyue@ciomp.ac.cn

**Abstract:** The photonic integrated interferometric imaging system generally adds single-mode fiber arrays at the focal plane of the subaperture and completes the large-field-of-view splicing imaging by receiving beams with different field-of-view angles. However, the direct use of fiber arrays leads to discontinuity of the imaging field-of-view and causes the focal length of the subaperture to lengthen, and the thickness is increased substantially. To address the above problems, we propose a combination of microlens arrays and fiber optic arrays to subdivide the subaperture image plane to achieve a seamless splicing of the field-of-view, and to significantly reduces the overall thickness of the subaperture array through the combination of the telephoto objective lens and the three-lens spatial compression plate. The design results show that by adding 65×65 mi-

收稿日期: 2024-02-05; 修订日期: 2024-02-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 12204476)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 12204476)

colens array in front of the fiber array to focus the beam twice to achieve the system field of view seamless splicing, the field of view is expanded 65 times, the full field of view is  $0.0489^\circ$ , the efficiency of spatial optical coupling in the center of each fiber in the single-mode fiber array is not less than 40% when the visible light is incident, and after adding the spatial compression plate to compress the free-space light path, the overall thickness of the system achieves one order of magnitude compression. This design realizes photonic integrated interference imaging system large field of view seamless splicing imaging at the same time, provides a new way for the solution of the problem of excessive thickness in ultra-long focal length lenses.

**Key words:** optical design; synthetic aperture; long focal length; visible-light imaging; fiber optic coupling

## 1 引言

随着空间遥感技术的不断发展,人们对空间光学系统的分辨率要求也越来越高。波动光学理论表明,传统光学成像系统角分辨率受波长和系统孔径的限制<sup>[1]</sup>,在工作波长确定的情况下,提高系统角分辨率需要增大系统口径,然而口径的增大会导致系统体积、重量、加工和装调难度成几何倍数增长<sup>[2]</sup>。因此,国内外学者不断寻求新的方向。光学合成孔径干涉成像技术与集成光子学为高分辨成像提供了新思路。2013年,洛克希德·马丁公司提出光子集成干涉成像技术和 SPIDER 系统(segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance)<sup>[3-4]</sup>。其基于光学合成孔径干涉成像原理,结构上用透镜阵列代替传统大口径光学镜头,同时采用光子集成电路技术,既可以避免大型光学系统复杂的工艺制造过程,又可以最大程度地降低系统的尺寸、重量和功耗,在天文观测、军事等领域均有广泛的应用价值。

光子集成干涉成像系统视场受合成孔径成像视场的制约,和波长及最短基线长度有关。为了解决视场问题,以 SPIDER 系统为例,目前主要有两种方式来扩大视场:一是通过改变合成孔径的排列方式<sup>[5]</sup>,二是在每个子透镜焦平面处加单模光纤阵列<sup>[6]</sup>。系统分辨率和子孔径排列有关,一般通过第二种方法扩大视场,由于单模光纤只有纤芯附近能够传输光信息,且光纤包层为圆形导致相邻光纤间存在间隔,故不能实现对成像视场的完全覆盖,且丢失的视场信息通过图像重构也无法恢复。

国内外学者大多在子孔径排列方式、图像重构算法和光子集成芯片方面<sup>[7]</sup>展开研究,非均匀

分层多级结构<sup>[8]</sup>,均匀分布等间距同心圆环结构<sup>[9]</sup>相继被提出。压缩感知算法<sup>[10]</sup>,修正熵<sup>[11]</sup>等图像重构算法也在一定程度上提高了图像质量,但关于扩展系统成像视场却鲜有人研究。本文提出微透镜阵列结合光纤阵列的子孔径像面细分方法以实现大视场成像。该方法能实现视场的无缝拼接,并针对子孔径焦距过长导致成像系统厚度大幅增加的问题,设计出 F 数为 200.8, 摄远比为 0.0495 的透射式长焦距子孔径系统。系统由摄远物镜和三透镜空间板组成,光学总长小于半米。最后通过仿真分析,验证了子孔径与微透镜阵列结合后性能满足光子集成干涉阵列系统需求。

## 2 设计方法

### 2.1 光子集成干涉阵列成像视场

光子集成干涉阵列结构<sup>[9]</sup>如图 1 所示。系统成像基于范西特-泽尼克定理<sup>[12]</sup>。其由二维子孔径阵列获得目标光信息,经过单模光纤传输到光子集成芯片(PIC)中干涉成像,再经过图像复原后形成目标图像。

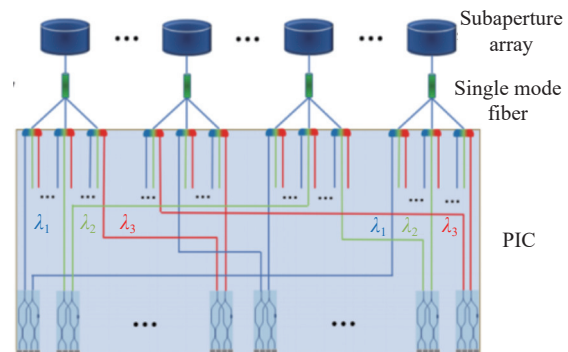


图 1 光子集成干涉阵列结构

Fig. 1 Framework of photonic-integrated interferometric array

成像系统视场 (field of view, FOV) 一方面受光纤耦合效率的影响, 当光纤端面上视场边缘的耦合效率约为轴上点耦合效率的 10% 时, 子孔径后单根单模光纤的视场限制为  $2\lambda/D$ , 其中  $\lambda$  为成像波长,  $D$  为子孔径直径<sup>[3]</sup>。另一方面, 成像系统是基于迈克尔逊合成孔径的成像方式, 其成像视场约为  $\lambda/B_{\min}$ ,  $B_{\min}$  为最短基线长度, 当不考虑加工装调空间的情况下, 最短基线为:  $B_{\min} = D$ , 此时两个相邻子孔径间距离为零, 边缘视场耦合效率约为中心的 50%。综上所述单根单模光纤系统的最佳成像视场为:

$$FOV_g = \frac{\lambda}{D} \quad (1)$$

为了提升系统视场, 传统方法通过在子孔径后由单根光纤变为  $N \times N$  单模光纤阵列, 如图 2 (彩图见期刊电子版) 所示。每根光纤接收一个小视场光束, 然后通过图像重构对小视场进行拼接从而实现大视场成像, 此时视场扩大为原来的  $N$  倍。

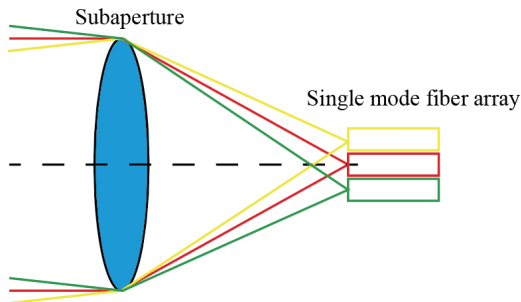


图 2 传统扩视场原理图

Fig. 2 Schematic diagram of conventional expanded FOV

该方法虽然能够有效实现成像视场延拓, 但由于光纤只有纤芯能接收目标光信息, 且光纤之间存在间隔, 故不能实现对成像视场的完全覆盖。

## 2.2 大视场光子集成干涉无缝拼接成像系统设计

通过光纤阵列虽然可以扩大视场, 但视场无法完全覆盖。针对这一问题, 本文提出将微透镜阵列和光纤阵列像面细分方法相结合, 实现大视场无缝拼接成像, 如图 3 所示。

在光纤阵列前加微透镜阵列时, 光纤阵列和微透镜阵列数相同, 不同视场的平行光通过单个微透镜耦合进对应单模光纤中, 实现子孔径视场的无缝分割与拼接。基线最大成像视场为:

$$FOV_{\text{single}} = \frac{\lambda_{\max}}{D} \quad (2)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为最大工作波长;  $D$  为子孔径直径。

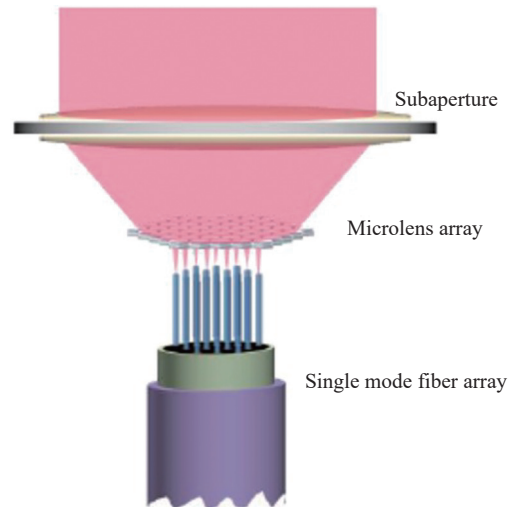


图 3 大视场无缝拼接成像原理图

Fig. 3 Schematic diagram of large FOV seamless splicing imaging

根据光子集成干涉系统分辨率要求和子孔径的排列方式, 可以确定合适的子孔径直径并给定工作波长, 由此可以算出系统基线的最大成像视场。

微透镜阵列数为  $N \times N$  时, 系统视场为:

$$FOV = N \frac{\lambda_{\max}}{D} \quad (3)$$

根据系统所需成像视场大小, 已知最大基线长度可以求出所需微透镜阵列数。

大视场拼接成像系统由子孔径、微透镜阵列和光纤阵列 3 个部分组成。基线最大成像视场角入射的光束 (原本汇聚于光纤包层边缘) 经过微透镜汇聚被单模光纤接收, 由此可以算出子孔径焦距  $f_a$  为:

$$f_a = \frac{y}{FOV_{\text{single}}} \quad (4)$$

式中:  $y$  为光纤包层直径。

如图 4 所示, 空间光入射时, 理想情况下接收系统可以等效为焦距  $f$  的衍射极限薄透镜光学系统, 若是反射式光学系统, 则等效为中心存在遮挡的薄透镜, 光学系统焦点处时耦合效率为<sup>[4]</sup>:

$$\eta = 2 \left[ \frac{\exp(-\beta^2 \varepsilon^2) - \exp(-\beta^2)}{\beta \sqrt{1 - \varepsilon^2}} \right]^2 \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon$  为中心遮拦比;  $\beta$  为耦合参数, 表征接受光学系统  $F$  数与单模光纤模场半径的关系, 即:



$$\beta = \frac{\pi a w}{\lambda f}, \quad (6)$$

式中:  $a$  为入瞳半径;  $w$  为单模光纤模场半径;  $f$  为系统焦距;  $\beta = 1.121$ ,  $\varepsilon = 0$  时, 单模光纤耦合效率最高, 为 81.45%。

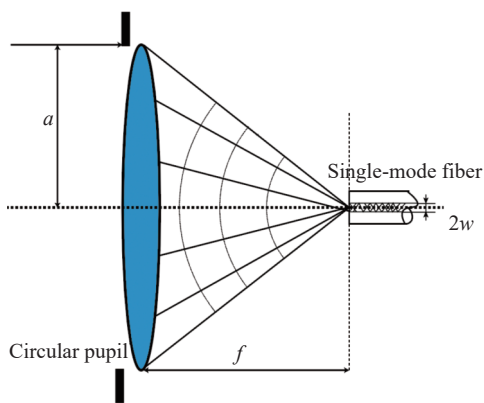


图 4 空间光与单模光纤耦合

Fig. 4 Spatial light coupled to single-mode fiber

为了保证单模光纤耦合效率最大, 子孔径选择透射式光学结构, 此时  $\varepsilon = 0$ 。根据公式(6)可以算出子孔径和微透镜阵列组成的系统焦距为:

$$f = \frac{\pi a w}{\lambda \beta}. \quad (7)$$

根据组合透镜公式:

$$f = \frac{f_a f_p}{f_p + L}, \quad (8)$$

式中:  $f_p$  为微透镜阵列焦距;  $L$  为微透镜阵列与子孔径焦面间距。

选定单模光纤参数可以求出系统焦距  $f$  和子孔径焦距  $f_a$  大小, 利用给定  $L$  可以算出微透镜焦距:

$$f_p = \frac{fL}{f_a - f}. \quad (9)$$

零视场平行光经过子孔径后充满单个微透镜时, 微透镜和子孔径焦平面间距最大为:

$$L_{\max} = \frac{f_a p}{D}, \quad (10)$$

式中:  $p$  为微透镜间距, 其值与光纤包层直径  $y$  相等。

### 2.3 子孔径光学设计

由于采用微透镜阵列和光纤阵列耦合的方式扩大视场需要超长焦距子孔径。为了减少子孔径的光学总长, 需要对子孔径进行优化设计。为了保证高耦合效率, 子孔径选择透射式镜头, 而单纯

的摄远物镜无法达到使用要求, 本文通过摄远物镜和空间压缩板组合大幅度减少了子孔径厚度, 子孔径成像原理如图 5 所示。

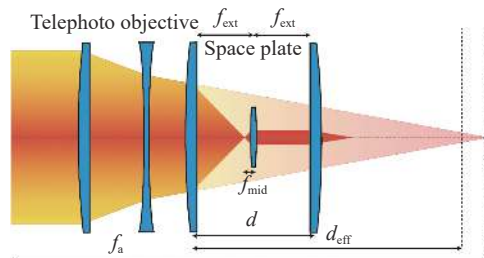


图 5 子孔径成像原理图

Fig. 5 Schematic diagram of subaperture imaging

光束在自由空间的传播长度在很大程度上决定了成像系统总长, 而空间板可以代替并减少自由空间厚度。本文使用了一种类似于  $4f$  系统的空间板, 其由三组透镜组成。压缩原理为在空间板中间傅立叶平面放置的正透镜产生的相位变化和自由空间传播相位变化抵消, 这样可以压缩自由空间, 并且保证入射角和出射角大小相等, 由于光束在中间傅立叶平面前汇聚过一次, 故方向相反<sup>[15]</sup>。

假设光以  $z$  轴为中心在自由空间传播, 为了简化只考虑透镜在  $y$  方向的作用, 此时  $z_0$  的相位变化:

$$\varphi = k_z z_0 = z_0 \sqrt{(k^2 - k_y^2)} = z_0 k \left( 1 - \frac{k_y^2}{2k^2} \right), \quad (11)$$

式中  $k$  为波数。忽略全局相位时  $\varphi = -z_0 k_y^2 / 2k$ 。

$4f$  系统中间傅立叶平面处有  $k_y = rk / f_{\text{ext}}$ , 将  $k_y$  带入公式(11)可以得出:

$$\varphi = -\frac{z_0 k r^2}{2f_{\text{ext}}^2}. \quad (12)$$

$4f$  系统中间透镜对相位的调制忽略常量相位延迟时相位大小为:

$$\varphi_{\text{mid}} = -\frac{k r^2}{2f_{\text{mid}}}. \quad (13)$$

由  $\varphi = \varphi_{\text{mid}}$  可以求出  $z_0 = f_{\text{ext}}^2 / f_{\text{mid}}$ 。其中:  $f_{\text{ext}}$  为系统中第一个和最后一个镜头焦距, 也称为外透镜;  $f_{\text{mid}}$  为系统中间镜头焦距。

最后可以求出三透镜空间板空间压缩率:

$$R = \frac{d_{\text{eff}}}{d} = \frac{f_{\text{ext}}}{2f_{\text{mid}}} - 1, \quad (14)$$

式中:  $d_{\text{eff}} = z_0 - 2f_{\text{ext}}$  为空间板在自由空间中的等效

传播距离;  $d=2f_{\text{ext}}$  为空间板实际厚度。

最后可以求出子孔径后焦距为:

$$EFL_a = EFL_1 - Rd - s \quad (15)$$

式中:  $EFL_1$  为摄远物镜后焦距;  $s$  为摄远物镜和空间板间距,  $EFL_a$  需大于微透镜阵列和子孔径焦平面间距  $L_{\text{max}}$ 。

### 3 光学系统参数与像质评价

#### 3.1 子孔径设计结果和像质分析

为了验证摄远物镜和空间压缩板组合对减少光学总长的有效性, 设计了一个实例, 并在光学设计软件 ZEMAX 中进行分析。子孔径系统的具体参数如表 1 所示。

表 1 子孔径设计参数

Tab. 1 Subaperture design parameters

Parameters	Specifications
Wavelength/nm	400-680
Field-of-view $2w/^\circ$	0.048 09
F-number	200.8
Focal length/mm	-9680.54
Total length/mm	478.98
Compression ratio	17.6
Telephoto ratio	0.0495
Back focal length/mm	30

该系统由透射式摄远物镜和空间压缩板两部分组成, 摄远物镜和空间板间距为 6 mm, 如图 6 所示。其中, 摄远物镜焦距为 9680.167 mm, 光学总长 5406 mm; 后焦距为 5275 mm; 空间压缩板外透镜焦距  $f_{\text{ext}}$  为 148.817 mm, 中心透镜焦距  $f_{\text{mid}}$  为 4 mm, 由此可以算出空间压缩率为 17.6。根据公式(15)可以算出理论上子孔径后焦距为 30 mm 和仿真相符, 摄远物镜后加空间压缩板, 光学总长由 5406 mm 变为 479 mm, 压缩了 11.3 倍。

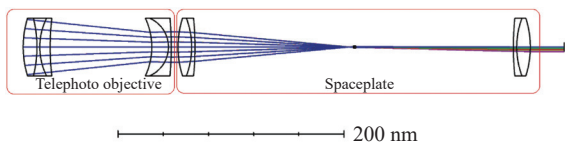


图 6 子孔径系统结构图

Fig. 6 Structural diagram of subaperture system

子孔径后焦面前加微透镜阵列, 微透镜阵列中各单元间距为 125  $\mu\text{m}$ , 若类比为探测器尺寸, 根据奈奎斯特准则, 需全视场 MTF 曲线在 4 lp/mm 处大于 0.2。系统 MTF 曲线如图 7 所示, 其 MTF 接近衍射极限, MTF 在 4 lp/mm 处大于 0.4。

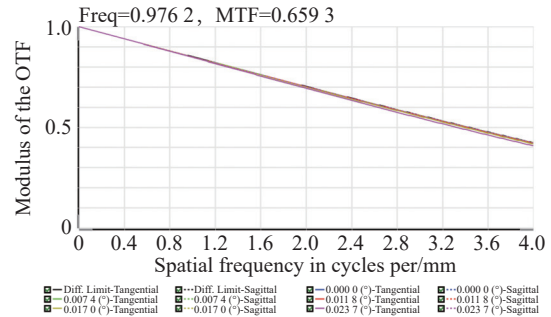


图 7 子孔径 MTF 曲线

Fig. 7 Subaperture's MTF curve

图 8 给出了子孔径系统在各视场的点列图, RMS 半径分别为 16.647, 17.560, 19.181, 22.446, 29.204  $\mu\text{m}$ , 艾里斑半径大小为 143.9  $\mu\text{m}$ 。由图 8 可知各视场光斑半径均小于艾里斑半径, 具有良好的成像质量。

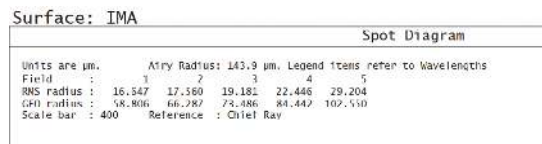
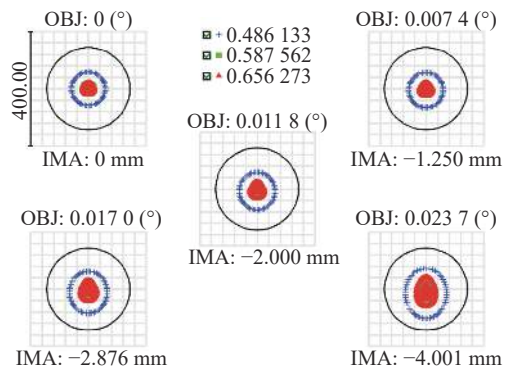


图 8 子孔径系统点列图

Fig. 8 Spot diagram of subaperture system

#### 3.2 系统设计结果和耦合效率

选择表 2 所示的光纤阵列参数。根据公式(7)可以求出子孔径和微透镜阵列系统焦距为 250.923 mm。当  $L=20$  mm 时, 根据公式(9)可以求出微透镜焦距为 0.523 mm。微透镜阵列仿真参数如表 3 所示。

表 2 单模光纤阵列参数

Tab. 2 Single-mode fiber array parameters

Parameters	Specifications
Array number	65×65
Core diameter/μm	3
Cladding diameter/μm	125
Numerical aperture	0.12
Operating wavelength/nm	400~680
mode field diameter/um (1/e <sup>2</sup> fit – near field)	3.3@405 nm 4.6@630 μm

表 3 微透镜阵列参数

Tab. 3 Microlens array parameters

Parameters	Specifications
Array number	65×65
Subunit shape	Square
materials	Fused silica
Focal length/mm	0.523
Thickness/mm	0.5
Microlens pitch/μm	125

由于孔径和微透镜阵列组合成的系统参数如表 4 所示。

表 4 系统参数

Tab. 4 System parameters

Parameters	Specifications
Wavelength/nm	400~680
Field-of-view 2w/°	0.048 09
F-number	5.2
Focal length/mm	-250.923
Total length/mm	459.663
Numerical Aperture	0.095 8

图 9(彩图见期刊电子版)给出了系统在各视场的点列图, RMS 半径分别为 0.555, 0.574, 0.606, 0.668, 0.794 μm, 艾里斑半径大小为 3.724 μm。由图 9 可知各视场光斑半径均小于艾里斑半径, 成像质量较好。

图 10(彩图见期刊电子版)为系统 MTF 曲线, 从图 10 可以看出各视场 MTF 接近衍射极限。

由表 2 和表 4 可知, 系统数值孔径为 0.095 8, 小于光纤数值孔径 0.12, 符合光纤耦合入射角度限制。系统工作波长为 400~680 nm, ZEMAX 仿真取 F、d、C 光波长分别为 0.486、0.588、0.656 μm, 由于单模光纤模场直径和波长成正比, 可以算出 F、d、C 光的模场直径分别为 3.71、4.36、4.75 μm, 通过 ZEMAX 物理光学模块可以算出不同视场 F、d、C 光耦合效率如表 5 所示, 其对应的辐照度伪彩色仿真图如图 11(彩图见期刊电子版)所示。

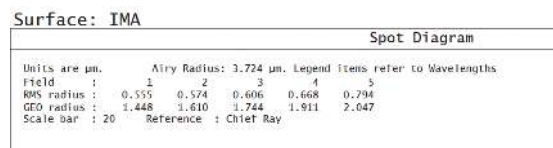
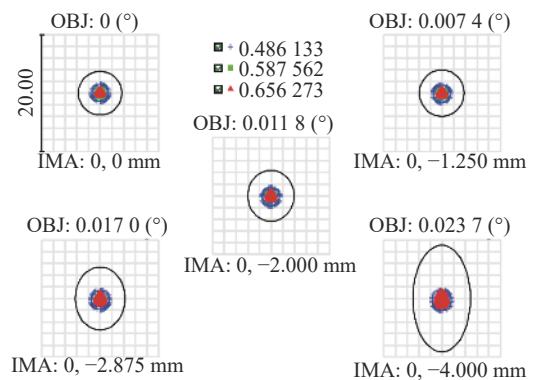


图 9 系统点列图

Fig. 9 Point diagram of the system

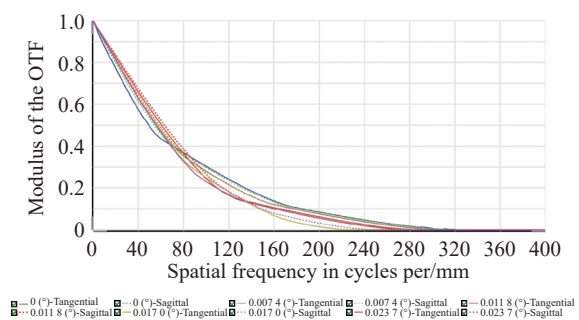


图 10 系统 MTF 曲线

Fig. 10 MTF curve of the system

表 5 各视场光纤耦合效率

Tab. 5 Fiber coupling efficiency of each field of view

Field of view	F	d	C
0°	0.565 365	0.444 582	0.450 298
0.0170177°	0.587 243	0.404 386	0.481 939
0.0236768°	0.610 009	0.424 886	0.451 323

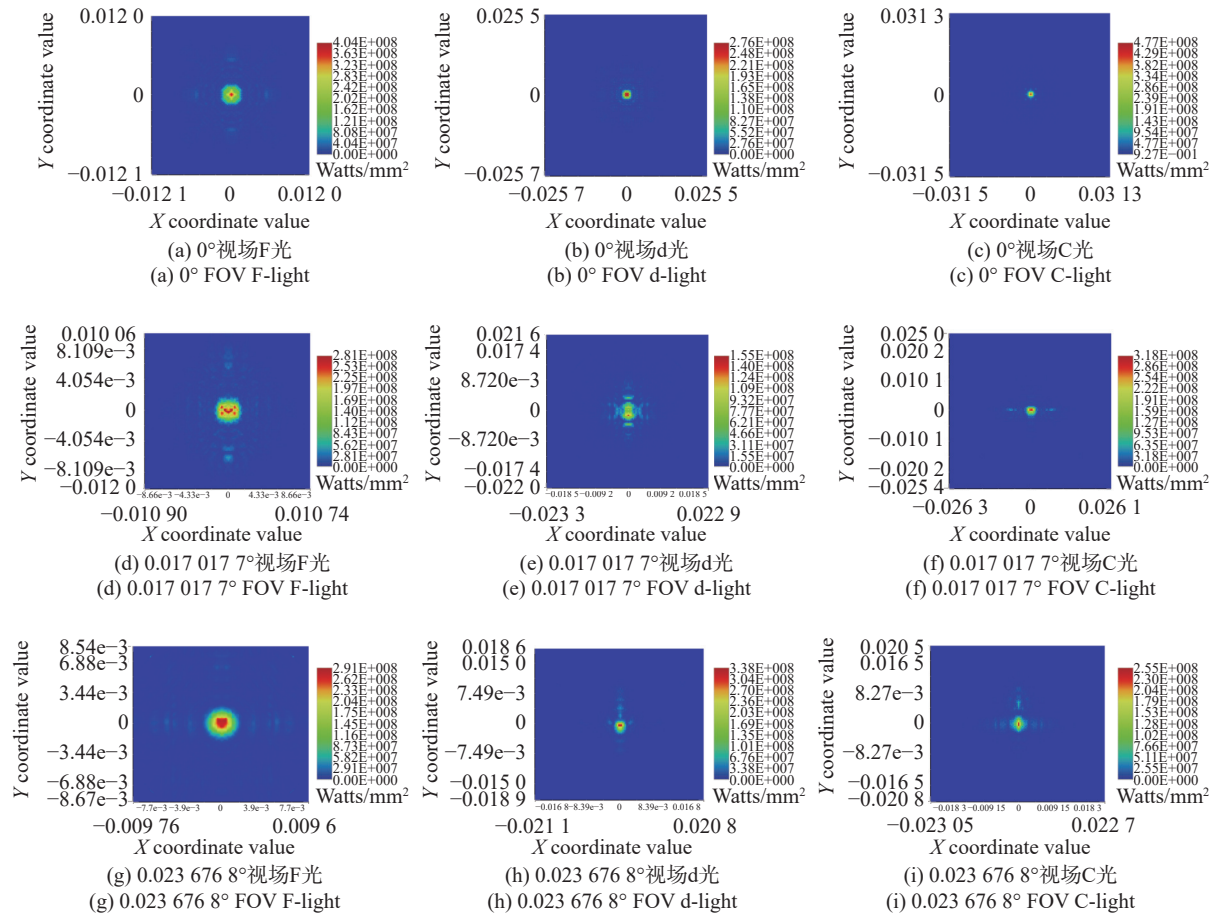


图 11 系统各视场辐照度

Fig. 11 Irradiance in each field of view of the system

## 4 子孔径公差与光纤耦合的机械位置容差分析

### 4.1 子孔径公差分析

在实际生产装配过程中,由于材料自身加工的误差及装配等因素,会导致光学系统成像质量下降,系统公差要求决定着制造过程的难度和成本,故需对系统进行公差分析。经过公差分析,满足高要求的加工公差以及装调公差如表 6 所示。

表 6 子孔径公差

Tab. 6 Tolerance of subaperture

Parameters	Specifications
Surface radius/mm	±0.02
Thickness/mm	±0.02
Surface decenter/mm	±0.02
Surface tilt/°	±0.01
Element decenter/mm	±0.05
Element tilt/°	±0.02

对于表 6 给出的公差范围,以 4 lp/mm 处 MTF 衍射平均值作为公差分析评价标准,经过 500 次

蒙特卡洛分析后,结果如表 7 所示。由表 7 可以看出在给定的公差范围内有 98% 的概率使子孔径 MTF 在 4 lp/mm 处大于 0.21,系统具有良好的可加工性,可以满足要求。

表 7 子孔径公差分析结果

Tab. 7 Tolerance analysis result of subaperture

Parameters	Specifications
The average MTF	0.35209144
MTF value of 98%	>0.21276278
MTF value of 90%	>0.27879303
MTF value of 80%°	>0.31568496
MTF value of 50%	>0.36178363
MTF value of 20%	>0.39748697
MTF value of 10%	>0.40812805
MTF value of 2%	>0.42106348

### 4.2 光纤耦合的机械位置容差分析

为保证子孔径与微透镜阵列组成的系统与光纤阵列在一定机械对准误差下仍有较高的耦合效率,需要确定光纤耦合的机械位置容差。以纤芯半径  $r_c$  与像斑半径的百分比来定义误差裕量系数  $\zeta$ 。光纤纤芯半径为 1.5  $\mu\text{m}$ ,边缘视场像斑半径最



大为  $0.794\ \mu\text{m}$ , 可以计算出误差裕量系数为 1.9。

机械对准误差分为纵向误差、横向误差和角向误差 3 种。纵向对准误差导致在误差裕量系数小于 1, 即像斑半径大于纤芯半径时, 会产生光能损失。仿真结果表明光纤阵列纵向偏移量为  $0.025\ \text{mm}$  时, 光斑半径最大, 为  $1.5\ \mu\text{m}$ 。此时, 中心视场耦合效率降低到原来的 98%, 边缘视场耦合效率降低到原来的 86%。 $X$  和  $Y$  方向的位置误差  $d_x$  与  $d_y$  导致的综合横向误差偏移量为  $d_r = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ , 当  $d_r > (1 - 1/\xi)r_c$  时光斑与纤芯相交, 导致部分光能损失。仿真结果表明: 当  $d_r = 0.711\ \mu\text{m}$  时, 光纤阵列各光纤耦合效率降低到原来的 85% 左右; 当光纤端面法线与微透镜光轴存在角度偏差时, 部分光线的入射角大于光纤的最大孔径从光纤包层泄露导致耦合效率降低; 当角度偏差等于  $3^\circ$  时, 光纤阵列各光纤耦合效率降低到原来的 85% 左右。光纤耦合机械位置容差结果见表 8。

表 8 光纤耦合机械位置容差

Tab. 8 Mechanical position tolerance of fiber coupling

Parameters	Specifications
Longitudinal tolerance/mm	$\pm 0.025$
Transvers tolerance/ $\mu\text{m}$	0.711
angular deviation/ $^\circ$	$\pm 3$

#### 参考文献:

- [1] BORN M, WOLF E. *Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light*[M]. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1999.
- [2] 苏云, 葛婧菁, 王业超, 等. 航天高分辨率对地光学遥感载荷研究进展[J]. *中国光学(中英文)*, 2023, 16(2): 258-282.  
SU Y, GE J J, WANG Y CH, et al.. Research progress on high-resolution imaging system for optical remote sensing in aerospace[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(2): 258-282. (in Chinese).
- [3] KENDRICK R, DUNCAN A, WILM J, et al.. Flat panel space based space surveillance sensor[C]. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2013.
- [4] BADHAM K, KENDRICK R L, WUCHENICH D, et al.. Photonic integrated circuit-based imaging system for SPIDER[C]. *Proceedings of 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, IEEE, 2017: 1-5.
- [5] DUNCAN A, KENDRICK R, THURMAN S, et al.. SPIDER: next generation chip scale imaging sensor[C]. *Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference*, 2015: 27.
- [6] SCOTT R P, SU T H, OGDEN C, et al.. Demonstration of a photonic integrated circuit for multi-baseline interferometric imaging[C]. *Proceedings of 2014 IEEE Photonics Conference*, IEEE, 2014: 1-2.
- [7] CHEN H, ON M B, YUN-JHU-LEE, et al.. Photonic interferometric imager with monolithic silicon CMOS photonic integrated circuits[C]. *Optical Fiber Communication Conference 2022*, Optica Publishing Group, 2022: Tu2I. 2.
- [8] GAO W P, YUAN Y, WANG X R, et al.. Quantitative analysis and optimization design of the segmented planar integrated optical imaging system based on an inhomogeneous multistage sampling lens array[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11869-11884.
- [9] WANG K, ZHU Y Q, AN Q CH, et al.. Even sampling photonic-integrated interferometric array for synthetic aperture

## 5 结 论

本文提出了一种实现光子集成干涉阵列无缝拼接成像的方法, 通过光纤阵列与微透镜阵列相结合的方式对子孔径出射光束进行二次聚焦, 实现了系统视场的无缝拼接成像, 并针对视场拼接导致子孔径厚度大幅度增加的问题, 设计了一种紧凑式长焦镜头。仿真验证结果表明子孔径后加入  $65 \times 65$  微透镜和光纤阵列后可使光子集成干涉阵列视场扩大 65 倍, 达到  $0.0489^\circ$ , 且当工作波长为  $400 \sim 680\ \text{nm}$  的空间光入射时, 单模光纤阵列中各光纤中心耦合效率不低于 40%, 最高达 61%。在子孔径厚度方面, 空间压缩比为 17.6 的空间压缩板使系统整体厚度压缩了 11.3 倍。本文实现了 F 数为 200.8、焦距为  $9680\ \text{mm}$ 、光学总长  $479\ \text{mm}$  的子孔径光路设计, 其传递函数接近衍射极限, 在  $4\ \text{lp/mm}$  处优于 0.4。今后需要在本文研究基础上进行扩展, 一是不断压缩系统的厚度, 二是不断提高光纤阵列耦合效率, 例如将系统中普通微透镜阵列替换成  $1/4$  节距的梯度折射率透镜阵列, 预计能将光纤耦合效率提高到 70% 左右。

- imaging[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32119-32128.
- [10] 于海滨, 陈蓓曦, 潘枝峰, 等. 光子集成干涉成像系统微透镜排布设计与图像复原[J]. *应用光学*, 2022, 43(2): 213-220.
- YU H B, CHEN B X, PAN ZH F, *et al.*. Arrangement of microlens and image restoration technology of photon integrated interferometric imaging system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2022, 43(2): 213-220. (in Chinese).
- [11] CHEN T B, ZENG X F, ZHANG ZH Y, *et al.*. REM: a simplified revised entropy image reconstruction for photonics integrated interference imaging system[J]. *Optics Communications*, 2021, 501: 127341.
- [12] GOODMAN J W. *Statistical Optics* [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015.
- [13] GUYON O. Wide field interferometric imaging with single-mode fibers[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2002, 387(1): 366-378.
- [14] RUILIER C. Degraded light coupling into single-mode fibers[J]. *Proceedings of SPIE*, 1998, 3350: 319-329.
- [15] SORENSEN N J, WEIL M T, LUNDEEN J S. Large-scale optical compression of free-space using an experimental three-lens spaceplate[J]. *Optics Express*, 2023, 31(12): 19766-19776.

作者简介:



刘欣悦(1973—),男,辽宁大连人,博士,研究员,博士生导师,1996年于清华大学获得学士学位,1999年、2006年于中国科学院大学分别获得硕士、博士学位,主要从事光学干涉成像等方面的研究。E-mail: [liuxinyue@ciomp.ac.cn](mailto:liuxinyue@ciomp.ac.cn)