

# 基于棋盘采样透镜阵列的分段平面成像系统的 成像特性研究和优化

李艳<sup>1,2</sup>, 何琰<sup>1,2\*</sup>, 于清华<sup>1,3</sup>, 孙胜利<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院智能红外感知重点实验室, 上海 200083)

**摘要:** 仿真模拟了分段平面成像系统的成像特性, 基于棋盘式透镜采样阵列, 探讨了系统结构参数对成像结果的影响, 并给出了成像系统的最佳参数。在此基础上, 创新性地采用了高光谱图像, 详细研究了自然场景下干涉光谱宽度对分段平面成像系统成像质量的影响, 指出实际应用场景中容许的干涉带宽应不大于 100 nm。研究内容不仅对棋盘式成像仪的开发具有指导意义, 其中基于真实场景的容许带宽和误差分析的讨论对所有的分段平面成像系统都具有启发性。

**关键词:** 干涉成像; 数值模拟; 参数优化; 光子集成电路; 宽带光谱

中图分类号: V243.5; O439

文献标识码: A

## Analysis and optimization of imaging characteristics of segmented planar imaging system based on checkerboard sampling lens array

LI Yan<sup>1,2</sup>, HE Yan<sup>1,2\*</sup>, YU Qing-Hua<sup>1,3</sup>, SUN Sheng-Li<sup>1,3</sup>

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

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

3. Key Laboratory of Intelligent Infrared Sensing, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

**Abstract:** The study simulated imaging characteristics of a segmented planar imaging system. It investigated the influence of structural parameters on imaging results based on a checkerboard lens sampling array, and provided optimal parameters for the system. The work innovatively employed hyperspectral images to analyze the impact of interference spectral width on imaging quality in natural scenes, concluding that the allowable interference bandwidth in practical applications should not exceed 100 nm. The discussion on the allowable bandwidth and error analysis based on real-world scenarios offered guidance for developing checkerboard-type imagers. These findings also provided universal insights applicable to all segmented planar imaging systems.

**Key words:** interference imaging, numerical simulation, parameter optimization, photonic integrated circuit, broadband spectrum

## 引言

干涉成像技术在超高角分辨率天文学中已经取得了广泛的成功。借由地面上的长基线光学干涉仪, 如海军精密光学干涉仪(NPOI)<sup>[1]</sup>、CHARA 红外望远镜阵列<sup>[2]</sup>、甚大望远镜干涉仪(VLTI)<sup>[3-5]</sup>, 人

类获得了等效百米光学口径的角分辨能力<sup>[6]</sup>, 从而实现了遥远天体前所未有的高精度观测。在与超大口径望远镜的角逐中, 光学干涉阵列规避了传统单口径光学系统在制造上的困难, 如超大主镜的制造、可靠的大规模支撑和精确的热控制<sup>[7]</sup>, 已经体

收稿日期: 2025-02-25, 录用日期: 2025-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(62475274)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62475274)

作者简介(Biography): 李艳(1995—), 女, 山东威海人, 博士研究生, 主要研究领域为光学干涉成像. E-mail: liyan@mail. sitp. ac. cn

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: heyant21@mails.ucas.ac.cn

Received date: 2025-02-25, accepted date: 2025-05-12

现出了干涉成像在尺寸、功耗和角分辨率上的优势。

光子集成技术的高速发展为干涉成像技术带来了新的可能性<sup>[8]</sup>。集成化制造的微型马赫泽德干涉仪和微透镜阵列能够实现紧凑密集的大规模片上干涉<sup>[9-10]</sup>,将其与干涉成像技术结合,分段平面成像系统应运而生<sup>[11]</sup>。该系统通过多块光子集成芯片,实现对目标频谱信息的高密度干涉采样,无需复杂的透镜组和昂贵的焦平面探测器,在体积、质量和成本上都展现出了对传统大口径光学系统的潜在优势<sup>[12]</sup>。

分块平面干涉成像系统中,微透镜阵列两两配对干涉组成不同矢量长度的干涉基线,从而实现目标不同空间频率信息的干涉响应<sup>[13-14]</sup>。不同的微透镜配对方案会导致不同频谱采样结果,这将造成数字化重建空域图像时图像质量的显著差异<sup>[15-16]</sup>。因此有关分块平面干涉系统中透镜阵列的排列和组合方式的研究一直是一个热点,旨在通过合理的排布方式获取更优的成像质量。自最初的蛛网式透镜排布方案被提出并成功进行实验验证后,基于蛛网式的基线配对优化方案层出不穷<sup>[17-18]</sup>,此外许多其他的透镜排布方案也被提出,如多级采样的透镜排布方案<sup>[19]</sup>,密集六角透镜排布方案<sup>[20]</sup>,蜂窝状排布方案等<sup>[21]</sup>。总体而言,这些方案都旨在通过优化透镜排布,实现高的占空比和对中低频信息的高密采集。但是必须要指出的是,由于数字化重建图像时各基线采集到的频谱信息需要被填入等间距分布的频谱矩阵,而大多数透镜排布方案中都不可避免会出现对基频的非整数倍采样<sup>[18,22]</sup>,因此,在实际成像中必然会引入大量的近似误差,从而无法达到仿真预言的图像重建质量。本课题组早先提出的棋盘式透镜排布方案很好地避免了这一问题,优雅地实现了对基频的所有整数倍采样<sup>[15]</sup>,而不存在近似误差。同时通过额外配置更小基频的透镜阵列,可以实现对中低频信息的整数倍加密采样,已经通过实验室成像验证了这一点,展现了这一设计方案的应用优势。然而目前对于这一优秀排布的成像系统尚未建立数值仿真模型和相应的参数优化讨论。与此同时,大多数分块平面干涉成像系统的数值模拟都是基于准单色近似下的理想频谱采样分析,未能进一步考虑干涉时的光谱宽度带来的干扰<sup>[23-24]</sup>,但这一因素在实际运用中是至关重要的<sup>[25-26]</sup>。

基于以上分析,本文对棋盘式透镜排布的干涉成像系统的成像特性进行了仿真分析。利用计算机仿真的方法完整模拟了棋盘式干涉成像系统的成像过程,在准单色情况下分析了不同系统参数和阵列规模下该系统的成像质量,并给出了最优化设计参数。在此基础上,考虑到实际应用中各干涉通道的光束具有一定的光谱宽度,利用高光谱成像数据集,详细研究了不同干涉光谱宽度对成像质量的影响,并给出系统能够容许的干涉带宽。研究结果不仅能够推广棋盘式成像仪的应用,高光谱仿真也能够为所有的分段平面干涉成像系统提供理论参考。

## 1 工作原理与系统结构

干涉成像的基石是范西特泽尼克定理,其归一化形式表示为式(1)。该定理简洁地说明,在准单色条件下,远场空间非相干目标 $I(\alpha, \beta)$ 发出的光波在探测平面 $xoy$ 上表现出一定的空间相干性。在瞳面上任意两点 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 的光场都具备一定的空间相干性。两点的光场发生干涉时,复相干因子 $\mu(x_1, y_1; x_2, y_2)$ 等于目标光强分布 $I(\alpha, \beta)$ 在空间频率 $(u = \Delta x/\lambda z, v = \Delta y/\lambda z)$ 位置的归一化傅里叶变换,附加一个额外的相位项 $\exp(jA)$ 。其中, $\Delta x = x_2 - x_1, \Delta y = y_2 - y_1$ 分别表示两点横向和纵向的距离。相位因子 $A = \pi((x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2))/\lambda z$ 是由两点对称中心相对于坐标原点的偏移引入的非中心对称误差。显然在成像距离 $z$ 很远时,这一相位项可以忽略:

$$\mu(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{\exp(jA) \iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta) \times \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \alpha + \Delta y \beta)] d\alpha d\beta}{\iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta) d\alpha d\beta} \quad (1)$$

基于上述原理,大多数分块平面干涉成像仪的成像原理都如图1所示。两两配对的微透镜阵列用于实现瞳面上任意两点 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 的光场的采样。透镜后端的光子集成芯片实现合束干涉、光谱分光和对复相干因子的光计算,复相干因子对应的空间频率坐标表达式如式(2),相应的复相干因子表达式如式(3)。透镜排布配对优化实际上就是设置不同 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 的组合,从而根据式(2)和式(3),实现对目标不同的空间频率 $(u, v)$ 的覆盖:

$$\begin{cases} u = \frac{x_2 - x_1}{\lambda z} = \frac{\Delta x}{\lambda z} \\ v = \frac{y_2 - y_1}{\lambda z} = \frac{\Delta y}{\lambda z} \end{cases}, \quad (2)$$

$$\mu(u, v) = |\mu| e^{i\varphi}. \quad (3)$$

棋盘式干涉成像仪是分段平面干涉成像系统的一种典型结构,其结构和工作原理如图2所示。在系统瞳面上,透镜阵列均匀排列成矩形分布的棋盘状。共有 $(2N+1) \times (2N+1)$ 个微透镜,根据特定的规则分为四组,每组透镜的数量依次为 $N \times N$ 、 $N \times (N+1)$ 、 $(N+1) \times N$ 、 $(N+1) \times (N+1)$ 。在每一组内部,透镜围绕中心对称配对。基于这一配对方式,能够实现对基频的所有整数倍采样,无需近似处理,这为数字化图像重建带来了极大的便利,并且具有极佳的成像效果。

在图2中展示了该成像仪的详细组成部分,包括光学干涉计算模块和电子学处理模块。光学干涉计算模块由透镜阵列和三层PIC组成。第一层2D PIC设置有光波导阵列和阵列波导光栅,用于耦合各个透镜收集的光束,并将其分为多个波段的窄带光。接下来是一个3D PIC,用于实现透镜交叉配对。这一结构可以由先进半导体工艺,如超快激光刻写(ULI)、多层堆叠和平面PIC耦合等方法制造,并配合计算机辅助设计,以实现精准的光程匹配<sup>[27]</sup>。第三层干涉仪阵列由多个2D PIC组成,在这一器件中,来自同一对透镜相同波长的两束光被耦合到同一个正交探测器中,实现合束、移相,以及四路相位差 $90^\circ$ 的干涉输出。根据范西特泽尼克定理<sup>[13]</sup>,最终,在电子学处理模块中,借助平衡探测器读出和数字信号处理,就能够得到对目标频谱信息

的采样结果。进一步地,在DSP中对目标频谱信息进行傅里叶逆变换,就能够输出目标图像。

由于在重建图像时需要使用傅里叶逆变换,采集的频谱信息需要被预先填充到等间隔的频谱矩阵中。大多数透镜排布方案难以避免对目标频谱的非等间距采样,频谱填充时会不可避免出现近似误差,或者需要使用非均匀的离散傅里叶变换。前者会降低成像质量,而后一方法会不可避免地增加成像时间,这都不利于分块平面成像仪的应用。棋盘式成像仪能够优雅地实现对基频整数倍的无偏全覆盖采样,体现了它的应用优势。此外,所有的高填充因子透镜排布方案都不可避免会出现透镜交叉配对的情形,为PIC模块的设计和制造带来了挑战。但是棋盘式成像仪的2D PIC波导阵列是平行的,能够避免径向结构成像仪所需的波导阵列旋转。相比之下,六角排布成像仪的分光和传输是通过3D PIC完成的,其设计和制造难度较高。即使系统设计类似于本文中的多层PIC结构,如蜂窝状的排布,也需要制造长度不同的2D PIC。因此,可以说棋盘式成像仪在设计和制造上也具备一定的优势。

## 2 准单色成像特性仿真

分段平面干涉成像系统的数值模拟主要涉及两个方面。第一个方面是根据透镜阵列排列方案确定每对透镜检测到的空间频率 $(u, v)$ 。第二个方面是建立一个计算模型,利用光干涉和差分电路计算来自任何配对透镜的耦合光场的复相干系数。基于这一原理,建立了数值仿真模型,并利用MATLAB对棋盘干涉成像系统进行了数值仿真分析。

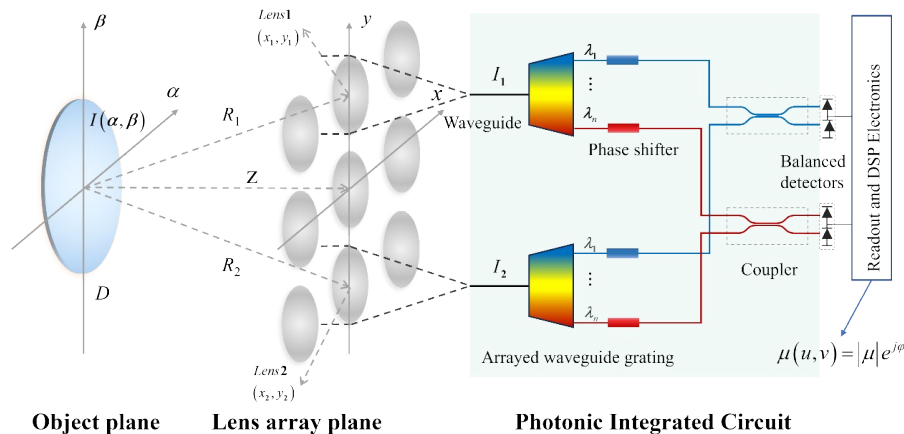


图1 分段平面干涉成像系统的工作原理

Fig. 1 The working principle of the segmented plane interference imaging system

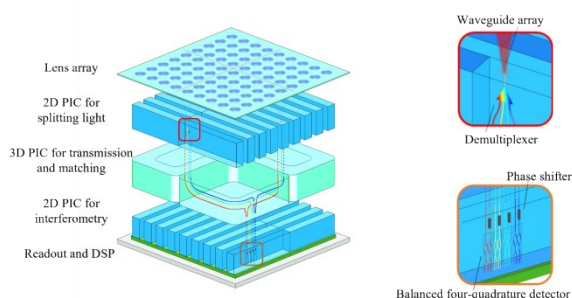


图2 “棋盘式”成像仪的结构和工作原理

Fig. 2 The structure and working principle of the “checkerboard” imager

重点分析了成像距离、透镜阵列尺寸、透镜采样密度和波导制造精度对成像质量的影响。仿真的初始参数选择如表1所示。

表1 仿真选取的初始参数

Table 1 The initial parameters selected in the simulation

| Structural parameters                  | Symbol                 | Size             |
|--|------------------------|------------------|
| Lens Diameter (mm)                     | $D$                    | 2                |
| Lens Spacing (mm)                      | $B_{\min}$             | 2                |
| Imaging Distance (km)                  | $z$                    | 1 000            |
| Operating Central Wavelength (nm)      | $\lambda$              | 1 550            |
| Lens Array Size                        | $(2N+1) \times (2N+1)$ | $81 \times 81$   |
| Total size of imager ( $\text{mm}^2$ ) | $S$                    | $162 \times 162$ |
| Operating Field of View (mrad)         | FOV                    | 1.5              |

对不同参数设置下的成像质量,统一采用PSNR来进行评价。图像的PSNR计算方法如式(4)所示,其中 $\text{MAX}_I^2$ 代表图像的归一化最大值,MSE表示重建图像相对原始图像的均方根误差:

$$\text{PSNR} = 10 \times \lg\left(\frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}}\right) \quad (4)$$

仿真采用的输入图像尺寸为 $256 \times 256$ ,图像大小和频谱分布如图3所示。

## 2.1 成像距离

对于干涉成像而言,成像距离的选取是十分重要的。如第一部分所述,只有在成像距离 $z$ 很大时,额外的相位因子 $A$ 才能趋于零,否则会导致图像重建时各空间频率分量的显著相移。图4(a)给出了不同成像距离下的图像重建结果。图4(b)给出了重建图像的PSNR随成像距离的变化趋势。如同理论

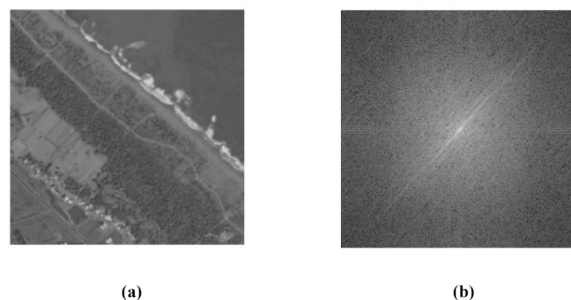


图3 仿真输入:(a)用于仿真的输入图像;(b)输入图像的频谱分布

Fig. 3 Input for simulation: (a) input image for simulation; (b) spectrum distribution of input image

预言的那样,成像距离低于10 km时,重建图像的PSNR值很低,这从图4(a)中能够直观看出。成像的PSNR在10~100 km区间显著增加,在100 km以上时趋于稳定,始终保持在27 dB以上。同时,考虑到干涉成像的视场角通常在毫弧度量级,这也决定了这一成像技术适用于轨道高度100 km以上的遥感成像。

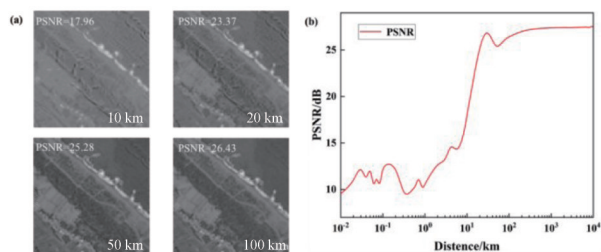


图4 仿真结果:(a)不同成像距离下的图像重建结果;(b)重建图像的PSNR随成像距离的变化

Fig. 4 Simulation results: (a) the image reconstruction results at different imaging distances; (b) the PSNR of the reconstructed images varying with the imaging distance

此外当干涉成像系统工作距离较小时,如果进一步考察不可忽略的相位误差项 $A$ ,仍然有可能实现干涉成像。因为瞳面干涉坐标 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 是已知的,工作波长也是确定的,只需要确定工作距离 $z$ ,在图像重建时就可以补偿一个如式(5)的相位因子 $A'$ ,从而实现成像:

$$A' = \exp\left\{\frac{j\pi}{\lambda z} \left[ (x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2) \right]\right\} \quad (5)$$

图5(a)第一幅图展示了成像距离20 km、经相位补偿后的图像重建结果。同时应当指出,即使无法预先知晓成像距离 $z$ ,通过设置成像距离 $z$ 的估计值,结合像质评价函数进行迭代优化,也可以实

现小工作距离的干涉成像。图 5(a)中给出了三个不同  $z$  的估计值下,相位补偿后的图像重建结果。图 5(b)给出了重建图像的 PSNR 与  $z$  的估计值间的关系,显然在估计值接近实际成像距离  $z=20$  km 时,相位补偿后的图像重建质量最佳。

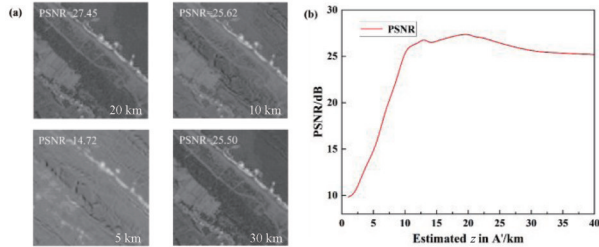


图 5 采用不同的  $z$  估计值进行相位补偿得到的图像重建结果:(a)  $z$  的估计值分别为 20 km、10 km、5 km 和 30 km 时的图像重建结果;(b) 重构图像的 PSNR 随  $z$  估计值的变化曲线

Fig. 5 Image reconstruction results obtained by using different estimated values of  $z$  for phase compensation: (a) image reconstruction results when the estimated values of  $z$  are 20 km, 10 km, 5 km, and 30 km, respectively; (b) curve of the reconstructed image's PSNR varying with the estimated values of  $z$

## 2.2 透镜阵列参数

透镜阵列的排布决定了干涉成像系统的频谱覆盖。对棋盘式干涉成像仪而言,透镜阵列的参数研究主要分为两个方面。一方面是最短基线  $B_{\min}$  固定的情况下,阵列规模对成像质量的影响,这主要涉及到高频信息的拓展。另一方面在于成像阵列面积  $S$  固定的情况下,透镜的直径  $D$ ,也就是最短基线  $B_{\min}$  的大小对成像质量的影响,这主要涉及的是低频信息的采样密度。

首先针对第一种情况,图 6(a)分别展示了阵列规模为  $21 \times 21$ 、 $41 \times 41$ 、 $81 \times 81$ 、 $121 \times 121$  的成像结果,最短基线长度  $B$  始终保持不变。由于小规模阵列也能采集到图像的低频分量,重建图像也能保持与输入图像的部分相似性,这在 PSNR 中有所体现。但是肉眼可见,随着阵列规模的增加,图像高频信息被更多地采集,重建得到的图像复现了更加丰富的细节。图 6(b)展示了仿真的重建图像的 PSNR 随阵列规模的变化趋势。可以看到,随着阵列规模的增加,一开始成像的 PSNR 迅速上升,这显然是由于中低频信息的覆盖提升导致的。在阵列规模提高到  $70 \times 70$  后,这种提升就不再明显了,此时新增的基线信号对应于视场内那些微弱的高频分量,虽然能够提升重建图像的细节,但是对于 PSNR 的贡献就比

较小了。选择  $81 \times 81$  的阵列规模,是一个比较折衷的值。

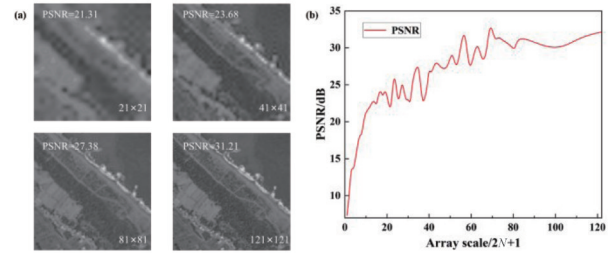


图 6 仿真结果:(a)不同透镜阵列尺寸下的图像重建结果;(b) 重构图像的 PSNR 随阵列大小的变化

Fig. 6 Simulation results: (a) the image reconstruction results for different lens array sizes; (b) the PSNR of the reconstructed images varying with the array size

在此基础上,针对第二种情况,模拟了最短基线的设置。如上所述,在调整最短基线的大小时,透镜阵列  $S$  的总面积保持不变。将最短基线的长度分别设置为 4 mm、3 mm、2 mm、1 mm,最长基线始终保持在 80 mm。对于棋盘成像仪,这相当于在最大频率  $f_{\max} = B_{\max} / \lambda z$  内以不同采样密度均匀采样。仿真结果如图 7 所示,增大采样密度可以显著提高成像质量。虽然没有获得更多的高频分量,但由于增加了中低频分量的覆盖范围,可以大大提高成像质量。当采样频率超过场景对应的奈奎斯特频率(对应  $B_{\min}$  小于 2 mm)时,该增益仍然存在,重构图像的 PSNR 逐渐增大。

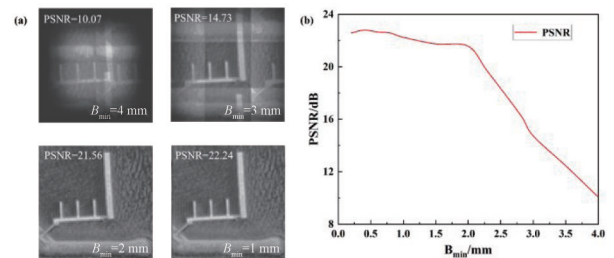


图 7 仿真结果:(a)不同最短基线长度下的图像重建结果;(b)最短基线下重构图像的 PSNR 变化

Fig. 7 Simulation results: (a) the image reconstruction results for different shortest baseline lengths; (b) the PSNR of the reconstructed images varying with the shortest baseline

## 2.3 波导制造精度

如图 1 中所示,每一个干涉通道内干涉信号的复可见度都借助四路依次移相  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  的正交干涉输出计算得到。其矩阵表示如式(6):

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out1}} \\ E_{\text{out2}} \\ E_{\text{out3}} \\ E_{\text{out4}} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{j\pi/2} & 0 & e^{j\pi} & 0 \\ e^{j\pi} & 0 & e^{j\pi/2} & 0 \\ 0 & e^{j\pi/2} & 0 & e^{j\pi} \\ 0 & e^{j\pi} & 0 & e^{j\pi/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-j\pi/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} \\ 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中,第一个相移矩阵严格依赖于波导制造精度,波导的制造误差将会直接导致两干涉信号的相位差与设计值产生偏移。存在波导制造误差的相移矩阵可以表示为式(7):

$$\begin{bmatrix} e^{j(\pi/2 + A_1)} & 0 & e^{j(\pi + A_2)} & 0 \\ e^{j(\pi + B_1)} & 0 & e^{j(\pi/2 + B_2)} & 0 \\ 0 & e^{j(\pi/2 + C_1)} & 0 & e^{j(\pi + C_2)} \\ 0 & e^{j(\pi + D_1)} & 0 & e^{j(\pi/2 + D_2)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

该式描述了两输入电场在 $2 \times 2$ 马赫泽德干涉仪中的移相误差。对每一对配对的干涉基线而言,输入任意的光场,干涉仪的相移矩阵应该始终保持一致。为了研究波导制造精度对棋盘式成像仪成像质量的影响,在不同干涉基线的相移矩阵中引入大小不同的相移误差,各相移误差总体服从均值为0、标准差为 $\mu$ 的正态分布。得到的仿真结果如图8所示。

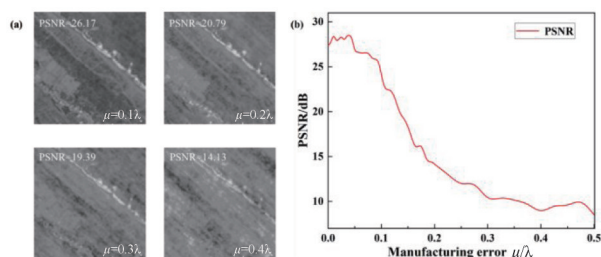


图8 仿真结果:(a)不同标准差 $\mu$ 下的图像重建结果;(b)重建图像的PSNR随波导制造误差的变化

Fig. 8 Simulation results: (a) the image reconstruction results with different standard deviations  $\mu$ ; (b) the PSNR of the reconstructed images varying with the waveguide manufacturing error

该仿真结果表明,波导制造误差的标准差小于 $0.1\lambda$ 时,成像质量是可以接受的,如图8(b)所示。此后,随着波导制造误差增加,不同基线计算得到的复相干因子的误差迅速增大,直接导致重建图像的质量急剧下滑。图8(a)给出了几个典型的波导

制造误差下的成像结果,直观呈现了像质退化的过程。该仿真结果对光计算模块波导制造的精度和一致性提出了理论要求,从而更好地指导棋盘式干涉成像仪的实际应用。

### 3 干涉非单色性引入的像质退化分析

第三部分对干涉成像仪的参数讨论都建立在准单色近似条件下。实际应用中,波导光栅的分光机制决定了各干涉通道内的光束具有一定的光谱宽度,与此同时,合理地探究干涉成像仪容许的最大单通道干涉带宽,对提升仪器的干涉光通量也是很有帮助的。因此,本节利用高光谱遥感的多波段数据立方体,对干涉非单色性引入的像质退化进行分析。如同第二部分认为目标光场中的各点空间非相干那样,这里高光谱图像的各波长间也是不相干的,这符合一般自然场景的特征。

以一对干涉基线的仿真为例,配对透镜的坐标为 $A(x_1, y_1)$ 和 $B(x_2, y_2)$ ,探测的中心波长依然为 $\lambda_0 = 1550\text{ nm}$ ,成像系统的参数保持与表1一致,则此时仍然认为干涉的复相干因子 $|\mu|e^{j\varphi}$ 对应目标光强分布在空间频率 $(u, v)$ 处的频谱信息为 $F(u, v)$ , $(u, v)$ 的坐标如式(8)所示:

$$\begin{cases} u = \frac{x_2 - x_1}{\lambda_0 z} = \frac{\Delta x}{\lambda_0 z} \\ v = \frac{y_2 - y_1}{\lambda_0 z} = \frac{\Delta y}{\lambda_0 z} \end{cases}. \quad (8)$$

此时的目标光强分布是多色的,其电场表示为 $E(\alpha, \beta, \lambda)$ 。目标上任意一点到达透镜A、B处的电矢量依次表示为 $E_A(\alpha, \beta, \lambda)$ 和 $E_B(\alpha, \beta, \lambda)$ ,经过四正交耦合器后的光计算过程如式(9)所示。注意到此时的相移矩阵中,指数部分增加了波长依赖项 $\lambda_0/\lambda$ ,这意味着对于中心波长 $\lambda_0$ 以外的所有波长,相移都是不完美的:

$$\begin{bmatrix} E_{\text{out1}}(\alpha, \beta, \lambda) \\ E_{\text{out2}}(\alpha, \beta, \lambda) \\ E_{\text{out3}}(\alpha, \beta, \lambda) \\ E_{\text{out4}}(\alpha, \beta, \lambda) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} e^{j\pi\lambda_0/2\lambda} & 0 & e^{j\pi\lambda_0/\lambda} & 0 \\ e^{j\pi\lambda_0/\lambda} & 0 & e^{j\pi\lambda_0/2\lambda} & 0 \\ 0 & e^{j\pi\lambda_0/2\lambda} & 0 & e^{j\pi\lambda_0/\lambda} \\ 0 & e^{j\pi\lambda_0/\lambda} & 0 & e^{j\pi\lambda_0/2\lambda} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-j\pi/2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 0 \\ 1/\sqrt{2} & 0 \\ 0 & 1/\sqrt{2} \\ 0 & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_A(\alpha, \beta, \lambda) \\ E_B(\alpha, \beta, \lambda) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

对整个数据立方体 $E(\alpha, \beta, \lambda)$ 中的各点执行上述操作,得到四正交耦合器四个输出端口的电场

$E_{out1}(\alpha, \beta, \lambda), E_{out2}(\alpha, \beta, \lambda), E_{out3}(\alpha, \beta, \lambda), E_{out4}(\alpha, \beta, \lambda)$ 。如前所述,不同坐标位置和不同波长间的光场是互不相关的,因此求各张量与其复共轭的内积,然后逐点求和,就能够得到四个输出端的光强,如式(10)所示:

$$\begin{cases} I_1 = \sum_{\alpha\beta\lambda} E_{out1}(\alpha, \beta, \lambda) \odot E_{out1}^*(\alpha, \beta, \lambda) \\ I_2 = \sum_{\alpha\beta\lambda} E_{out2}(\alpha, \beta, \lambda) \odot E_{out2}^*(\alpha, \beta, \lambda) \\ Q_1 = \sum_{\alpha\beta\lambda} E_{out3}(\alpha, \beta, \lambda) \odot E_{out3}^*(\alpha, \beta, \lambda) \\ Q_2 = \sum_{\alpha\beta\lambda} E_{out4}(\alpha, \beta, \lambda) \odot E_{out4}^*(\alpha, \beta, \lambda) \end{cases} \quad (10)$$

经过平衡探测器差分计算后,最终得到对频谱信息  $F(u, v)$  的采样结果。对所有的基线执行上述操作,即可得到非单色情况下,棋盘式成像仪覆盖的所有  $u-v$  坐标下的频谱采样结果。图9给出了仿真使用的高光谱遥感数据示意图,左图为合成的伪彩色图像,右图代表各个不同的波段下拍摄的灰度图像。所选数据的光谱分辨率为 10 nm,中心波长 1 550 nm,总共涵盖 1 400~1 700 nm 共计 300 nm 的光谱带宽。

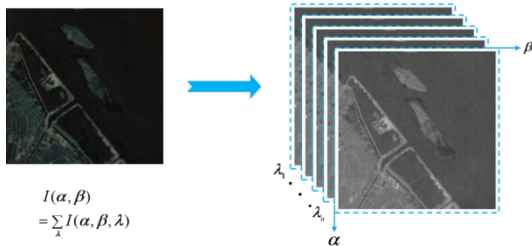


图9 仿真中使用的高光谱遥感数据示意图

Fig. 9 A schematic diagram of the hyperspectral remote sensing data used in the simulation

依次选取光谱宽度为 20 nm、50 nm、100 nm、200 nm 的高光谱遥感数据立方体,按照式(9)、式(10)所述流程,进行单通道干涉成像仿真。得到的成像结果如图10所示。

显然,随着通道内干涉光谱宽度的增加,重建图像的质量逐渐下降。这一结果一部分是由于式(9)中展示的相移误差导致的,随着波长与中心波长的偏离增大,相移误差逐渐增加。但是总的来看,像质退化主要还是由于复相干因子的物理意义变化引起的。如式(11)所示,此时由透镜  $A(x_1, y_1)$  和  $B(x_2, y_2)$  组成的干涉基线测量的复相干因子,不再准确地代表空间频率  $(u, v)$  处的频谱信息,  $(u, v)$

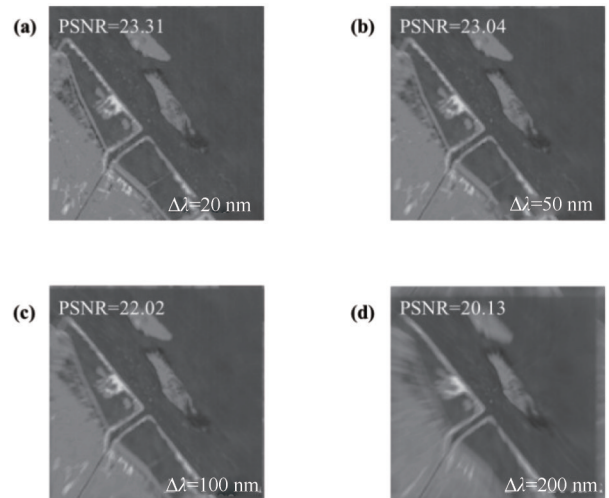


图10 不同光谱宽度的高光谱遥感数据立方体单通道干涉成像图像重建结果:(a)  $\Delta\lambda = 20$  nm; (b)  $\Delta\lambda = 50$  nm; (c)  $\Delta\lambda = 100$  nm; (d)  $\Delta\lambda = 200$  nm

Fig. 10 The image reconstruction results of single channel interferometric imaging of hyperspectral remote sensing data cube with different spectral widths: (a)  $\Delta\lambda = 20$  nm; (b)  $\Delta\lambda = 50$  nm; (c)  $\Delta\lambda = 100$  nm; (d)  $\Delta\lambda = 200$  nm

的表达式如式(3)所示。非单色情形下,测量的复相干因子  $\mu$  等于不同波长下对应的空间频率  $(u(\lambda), v(\lambda))$  处的复相干因子的线性叠加(若波长是连续的则转化为对波长的积分),  $(u(\lambda), v(\lambda))$  的表达式如式(2)所示。这相当于一种空间频率上的平均。因此,正如图10展示的那样,在重建的图像中出现了混叠和伪影:

$$\mu(x_1, y_1; x_2, y_2) = \frac{\sum_{\lambda=\lambda_1}^{\lambda_2} \iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta, \lambda) \times \exp[-j \frac{2\pi}{\lambda z} (\Delta x \alpha + \Delta y \beta)] d\alpha d\beta}{\iint_{-\infty}^{\infty} I(\alpha, \beta, \lambda) d\alpha d\beta} \quad (11)$$

根据仿真的结果,可以认为在单通道干涉带宽不大于 100 nm 时,重建图像的像质是可以接受的,此时可以通过合适的算法对其进行校正,以获取更好的成像质量。在此基础上,进一步仿真研究了不同阵列规模下,干涉带宽为 100 nm 时的成像结果。如图11所示,在光谱通道较宽的情形下,阵列规模的提升对图像重建结果的增益是很小的,将其与图6(a)对比,能够直观地看出这一差异。

随着透镜阵列尺寸的增大,重构图像的 PSNR 没有明显提高。这表明,对于捕获高频信息的长基线透镜对,相对较宽的干涉光谱导致光学计算得出的复相干因子大大偏离在准单色条件下的理论值。

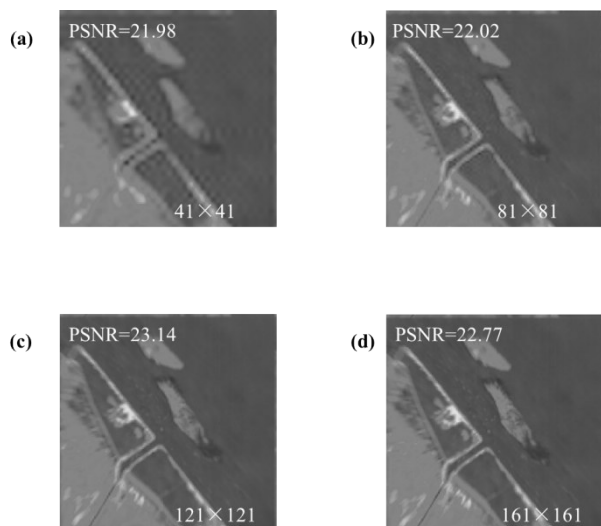


图 11 在干涉带宽为 100 nm 时不同阵列尺寸下的图像重建结果:(a)  $41 \times 41$ ; (b)  $81 \times 81$ ; (c)  $121 \times 121$ ; (d)  $161 \times 161$

Fig. 11 The image reconstruction results in different array sizes with an interference bandwidth of 100 nm: (a)  $41 \times 41$ ; (b)  $81 \times 81$ ; (c)  $121 \times 121$ ; (d)  $161 \times 161$

因此,捕获的高频分量不能提高重建图像的质量。对比图 11(c)和 11(d),阵列尺寸的增加甚至会降低图像质量,因为更多错误的高频成分会导致进一步的混叠。当然,必须指出,这种由光场非单色性引起的像质退化是可以通过图像重建过程中的迭代算法来实现改善的。

#### 4 结语

本文通过数值模拟研究了能够实现基频整数倍采样的棋盘式分块平面成像仪的成像能力。首先建立了棋盘式成像仪的信号传输模型,以及相应的仿真方法。在准单色条件下,对该成像仪的不同参数进行了仿真研究。对成像距离仿真结果表明,棋盘式成像仪的工作距离保持在 100 km 以上时能够获得较好的成像质量,同时提出了小工作距离下的相位补偿方法,实现了小工作距离下的成像。对透镜阵列仿真结果显示了增大阵列规模或者减小基频,都能够实现像质的提升。构建了带有制造精度误差的相移矩阵,对波导制造精度的仿真结果表明,波导制造精度的标准差小于  $0.1\lambda$  时,成像质量是可以接受的。此外,在上述仿真的基础上,进一步研究了干涉光谱宽度对图像重建质量的影响。结果表明,单通道干涉带宽在 100 nm 以内,成像质量是可以接受的,但是在光谱较宽的情形下,高频信息采样误差增大,使得长基线的增加对图像重建

质量失去增益。本研究结果为棋盘式成像系统的开发提供了理论基础,其中对于波导制造精度和非单色性的讨论,对所有的分段平面干涉成像仪都具有参考价值。

#### References

- [1] Armstrong J T, Schmitt H R, Restaino S R, et al. An infrared beam combiner for wavelength bootstrapping at the NPOI [C]. Proceedings of the Optical and Infrared Interferometry and Imaging VI, SPIE, 2018.
- [2] Lanthermann C. The CHARA array: current and future imaging capability [C]. Proceedings of the American Astronomical Society Meeting Abstracts, 2023.
- [3] Bohn A, Benisty M, Perraut K, et al. Probing inner and outer disk misalignments in transition disks—Constraints from VLT/GRAVITY and ALMA observations [J]. Astronomy & Astrophysics, 2022, 658: A183.
- [4] Kluska J, Olofsson H, Van Winckel H, et al. VLT/PIONIER reveals the close environment of the evolved system HD 101584 [J]. Astronomy & Astrophysics, 2020, 642: A152.
- [5] Wojtczak J, Labadie L, Perraut K, et al. The GRAVITY young stellar object survey—IX. Spatially resolved kinematics of hot hydrogen gas in the star-disk interaction region of T Tauri stars [J]. Astronomy & Astrophysics, 2023, 669: A59.
- [6] Eisenhauer F, Monnier J D, Pfuhl O. Advances in optical/infrared interferometry [J]. Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 2023, 61(1): 237–285.
- [7] Chung S J, Miller D W, De Weck O L. ARGOS testbed: study of multidisciplinary challenges of future spaceborne interferometric arrays [J]. Optical Engineering, 2004, 43(9): 2156–2167.
- [8] Siew S Y, Li B, Gao F, et al. Review of silicon photonics technology and platform development [J]. Journal of Lightwave Technology, 2021, 39(13): 4374–4389.
- [9] Shu H, Chang L, Tao Y, et al. Microcomb-driven silicon photonic systems [J]. Nature, 2022, 605(7910): 457–463.
- [10] Yong J, Feng Z, Wu Z, et al. Photonic integrated interferometric imaging based on main and auxiliary nested microlens arrays [J]. Optics Express, 2022, 30(16): 29472–29484.
- [11] 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.
- [12] Rizzo A, Dave U, Novick A, et al. Fabrication-robust silicon photonic devices in standard sub-micron silicon-on-insulator processes [J]. Optics Letters, 2023, 48(2): 215–218.
- [13] Goodman J W. Statistical optics [M]. John Wiley & Sons, 2015.
- [14] Su T, Scott R P, Ogden C, et al. Experimental demonstration of interferometric imaging using photonic integrated circuits [J]. Optics Express, 2017, 25(11): 12653–12665.
- [15] Yu Q, Ge B, Li Y, et al. System design for a “checkerboard” imager [J]. Applied Optics, 2018, 57(35):

- 10218–10223.
- [16] Chen J, Ge B, Yu Q. Influence of measurement errors of the complex coherence factor on reconstructed image quality of integrated optical interferometric imagers [J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(10): 105108.
- [17] Badham K, Kendrick R L, Wuchenich D, et al. Photonic integrated circuit-based imaging system for SPIDER [C]. *Proceedings of the 2017 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR)*, 2017.
- [18] Lyu G M, Li Q, Chen Y T, et al. An improved scheme and numerical simulation of segmented planar imaging detector for electro-optical reconnaissance [J]. *Optical Review*, 2019, 26: 664–675.
- [19] Wang K, Zhu Y Q, An Q C, et al. Even sampling photonic-integrated interferometric array for synthetic aperture imaging [J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 32119–32128.
- [20] Ding C, Zhang X, Liu X, et al. Structure design and image reconstruction of hexagonal-array photonics integrated interference imaging system [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 139396–139403.
- [21] Zhao Z, Yuan Y, Zhang C, et al. Imaging quality characterization and optimization of segmented planar imaging system based on honeycomb dense azimuth sampling lens array [J]. *Optics Express*, 2023, 31(22): 35670–35684.
- [22] Deng X, Tao W, Diao Y, et al. Imaging analysis of photonic integrated interference imaging system based on compact sampling lenslet array considering on-chip optical loss [C]. *Proceedings of the Photonics*, 2023.
- [23] Chen T, Zeng X, Zhang Z, et al. REM: A simplified revised entropy image reconstruction for photonics integrated interference imaging system [J]. *Optics Communications*, 2021, 501: 127341.
- [24] Mars M, Betcke M M, Mcewen J D. Learned interferometric imaging for the SPIDER instrument [J]. *RAS Techniques and Instruments*, 2023, 2(1): 760–778.
- [25] Zhang Y, Wang K, An Q, et al. High-accuracy online calibration scheme for large-scale integrated photonic interferometric measurements [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(3): 1–5.
- [26] Chen J, Yu Q, Ge B, et al. A phase difference measurement method for integrated optical interferometric imagers [J]. *Remote Sensing*, 2023, 15(8): 2194.
- [27] Yoo S, Guan B, Scott R P. Heterogeneous 2D/3D photonic integrated microsystems [J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2016, 2(1): 1–9.