

光学学报

光子集成干涉成像机理和空间频谱覆盖研究

马红柳¹, 黄康¹, 刘勇², 常虹², 陈守谦³, 张旺^{1*}

¹吉林大学机械与航空航天工程学院, 吉林 长春 130025;

²北京航天计量测试技术研究所, 北京 100076;

³哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 光子集成干涉成像系统具有体积小、质量轻、能耗低、分辨率高的成像特性, 有望取代传统大口径望远镜实现远距离探测。研究了光学干涉探测成像原理, 建立了空间目标干涉图像复原模型。研究了微透镜阵列排布对成像质量的影响, 提出了微透镜阵列设计方法。研究了光学相干基线匹配对空间目标频谱覆盖的影响, 提出了能够高效覆盖高、中、低频谱的相干基线匹配方法。最后, 比较了不同的微透镜阵列排布和干涉基线匹配方式下目标图像仿真复原效果。结果表明, 所提微透镜阵列排布方式和干涉基线匹配方法能够提升空间目标频谱覆盖, 提高目标图像复原质量。

关键词 成像系统; 光电探测; 干涉成像; 光子集成; 微透镜; 图像复原

中图分类号 O438

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0411003

Research on Photonic Integrated Interferometric Imaging Mechanism and Space Spectrum Coverage

Ma Hongliu¹, Huang Kang¹, Liu Yong², Chang Hong², Chen Shouqian³, Zhang Wang^{1*}

¹School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun, Jilin 130025, China;

²Beijing Institute of Aerospace Measurement and Testing Technology, Beijing 100076, China;

³Research Center of Space Optics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Photonic integrated interferometric imaging system has the imaging characteristics of small-scale, low weight, low power consumption, and high resolution, which is expected to replace the traditional large aperture telescopes to realize remote detection. The principle of optical interferometry imaging is studied, and the restoration model of space object interferometric imaging is established. The influence of microlens array arrangement on imaging quality is studied, and the design method of microlens array is proposed. The effect of optical coherent baseline matching on spatial target spectrum coverage is studied, the coherent baseline matching method that can cover high, medium, and low spectrum coverage efficiently is presented. Finally, effects of target image simulation restoration under different microlens array arrangements and interference baseline matching approaches are compared. The results show that the proposed arrangement of microlens array and interference baseline matching method can improve the spectrum coverage of space target and improve the restoration quality of target images.

Key words imaging systems; electro-optical detection; interferometric imaging; photonic integration; microlens; image restoration

OCIS codes 110.3175; 040.5160; 110.3010

收稿日期: 2020-08-25; 修回日期: 2020-09-22; 录用日期: 2020-10-09

* E-mail: wangzhang@jlu.edu.cn

1 引言

传统的光学望远镜利用光波的折射和反射原理进行成像。为提高光学系统的空间分辨率,需要增大光学系统的通光口径,但同时望远镜系统的体积、质量、能耗同步增大,并且制造难度也进一步增加^[1]。随着光子集成器件制造工艺和干涉探测技术的愈发成熟,近几年提出的以光子集成干涉成像作为核心技术的分块式平面光电探测成像系统(SPIDER)引起了天文观测领域研究者的广泛关注。与传统的光学成像系统相比,光子集成干涉成像技术以光学干涉信息为目标传感形式,以光子集成芯片为干涉信息获取的关键技术与器件支撑,通过微透镜阵列获取目标光学信息,在光子集成芯片(PIC)中进行光波的调控及干涉^[2-3]。通过在输出端对干涉信息进行采集、处理及重构,该系统获得高分辨率图像^[4-6]。目前光子集成干涉成像技术正处于研究的初级阶段,相关单位仅通过搭建实验平台进行了部分理论验证,但该技术尚未实现工程化^[7-8]。光子集成干涉成像技术仍然存在着不足之处,主要表现为光学干涉成像原理与信号传输机制尚不明确、空间目标频谱覆盖不够精准、图像复原质量不够理想。

本文对光子集成干涉成像的光学相干成像原理和信号传输机制进行研究,包括空间目标相干探测过程中信号的接收、传递和处理。并提出一种新型干涉基线匹配方法,比较了不同微透镜配对方式对图像复原质量的影响,进而为获得空间目标频率精准覆盖、实现目标图像高质量复原提供支持。

2 光子集成干涉成像原理

光子集成干涉成像是一种基于干涉原理和光子集成技术的新体制、新模式光电探测成像技术,成像流程如图 1 所示。光子集成干涉成像系统包含信号接收、信号传递、信号处理三个工作单元。其中,信号接收单元主要包括微透镜阵列及其组件;信号传递单元包括光波导、阵列波导光栅及相位调制器;信号处理单元包括平衡探测器和数字信号处理器。光子集成干涉成像系统的工作方式为:微透镜阵列接收空间目标光信号并将信号耦合到 PIC 上,光信号在 PIC 上经光波导传递、阵列波导光栅分光复用、光学相位调制器对两束光波进行相位调制,使其满足干涉条件。相干光从 PIC 输出后进入 90° 光混频器和平衡探测器中进行光波干涉和信号测量,再通过数字信号处理实现目标图像的复原^[9-13]。

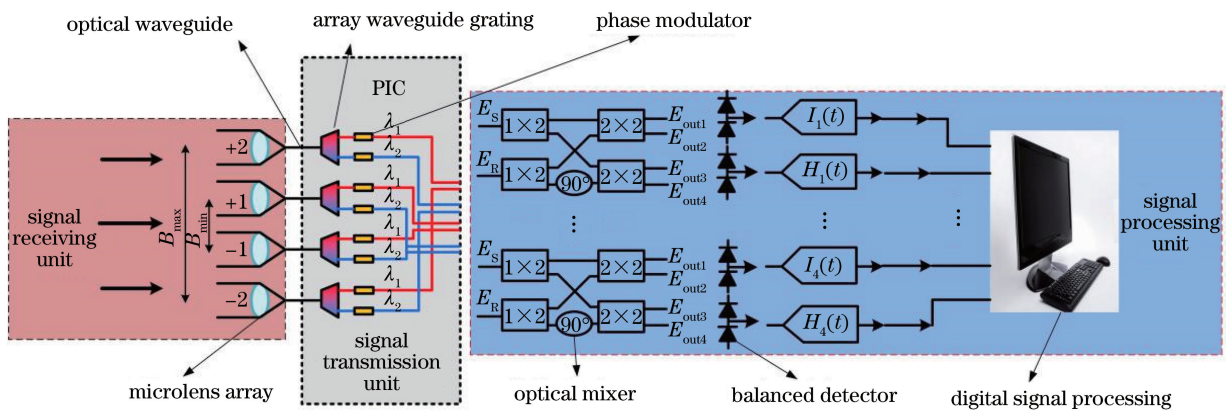


图 1 光子集成干涉成像系统的原理

Fig. 1 Schematic of photonic integrated interferometric imaging system

2.1 干涉成像原理

光子集成干涉成像技术以干涉探测为目标信息获取方式,其主要原理为范西特-泽尼克定理^[14]。范西特-泽尼克定理可以表述为:当光源本身线度和微透镜阵列平面线度都比两者之间的距离小得多时,微透镜阵列平面上复空间相干度正比于光源强度分布的归一化傅里叶变换。

如图 2 所示,假定光源 σ 仅是物面 Σ_1 的一部

分,平面 Σ_1 上的点 Q 坐标为 (a, b) ;平面 Σ_2 为微透镜阵列平面,透镜 D_1 的圆心坐标为 (c_1, e_1) ,透镜 D_2 的圆心坐标为 (c_2, e_2) ,透镜 D_2 到透镜 D_1 的空间距离矢量称为干涉基线;平面 Σ_3 为像面,平面 Σ_3 上的点 Q' 坐标为 (u, v) ;物面与微透镜阵列平面相互平行并且距离为 z ,微透镜阵列平面与像面相互平行并且距离为 z' ,点 Q 到透镜 D_1 的距离为 r_1 ,点 Q 到透镜 D_2 的距离为 r_2 。

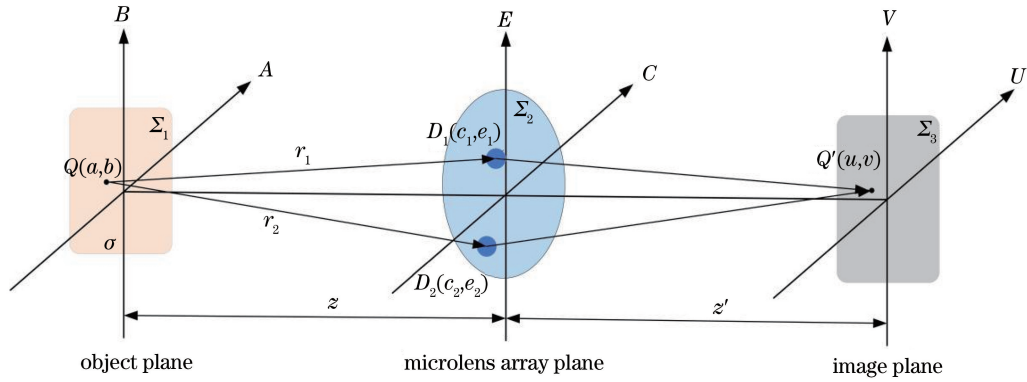


图 2 干涉成像示意图

Fig. 2 Schematic of interferometric imaging

由准单色光的传播和衍射理论^[15]可知,微透镜阵列平面上透镜 D_1 和透镜 D_2 之间的互强度 $V(D_1, D_2)$ 为

$$V(D_1, D_2) = \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \int_{\sigma} I(Q) \frac{\exp\left[j \frac{2\pi}{\bar{\lambda}}(r_1 - r_2)\right]}{r_1 r_2} dQ, \quad (1)$$

式中: $I(Q)$ 为 Q 点的强度; $\bar{\lambda}$ 为平均波长。归一化的互强度称为复空间相干度,对(1)式进行归一化,则透镜 D_1 和透镜 D_2 之间的复空间相干度 $W(D_1, D_2)$ 为

$$W(D_1, D_2) = \frac{V(D_1, D_2)}{[I(D_1)I(D_2)]^{\frac{1}{2}}} = \frac{\frac{1}{\bar{\lambda}^2} \int_{\sigma} I(Q) \frac{\exp\left[j \frac{2\pi}{\bar{\lambda}}(r_1 - r_2)\right]}{r_1 r_2} dQ}{[I(D_1)I(D_2)]^{\frac{1}{2}}}, \quad (2)$$

式中: $I(D_1)$ 和 $I(D_2)$ 分别是透镜 D_1 和透镜 D_2 的强度,并且 $I(D_1) = V(D_1, D_1)$, $I(D_2) = V(D_2, D_2)$, 光子集成干涉成像系统中微透镜的直径相同。若光源在 AB 平面,则(2)式变为

$$W(D_1, D_2) = \frac{\frac{1}{\bar{\lambda}^2} \iint_{\sigma} I(a, b) \frac{\exp\left[j \frac{2\pi}{\bar{\lambda}}(r_1 - r_2)\right]}{r_1 r_2} da db}{[I(D_1)I(D_2)]^{\frac{1}{2}}}. \quad (3)$$

(3)式中被积函数的分母 $r_1 r_2$ 可用 z^2 适当近似,则令

$$\phi = \frac{\pi [(c_1^2 + e_1^2) - (c_2^2 + e_2^2)]}{\bar{\lambda} z} = \frac{\pi}{\bar{\lambda} z} (\rho_1^2 - \rho_2^2), \quad (4)$$

式中: ϕ 为相位信息; ρ_1 和 ρ_2 分别为透镜 D_1 和透

镜 D_2 到原点的距离。令 $\Delta c = c_1 - c_2$, $\Delta e = e_1 - e_2$, 并对 r_1 和 r_2 进行傍轴近似,则范西特-泽尼克定理的最终表达式为

$$W(D_1, D_2) = \frac{e^{j\phi} \iint I(a, b) \exp\left[-j \frac{2\pi}{\bar{\lambda} z} (\Delta c a + \Delta e b)\right] da db}{\iint I(a, b) da db}, \quad (5)$$

当 $\phi = 0$ 或 $\phi \ll 2/\pi$ 时,(5)式中可以舍弃相位因子。

$|W(D_1, D_2)|$ 和 $I(a, b)$ 之间存在傅里叶变换关系,在获得复空间相干度信息的基础上,通过傅里叶逆变换可以得到目标强度信息。

2.2 目标信号接收、传递及处理方式

光子集成干涉成像系统在工作过程中,微透镜阵列接收空间目标光信号并将其耦合到光子集成芯片上。光信号在光子集成芯片上经光波导传递、阵列波导光栅分光复用、光学相位调制器对相干光波进行相位调制。相干光在 90° 光混频器中进行干涉,并利用平衡探测器测量干涉信息^[16]。假定进入 90° 光混频器的相干光为

$$E_S = E_A e^{j(\omega_1 t + \phi_1)}, \quad (6)$$

$$E_R = E_B e^{j(\omega_2 t + \phi_2)}, \quad (7)$$

式中: ω_1 和 ω_2 均为相干光的频率; ϕ_1 和 ϕ_2 均为相干光的初始相位; E_A 和 E_B 分别为两束相干光的振幅。

如图 1 所示,两束相干光 E_S, E_R 分别进入 90° 光混频器中, 90° 光混频器能够使入射光波产生同相和正交混频,进而发生干涉。相干光经光混频器后的输出信号^[16]表示为

$$E_{\text{out1}} = \frac{1}{2} (E_S + E_R), \quad (8)$$

$$E_{\text{out}2} = \frac{1}{2}(E_S - E_R), \quad (9)$$

$$E_{\text{out}3} = \frac{1}{2}(E_S + jE_R), \quad (10)$$

$$E_{\text{out}4} = \frac{1}{2}(E_S - jE_R). \quad (11)$$

经平衡探测器后的电信号为

$$I = I_1 - I_2 =$$

$$\kappa(E_{\text{out}1}E_{\text{out}1}^* - E_{\text{out}2}E_{\text{out}2}^*) = \kappa\text{Re}(E_S E_R^*), \quad (12)$$

$$H = H_1 - H_2 =$$

$$\kappa(E_{\text{out}3}E_{\text{out}3}^* - E_{\text{out}4}E_{\text{out}4}^*) = \kappa\text{Im}(E_S E_R^*), \quad (13)$$

式中： κ 为平衡探测器的响应度； $E_{\text{out}1}^*$ 为 $E_{\text{out}1}$ 的共轭。由范西特-泽尼克定理可知，两束相干光的互强度为

$$V(u, v) = \iint I(a, b) \exp[-j2\pi(ua + vb)] da db = \frac{1}{\kappa}(I + jH), \quad (14)$$

式中： $u = \frac{\Delta c}{\lambda z}$ ， $v = \frac{\Delta e}{\lambda z}$ 均为干涉基线对应的空间频率。则复原图像的光强分布为

$$I'(a, b) = \mathcal{F}^{-1}[V(u, v)]. \quad (15)$$

由(15)式可知，两束相干光经 90° 光混频器进入平衡探测器中，经过光电转换处理后得到电信号 I 和电信号 H ，分别为两束相干光互强度的实部和虚部信息，再通过傅里叶逆变换可得到目标光源的强度分布。

3 微透镜阵列优化

在目标距离一定时，空间目标频谱采样与基线长度、基线矢量方向、波长有关。优化空间目标频谱覆盖的方式有：优化微透镜阵列的排布，改变基线的矢量方向，获得更多方向的空间频率采样点；优化干涉基线的匹配方式，改变基线的长度，获得不同频率的空间频率采样点；增加阵列波导光栅的分光通道，提高空间频率采样点数量。

3.1 优化微透镜阵列的排布

光子集成干涉成像是一种基于干涉原理和光子集成器件的新型光电探测成像技术。这里将微透镜阵列呈辐射条状排列，如图 3 所示，沿相同径向的微透镜进行干涉基线匹配，辐射条状的每个半径称为干涉臂，一个微透镜阵列由若干个干涉臂组成。

假定微透镜的直径为 d ，干涉臂的数目为 P ，则两个干涉臂之间的夹角^[4-5]为

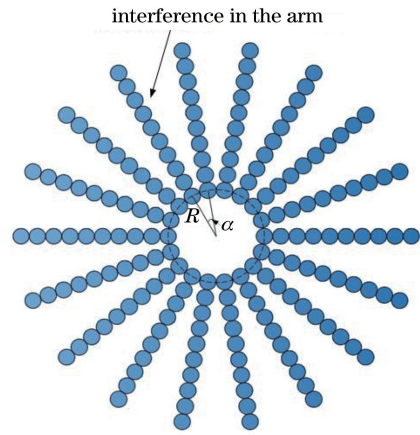


图 3 微透镜阵列形状示意图

Fig. 3 Diagram of the microlens array shape

$$\alpha = \frac{2\pi}{P}. \quad (16)$$

在微透镜阵列中，最内层透镜构成圆的半径为

$$R = \frac{d}{2 \tan \frac{\alpha}{2}}. \quad (17)$$

位于第 f 个干涉臂中的第 i 个透镜的圆心坐标 $[c(i, f), e(i, f)]$ 为

$$c(i, f) = [R + (i - 1)d] \times \cos[(f - 1) \times \alpha], \quad (18)$$

$$e(i, f) = [R + (i - 1)d] \times \sin[(f - 1) \times \alpha]. \quad (19)$$

任意两个微透镜之间的空间距离矢量称为干涉基线，假设微透镜 D_3 的圆心坐标为 $[c(q, f), e(q, f)]$ ，微透镜 D_4 的圆心坐标为 $[c(h, f), e(h, f)]$ ，则由微透镜 D_3 和 D_4 配对形成的干涉基线对应的空间频率为

$$u = \frac{\Delta c}{\lambda z} = \frac{c(q, f) - c(h, f)}{\lambda z}, \quad (20)$$

$$v = \frac{\Delta e}{\lambda z} = \frac{e(q, f) - e(h, f)}{\lambda z}, \quad (21)$$

$$V(u, v) = V^*(-u, -v). \quad (22)$$

由(22)式可知，方向相反的两个空间频率点对应的傅里叶谱关于原点对称。若微透镜阵列的干涉臂数量 P 为偶数时，干涉臂将关于原点对称并采集到方向相反的空间频率点，使采集到的空间目标频谱信息发生冗余。若微透镜阵列的干涉臂数量 P 为奇数时，能够采集到更多方向的空间目标频谱信息。因此微透镜阵列的干涉臂数量设计为奇数，在避免采集到冗余空间目标频谱信息同时，获得了更多方向的空间频率采样点，提升了空间目标频谱覆盖。

3.2 优化干涉基线的匹配方式

在目标距离和波长一定时,基线对应的空间频率与基线的长度有关。基线越长,采样点的空间频率越高;基线越短,采样点的空间频率越低。图像的细节信息取决于高空间频率采样点,采样点的空间频率越高,图像的细节越能够得到更好复原。而图像的轮廓信息取决于低空间频率采样点,采样点的空间频率越低,图像的轮廓越能够得到更好复原。因此通过优化干涉基线的匹配方式来提高直接复原图像的质量,干涉基线匹配方法如下。

1) 集中采集低频信息的匹配方式。若每个干涉臂上有 28 个微透镜,微透镜的位置排序为 1,2,3,⋯,28,微透镜的配对方式为(1,28),(2,20),(3,6),(4,13),(5,7),(8,21),(9,14),(10,11),(12,27),(15,25),(16,24),(17,23),(18,22),(19,26),则此时的基线长度是 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,13,15,18,27 倍的相邻微透镜直径。该干涉基线匹配方式的优点为主要采集低频信息,从而复原目标图像的轮廓,但该干涉基线匹配方式不能对高频信息进行采样,不能较好地复原图像的细节部分。

2) 均匀采样的匹配方式。均匀采样的匹配方式如图 4 所示。若每个干涉臂上有 28 个微透镜,微透镜的位置排序为 1,2,3,⋯,28,微透镜的配对方式为(1,28),(2,27),(3,26),(4,25),(5,24),(6,

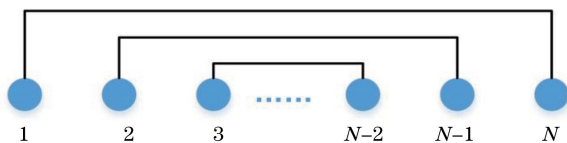


图 4 均匀采样的匹配方式
Fig. 4 Uniform sampling matching method

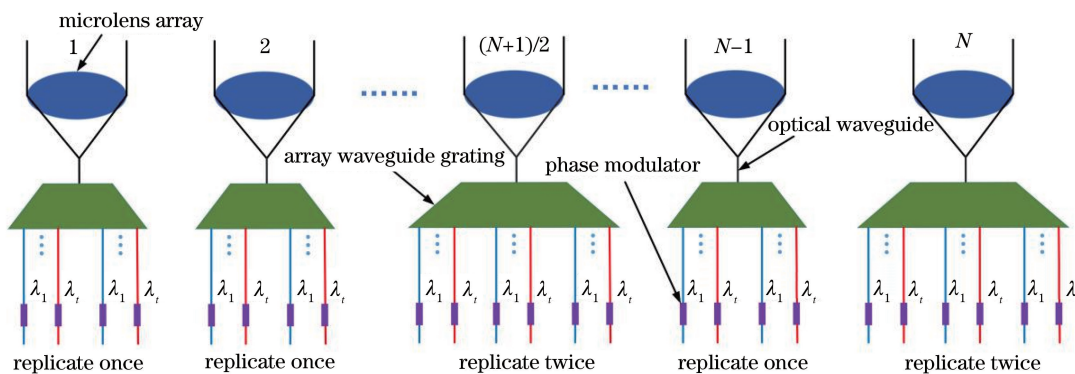


图 5 优化的光子集成器件示意图

Fig. 5 Schematic of the optimized photonic integrated device

23),(7,22),(8,21),(9,20),(10,19),(11,18),(12,17),(13,16),(14,15),则此时的基线长度是 1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27 倍的相邻微透镜直径。该干涉基线匹配方式的主要特点为均匀地采集低频信息和高频信息,基线长度呈等差数列分布。

3) 集中采集高频信息的匹配方式。若每个干涉臂上有 28 个微透镜,微透镜的位置排序为 1,2,3,⋯,28,微透镜的配对方式为(1,21),(2,23),(3,25),(4,27),(5,22),(6,24),(7,26),(8,19),(9,18),(10,17),(11,16),(12,15),(13,14),(20,28),则此时的基线长度是 1,3,5,7,8,9,11,17,18,19,20,21,22,23 倍的相邻微透镜直径。该干涉基线匹配方式的优点为主要采集高频信息,使目标图像的细节部分得到复原,但该干涉基线匹配方式不能对低频信息进行采样,直接复原图像的轮廓较模糊。

4) 新型的匹配方式。由光子集成干涉成像系统的光学相干成像原理可知,光子集成干涉成像系统利用阵列波导光栅将光波导输出的光波进行分光复用。若阵列波导光栅的波长通道数为 t ,则光波分光后的波长依次为 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_t$ 。如图 5 所示,这里通过优化设计光子集成器件,采用镜像的方式设计阵列波导光栅,使每一个微透镜对应的光波细分谱段复制一次,即 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_t; \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_t$,这样可以使每一个窄谱段 λ_i 使用两次。其中,每个干涉臂上中间和最后微透镜对应的光波细分谱段复制两次,即 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_t; \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_t; \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_t$,这样可以使每一个窄谱段 λ_i 使用三次。进而使每个微透镜实现两次配对。

若每个干涉臂上有 29 个微透镜,微透镜的位置排序为 1,2,3,⋯,29。如图 6 所示,在第一份分光后的波长下,微透镜的配对方式为(1,28),(2,27),(3,26),(4,25),(5,24),(6,23),(7,22),(8,21),(9,20),(10,19),(11,18),(12,17),(13,16),(14,15),(29,29),则此时的基线长度是 0,1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27 倍的相邻微透镜直径。如图 7 所示,在第二份分光后的波长下,微透镜的配对方式为(1,29),(2,28),(3,27),(4,26),(5,25),(6,24),(7,23),(8,22),(9,21),(10,20),(11,19),(12,18),(13,17),(14,16),(15,15),则此时的基线长度是 0,2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28 倍的相邻微透镜直径。因此在相等的波长 λ_i 下,沿相同径向的微透镜配对形成的基线长度是 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28 倍的相邻微透镜直径。

若每个干涉臂上有 N 个微透镜,则每个微透镜通过两次配对形成的基线长度为 $0 \sim N-1$ 连续

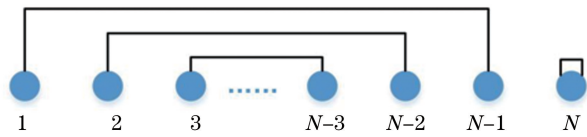


图 6 第一份分光后波长下的配对方式

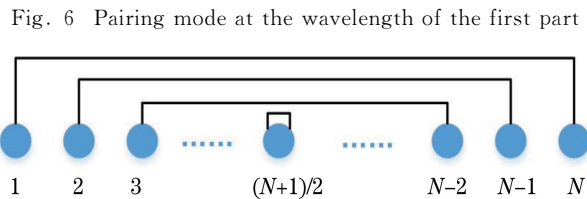


图 7 第二份分光后波长下的配对方式

Fig. 7 Pairing mode at the wavelength of the second part

表 1 不同干涉臂数量下的 P_{SNR} 和 M_{SE}

Table 1 P_{SNR} and M_{SE} under different number of interference arms

Number of interference arms	P_{SNR}/dB	M_{SE}	Valid number of samples
41	9.836	6752	6591
42	9.562	7191	5150
49	9.864	6709	7732
50	9.744	6896	6021

随着干涉臂数量的增加,空间频率采样点数量也应增加。但干涉臂数量为偶数时,会采集到方向相反的空间频率点,导致干涉臂数量为 41 时的有效采样点数比干涉臂数量为 42 时的有效采样点数多,干涉臂数量为 49 时的有效采样点数比干涉臂数量为 50 时的有效采样点数多。由表 1 可知,干涉臂数

整数倍的相邻微透镜直径。新型干涉基线匹配方式可以同时采集到零频和基频整数倍的频率信息。新型干涉基线匹配方式能同时集中采集低频信息和高频信息,实现了对目标轮廓和细节的同时复原,提高了直接复原图像的质量,与此同时,增加了空间频率采样点的数量,提升了空间目标频谱覆盖。

4 目标图像仿真复原与结果分析

4.1 成像质量的评价

光子集成干涉成像系统对空间目标频谱信息采集属于欠采样过程,因此系统对目标图像直接复原时会丢失部分图像的内容。这里,采用峰值信噪比(P_{SNR})和均方误差(M_{SE})对成像质量进行评价。 P_{SNR} 和 M_{SE} 的表达式分别为

$$P_{SNR} = 10 \log_{10} \left[\frac{(2^m - 1)^2}{M_{SE}} \right], \quad (23)$$

$$M_{SE} = \frac{1}{M \times T} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^T [X(x, y) - X_0(x, y)]^2, \quad (24)$$

式中: M, T 分别为空间目标图像的高度和宽度; $X(x, y)$ 为目标图像在空间位置 (x, y) 的灰度值; $X_0(x, y)$ 为复原图像在空间位置 (x, y) 的灰度值。峰值信噪比越大,成像质量越好;均方误差越小,成像质量越好^[17]。

4.2 干涉臂数量对图像复原的影响

在其他设计参数相同的情况下,对具有不同干涉臂数量的光子集成干涉成像系统进行仿真图像复原。对比不同干涉臂数量下的峰值信噪比和均方误差,分析干涉臂数量对图像直接复原的影响。峰值信噪比和均方误差的数据如表 1 所示。图像直接复原的结果如图 8 所示。

量为 49 时的 P_{SNR} 最大且 M_{SE} 最小,直接复原图像的质量较好。由图 8 可知,干涉臂数量为奇数时,直接复原图像的分辨率更高。与干涉臂数量为偶数时相比,干涉臂数量为奇数时获得更多方向的空间频率采样点,提升了空间目标频谱覆盖,避免采集的空间目标频谱信息有冗余,提高了直接复原图像

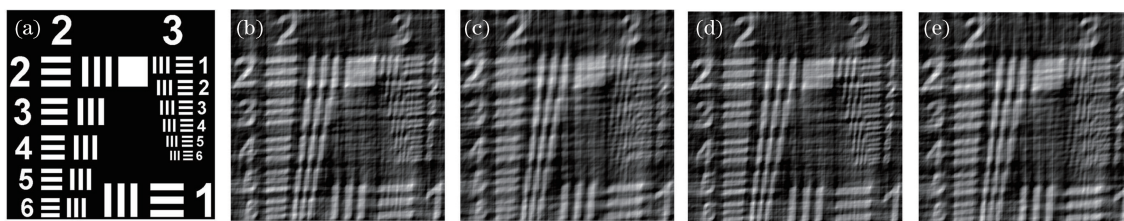


图 8 不同干涉臂数量下直接复原的图像。(a)原图;(b) 41;(c) 42;(d) 49;(e) 50

Fig. 8 Restored images directly under different number of interference arms. (a) Original image; (b) 41; (c) 42; (d) 49; (e) 50

的质量。

4.3 干涉基线匹配方式对图像复原的影响

在其他设计参数相同的情况下,分别采用不同的干涉基线匹配方式对光子集成干涉成像系统进行

仿真图像复原。对比不同干涉基线匹配方式下的 P_{SNR} 和 M_{SE} ,分析干涉基线匹配方式对图像复原的影响。不同干涉基线匹配方式下的 P_{SNR} 和 M_{SE} 如表 2 所示。图像直接复原的结果如图 9 所示。

表 2 不同干涉基线匹配方式下的 P_{SNR} 和 M_{SE}

Table 2 P_{SNR} and M_{SE} under different interference baseline matching methods

Method	P_{SNR}/dB	M_{SE}	Valid number of samples
Proposed pairing method	9.723	6929	6327
Low-frequency intensive method	9.436	7403	3639
Uniform distribution method	9.433	7408	4269
High-frequency intensive method	9.212	7795	4289

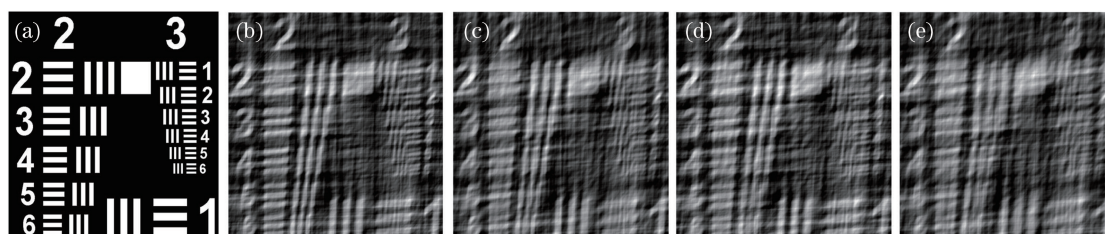


图 9 采用不同干涉基线匹配方式直接复原的图像。(a)原图;(b)新型的匹配方式;(c)集中采集低频信息的匹配方式;(d)均匀采样的匹配方式;(e)集中采集高频信息的匹配方式

Fig. 9 Restored images directly by different interference baseline matching methods. (a) Original image; (b) new matching method; (c) matching method for collecting low frequency information intensively; (d) uniform sampling matching method; (e) matching method for collecting high frequency information intensively

由表 2 可知:新型干涉基线匹配方式的 P_{SNR} 为 9.723, M_{SE} 为 6929,对比其他基线匹配方式,新型干涉基线匹配方式的 P_{SNR} 最大并且 M_{SE} 最小,直接复原的目标图像质量最好;新型干涉基线匹配方式增加了空间频率采样点的数量,提升了目标图像的空间频谱覆盖,获得了更多空间目标频谱信息。由图 9 可知,相比于其他干涉基线匹配方式,新型干涉基线匹配方式能够同时集中采集低频信息和高频信息,直接复原图像的分辨率更高。由计算机仿真结果得出,新型干涉基线匹配方式能够有效地提高直接复原图像的分辨率,提升目标图像的空间频谱覆盖。

4.4 目标图像仿真复原

对光子集成干涉成像系统进行仿真图像复原,采用新型干涉基线匹配方式,光子集成干涉成像系统的设计参数如表 3 所示,仿真结果如图 10 所示。

由图 10 可知,采用新型干涉基线匹配方式和干涉臂数量为奇数的光子集成干涉成像系统复原的图像质量最好。其能够避免采集的空间目标频谱信息有冗余,获得更多方向的空间目标频谱信息,并能同时采集到零频和基频整数倍的空间目标频谱信息。当新型干涉基线匹配方式下的光子集成干涉成像系统的优点与干涉臂数量为奇数时的光子集成干涉成像系统的优点同时满足时,提升了空间目标频谱覆盖,提高了直接复原图像的分辨率。

表 3 光子集成干涉成像系统的参数

Table 3 Parameters of photonic integrated interferometric imaging system

Parameter	Symbol of Parameters	Value
Spectral coverage wavelength	λ /nm	500–900
Microlens diameter	d /mm	1
Longest baseline	B_{\max} /mm	28
Number of interference arms	P	39
Number of microlens per PIC spoke	N	29
Object distance	z /km	100
Number of spectral bins	n	10

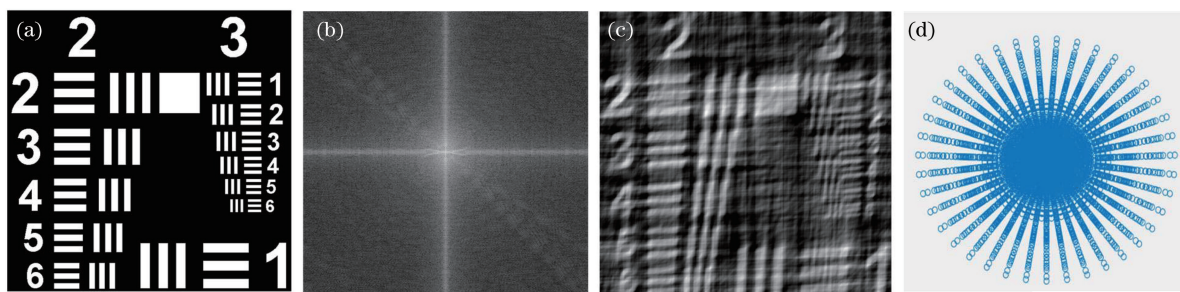


图 10 新型干涉基线匹配方式直接复原的结果。(a)原图;(b)目标图像的互强度谱;(c)直接复原的图像;(d)空间频谱覆盖
Fig. 10 Results of direct restoration using a new interference baseline matching method. (a) Original image;
(b) mutual intensity spectrum of the target image; (c) directly restored image; (d) spatial spectrum coverage

5 结 论

对光子集成干涉成像原理和空间频谱覆盖方法进行的研究。为避免采集到冗余的空间目标频谱信息,将微透镜阵列的干涉臂数量设计为奇数,并且等间隔分布。为提高直接复原图像质量,提出了一种新型干涉基线匹配方式,通过优化设计光子集成器件,采用镜像的方式设计阵列波导光栅,使每个微透镜实现两次配对。新型干涉基线匹配方式的 P_{SNR} 为 9.723, M_{SE} 为 6929,与其他干涉基线匹配方式相比,新型干涉基线匹配方式的 P_{SNR} 最大且 M_{SE} 最小。仿真结果表明,新型干涉基线匹配方式能够增加空间频率采样点数量,提升了目标图像的空间频谱覆盖,并能同时集中采集低频信息和高频信息,提高了直接复原图像的质量。

目前,本课题的研究尚存在不足之处,如光子集成干涉成像系统直接复原的图像较为模糊。为获得清晰的复原图像,后续将开展关于空间目标稀疏采样频谱重构技术、光学干涉图像高分辨重构技术的研究。

参 考 文 献

- [1] Liu T. An overview of development of foreign large aperture reflection imaging technology on geostationary orbit [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2016, 37(5): 1-9.
- [2] 刘韬. 国外静止轨道大口径反射成像技术发展综述 [J]. *航天返回与遥感*, 2016, 37(5): 1-9.
- [3] Guyon O. Wide field interferometric imaging with single-mode fibers [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2002, 387(1): 366-378.
- [4] Liu G Y, Su T H, Li S W, et al. Si_3N_4 photonic integrated circuit for multi-baseline interferometric imaging [C] // 2017 IEEE Photonics Conference (IPC), October 1-5, 2017, Orlando, FL, USA. New York: IEEE Press, 2017: 51-52.
- [5] Kendrick R L, Duncan A, Ogden C, et al. Flat-panel space-based space surveillance sensor [EB/OL]. [2020-08-24]. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2013amos.confE.45K.abstract>.
- [6] Pratley L, McEwen J D. Sparse image reconstruction for the SPIDER optical interferometric telescope [EB/OL]. (2019-03-15) [2020-08-24]. <https://arxiv.org/abs/1903.05638>.
- [7] Thurman S T, Kendrick R L, Duncan A, et al. System design for a SPIDER imager [C] // *Frontiers in Optics*, October 18-22, 2015, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2015: FM3E.3.
- [8] Su T H, Scott R P, Ogden C, et al. Experimental demonstration of interferometric imaging using

- photonic integrated circuits [J]. *Optics Express*, 2017, 25(11): 12653-12665.
- [8] Su T H, Liu G Y, Badham K E, et al. Interferometric imaging using Si_3N_4 photonic integrated circuits for a SPIDER imager [J]. *Optics Express*, 2018, 26(10): 12801-12812.
- [9] Wang S X, Lang T T, Song G Y, et al. SiON-based cyclic arrayed waveguide grating routers with improved loss uniformity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(11): 1123001.
王书新, 郎婷婷, 宋广益, 等. 提高损耗均匀性的氮氧化硅阵列波导光栅路由器 [J]. *光学学报*, 2019, 39(11): 1123001.
- [10] Zhao M M, He Y T, Su X H, et al. Design and modeling analysis of W band electro-optical phase modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(3): 0313002.
赵铭明, 何云涛, 苏兴华, 等. W 波段电光相位调制器的设计与建模分析 [J]. *光学学报*, 2019, 39(3): 0313002.
- [11] Qi Y F, Feng Q, Zhang J, et al. Design of fiber-optic current transformer based on passive phase modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0406004.
齐跃峰, 冯麒, 张瑾, 等. 基于无源相位调制器的光纤电流互感器设计 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0406004.
- [12] Feng Y. Digital optical coherent detection and its application [D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
冯勇. 数字相干光检测研究与应用 [D]. 北京: 清华大学, 2010.
- [13] Meijerink A, Heideman G H L M, van Etten W. Balanced optical phase diversity receivers for coherence multiplexing [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(11): 2393-2408.
- [14] Goodman J W. *Statistical optics* [M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1985.
- [15] Lü N G. *Fourier optics* [M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006.
吕乃光. *傅里叶光学* [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [16] Hoffman D, Heidrich H, Wenke G, et al. Integrated optics eight-port 90 degrees hybrid on LiNbO_3 [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1989, 7(5): 794-798.
- [17] Wang Z, Bovik A C, Sheikh H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.