

最短基线长度对集成干涉系统的影响

张震^{1,2,3,4}, 曾雪锋^{1,2,3,4*}, 刘洋^{1,2,3,4**}, 王灵杰^{1,2,3,4***}, 张学军^{1,2,3,4}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;³应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;⁴光学系统先进制造重点实验室(中国科学院), 吉林 长春 130033

摘要 集成干涉成像是一种兼顾高分辨率和轻量化优势的远场成像技术,有望在保证高分辨率的同时将体积和功耗减小至1/10。针对最短基线长度对该系统成像的影响进行研究。首先,对集成干涉成像系统的工作原理进行分析,并结合采样定理,得出最短基线长度与最大观测视场之间的约束关系。然后建立仿真流程,在透镜匹配形式不变的情况下,通过调整微透镜间隔以改变最短基线长度,最终得到恢复图像。结果表明:在满足视场要求的情况下,通过延长基线可以提高系统的分辨能力,但是一旦突破最大观测视场的限制,由于空间混叠的存在,系统成像质量会明显下降,对应恢复图像的均方根误差平均增加31.02%,峰值信噪比平均下降28.21%。

关键词 成像系统; 干涉成像; 干涉基线; 计算机仿真

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS241355

1 引言

干涉成像是天文学研究中的重要技术手段^[1],其与单口径望远镜的区别在于:单口径望远镜的角分辨率受限于通光口径,而干涉成像是通过望远镜阵列的排布构建较长的干涉基线,从而提高系统分辨能力。鉴于制造大口径望远镜所面临的挑战,并且其检验流程较为复杂^[2],干涉成像在高分辨率成像方面具有明显的优势^[3]。

干涉成像技术通过整合多个子孔径光束实现高分辨率观测^[4],其困难在于多个分立光学元件提高了装调的复杂度,进而制约了子孔径阵列的规模。针对这一问题,研究人员开始考虑采取集成光学器件替代复杂的干涉光路。2013年,美国洛克希德马丁公司的研究人员^[5]结合光子集成芯片(PIC)设计了集成干涉系统(SPIDER),并通过仿真验证了该系统对复相干度的测量能力。目前,针对集成干涉系统的研究主要集中在三个方面:首先是微透镜阵列结构的设计,包括蜘蛛网式布局^[6]、棋盘式布局^[7]、多层级采样阵列^[8]、旋转式设计^[9]和六边形阵列^[10]等多种创新形式。其次是针对光子集成芯片,主要有基于二氧化硅基底^[11]和氮化硅基底^[12]的设计方案。最后在恢复算法领域,包括多尺度 Clean 算法^[13]、TV 范数最小化算法^[14]和基于最大

熵的图像恢复算法。

上述研究已经表明集成干涉系统的成像能力,但是对于系统观测视场大小仍需要更加深入的分析。已有的研究通常将单模光纤的耦合效率视为观测视场的主要制约因素,忽略了最短基线长度对于观测视场的限制作用。本文首先从频谱采样的角度推导了最短基线长度与视场大小的约束关系,然后根据集成干涉系统的原理设计了仿真流程,通过调整最短基线长度实现对观测目标的成像。结果表明:通过延长基线可以提高集成干涉系统的分辨能力,但若最短基线长度突破最大观测视场的限制,由于空间混叠效应的影响,系统成像质量会明显下降。

2 集成干涉成像系统原理

集成干涉系统的结构如图1所示,主要由微透镜阵列、光子集成芯片、探测器和数字信号处理器组成。光子集成芯片内部包括光学波导,阵列波导光栅和 2×4 光学混频器。远场非相干物体的光信号经过微透镜阵列后耦合进入光子集成芯片,宽光谱光信号经过阵列波导光栅分解成多个独立窄光谱信号^[15],再将配对透镜对应的窄光谱信号输入光学混频器执行相移得到四路输出信号,并通过探测器及后续信号处理得到对应空间频率的复相干度,其测量原理与条纹投影

收稿日期: 2024-07-25; 修回日期: 2024-08-19; 录用日期: 2024-09-02; 网络首发日期: 2024-09-06

基金项目: 吉林省重大专项(SKL202302023)、中国科学院青年创新促进会(2020224)

通信作者: *zxf@ciomp.ac.cn; **liu9527aaa@163.com; ***wanglingjie@126.com

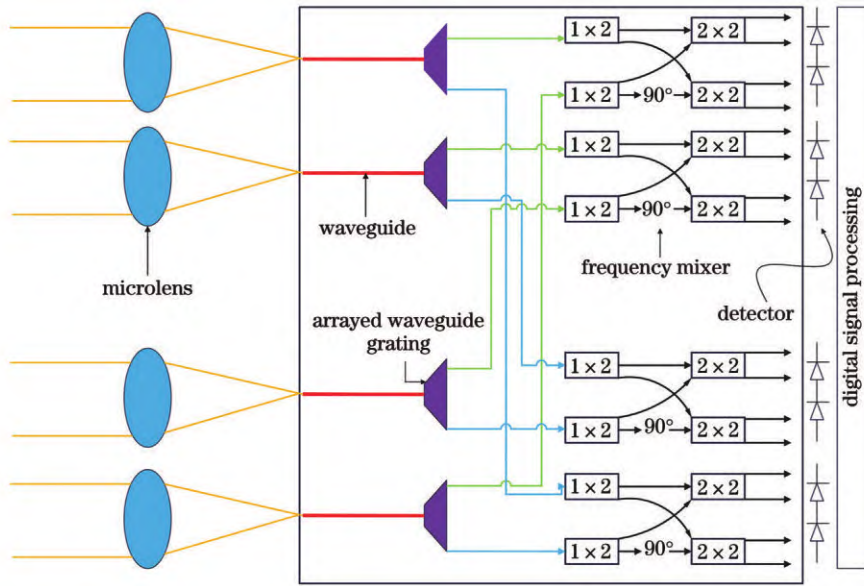


图1 集成干涉系统结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of SPIDER

中的四步相移算法相类似^[16]。图1只展示了一条干涉臂及其配套芯片,实际过程中可以通过增加干涉臂的数目或者旋转单条干涉臂以实现复相干度的二维采样。依据 van Cittert-Zernike 定理,非相干物体的复相干度与光强存在傅里叶变换关系^[17],据此可以在某一波段实现观测目标光强的重建。van Cittert-Zernike 定理^[18]的表达式为

$$J = \frac{1}{(\lambda z)^2} \iint I(x, y) \times \exp\left[-i \frac{2\pi}{\lambda z} [x(u_1 - u_2) + y(v_1 - v_2)]\right] ds, \quad (1)$$

式中: $I(x, y)$ 为观测目标的光强分布; (x, y) 为物场坐标; J 为复相干度; λ 为波长; z 为探测距离; i 为虚数单位; (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) 分别为匹配透镜的坐标; ds 为面积微元,积分在物场平面上进行。然后,从采样定理出发对集成干涉系统进行分析。

假设物场光强分布为 $I(x)$,其对应相干度为 $J(f)$,其中 f 表示微透镜的焦距,两者存在傅里叶变换关系,具体表达式为

$$J(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(x) \exp(-i2\pi fx) dx. \quad (2)$$

集成干涉系统本质上是通过对相干度 $J(f)$ 的有限离散采样实现对光强 $I(x)$ 的反算,在单条干涉臂的微透镜采取首尾匹配的前提下,有限离散采样可以表征为频域滤波器 $H(f)$,具体表示为

$$H(f) = \frac{1}{2f_0} \text{comb}\left(\frac{f}{2f_0} + \frac{1}{2}\right) \text{rect}\left(\frac{f}{4Pf_0}\right), \quad (3)$$

式中: P 为干涉基线的数目; f_0 为系统采集到的最低空间频率。频域滤波器 $H(f)$ 由两部分组成,第一项为

梳状函数 $\text{comb}()$,实现了频域滤波器对特定频率的采样,第二项为矩形函数 $\text{rect}()$,实现了对于特定频域的截取。 f_0 由最短基线长度 b 、波长 λ 和探测距离 z 决定,具体表示为

$$f_0 = \frac{b}{\lambda z}. \quad (4)$$

通过对频域滤波器的傅里叶逆变换可以实现对系统冲激响应 $h(x)$ 的计算,具体表示为

$$h(x) = \text{comb}(2f_0 x) \exp(-i2\pi f_0 x) * 4Pf_0 \text{sinc}(4Pf_0 x). \quad (5)$$

最终恢复的物场光强分布可以表示为

$$I(x) * h(x) = \frac{1}{2f_0} \sum_{k=-\infty}^{+\infty} (-1)^k I\left(x - \frac{k}{2f_0}\right) * 4Pf_0 \text{sinc}(4Pf_0 x), \quad (6)$$

由式(6)可知,成像结果可以表示为两个函数的卷积。其中,第一项可以理解为物场先平移、再累加求和的过程。第二项 sinc 函数相当于一个模糊核,决定了集成干涉系统的分辨能力。在忽略模糊核的情况下,假设观测物体的线视场宽度为 X ,为了避免出现空间混淆,要求满足

$$\frac{1}{2f_0} > X. \quad (7)$$

所以最短基线长度需要满足条件

$$b < \frac{\lambda z}{2X}. \quad (8)$$

同时,考虑到观测目标的角视场 θ_{FOV} 满足 $\theta_{\text{FOV}} = X/z$,所以上述条件也可表示为

$$b < \frac{\lambda}{2\theta_{\text{FOV}}}. \quad (9)$$

3 集成干涉成像系统仿真流程设计

本节对集成干涉成像系统的仿真流程进行阐述。首先,输入观测图像,同时设置观测物距 z 、观测波长 λ 和视场 X 。然后完成微透镜阵列的设计^[19],如图2所示。

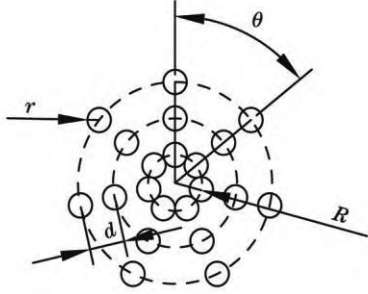


图2 微透镜阵列结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of microlens array structure

设 M 为干涉臂数目, N 为每条干涉臂上微透镜数目。在图2中, r 为微透镜的半径, d 为微透镜间距。 θ 为相邻干涉臂之间夹角,表示为

$$\theta = 2\pi/M. \quad (10)$$

每条干涉臂上最内侧的微透镜的圆心会组成一个同心圆,该同心圆的半径为 R ,满足如下关系,

$$R = \frac{r}{\sin(\pi/M)}. \quad (11)$$

由图2中的几何关系,可以得出微透镜的位置坐标,具体表达式为

$$\begin{cases} X_{m,n} = [R + (n-1)d] \times \cos[(m-1)\theta] \\ Y_{m,n} = [R + (n-1)d] \times \sin[(m-1)\theta] \end{cases}, \quad (12)$$

式中: m 为沿逆时针方向干涉臂的排列序号, $1 \leq m \leq M$; n 为每条干涉臂上微透镜由内到外的排列序号, $1 \leq n \leq N$ 。

进行光信号收集,依据输入图像的亮度计算出不同空间位置的光振幅模值 $A(x, y)$,然后计算出由物点传播到微透镜的复振幅,可以表示为

$$A(x, y) \exp \left[i \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{(x-u)^2 + (y-v)^2 + z^2} \right], \quad (13)$$

式中: (u, v) 为微透镜坐标。同时,光纤耦合效率 ρ ^[20]可表示为

$$\rho(\alpha, D, f, \omega, \lambda) = \frac{8}{\omega^2} \exp \left[-2 \left(\frac{\alpha f}{\omega} \right)^2 \right] \times \left[\int \exp \left(-\frac{r^2}{\omega^2} \right) I_0 \left(\frac{2\alpha f r}{\omega^2} \right) J_1 \left(\frac{\pi D r}{\lambda f} \right) dr \right]^2, \quad (14)$$

式中: α 为微透镜焦平面上的光斑与光轴之间的偏移角距离; D 为微透镜的直径; ω 为单模光纤模场直径; J_1 为一阶贝塞尔函数; I_0 为零阶修正贝塞尔函数。

将每一条干涉臂上微透镜两两匹配形成不同的干涉基线,通常采用首尾配对的形式进行匹配,如图3所示。分别假设匹配透镜对应的坐标分别为 (u_1, v_1) 、 (u_2, v_2) ,可得匹配透镜对应的空间频率为

$$\begin{cases} f_x = \frac{\mu_1 - \mu_2}{\lambda z} \\ f_y = \frac{v_1 - v_2}{\lambda z} \end{cases}. \quad (15)$$

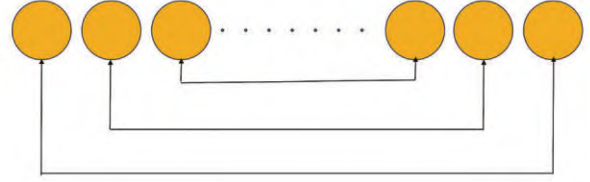


图3 首尾配对示意图

Fig. 3 Schematic diagram of first and last pairing

然后完成复相干度的反算,在理想情况下,光学混频器的四路输出光强 (I_A, I_B, I_C, I_D) 与两路输入光强 (I_S, I_R) 满足一定的关系^[21],具体为

$$\begin{cases} I_A = I_S + I_R + 2\sqrt{I_S I_R} \cos(\varphi) \\ I_B = I_S + I_R - 2\sqrt{I_S I_R} \cos(\varphi) \\ I_C = I_S + I_R + 2\sqrt{I_S I_R} \sin(\varphi) \\ I_D = I_S + I_R - 2\sqrt{I_S I_R} \sin(\varphi) \end{cases}. \quad (16)$$

因此复相干度 J 的模 $|J|$ 和相位 φ ^[22]分别满足

$$\begin{cases} |J| = \frac{\sqrt{(I_A - I_B)^2 + (I_C - I_D)^2}}{I_A + I_B + I_C + I_D} \\ \tan \varphi = \frac{I_C - I_D}{I_A - I_B} \end{cases}. \quad (17)$$

然后,通过傅里叶逆变换完成图像恢复,具体表示为

$$I_r(x, y) = \sum \sum |J| \cos[2\pi(f_x x + f_y y) + \varphi]. \quad (18)$$

完成图像恢复后,以均方根误差(RMSE)和峰值信噪比(PSNR)作为评估指标进行成像质量评价,具体计算过程为

$$\begin{cases} R_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{l_1 \times l_2} \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{l_2} [I_r(i, j) - I_o(i, j)]^2} \\ P_{\text{PSNR}} = 20 \lg \left(\frac{255}{R_{\text{RMSE}}} \right) \end{cases}, \quad (19)$$

式中: l_1, l_2 分别为恢复图像沿横向和纵向的像素数目; I_r, I_o 分别表示恢复图像与原始图像。

4 分析和讨论

本节通过调整微透镜间隔研究最短基线长度对系统成像的影响。为达到此目的,设定了微透镜间隔的多个测试点,具体分别为1、2、3、4、5、6 mm。同时为说明延长基线对最大观测视场的限制作用,设置两种不

同大小的视场。每条干涉臂上的微透镜采用首尾配对的形式,参数设置具体见表 1,三种不同的观测目标如图 4 所示。依据第 3 节中的仿真流程设计程序,得到的恢复图像如图 5~图 10 所示,不同的微透镜间距对应恢复图像按照(a)~(f)进行标记,恢复图像对应 RMSE 和 PSNR 如表 2、表 3 所示。

依据第二节中的分析,最短基线长度需要满足 $b < \lambda z / (2X)$,在已有的微透镜阵列结构形式下,最短基线长度等同于微透镜间隔。为了避免发生空间混叠,当系统观测视场为 200 m 时,微透镜间隔应该小于 2.4 mm。对图 5~图 7 以及表 2 的结果进行分析,可以发现,当微透镜的间隔为 1~2 mm 时,恢复图像的 RMSE 和 PSNR 呈现相对稳定的态势,并且图像细节的恢复效果随着微透镜间隔的增加亦有所提升。然而,当微透镜间隔由 2 mm 增加到 3 mm 时,对应恢复

表 1 集成干涉系统仿真参数

Table 1 Simulation parameter of SPIDER system

Parameter	Value
Wavelength λ /nm	1600
Observation distance z /km	600
Microlens diameter D /mm	1
Microlens focal length f /mm	10
Number of interference arms M	87
Number of microlenses per column N	104
Linear field X /m	200
Angular field θ_{FOV} /($^{\circ}$)	1.14' 0.57'

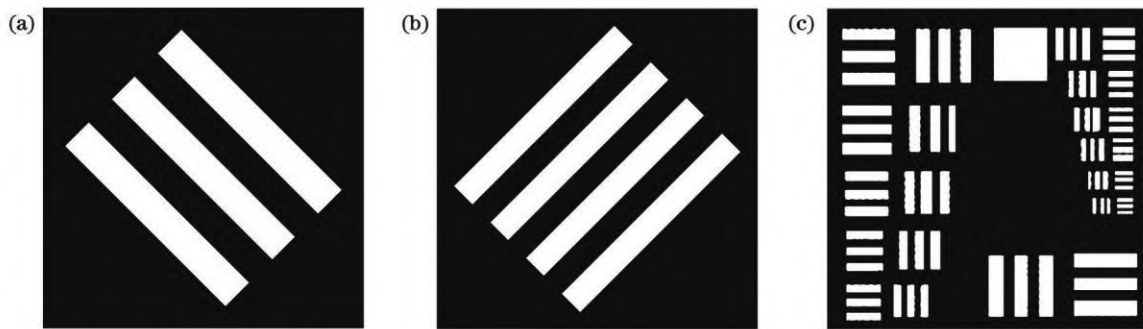


图 4 观测目标。(a)目标 1;(b)目标 2;(c)目标 3

Fig. 4 Observation objective. (a) Objective 1; (b) objective 2; (c) objective 3

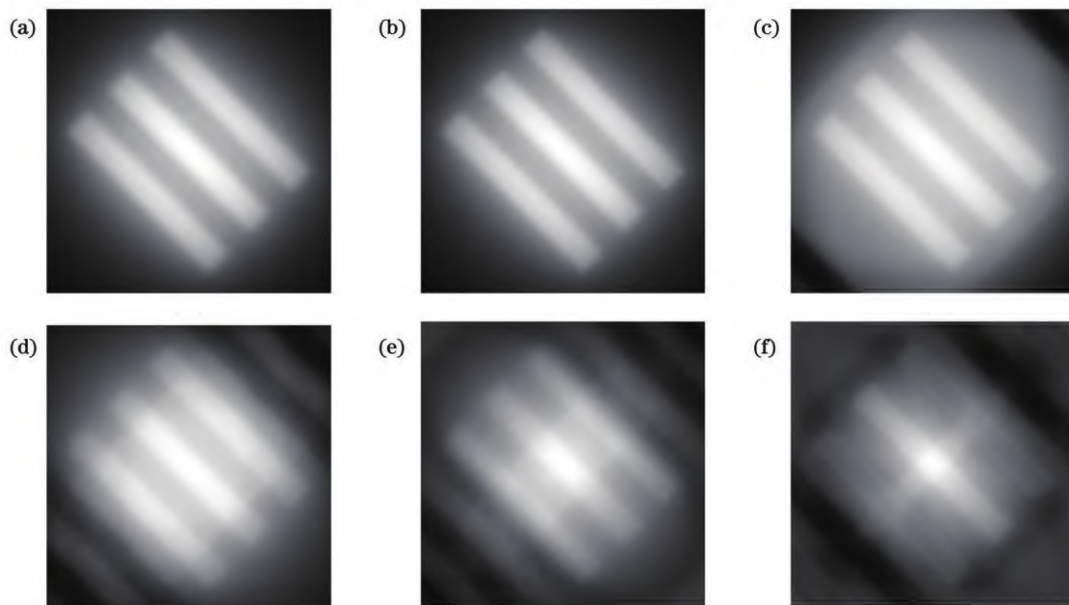


图 5 观测目标 1 在不同最短基线长度下的恢复结果(视场为 200 m)。(a) 1 mm;(b) 2 mm;(c) 3 mm;(d) 4 mm;(e) 5 mm;(f) 6 mm

Fig. 5 Recovery results of observation objective 1 at different minimum baseline lengths (linear field of view 200 m). (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm

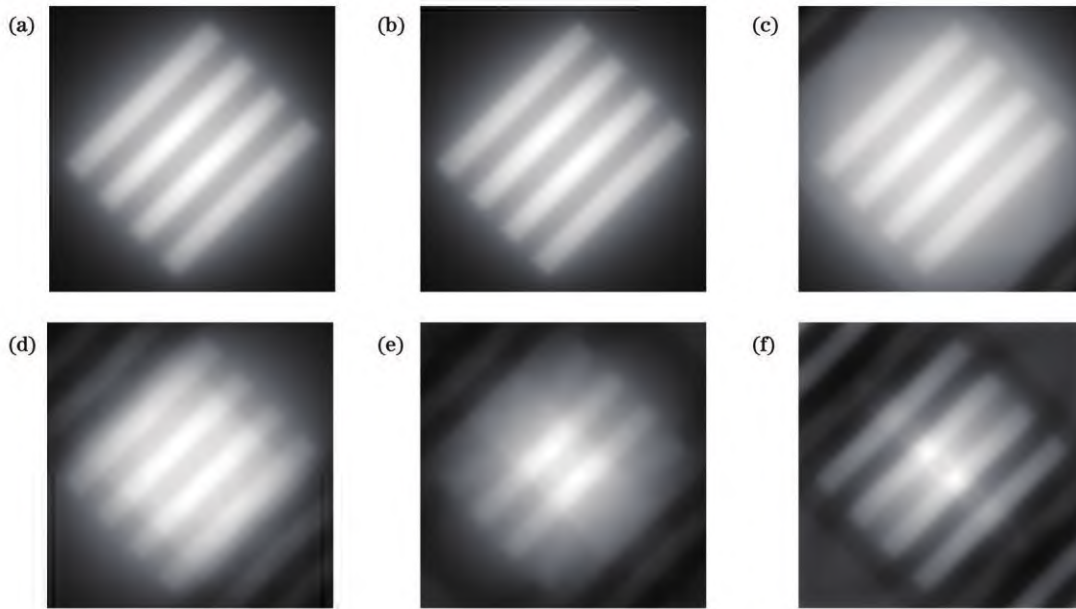


图6 观测目标 2 在不同最短基线长度下的恢复结果(视场为 200 m)。(a) 1 mm;(b) 2 mm;(c) 3 mm;(d) 4 mm;(e) 5 mm;
(f) 6 mm

Fig. 6 Recovery results of observation objective 2 at different minimum baseline lengths (linear field of view 200 m). (a) 1 mm;
(b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm

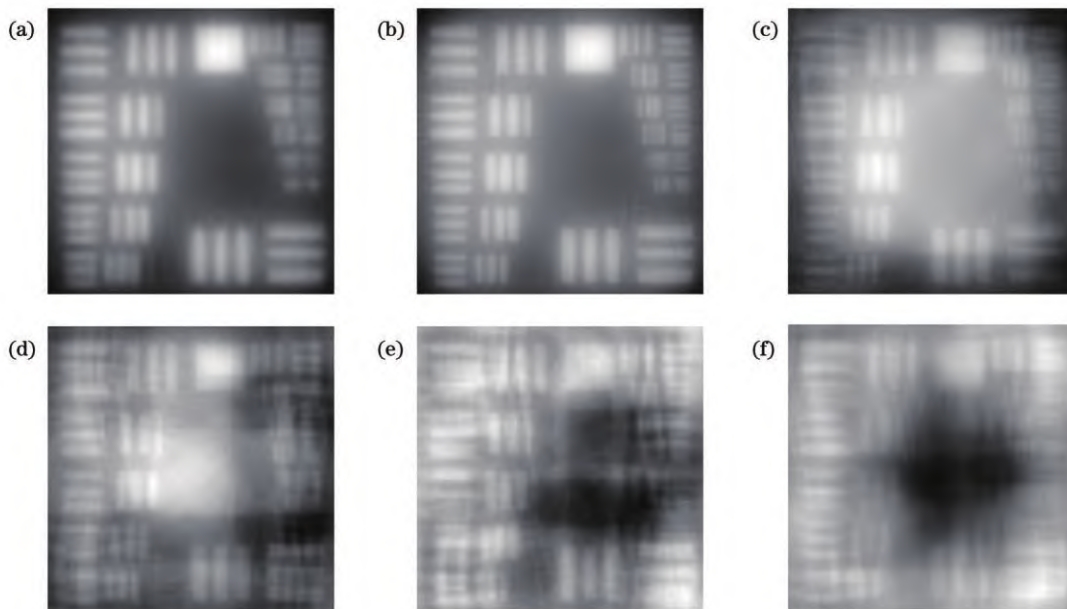


图7 观测目标 3 在不同最短基线长度下的恢复结果(视场为 200 m)。(a) 1 mm;(b) 2 mm;(c) 3 mm;(d) 4 mm;(e) 5 mm;
(f) 6 mm

Fig. 7 Recovery results of observation objective 3 at different minimum baseline lengths (linear field of view 200 m). (a) 1 mm;
(b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm

图像的 RMSE 分别上升 32.71%、33.98%、29.58%，对应 PSNR 分别下降 21.08%、30.18%、29.93%，图像恢复效果明显下降。

同理，当系统观测视场为设定为 100 m 时，微透镜间隔应小于 4.8 mm。经过对图 8~图 10 和表 3 的结果进行分析，可以发现，当微透镜间隔为 1~4 mm 时，恢

复图像的 RMSE 和 PSNR 保持相对稳定，而且图像细节的恢复效果随着微透镜间隔的增加也有所增强。然而，当微透镜间隔由 4 mm 增加到 5 mm 时，图像的恢复效果呈现下降趋势，对应 RMSE 分别上升 27.57%、32.89%、29.58%，对应 PSNR 分别下降 23.41%、29.50%、29.98%。

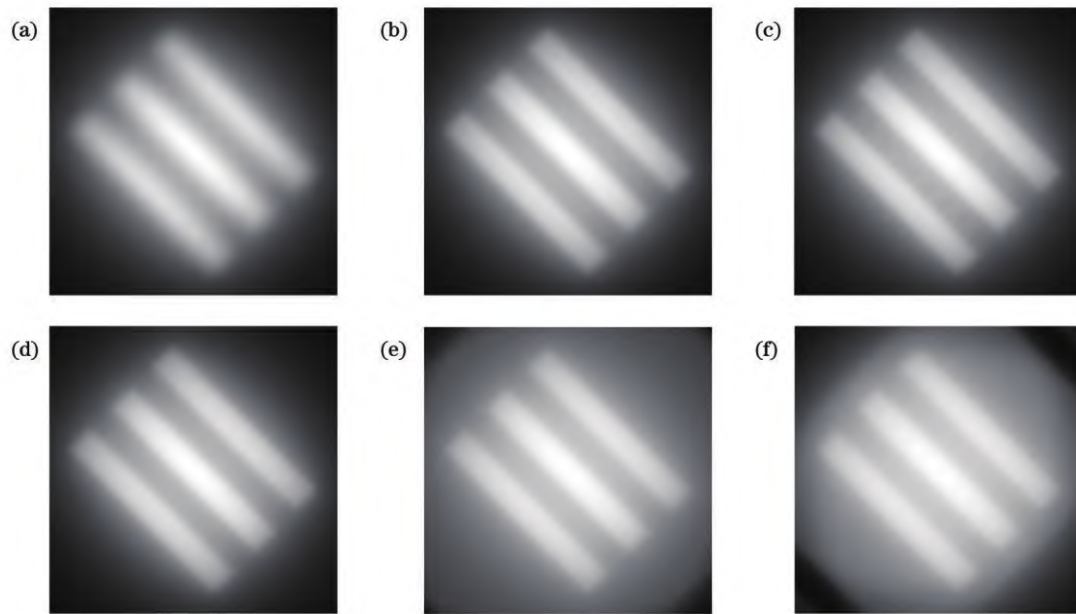


图8 观测目标 1 在不同最短基线长度下的恢复结果(视场为 100 m)。(a) 1 mm;(b) 2 mm;(c) 3 mm;(d) 4 mm;(e) 5 mm;(f) 6 mm

Fig. 8 Recovery results of observation objective 1 at different minimum baseline lengths (linear field of view 100 m). (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm

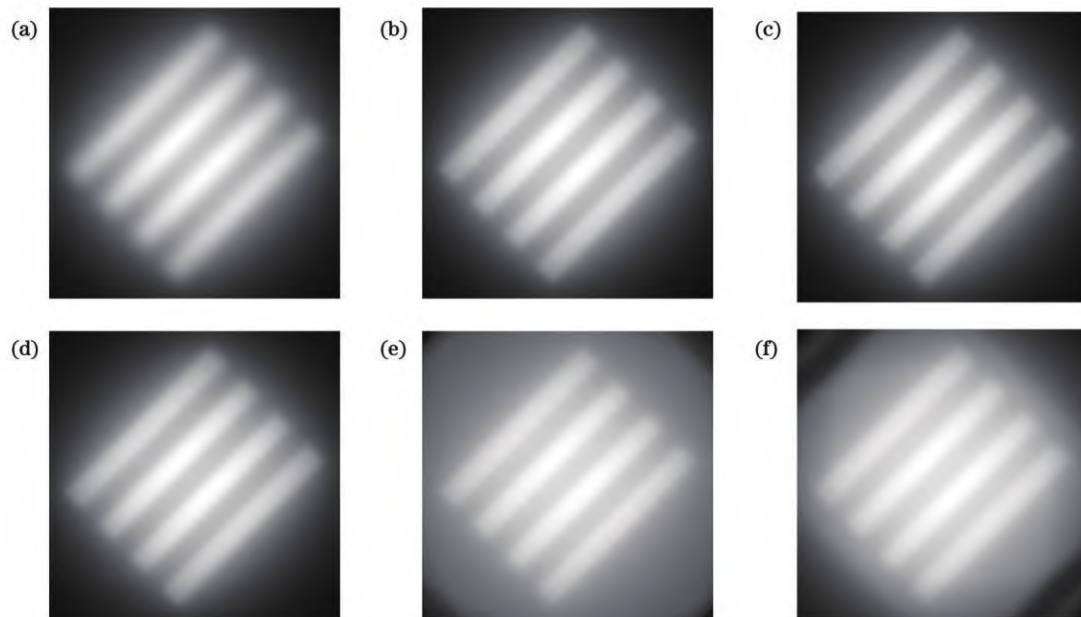


图9 观测目标 2 在不同最短基线长度下的恢复结果(视场为 100 m)。(a) 1 mm;(b) 2 mm;(c) 3 mm;(d) 4 mm;(e) 5 mm;(f) 6 mm

Fig. 9 Recovery results of observation objective 2 at different minimum baseline lengths (linear field of view 100 m). (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm

以上仿真结果说明了最短基线长度 b 与最大观测线视场 X 之间的限制关系。然后,结合单模光纤的耦合效率对观测视场的大小进行深入分析。如果只考虑单模光纤的耦合效率^[23],得到的最大观测线视场为 $\lambda z/D$,其中 D 表示微透镜直径。如果进一步将最短基线长度 b 考虑在内,得到的最大线视场为 $\lambda z/(2b)$ 。在

本文中,最短基线长度 b 对应单条干涉臂上相邻微透镜的间隔,其中 $b > D$,可得 $\lambda z/(2b) < \lambda z/D$,并且在仿真流程中也将单模光纤的耦合效率考虑在内。这进一步说明,在单模光纤的耦合效率与最短基线长度都对视场有影响的前提下,最短基线长度 b 为限制集成干涉系统观测视场大小的主要因素。

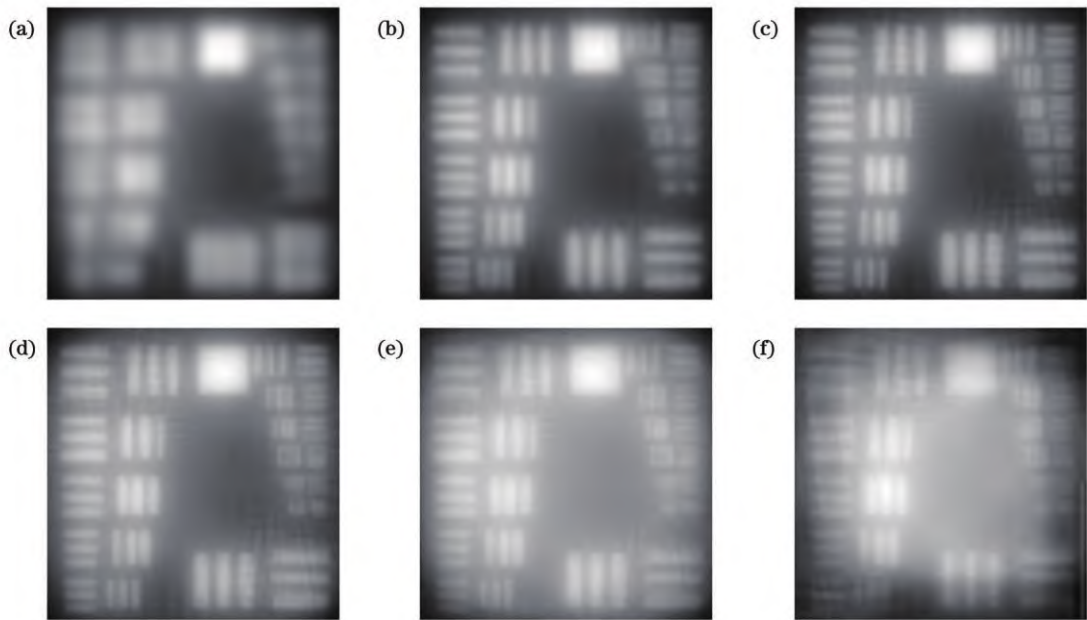


图 10 观测目标 3 在不同最短基线长度下的恢复结果(视场为 100 m)。(a) 1 mm;(b) 2 mm;(c) 3 mm;(d) 4 mm;(e) 5 mm;(f) 6 mm

Fig. 10 Recovery results of observation objective 3 at different minimum baseline lengths (linear field of view 100 m). (a) 1 mm; (b) 2 mm; (c) 3 mm; (d) 4 mm; (e) 5 mm; (f) 6 mm

表 2 视场为 200 m 对应恢复图像 RMSE 和 PSNR
Table 2 RMSE and PSNR corresponding to the recovered image at a field of view of 200 m

Image	Evaluation metric	Lens distance /mm					
		1	2	3	4	5	6
Fig. 4(a)	RMSE	89.8945	89.6899	119.0260	113.4020	119.1140	112.0430
	PSNR /dB	9.0561	9.0759	6.6179	7.0384	6.6115	7.1431
Fig. 4(b)	RMSE	96.9002	96.7268	129.5950	126.1650	127.0960	128.5600
	PSNR /dB	8.4043	8.4199	5.8790	6.1120	6.0482	5.9487
Fig. 4(c)	RMSE	107.3200	107.2600	138.9920	128.5290	130.9190	133.2670
	PSNR /dB	7.5172	7.5220	5.2710	5.9508	5.7907	5.6364
Average	RMSE	98.0382	97.8922	129.2040	122.6990	125.7100	124.6230
	PSNR /dB	8.3259	8.3393	5.9226	6.3671	6.1501	6.2427

表 3 视场为 100 m 对应恢复图像 RMSE 和 PSNR
Table 3 RMSE and PSNR corresponding to the recovered image at a field of view of 100 m

Image	Evaluation metric	Lens distance /mm					
		1	2	3	4	5	6
Fig. 4(a)	RMSE	89.6507	90.1033	89.8676	90.1259	114.9750	119.1210
	PSNR /dB	9.0797	9.0360	9.0587	9.0338	6.9187	6.6110
Fig. 4(b)	RMSE	97.0087	97.1276	97.0658	97.2557	129.2460	129.8130
	PSNR /dB	8.3946	8.3840	8.3895	8.3725	5.9025	5.8644
Fig. 4(c)	RMSE	111.5010	107.4812	107.2060	107.4350	139.2170	139.1460
	PSNR /dB	7.1853	7.5042	7.5265	7.5079	5.2570	5.2614
Average	RMSE	99.3868	98.2373	98.0465	98.2722	127.8130	129.3600
	PSNR /dB	8.2199	8.3081	8.3249	8.3047	6.0261	5.9123

5 结 论

通过理论分析,并结合计算机仿真,结果表明:增加最短基线长度可以提升系统的分辨率,然而,一旦突破最大观测视场的限制,会发生空间混叠,导致成像质量迅速下降。所以,增加最短基线长度可以提升集成干涉系统的分辨能力,但是必须充分考虑最短基线长度对视场的限制作用。基于上述讨论,可以考虑通过调整微透镜间距,将集成干涉系统设置成短基线-大视场和长基线-小视场两种不同的工作模式。这一策略旨在进一步优化集成干涉成像系统的性能,以适应不同应用场景下的成像需求。

参 考 文 献

- [1] Hariharan P. Stellar interferometry[M]//Optical interferometry. Amsterdam: Elsevier, 2003: 221-238.
- [2] 张学军. 空间光学系统先进制造技术进展: 从非球面到自由曲面[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822009.
Zhang X J. Progress on space optics manufacturing: from aspheres to freeforms[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822009.
- [3] 张自然, 吕国冕, 冯华君, 等. 光子集成干涉成像系统的信号能量与噪声分析[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1311001.
Zhang Z R, Lü G M, Feng H J, et al. Analysis of signal energy and noise in photonic integrated interferometric imaging system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1311001.
- [4] 郭红锋. 光干涉与综合孔径技术发展[J]. 天文学进展, 2003, 21(3): 219-230.
Guo H F. Development on techniques of the optical interferometry and aperture synthesis[J]. Progress in Astronomy, 2003, 21(3): 219-230.
- [5] Kendrick R L, Duncan A L, Ogden C, et al. Segmented planar imaging detector for EO reconnaissance[C]//Imaging and Applied Optics, June 23-27, 2013, Arlington, Virginia. Washington, D.C.: OSA, 2013: CM4C.1.
- [6] Yang F, Yan W, Tian P, et al. Electro-optical imaging technology based on microlens array and fiber interferometer[J]. Applied Sciences, 2019, 9(7): 1331.
- [7] Yu Q H, Ge B, Li Y, et al. System design for a "checkerboard" imager[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10218-10223.
- [8] Gao W P, Wang X R, Ma L, et al. Quantitative analysis of segmented planar imaging quality based on hierarchical multistage sampling lens array[J]. Optics Express, 2019, 27(6): 7955-7967.
- [9] 陈天宝. 基于光子集成器件的干涉成像关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
Chen T B. Research on key techniques of interferometric imaging based on photonics integrated devices[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [10] Ding C, Zhang X C, Liu X Y, et al. Structure design and image reconstruction of hexagonal-array photonics integrated interference imaging system[J]. IEEE Access, 2020, 8: 139396-139403.
- [11] Badham K, Duncan A, Kendrick R L, et al. Testbed experiment for SPIDER: a photonic integrated circuit-based interferometric imaging system[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance (AMOS) Technologies Conference, September 19-22, 2017, Wailea, Maui, Hawaii. [S.l.: s.n.], 2017: 58.
- [12] 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.
- [13] 李冠廷. SPIDER图像重构技术的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022.
Li G T. Research on SPIDER image reconstruction technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022.
- [14] 刘罡. 高分辨率紧凑被动相干成像技术研究[D]. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所.
Liu G. Research on compact passive coherent imaging technology with high resolution[D]. Xi'an: Xi'an Institute of Optical Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences.
- [15] 袁佳茜, 刘嘉程, 杜江兵, 等. 基于质子交换和刻蚀工艺的体铌酸锂阵列波导光栅[J]. 光学学报, 2023, 43(13): 1305003.
Yuan J X, Liu J C, Du J B, et al. Arrayed waveguide grating fabricated over bulk lithium-niobate substrate based on proton exchange and etching[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(13): 1305003.
- [16] 严飞, 孙成, 吴佩悦, 等. 一种二值编码结合误差扩散算法的三维测量方法[J]. 光学学报, 2023, 43(22): 2212001.
Yan F, Sun C, Wu P Y, et al. A three-dimensional measurement method based on binary coding combined with error diffusion algorithm[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(22): 2212001.
- [17] Thompson A R, Moran J M, Swenson G W. Interferometry and synthesis in radio astronomy[M]. ChamSpringer International Publishing, 2017.
- [18] 陈天宝, 曾雪锋, 白莹莹, 等. 光子集成干涉成像图像重构: 嫡先验[J]. 光学学报, 2021, 41(23): 2311002.
Chen T B, Zeng X F, Bai Y Y, et al. Image reconstruction of photonics integrated interference imaging: entropy prior[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(23): 2311002.
- [19] 贺瑛攀. 基于光学干涉的分段式平面成像探测系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2022: 22-25.
He Y P. Research on segmented plane imaging detection system based on optical interferometry[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2022: 22-25.
- [20] Guyon O. Wide field interferometric imaging with single-mode fibers[J]. Astronomy & Astrophysics, 2002, 387(1): 366-378.
- [21] Benisty M, Berger J P, Joco L, et al. An integrated optics beam combiner for the second generation VLT instruments[J]. Astronomy & Astrophysics, 2009, 498(2): 601-613.
- [22] 张怡. 光子集成干涉成像的测量误差分析与补偿方法研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2022.
Zhang Y. Research on measurement error analysis and compensation for photonic integrated interferometric imaging[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2022.
- [23] 林菲. 星载轻小型干涉成像相机关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
Lin F. Research on key technologies of spaceborne small-size interference imaging camera[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.

Effect of Minimum Baseline Length on Integrated Interferometric Systems

Zhang Zhen^{1,2,3,4}, Zeng Xuefeng^{1,2,3,4*}, Liu Yang^{1,2,3,4**}, Wang Lingjie^{1,2,3,4***}, Zhang Xuejun^{1,2,3,4}

¹*Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China;*

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

³*State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun 130033, Jilin, China;*

⁴*Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology of Optical Systems, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, Jilin, China*

Abstract

Objective The angular resolution of an optical system is inversely proportional to the aperture size of the telescope. However, increasing the telescope's aperture places higher demands on precision manufacturing, and large aperture systems often require complex mechanical structures. This leads to high production costs, longer manufacturing cycles, and stricter rocket launch requirements during orbital deployment. Therefore, achieving lightweight and low power consumption while maintaining high resolution is a critical challenge for optical systems. To address this, researchers at Lockheed Martin and the University of California, Davis, have proposed integrated interferometric imaging technology. By combining the microlens arrays with photonic integration chips, they process optical signals from matched lenses to capture complex coherence across multiple spatial frequencies, corresponding to the far-field target. Using the van Cittert-Zernike theorem, the light intensity distribution of the observed target is reconstructed through inverse Fourier transformation. Current research on integrated interferometric systems mainly focuses on three areas: microlens array structures, photonic integrated chip designs, and image recovery algorithms. These studies have primarily focused on the simulation process of the photonic integrated interference system. However, they only consider the coupling efficiency from the microlens array to the optical waveguide as the limiting factor of the field of view, without adequately investigating the influence of spatial aliasing caused by the discrete spectral distribution. To address this gap, we examine the effect of the minimum baseline length on imaging in integrated interferometric systems, which is crucial for advancing their practical application.

Methods The study involves both theoretical analysis and computer simulation. First, we construct a frequency domain filter and perform an inverse Fourier transform to obtain the spatial convolution kernel of the integrated interferometric system. We then analyze this convolution kernel to determine the maximum object field width that prevents spectral aliasing. A computer simulation process is designed to verify these theoretical conclusions. This simulation includes the following steps. First, the observation image is input, followed by the construction of the microlens array based on the existing cobweb layout. Next, the coupling efficiency for each object field, corresponding to different microlenses at various positions, is calculated using the coupling efficiency formula. Then, interferometric baselines of different lengths are constructed through head-to-tail matching, and the complex coherence is achieved using the four-step phase-shifting algorithm. The image is then reconstructed using the inverse Fourier transform, which is used to calculate the image width. Finally, the quality of the recovered image is evaluated using root mean square error (RMSE) and peak signal-to-noise ratio (PSNR).

Results and Discussions Based on the sampling theorem, we analyze the field of view of the integrated interferometric system, highlighting the spatial aliasing effect caused by head-to-tail matching of microlens arrays. The relationship between the minimum baseline length and the field of view is then derived. Based on the principles of the integrated interferometric system, a simulation process is developed to enable imaging of the observation target by adjusting the minimum baseline length. The simulation results demonstrate that when the minimum baseline length exceeds the field of view limit, the system's imaging quality significantly degrades due to spatial aliasing. This confirms the constraint between the minimum baseline length and the field of view size.

Conclusions The analysis demonstrates that increasing the minimum baseline length improves the system's resolution. However, surpassing the maximum field of view limit leads to rapid degradation in imaging quality due to spatial aliasing. Therefore, while increasing baseline length improves resolution, the limiting effect on the field of view must be carefully considered. By adjusting microlens spacing, two operating modes are proposed: short-baseline for a large field of view and long-baseline for a small field of view. This strategy aims to optimize the performance of integrated interferometric systems across various application scenarios.

Key words imaging system; interferometric imaging; interferometric baseline; computer simulation