

## 光子集成干涉成像系统的信号能量与噪声分析

张自然, 吕国冕, 冯华君, 徐之海, 李奇, 周浩, 陈跃庭\*

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 光子集成干涉成像是一种基于光子集成芯片获取目标傅里叶频谱信息的新兴成像技术。目前, 能量损耗与噪声干扰是制约该技术发展的关键因素。为分析它们对光子集成干涉成像系统的影响, 研究了基线长度与干涉信号能量的关系和噪声对成像质量的影响。研究结果表明输出信号的能量处于纳瓦量级。干涉信号的振幅与对比度会随着基线长度的增加而迅速减小。长基线下的干涉信号振幅极小, 在探测器精度不够的情况下, 干涉信号的对比度将无法获取。综合来看, 光子集成干涉成像系统适合采集目标的低频信息, 并且当将噪声控制在干涉信号强度的  $10^{-3}$ 、相位误差控制在  $1/40\lambda$  时才不会对成像结果产生较大的影响。

**关键词** 成像系统; 干涉成像; 光子集成; 信号能量; 对比度噪声; 相位误差

中图分类号 O438

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1311001

## Analysis of Signal Energy and Noise in Photonic Integrated Interferometric Imaging System

Zhang Ziran, Lü Guomian, Feng Huajun, Xu Zhihai, Li Qi, Zhou Hao, Chen Yueting\*

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

**Abstract** Photonic integrated interferometric imaging is an emerging imaging technology. It uses photonic integrated circuits to obtain the Fourier spectrum of the target. At present, energy loss and noise interference are the key factors restricting the development of this technology. To analyze their impact on photonic integrated interferometric imaging systems, this paper studies the relationship between the baseline length and the interference signal energy and the effect of noise on imaging quality. The results show that the energy of the output signal is at the nanowatt level. The amplitude and visibility of the interference signal decay sharply as the baseline length increases. The amplitude of the interference signal under the long baseline is extremely small. In the case of insufficient detector accuracy, the visibility of the interference signal cannot be obtained. Overall, the photonic integrated interferometric imaging systems are suitable for collecting low-frequency signals of the target. In addition, the noise controlled at  $10^{-3}$  of the interference signal strength and the phase error controlled at  $1/40\lambda$  will not greatly affect the imaging result.

**Key words** imaging systems; interferometric imaging; photonic integration; signal energy; visibility noise; phase error

## 1 引言

受衍射极限的限制, 对远距离目标的高分辨率成像一直是一个具有挑战性的课题<sup>[1-2]</sup>。传统光学系统通过增大口径来提高分辨率, 这类系统存在资源消耗巨大、镜片加工困难、需要极其精密的机械装调等缺点。2015年, Duncan团队<sup>[3]</sup>提出一种新型望远成像技术, 并将其命名为 SPIDER (Segmented Planar Imaging Detector for Electro-Optical Reconnaissance)。相比于

传统系统, 这项技术借鉴了天文学中的相干测量技术<sup>[4]</sup>, 使用微透镜阵列和光子集成芯片替代了望远镜干涉阵列。SPIDER在尺寸、重量、功耗上都大幅降低, 在天文观测和遥感成像等领域具有一定的应用潜力。

在 2017—2018 年, Duncan 团队<sup>[5-6]</sup>在 SPIDER 成像演示实验上取得了成功。但由于采样率和信噪比低等因素, 实际的成像结果并不理想。此后, 许多研究者在成像原理<sup>[7-8]</sup>、系统结构和图像重建算法上展开了研

收稿日期: 2021-12-09; 修回日期: 2022-01-03; 录用日期: 2022-01-13

基金项目: 装备预研航天科技联合基金(6141B06240204)

通信作者: \*chenyt@zju.edu.cn

究。棋盘式结构<sup>[9]</sup>、分层多级结构<sup>[10]</sup>、六边形结构<sup>[11]</sup>、非均匀分层多级结构<sup>[12]</sup>相继被提出。基于压缩感知<sup>[13]</sup>、嫡先验<sup>[14]</sup>、修正嫡<sup>[15]</sup>的图像重构方法也在一定程度上提高了重建图像的质量。除了系统结构布局和图像重建算法外,系统的信号能量衰减/损耗和噪声干扰也是制约成像质量提高的关键因素,目前国内外却缺乏相关文献对其进行分析。

本文主要研究光子集成干涉成像系统的信号能量水平及噪声对成像质量的影响。根据系统的能量传输和能量损耗,计算了光子集成芯片输出的信号能量。基于光源产生、传播、收集和干涉过程,模拟了不同基线长度下干涉信号的能量曲线。分析了系统的噪声来源,并根据范西泰特-策尼克定理模拟了系统在不同噪声等级下的成像结果。通过分析系统的信号能量、噪声水平和成像结果,给出了系统对探测精度和噪声水平的参数要求。该研究结果对开展光子集成干涉成像实验和改进图像重建算法的研究有很大的参考价值。

## 2 光子集成干涉成像原理

光子集成干涉成像是一种基于范西泰特-策尼克定理的成像技术,范西泰特-策尼克定理<sup>[16]</sup>指出:当光源本身线度及观察区域线度都比两者距离小得多时,观察区域上光源的复相干系数 $\mu$ 等于其光源强度的归

一化傅里叶变换。光子集成干涉成像过程如图 1 所示,图 1 中  $P(u, v)$  为空间频率上一点的坐标。成像系统由微透镜阵列、光子集成芯片和光信号探测器构成。成对的透镜[Q1、Q2,其位置坐标分别为  $Q_1(x_1, y_1)$  和  $Q_2(x_2, y_2)$ ]将收集到的远场光线耦合到光子集成芯片中进行干涉,其干涉叠加的结果<sup>[17]</sup>可以写为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} A \cos(2\pi \bar{\nu} t + \alpha), \quad (1)$$

式中: $I_1, I_2$ 为两路干涉光源强度; $t$ 为时间; $\bar{\nu}$ 为平均频率; $\alpha$ 为干涉信号的相位。

在两路干涉光源强度均等( $I_1 = I_2$ )的近似条件下,干涉信号  $I$  的对比度值  $V$  与复相干系数的幅值  $A$  相等<sup>[17]</sup>。因此,测量出干涉信号的对比度  $V$  和相位  $\alpha$ , 便可以得到复相干系数( $\mu = Ve^{i\alpha}$ )。通过改变 Q1、Q2 透镜之间的距离(基线长度)和方向,测量多个复相干系数,并且将其映射到二维笛卡尔坐标系( $u, v$ )的网格中,便得到了  $u$ - $v$  频谱<sup>[7]</sup>。根据范西泰特-策尼克定理,对  $u$ - $v$  频谱进行傅里叶逆变换,求解出归一化的光源强度为

$$\bar{I}(\eta, \xi) = \mathcal{F}^{-1}(\mu), \quad (2)$$

式中:( $\eta, \xi$ )为空间位置坐标; $\mathcal{F}^{-1}(\cdot)$ 代表傅里叶逆变换。最后,对归一化的光源强度为  $\bar{I}(\eta, \xi)$  的图像进行对比度拉伸,便能得到  $I(\eta, \xi)$ 。

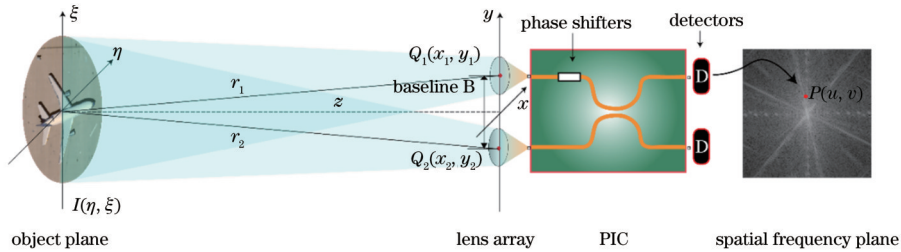


图 1 光子集成干涉成像原理

Fig. 1 Principle of photonic integrated interferometric imaging

## 3 光子集成干涉成像系统的信号能量

### 3.1 系统的能量传输过程

光子集成干涉成像系统采用微透镜收集远距离目标发出的光线,系统接收到的光能量非常微弱,研究光子集成干涉成像系统的信号能量对开展成像实验具有重要意义。系统的能量传输过程如图 2 所示。在微透镜阵列前设计一个圆筒形的光阑<sup>[6]</sup>,用于防止杂散光的影响。在系统内部,微透镜将光线收集并耦合到芯片的过程中存在能量损耗。同时,阵列波导光栅的分光、光信号在芯片上的传输和处理等过程中也会产生损耗。波导输出由片上集成的光电探测器和读出电路共同完成。根据能量守恒原理,探测器接收到的光功率可以表示为

$$W_\lambda = E(\lambda) S_{\text{len}} \tau \alpha \beta, \quad (3)$$

式中: $W_\lambda$ 为探测器接收到的光功率; $E(\lambda)$ 为中心波长  $\lambda$  处 10 nm 带宽范围内光学镜头前的辐照度(单位:

$\text{W}/\text{m}^2$ ); $S_{\text{len}}$ 为微透镜面积(单位: $\text{m}^2$ ); $\tau$ 为微透镜的透过率; $\alpha$ 为耦合损耗; $\beta$ 为光子集成芯片上的损耗。由于系统的成像距离适合于遥感成像,难以开展有效的实验去测量实际的  $E(\lambda)$  数据,只能通过估算的方式来得到  $E(\lambda)$  的值。到达地球大气层外的太阳辐照度为  $1367 \text{ W}/\text{m}^2$  (太阳常数),自然景物的平均反射率为 18%,假设太阳光能量均匀地分布在 250~2500 nm 的带宽范围内,大气透过率为 0.3~0.8,则遥感光子集成干涉成像系统中微透镜阵列前的  $E(\lambda)$  值约为  $0.1 \sim 0.7 \text{ W}/\text{m}^2$ ;微透镜的直径和透过率分别为 2 mm 和 0.9,耦合损耗为 6 dB,芯片上的损耗为 15 dB<sup>[6]</sup>。根据式(3),探测器接收到的光功率约为 2~15 nW。由上述分析可知,光子集成干涉成像系统在成像时对探测器的探测精度要求在纳瓦量级。但处理探测信号并提取高频信息的过程会对探测精度提出更高的要求。通过以下模拟实验对这一问题进行详细的说明。

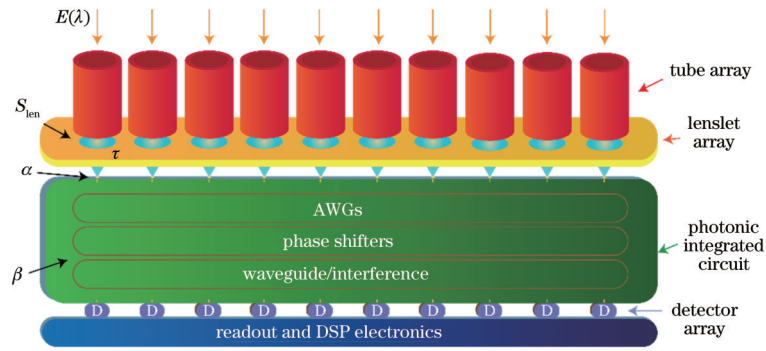


图 2 光子集成干涉成像系统的能量传输示意图

Fig. 2 Diagram of energy transmission of photonic integrated interferometric imaging system

### 3.2 基线长度与干涉信号能量的关系

模拟的成像目标的物面大小为  $256 \text{ m} \times 256 \text{ m}$ , 成像距离为  $160 \text{ km}$ 。从光源的产生、传播、收集、干涉来模拟探测器接收到的干涉信号  $I$ 。模拟过程中, 物面被划分成  $256 \times 256$  的网格, 每个网格都产生一个具有随机初始相位的波函数, 微透镜收集物面各点发出的光波, 并在光子集成芯片中将其干涉叠加。基线长度被设置在  $0 \sim 2.5 \text{ cm}$  的范围内, 目的是探究基线长度对输出信号的影响。给移相器加入了  $0 \sim 2\pi$  的相位调制, 以展示一个完整周期下的信号能量变化曲线。图 3(a) 是光子集成干涉成像系统在不同基线长度下输出的信号能量曲线。图中  $\Delta I_1$  为基线长度  $B=0 \text{ cm}$  时的信号振幅,  $\Delta I_2$  为基线长度  $B=0.5 \text{ cm}$  时的信号振幅。仿真结果表明, 干涉叠加结果是余弦函数, 但信号的振幅和初始相位会发生变化。通过对比发现基线长度  $B=0 \text{ cm}$  的信号振幅远大于其他基线长度的信号振幅。在排除基线长度  $B=0 \text{ cm}$  的情况后, 基线长度  $B=$

$0.5 \text{ cm}$  的信号振幅最大, 但仅为基线长度  $B=0 \text{ cm}$  的信号振幅的  $1/20$ 。将基线长度变化的步长设置得更小, 并计算输出信号曲线的对比度值, 得到的结果如图 3(b) 所示。在图 3(b) 中, 基线长度  $B=0 \text{ cm}$  的干涉信号是光源信号自相干产生的, 它对应于归一化的傅里叶变换频谱的中央零频率。当基线长度  $B=0 \text{ cm}$  时, 干涉信号的对比度为 1。随着基线长度的增加, 芯片内的光信号由相干变为部分相干, 芯片输出干涉信号曲线的振幅迅速衰减, 导致了干涉信号的对比度值迅速衰减。当基线长度  $B=1.5 \text{ cm}$  时, 干涉信号的振幅衰减为  $B=0 \text{ cm}$  的  $1/100$  以下, 对应的对比度值也衰减为  $1/100$  以下。长基线采集目标的高频信息, 当基线长度更长时, 干涉信号的波动幅度会更小, 对比度会更低。由于信号能量本身十分微弱, 随着基线长度的增加, 探测器想要探测出该信号的振幅就需要更高的精度。在极高的探测精度要求下, 不得不考虑噪声带来的影响。

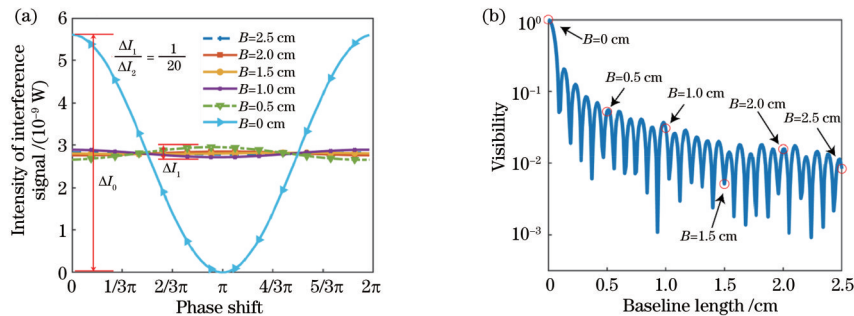


图 3 基线长度对干涉信号的影响。(a) 干涉信号的能量曲线; (b) 干涉信号的对比度与基线长度的关系

Fig. 3 Influence of baseline length on interference signal. (a) Energy curves of interference signals; (b) visibility of interference signals under different baseline lengths

## 4 光子集成干涉成像系统的噪声分析

### 4.1 系统的噪声来源

光子集成干涉成像系统通过采集目标的傅里叶域信息进行成像。一对透镜组成一条基线, 一条基线在一个波段下只能对傅里叶变换频谱图上的一个点进行采样, 因此整个系统的成像结果具有稀疏性。此外, 由于探测器是在频域上采集信号, 引入的噪声和误差最

终也会体现在图像的频域上, 具体表现为对比度噪声和相位噪声。对比度噪声来源于干涉光的强度差异和光探测器的噪声。对于遥远目标, 到达两个微透镜前的光可近似相等。但在两个微透镜将光耦合到波导的过程中, 耦合效率不一致和芯片内部两路光程差异带来的损耗不同, 导致两路干涉光源强度不等。这种差异进而会影响干涉信号的对比度, 形成对比度噪声。干涉信号的对比度还可以写为  $V = a/I'$ ,  $a$  为干涉信号

的振幅,  $I'$  为干涉光的平均强度。由于探测器需要分辨出干涉信号的振幅才能计算对比度, 因此探测器噪声也会对干涉信号的对比度产生直接影响, 具体有热噪声、散粒噪声、 $1/f$  噪声等<sup>[18]</sup>。相位噪声由成像器件制作工艺、大气扰动等因素引入的光程差造成。由于大气扰动带来的相位失真不是由成像系统造成的, 因此在后续的仿真中不作考虑。

#### 4.2 噪声对成像结果的影响

为模拟不同噪声等级对系统成像质量的影响, 参考 Duncan 团队<sup>[6]</sup>提出的光子集成干涉成像器件参数进行模拟成像实验。选择 Duncan 团队提出的系统参数是因为该参数已经被实验结果所验证, 并且在目前的工艺水平下可以制造相应的器件。每个 PIC (photonic integrated circuit) 内包含 12 个不同的干涉基线长度, 最长基线长度为 20.88 mm, 最短基线长度为 0.72 mm, 微透镜直径为 0.72 mm。37 个 PIC 呈放射状均匀地排列在不同的角度上。成像波段为 1065~1550 nm, 在芯片内被阵列波导光栅分成了 18 个光谱通道。设置的成像距离为 160 km, 图 4 是根据上述参数仿真得到的傅里叶频谱采样结果。不同波长的采样点可以通过颜色进行区分。

成像的目标如图 5(a) 所示, 它的分辨率为  $256 \times 256$ 。根据范西泰特-策尼克定理, 复相干系数的幅值如图 5(b) 所示。为了展示出更好的视觉效果, 图 5(b) 对原始数据取以 10 为底的对数进行展示。将图 5(b) 中虚线的值取出, 以中央零频率为起点, 像素数为横坐标, 绘制出二维曲线[图 5(c)]。图 5(b) 最中间的像素

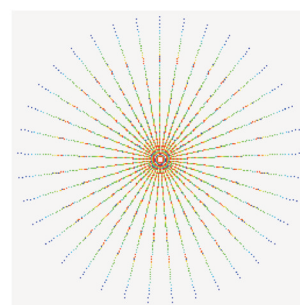


图 4 傅里叶频谱采样分布

Fig. 4 Fourier spectrum sampling distribution

代表的空间频率为零, 与中央零频率像素点间隔的像素数越多, 对应于干涉信号的空间频率越大, 基线长度越长。图 5(c) 上绘制了 3 个不同的噪声等级, 分别对应  $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$  三种情况。定义噪声等级与对比度是同一个概念, 其描述的是噪声对干涉信号的波动幅度的影响。在后续的仿真过程中, 对比度噪声被建模为均值为 0 的高斯分布<sup>[17]</sup>, 噪声等级 ( $10^{-2}$ 、 $10^{-3}$ 、 $10^{-4}$ ) 则表示为高斯噪声的标准差。根据图 5(c): 当噪声等级为  $10^{-2}$  时, 除中央零频率附近的少量信号外, 噪声几乎对所有其他信号都会产生较大的影响; 当噪声等级为  $10^{-3}$  时, 距中央零频率点 30 pixel 以外的信号都会受到噪声较大的影响; 当噪声等级为  $10^{-4}$  时, 噪声对信号的影响较小。上述分析也说明了一对干涉透镜之间的基线长度不能无限地增加, 噪声水平确定了高频信号探测的阈值上限, 超过该阈值的高频信号都会受到较大噪声的影响。

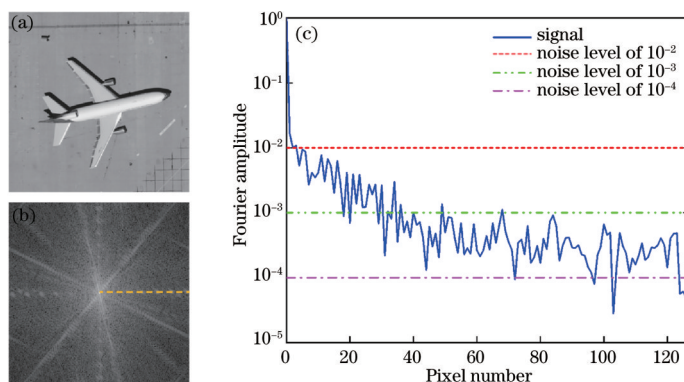


图 5 基于范西泰特-策尼克定理模拟的干涉信号的对比度值。(a) 成像目标; (b) 成像目标复相干系数的幅值; (c) 不同空间频率下干涉信号的对比度, 对应于图 5(b) 中的虚线

Fig. 5 Visibility of interference signals simulated by van Cittert-Zernike theorem. (a) Imaging target; (b) amplitude of complex coherence coefficient of imaging target; (c) visibility of interference signal at different spatial frequencies, corresponding to dashed line in Fig. 5(b)

在不同等级的对比度噪声和相位噪声下, 对干涉成像结果进行模拟。在模拟成像过程中, 对比度噪声由干涉光源强度不均等、探测器噪声等因素造成, 将其建模为高斯噪声<sup>[19]</sup>。在不考虑大气湍流等系统外因素时, 相位噪声具体表现为器件的制造精度误差, 用一定范围内随机产生的光程差<sup>[19]</sup>进行模拟。由于系统的最长基线为 2.088 cm, 最小波长为 1065 nm, 采样到的对

比度值为  $10^{-3}$  量级(图 3), 对应于距中央零频率 30 pixel 的位置(图 5), 因此图 4 的傅里叶频谱采样分布被映射到  $60 \text{ pixel} \times 60 \text{ pixel}$  以内, 通过补 0 来得到一个  $256 \text{ pixel} \times 256 \text{ pixel}$  的傅里叶频谱图。仿真结果如图 6 所示, 图 6(a) 是不带对比度噪声和相位噪声的成像结果, 相比于图 5(a), 图像细节信息丢失, 并出现了旁瓣和振铃现象。以图 6(a) 为基准: 按从左往右的顺序, 每隔

一张图对比度噪声增加 10 倍,按从下往上的顺序,每隔一张图光程误差增加 10 倍。为了使研究结论更具有普适性,对 UC Merced Land-Use 数据集中 21 个类别的 2100 张图像进行成像仿真。用峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 对不同噪声水平的成像结果进行量化评价,对评价结果取平均值,将所得结果标注在图 6 的每幅子图中。评价结果表明,对比度噪声控制在  $10^{-3}$  以内、光程误差控制在 30 nm 以内时,

图像的成像质量基本不会受到影响。当对比度噪声增加到  $10^{-2}$ 、光程误差增加到  $0.3 \mu\text{m}$  时,平均 PSNR 会从 17.94 下降到 15.27,平均 SSIM 会从 0.51 下降到 0.36。成像质量大幅降低,但仍然可以看到被成像目标的轮廓信息。当对比度噪声增加到  $10^{-1}$  量级、光程 (OPD) 误差增加到  $3 \mu\text{m}$  时,图像信息完全丢失,无法得到有效的成像结果。

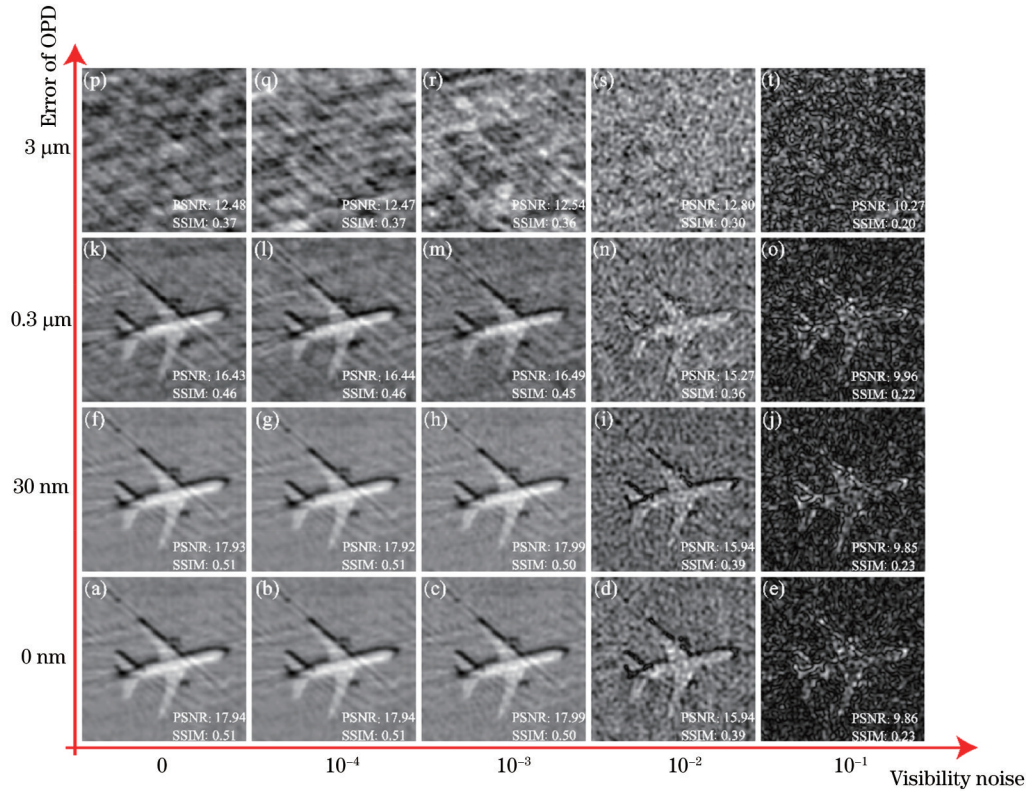


图 6 不同对比度噪声和相位误差下的光子集成干涉成像仿真结果

Fig. 6 Simulation results of photonic integrated interference imaging with different visibility noise and phase error

以上噪声分析得出的结论如下:

1) 光子集成干涉成像系统适用于采集成像目标的低频信息。长基线采集的高频信号的波动幅度小,极易受到噪声扰动的影响,因此很难从中提取出有用的对比度信息。

2) 当光子集成芯片输出的干涉信号功率为  $a$  (单位: nW)、对比度噪声控制在  $10^{-3}a$  (单位: nW) 以内时,成像质量不会受到较大的影响。对比度噪声达到  $10^{-2}a$  时也能成像,但图像质量会大幅降低。

3) 当光程误差控制在 30 nm (约  $1/40\lambda$ ) 以内时,成像质量不会受到较大的影响。光程误差达到 300 nm (约  $1/4\lambda$ ) 时,成像质量会大幅下降。

## 5 结 论

光子集成干涉成像系统的信号能量和噪声水平是决定系统能否成像的关键因素之一。从能量损耗的角度估算了光子集成芯片的输出信号能量,并基于波动

光学原理模拟了不同基线长度下的干涉信号能量曲线。基线长度会影响复相干系数的幅值。当基线长度为 0 cm 时,复相干系数为 1。随着基线长度的增加,复相干系数的幅值会迅速衰减。长基线下的干涉信号的波动幅度极小,在探测器精度不够的情况,干涉信号的对比度无法分辨。能量分析结果显示,在遥感成像的场景中,光子集成干涉成像系统的输出信号能量处于纳瓦量级。由于芯片上的信号能量十分微弱,噪声影响不可忽视。综合干涉信号曲线和噪声模拟实验结果,得出的结论为:若光子集成芯片的输出信号平均能量为  $a$ ,探测对比度为  $10^{-3}$  量级的低频信号需要的探测器精度为  $10^{-3}a$ 。同时探测器的噪声控制在  $10^{-3}a$ 、芯片光程误差控制在  $1/40\lambda$  以内时,成像质量不会受到较大的影响。先进图像重建算法的引入可能降低对探测器硬件参数的要求。在接下来的工作中,将考虑设计对噪声鲁棒性更好的算法来重建图像,以缓解光子集成干涉成像系统的信号能量和噪声问题。

## 参 考 文 献

- [1] 南仁东, 姜鹏. 500 m 口径球面射电望远镜(FAST)[J]. 机械工程学报, 2017, 53(17): 1-3.  
Nan R D, Jiang P. 500 m aperture spherical radio telescope (FAST)[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53 (17): 1-3.
- [2] Gardner J P, Mather J C, Clampin M, et al. The James Webb space telescope[J]. Space Science Reviews, 2006, 123(4): 485-606.
- [3] Thurman S T, Kendrick R L, Duncan A L, et al. System design for a SPIDER imager[C]//Frontiers in Optics 2015, October 18-22, 2015, San Jose, California. Washington, D.C.: OSA, 2015: FM3E.3.
- [4] 董磊, 阮宇翔, 王建立, 等. 基于计算干涉测量的远距离目标高精度角度测量技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(18): 1811016.  
Dong L, Ruan Y X, Wang J L, et al. Progress in high accurate angle measurement technology of long-distance target based on computational interferometry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(18): 1811016.
- [5] 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.
- [6] Su T H, Liu G Y, Badham K E, et al. Interferometric imaging using  $\text{Si}_3\text{N}_4$  photonic integrated circuits for a SPIDER imager[J]. Optics Express, 2018, 26(10): 12801-12812.
- [7] Lü 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(6): 664-675.
- [8] 马红柳, 黄康, 刘勇, 等. 光子集成干涉成像机理和空间频谱覆盖研究[J]. 光学学报, 2021, 41(4): 0411003.  
Ma H L, Huang K, Liu Y, et al. Research on photonic integrated interferometric imaging mechanism and space spectrum coverage[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(4): 0411003.
- [9] Yu Q H, Ge B, Li Y, et al. System design for a “checkerboard” imager[J]. Applied Optics, 2018, 57(35): 10218-10223.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Liu G, Wen D S, Song Z X. System design of an optical interferometer based on compressive sensing[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 478 (2): 2065-2073.
- [14] 陈天宝, 曾雪峰, 白莹莹, 等. 光子集成干涉成像图像重构: 熵先验[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.
- [15] Chen T B, Zeng X F, Zhang Z Y, et al. REM: a simplified revised entropy image reconstruction for photonics integrated interference imaging system[J]. Optics Communications, 2021, 501: 127341.
- [16] 古德曼. 统计光学[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2015: 167-173.  
Goodman J W. Statistical optics[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2015: 167-173.
- [17] 吕乃光. 傅里叶光学[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2006: 209-212.  
Lü N G. Fourier optics[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2006: 209-212.
- [18] Su T H. Photonic integrated circuits for compact high resolution imaging and high capacity communication utility[D]. Davis: University of California, 2017: 117-118.
- [19] Desantis Z. Image reconstruction for interferometric imaging of geosynchronous satellites[D]. Rochester: University of Rochester, 2017: 36-72.