

基于路径纠缠光子对的抗噪声量子成像

王搏尘 常伟军 李明 包燕升 李政勇 王惠林

Noise-robust quantum imaging based on path-entangled photon pairs

WANG Bochen, CHANG Weijun, LI Ming, BAO Yansheng, LI Zhengyong, WANG Huilin

引用本文:

王搏尘, 常伟军, 李明, 等. 基于路径纠缠光子对的抗噪声量子成像[J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1309–1314. DOI: 10.5768/JAO202546.0612013

WANG Bochen, CHANG Weijun, LI Ming, et al. Noise-robust quantum imaging based on path-entangled photon pairs[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1309–1314. DOI: 10.5768/JAO202546.0612013

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于周期极化晶体MgO:PPLN的纠缠光子对制备过程的研究

Study on preparation process of entangled photon pairs based on periodically polarized crystal MgO:PPLN

应用光学. 2023, 44(1): 182–187 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0105001>

胶质红外量子点薄膜入射角对荧光特性的影响分析

Effect of incidence angle on fluorescence properties of colloidal infrared quantum dots thin film

应用光学. 2020, 41(5): 1082–1088 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0506003>

电磁诱导吸收和透明的可控切换

Controllable switching between electromagnetically induced absorption and transparency

应用光学. 2024, 45(3): 583–589 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0310013>

光子计数集成成像的压缩与重构

Compression and reconstruction of photon counting integral imaging

应用光学. 2023, 44(2): 295–306 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0202001>

基于双光子吸收的宽谱光源关联特性测量方法

Measurement method of correlated properties of broad spectral sources based on two-photon absorption

应用光学. 2024, 45(6): 1158–1163 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0601007>

光子集成干涉成像系统微透镜排布设计与图像复原

Arrangement of microlens and image restoration technology of photon integrated interferometric imaging system

应用光学. 2022, 43(2): 213–220 <https://doi.org/10.5768/JAO202243.0201005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2025) 06-1309-06

引用格式: 王搏尘, 常伟军, 李明, 等. 基于路径纠缠光子对的抗噪声量子成像 [J]. 应用光学, 2025, 46(6): 1309-1314.

WANG Bochen, CHANG Weijun, LI Ming, et al. Noise-robust quantum imaging based on path-entangled photon pairs[J]. Journal of Applied Optics, 2025, 46(6): 1309-1314.



在线阅读

基于路径纠缠光子对的抗噪声量子成像

王搏尘¹, 常伟军¹, 李明², 包燕升³, 李政勇³, 王惠林¹

(1. 西安应用光学研究所, 陕西 西安 710065; 2. 陆军装备部驻西安地区军事代表局, 陕西 西安 710000;

3. 北京交通大学 物理科学与工程学院, 北京 100044)

摘要: 无交互量子成像是一种基于 Zou-Wang-Mandel 量子干涉效应的新型量子成像技术。本文利用路径纠缠的波长非简并光子对, 实现了探针光子与成像光子的解耦, 显著提升了主动照明成像系统对背景噪声光子的抑制能力。实验结果表明: 该系统可在远强于探针光子强度的同波长背景噪声环境中工作, 成像帧率超过 30 帧/s, 且无需引入符合计数或“点云重建”等后处理技术。该技术有望将实验室中的量子成像推向实际应用, 为对背景噪声光子抑制要求严苛的场景提供关键支撑。

关键词: 量子光学; 量子干涉; 量子成像; 纠缠光子对

中图分类号: TN206; O431

文献标志码: A

DOI: [10.5768/JAO202546.0612013](https://doi.org/10.5768/JAO202546.0612013)

Noise-robust quantum imaging based on path-entangled photon pairs

WANG Bochen¹, CHANG Weijun¹, LI Ming², BAO Yansheng³, LI Zhengyong³, WANG Huilin¹

(1. Xi'an Institute of Applied Optics, Xi'an 710065, China; 2. Military Representative Bureau of the Army Equipment

Department in Xi'an Area, Xi'an 710000, China; 3. School of Physical Science and

Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Interaction-free quantum imaging is a novel quantum imaging technique based on the Zou-Wang-Mandel quantum interference effect. This work utilized the path-entangled wavelength-nondegenerate photon pairs to achieve decoupling between probe photons and imaging photons, significantly enhancing the background noise photon suppression capability of active illumination imaging systems. Experimental results demonstrate that the system can operate in environments with same-wavelength background noise far stronger than the probe photon intensity while maintaining an imaging frame rate exceeding 30 frame/s, without requiring post-processing techniques such as coincidence counting or reconstruction. This technology promises to advance laboratory-based quantum imaging into practical applications, providing pivotal supports for the scenarios demanding stringent suppression of background noise photons.

Key words: quantum optics; quantum interference; quantum imaging; entangled photon pairs

引言

量子成像是基于量子光学特性实现成像的一类技术集合, 其目标在于利用量子光学手段突

破现有传统成像方案的限制。通过利用一些反直觉的量子光学现象, 量子成像可实现经典方法难以企及的成像特性, 例如: 利用关联光子对空间相

收稿日期: 2025-08-15; 修回日期: 2025-11-02

基金项目: 国家自然科学基金 (62075010)

第一作者: 王搏尘, E-mail: 380728126@qq.com

通信作者: 王惠林, E-mail: whl205316@163.com

关性的量子“鬼”成像^[1]、基于双模压缩光束的亚散粒噪声成像^[2]、基于双光子干涉效应的 Hong-Ou-Mandel 干涉成像等^[3]。这些量子成像方案通过利用非经典的量子光学效应,革新了传统光学视角下人们对于光与物质相互作用的认知。然而,量子成像技术从实验室迈向实际应用仍面临诸多挑战,例如基于光子计数的一类量子成像方案中,传感器探测到光子强度通常为单光子级别,并且需要通过符合计数、点云重建等技术对测得的光子计数数据进行后处理,从而恢复出目标的图像数据^[4]。这不仅要求使用昂贵的高灵敏度探测器,而且其极低的光通量也会导致成像结果极易受环境背景光子干扰。因此,系统往往需在暗室或弱光环境下运行,且难以满足视频级实时成像的需求。这些因素共同限制了量子成像技术在动态目标或强背景光场景下的实际应用。

2014年,诺贝尔物理学奖得主 Zeilinger 团队提出了基于量子诱导相干(quantum induced coherence, QIC)效应的新型量子成像技术,被称为未探测光子量子成像(quantum imaging with undetected photons, QIUP)或无交互量子成像^[5]。该量子成像系统通过利用两对处于路径纠缠态的自发参量下转换(spontaneous parametric down-conversion, SPDC)光子对(在非线性光学中,每对光子通常包含一个“信号光子”和一个“闲频光子”),当两对光子中的闲频光子空间模式处于路径叠加态时,与其空间分离的两个信号光子将产生一阶干涉现象。值得注意的是,尽管被探测器接收的信号光子没有与待测目标产生直接的相互作用,但在闲频光束照射目标时却会对信号光子的干涉可见度产生影响^[6-8]。由于光子对中闲频光子与信号光子的能量可以高度非简并,该技术可利用可见光波段的探测器、相机捕捉红外波段乃至太赫兹波段的目标图像与信息^[9-12]。至关重要,该量子成像系统展现出卓越的背景噪声抑制能力,即使在背景噪声强度远超照明光束的条件下,仍能保持良好的成像可见度。这种固有的强噪声抑制能力、高度灵活的工作波段选择以及免图像重建的特性,使 QIUP 技术有望成为推动量子成像迈向实际应用的关键突破口。

本文基于 QIUP 量子成像技术,提出了一种抗噪声量子成像系统。通过实验验证了当系统中引入与闲频光子波长相同的背景噪声时,信号光子的成像可见度基本不受到影响。基于该特性,文

章进一步实现了在强烈的背景噪声中进行视频帧率的量子成像的实验验证。以上结果表明,现阶段的 QIUP 量子成像技术为处于宽谱强烈噪声环境下,例如强激光与目标相互作用时的实时红外检测与成像提供了一种新的可行方案。未来,基于抗噪声 QIUP 的新型量子激光雷达具有颠覆现有遥感体制的潜力^[13]。

1 理论基础

关于 QIUP 量子成像的理论框架在先前的一些研究中已经得到了充分的计算与分析^[14],因此本文对其工作原理仅进行简要概述。图1为 QIUP 成像的原理示意图,泵浦激光器通过泵浦两块相同的二阶非线性晶体产生两个相同的 I 类相位匹配 SPDC 过程,从而产生两对波长非简并的光子对。其中,空间模式为 s_1 、 s_2 的信号光子波长处于可见光波段,且二者在分束器 BS2 处合束,而来自晶体 NL₁ 与 NL₂ 的红外波段的闲频光子具有相同的空间模式 i 。假设两个 SPDC 过程完全相同,且相位差为 φ ,此时干涉仪输出端两个 SPDC 过程产生的光子对处于最大路径纠缠态: $|\psi\rangle = (|1_{s_1}, 1_{i1}\rangle + e^{-i\varphi}|1_{s_2}, 1_{i2}\rangle)/\sqrt{2}$ 。若插入透射率为 T 的分束器 BS1,则 BS2 后探测器处的量子态可以写为

$$|\psi\rangle = \frac{1}{2} \left[\left(T + ie^{-i\varphi} \right) |1\rangle_i + i\sqrt{1-|T|^2} |1\rangle_0 \right] |1\rangle_{s_1} + \frac{1}{2} \left[\left(e^{-i\varphi} + iT \right) |1\rangle_i + i\sqrt{1-|T|^2} |1\rangle_0 \right] |1\rangle_{s_2} \quad (1)$$

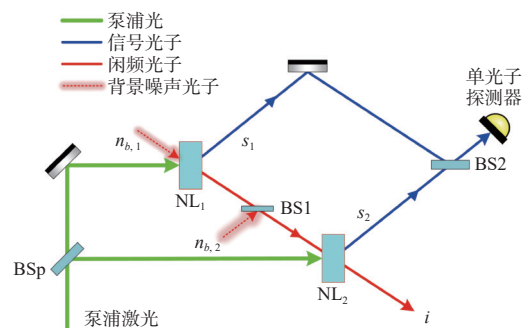


图1 QIUP 实验装置简图

Fig. 1 Schematic of QIUP device.

通过分析式(1)中探测器处的量子态,可知在 QIUP 系统中,信号光子的强度由装置中所有相互作用的光场的相对相位决定,而干涉的可见度主要取决于 SPDC 光子对的相关性、位于闲频光子

路径中分束器 BS1 的透射率, 单光子探测器处的信号光子计数速率满足:

$$R_s \propto \frac{1 \pm |T| \cos(\varphi + \gamma)}{2} \quad (2)$$

式中: φ 为两个 SPDC 过程的相位差; γ 为分束器 BS1 引入的额外相位; T 为分束器 BS1 对闲频光子的透射率。从式(2)可以看出, 虽然信号光子与闲频光子为独立的两个光束, 但闲频光子的透射率 T 却决定了信号光子在探测器处的强度。

当在该装置中引入与闲频光子波长相同的背景噪声光子时, 如图 1 中红色虚线箭头所示, 信号光子的干涉可见度 V 可以写为^[15]

$$V = \frac{2(n_{b,1} + 1) \cdot T \cdot \cosh^2 \xi}{(1 + T^2)(n_{b,1} + 1) \cosh^2 \xi + (n_{b,2} + 1)(1 - T^2)} \quad (3)$$

式中: $n_{b,1}$ 、 $n_{b,2}$ 为经过非线性晶体 NL_1 与 NL_2 的背景噪声光子的平均光子数; ξ 为 SPDC 过程在低增益区域的增益系数。根据式(3)可以得出, 当噪声光子的平均光子数 $n_{b,1} = n_{b,2}$ 时, 量子干涉可见度与噪声平均光子数无关, 即使噪声强度远大于闲频光子, 系统的干涉可见度也不会受到影响。

2 实验系统

上文给出了 QIUP 量子成像的简要理论框架, 下面对本文所提出的量子成像装置的结构进行描述与分析。实验装置的结构示意图如图 2 所示, 其基本结构为一个使用单个二阶非线性晶体的 Zou-

Wang-Mandel 量子干涉装置, Nd: YVO₄ 窄线宽连续激光器 (Verdi, Coherent) 发出的 532 nm 的平均功率约为 100 mW 的激光作为泵浦光束, 其偏振态由半波片调节使其满足 SPDC 过程相位匹配的要求。泵浦激光通过泵浦 I 类 BBO 晶体 (β -BBO, $5 \times 5 \times 3 \text{ mm}^3$, $\theta = 22.1^\circ$, CASTECH) 产生共线出射的 810 nm (信号) 与 1550 nm (闲频) 的关联光子对。泵浦光与 810 nm 的信号光子被二向色镜 DM2 反射, 然后与泵浦激光一同被反射镜 M1 反射, 它们的相位可以通过线性平移台控制; 1550 nm 的闲频光子作为探针光子透射经过二向色镜 DM2 后通过成像目标后被 M2 反射, 反射后的泵浦光与 SPDC 光子对再次通过 BBO 晶体产生第 2 个相同的 SPDC 过程, 两次 SPDC 过程产生的 810 nm 的信号光子被二向色镜 DM1 反射后, 经过带通滤光片后被可见光 sCMOS 相机探测, 相机在 810 nm 处量子效率约为 84%, 对波长为 1550 nm 的闲频光子基本没有响应。成像目标由 L1 ($f=175 \text{ mm}$) 与相机镜头 L_c ($f=100 \text{ mm}$) 构成的 4- f 系统在相机处进行成像。若相机被替换为一个单光子计数模块, 则该位置信号光子的光子计数率可以写为

$$I_s \propto 1 + |\mu| |R| \cos(\varphi_p - \varphi_s - \varphi_i) \quad (4)$$

式中: φ_p 、 φ_s 、 φ_i 分别为泵浦、信号、闲频光子的相位; μ 为 SPDC 光子对的一阶相关函数; R 为目标对于闲频光子的反射系数。

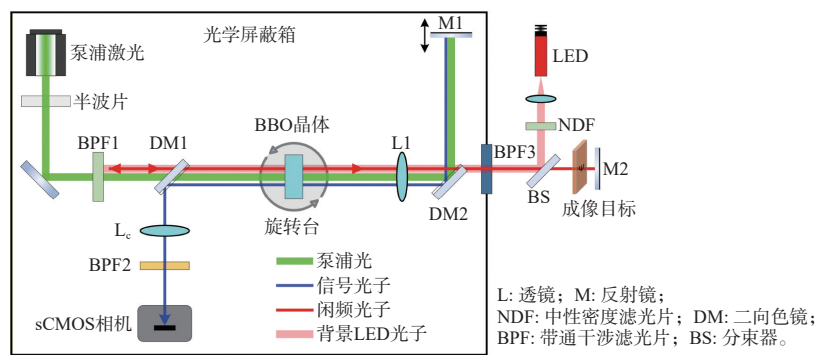


图 2 抗噪声量子成像实验装置简图

Fig. 2 Schematic of noise-robust quantum imaging device.

为了实现量子成像系统对于背景抗噪声的抵抗, 实验装置中引入了两个高品质带通干涉滤光片 (BPF1 与 BPF3) 与一个光学屏蔽外壳。滤光片 BPF1 除了滤除激光器发出的谐波外, 还可以反射 1550 nm 的噪声光子, 以此平衡 BBO 晶体两端的噪声光子强度 (即 $n_{b,1} \approx n_{b,2}$)。BPF3 结合屏蔽外壳

可以阻止除了波长为 1550 nm 光子以外的光子进入系统。最后, 为了验证系统的噪声抵抗能力, 在装置中通过分束器引入一个中心波长为 1550 nm 波段的准直 LED 光源 (LED1550L, Thorlabs) 作为背景噪声光子, 在其前方放置有不同衰减的中性密度滤光片 (neutral density filter, NDF), 由于 SPDC

过程效率仅为 $10^{-9} \sim 10^{-11}$ 量级, 故 LED 光源的光强远大于作为探针光子的 1550 nm 闲频光子。量子成像系统中 LED 光源、SPDC 光子的理论计算相对光谱强度, 以及相机的归一化量子效率如图 3 所示。

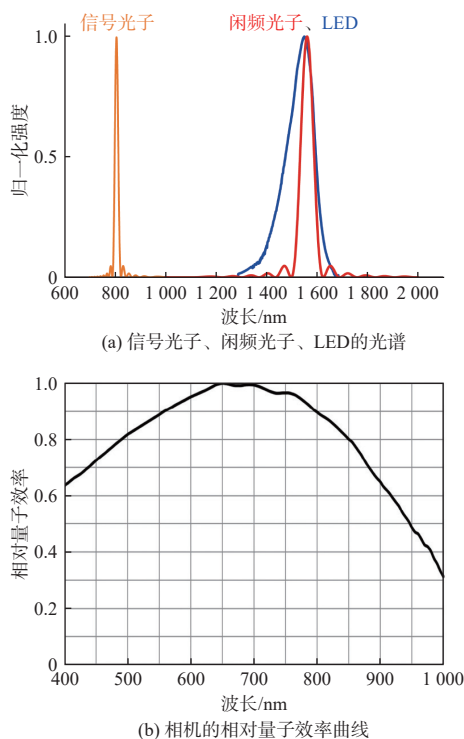


图3 信号光子、闲频光子、LED 的光谱及相机的相对量子效率曲线

Fig. 3 Spectrum of signal, idler photons and LED, and quantum efficiency of camera

3 实验结果

根据理论部分的推导, 在所搭建的系统中目标对闲频光子的反射率决定了信号光子干涉的可见度。将图 2 系统中成像目标与 sCMOS 相机分别替换为反射镜与单光子探测器, 并测量信号光子的光子计数率。测量结果如图 4(a) 所示, 与理论预测的一致: 当闲频光子被反射镜反射回系统时, 信号光子的光子计数随 M1 的位置呈周期性变化, 周期约为 780 nm; 当闲频光子被屏蔽时, 该周期性变化消失。信号光子的最大干涉可见度约为 0.61, 由于 SPDC 光子天然具有较宽的光谱, 所以其相干长度仅有约 260 μm , 如图 4(b) 所示。利用量子成像系统对刻蚀有磨砂图案的单晶硅片进行透射成像, 单晶硅在可见光与近红外波段截止, 在短波红外波段具有约 50% 的透射率。成像时未刻蚀图案

的表面正对晶体所在的方向, 由于硅片对 810 nm 的光子截止, 以此排除了反射成像的可能性。

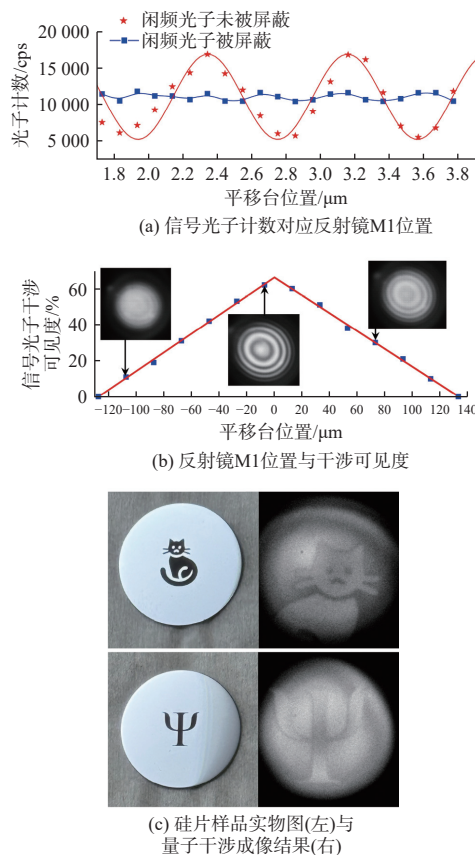
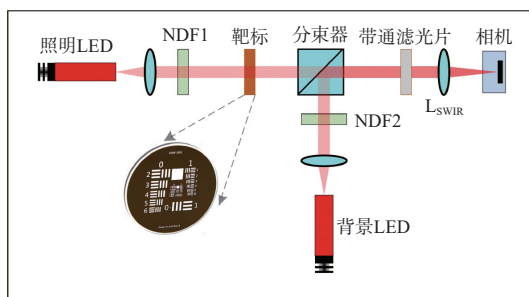


图4 测量结果

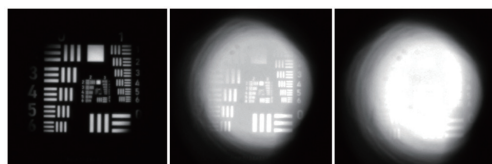
Fig. 4 Measurement results

而后通过与经典成像系统的成像结果进行比较, 以验证该量子成像方案对于背景噪声的抵抗能力。如图 5(a) 所示, 经典成像系统中 USAF1951 靶标作为成像目标被 1550 nm LED 光源照亮, 该光源在 1545 nm~1555 nm 波段范围内光功率约为 2 mW, 另有一个相同的 LED 光源作为背景噪声光通过 50:50 分束器引入系统, 最后经过 10 nm 带通干涉滤光片后通过定焦镜头 $L_{\text{SWIR}} (f=50 \text{ mm})$ 与短波红外相机 (SONY IMX990) 对靶标进行成像, 该相机在 1550 nm 波段的量子效率约为 76%, 与量子成像系统中 sCMOS 相机相近。照明 LED 光束通过透射率 $T_{\text{NDF1}} = 52\%$ 的中性密度滤光片, 而背景 LED 关闭与通过透射率为 $T_{\text{NDF2}} = 52\%$ 和 77% 的中性密度滤光片后的成像结果分别如图 5(b)~图 5(d) 所示, 结果表明目标的成像可见度随着背景 LED 透射光功率的增加逐渐降低, 直至不可见。

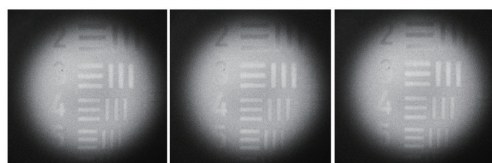
与之相比在图 2 的抗噪声量子成像系统中, 虽然 LED 光束与照明目标的闲频光子具有相似的光



(a) 经典成像装置图



(b) 背景LED关闭

(c) $T_{NDF2}=52\%$ (d) $T_{NDF2}=77\%$ 

(e) 背景LED关闭

(f) $T_{NDF}=52\%$ (g) $T_{NDF}=77\%$

图5 经典成像结果(a)~(d)与量子成像结果(e)~(g)

Fig. 5 Classic imaging results (a)~(d) and quantum imaging results (e)~(g)

谱特性,但是被相机接收用于成像的却为 810 nm 的信号光子。因此导致成像可见度降低的主要原因源于两个 SPDC 过程产生光子对的强度不均衡,即噪声光子作为种子光与泵浦光束相位匹配发生受激频率转换过程($\omega_{LED} + \omega_{泵浦} \rightarrow \omega_{信号} + \omega_{闲频}$),该过程产生了与信号光子波长相近的光子。但是该非线性过程对于光束相干性以及入射角要求非常严苛,并且在所设计的量子成像系统中引入了 BPF1 对背景光子与闲频光子进行二次反射,平衡了晶体两侧两个 SPDC 过程产生的光子对的强度,大幅降低了该效应的不利影响。利用单光子探测器测量 810 nm 信号光子的光子计数速率约为 12 kcps,系统探测效率约为 20%,根据能量守恒计算照明目标的闲频光束功率约为 10^{-11} mW,远小于背景 LED 光束的功率。通过使用不同透射率的中性密度滤光片,对图 2 中量子成像系统在不同背景 LED 透射率下的成像结果进行测量,如图 5(e)~图 5(g)。抗噪声量子成像、经典成像最大可见度与背景 LED 光透射率之间的关系如图 6 所示,随着背景 LED 光源的透射率增加,经典成像结果的可见度逐渐降低,而量子成像的可见度保持在 50% 左右不变。测量结果与理论预测结果相符,

即使在强度远超 SPDC 光子对的同波长 LED 背景光照下,量子成像可见度基本保持不变。在背景光照不强的情况下,量子成像可见度小于经典成像的原因主要是由于晶体后器件的插入损耗造成了两个 SPDC 过程的强度不一致与 SPDC 过程制备的光子对的相关性不完美导致。

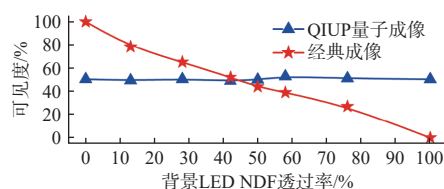


图6 最大成像可见度与背景 LED 光透射率之间的关系

Fig. 6 Maximum visibility versus background LED transmittance.

最后在背景 LED 光源打开且未被衰减的条件下,对该量子成像系统的成像实时性进行测量,USAF1951 分辨率靶标置于平移台上以 20 mm/s 的速度从右向左移动经过成像视场(样品被夹持在样品架上,应力造成反射闲频光子的相位略微不一致),相机的曝光时间分别设置为 80 ms、30 ms、10 ms。靶标移动到相同位置的成像结果如图 7 所示,当曝光时间为 30 ms、且打开背景 LED 照明时,该系统的最大成像可见度约为 51%。当曝光时间降低到约 10 ms 时,由于曝光时间内收集到的信号光子强度极低,导致成像可见度降低至约 13%。该实验结果表明,该量子成像系统具备以视频级别的成像实时性在强烈背景光照环境下工作的能力。

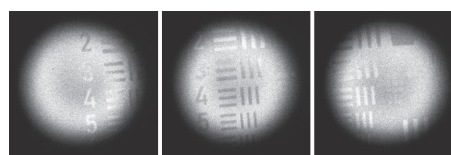
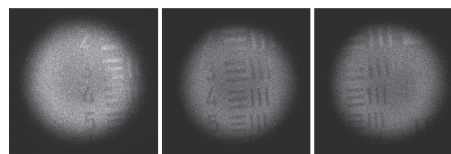
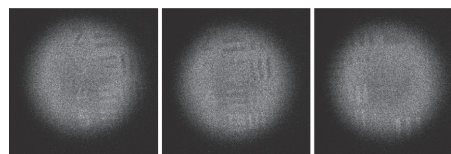
(a) $t=80$ ms(b) $t=30$ ms(c) $t=10$ ms

图7 曝光时间

Fig. 7 Acquisition time

4 结 论

本文基于路径纠缠光子对与量子诱导相干效应,设计了一种抗噪声量子成像方案。该方案中,与目标发生相互作用的是纠缠光子对中 1550 nm 的闲频光子,而被探测用于成像的则是 810 nm 信号光子。实验结果表明,该量子成像方案不仅能够通过工作在可见光、近红外波段的相机实现短波红外波段的干涉成像,还能在背景噪声强度远高于照明光束的环境中维持不低于 30 Hz 的成像帧率。基于上述特性,该方案为克服量子成像技术中成像实时性与噪声敏感性两大关键挑战提供了有效途径,并在生物医学、工业检测、国防军事等领域展现出广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] STREKALOV D V, SERGIENKO A V, KLYSHKO D N, et al. Observation of two-photon “ghost” interference and diffraction[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(18): 3600-3603.
- [2] BRIDA G, GENOVESE M, RUO B I. Experimental realization of sub-shot-noise quantum imaging[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(4): 227-230.
- [3] NDAGANO B, DEFLENNE H, BRANFORD D, et al. Quantum microscopy based on Hong–Ou–Mandel interference[J]. *Nature Photonics*, 2022, 16(5): 384-389.
- [4] MORRIS P A, ASPDEN R S, Bell J E C, et al. Imaging with a small number of photons[J]. *Nature Communications*, 2015, 6(1): 5913-5918.
- [5] LEMOS G B, BORISH V, COLE G D, et al. Quantum imaging with undetected photons[J]. *Nature*, 2014, 512(7515): 409-412.
- [6] WANG L J, ZOU X Y, MANDEL L. Induced coherence without induced emission[J]. *Physical Review A*, 1991, 44(7): 4614-4622.
- [7] ZOU X Y, WANG L J, MANDEL L. Induced coherence and indistinguishability in optical interference[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(3): 318-321.
- [8] HERZOG T, RARITY J, WEINFURTER H, et al. Frustrated two-photon creation via interference[J]. *Physical Review Letters*, 1994, 72(5): 629-632.
- [9] PATEROVA A V, MANIAM S M, YANG H, et al. Hyperspectral infrared microscopy with visible light[J]. *Science Advances*, 2020, 6(44): eabd0460.
- [10] KALASHNIKOV D A, PATEROVA A V, KULIK S P, et al. Infrared spectroscopy with visible light[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(2): 98-101.
- [11] KVIATKOVSKY I, CHRZANOWSKI H M, RAMELOW S. Mid-infrared microscopy via position correlations of undetected photons[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5916-5925.
- [12] KUTAS M, RIEKING F, KLIER J, et al. Terahertz quantum imaging[EB/OL]. [2025-08-10]. <https://arxiv.org/abs/2408.02531>.
- [13] DALVIT D A R, VOLKOFF T J, CHOI Y S, et al. Quantum frequency combs with path identity for quantum remote sensing[J]. *Physical Review X*, 2024, 14(4): 041058.
- [14] LAHIRI M, LAPKIEWICZ R, LEMOS G B, et al. Theory of quantum imaging with undetected photons[J]. *Physical Review A*, 2015, 92(1): 013832.
- [15] MA Y, GEMMELL N, PEARCE E, et al. Eliminating thermal infrared background noise by imaging with undetected photons[J]. *Physical Review A*, 2023, 108(3): 032613.