

光子计数计算鬼成像

李明飞^{1,2*}, 袁梓豪^{1,2}, 刘院省^{1,2}, 邓意成^{1,2}

¹北京航天控制仪器研究所, 北京 100039;

²中国航天科技集团有限公司量子工程研究中心, 北京 100094

摘要 为实现远距离、高灵敏的三维成像,开展了光子计数计算鬼成像研究。通过振幅型空间光调制器,实现了基于离散余弦变换矩阵和 Walsh 变换矩阵作为测量基的结构光照明,采用单光子探测技术实现了 700 m 距离、高灵敏的三维成像。对比研究了快速傅里叶变换算法和迭代优化算法的重建结果。研究表明,相同采样率时,离散余弦测量基作为观测矩阵时重建图像的误差比 Walsh 观测矩阵小,但 Walsh 观测矩阵重建图像的分辨率更高。计算鬼成像分辨率理论上不受接收镜头衍射极限限制,但实际受接收镜头集光效率、单光子探测器计数率、积分时间等影响,本文搭建的实验系统实现了成像分辨率达到接收镜头瑞利衍射极限分辨率 2 倍的成像结果。光子计数计算鬼成像无需转台或扫描镜等移动部件,具有弱光条件下凝视远距离目标并进行三维成像的能力。研究方法对基于光子计数的单像素成像技术和计算鬼成像技术研究具有一定参考价值。

关键词 成像系统; 光子计数; 计算鬼成像; 单像素成像; 单光子

中图分类号 O431.2

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011026

Photon Counting Computational Ghost Imaging

Li Mingfei^{1,2*}, Yuan Zihao^{1,2}, Liu Yuanxing^{1,2}, Deng Yicheng^{1,2}

¹Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100039, China;

²Quantum Engineering Research Center, China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100094, China

Abstract To realize long-distance, highly sensitivity three-dimensional imaging, photon counting computational ghost imaging has been researched in experiments. Structured light illumination is realized using an amplitude-type spatial light modulator based on a discrete cosine transform matrix or Walsh transform matrix as the measurement basis, and single-photon detection technology is used to achieve a 700 m distance, highly sensitivity three-dimensional imaging. Two algorithms, fast Fourier transform and iterative optimization, are researched and compared. The error in images reconstructed by the discrete cosine measurement basis is smaller than that in images reconstructed by the Walsh observation matrix under the same sampling rate, while the resolution of images reconstructed by the Walsh observation matrix is higher. Theoretically, the resolution of the computational ghost imaging system is not restricted by the diffraction limit of the receiving lens; however, resolution is still affected by the collection efficiency of the receiving lens, the counting rate of the single-photon detector, and exposure time, among others. We demonstrated that the imaging resolution of our experimental system improved on the Rayleigh diffraction limit resolution of the receiving lens by a factor of two. The photon counting computational ghost imaging scheme has the potential to visualize the imaging target in three dimensions under weak illumination, without the need of a rotating platform and scanning mirror. Our research method has reference value for research on single-pixel imaging technology based on photon counting and computational ghost imaging technology.

Key words imaging systems; photon counting; computational ghost imaging; single-pixel imaging; single photon

OCIS codes 110.1758; 270.5290

收稿日期: 2021-02-22; 修回日期: 2021-03-19; 录用日期: 2021-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(61805006)

* E-mail: mf_li@sina.cn

1 引言

鬼成像,亦称量子成像、符合成像或关联成像,1995年由Pittman等实验证实,因其非定域性的成像方式,被称为“鬼”成像^[1]。学者们最初认为纠缠光源是实现鬼成像的必要条件^[2-3],随研究深入发现热光场也可实现鬼成像^[4-8],这一发现使得鬼成像更具有实用价值。

计算鬼成像,是Shapiro在2008年提出的鬼成像改进方案^[9],在传统鬼成像基础上通过对空间光场进行操控,去掉了原有记录光场的阵列探测器,仅单个像素探测器即可实现目标的二维或三维成像。同年,Duarte等^[10]报道了基于压缩采样的单像素成像方案,该方案与计算鬼成像技术方案极相似,两个技术领域开始相互促进与融合。实际上,无论是计算鬼成像还是单像素成像技术,它们共性技术的原理是相同的,广义上均属于计算成像技术。目前鬼成像具有的独特优势有:抗大气湍流^[11-12]、散射成像,成像效果可优于传统相机;可实现压缩采样条件下的单像素成像,具有高灵敏度和低数据量特点,在极弱光成像和遥感成像领域有潜在应用价值;具有超衍射极限成像能力^[13-14],被实验证明的超分辨能力可达4倍衍射极限,在高分辨显微成像方面具有应用价值;具有多光谱成像能力,单次曝光即可实现数个光谱通道同时成像^[15]。尽管鬼成像技术具有诸多优势,但其相比经典成像,在成像速度、成像信噪比和所成图像大小等均不占优势,例如要获得一幅1M像素图像,需数十秒采样和重建时间!并且成像信噪比难以达到30dB以上。

针对上述问题,研究热点一方面集中在提升量子成像的信噪比和成像速度,另一方面则是探索鬼成像技术在极弱光成像、超分辨成像等具体应用场景中不可替代的技术优势。光子计数计算鬼成像作为鬼成像研究领域的重要方向之一,因在极弱光成像方面具有潜在应用前景而引起学者的研究兴趣。光子计数计算鬼成像通过计算光子信号与调制矩阵实现目标的成像,成像过程无需机械扫描设备且仅需单像素的单光子探测器,相比传统扫描方法有独特的优势。另外,单光子探测的灵敏度优势具有不可替代性,例如盖革模式下的雪崩光电管可达到单个光子灵敏度,即能量探测的极限在 10^{-19} J量级,这是线性探测器无法达到的。然而单光子探测在计算鬼成像应用中的动态范围小,需要多次测量并进行统计计数才能达到线性探测器动态范围的效

果。为挖掘光子计数计算鬼成像方案的潜力,学者们进行了大量研究工作。2011年,Howland等^[16]验证了单像素成像方案用于三维成像的可行性,完成了2.1m距离、像素为 $64\text{ pixel}\times 64\text{ pixel}$ 图像的成像实验,实验结果表明,可利用距离选通方式实现遮挡目标的成像。2012年,杜克铭等^[17]提出一种基于压缩传感的光子计数成像方案,并进行了原理验证。2013年,Howland等^[18]进一步实现了照明功率为0.5pW、距离为7m下,像素为 $256\text{ pixel}\times 256\text{ pixel}$ 目标的成像实验,成像采样时间为3s,在 $32\text{ pixel}\times 32\text{ pixel}$ 下可实现14Hz(帧率为14frame/s)的目标追踪。2015年,李明飞等^[19]进行了光子计数信号与热光场关联的成像实验,实现了1.8m距离 $752\text{ pixel}\times 480\text{ pixel}$ 合作目标关联成像,每秒平均光子计数约为 5.1×10^6 。2016年,薄遵望等^[20]进行了基于光子计数的关联成像实验,实验中将6路延时信号接入到单光子探测器中以提升探测信号动态范围,实现了2km距离合作目标的成像,并证明光子数涨落小于10时仍可实现关联成像。2016年,Sun等^[21]对高速光子计数计算鬼成像进行了研究,实现了近5m距离 $128\text{ pixel}\times 128\text{ pixel}$ 目标12Hz的3D成像。2017年,Liu等^[22]对光子计数计算鬼成像灵敏度极限进行了研究,实验证明成像灵敏度极限在单次测量时接近1photon/pixel,同等条件下灵敏度高于扫描成像2个量级。2018年,Liu等^[23]研究了快速光子计数计算鬼成像,实验证明0.1photon/pixel即可实现成像,灵敏度比传统成像高3个量级。2020年,Liu等^[24]实现了距离约为100km、成像灵敏度达到0.01photon/pixel、大小为 $192\text{ pixel}\times 108\text{ pixel}$ 的合作目标成像。

本文采用计算鬼成像技术开展了室外数百米距离成像实验,深入研究了不同正交矩阵作为测量基对光子计数成像信噪比和分辨率的影响,对比分析了不同算法的重建图像中均匀区域的灰度方均根误差和算法效率,得到了接收镜头口径在受限条件下的成像分辨率,讨论了光子计数计算鬼成像方案在三维成像方面的优缺点。

2 实验方案与结果

2.1 实验装置

计算鬼成像实验系统和原理如图1所示,由波长为532nm的激光器发射重复频率为100kHz、脉冲时间宽度为10ns的脉冲激光束。发出的光经扩束镜准直扩束,扩束后的光斑经两次反射以 24° 角

入射到数字微镜器件(DMD)表面,经 DMD 调制后的光束经过两次反射后由发射镜头投影到远方的靶标上,投影镜头口径为 160 mm,数值孔径 $NA = 0.032$ 。物体的反射光由接收镜头收集,接收镜头口径由可调的光阑控制,实验设定为 5 mm。探测到的光信号首先耦合进入多模光纤,再通过多模光纤联接到单光子探测器(Gm-APD)进行探测。通过在

DMD 上加载调制矩阵可将一系列照明图像投射到物体上,实现测量基的结构光照明,返回信号被 Gm-APD 探测。激光器每发射一个脉冲,同时同步输出电信号作为脉冲飞行时间的开始,Gm-APD 探测到光信号后也将输出一个电脉冲,作为脉冲飞行时间的结束。根据光速不变原理,可利用脉冲飞行时间获得目标的距离信息。

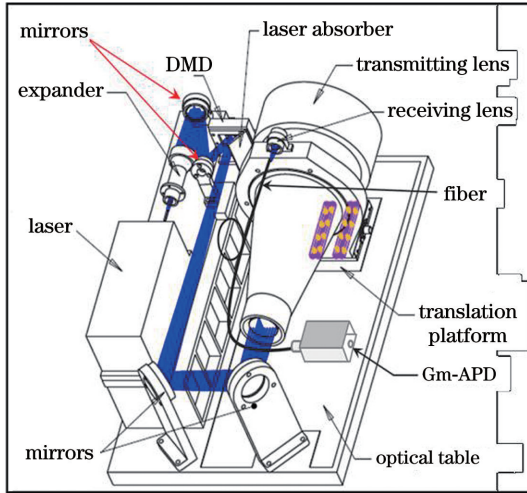


图 1 计算鬼成像系统实验装置

Fig. 1 Experimental setup of the computational ghost imaging system

选用的 Gm-APD 参数为:死时间典型值为 20 ns,最大值为 40 ns;最小计数率为 12 MHz,最大为 40 MHz;感光面积为 0.170 mm;暗计数为 100 s^{-1} ;时间分辨率约为 350 ps。选用的 DMD 为美国德州仪器 Type A 型,其窗口透过率为 80%,单个微镜尺寸为 13.68 mm,微镜数为 1024×768 ,调制速度最快为 22 kHz,实验设定 40 Hz 调制速度。

2.2 测量矩阵

实验用正交基为 Walsh 变换(WT)矩阵和离散余弦变换(DCT)矩阵。Walsh 矩阵和 Hadamard 矩阵具有相同的矩阵元素,区别仅在于构造矩阵的行和列排列不同。Hadamard 矩阵起源较早,应用极其广泛^[25]。Hadamard 矩阵(简称 \mathbf{H} 矩阵)具有的特征:产生速度快,矩阵元仅有 ± 1 元素。矩阵任意两行(或列)正交,满足的关系为

$$\sum_k^K \mathbf{H}(k, l) \mathbf{H}(k, l') = 0. \quad (1)$$

若 K 为矩阵阶数,则 K 须等于 \mathbf{H} 矩阵的行数 k 或列数 $l, l \neq l'$ 。 $\mathbf{H}(k, l)$ 为 Hadamard 矩阵元。 \mathbf{H} 矩阵满足 $\mathbf{H}\mathbf{H}^T = K\mathbf{I}, \mathbf{I}$ 为单位矩阵,且 \mathbf{H} 逆矩阵 $\mathbf{H}^{-1} = \mathbf{H}$ 。按逆序格雷码对 \mathbf{H} 矩阵进行排序后,可得到 Walsh 变换矩阵,设图像矩阵元 $\mathbf{T}(m, n)$,二维 Walsh 变换表达式为

$$\mathbf{F}(p, q) = \mathbf{W}\{\mathbf{T}(k, l)\} = \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{K-1} \mathbf{T}(k, l) (-1)^{b(k, l, p, q)}, \quad (2)$$

式中: $b(k, l, p, q)$ 为对 2 取模运算,表达式为

$$b(k, l, p, q) = \sum_{i=0}^{n-1} [g_i(p)k_i + g_i(q)l_i], \quad (3)$$

式中: $g_0(p) = p_{n-1}, g_1(p) = p_{n-1} + p_{n-2}, g_2(p) = p_{n-2} + p_{n-3}, \dots, g_{n-1}(p) = p_1 + p_0$ 。下标 $i = 0, 1, 2, \dots, n-1$, 分别对应 k_i, l_i, p_i, q_i 二进制表示时相应的位。

由于 Walsh 矩阵元为 -1 和 1 两种元素,先将矩阵元 -1 变为 $1, 1$ 变为 0 , 构成 \mathbf{D}_{-1} 矩阵;再将矩阵元 -1 变为 $0, 1$ 不变,产生 \mathbf{D}_{+1} 矩阵,通过 $\mathbf{D}_{+1} - \mathbf{D}_{-1}$ 的方式来实现 Walsh 矩阵完整的测量。理论上全测量时,若图像大小为 $N \times N$,则全采样的测量次数为 $2 \times N \times N$ 。

DCT 与离散傅里叶变换(DFT)二者数学表达非常接近,实际上 DCT 就是对 DFT 只截取余弦变换部分生成的。二维 DCT 的数学表达式为

$$F(p, q) = \alpha_p \alpha_q \sum_{m=0}^{M_0-1} \sum_{n=0}^{N_0-1} \mathbf{T}(m, n) \times \cos \left[\left(\frac{\pi(2m+1)}{2M_0} p \right) \right] \cos \left[\left(\frac{\pi(2n+1)}{2N_0} q \right) \right], \quad (4)$$

其中,

$$\alpha_p = \begin{cases} 1/\sqrt{M_0}, & p = 0 \\ \sqrt{2/M_0}, & 1 \leq p \leq M_0 - 1 \end{cases}, \quad (5)$$

$$\alpha_q = \begin{cases} 1/\sqrt{N_0}, & q = 0 \\ \sqrt{2/N_0}, & 1 \leq q \leq N_0 - 1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中: M_0 和 N_0 为矩阵的行数和列数, $0 \leq m \leq M_0 - 1, 0 \leq n \leq N_0 - 1$ 。

Walsh 矩阵和 DCT 矩阵的测量基相似,但区别在于 DCT 矩阵元素具有灰度,采用 DMD 作为调制器,按 8 bit 灰度投影计算,DCT 测量速度将降为 Walsh 基测量速度的 1/8,相应的成像速度也将降低 1/8。

抖动算法可将 DCT 有灰度的正弦图案转换成二值正弦图案,从而提高调制速度,使得计算成像速度大幅提升^[26]。抖动算法的核心思想为误差扩散原理,先对当前像素值进行甄别,采用阈值法对当前像素值进行二值化,将输入和输出的像素值之差按一定的权重传播到若干相邻未处理的区域。误差扩散原理可表达为

$$\mathbf{G}^*(m, n) = \mathbf{G}(m, n) + \sum_{k, l} \omega(k, l) \mathbf{l}_{\text{error}}(m - k, n - l), \quad (7)$$

式中: $\mathbf{G}(m, n)$ 为输入的 DCT 图案; $\mathbf{G}^*(m, n)$ 为像素点 (m, n) 的邻域像素中加入的量化误差扩散值与输入图案灰度之和; 量化误差 $\mathbf{l}_{\text{error}}(m, n)$ 扩散到邻域像素的二维权重函数为 $\omega(k, l)$ 。设置 T_r 为阈值,对于归一化后的灰度图像,一般取 $T_r = 0.5$,像素值 $\mathbf{G}^*(m, n)$ 可被二值化为抖动图案 $\mathbf{D}_b(m, n)$,表达式为

$$|\mathbf{D}_b(m, n)| = \begin{cases} 0, & |\mathbf{G}^*(m, n)| < T_r \\ 1, & |\mathbf{G}^*(m, n)| \geq T_r \end{cases}. \quad (8)$$

针对二值化 DCT 矩阵 \mathbf{D}_b 负数矩阵元,采用的处理方式与 Walsh 测量基类似,需对负值和零值矩阵元进行约对值操作,然后再采用抖动算法进行二值化。因此,全测量时若图像大小为 $N \times N$,则全采样的测量次数为 $2 \times N \times N$ 。

2.3 重建算法

对于 Walsh 测量基和 DCT 测量基测量后获得的相应信号 \mathbf{y} ,可直接分别采用 Walsh 逆变换和 DCT 逆变换即可重建,两种算法均存在快速算法且非常成熟,在此不进行具体介绍。除线性算法,压缩感知算法也是重建图像领域中较为常用的方法。

经过研究对比,采用稀疏泊松强度重建 (SPIRAL) 算法,约束项采用全变分 (TV) 作为约束条件。由于实验中光子被探测到是离散事件,发射的脉冲数 n_p 为 100 kHz,探测的光子数 $y_i \ll n_p$,上述事件遵循泊松分布。测量的光子信号向量 \mathbf{y} 与观测矩阵 \mathbf{A} 和图像 \mathbf{f} 满足的关系为

$$\mathbf{y} \sim \text{Poisson}(\mathbf{A}\mathbf{f}), \quad (9)$$

式中: 目标图像 $\mathbf{f} \in \mathbb{R}_+^N$; 观测矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}_+^{m_{\text{cas}} \times N}$; 观测到的信号 $\mathbf{y} \in \mathbb{Z}_+^{m_{\text{cas}}}$ 。上述正定且整数的约束使得求解 (9) 式变为难题。幸运的是,文献 [27] 指出可将上述问题转换为凸优化问题后再进行求解。

$$\hat{\mathbf{f}} \triangleq \arg \min_{\mathbf{f} \in \mathbb{R}_+^N} \mathbf{1}^T \mathbf{A}\mathbf{f} - \sum_{i=1}^{m_{\text{cas}}} y_i \ln(\mathbf{e}_i^T \mathbf{A}\mathbf{f} + \epsilon) + \tau \|\mathbf{f}\|_{\text{TV}},$$

subject to $|\mathbf{f}| \geq 0$, (10)

式中: $\mathbf{1}$ 为有 m_{cas} 个 1 的矢量; \mathbf{e}_i 为第 i 个正则基的单位矢量; $0 < \epsilon \leq 1$; m_{cas} 为测量次数; τ 为惩罚因子。惩罚项 TV 计算表达式为

$$\|\mathbf{f}\|_{\text{TV}} = \sum_{k=1}^{\sqrt{K}-1} \sum_{l=1}^{\sqrt{K}} |f_{k,l} - f_{k+1,l}| + \sum_{k=1}^{\sqrt{K}} \sum_{l=1}^{\sqrt{K}-1} |f_{k,l} - f_{k,l+1}|, \quad (11)$$

计算时参数 $\tau = 0.01, \epsilon = 10^{-10}$, 迭代次数为 50。

在对目标进行距离重建时,采用光子的飞行时间信号和光子数信号进行重建。无论采用何种重建算法,利用光子飞行时间信号重建的图像为 \mathbf{X}_t , 光子数信号重建的图像为 \mathbf{X}_n , 二者相除可实现图像各像素距离信息重建,即

$$\mathbf{X}_d = \mathbf{X}_t / \mathbf{X}_n. \quad (12)$$

为防止除“0”,数据处理时将图像 \mathbf{X}_n 中等于 0 的元素予以剔除,即设置为空集。距离图像相当于时间信息与光子数信号的解卷积重建结果。

2.4 实验结果

对 DCT 测量基和 Walsh 测量基成像效果进行对比研究。第一个成像目标为距离 700 m 处的手机信号塔,如图 2 所示,由 80 mm 口径望远镜在 700 m 处拍摄得到目标图像。针对目标同一区域采用相同采样率 (SR) 进行了 DCT 测量基和 Walsh 测量基下的图像重建。图 2 第一行为基于 DCT 测量基利用不同算法重建的图像,重建算法分别为快速变换 (FT) 算法和 SPIRAL 算法。

图 2(a) 和 (b) 为 DCT 测量基测量后重建图像结果,图 2(c) 和 (d) 为 DCT 测量基按 (12) 式重建的距离图像,图像采样次数均为 $m_{\text{cas}} = 4096$,图像像素均为 64×64 ,故采样率 $R_s = m_{\text{cas}} / 8192 = 0.5$ 。

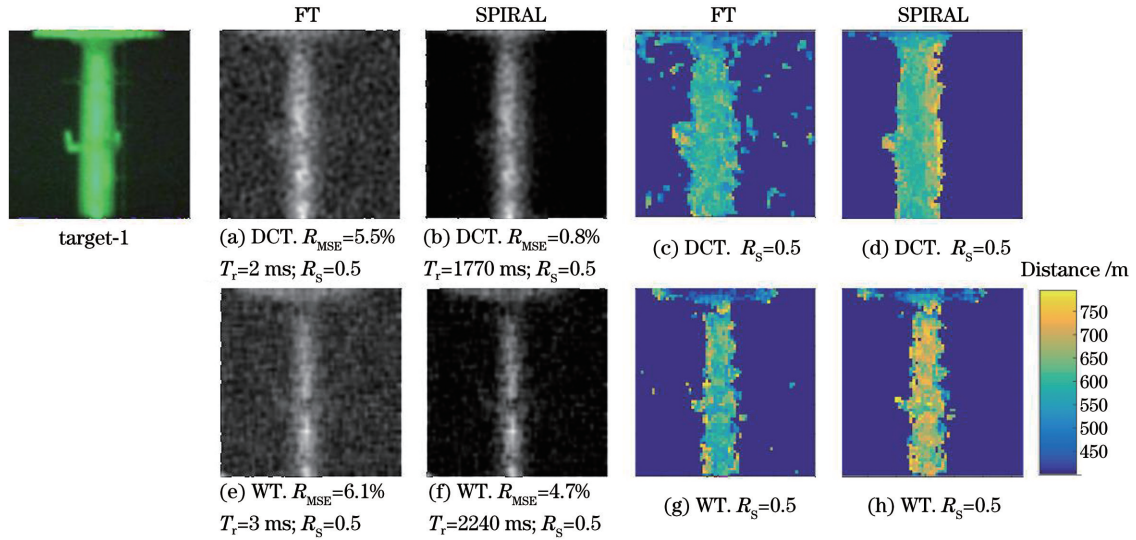


图 2 不同测量基与不同算法重建图像对比

Fig. 2 Comparison of reconstructed images under different measurement basis and different algorithms

图 2(e)和(f)为 Walsh 测量基测量后重建图像结果,图 2(g)和(h)对应 Walsh 测量基按(12)式重建的距离图像,图像采样次数均为 $m_{\text{ens}} = 4096$,图像像素均为 64×64 ,故 $R_s = m_{\text{ens}} / 8192 = 0.5$ 。

为测试实验系统成像的分辨率,对合作目标进行实验,选用 WT 作为测量基。实验靶标为三线靶

标,每组线条宽度与间距相等,依次为 8, 6, 4 cm。靶标安装的距离为 640 m。图 3(a)为 FT 算法成像结果,图 3(b)为 SPIRAL 算法重建结果。图 3(c)和(d)为按(12)式重建的目标距离图像。图像采样次数均为 $m_{\text{ens}} = 8192$,图像像素均为 64×64 ,故 $R_s = m_{\text{ens}} / 8192 = 1.0$ 。

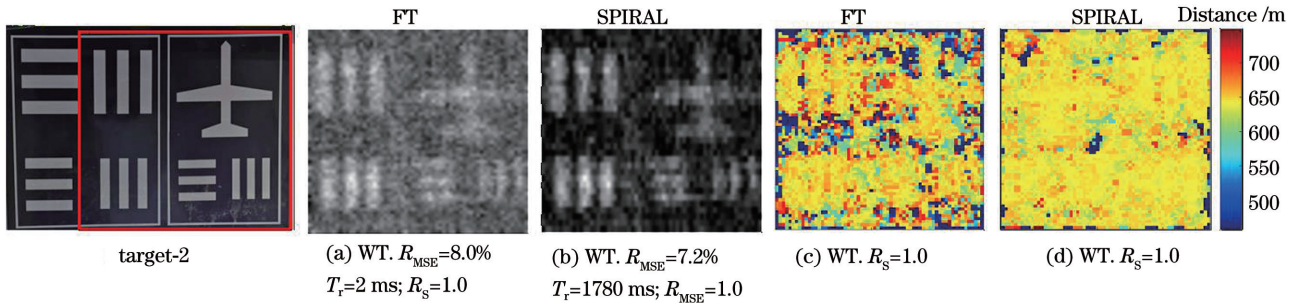


图 3 不同测量基与不同算法对三线靶标的重建图像对比

Fig. 3 Comparison of reconstructed three-line target images under different measurement basis and different algorithms

图 4 对应图 3 重建图像的信号取值信息,差分后的光子计数信号主要集中在 $4.24 \sim 4.26 \mu\text{s}$,其余部分的信号涨落极其微弱无法用于重建图像,故实验中

选取的信号为 $4.24 \sim 4.26 \mu\text{s}$ 内到达的光子信号。

3 分析与讨论

为实现图像质量的评价,在无原始图像对比的情况下,定义了一种基于先验知识的量化评价方法。该方法的核心思想是:任意图像均存在一定的灰度平滑、平坦区域,理想情况下该区域像素灰度值的均方根误差(RMSE)为 0,实际 RMSE 计算结果应接近 0。设选取图像相对光滑部分的灰度平均值 S_{ave} ,图像灰度 RMSE 视为噪声或误差,灰度 RMSE 的表达式为

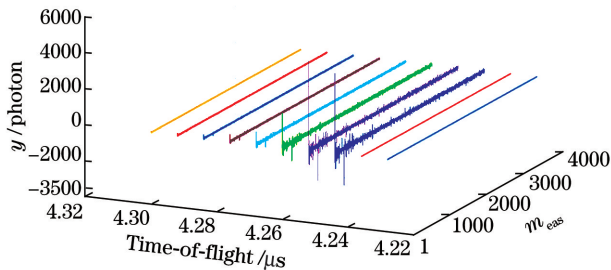


图 4 不同时间切片对应的光子信号

Fig. 4 Photon signals corresponding to different time-of-flight slices

$$R_{\text{MSE}} = \left\{ \frac{1}{N'} \sum_{i'=1}^{N'} [T(i') - S_{\text{ave}}]^2 \right\}^{1/2}, \quad (13)$$

式中: $T(i')$ 为图像第 i' 个选取区域索引点像素值; $S_{\text{ave}} = \sum_{i'=1}^{N'} T(i')/N'$, N' 为选取区域像素总数。

首先,分析相同测量基实验结果。对图 2(a)和(b)、图 2(c)和(d)、图 2(e)和(f)、图 2(g)和(h)进行两两对比, T_r 对应不同算法的重建时间,结果表明, FT 算法重建速度快于 SPIRAL 算法,而 SPIRAL 算法重建的 RMSE 总是小于 FT 算法,直观上从图像清晰度也可观察到相同结论。其次,分析相同重建算法的实验结果。对图 2(a)和(e)、图 2(b)和(f)、图 2(c)和(g)、图 2(d)和(h)进行两两对比,结果表明, DCT 测量基重建图像的 RMSE 比 WT 测量基的更低,但从视觉效果上 WT 测量基重建图像的分辨率更高,从图 2(f)和图 2(h)中心部分可看到信号塔的一个“拐角”,而图 2(b)和(d)中心部分“拐角”部分并不清晰。特别需要说明的是,图 2(c)、(d)、(g)及(h)为目标的距离重建,部分像素点重建的误差较大,甚至达到百米量级,提升这一精度仍是值得深入研究的课题。

通过上述分析,可得出一定指导性结论:在光子计数计算鬼成像测量基选取时,在相同采样率条件下, DCT 测量基重建的图像信噪比高于 WT 测量基, WT 测量基重建图像的分辨率高于 DCT 测量基。

对图 3(a)和(b)进行对比后得出的结论与前文一致,相同测量基下 SPIRAL 算法重建误差 $R_{\text{MSE}} = 7.2\%$, 小于 FT 方法重建图像误差 8.0% 。图 3(c)和(d)为按(12)式重建的目标距离图像,直观来看,仍然是 SPIRAL 算法重建效果优于 FT 方法。由于目标为一平面铝板,故重建的目标距离图像理论上应为像素值均匀的平面,即等距平面。即使存在实验靶标安装导致的倾斜,成像结果也应该为均匀平面的过渡,而非成像结果中出现的阶跃,提升距离测量准确度仍是值得深入研究的课题。

从分辨率角度分析,光子计数计算鬼成像在接收镜头口径为 5 mm 的条件下可分辨距离 640 m 处 4 cm 宽等间隔的三线靶标,若按照接收镜头衍射极限计算,直接成像的分辨率为 8 cm,光子计数计算鬼成像系统相当于实现了 2 倍衍射极限分辨率的成像。需说明的是,现有的系统成像分辨率由发射镜头光学衍射极限和接收探测器能量分辨率共同决定,似乎与接收镜头口径无关。然而,即使计算鬼成像中照射在物体表面的光场已知,例如通过计算或预标定等方式提前获得,鬼成像的分辨率仍与接收镜头的口径有关,其影响着探测器所能接收到光强

度信号的动态范围,进而影响成像分辨率,故研究接收镜头口径与成像分辨率极限的关系仍有意义。与经典方案不同的是,计算鬼成像提升分辨率不必通过增大接收镜头口径,而是通过增加接收镜头数量即可。

4 结 论

从理论与实验两方面研究了光子计数计算鬼成像技术,对比了二值化的 DCT 测量基和 Walsh 测量基在相同条件下的图像重建结果。研究表明,在相同采样率条件下, DCT 测量基重建图像的 RMSE 小于 Walsh 测量基,但 Walsh 测量基重建图像的分辨率更高。这一结论对光子计数计算鬼成像实际应用时的测量基选取具有一定指导意义。

对基于 Walsh 测量基的光子计数计算鬼成像技术在全采样条件下重建图像分辨能力进行了进一步研究,实验结果表明,所设计的光学系统可实现超接收镜头 2 倍衍射极限的成像。该结论对某些光场可标定的远距离计算鬼成像接收镜头设计具有一定指导价值。

研究表明,相同测量基条件下, SPIRAL 算法重建的图像质量总是优于 FT 算法,包括灰度成像和距离成像,但 FT 算法重建时间优于 SPIRAL 算法 2~3 个量级。

光子计数计算鬼成像的分辨率除了受照明光场横向相干尺寸的影响外,主要还受到探测器能量分辨率、动态范围与探测信噪比影响,而环境光的微小变化、激光束的大气背向散射等在实验中难以避免,这极大限制了成像分辨能力。此外,探测器动态范围与探测信噪比对物体距离图像重建影响较大,导致本实验系统对目标进行距离重建结果中像素点偏差较大。如何发挥单光子探测的优势,如利用单光子事件的概率性等特点,提升探测信噪比、重建高质量的三维计算鬼成像仍是需要进一步研究的课题。随着学者们对关联成像技术的不断探索^[28-30],未来该技术必然在某些领域发挥不可替代的作用。

参 考 文 献

- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A*, 1995, 52(5): R3429.
- [2] Abouraddy A F, Saleh B E, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging [J].

- Physical Review Letters, 2001, 87(12): 123602.
- [3] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-photon" coincidence imaging with a classical source [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 113601.
- [4] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Correlated imaging, quantum and classical [J]. Physical Review A, 2004, 70: 013802.
- [5] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation [J]. Physical Review Letters, 2004, 93(9): 093602.
- [6] Cao D Z, Xiong J, Wang K G. Geometrical optics in correlated imaging systems [J]. Physical Review A, 2005, 71: 013801.
- [7] Cai Y J, Zhu S Y. Ghost imaging with incoherent and partially coherent light radiation [J]. Physical Review E, 2005, 71(5): 056607.
- [8] Zhang D, Zhai Y H, Wu L A, et al. Correlated two-photon imaging with true thermal light [J]. Optics Letters, 2005, 30(18): 2354-2356.
- [9] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
- [10] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 83-91.
- [11] Zhang P L, Gong W L, Shen X, et al. Correlated imaging through atmospheric turbulence [J]. Physical Review A, 2010, 82(3): 033817.
- [12] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y. Turbulence-free ghost imaging [J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(11): 111115.
- [13] Gong W L, Han S S. Super-resolution far-field ghost imaging via compressive sampling [EB/OL]. (2009-11-25) [2021-02-20]. <https://arxiv.org/abs/0911.4750>.
- [14] Li W W, Tong Z S, Xiao K, et al. Single-frame wide-field nanoscopy based on ghost imaging via sparsity constraints [J]. Optica, 2019, 6(12): 1515-1523.
- [15] Liu Z T, Tan S Y, Wu J R, et al. Spectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints [J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 1-10.
- [16] Howland G A, Dixon P B, Howell J C. Photon-counting compressive sensing laser radar for 3D imaging [J]. Applied Optics, 2011, 50(31): 5917-5920.
- [17] Du K M, Jiang Y D, Chen Y, et al. Photon-counting imaging system based on compressive sensing [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(2): 363-368.
- 杜克铭, 蒋远大, 陈颖, 等. 基于压缩传感的光子计数成像系统 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 363-368.
- [18] Howland G A, Lum D J, Ware M R, et al. Photon counting compressive depth mapping [J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23822-23837.
- [19] Li M F, Yang R, Huo J, et al. "Quantum" imaging of cooperative target based on photon-counting regime [J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(22): 014202. 李明飞, 杨然, 霍娟, 等. 基于光子计数的合作目标"量子"成像 [J]. 物理学报, 2015, 64(22): 014202.
- [20] Bo Z W, Gong W L, Yan Y, et al. Experimental research of ghost imaging based on photon counting [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(11): 1104001. 薄遵望, 龚文林, 严毅, 等. 基于光子计数的关联成像实验研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(11): 1104001.
- [21] Sun M J, Edgar M P, Gibson G M, et al. Single-pixel three-dimensional imaging with time-based depth resolution [J]. Nature Communications, 2016, 7: 12010.
- [22] Liu X F, Yao X R, Wang C, et al. Quantum limit of photon-counting imaging based on compressed sensing [J]. Optics Express, 2017, 25(4): 3286-3296.
- [23] Liu X L, Shi J H, Wu X, et al. Fast first-photon ghost imaging [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5012.
- [24] Liu X L, Shi J H, Sun L, et al. Photon-limited single-pixel imaging [J]. Optics Express, 2020, 28(6): 8132-8144.
- [25] Li M F, Yan L, Yang R, et al. Fast single-pixel imaging based on optimized reordering Hadamard basis [J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(6): 064202. 李明飞, 阎璐, 杨然, 等. 基于 Hadamard 矩阵优化排序的快速单像素成像 [J]. 物理学报, 2019, 68(6): 064202.
- [26] Li M F, Yuan Z H, Zhao L L, et al. Walsh bases and binary discrete cosine bases single-pixel imaging comparing [J]. Navigation and Control, 2020, 19(1): 40-47, 132. 李明飞, 袁梓豪, 赵琳琳, 等. 基于 Walsh 基和二值离散余弦基单像素成像的对比分析 [J]. 导航与控制, 2020, 19(1): 40-47, 132.
- [27] Harmany Z T, Marcia R F, Willett R M. This is SPIRAL-TAP: sparse Poisson intensity reconstruction algorithms: theory and practice [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2012, 21(3): 1084-1096.
- [28] Wu Z W, Qiu X D, Chen L X. Current status and prospect for correlated imaging technique [J].

- Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(6): 060001.
- 吴自文, 邱晓东, 陈理想. 关联成像技术研究现状及展望 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(6): 060001.
- [29] Yuan S, Wang Z, Zhou X, et al. Blind watermarking method based on binarized computational ghost imaging [J]. Acta Photonica Sinica, 2020, 49(2): 0210003.
- 袁胜, 王真, 周昕, 等. 基于二值化计算鬼成像的盲水印方法 [J]. 光子学报, 2020, 49(2): 0210003.
- [30] Hou X H, Jin G D, Tan L N. Survey of ship detection in SAR images based on deep learning [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(4): 0400005.
- 侯笑晗, 金国栋, 谭力宁. 基于深度学习的 SAR 图像舰船目标检测综述 [J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(4): 0400005.