

不同路径下散射介质对计算关联成像的影响

刘保磊¹ 杨照华¹ 曲少凡¹ 张艾昕² 吴令安²

¹北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191

²中国科学院物理研究所北京凝聚态物理国家实验室, 北京 100190

摘要 物体和探测器中间存在的散射介质会对传统光学成像造成严重影响, 计算关联成像是能够降低散射影响的有效方法之一。本文分析了光源发射路径和接收路径存在的散射介质, 建立了存在散射介质的计算关联成像 (CGI) 模型, 对比分析了不同路径段的散射介质对 CGI 和传统直接成像 (TDI) 的影响。从理论分析得出, CGI 中发射路径的散射介质会引起重建图像质量的衰减, 而接收路径中的散射介质几乎不会影响最终的成像结果。实验分析证实, CGI 可以降低散射光对成像造成的干扰。实验结果表明, 在发射路径和接收路径同时存在散射干扰时, CGI 和 TDI 的衬噪比分别为 2.98 和 2.72。CGI 能够降低云、烟、雾或生物组织等介质的散射干扰。

关键词 成像系统; 散射介质成像; 计算关联成像; 空间光调制器

中图分类号 O436.2; O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201636.1026017

Influence of Turbid Media at Different Locations in Computational Ghost Imaging

Liu Baolei¹ Yang Zhaohua¹ Qu Shaofan¹ Zhang Aixin² Wu Ling'an²

¹School of Instrumentation Science & Optoelectronics Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China

²Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics, Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract In traditional direct imaging a scattering medium between the object and detection system will severely degrade the image quality. Computational correlation imaging (GI) has a unique advantage in that the effect of the light scattering can be greatly reduced. We present an analysis of computational correlation imaging and traditional direct imaging (TDI) with a turbid medium in various locations in the beam paths. It is found that a scattering medium in the illumination path will decrease the reconstructed imaging quality, while if it is only in the detection path it has almost no effect. Experimental results with a scattering medium in both the illumination and detection paths show an improved contrast-to-noise ratio of 2.98 compared with 2.72 for conventional direct imaging. These results are important for imaging objects embedded in media such as fog, smoke and cloud.

Key words imaging systems; imaging through turbid media; computational ghost imaging; spatial light modulator

OCIS codes 110.0113; 110.1758; 110.3010

1 引言

穿透云、烟、雾, 以及从生物组织等浑浊散射介质获取目标的有效图像信息, 一直是成像研究的重点。目前, 散射介质中物理成像方法按照原理可以分为两类: 1) 根据介质散射光和目标反射光特性不同, 将信号的弹道光与介质散射光分离提高成像质量, 常用方法有距离选通成像^[1-2]和偏振成像^[3]; 2) 利用散射过程反演散射光特性, 如波前整形^[4-5]、相位共轭^[6]、时间反转^[7]等。但是, 通常这些技术手段所用的光路复杂, 设备成

收稿日期: 2016-06-01; 收到修改稿日期: 2016-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61473022, 60907031)

作者简介: 刘保磊(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事关联成像、多光谱成像等方面的研究。

E-mail: liu_baolei@126.com

导师简介: 杨照华(1975—), 女, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事关联成像、成像制导、航天器姿态测量与控制等方面的研究。E-mail: yangzh@buaa.edu.cn(通信联系人)

本高。相比之下,关联成像是一种能够提高散射介质中成像质量的简单光学机制,具有较大的研究价值和潜力。

关联成像,又称鬼成像(GI),起源于20世纪90年代。最早由史砚华等^[8-9]利用非线性晶体的自发参量下转换实现基于量子纠缠的关联成像。随后基于经典光^[10]、赝热光^[11]和真热光^[12-13]的关联成像相继实现。早期的热光关联成像实验借助分束器将光路分成两束,一束通过物体到达一个点探测器,另一束到达一个测量光场空间分布的参考探测器,基于两路光场空间分布的关联性实现成像。随着理论不断成熟,对关联成像应用方面的研究成为一个重要的方向^[14-20]。户外关联成像实际应用时主要干扰来自于大气湍流造成的相位随机扰动和大气分子及气溶胶粒子的散射影响^[21-23]。研究表明,关联成像的一大优势在于能够在一定程度上减小大气湍流扰动的影响^[24-25]。对散射介质影响的分析表明,大气散射对关联成像的影响主要来自于米氏散射。实验研究已证实,在光路中存在散射介质时,关联成像依然能够获取高质量的成像结果,相比于传统直接成像具有一定的优势^[26-27]。近期Xu^[28]等的研究表明,在环境散射变强时关联成像相比于传统直接成像具有更强的稳健性。这些均为针对双光臂热光关联成像所进行的分析。

计算关联成像(CGI)由Shapiro^[29]于2008年提出,该方案利用空间光调制器(SLM)对光场进行强度或相位调制产生一系列特定的散斑涨落光场。由于调制信息可控,作用到物体上的光场分布信息可由人为设计,因此不需要参考光路,使用单光臂方案结合单像素桶探测器即可完成成像^[30-31]。计算关联成像光路中不需要传统关联成像中的参考臂和高分辨率探测器,通过单像素桶探测器的采样值和空间光调制器中的调制信息进行二阶关联完成成像,使得整个系统更加简洁,有利于系统的简化与集成。因此研究计算关联成像中的散射介质干扰问题具有重要的实用价值。

本文针对计算关联成像中散射介质处于光路中不同路径时对成像质量的影响进行了理论分析和实验研究。从被散射后的光场特性出发,将被粒子散射后的光场分为与入射光场具有关联的直射光场和不具有关联的散射光场。理论分析得出,由于粒子随机散射造成的散射光场与入射光场不具有关联性,通过二阶关联算法可以降低散射光场的干扰,从而提高成像质量。实验结果表明:在计算关联成像机制中,发射路径中的散射介质可能导致重建图像质量衰减;接收路径中的散射介质基本上不会影响最终的成像结果,该成像方式能够在较大程度上降低光路中散射介质对成像的干扰。

2 理论分析

传统赝热光关联成像中,利用旋转的毛玻璃褪去激光的相干性,产生光场随机涨落的赝热光场。光场被分束器分为物光和参考光两部分,物光照射到物体后的反射光或透射光总光强被无分辨能力的单像素桶探测器收集,另一束参考光的光场信息被具有分辨能力的面阵探测器记录,通过相应算法提取两光场之间的关联信息即可完成对物体的非局域成像。但该光路系统需要双光臂,不适合于实际应用。计算关联成像使用单光臂方案实现对物体的关联成像,光场涨落可控,光路简单,实用性更强。为此,利用单光臂的计算关联成像方案分析散射介质处于不同路径时的成像影响,光路图如图1(a)所示,M为全反镜, L_1 为发射透镜,将空间光调制器的调制光场投射到被成像物体上, L_2 为收集透镜,将物面的光束收集到单像素桶探测器感光面上,通过对调制光场和总光强响应值进行二阶关联完成图像重建。在计算关联成像中,由空间光调制器调制光场的强度或相位,产生空间分布随时间涨落的光场照射到物体上。由于调制信息可控,作用到物体上的光场分布 $I(x, y)$ 可根据惠更斯-菲涅耳传播函数以及距离参数计算得出,此时用于采集总光强值的单像素桶探测器值 S_i 的响应为

$$S_i = \int I_i(x, y) T(x, y) dx dy, \quad (1)$$

式中 $I_i(x, y)$ 为第 i 次采样的物面光场分布, $T(x, y)$ 为物体的透射率函数。经过 N 次采样后,不存在散射介质的理想情况下物体重建图像 $G(x, y)$ 可由二阶关联算法得出^[29-31]。

$$G(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - \langle S \rangle) I_i(x, y) = \langle S I(x, y) \rangle - \langle S \rangle \langle I(x, y) \rangle, \quad (2)$$

式中 $\langle \rangle$ 表示对 N 次测量结果的系综平均。

当计算关联成像光路中存在散射介质时,散射介质前的入射光场 $I(x,y)$ 由于粒子的随机散射而遭到破坏。探测面的光场可表示为光场分布与入射光场强度统计分布特性相似的直射光场和光场强度统计分布特性被散射改变的散射光场两部分^[27-28],即

$$I(x,y) = \alpha I(x,y) + I_{\text{sca}}(x,y), \quad (3)$$

式中 α 为直射光场强度与全部入射光场强度之比, α 满足 $0 < \alpha < 1$, $\alpha I(x,y)$ 为入射光场被散射时能够保持与原入射光场强度分布相似的直射光场, $I_{\text{sca}}(x,y)$ 为入射光场被散射后强度分布改变的散射光场。在此,忽略散射介质的吸收损耗。

考虑到实际桶探测器无法全部收集散射光场,假定 $I_D(x,y)$ 为到达探测器面的光场强度分布,则

$$I_D(x,y) = \alpha I(x,y) + \beta I_{\text{sca}}(x,y), \quad (4)$$

式中 β 为通过透镜收集的散射光强度与全部散射光强度之比, $\beta I_{\text{sca}}(x,y)$ 为桶探测器实际收集到的散射光场。

粒子随机散射引起的散射光场独立分布,直射光场与散射光场不具有关联性,两者强度统计独立,因此,

$$\langle I(x,y) I_{\text{sca}}(x,y) \rangle = \langle I(x,y) \rangle \langle I_{\text{sca}}(x,y) \rangle. \quad (5)$$

研究了散射介质处于三种情况时对计算关联成像和传统直接成像(TDI)造成的影响。图 1(b)~(d) 为散射介质 D_A 、 D_B 分别位于发射透镜和物体之间的发射路径,物体和收集透镜之间的接收路径,以及同时位于发射路径和接收路径时的示意图。其中传统直接成像是指当普通相机位于图 1 中单像素桶探测器位置时所获取的物体图像。

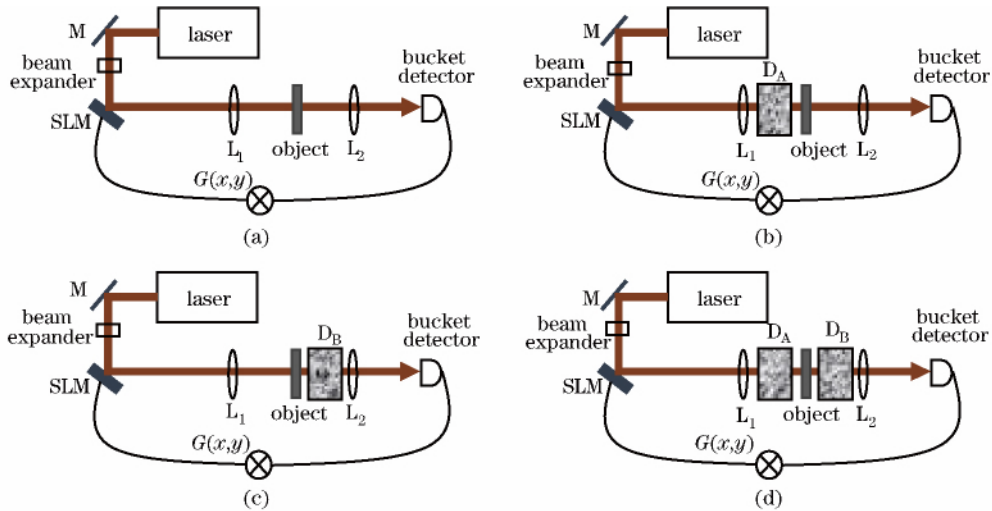


图 1 计算关联成像光路图。(a)无散射介质;(b)散射介质位于发射路径;(c)散射介质位于接收路径;
(d)散射介质同时位于发射路径及接收路径

Fig. 1 Scheme for CGI. (a) Without scattering medium; (b) scattering medium in illumination path;
(c) scattering medium in reception path; (d) scattering medium in both illumination and reception path

对于第一种情况,如图 1(b)所示,经过光场调制后 L_1 的出射光场为 $I(x,y)$, $I_{\text{sca}1}(x,y)$ 为光透过发射路径上介质 D_A 后的散射光场,则单像素桶探测器接收到的总光强 S_1 为

$$S_1 = \int dx dy [\alpha I(x,y) + \beta I_{\text{sca}1}(x,y)] T(x,y). \quad (6)$$

将(6)式代入(2)式得

$$\begin{aligned} G_1(x,y) &= \langle S_1 I(x,y) \rangle - \langle S_1 \rangle \langle I(x,y) \rangle = \\ &= \langle [\alpha I(x,y) + \beta I_{\text{sca}1}(x,y)] T(x,y) I(x,y) \rangle - \langle [\alpha I(x,y) + \beta I_{\text{sca}1}(x,y)] T(x,y) \rangle \langle I(x,y) \rangle = \\ &= \alpha \cdot [\langle S I(x,y) \rangle - \langle S \rangle \langle I(x,y) \rangle] = \alpha \cdot G(x,y). \end{aligned} \quad (7)$$

由(7)式可知,由于直射光场和散射光场之间不再具有关联性,计算关联成像结果 $G_1(x,y)$ 下降为理想情况下的 α 倍。作为对比,传统直接成像时不受散射介质干扰,采集到的光强信号 $I_{D1}(x,y)$ 与物体的透射率函数成正比,即

$$I_{D1}(x,y) = [\alpha I(x,y) + \beta I_{\text{sca}1}(x,y)] T(x,y). \quad (8)$$

对于第二种情况,散射介质 D_B 位于物体和探测器之间的接收路径上,如图 1(c)所示。由于直射光和散射光都被探测器收集到,若忽略散射介质对光束的吸收作用,此时单像素桶探测器的总光强响应值 S_2 涨落与不存在散射介质 D_B 时的响应值涨落基本保持一致。因此二阶关联成像的结果 $G_2(x, y)$ 不受散射介质 D_B 的干扰,即

$$S_2 = \int [\sigma I(x, y) T(x, y) + \zeta I_{\text{sca}2}(x, y)] dx dy \approx \int I(x, y) T(x, y) dx dy, \quad (9)$$

$$G_2(x, y) = \langle S_2 I(x, y) \rangle - \langle S_2 \rangle \langle I(x, y) \rangle \approx G(x, y), \quad (10)$$

式中 σ 为直射光场强度与全部入射光场的强度之比, ζ 为通过收集透镜 L_2 的散射光强度与全部散射光强度之比, $I_{\text{sca}2}(x, y)$ 为光透过 D_B 后的散射光场。

对传统直接成像,其成像结果 $I_{D2}(x, y)$ 则由于受到散射光场的干扰而使得成像分辨率和对比度下降,即

$$I_{D2}(x, y) = \sigma I(x, y) T(x, y) + I_{\text{sca}2}(x, y). \quad (11)$$

对于第三种情况,散射介质 D_A 、 D_B 同时存在,如图 1(d)所示,是最接近于计算关联成像实际应用于遥感、医疗等领域成像时遇到的问题。此时,单像素桶探测器的光强采样值 S_3 包括直射光和散射光两部分,通过二阶关联算法对光强采样值和调制光场进行关联运算,散射光场的干扰得以降低,但成像结果 $G_3(x, y)$ 为理想情况下的 α 倍,即

$$S_3 = \int \{ \sigma \{ [\alpha I(x, y) + \beta I_{\text{sca}1}(x, y)] T(x, y) \} + \zeta I_{\text{sca}3}(x, y) \} dx dy \approx \int [\alpha I(x, y) + \beta I_{\text{sca}1}(x, y)] T(x, y) dx dy, \quad (12)$$

$$G_3(x, y) = \langle S_3 I(x, y) \rangle - \langle S_3 \rangle \langle I(x, y) \rangle \approx \langle [\alpha I(x, y) + \beta I_{\text{sca}1}(x, y)] T(x, y) I(x, y) \rangle - \langle [\alpha I(x, y) + \beta I_{\text{sca}1}(x, y)] T(x, y) \rangle \langle I(x, y) \rangle = \alpha \cdot [\langle SI(x, y) \rangle - \langle S \rangle \langle I(x, y) \rangle] = \alpha \cdot G(x, y), \quad (13)$$

式中 $I_{\text{sca}3}(x, y)$ 为光透过两段散射介质 D_A 和 D_B 后的散射光场。传统直接成像结果 $I_{D3}(x, y)$ 同样会同时采集到直射光场和散射光场,即

$$I_{D3}(x, y) = \sigma \{ [\alpha I(x, y) + \beta I_{\text{sca}1}(x, y)] T(x, y) \} + \zeta I_{\text{sca}3}(x, y). \quad (14)$$

通过对比(6)~(14)式可以得出,总体看,第二种情况和第三种情况下的传统直接成像结果一致,第一种情况和第三种情况下计算关联成像结果一致。对传统直接成像而言,发射路径的散射介质 D_A 只会引起物体透光部分强度分布不均,对物体轮廓没有影响;接收路径中由散射介质 D_B 导致的散射光场会恶化成像质量。对计算关联成像而言,发射路径中的散射介质 D_A 会引起重建图像质量衰减;接收路径中的散射介质 D_B 不会影响最终的成像结果;当散射介质 D_A 、 D_B 同时存在时,成像结果对比度有所下降,但由于能降低散射介质 D_B 的干扰,成像质量优于传统直接成像。

3 实验设计

散射介质对计算关联成像的影响分析实验光路图,如图 2 所示,实验系统由激光器、反射镜、准直扩束透镜、空间光调制器、发射透镜、收集透镜、探测器,以及散射介质组成。散射介质分别置于空间光调制器和目标物体之间的发射路径,目标物体和探测器之间的接收路径,以及同时置于发射路径和接收路径上。为提高成像速度和振幅调制效率,采用数字微镜器件(DMD,美国德州仪器公司)作为空间光调制器,该 DMD 含有 1024×768 个微镜单元,微镜大小 $13.68 \mu\text{m} \times 13.68 \mu\text{m}$,微镜间距小于 $1 \mu\text{m}$,有效镜面大小 $14.008 \mu\text{m} \times 10.506 \mu\text{m}$,实验时使用 640×580 个微镜单元并以 2×2 个微镜作为 1 个调制单元,因此共有 320×290 个调制单元。实验中,波长为 532 nm 的光束由激光器发出后经过扩束准直后以 24° 夹角入射到 DMD 镜阵面,每个微镜受数字电路系统中调制矩阵控制发生相对于阵面 12° 或 -12° 摆动,实现对入射光场的调制,激光束的入射功率为 0.72 mW 。根据光学反射定律,当微镜调到 12° 时,光场将在垂直方向出射,而落到 -12° 的光将偏离光路。为方便对比传统直接成像与计算关联成像,实验所用探测器为高速工业相机(Viewworks 公司, VC-2MC-M340E0 型),传统直接成像结果来源于该相机多次曝光后的平均叠加,同时将单幅照片的光场强度进行面积分作为单像素桶探测器的总光强响应值,用于计算关联成像。

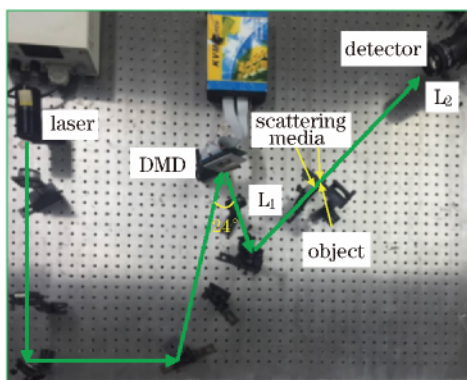


图 2 实验光路示意图

Fig. 2 Experimental light path diagram

受探测器采集速度限制, DMD 的调制速度设定为 100 Hz。实验中所使用的目标物体为透射型字母“K”, 物体尺寸为 $12\text{ mm} \times 15\text{ mm}$, 所使用透镜的焦距分别为 $L_1 = 75\text{ mm}$ 和 $L_2 = 50\text{ mm}$ 。

散射介质为含有磺化聚苯乙烯胶体粒子的水分散液, 胶体密度 $\rho = 1.25\text{ mg/mL}$, 其朗伯定律散射系数 $\mu_s \approx 2.32\text{ cm}^{-1}$, 微粒平均直径 $d \approx 2.75\text{ }\mu\text{m}$, 因此 $2\pi d/\lambda = 32.48$ 符合米氏散射条件^[32]。将该胶体置于 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 真空环境中干燥烘干后, 利用动态激光散射法测量微粒样本, 统计样本数为 5.35×10^7 , 不同粒子直径的归一化概率分布如图 3 所示, 微粒直径分布在 $2.4 \sim 3.2\text{ }\mu\text{m}$ 。实验中所使用的散射介质容器为两个比色皿, 通光面尺寸为 $10\text{ mm} \times 40\text{ mm}$, 有效光程为 10 mm 。

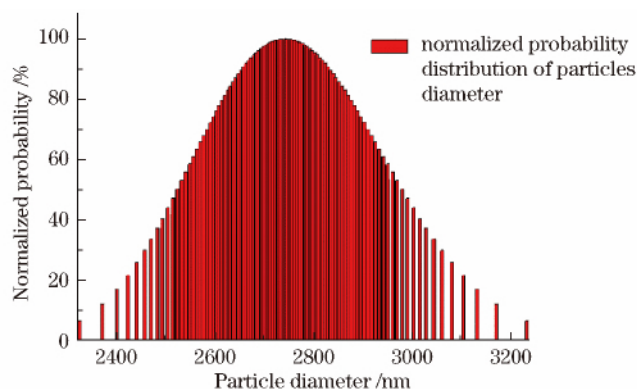


图 3 散射介质磺化聚苯乙烯粒子直径归一化概率分布

Fig. 3 Normalized probability distribution of sulfonated polystyrene particle diameter

4 实验结果及分析

4.1 定性比较

图 4(a) 左侧所示为实验中所使用的目标物体“K”。图 4(a) 右侧所示为理想情况下计算关联成像光路中不存在散射介质时的二阶关联结果, 采样值为 18000。使用目标物体“K”分别对不同路径下存在散射介质时进行实验, 传统直接成像(左侧)和计算关联成像(右侧)的结果分别如图 4(b)~(d) 所示, 图片分辨率均为 $320\text{ pixel} \times 290\text{ pixel}$ 。其中, 计算关联成像的采样值均为 18000。可以看出, 在接收路径中存在散射介质时, 粒子散射引起的散射光导致传统直接成像的对比度下降。散射介质处于接收路径时对计算关联成像影响较小, 处于发射路径时的影响更为明显。但相比于传统直接成像, 计算关联成像在三种情况中能够获得质量较高的物体图像。

4.2 物体图像横向截面强度对比

为了更直观地比较三种情况下两种成像方式的成像质量, 选取图 4(b)~(d) 的纵向位置为 $100 \sim 110$ 像素点的 10 条水平直线的强度值进行平均, 以减小测量误差, 得到图像横截面强度曲线如图 5~7 所示。由

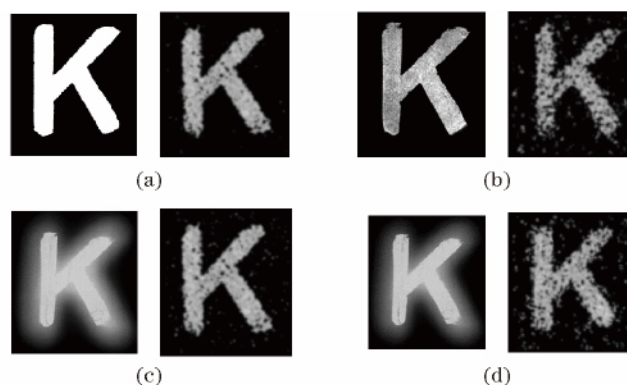


图 4 传统直接成像和计算关联成像实验结果对比。(a)目标物体(左侧)及理想情况下计算关联成像结果(右侧);
(b)散射介质位于发射路径;(c)散射介质位于接收路径;(d)散射介质位于发射路径及接收路径
Fig. 4 Experimental result of CGI and TDI. (a) Object (left) and CGI (right) images in ideal condition ;
(b) scattering medium in illumination path ; (c) scattering medium in reception path ;
(d) scattering medium in both illumination and reception path

图 5 可知,当散射介质 D_A 位于发射路径时,两种成像方式所得的强度测量结果对比度都比较大。但传统直接成像几乎不受散射介质 D_A 干扰,强度曲线起伏较小。

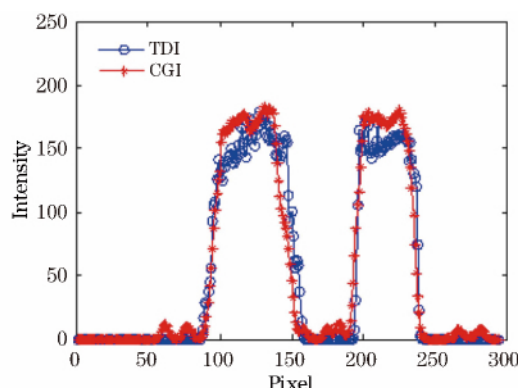


图 5 散射介质 D_A 位于发射路径时物体截面的传统直接成像与计算关联成像对比

Fig. 5 Comparison of cross section image obtained by TDI and CGI with scattering medium D_A in illumination path

图 6 所示为散射介质 D_B 位于接收路径时,两种成像方式获取的图像横截面强度曲线对比。可以看出,此时传统直接成像所获取的图像对比度严重下降,而计算关联成像仍能保证高对比度的成像结果。这种情况下,计算关联成像能够减少散射介质 D_B 的干扰,成像质量优于传统直接成像。

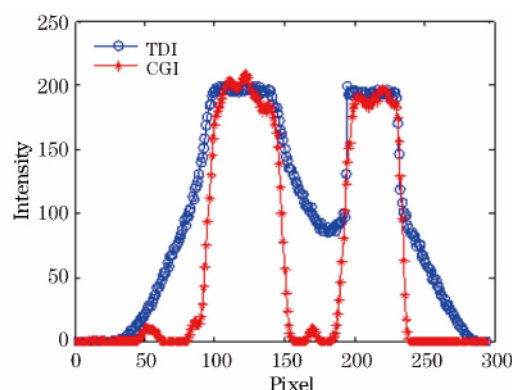


图 6 散射介质 D_B 位于接收路径时物体截面的传统直接成像与计算关联成像对比

Fig. 6 Comparison of cross section image obtained by TDI and CGI with scattering medium D_B in reception path

图 7 所示为发射路径和接收路径中存在散射介质 D_A 和 D_B 时,两种成像方式获取的图像横截面强度曲

线对比。此时,计算关联成像测得的目标物体图像质量相比于前两种情况有所下降,但仍优于传统直接成像。传统直接成像在第二、三种情况基本一致,由于受到接收路径上散射介质 D_B 的干扰使得成像质量下降。

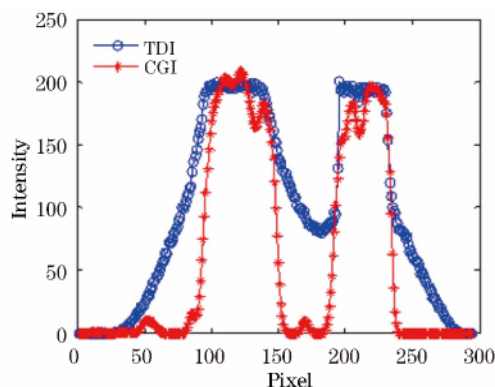


图 7 散射介质 D_A 、 D_B 同时存在时物体截面的传统直接成像与计算关联成像对比

Fig. 7 Comparison of cross section image obtained by TDI and CGI with scattering medium D_A and D_B

4.3 定量化成像质量对比

为了进一步定量比较两种成像方式,采用通用的峰值信噪比(R_{PSN})和适用于关联成像中的衬噪比(R_{CN})衡量对比两种成像方法的图像质量。峰值信噪比 R_{PSN} 定义为

$$R_{PSN} = 10 \times \lg\left(\frac{255^2}{E_{MS}}\right), \quad (15)$$

式中 E_{MS} 为均方差且

$$E_{MS} = \frac{1}{mn} \sum_{r,c=1}^{m,n} \|U_0(r,c) - U(r,c)\|^2, \quad (16)$$

式中 r 和 c 分别为图像的二维坐标, $U_0(r,c)$ 和 $U(r,c)$ 分别为原始图像和重建图像的像素值,图像大小为 $m \times n$ 。峰值信噪比反映了图像受噪声干扰的程度, R_{PSN} 值越大,重建的图像质量越好。

衬噪比定义为^[33]

$$R_{CN} = \frac{\langle G(x_s) \rangle - \langle G(x_b) \rangle}{\sqrt{\Delta^2 G(x_s) - \Delta^2 G(x_b)}}, \quad (17)$$

式中 x_s 和 x_b 分别对应目标物体和背景区域的像素位置, $G(x_s)$ 和 $G(x_b)$ 分别为目标处和背景处的强度, $\Delta^2 G(x) = \langle G^2(x) \rangle - \langle G(x) \rangle^2$ 为关联函数的方差。衬噪比反映了目标物体与背景光强的对比程度, R_{CN} 值越大,图像对比度越好,目标物体越容易被识别出来。

传统直接成像的峰值信噪比和衬噪比值分别用 R_{PSNT} 和 R_{CNT} 表示,计算关联成像的相应值分别用 R_{PSNC} 和 R_{CNC} 表示。不存在散射介质的理想情况下,计算关联成像的峰值信噪比值 $R_{PSNC} = 13.09$,衬噪比 $R_{CNC} = 4.01$ 。散射介质位于不同路径时的传统直接成像和计算关联成像的峰值信噪比和衬噪比如表 1 所示。由表 1 可知,当发射路径中存在散射介质 D_A 时,由于 $G_1(x,y)$ 值下降,导致计算关联成像所获取的物体图像峰值信噪比和衬噪比略低于同等情况下的传统直接成像。由(6)~(14)式可知,当接收路径中存在散射介质 D_B 或发射路径和接收路径同时存在散射介质 D_A 、 D_B 时,计算关联成像所获取的物体图像峰值信噪比和衬噪比高于同等情况下的传统直接成像,从而体现出了计算关联成像在噪声环境中获取物体图像的优越性。

表 1 散射介质处于不同路径时传统直接成像和计算关联成像的衬噪比和峰值信噪比

Table 1 R_{PSN} and R_{CN} of TDI and CGI with scattering medium in different paths

Parameter	With D_A only	With D_B only	With D_A and D_B
R_{PSNT}	12.04	11.01	11.12
R_{CNT}	3.88	2.74	2.72
R_{PSNC}	10.58	13.03	11.55
R_{CNC}	2.35	3.91	2.98

5 结 论

从理论分析和实验验证两方面研究了散射介质分别位于发射路径、接收路径,以及发射路径和接收路径同时存在时的传统直接成像和计算关联成像。在计算关联成像机制中,由于发射路径中的粒子随机散射造成的散射光场与入射光场之间的关联性丢失,因此可以通过桶探测值与入射光场的二阶关联消除散射光场的干扰,从而提高成像质量,但发射路径中的散射介质会引起重建图像质量衰减。由于计算关联成像中接收路径中的散射介质对光场总光强涨落影响并不显著,因此该路径中的散射介质基本上不会影响最终的成像结果。而在传统直接成像中,散射光场在很大程度上干扰了成像结果,难以通过简单机制来消除散射光的干扰。计算关联成像提供了一种能够消除浑浊介质中散射光干扰的简单机制,在恶劣环境中更具有优势。实验光路简单、设备成本低、易于实现,验证了该成像方案在散射介质存在的条件下进行成像的可行性。计算关联成像在云、烟、雾或等散射介质干扰的遥感成像领域,以及生物组织分析、医疗诊断等存在散射的光学成像领域有着广阔的前景和较高的工程实用价值。

参 考 文 献

- Wang L, Ho P P, Liu C, *et al.* Ballistic 2D imaging through scattering walls using an ultrafast optical Kerr gate[J]. *Science*, 1991, 253(5021): 769-771.
- Gayen S K, Alrubaiie M, Alfano R R. Time-gated backscattered ballistic light imaging of objects in turbid water[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(1): 011115.
- Liang J, Ren L, Ju H, *et al.* Polarimetric dehazing method for dense haze removal based on distribution analysis of angle of polarization[J]. *Optics Express*, 2015, 23(20): 26146-26157.
- Katz O, Small E, Bromberg Y, *et al.* Focusing and compression of ultrashort pulses through scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 372-377.
- Mosk A P, Lagendijk A, Lerosey G, *et al.* Controlling waves in space and time for imaging and focusing in complex media [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(5): 283-292.
- Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, *et al.* Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- Lerosey G, de Rosny J, Tourin A, *et al.* Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal[J]. *Science*, 2007, 315(5815): 1120-1122.
- 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.
- 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.
- 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.
- Ferri F, Magatti D, Gatti A, *et al.* High-resolution ghost image and ghost diffraction experiments with thermal light[J]. *Physical Review Letters*, 2005, 94(18): 183602.
- 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.
- Liu X F, Chen X H, Yao X R, *et al.* Lensless ghost imaging with sunlight[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2314-2317.
- Zhang Minghui, Wei Qing, Shen Xia, *et al.* Statistical optics based numerical modeling of ghost imaging and its experimental approval[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(10): 1858-1866.
张明辉, 魏 青, 沈 夏, 等. 基于统计光学的无透镜鬼成像数值模拟与实验验证[J]. *光学学报*, 2007, 27(10): 1858-1866.
- Chen Tao, Li Zhengwei, Wang Jianli. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523-2530.
陈 涛, 李正伟, 王建立. 应用压缩传感理论的单像素相机成像系统[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(11): 2523-2530.
- Liu Xuefeng, Yao Xuri, Li Mingfei, *et al.* The role of intensity fluctuations in thermal ghost imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(18): 184205.
刘雪峰, 姚旭日, 李明飞, 等. 强度涨落在热光鬼成像中的作用[J]. *物理学报*, 2013, 62(18): 184205.
- Chen Chao, Zhao Shengmei. Study on high order difference sifted ghost imaging scheme[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34

- (6): 0611002.
- 陈 超, 赵生妹. 高阶差值筛选鬼成像方案研究[J]. 光学学报, 2014 34(6): 0611002.
- 18 Zhang Y, Shi J, Li H, *et al.* Imaging through aberrating media by computational ghost imaging with incoherent light[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 011102.
 - 19 Han Shensheng, Gong Wenlin, Chen Mingliang, *et al.* Research progress of GISC lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2547-2555.
- 韩申生, 龚文林, 陈明亮, 等. 基于稀疏和冗余表象的鬼成像雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2547-2555.
- 20 Zhang Weiliang, Zhang Wenwen, He Ruiqing, *et al.* Iterative denoising ghost imaging based on local hadamard modulation[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(4): 0411001.
- 张伟良, 张闻文, 何睿清, 等. 基于局部 Hadamard 调制的迭代去噪鬼成像[J]. 光学学报, 2015, 36(4): 0411001.
- 21 Zhao C, Gong W, Chen M, *et al.* Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(14): 141123.
 - 22 Gong W, Zhao C, Yu H, *et al.* Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. Scientific Reports, 2016, 6.
 - 23 Chen M, Li E, Gong W, *et al.* Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(02): 83.
 - 24 Zhang P, Gong W, Shen X, *et al.* Correlated imaging through atmospheric turbulence[J]. Physical Review A, 2010, 82(3): 033817.
 - 25 Cheng J, Lin J. Unified theory of thermal ghost imaging and ghost diffraction through turbulent atmosphere[J]. Physical Review A, 2013, 87(4): 043810.
 - 26 Gong W, Han S. Correlated imaging in scattering media[J]. Optics Letters, 2011, 36(3): 394-396.
 - 27 Bina M, Magatti D, Molteni M, *et al.* Backscattering differential ghost imaging in turbid media[J]. Physical Review Letters, 2013, 110(8): 083901.
 - 28 Xu Y K, Liu W T, Zhang E F, *et al.* Is ghost imaging intrinsically more powerful against scattering? [J]. Optics Express, 2015, 23(26): 32993-33000.
 - 29 Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. Physical Review A, 2008, 78(6): 061802.
 - 30 Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. Physical Review A, 2009, 79(5): 053840.
 - 31 Welsh S S, Edgar M P, Bowman R, *et al.* Fast full-color computational imaging with single-pixel detectors[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23068-23074.
 - 32 Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles[M]. Manhattan: John Wiley & Sons, 2008.
 - 33 Chan K W C, O' Sullivan M N, Boyd R W. Optimization of thermal ghost imaging: High-order correlations v. s. background subtraction[J]. Optics Express, 2010, 18(6): 5562-5573.