

信道气流干扰下的关联成像研究

傅喜泉[†], 黄贤伟[†], 谭威, 白艳锋

湖南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410082

摘要 风导致的信道气流是影响关联成像的重要因素,因此,对信道气流干扰下的关联成像研究进行了总结。首先,给出了近场气流影响的相位模型,并从光传输和关联成像两个角度进行了可靠性验证;然后,将该模型扩展到高风速区域,得到超声速气流下风速和边界层厚度对关联成像的影响规律,定量分析了成像质量的变化情况;最后,针对实际成像过程中的探测抖动问题,介绍了基于关联成像时间特性的抑制方法以及小样本成像算法。本研究结果不仅可以评估信道气流对关联成像的影响,还为关联成像在机载遥感等领域的应用提供了重要的参考价值。

关键词 量子光学; 量子信息与处理; 湍流; 图像恢复技术; 近场气流; 关联成像

中图分类号 O431

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1011017

Correlation Imaging Research Under Disturbance of Channel Airflow

Fu Xiquan[†], Huang Xianwei[†], Tan Wei, Bai Yanfeng

College of Computer Science and Electronic Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China

Abstract The channel airflow caused by wind is an important influencing factor for correlation imaging. Therefore, this paper summarizes the correlation imaging research under the disturbance of channel airflow. First, the phase model affected by the near-field airflow is given, and the effectiveness of the model is verified from the perspectives of optical transmission and correlation imaging. Then, the model is extended to high wind speed regions, the influence law of wind speed and boundary layer thickness under supersonic airflow on correlation imaging is obtained, and the change of imaging quality is quantitatively analyzed. Finally, aiming at the problem of detection jitter in the actual imaging process, the suppression method based on the correlation imaging time characteristic and the small sample imaging algorithm are introduced. The results can not only evaluate the influence of channel airflow on correlation imaging, but also provide important reference value for the application of correlation imaging in airborne remote sensing and other fields.

Key words quantum optics; quantum information and processing; turbulence; image reconstruction techniques; near-field airflow; correlation imaging

OCIS codes 270.5585; 030.7060; 110.3010

1 引言

关联成像也被称为量子成像,是 20 世纪 90 年代兴起的一门新型成像技术,也是成像领域的研究热点。作为一种非定域的成像方式,关联成像技术

将随机光源分成两束相同的光,一束照射待检测目标后被没有空间分辨能力的桶探测器接收,另一束经过自由传输后被具有空间分辨能力的参考探测器接收。将两路光信号进行关联计算,就能重构目标的空间分布信息^[1]。关联成像早期采用量子光

收稿日期: 2021-03-01; 修回日期: 2021-04-14; 录用日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(61871431,61971184,62001162)

* E-mail: fuxiquan@gmail.com

† 共同第一作者

源^[2-6], 随后, 人们发现用经典的赝热光源也能实现鬼成像^[7-11], 且直接用激光照射旋转的毛玻璃或空间光调制器就能得到赝热光源。关联成像理论自诞生以来得到了人们的广泛研究, 包括关联成像的机理以及关联成像的优化等^[12-20]。近年来, 对关联成像技术的研究逐渐考虑了实际因素, 如信道干扰及物光衰减。物臂上的光场在传输过程中会受到路径吸收和散射等因素的影响, 导致光场强度发生衰减, 探测的物光强度变弱。已有研究结果表明, 相比传统成像方式, 弱光探测情况下鬼成像的质量更好, 原因是物光探测强度对鬼成像质量的影响较小^[21]。但鬼成像结果会受探测噪声的影响^[22], Yang 等^[23-25]针对弱光探测条件下的关联成像进行了大量研究, 并提出了抑制噪声影响的成像算法及方案, 如机器学习和快速直达光子成像方案, 使关联成像对物光信号的探测要求更低。

除了对弱光关联成像技术的研究外, 国内外学者还研究了不同场景下关联成像技术的应用, 其中, 信道干扰如大气湍流是必需要考虑的因素。Meyers 等^[26-27]研究了大气湍流影响下的关联成像, 结果表明, 大气湍流对于关联成像的影响很微弱。但实际应用中, 光强起伏会导致探测的物光信号强度发生随机变化^[28-30], 使探测的物光信号分布发生变化。此外, 信道干扰会导致光斑的中心位置发生随机变化^[31-33], 由于远距离探测时探测器的口径有限, 光斑可能会漂出探测范围, 导致物光信号的丢失等问题; 且在不稳定的成像环境中, 目标的成像质量较差。Zhang 等^[34-35]研究了长距离大气信道的关联成像; Tan 等^[36-37]研究了湍流影响下探测区域的大小对关联成像质量的影响, 并分析了部分收光情况下系统的成像能力, 对比了上行链路和下行链路湍流对成像结果的影响; Shi 等^[38]分析了湍流情况下视场角对关联成像结果的影响。上述研究结果均表明, 远距离成像条件下大气湍流会对成像质量造成一定的负面影响, 且相比传统成像方式, 关联成像的抗信道干扰能力更强。

关联成像的抗干扰和弱光成像等特点使其在遥感等实际应用中具有潜在价值。众所周知, 风是影响湍流干扰的一种重要因素, 风速的不均匀分布导致气流的干扰也是不均匀的^[39-40], 不同风速也会产生不同强度的随机气流。研究不同风速导致的气流干扰对扩展关联成像的实际应用场景具有重要意义, 如峡谷间的成像及机载成像中, 不均匀风速以及高速飞行器均会产生随机变化的流场, 但目前在关

联成像领域对于这些场景下的成像理论及相关模型的研究较少。因此, 研究信道气流干扰下的关联成像不仅能丰富关联成像的理论体系和成像场景, 还可以评估实际应用中信道气流的干扰。针对上述问题, 本文重点分析了信道气流对成像系统的干扰及建模和校验, 并评估了气流对光信号传输以及关联成像的影响, 同时对抑制随机干扰引起的探测抖动方法进行了研究。

2 近场气流模型及验证

2.1 近场气流模型

不考虑温度变化时, 通过高风速环境下相位差均方根的统计模型, 得到气流平均光程差的近似表达式为^[41]

$$X_{\text{OPD}} \approx A_0 \frac{\delta^*}{\sin \beta} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{SL}}} M^2, \quad (1)$$

式中, $A_0 = 1.7 \times 10^{-5}$, δ^* 为边界层的位移厚度 ($\delta/\delta^* = q$, δ 为边界层厚度, q 为常数), β ($0 < \beta \leq \pi/2$) 为入射光与流场方向的夹角, ρ_0 为自由射流的密度, $\rho_{\text{SL}} = 1.229 \text{ kg/m}^3$ 为海平面的空气密度, M 为飞行器的马赫数。由光程差可以得到平均相位差 $S = \frac{2\pi}{\lambda} X_{\text{OPD}}$, 其中, λ 为激光波长。

在平均相位差的基础上进行随机扰动, 以模拟气流的瞬时相位变化, 同时将平均相位差作为衡量气流对激光传输影响程度的基准。不考虑温度变化时, 气流引起的平均相位差可表示为^[42]

$$S \approx 2\pi A_0 \frac{\delta^*}{\lambda \sin \beta} \frac{\rho_0}{\rho_{\text{SL}}} M^2, A_0 = 1.7 \times 10^{-5}. \quad (2)$$

由于近场气流厚度即边界层厚度 δ 在实际中更大, 在边界层厚度即气流区间长度一定时, 随着风速的增加, 气流引起的平均相位差逐渐增大。原因是风速的增大会增加气流分布的不均匀性, 从而增强气流的随机干扰。

2.2 近场气流影响的光传输及关联成像模型

当光束通过近场气流区域时, 会受到气流带来的微扰, 该微扰和湍流类似, 都是由相位起伏引起的。因此, 采用随机相位屏方法对气动光学效应进行建模仿真, 将长度为 L 的连续随机介质分割成多个厚度为 Δz 的平行平板, 相位屏位于平板的后表面。当相位变化足够小时, 衍射与相位调制可视为相互独立。初始光场首先经过真空衍射, 然后进行相位调制, 得到的最终光场可表示为^[43-45]

$$A(x, y, z_j) \approx \exp \left[\frac{i}{2k} \int_{z_{j-1}}^{z_j} \nabla_{\perp}^2 dz \right] \times$$

$$\exp [iS(x, y, z_j)] A(x, y, z_{j-1}), \quad (3)$$

式中, x, y 为空间坐标, z_j 为激光传输到第 j 步的距离, k 为波数, ∇_{\perp}^2 为拉普拉斯算符, i 为虚数符号。对(3)式进行傅里叶变换和逆变换,可得到

$$A(x, y, z_j) = \mathcal{F}^{-1} \left\{ \exp \left[-\frac{i\Delta z}{2k} (K_x^2 + K_y^2) \right] \times \mathcal{F} \{ \exp [iS(x, y, z_j)] A(x, y, z_{j-1}) \} \right\}, \quad (4)$$

式中, K_x, K_y 为空间频率坐标, \mathcal{F} 和 \mathcal{F}^{-1} 分别为傅里叶变换和傅里叶逆变换, S 为由近场气流带来的平均相位差。可用随机相位屏方法仿真近场气流对激光传输的影响,由于直接用随机数构造的相位屏随机起伏太大,不符合实际情况,因此用归一化的湍流相位屏与近场气流引起的平均相位差对气流相位屏进行修正,最终得到受气流影响的相位为归一化湍流相位与平均相位差 S 的乘积,该分布与湍流的相位分布类似。从该模型建立的过程可知,气流和湍流环境具有一些相似点,一方面,两者对光传输的影响都可以被认为是相位调制;另一方面,两种环境中都存在湍流。这表明对随机相位屏进行高斯随机分布是合理的,原因是大气湍流带来的干扰也是高斯噪声。但在气流中,还可能含有层流和混合流等,因此,直接引入湍流公式是不合适的,用平均相位差公式衡量气流相位的大小更符合实际。

基于上述光传输模型,提出了一种气流环境影响下的关联成像计算模型,由于气流扰动可以被视为相位调制,因此用光场衍射和多相位屏调制的组合描述光束在物臂上的传输过程,物臂上到达目标平面的光场可表示为

$$A(x, y, z) = \prod_{j=1}^{M_0} \exp \left(\frac{i}{2k} \int_{z_{j-1}}^{z_j} \nabla_{\perp}^2 dz \right) \times \exp [iS(x, y, z_j)] A(x, y, z=0), \quad (5)$$

式中, $S(x, y, z_j)$ 为由气流扰动引起的随机相位调制, $\Delta z = z_j - z_{j-1}$ 为传输的步长, M_0 为光场的传输步数, z 为激光传输的距离。由于流场壁面是绝热的,因此可忽略温度扰动。可以发现,平均相位差与边界层位移厚度和风速的平方成正比,在随机相位屏的生成过程中,相位分布是随机的,气流相位屏起伏大小由 S 决定。风速越大,平均相位差 S 越大,随机相位的干扰也越强。

在参考臂中,光场没有经过干扰自由传输到探测器,可表示为

$$A(x, y, z) = \prod_{j=1}^{M_0} \exp \left(\frac{i}{2k} \int_{z_{j-1}}^{z_j} \nabla_{\perp}^2 dz \right) \times$$

$$A(x, y, z=0). \quad (6)$$

在物臂端,光场照射目标后被没有空间分辨能力的桶探测器接收,因此物臂上的光信号是光场总功率,可表示为 $I = \int |A(x, y, z)|^2 T(x, y) dx dy$, 其中, $T(x, y)$ 为目标物体的透射函数。而参考臂上,光场自由传输后被 CCD 探测器探测,记录的光强分布可表示为 $R(x, y) = |A(x, y, z)|^2$ 。采用多帧累积方法描述关联成像的过程,重复该过程 N 次,得到物臂和参考臂上检测到的信息 I 和 I_{ref} 分别为

$$I = [I_1, I_2, \dots, I_N], \quad (7)$$

$$I_{\text{ref}} = [R_1(x, y), R_2(x, y), \dots, R_N(x, y)]. \quad (8)$$

通过(7)式和(8)式重建的物体空间分布可表示为^[46-48]

$$T'(x, y) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_n R_n(x, y)}{\frac{1}{N^2} \sum_{n=1}^N I_n \sum_{n=1}^N R_n(x, y)}. \quad (9)$$

2.3 近场气流模型的验证

为了验证模型的准确性, Huang 等^[42]进行了激光在风洞中的传输实验,并与数值模拟结果进行了对比。实验中风速的变化范围为 $0 \sim 30$ m/s, 激光波长为 532 nm (LR-GSP-532 nm 连续激光, 光谱线宽为 27 pm), 激光的初始宽度为 1 mm, 实验原理如图 1 所示。其中, 风洞的宽为 45 cm, 激光在风洞中的传输通过平面镜来回反射, 以进行较远距离的传输测量, 其中, M2~M5 为平面镜。选取 M1、M2、M3 三个测量点测量光场的强度分布, 三个测量点

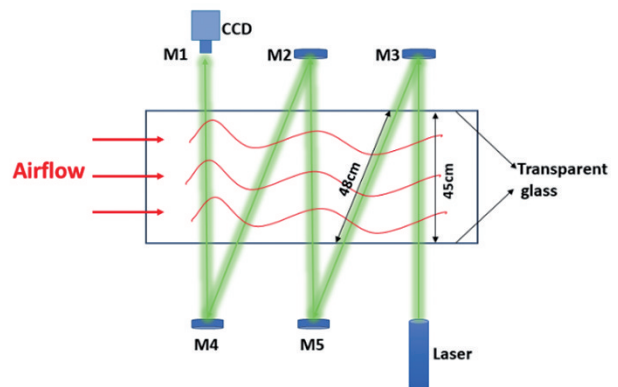


图 1 激光在风洞中传输的实验原理^[42]

Fig. 1 Experimental principle of the laser transmission in a wind tunnel^[42]

处激光经过的气流区间长度分别为 2.31, 1.38, 0.45 m, M1 为与 M2 平行的测量点。

在无风和有风情况下,对 M1、M2、M3 三个测量点处的光斑各测量 100 次,光斑的净平均漂移量为有风情况下的平均漂移量减去无风情况下的平均漂移量,结果如图 2 中的菱形符号所示,其中, M 为风速。可以发现,随着风速的增加,光斑的漂移量总体呈增加趋势。为了验证数值模拟模型的可靠性,基于气流影响的激光传输模型进行了数值计算,结果如图 2 中的实线所示。可以明显发现,当气流区

间长度较小,如在 0.45 m 和 1.38 m 时,实验结果总体比模拟结果大;当气流区间长度较大,如在 2.31 m 时,实验结果和模拟结果的一致性较好。还可以发现,实验结果和模拟结果的差在一个量级以内,这表明建立的激光传输模型是合理的。由于气流区间长度较大时实验结果和模拟结果的一致性较好,由(2)式可知,气流区间长度的增加基本等效于风速的增加,因此,当气流区间较小时,随着风速的逐渐增大(超过 0.1Ma),实验和模拟结果的一致性也较好。

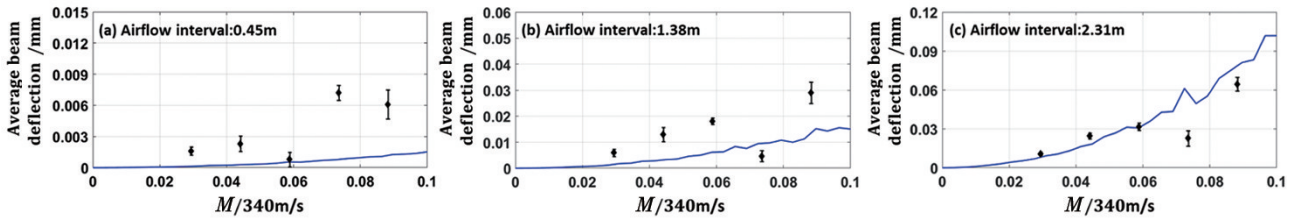


图 2 风速对光斑平均漂移量的影响。(a)气流区间为0.45 m;(b)气流区间为 1.38 m;(c)气流区间为2.31 m^[42]

Fig. 2 Influence of the wind speed on the average beam deflection. (a) Airflow interval is 0.45 m; (b) airflow interval is 1.38 m; (c) airflow interval is 2.31 m^[42]

此外,Huang 等^[49]对比了风洞环境下的关联成像实验与模拟结果,在气流环境下进行关联成像的实验装置如图 3 所示。其中,物臂中的赝热光穿过风洞,波长为 532 nm 的激光穿过旋转的毛玻璃和透镜产生的散斑光束分成了两路,旋转的毛玻璃在焦距 $f=400$ mm 的透镜焦平面上。物臂中光场穿过距离为 Z_1 的风洞并照射目标物体,透过物体的光场经过距离 Z_2 传输到桶探测器,然后通过桶探测器检测透射光的总功率;参考臂中光场自由传输

到 CCD 探测器,自由传输距离为 Z 。待成像目标物体为透射双缝,缝宽为 0.4 mm,缝间距为 0.6 mm。成像目标的信噪比(SNR)可表示为

$$R_{SN} = \frac{\langle G_s \rangle - \langle G_n \rangle}{\sqrt{\frac{1}{2}(D_s + D_n)}}, \quad (10)$$

式中, G_s 和 G_n 分别为重建物体对应原物体透射率分别为 1 和 0 时信号的总体平均值, D_s 和 D_n 分别为相应的方差。

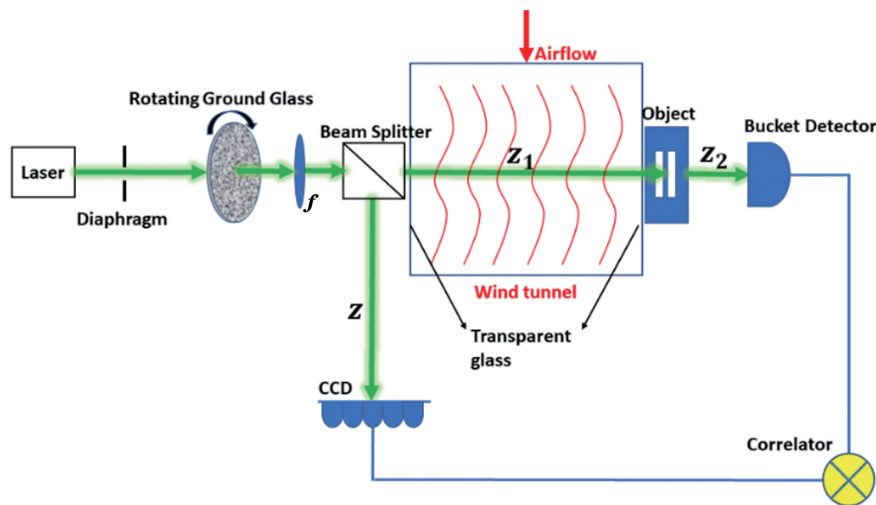


图 3 不同风速下的关联成像实验装置^[49]

Fig. 3 Correlation imaging experimental device under different wind speeds^[49]

图 4 为不同风速下的实验结果,其中, v 为风速。可以发现,在图 4(a)~图 4(d)中,随着风速的

增大,成像质量逐渐降低;当风速增加到 45 m/s 时,重建双缝的分辨率有明显下降。为了定量描述成像

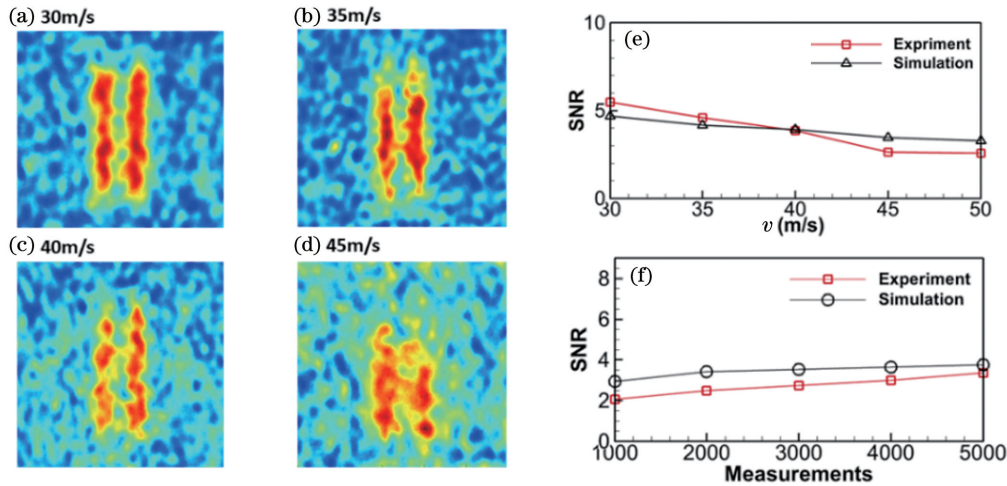


图 4 不同风速下的成像结果。(a)~(d)不同风速下的关联成像实验结果;(e)不同风速下的实验与模拟结果;(f)不同采样次数下的实验与模拟结果^[49]

Fig. 4 Imaging results under different wind speeds. (a)–(d) Correlation imaging experiment results under different wind speeds; (e) experiment and simulation results under different wind speeds; (f) experiment and simulation results under different sampling times^[49]

质量,在图 4(e)中给出重建目标的 SNR,可以发现, SNR 随风速的增大而减小。原因是风速会导致随机的气流环境,引起扰动;且风速越大,环境的随机性越强。在关联成像过程中,物臂上的随机扰动会使物光发生额外波动,导致成像质量下降。基于关联成像计算模型,仿真了气流环境影响下的关联成像结果,仿真条件与实验设置相同,不同测量次数和风速下仿真和实测图像的 SNR 如图 4(e)和图 4(f)所示。可以发现,仿真和实测图像的 SNR 变化趋势相同,且两者的相对误差始终低于 50%。通过激光传输和关联成像实验,进行了不同风速下的光传输效应与成像实验,并基于所提出的计算模型进行了数值模拟,结果表明,实验与模拟结果的一致性较好,验证了所提模型和气流相位模型的

有效性。

3 超声速气流对关联成像的影响

3.1 超声速气流对目标重建的影响

基于上述验证的气流模型,Huang 等^[49]将关联成像技术扩展到高风速区间,研究了高速气流如超声速对关联成像的影响,相关结果可为评估目标成像的影响因素提供重要参考。实际应用中,当成像平台高速运动时,周边会产生随机变化的气流,且气流仅存在于移动平台附近。赝热光由焦距为 f 的透镜准直后分束,一路光经过气流环境后自由传输一段距离 L_{free} 并照射物体,透过物体的光场在传输距离 Z_2 时被桶探测器接收,参考光则自由传输至参考探测器上,自由传输距离为 Z ,其成像方案如图 5

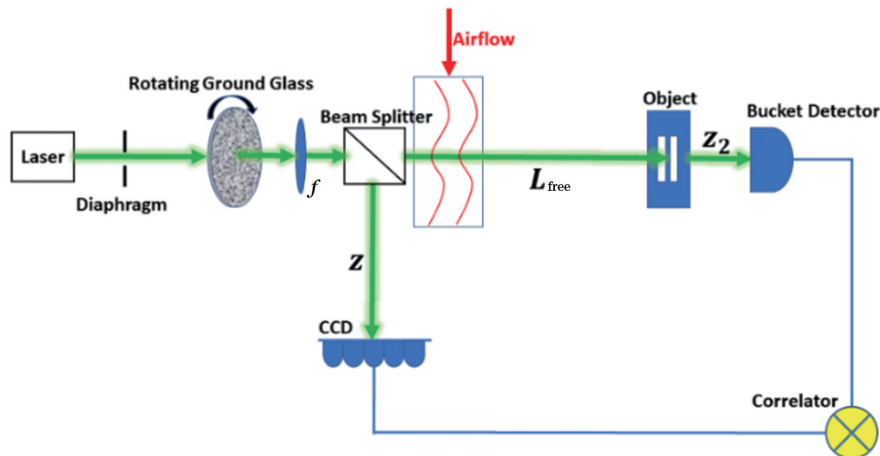


图 5 高速气流下的关联成像方案^[49]

Fig. 5 Correlation imaging scheme under high-speed airflow^[49]

所示。通过数值模拟分析影响目标成像的因素,待成像透射双缝的缝宽为 0.4 mm,缝间距为 0.6 mm。

风速为 $0.5Ma$, $1.5Ma$, $2Ma$, $3Ma$ 时重建物体的质量与衍射距离 L_{free} 的关系如图 6 所示,可以发现,当风速为 $0.5Ma$ 时,随着 L_{free} 的增加,重建图像的 SNR 几乎不变,如图 6(a) 所示;当风速为 $1.5Ma$ 时,重建图像的 SNR 随 L_{free} 的增加有略微降低,但仍然可以区分双缝图案,如图 6(b) 所示;当风速为 $2Ma$ 时,随着 L_{free} 的增加,重建物体完全变形,成像图像的 SNR 比 $L_{free}=0$ m 时降低了 59%,如图 6(c) 所示;当风速为 $3Ma$ 时,随着 L_{free} 的增加,成像图像的 SNR 比 $L_{free}=0$ m 时降低了 93%,双缝图案消失,如图 6(d) 所示。此外,当 $L_{free}=0$ m 时,风速对成像质量没有影响。原因是气流对成像

质量的影响取决于相位调制,而相位调制需要通过传输距离才能反映。边界层厚度是关联成像的另一个影响因素,图 7 为不同边界层厚度下风速 $M=1.5Ma$ 时的目标成像结果。可以发现,成像图像的 SNR 随衍射距离的增加逐渐降低。当边界层厚度从 20 mm 增加到 80 mm 时,成像质量受到了严重影响,基本无法分辨目标且图像的 SNR 比 $L_{free}=0$ m 时降低了 81.4%。对于厚度为 150 mm 的边界层,成像质量在 $L_{free}=0$ m 时开始变差,且成像图像的 SNR 比 $L_{free}=0$ m 时大约降低了 95%。可以发现,较大的风速和边界层厚度会产生较大的气流相位,从而对关联成像的物臂光路造成更强的气流扰动,该模型的计算可为评估气流对成像质量的影响提供参考价值。

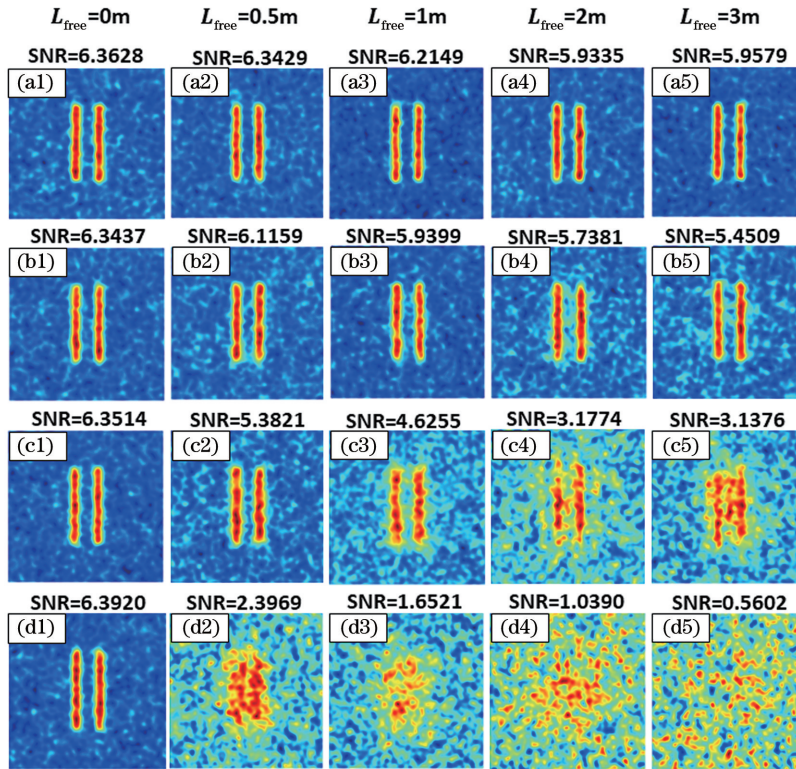


图 6 不同风速下的关联成像结果。(a) $M=0.5Ma$; (b) $M=1.5Ma$; (c) $M=2Ma$; (d) $M=3Ma$ ^[49]

Fig. 6 Correlation imaging results under different wind speeds. (a) $M=0.5Ma$; (b) $M=1.5Ma$; (c) $M=2Ma$; (d) $M=3Ma$ ^[49]

3.2 气流与大气湍流对关联成像的影响

对气流影响的建模类似于湍流过程,而气流本身也类似于湍流,因此对比了气流和湍流对关联成像的影响,图 8 为气流和湍流环境对关联成像质量的影响,其中, C_n^2 为大气折射率结构常数,可表示湍流的强度。仿真时,气流的边界层厚度为 20 mm, $L_{free}=3$ m。对于湍流,用卡尔曼谱生成内尺度 $l_0=1$ mm,外尺度 $L_0=10$ m 的湍流相位^[50-51],物臂上

存在湍流的路径长度为 3.02 m,等于整个传输距离,即湍流情况下的成像距离与气流情况一致。参数 $\alpha = |R_{SN}^1 - R_{SN}^0| / R_{SN}^1$ 可评估湍流或气流环境中成像质量的下降速度, R_{SN}^1 和 R_{SN}^0 分别为在信道干扰和无干扰下成像图像的 SNR。可以发现,湍流的相位扰动随湍流强度的增加而增强,从而降低了目标重建的 SNR。当湍流强度增加 5 个量级时,成像质量下降了不到 30%;但当风速从 $0.1Ma$ 增加到

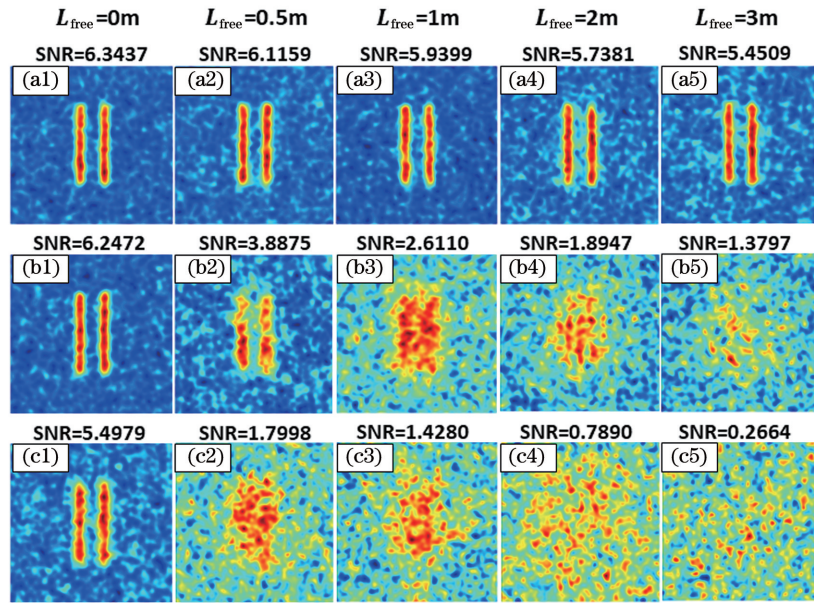


图 7 $M=1.5Ma$ 时不同边界层厚度对成像结果的影响。(a)边界层厚度为 20 mm;(b)边界层厚度为 80 mm;(c)边界层厚度为 150 mm^[49]

Fig. 7 Influence of different boundary layer thicknesses on imaging results when $M=1.5Ma$. (a) Boundary layer thickness is 20 mm; (b) boundary layer thickness is 80 mm; (c) boundary layer thickness is 150 mm^[49]

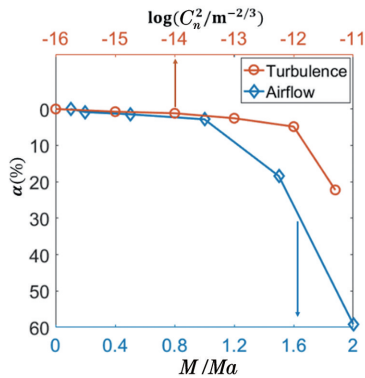


图 8 风速和湍流强度对成像质量的影响^[49]

Fig. 8 Influence of wind speed and turbulence intensity on image quality^[49]

2Ma(不到 2 个量级)时,成像质量下降了 60%。这表明与大气湍流相比,气流环境对图像 SNR 的影响更大。由于计算时边界层的厚度较小,其下降趋势对于较厚的边界层更明显。众所周知,信道干扰会引入额外的噪声,导致关联成像的质量下降,因此,该模型和相应的结果分析有助于估计气流对成像系统性能的影响。

4 探测抖动对关联成像的影响

4.1 探测抖动下的成像实验装置

在实际成像应用如机载成像中,除气流的影响外,还需考虑成像平台的抖动对成像系统的影响。

实际中,成像平台的抖动或信道造成的光斑漂移可被视为不稳定的成像环境,该环境会导致探测抖动,使重建的目标图像质量变差。因此,Huang 等^[52]进行了探测抖动情况下的关联成像实验,实验装置如图 9 所示。其中,光源和参考探测器放置在抖动平台上。在参考臂中检测到的强度分布没有变化,原因是参考探测器与光源在同一个平台,可认为参考探测器是相对静止的。该装置可用于研究物臂中探测抖动对关联成像性能的影响,由波长为 532 nm 的激光穿过旋转毛玻璃和透镜产生的光源分为两个相同的部分,毛玻璃在焦距 f 为 300 mm 透镜的焦平面上。在物臂上,赝热光源传输距离 Z_1 后照射物体,透过物体的光场再传输距离 Z_2 后由桶探测器探测器探测光的总功率;在参考臂中,光自由传输距离 Z 到达 CCD 探测器上。根据常规的关联成像算法,通过线性计算恢复出没有抖动的物体信息 $O(x, y)$,可表示为

$$O(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (B_i - \langle B \rangle) I_i(x, y), \quad (11)$$

式中, $B_i = \int |E_i(x, y) \otimes b_t(x, y; z_1)|^2 T(x, y) dx dy$ 和 $b_t(x, y; z_1)$ 分别为桶探测器的信号和物臂的脉冲响应函数(下标 t 表示物臂), $E_i(x, y)$ 为光源, $\langle B \rangle$ 为桶探测器的平均信号强度, $T(x, y)$ 为物体的透射函数, $I_i(x, y) = |E_i(x, y) \otimes b_r(x, y; z_1)|^2$

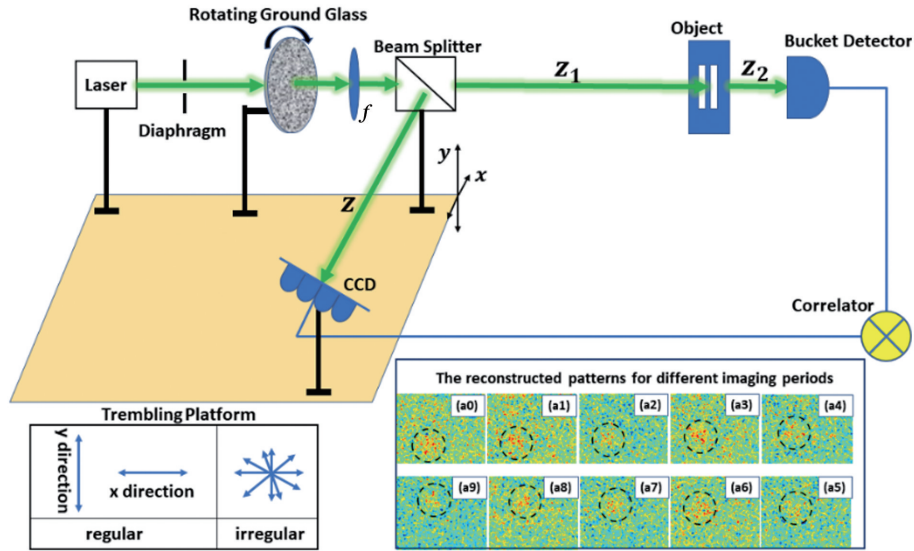


图 9 探测抖动情况下的关联成像实验装置^[52]

Fig. 9 Experimental setup of the correlation imaging for detecting trembling^[52]

为 CCD 探测器记录的参考光强度分布, $b_r(x, y; z_1)$ 为相应的脉冲响应函数(下标 r 表示物臂)。

4.2 探测抖动下的成像理论

由于参考探测器相对光源是静止的, 检测到的强度分布不变, 即 $I'_i(x, y) = I_i(x, y)$ 。但不稳定的环境会导致成像过程中物臂的探测抖动, 强度分布沿 x 和 y 方向随时间变化的位移分别为 $\Delta x(t)$ 和 $\Delta y(t)$, 则第 i 次测量的强度 $I'_i(x, y)$ 可表示为

$$I'_i(x, y) = I'_i[x - \Delta x(t_i), y - \Delta y(t_i)]. \quad (12)$$

桶探测器的探测信号为

$$B'(t_i) = \int I'_i[x - \Delta x(t_i), y - \Delta y(t_i)] \times T(x, y) dx dy. \quad (13)$$

将(13)式代入(11)式, 得到探测抖动下的物体信息为

$$O'(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [B'_i(t_i) - \langle B' \rangle] I_i(x, y), \quad (14)$$

式中, $\langle B' \rangle = [\sum_{i=1}^N B'_i(t_i)] / N$ 。对于较短的成像间隔, 强度分布的位移可以看作是一个恒定值, 即 $\Delta x(t) = \Delta x, \Delta y(t) = \Delta y$ 。相比未扰动条件, 扰动条件下重建物体的像产生的恒定位移可表示为

$$O'(x, y) = O(x - \Delta x, y - \Delta y) + \epsilon, \quad (15)$$

式中, ϵ 为噪声。整个成像过程可分为一组较短的成像间隔, 且针对不同的测量间隔, 重建目标的位置会发生变化。可将关联成像视为重建目标在不同位置的叠加, 将重建物体近似表示为

$$O'(x, y) \propto \frac{1}{N} \sum_{k=1}^m O[x - \Delta x(T_k), y - \Delta y(T_k)] + \epsilon(N), \quad (16)$$

式中, \propto 为成正比符号, T_k 为测量间隔, 对应的测量时间为 $t_{(k-1)N/m+1} - t_{kN/m+1}$, m 为短间隔的数量。可以发现, 整个成像过程呈时间特性, 且位移严重破坏了重建目标的分辨率。为了验证(16)式, 进行了关联成像实验, x 和 y 方向上的抖动成像结果分别如图 10(a) 和图 10(b) 所示, 探测抖动的范围分别为物体平面上光斑的 17% 和 34%。可以发现, 随着抖动范围在 x 方向上的增加, 重构目标图像先变模糊, 然后出现多缝图案; 当平台在 y 方向上抖动时, 会出现更长的双缝图案。这表明图 10 中的重建图案是物体在 x 或 y 方向上不同位置的叠加。

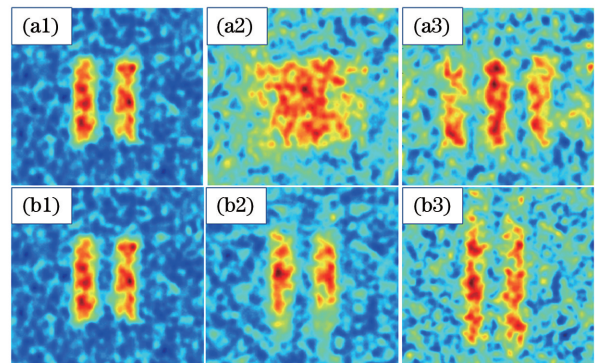


图 10 不同方向抖动下的成像结果。(a) x 方向; (b) y 方向^[52]

Fig. 10 Imaging results of the trembling in different directions. (a) x direction; (b) y direction^[52]

4.3 探测抖动情况下的成像干扰抑制

实际成像条件下,不稳定环境(如平台抖动)的变化是不规律的,因此需要关注不规则抖动情况下的成像。图 11 为无抖动及实际不规则抖动情况下的成像结果,可以发现,不规则抖动情况下目标物体已经完全扭曲,原因是不规则抖动会导致重构物体在不同方向上发生位移,进而导致关联成像的质量严重下降。

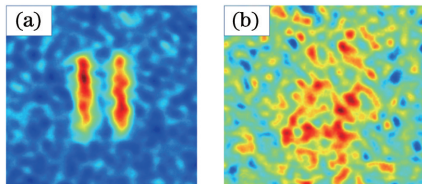


图 11 不同抖动情况下的成像结果。(a)无抖动情况;
(b)不规则抖动情况^[52]

Fig. 11 Imaging results under different trembling conditions. (a) No trembling; (b) irregular trembling^[52]

从(16)式可以看出,关联成像过程呈时间属性,且图像是重建目标在不同位置的叠加。因此,将整个成像过程分为多个间隔,每个间隔对应一个重构图案,然后获得一组图案。如果找到一组几乎具有相同位置和较高SNR的恢复目标图案,且该图案没

有位于成像平面之外,则可用与这些重建图案对应的测量数据提高成像质量。因此,可基于成像处理的时间特性消除关联成像图像的模糊和失真情况。首先,将整个成像过程离散为一系列较短的成像间隔($T_1, T_2, T_3, \dots, T_m$),对于每个短间隔,认为其位移 $\Delta x(T_k), \Delta y(T_k)$ 为恒定值。为了方便分析,每个间隔都是相同的,且对应于 N/m 的小采样。然后,对于每个间隔,执行关联成像处理过程,获得许多重构的物体图案 $O[x - \Delta x(T_k), y - \Delta y(T_k)]$ 。小采样的选择标准:在目标的恢复图案中,物体信息可以被检测到。尽管环境的变化是随机且未知的,但可以从小采样的重构图案中获得成像的规律性。最后,根据这些成像图案,得到重建物体的位置。以图 11(b)中的实验数据为例,给出了物体位置的检测算法,具体流程如图 12(a)所示。首先,将重构物体图案进行二值化处理;然后,用矩形矩阵遍历二进制图案,并统计矩阵区域内 1 的数量。通过遍历过程,很容易找到包含 1 最多的矩阵区域,且目标物体信息就包含在矩阵区域中。重建物体的位置可通过计算对象区域的中心位置(行和列)获得,如图 12(b)和图 12(c)所示。其中,遍历矩阵的像素数为 200,遍历步长为 5。图 12(d)为用图 12(b)和图 12(c)中数据重建的图像 SNR。通过重

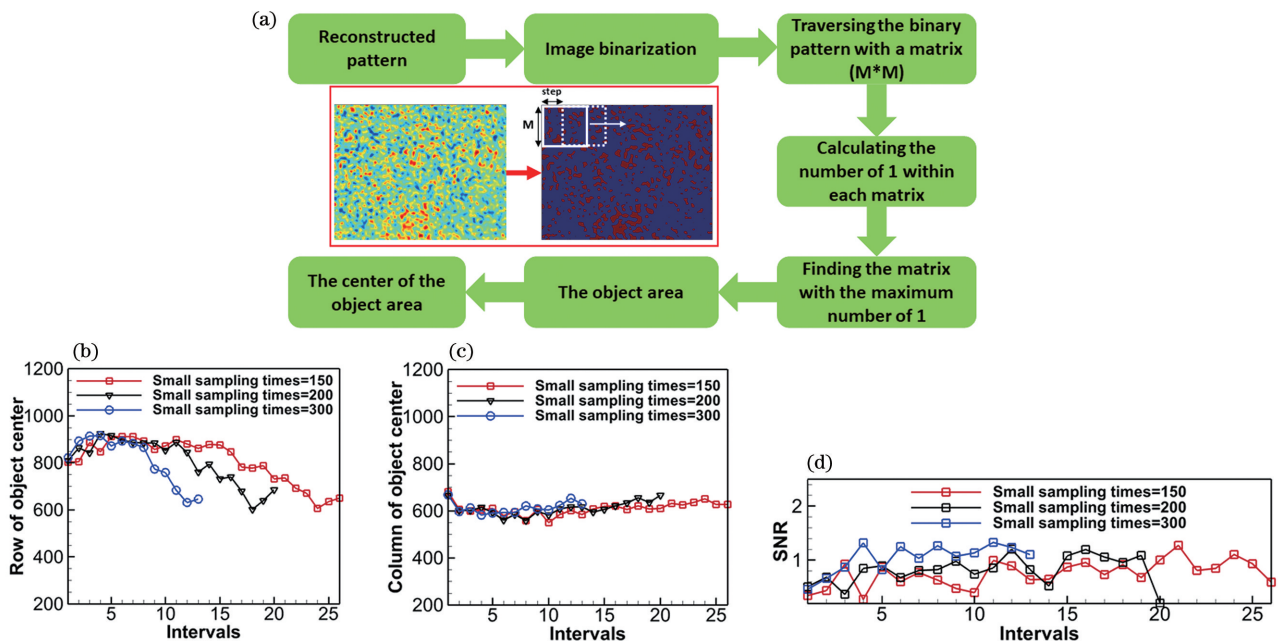


图 12 物体信息检测方法及其检测结果。(a)物体区域检测的流程图。(b)~(c)不同成像间隔下的物体区域中心;(d)不同成像间隔下重构目标的 SNR^[52]

Fig. 12 Object information detection method and detection results. (a) Flow chart of the object area detection. (b)~(c) center of the object area under different imaging intervals; (d) SNR of the reconstructed target under different imaging intervals^[52]

构的位置可以找到一组间隔,使重构物体中心几乎没有变化,且物体也没有部分位于成像平面之外的情况。此外,还可以找到具有较高 SNR 的间隔,在这些间隔中选择参考数据和桶探测器数据,形成新的数据序列。最后,用新形成的数据计算关联成像,可有效提升成像质量。为了衡量目标的成像质量,重建图像的 SNR 依然由(10)式给出。

图 13 为没有采用改进算法和采用改进算法的成像结果,前 3 行是实际环境下的成像结果,第 4 行是实验室环境下的成像结果。图 13(a)为没有抖动干扰情况下的成像结果,图 13(b)为所有采样数据的关联成像结果,图 13(c)为采用改进算法的成像结果,其中,短间隔的数量 $m=20$,对应的小样本采样次数 $N/m=200$ 。为验证改进算法的有效性,在真实环境中进行了多次关联成像实验。可以发现,抖动环境下物体的成像图案完全失真,无法继续区分,而改进的成像算法能明显改善重建目标的质量,

用改进算法重建的图 13(c1)~图 13(c3)SNR 比无抖动时分别增加了 157%、109%和 93%。此外,还进行了实验室环境下的不规则抖动实验,与图 13(b3)抑制前的结果相比,采用抑制算法的成像结果能清晰分辨目标,如图 13(c3)所示,且 SNR 提高了 174%。最后将该算法与参考文献[53]中提到的互相关算法进行了对比,结果如图 13(c1)~图 13(c4)和图 13(d1)~图 13(d4)所示,可以发现,直接检测算法重建图像的分辨率更高。综上所述,基于成像时间特性的改进算法是解决探测抖动导致图像失真的有效算法,且相比无抖动时,目标重构的 SNR 至少可以提高 93%。在关联成像的应用中,不可避免地会遇到不稳定环境,如抖动的成像平台及信道扰动导致的光斑随机漂移,而该改进算法可以有效提高成像分辨率和 SNR,同时能解决由物体运动导致的图像质量下降问题,对遥感等关联成像的应用具有重要意义。

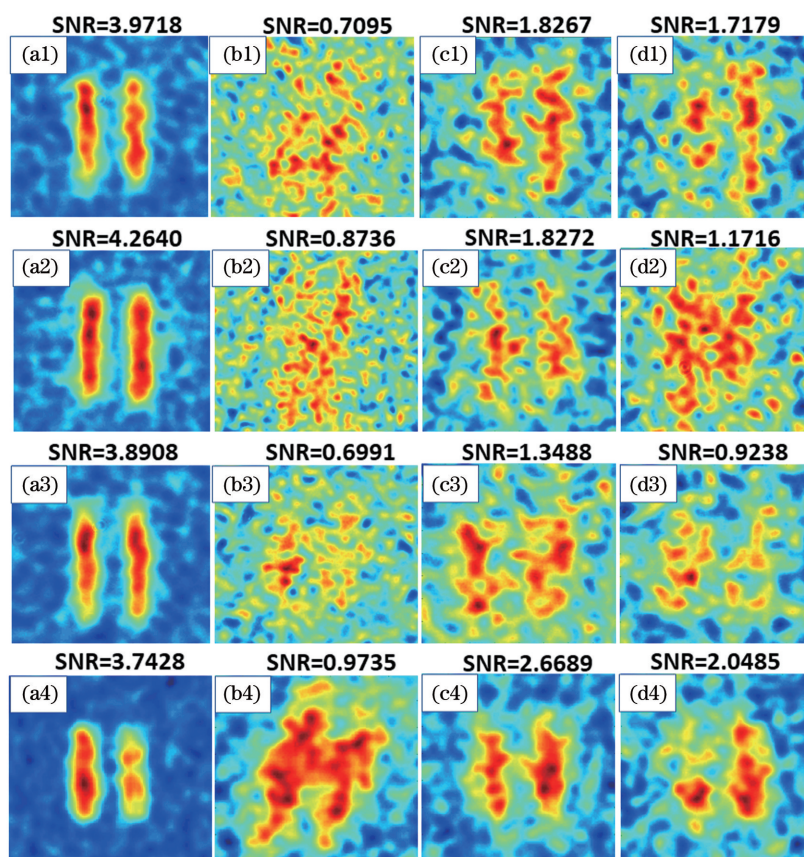


图 13 目标的重建图像。(a)无抖动情况;(b)存在抖动的情况;(c)改进算法的成像结果;(d)互相关算法的成像结果^[52]

Fig. 13 Reconstructed image of the target. (a) No trembling; (b) with trembling; (c) imaging result of the improved algorithm; (d) imaging result of the cross-correlation algorithm^[52]

5 结 论

介绍了近场气流影响的关联成像相关研究,首

先,通过气流影响的平均光程差模型给出了近场气流的相位,建立了受气流影响的光传输和关联成像模型,并进行了相关实验分析。然后,将该模型扩展

到高风速区域,通过模拟计算得到超声速风场对成像结果的影响规律,并定量分析了不同风速和气流边界层厚度影响下成像质量的变化情况,对比发现,气流对成像质量的影响比湍流更大。考虑到实际近场气流环境下的成像,详述了基于关联成像时间特性的抖动抑制算法,通过小样本成像算法提升目标成像的分辨率和 SNR,且成像 SNR 比无抖动干扰时至少提升了 93%。风导致的信道气流是关联成像面向应用的重要影响因素,如机载成像时的近场气流干扰,本研究结果可为机载关联成像提供信道气流的干扰评估,对关联成像的应用有重要的指导意义。但目前气流缺乏类似大气湍流的成熟功率谱模型,之后还需侧重于气流谱及基于气流谱成像模型的研究,以更好地探究气流内在因素的扰动,如气流尺度、时间变化。

参 考 文 献

- [1] D'Angelo M, Kim Y H, Kulik S P, et al. Identifying entanglement using quantum ghost interference and imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 92(23): 233601.
- [2] Chen Z H, Zhou Y, Shen J T. Correlation signatures for a coherent three-photon scattering in waveguide quantum electrodynamics[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(9): 2559-2562.
- [3] Chen Z H, Zhou Y, Shen J T. Dissipation-induced photonic-correlation transition in waveguide-QED systems[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(5): 053805.
- [4] Zhou Y, Chen Z H, Wang L H, et al. Efficient two-photon excitation by photonic dimers[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(3): 475-478.
- [5] Chen Z H, Zhou Y, Shen J T. Entanglement-preserving approach for reservoir-induced photonic dissipation in waveguide QED systems[J]. *Physical Review A*, 2018, 98(5): 053830.
- [6] Chen Z, Zhou Y, Shen J T. Photon antibunching and bunching in a ring-resonator waveguide quantum electrodynamics system[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(14): 3313-3316.
- [7] D'Angelo M, Valencia A, Rubin M H, et al. Resolution of quantum and classical "ghost" imaging [C]//2005 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 22-27, 2005, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2005, 1: 566-568.
- [8] Abouraddy A F, Saleh B E A, Sergienko A V, et al. Role of entanglement in two-photon imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2001, 87(12): 123602.
- [9] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, et al. Optical imaging by means of two-photon quantum entanglement[J]. *Physical Review A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1995, 52(5): R3429-R3432.
- [10] 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.
- [11] Bo Z W, Gong W L, Li E R, et al. Multiple-input ghost imaging via sparsity constraints with thermal light[J]. *Applied Physics Express*, 2014, 7(10): 102501.
- [12] Cao D Z, Xiong J, Wang K G. Geometrical optics in correlated imaging systems[J]. *Physical Review A*, 2005, 71: 013801.
- [13] Gao Y, Bai Y F, Fu X Q. Point-spread function in ghost imaging system with thermal light[J]. *Optics Express*, 2016, 24(22): 25856-25866.
- [14] Yang C, Wang C L, Guan J, et al. Scalar-matrix-structured ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 281-285.
- [15] Wang W, Wang Y P, Li J H, et al. Iterative ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5150-5153.
- [16] Sprigg J, Peng T, Shih Y. Super-resolution imaging using the spatial-frequency filtered intensity fluctuation correlation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 38077.
- [17] Gong W L. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 234-237.
- [18] 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.
- [19] Feng W, Zhao X D, Tang S J, et al. Compressive computational ghost imaging method based on region segmentation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(10): 101105.
冯维, 赵晓冬, 汤少靖, 等. 基于区域分割的压缩计算鬼成像方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(10): 101105.
- [20] Zhao M, Wang Y, Tian Z M, et al. Method of push-broom underwater ghost imaging computation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(16): 161101.
赵明, 王钰, 田芷铭, 等. 水下推扫式计算鬼成像的

- 方法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(16): 161101.
- [21] Morris P A, Aspden R S, Bell J E C, et al. Imaging with a small number of photons[J]. Nature Communications, 2015, 6: 5913.
- [22] Shi X H, Li H X, Bai Y F, et al. Negative influence of detector noise on ghost imaging based on the photon counting technique at low light levels [J]. Applied Optics, 2017, 56(26): 7320-7326.
- [23] Yang Y, Shi J H, Cao F, et al. Computational imaging based on time-correlated single-photon-counting technique at low light level [J]. Applied Optics, 2015, 54(31): 9277-9283.
- [24] Liu X L, Shi J H, Wu X Y, et al. Fast first-photon ghost imaging [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 5012.
- [25] Sun L, Shi J H, Wu X Y, et al. Photon-limited imaging through scattering medium based on deep learning[J]. Optics Express, 2019, 27(23): 33120-33134.
- [26] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y. Turbulence-free ghost imaging[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(11): 111115.
- [27] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y H. Positive-negative turbulence-free ghost imaging [J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(13): 131114.
- [28] Chen Z Y, Cui S W, Zhang L, et al. Measuring the intensity fluctuation of partially coherent radially polarized beams in atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18278-18283.
- [29] Liu X H, Pu J X. Investigation on the scintillation reduction of elliptical vortex beams propagating in atmospheric turbulence [J]. Optics Express, 2011, 19(27): 26444-26450.
- [30] Cheng W, Haus J W, Zhan Q W. Propagation of vector vortex beams through a turbulent atmosphere[J]. Optics Express, 2009, 17(20): 17829-17836.
- [31] Huang Y P, Zeng A P, Gao Z H, et al. Beam wander of partially coherent array beams through non-Kolmogorov turbulence[J]. Optics Letters, 2015, 40(8): 1619-1622.
- [32] Liu X L, Wang F, Wei C, et al. Experimental study of turbulence-induced beam wander and deformation of a partially coherent beam [J]. Optics Letters, 2014, 39(11): 3336-3339.
- [33] Wang Q, Zhu Y, Zhang Y X. Precision wander model of beam wave in the weak to strong turbulence of atmosphere [J]. Optics Letters, 2017, 42(16): 3213-3216.
- [34] Zhang P L, Gong W L, Shen X, et al. Correlated imaging through atmospheric turbulence[J]. Physical Review A, 2010, 82(3): 033817.
- [35] Chen M L, Li E R, Gong W L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. Optics and Photonics Journal, 2013, 3(2): 83-85.
- [36] Tan W, Huang X W, Nan S Q, et al. Effect of the collection range of a bucket detector on ghost imaging through turbulent atmosphere [J]. Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision, 2019, 36(7): 1261-1266.
- [37] Tan W, Huang X W, Nan S Q, et al. Ghost imaging through inhomogeneous turbulent atmosphere along an uplink path and a downlink path [J]. OSA Continuum, 2020, 3(5): 1222-1231.
- [38] Shi D F, Fan C Y, Zhang P F, et al. Two-wavelength ghost imaging through atmospheric turbulence[J]. Optics Express, 2013, 21(2): 2050-2064.
- [39] Ding H L, Yi S H, Zhu Y Z, et al. Experimental investigation on aero-optics of supersonic turbulent boundary layers[J]. Applied Optics, 2017, 56(27): 7604-7610.
- [40] Gordeyev S, Jumper E, Hayden T E. Aero-optical effects of supersonic boundary layers [J]. AIAA Journal, 2012, 50(3): 682-690.
- [41] Cress J, Gordeyev S, Post M, et al. Aero-optical measurements in a turbulent, subsonic boundary layer at different elevation angles[C]//39th Plasmadynamics and Lasers Conference, June 23-26, 2008, Seattle, Washington. Reston: AIAA, 2008: 1-14.
- [42] Huang X W, Shi X H, Nan S Q, et al. Investigation on the behavior of a laser propagating through a random environment induced by wind [J]. Optics Express, 2019, 27(7): 9420-9428.
- [43] Dipankar A, Marchiano R, Sagaut P. Trajectory of an optical vortex in atmospheric turbulence [J]. Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2009, 80(4): 046609.
- [44] Lochab P, Senthilkumaran P, Khare K. Propagation of converging polarization singular beams through atmospheric turbulence [J]. Applied Optics, 2019, 58(23): 6335-6345.
- [45] Luo Y J, Ji X L, Yu H. Influence of coma aberration on aperture averaged scintillations in oceanic turbulence[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 46-55.
- [46] Huang X W, Bai Y F, Fu X Q. Stable and secure image transmission based on temporal ghost imaging [J]. Journal of Optics, 2019, 21(5): 055701.
- [47] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost

- imaging in the time domain[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167-170.
- [48] Yang D Y, Chang C, Wu G H, et al. Compressive ghost imaging of the moving object using the low-order moments[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(21): 7941.
- [49] Huang X W, Nan S Q, Tan W, et al. Ghost imaging influenced by a supersonic wind-induced random environment[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(5): 1009-1012.
- [50] Xu G J, Song Z H. Amplitude fluctuations for optical waves propagation through non-Kolmogorov coronal solar wind turbulence channels[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8566-8580.
- [51] Yu L, Hu B B, Zhang Y X. Intensity of vortex modes carried by Lommel beam in weak-to-strong non-Kolmogorov turbulence [J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19538-19547.
- [52] Huang X W, Nan S Q, Tan W, et al. Ghost imaging for detecting trembling with random temporal changing[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(6): 1354-1357.
- [53] Sun S, Gu J H, Lin H Z, et al. Gradual ghost imaging of moving objects by tracking based on cross correlation[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(22): 5594-5597.