

关联成像应用及其最新进展

侯明轩^{1,2}, 侯昌伦^{1,2*}¹杭州电子科技大学碳中和新能源研究院, 浙江 杭州 310018;²杭州电子科技大学电子信息学院, 浙江 杭州 310018

摘要 关联成像又称鬼成像,是一种新型的成像方式。它对探测得到的携带有物体光强信息的信号光与参考光路的测量矩阵进行符合运算,利用两个光路之间的二阶强度关联特性来获得物体的图像信息。不同于传统的成像方式,关联成像具有抗噪声能力强、成像方式多样等优势,可以减小散射介质对光信号的扰动和衰减所带来的影响。自1995年第一个鬼成像实验实现以来,鬼成像一直是经典物理和量子物理领域最热门的研究课题之一。主要概述鬼成像的发展历程和理论原理,讨论最近国内外科研人员在鬼成像应用方面的探索与实践。

关键词 鬼成像; 相关成像; 计算成像; 图像加密; 激光雷达; 散射; 三维成像

中图分类号 O439 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP212615

Application of Correlation Imaging and Its Latest Progress

Hou Mingxuan^{1,2}, Hou Changlun^{1,2*}

¹*Institute of Carbon Neutrality and New Energy, Hangzhou Dianzi University,
Hangzhou 310018, Zhejiang, China;*

²*School of Electronics and Information, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China*

Abstract Correlation imaging, also known as “ghost imaging”, is a new imaging method. It calculates the coincidence between a detected light signal carrying the light intensity information of an object and the measurement matrix of the reference light path; the image information of the object is obtained by using the second-order intensity correlation characteristics between the two light paths. Different from traditional optical imaging, correlation imaging has the advantages of strong anti-noise ability and various imaging methods, which can reduce the influence of scattering medium on the disturbance and attenuation of optical signals. Since the first ghost imaging experiment in 1995, it has become one of the most popular research topics in classical and quantum physics. In this article, the history of ghost imaging development, its theoretical principle, and the latest research on ghost imaging applications are presented.

Key words ghost imaging; correlation imaging; computational imaging; image encryption; lidar; scattering; 3D imaging

1 引 言

光学成像是基本的物理现象。基于光场的强度分布测量,人们发明了照相机、显微镜、投影仪等设备,这些设备广泛应用于我们的日常生活中。在古典光学理论中,菲涅耳等通过机械波理论更好地解释了惠更斯提出的光的波动理论,该理论认为光是机械振动在特殊介质“以太”中传播的波。麦克斯韦建立了经典电磁理论,解释了光是一种波长很短的电磁波,该理论作为光的动力学理论基础,反映了波的本性。20世纪80年代开始,研究学者进行理论和实验,研究

非线性晶体在自发参量下转换过程产生的双光子纠缠态,实现了全新的成像方式,即关联成像,也称鬼成像(GI)。

1995年,Pittman等^[1]利用纠缠光子对实现了第一个鬼成像实验。之后人们对鬼成像的成像方式和鬼成像的应用进行了广泛的研究,以改善成像质量。2002年,罗切斯特大学的Bennink等^[2]利用随机旋转的反光镜使激光束随机指向,给激光束引入随机相位变化,模拟出经典光源,模拟出的经典光源不具备任何量子纠缠的性质,首次使用经典光源实现鬼成像实验。2006年,Scarcelli等^[3]将激光照射在旋转的

收稿日期: 2021-09-27; 修回日期: 2021-10-23; 录用日期: 2021-11-10; 网络首发日期: 2021-11-22

通信作者: hou_cl@hdu.edu.cn

毛玻璃上,产生赝热光源,完成了鬼成像实验。2008年,Shapiro^[4]提出了仅包含物体光路的单光路鬼成像,利用空间光调制器极大地简化了实验系统的配置,并将其命名为计算鬼成像(CGI)。Khamoushi等^[5]利用数字投影仪,通过去除激光器和空间光调制器进一步简化鬼成像系统。目前,不仅在成像方式上,科研人员已经开发了很多鬼成像方案,用以提高成像质量和减少测量步骤。Ferri等^[6]提出了差分鬼成像(DGI),通过改进成像算法减去成像过程中的噪声项,可以有效提高鬼成像的信噪比。Sun等^[7]提出归一化鬼成像(NGI),通过调整传统鬼成像算法中的权重因子,可以达到DGI的成像效果。同样,通过改进算法来提高鬼成像的成像质量的还有伪逆鬼成像(PGI)^[8-9]、标量矩阵结构鬼成像(SMGI)^[10]、迭代去噪鬼成像^[11]、压缩感知鬼成像(CSGI)^[12-13]、渐进鬼成像^[14]、即时鬼成像(IGI)^[15]、Hadamard鬼成像^[16]、傅里叶鬼成像(FGI)^[17]等。2016年,Ryczkowski等^[18]通过考虑光学中的时空对偶性,提出了时域鬼成像(TGI),Devaux等^[19]证实了计算时域鬼成像(CTGI)的可行性,CTGI有效地消除了探测器带宽对鬼成像系统的限制,这代表着鬼成像的概念已经从空间域扩展到时间域。随着深度学习的发展,目前基于深度学习的鬼成像具有高效、鲁棒性高等特点^[20-24]。

在成像系统所使用的光源上,研究人员不断探索,除了常见的纠缠双光子或是激光器、空间光调制器产生的赝热光,还有LED^[25]、真热光^[26]、投影仪结构光^[27]、X射线^[28-30]、太赫兹^[31]、电子^[32]、多光谱^[33]等,被用在不同领域实现鬼成像。

2 鬼成像基本原理

如图1所示,经典光源通过分束器(BS)后分成两束,两束光源强度相等,分别称为参考路与信号路。一束光源经过信号系统后,由探测器 u_1 接收;另一束光源经过参考系统后,由探测器 u_2 接收。然后对两路探

测器信号进行关联运算。线性系统具有叠加性,从线性系统角度分析,将整个过程简化为系统模型,其中的每个物理过程简化为一个变换模型,包括激励信号、系统函数、输出信号。如果一个光学系统在一定条件下满足线性时不变,系统函数由脉冲响应函数描述,可以将该系统作为线性光学系统来分析。 $E_s(x_s)$ 与 $E_r(x_r)$ 表示信号路与参考路的输出平面的光波复振幅,分别表示为

$$E_s(x_s) = \int h_s(x_s, x_0) E_0(x_0) dx_0, \quad (1)$$

$$E_r(x_r) = \int h_r(x_r, x_0) E_0(x_0) dx_0, \quad (2)$$

式中: x_0, x_s 和 x_r 为光源、信号路和参考路各个平面的横向位置坐标; $h_s(x_s, x_0)$ 和 $h_r(x_r, x_0)$ 表示信号路和参考路的系统函数(脉冲响应函数)。系统的输出平面的光场强度 $I_i(x_i)$ 为

$$I_i(x_i) = E_i^*(x_i) E_i(x_i). \quad (3)$$

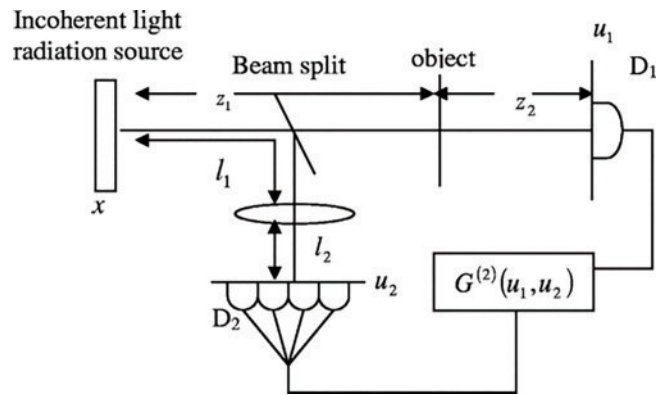


图1 经典光源鬼成像的原理^[37]

Fig. 1 Principle of typical light source ghost imaging^[37]

基于Glauber相干理论^[34-35],一阶互相关函数可以表示为

$$G^{(1)}(x_s, x_r) = \langle E_s^*(x_s) E_r(x_r) \rangle, \quad (4)$$

式中: $\langle \cdot \rangle$ 表示统计平均; $*$ 表示复共轭。二阶互相关函数可以表示为

$$G^{(2)}(x_s, x_r) = \langle E_s^*(x_s) E_r^*(x_r) E_s(x_s) E_r(x_r) \rangle = \langle E_s^*(x_s) E_s(x_s) \rangle \langle E_r^*(x_r) E_r(x_r) \rangle + \langle E_s^*(x_s) E_r(x_r) \rangle \langle E_r^*(x_r) E_s(x_s) \rangle = \langle I(x_s) \rangle \langle I(x_r) \rangle + |\langle E_s^*(x_s) E_r(x_r) \rangle|^2 = \langle I(x_s) \rangle \langle I(x_r) \rangle + |G^{(1)}(x_s, x_r)|^2. \quad (5)$$

热光场空间不同位置的光场强度不完全独立,且不同位置处的关联特性由 $|G^{(1)}(x_s, x_r)|^2$ 决定, $|G^{(1)}(x_s, x_r)|^2$ 也是恢复待测物体图像的关键信息。当 $G^{(1)}(x_s, x_r) = 0$ 时,即 $\langle I(x_1) I(x_2) \rangle = \langle I(x_1) \rangle \langle I(x_2) \rangle$,表示热光源光场两个不同空间位置完全无关联;当 $G^{(1)}(x_s, x_r) = [\langle I(x_1) \rangle \langle I(x_2) \rangle]^{\frac{1}{2}}$ 时,即 $G^{(2)}(x_s, x_r) = \langle I_s(x_s) I_r(x_r) \rangle = 2 \langle I(x_s) \rangle \langle I(x_r) \rangle$,表示热光源光场两个不同空间位置完全一阶相干;当 $G^{(1)}(x_s, x_r)$ 等于

其他数值时,表示二阶互相关函数含有一阶相干信息,可以用来恢复待测物体图像^[36]。

3 鬼成像应用现状

鬼成像发展到今天,研究人员努力的方向离不开两点:一是为了提高鬼成像的成像质量,降低鬼成像采集量;二是为了扩展鬼成像的发展领域。所有努力的方向都是为了鬼成像能进一步实现应用。为了鬼成像的转型,已经有很多科研人员在鬼成像的应用上做了探索。

3.1 基于鬼成像的光学加密

在网络信息技术飞速发展的今天,信息安全的保障技术尤为重要。通过对信息进行加密,即使信息被窃,窃取者也无法破译得到信息内容。在市场上已有的加密设备中,大多数的加密结果都是以振幅的形式出现的,这就意味着在对文件或资料加密的时候需要另外的装置,从而增加了系统的复杂程度。鬼成像作为一种图像式的加密设备,不用涉及太过繁琐的辅助设备,对传统加密设备繁琐的流程进行了改善。基于鬼成像的光学加密技术具有鲁棒性强、适用范围广、速度快等优点,在信息安全领域具有广泛的应用。2010年,Clemente等^[38]为鬼成像在信息安全光学加密领域开辟了先河,第一次将鬼成像与光学加密结合。2016年,Wu等^[39]利用鬼成像系统的位置复用,提出了一种基于计算鬼成像和位置复用的光学多图像加密方案。该方案将不同衍射距离计算鬼成像的每个原始图像加密为一个强度矢量,所有强度矢量叠

加在一起生成密文,图像数量的增加也导致计算量增大。2018年,Li等^[40]提出一种基于行扫描压缩鬼成像的提升小波变换和异或运算的多图像加密方法。2019年,Zhang等^[41]提出了一种基于鬼成像的结合公钥密码和Hadamard基模式的多图像加密方案,提高了加密图像的重建质量和安全性,解决了图像间的串扰问题。

鬼成像作为一种对称的光学加密系统,将待加密图像视为明文,将参考光作为解密密钥,将物光路探测器视为密文,鬼成像系统的安全性主要取决于密钥,且加密密钥与解密密钥相同,因此依赖性很强。基于鬼成像的光学加密方案如图2所示,文献^[41]提出的基于鬼成像的加密方案将置换的Hadamard基模式应用于鬼成像,设置多条光路,将不同排列的Hadamard基图案照射在不同的物体上,用桶探测器收集所有物体的强度值,不同排列的Hadamard基模式被用作不同图像解密的密钥,继而不会产生图像之间的串扰。

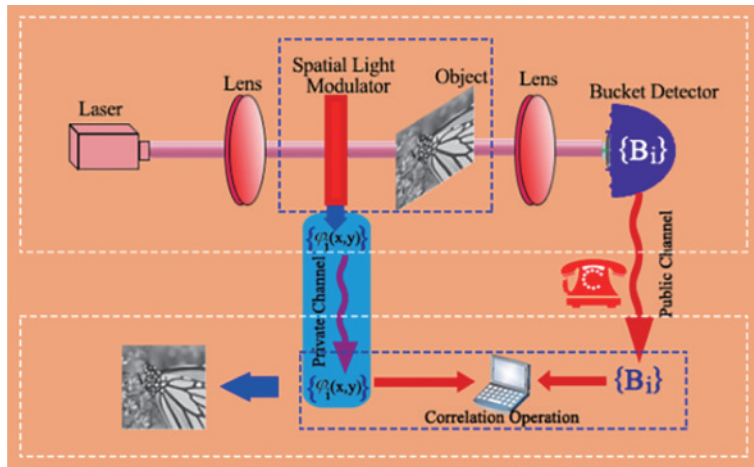


图2 基于鬼成像的光学加密方案^[41]

Fig. 2 Optical encryption scheme based on ghost imaging^[41]

基于鬼成像和公钥密码的多图像加密方法如图3所示,加密过程分为5个步骤。第一步,设置多条光路,在每条光路依次设置空间光调制器、待加密图像和

透镜,使每条光路集中在桶探测器上。第二步,控制空间光调制器产生的Hadamard基图案,为了对加密Hadamard基模式执行加扰操作并将其用作密钥,加扰

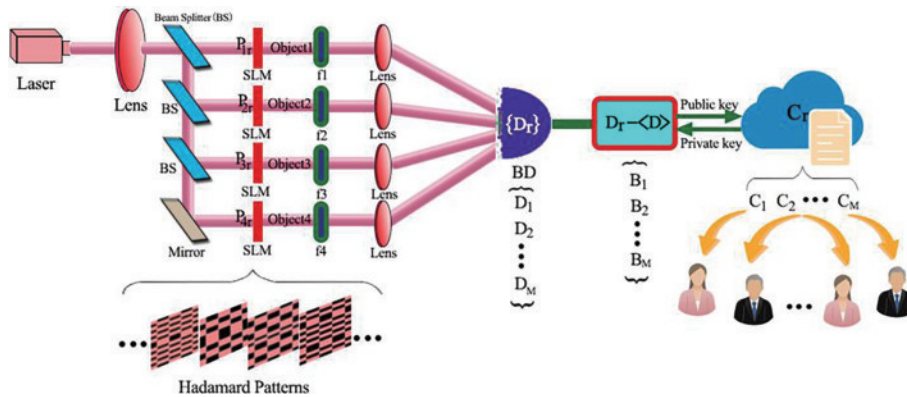


图3 多图像加密示意图^[41]

Fig. 3 Schematic of multiple-image encryption^[41]

的 Hadamard 基模式图案用于调制要加密的图像,所有图像的强度值 D_r 都是使用桶探测器进行测量的。第

三步,重复 M 次第二步,由桶探测器获得所有数据。

$$D_r = \int [P_{1r}(x, y) f_1(x, y) + P_{2r}(x, y) f_2(x, y) + \dots + P_{Nr}(x, y) f_N(x, y)] dx dy = A_{1r} + A_{2r} + \dots + A_{Nr} = \sum_{n=1}^N A_{nr}, \quad (6)$$

式中: N 为加密图像的数量; P_{Nr} 为执行加扰操作后的 Hadamard 基模式。第四步,计算 $B_r = D_r - \langle D_r \rangle$, $\langle D_r \rangle$ 指的是所有检测到数据 $\{D_r\}$ 的平均值。第五步,利用 RSA 公钥密码算法对 $\{B_r\}$ 进行加密,得到密文 $\{C_r\}$ 。密文表示为

$$\{C_r\} = \{R(D_{1r} - \langle D \rangle), R(D_{2r} - \langle D \rangle), \dots, R(D_{Mr} - \langle D \rangle)\}, \quad (7)$$

式中: $R(\bullet)$ 表示 $\{B_r\}$ 使用 RSA 算法加密; M 表示测量次数。在密钥分发和传输过程中,发送方将密文 $\{C_r\}$ 传输给接收方,接收方用自己的私钥对其进行解密,相较于传统的公钥密码体制,解决了质量低的问题。随机照明模式提高了系统的安全性、可行性和可靠性。

3.2 基于鬼成像的激光雷达

鬼成像具有高探测灵敏度,引起了人们对其在遥感技术应用上的兴趣,基于鬼成像的激光雷达逐渐发展起来^[42-45]。利用目标的先验信息,稀疏约束鬼成像

(GISC) 雷达^[43,46]是一种新型凝视成像激光雷达机制,可以用明显低于奈奎斯特速率的采样率获得真实空间中的高分辨率 3D 图像,具有高探测灵敏度和高抗噪能力。与传统的激光成像雷达技术完全不同, GISC Lidar 建立在辐射场的高阶相干性理论上,通过光子的涨落特性和计算重构的方式获取目标的图像信息^[47]。

典型的 GISC Lidar 系统的光学结构如图 4 所示,整个光学系统分为两部分,即发射系统和接收系统。发射系统在赝热光源面处产生一个脉冲式时空二维随机散斑场,经分光板后分成两束,通过发射镜,赝热光源面处的散斑场成像于待测目标上。接收系统中的接收镜将目标散射回的光能信号会聚于单像元的光电倍增管(PMT)上,通过高速采集卡采集 PMT 检测到的一序列电压信号,结合高速采集卡记录的电压信号与 CCD 所记录的空间强度分布进行关联图像重建,在凝视的情况下便可以获得待测目标的表面三维强度分布图像^[47]。

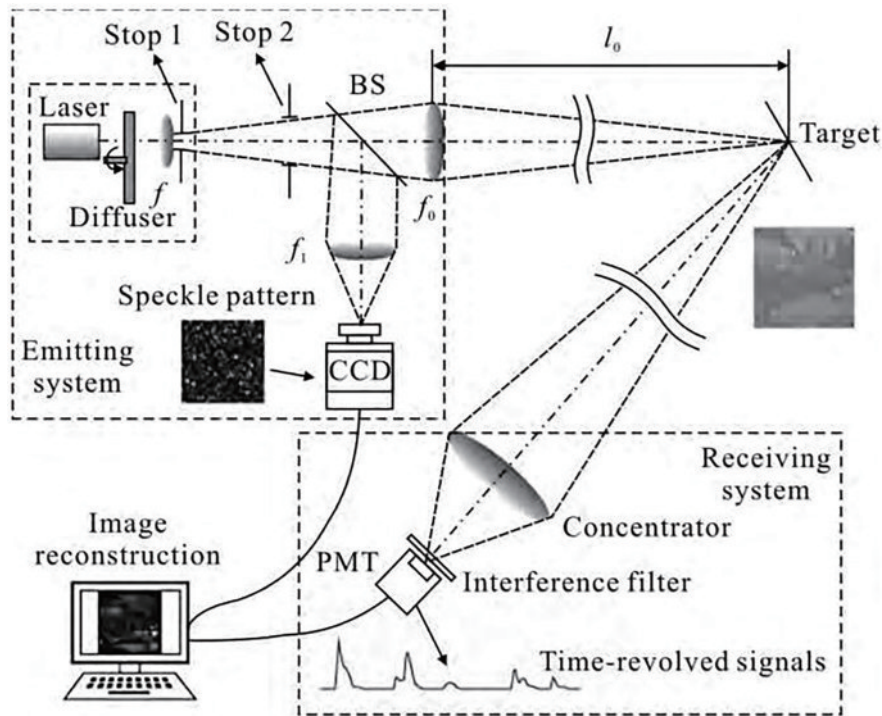


图 4 GISC Lidar 的光学原理^[47]

Fig. 4 Optical principle of GISC Lidar^[47]

传统的 GISC Lidar 在实际遥感应应用中需要大量的测量,致使成像速度减慢,并且由于相对运动,存在成像模糊的问题^[48-50]。解决方案是光电跟踪技术的运

动补偿^[51],但该技术限制了聚焦区域为中心的成像视场,从而导致无法实现连续测量。针对以上描述的问题,中国科学院上海光学精密研究所关于相对被测目

标沿/垂直雷达视线方向运动提出了相应的解决方案^[48-50]。Deng 等^[52]分析了背景光环境下鬼成像激光雷达的性能。2019 年, Ma 等^[53]提出基于稀疏约束的推扫扫描鬼成像激光雷达, 该雷达利用平台与目标场景之间的相对运动, 沿扫描方向连续对静止目标场景进行成像, 简化了成像系统, 减少了采样数量。

推扫式 GISC 激光雷达^[53]如图 5(a)所示。安装在移动平台上的推扫式 GISC 雷达系统发射预定和校准的矩

形散斑图案, 用以覆盖目标场景的特定区域。随后, 接收系统通过正交柱面透镜组将矩形散斑图案聚焦到线阵列检测器处。飞行方向上的成像区域被分成许多条。线阵列检测器的每个像素的信号对应于目标区域的不同条带, 当系统沿着飞行路径进行推扫扫描时, 目标区域的每个条带可以被线性检测器的每个像素顺序扫描和采样多次, 使发射系统和接收系统同步, 可以实现沿飞行方向的连续感测。

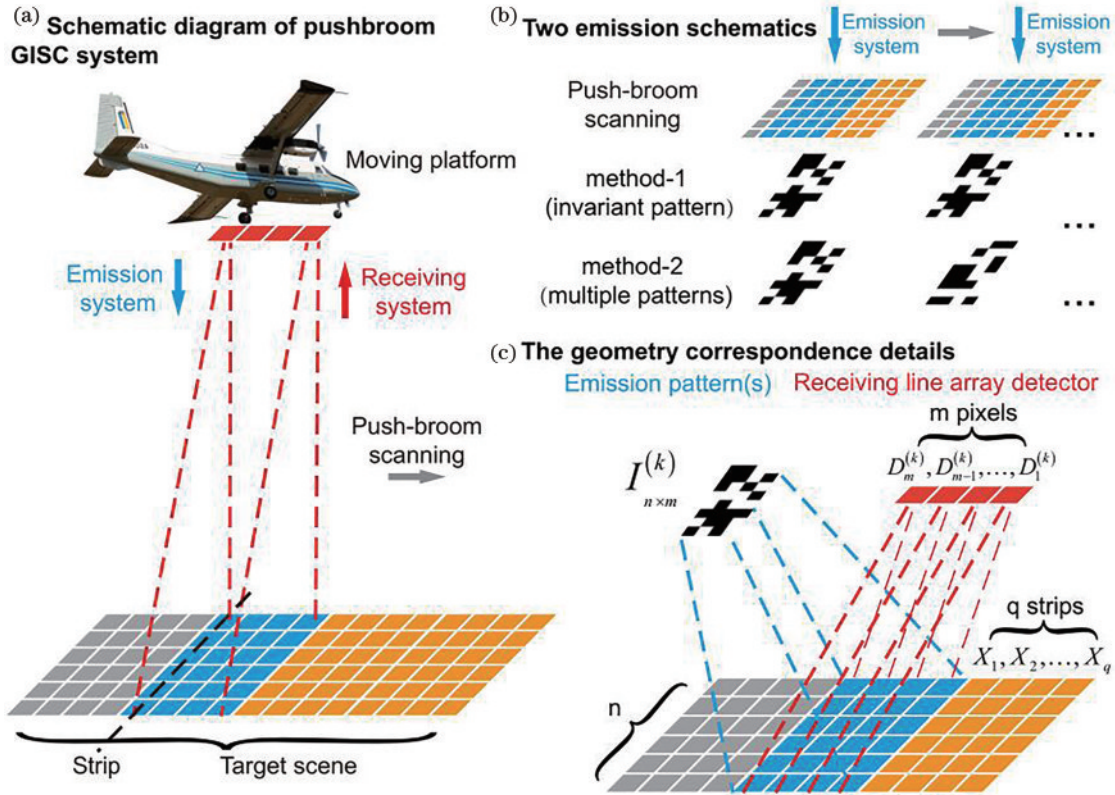


图 5 推扫式 GISC Lidar 系统原理图^[53]。(a)推扫式 GISC Lidar 系统原理图; (b)两种发射示意图; (c)几何对应细节
Fig. 5 Schematic of push-broom GISC Lidar system^[53]. (a) Schematic of push-broom GISC Lidar system; (b) two emission schematics; (c) geometry correspondence details

未来, 基于鬼成像的 GISC Lidar 解决快速成像、运动模糊等, 依然是该方向面向实际应用转型需要重点攻克的问题。

3.3 基于鬼成像的散射介质成像

对于传统成像技术, 光束经过散射介质传播后会产生光强闪烁、光束飘逸和到达角起伏等效应, 造成目标成像的信噪比降低。穿透介质成像一直以来是光学成像领域的重大挑战, 散射介质的质量浓度较高时, 甚至无法得到物体的像, 严重阻碍成像技术的发展。热光关联成像作为一种新的成像技术, 属于二阶强度关联成像, 可以对散射有一定抑制作用, 且光路简单、成本低, 为获得散射介质中清晰的物体图像提供了新的思路^[54-56]。

散射介质成像, 例如水下或水雾环境下的成像等, 具有很多应用价值。水下成像对水下目标的探测侦查、海洋工程的发展具有重要意义。Gong 等^[57]率先提

出了散射介质下的鬼成像, 证实了散射介质会使得鬼成像的信噪比降低。Bina 等^[58]通过使用反向散射结构的差分鬼成像来重建浸没在浑浊介质中的物体。Tajahuerce 等^[59]演示了通过动态散射介质的计算鬼成像。Zhao 等^[60]提出了一种被动鬼成像方案, 利用焦散照明在水下弱光环境探测大物体。Le 等^[61]研究了不同浊度和光照角度下的鬼成像。Zhang 等^[62]分析了海洋湍流对水下鬼成像可见度的影响, 结果表明, 海洋湍流作用下的鬼成像质量与湍流强度和光的传播距离有关, 在强烈的海洋湍流中, 保持鬼成像的质量需要在相对较小的传播距离条件下。Zhang 等^[63]从理论和实验上分析了海水对鬼成像质量的影响, 得出鬼成像对海水环境干扰具有鲁棒性, 具有长距离水下成像的潜力的结果。Luo 等^[64]提出有形洛伦兹源的计算鬼成像方案, 该方案可以有效地提高水下鬼成像质量。

文献[61]提出的水下鬼成像方案装置如图 6 所

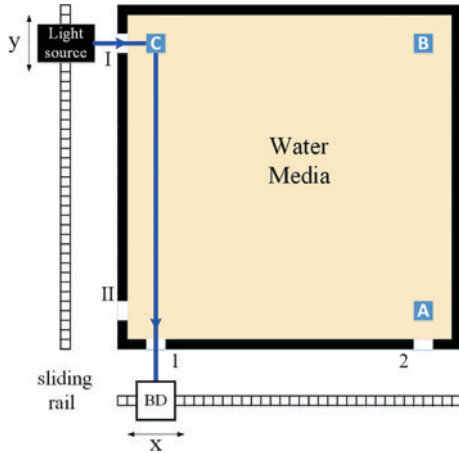


图 6 水下计算鬼成像的实验装置^[61]

Fig. 6 Experimental setup for underwater computational ghost imaging^[61]

示,通过在数字微镜器件(DMD)上应用伪随机二进制照明,产生一种空间非相干光束,数字微镜器件的发光二极管位于滑轨上。光束照射在不同位置(A、B和C)的反射交叉物体上,同样位于滑轨上的桶探测器(BD)收集来自物体的衍射光子,最后通过关联运算获得物体的图像信息。该实验装置可分析水下鬼成像性能,将物体分别放置在位置A、B和C上,光源和桶探测器滑动到相应的位置以完成不同浊度和光照角度的鬼成像。实验结果证明,CGI可以利用浊度变化来减弱水介质的影响,可以用来模拟远距离水下成像,证明了CGI在水下条件下的可能效用。

3.4 基于鬼成像的三维成像

与2D图像相比,三维成像在采集被测物体特征能力上更具优势。近年来,基于鬼成像的三维成像系统逐渐发展起来。2013年,Sun等^[65]利用光度立体理论成功实现了基于CGI系统的三维图像。2016年,Sun等^[66]提出了一种改进的飞行时间三维成像系统,使用压缩传感技术减少采集时间。Gong等^[46]提出了一个基于激光雷达的三维鬼成像系统,即使在奈奎斯特极限以下,距离三维场景1 km也可以全局测量稳定重建。2019年,Qian等^[67]提出一种基于利用表面法线自适应测量物体三维信息的方法,该方法根据表面发现的变化用不同空间分辨率的图案照亮物体表面区域,可有效降低采样数量。Soltanlou等^[68]利用单像素探测器在散射介质中进行三维成像,通过将光度立体法应用于重建的二维图像来获取三维形状,该技术对散射具有鲁棒性。2020年,Bo等^[69]提出一种新的基于时间鬼成像的焦平面三维成像方法,该方法利用时间鬼成像优点,使用慢积分相机在顺序泛光照明和焦平面检测的框架内进行三维表面成像。Huang等^[70]将飞行时间(TOF)应用到傅里叶鬼成像中,提出三维傅里叶鬼成像,结果表明其在去除网状物方面具有潜在优势。

单像素三维成像系统如图7所示,系统由脉冲激光器和数字微镜器件提供时变结构光照明。高速光电二极管与菲涅耳透镜聚光系统结合使用,测量每个图案产生的反向散射强度。光电二极管采集到的信号经过低噪声放大器,使用高速数字转换器进行采样^[66]。

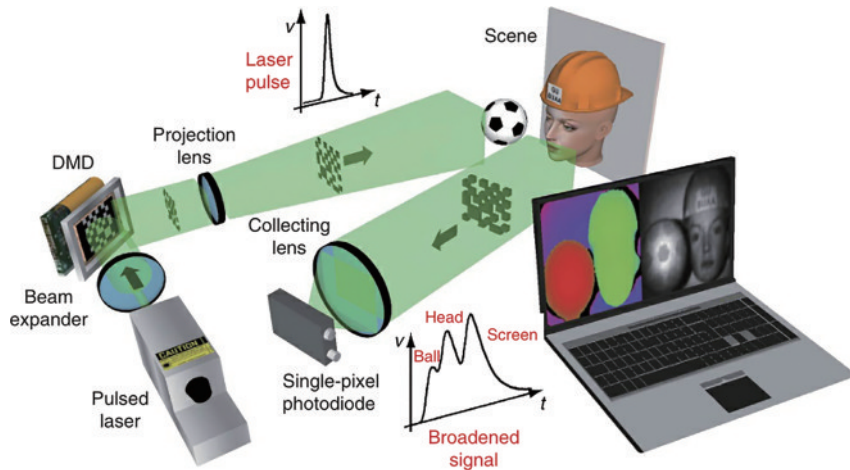


图 7 单像素三维成像系统^[66]

Fig. 7 Single pixel 3D imaging system^[66]

重构算法如图8所示。一个入射的激光脉冲[如图8(a)所示]从场景中反射,高速数字转换器将放大的模拟信号[如图8(b)所示]转换为离散数据点[如图8(c)所示],随后由计算机算法处理。利用时变信号中的离散采样强度点来重建二维图像,从而生成一个沿 x, y, z 方向的立方体图像[如图8(d)所示]。在立

方体图像中,每个横向像素(x, y 方向)沿纵轴(z 方向)具有强度分布[如图8(e)所示],强度分布与脉冲的时间形状、检测器响应时间、数据的读取、像素深度、物体的反射率有关。然后在每个像素位置对重建的时域信号应用三次样条插值,通过这些插值信号中找到最大值来确定场景的深度图[如图8(f)所示],并且通过

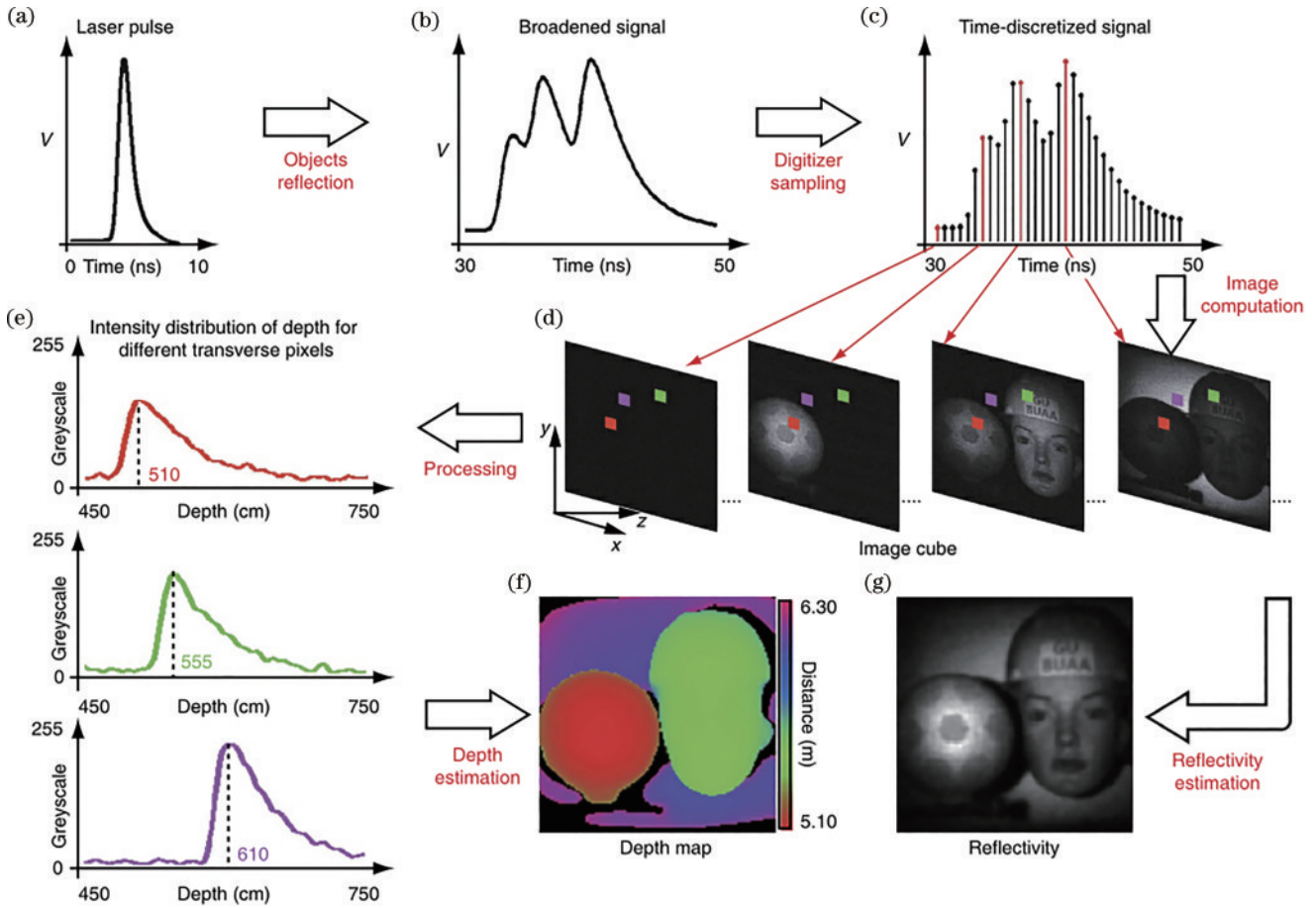


图 8 重构算法描述^[66]

Fig. 8 Overview of reconstruction algorithm^[66]

沿纵轴的平均立方体图像来计算场景反射率[如图 8(g)所示]。最后利用深度和反射率信息重建被测场景的三维图像,如图 9(e)所示,从三维重建图像可以明确区分物体信息。

除了上述提到的应用,科研人员还在鬼成像其他应用领域进行了探索,例如医学成像^[71-72]、显微^[73-74]、单像素^[75-78]、光谱学^[79]、细胞术^[80]、暗视^[81]等领域,都有一定的发展。

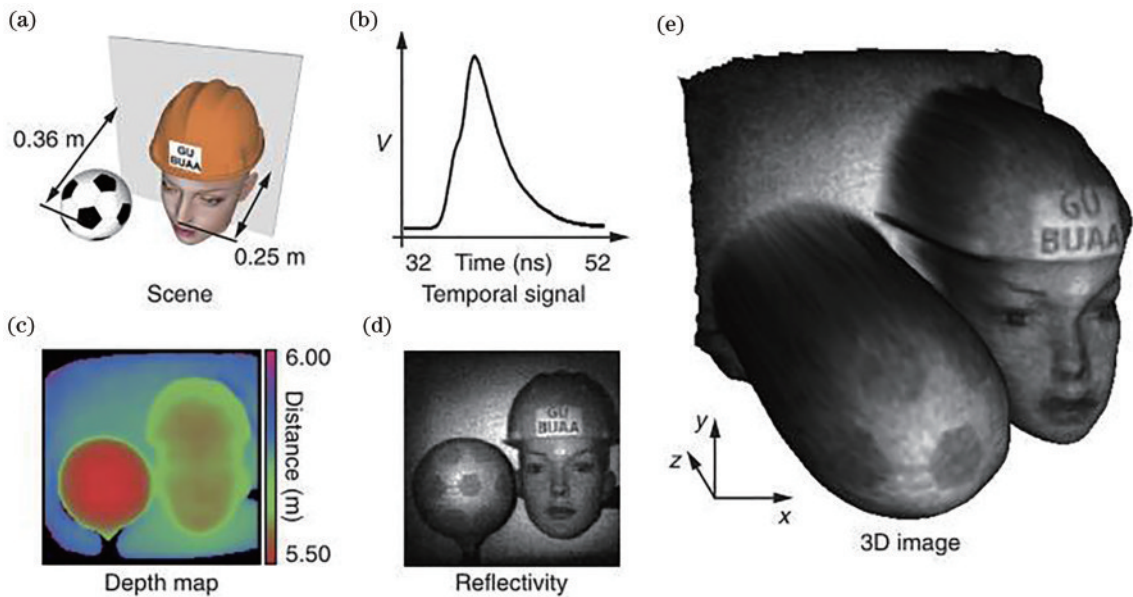


图 9 三维图像场景^[66]

Fig. 9 3D image of a scene^[66]

4 总结与展望

由于鬼成像系统的非局域性,在其成像方式上可以实现物像分离,近些年来受到科研人员的广泛关注,鬼成像在系统设计、可用光源、重建算法和拓展应用等方面逐步发展。目前,虽然已经有很多改进系统有效提高了鬼成像性能,但在数据的采集速度、处理速度、成像质量、信噪比等方面都还需要一定的提高。实际应用中成像环境复杂,影响因素较多,导致鬼成像由实验室到实际应用需要有足够的鲁棒性,因此距离实际应用还有一定的距离。鬼成像的成像机理和具体实现方式已经研究得比较成熟,未来鬼成像的发展将在与其他学科方向结合等方面寻找突破,在算法改进、信号的采集方式优化上逐步提高鬼成像系统的计算速度与成像质量,并结合应用场景克服环境噪声,使其具有更广阔的适用范围。

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-R3432.
- [2] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W. "Two-Photon" coincidence imaging with a classical source[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 89(11): 113601-113604.
- [3] Scarcelli G, Berardi V, Shih Y H. Can two-photon correlation of chaotic light be considered as correlation of intensity fluctuations? [J]. *Physical Review Letters*, 2006, 96(6): 063602.
- [4] Shapiro J H. Computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2008, 78(6): 061802.
- [5] Khamoushi S M M, Nosrati Y, Tavassoli S H. Sinusoidal ghost imaging[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(15): 3452-3455.
- [6] Ferri F, Magatti D, Lugiato L A, et al. Differential ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(25): 253603.
- [7] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, et al. Normalized ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [8] Zhang C, Guo S X, Cao J S, et al. Object reconstitution using pseudo-inverse for ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(24): 30063-30073.
- [9] Gong W L. High-resolution pseudo-inverse ghost imaging [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(5): 234-237.
- [10] Yang C, Wang C L, Guan J, et al. Scalar-matrix-structured ghost imaging[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 281-285.
- [11] Yao X R, Yu W K, Liu X F, et al. Iterative denoising of ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2014, 22(20): 24268-24275.
- [12] Wu H, Zhang X M, Gan J Q, et al. High-quality correspondence imaging based on sorting and compressive sensing technique[J]. *Laser Physics Letters*, 2016, 13(11): 115205.
- [13] Yu W K, Li M F, Yao X R, et al. Adaptive compressive ghost imaging based on wavelet trees and sparse representation[J]. *Optics Express*, 2014, 22(6): 7133-7144.
- [14] 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.
- [15] Yang Z, Zhang W X, Zhang M C, et al. Instant ghost imaging: improving robustness for ghost imaging subject to optical background noise[J]. *OSA Continuum*, 2020, 3(2): 391-400.
- [16] Wang L, Zhao S M. Fast reconstructed and high-quality ghost imaging with fast Walsh - Hadamard transform[J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 240-244.
- [17] Huang J, Shi D F, Yuan K E, et al. Computational-weighted Fourier single-pixel imaging via binary illumination [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 16547-16559.
- [18] Ryczkowski P, Barbier M, Friberg A T, et al. Ghost imaging in the time domain[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(3): 167-170.
- [19] Devaux F, Moreau P A, Denis S, et al. Computational temporal ghost imaging[J]. *Optica*, 2016, 3(7): 698-701.
- [20] Lucas A, Iliadis M, Molina R, et al. Using deep neural networks for inverse problems in imaging: beyond analytical methods[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2018, 35(1): 20-36.
- [21] Li Y, Xue Y, Tian L. Deep speckle correlation: a deep learning approach toward scalable imaging through scattering media[J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1181-1190.
- [22] Higham C F, Murray-Smith R, Padgett M J, et al. Deep learning for real-time single-pixel video[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8: 2369.
- [23] He Y C, Wang G, Dong G X, et al. Ghost imaging based on deep learning[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 6469.
- [24] Lyu M, Wang W, Wang H, et al. Deep-learning-based ghost imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 17865.
- [25] Xu Z H, Chen W, Penuelas J, et al. 1000 fps computational ghost imaging using LED-based structured illumination[J]. *Optics Express*, 2018, 26(3): 2427-2434.
- [26] Gatti A, Brambilla E, Bache M, et al. Ghost imaging with thermal light: comparing entanglement and classical correlation[J]. *Physical Review Letters*, 2004, 93: 093602.
- [27] Gao C, Wang X Q, Wang Z F, et al. Optimization of computational ghost imaging[J]. *Physical Review A*, 2017, 96(2): 023838.
- [28] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113902.
- [29] Yu H, Lu R H, Han S S, et al. Fourier-transform ghost imaging with hard X rays[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113901.
- [30] Zhang A X, He Y H, Wu L A, et al. Table-top X-ray ghost imaging with ultra-low radiation[J]. *Optica*, 2018, 5(4): 374-377.
- [31] Stantchev R I, Sun B Q, Hornett S M, et al.

- Noninvasive, near-field terahertz imaging of hidden objects using a single-pixel detector[J]. *Science Advances*, 2016, 2(6): e1600190.
- [32] Li S, Cropp F, Kabra K, et al. Electron ghost imaging [J]. *Physical Review Letters*, 2018, 121(11): 114801.
- [33] Huang J, Shi D F. Multispectral computational ghost imaging with multiplexed illumination[J]. *Journal of Optics*, 2017, 19(7): 075701.
- [34] 崔丽君, 赵成强, 徐文东, 等. 强度关联激光成像雷达测量矩阵研究[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0918002.
Cui L J, Zhao C Q, Xu W D, et al. Study on the measurement matrix in intensity correlation imaging laser radar[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0918002.
- [35] Zhao S M, Wang L, Liang W Q, et al. High performance optical encryption based on computational ghost imaging with QR code and compressive sensing technique[J]. *Optics Communications*, 2015, 353: 90-95.
- [36] 张银佐. 关联成像实验研究及后期解算算法设计[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 20-21.
Zhang Y Z. Experimental study of correlated imaging and algorithm design[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014: 20-21.
- [37] Cai Y J, Zhu S Y. Ghost imaging with incoherent and partially coherent light radiation[J]. *Physical Review E* 2005, 71(5): 056607.
- [38] Clemente P, Durán V, Torres-Company V, et al. Optical encryption based on computational ghost imaging [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(14): 2391-2393.
- [39] Wu J J, Xie Z W, Liu Z J, et al. Multiple-image encryption based on computational ghost imaging[J]. *Optics Communications*, 2016, 359: 38-43.
- [40] Li X Y, Meng X F, Yang X L, et al. Multiple-image encryption via lifting wavelet transform and XOR operation based on compressive ghost imaging scheme[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 102: 106-111.
- [41] Zhang L H, Yuan X, Wang K M, et al. Multiple-image encryption mechanism based on ghost imaging and public key cryptography[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(4): 7904014.
- [42] Erkmen B I. Computational ghost imaging for remote sensing[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 782-789.
- [43] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [44] Chen M L, Li E R, Gong W L, et al. Ghost imaging lidar via sparsity constraints in real atmosphere[J]. *Optics & Photonics Journal*, 2013, 3(2B): 83-85.
- [45] Hardy N D, Shapiro J H. Computational ghost imaging versus imaging laser radar for three dimensional imaging [J]. *Physical Review A*, 2013, 87(2): 023820.
- [46] Gong W L, Zhao C Q, Yu H, et al. Three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 26133.
- [47] 龚文林, 王成龙, 梅笑冬, 等. 面向实际应用的 GISC Lidar 近期研究进展与思考[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0302001.
Gong W L, Wang C L, Mei X D, et al. Recent research progress and thoughts on GISC lidar with respect to practical applications[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0302001.
- [48] 张聪, 龚文林, 韩申生. 运动目标强度关联成像及其在遥感探测中的应用[J]. *中国激光*, 2012, 39(12): 1214003.
Zhang C, Gong W L, Han S S. Ghost imaging for moving targets and its application in remote sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(12): 1214003.
- [49] Li E R, Bo Z W, Chen M L, et al. Ghost imaging of a moving target with an unknown constant speed[J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(25): 251120.
- [50] Li X H, Deng C J, Chen M L, et al. Ghost imaging for an axially moving target with an unknown constant speed [J]. *Photonics Research*, 2015, 3(4): 153-157.
- [51] Wang C L, Mei X D, Pan L, et al. Airborne near infrared three-dimensional ghost imaging lidar via sparsity constraint[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 732.
- [52] Deng C J, Pan L, Wang C L, et al. Performance analysis of ghost imaging lidar in background light environment[J]. *Photonics Research*, 2017, 5(5): 431-435.
- [53] Ma S, Liu Z T, Wang C L, et al. Ghost imaging LiDAR via sparsity constraints using push-broom scanning[J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13219-13228.
- [54] 宋明悦, 李高亮, 余远金, 等. 散射介质中强度关联成像的研究综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011019.
Song M Y, Li G L, Yu Y J, et al. Research review on intensity correlation imaging in scattering media[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011019.
- [55] 胡洋颀, 程正东, 曾波, 等. 烟幕环境下计算关联成像 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(10): 1011029.
Hu Y D, Cheng Z D, Zeng B, et al. Computational ghost imaging in smoke media[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(10): 1011029.
- [56] 胡洋颀, 程正东, 梁振宇, 等. 激光关联成像在烟幕条件下的实验研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401020.
Hu Y D, Cheng Z D, Liang Z Y, et al. Experimental study on laser computational ghost imaging through smoke media[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401020.
- [57] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [58] Bina M, Magatti D, Molteni M, et al. Backscattering differential ghost imaging in turbid media[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 110(8): 083901.
- [59] Tajahuerce E, Durán V, Clemente P, et al. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection[J]. *Optics Express*, 2014, 22(14): 16945-16955.
- [60] Zhao M, Uhlmann J, Lanzagorta M, et al. Passive ghost imaging using caustics modeling[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10188: 101880H.
- [61] Le M N, Wang G, Zheng H B, et al. Underwater computational ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2017,

- 25(19): 22859-22868.
- [62] Zhang Q W, Li W D, Liu K, et al. Effect of oceanic turbulence on the visibility of underwater ghost imaging [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(3): 397-402.
- [63] Zhang Y, Li W D, Wu H Z, et al. High-visibility underwater ghost imaging in low illumination[J]. *Optics Communications*, 2019, 441: 45-48.
- [64] Luo C L, Wan W X, Chen S Y, et al. High-quality underwater computational ghost imaging with shaped Lorentz sources[J]. *Laser Physics Letters*, 2020, 17(10): 105209.
- [65] Sun B, Edgar M P, Bowman R, et al. 3D computational imaging with single-pixel detectors[J]. *Science*, 2013, 340(6134): 844-847.
- [66] 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.
- [67] Qian Y, He R Q, Chen Q, et al. Adaptive compressed 3D ghost imaging based on the variation of surface normals[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27862-27872.
- [68] Soltanlou K, Latifi H. Three-dimensional imaging through scattering media using a single pixel detector[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(28): 7716-7726.
- [69] Bo Z W, Gong W L, Han S S. Focal-plane three-dimensional imaging method based on temporal ghost imaging: a proof of concept simulation[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2020, 37(3): 417-421.
- [70] Huang J, Shi D F, Yuan K E, et al. Three-dimensional Fourier ghost imaging[J]. *Optik*, 2020, 219: 165149.
- [71] Pelliccia D, Rack A, Scheel M, et al. Experimental X-ray ghost imaging[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 117(11): 113902.
- [72] He Y H, Zhang A X, Yu W K, et al. Energy-selective X-ray ghost imaging[J]. *Chinese Physics Letters*, 2020, 37(4): 71-74.
- [73] Sun Z, Tuitje F, Spielmann C. Toward high contrast and high-resolution microscopic ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2019, 27(23): 33652-33661.
- [74] Rossman U, Tenne R, Solomon O, et al. Rapid quantum image scanning microscopy by joint sparse reconstruction[J]. *Optica*, 2019, 6(10): 1290-1296.
- [75] Katz O, Bromberg Y, Silberberg Y. Compressive ghost imaging[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(13): 131110.
- [76] Bromberg Y, Katz O, Silberberg Y. Ghost imaging with a single detector[J]. *Physical Review A*, 2009, 79(5): 053840.
- [77] Wang Y W, Liu Y, Suo J L, et al. High speed computational ghost imaging via spatial sweeping[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 45325.
- [78] Czajkowski K M, Pastuszczyk A, Kotyński R. Real-time single-pixel video imaging with Fourier domain regularization[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20009-20022.
- [79] Janassek P, Blumenstein S, Elsässer W. Ghost spectroscopy with classical thermal light emitted by a superluminescent diode[J]. *Physical Review Applied*, 2018, 9(2): 021001.
- [80] Ota S, Horisaki R, Kawamura Y, et al. Ghost cytometry [J]. *Science*, 2018, 360(6394): 1246-1251.
- [81] Dou L Y, Cao D Z, Gao L, et al. Dark-field ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(25): 37167-37176.