

# 基于相关全息原理的散射成像技术及其进展

陈子阳, 陈丽, 范伟如, 卢腾飞, 沈少鑫, 蒲继雄\*

华侨大学信息科学与工程学院, 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

**摘要** 由于随机散射效应, 相干光束经过强散射介质后, 出射光场变成光强呈无序分布的散斑场, 因此无法直接从出射场获取入射光的信息。然而, 在随机散射过程中, 出射散斑场仍然携带着入射光场信息。从散斑场中获取原始信息以实现物体的重建是一个备受关注的研究课题。研究人员针对该问题提出了包括散斑相关、传输矩阵、波前调控及时间反演与相位共轭等技术。着重介绍了基于相关全息原理的散射成像技术, 主要包括其原理、发展历史以及最新的研究进展, 并对该技术的未来发展趋势进行了展望。

**关键词** 成像系统; 散射成像; 相关全息; 散射介质; 散斑场

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.0200001

## Progress on Scattering Imaging Technologies Based on Correlation Holography

Chen Ziyang, Chen Li, Fan Weiru, Lu Tengfei, Shen Shaoxin, Pu Jixiong\*

*Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China*

**Abstract** When a coherent beam propagates through a strong scattering medium, a speckle pattern of the output field can be formed due to random scattering. As a consequence, it is impossible to directly acquire the original information of the input beam from the output scattering field. However, in the random scattering process, the output speckle pattern still contains the original information of the incident beam. The acquirement of the original information based on speckle patterns for the reconstruction of an object has become a hot research topic. As for this problem, the techniques including speckle correlation, transmission matrix, wavefront control as well as time reversal and phase conjugation have been proposed. The scattering imaging technique based on correlation holographic theory is mainly introduced, in which its principle, history and recent new progress are included. In addition, its future development is prospected.

**Key words** imaging systems; scattering imaging; correlation holography; scattering medium; speckle field

**OCIS codes** 110.0113; 110.6150; 290.4210; 030.6140

## 1 引言

人眼视觉是人类感知外界最重要的方式之一。一般来说, 人类从外界获取的信息超过 80% 是通过视觉成像完成的, 因此成像技术一直以来都是一个备受关注的研究课题。当光在自由空间中传输, 其

成像问题比较简单, 技术也相对成熟。但是, 在很多实际应用领域中, 经常会涉及光经过散射介质的传输问题。对于弱散射介质, 例如大气湍流, 利用自适应光学的方法可以有效地纠正介质所引起的波像差, 获得较高质量的成像结果<sup>[1-3]</sup>。然而, 当相干光经过强散射介质(如纳米颗粒材料、生物细胞组织、

收稿日期: 2020-10-15; 修回日期: 2020-12-14; 录用日期: 2020-12-15

基金项目: 国家自然科学基金(11674111)、福建省杰出青年科研基金项目(2018J06017)

\* E-mail: jixiong@hqu.edu.cn

白纸和浓雾等)后,由于光在这些介质内发生多重散射,出射光场将变成散斑场。在这种情况下,自适应光学技术无法有效地纠正波像差。散射介质引起的成像质量降低甚至无法成像,已经成为光学观测和应用的一大挑战。

尽管携带物体信息的光束经过散射介质后会形成光强呈无序分布的散斑,但是在这一散射过程中,物体的信息并没有丢失,而是重新分布,即出射散斑场仍然携带着原始物体的信息。通过散斑获取物体信息以实现物体的成像,一直是研究人员重点关注的一个问题。1990年,Freund<sup>[4]</sup>指出,在合适的条件下,合理利用多重散射可以使散射介质具有透镜的功能,进而可利用散射介质获得理想的成像结果。1999年,van Rossum等<sup>[5]</sup>对以上研究结果进行了更为深入的讨论。2007年,Vellekoop等<sup>[6]</sup>提出了反馈波前整形技术,在实验上通过对入射光的波前进行整形,有效地控制了光在散射介质中的传输过程,将无序散斑场调控为聚焦点,光强增长了一千倍。这个工作表明,尽管光束在散射介质中的传输是一个非常复杂的光学过程,但是通过波前整形技术,还是可以有效地控制光在散射介质中的传输。波前整形技术的提出极大地促进了强散射介质中的光场调控与成像研究<sup>[7-11]</sup>。

实际上,当入射光在介质中的散射程度较弱时,依然可以通过提取弹道光的信息来获得入射物光的原始信息<sup>[12-13]</sup>,例如飞行时间(time of flight)技术<sup>[14]</sup>、光学相干层析术(optical coherence tomography)<sup>[15-16]</sup>和偏振门(polarization-based gating)技术<sup>[17]</sup>等。然而,随着光在介质中的散射程度的增加,可获取的弹道光的光子数将持续衰减,当其衰减到一定程度时,利用弹道光成像技术就难以获得较好的成像质量。在Vellekoop等<sup>[6]</sup>的工作之后,关于强散射介质的散斑场调控和成像引起了研究人员的广泛兴趣。针对基于散射光实现物体经过散射介质后的成像问题,研究人员提出了一系列的方法,并发展出了诸多技术,例如波前整形<sup>[6, 18-21]</sup>、相位共轭与时间反演<sup>[22-26]</sup>、深度学习<sup>[27-31]</sup>、传输矩阵<sup>[32-36]</sup>、散斑相关<sup>[37-39]</sup>及调制光照明<sup>[40-41]</sup>等。

本文主要介绍了基于相关全息技术实现物体经过强散射介质后的成像(以下简称为散射成像)问题。首先简要介绍了全息技术的基本概念及其发展历史,并简述了基于相关全息实现散射成像的基本原理,接着对基于相关全息技术实现散射成像的研究进展进行了介绍,最后讨论了散射成像技术所面

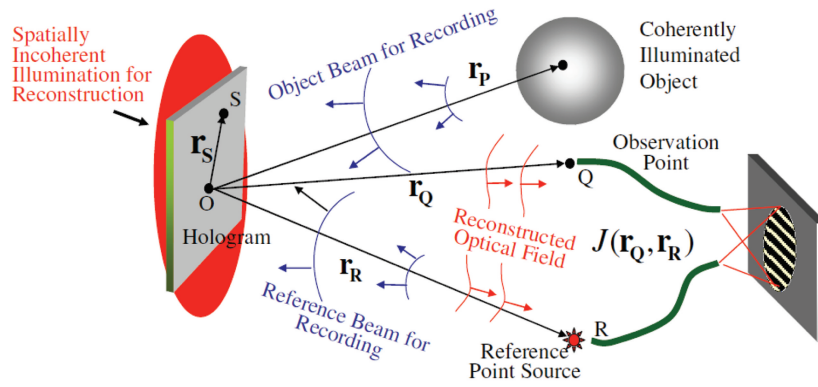
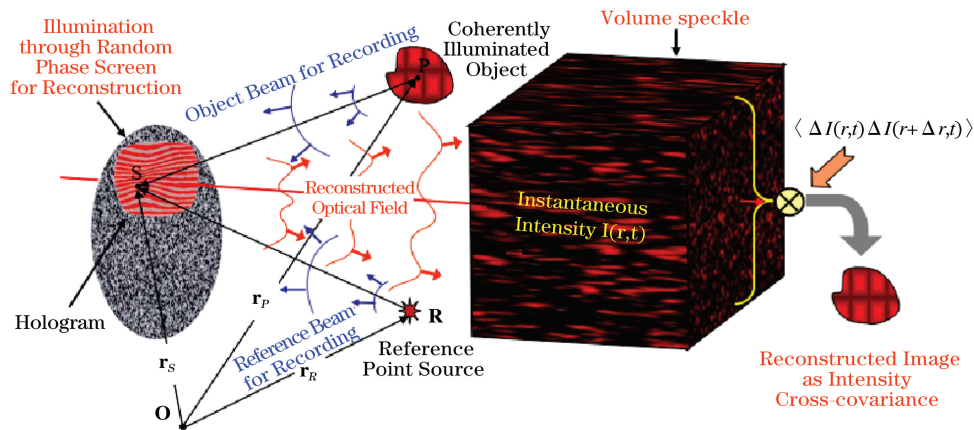
临的问题和未来发展趋势。

## 2 全息技术:从传统全息到相关全息

全息技术能够记录和重建物体的全部信息(包括振幅和相位)。全息的概念最早由Gabor提出<sup>[42]</sup>,最初的Gabor型全息(或in-line holography)存在光源相干性差和“孪生像”的问题。激光器的发明使得相干光源的产生变得更加简便,也促进了全息技术的进一步发展。1963年,Leith等<sup>[43]</sup>提出了离轴全息,孪生像问题得到了很好的解决。

随着光电器件如电荷耦合器(Charge Couple Device, CCD)和空间光调制器(Spatial Light Modulator, SLM)等的应用和发展,数字全息技术得以实现<sup>[44-46]</sup>。数字全息采用数字的方式记录全息图,能够有效地利用CCD的空间分辨率。因此,除了离轴全息能够将共轭像分开以外,基于数字全息技术,借助相位迭代算法也能够有效消除共轭像的影响<sup>[47-48]</sup>。

传统的全息技术是将物体重建为复振幅分布,相关全息是将物体重建为随机场的相关函数分布。目前,相关全息技术主要包括基于光场二阶统计的相干全息(coherence holography)<sup>[49]</sup>和基于光场四阶统计的光子相关全息(photon correlation holography)<sup>[50]</sup>。2005年,Takeda等<sup>[49]</sup>首次提出了一种基于范希特-泽尼克定理(van-Cittert Zernike theorem)的非传统全息技术,称为相干全息。范希特-泽尼克定理具有与衍射积分公式类似的表达形式,因而相干函数和光场一样,均遵循波动方程。图1所示为相干全息的记录和重建过程,其中,记录过程和传统全息一样,利用物光和参考光干涉形成全息图;重建过程则采用非相干光源照明全息图,基于范希特-泽尼克定理,将观测点Q和参考源点R处的场之间的互强度与全息图的强度透过率联系起来。由于互强度和光场具有相同的分布,因此互强度可以用于重建物体的复振幅信息。2011年,Naik等<sup>[50]</sup>提出了光子相关全息,该方法利用光场的四阶相关(强度相关),证明了系综平均是可以通过时间平均或者空间平均来实现的,其原理如图2所示。相干全息和光子相关全息技术的区别类似于迈克耳孙干涉法<sup>[51]</sup>和汉伯里·布朗-特维斯(Hanbury-Brown Twiss, HBT)强度干涉仪<sup>[52]</sup>的区别,相干全息是基于光场的二阶相关,光子相关全息是基于光场的四阶相关。

图1 相干全息的记录和重建过程<sup>[53]</sup>Fig. 1 Recording and reconstruction of coherence holography<sup>[53]</sup>图2 光子相关全息的原理<sup>[50]</sup>Fig. 2 Principle of photon correlation holography<sup>[50]</sup>

### 3 基于相关全息实现散射成像的原理

源平面(散射平面)的电场表示为  $E(\hat{r})$  ( $\hat{r}$  为散射平面的位置坐标), 在自由空间中经过距离  $z$  的传输后, 观察平面(CCD 探测平面)的电场  $E(\mathbf{r})$  为

$$E(\mathbf{r}) = \int G(\mathbf{r}, \hat{r}) E(\hat{r}) \exp(i\varphi_r) d\hat{r}, \quad (1)$$

式中:  $\varphi_r$  是散射介质引入的随机相位;  $\mathbf{r}$  为观察平面的位置坐标;  $G(\mathbf{r}, \hat{r})$  是近似条件下自由空间的传播核, 可以表示为  $G(\mathbf{r}, \hat{r}) \approx \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \times \exp\left(ik \frac{|\mathbf{r}|^2 - 2\mathbf{r} \cdot \hat{r} + |\hat{r}|^2}{2z}\right)$ , 其中  $\lambda$  和  $k = 2\pi/\lambda$  分别为入射光波的波长和波数。探测平面的光强  $I(\mathbf{r}) = E(\mathbf{r}) \cdot E^*(\mathbf{r})$ , 其中  $*$  表示复共轭。

散斑  $I(\mathbf{r})$  的强度相关(四阶相关)<sup>[50]</sup> 可以表示为  $m_4(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = \langle I(\mathbf{r}) \cdot I(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \rangle = \langle E(\mathbf{r}) E^*(\mathbf{r}) E(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) E^*(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \rangle$ , (2)

式中:  $\langle \cdot \rangle$  表示系综平均, 可以通过空间平均或时间平均来实现;  $\Delta\mathbf{r}$  为空间中两点的坐标差。

假设散斑场服从高斯分布, 则散斑场的强度相关<sup>[50]</sup> 可以表示为

$$m_4(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) = \bar{I}^2 + \left| \int I(\hat{r}) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \Delta\mathbf{r} \cdot \hat{r}\right) d\hat{r} \right|^2, \quad (3)$$

式中:  $I(\hat{r})$  是源平面的强度;  $\bar{I}$  是平均光强。

光强互协方差(cross-covariance)函数定义为

$$C(\Delta\mathbf{r}) = \langle \Delta I(\mathbf{r}) \cdot \Delta I(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \rangle = m_4(\mathbf{r}, \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) - \bar{I}^2, \quad (4)$$

式中:  $\Delta I(\mathbf{r}) = I(\mathbf{r}) - \langle I(\mathbf{r}) \rangle$  表示光强的涨落。

由(3)、(4)式, 可以进一步得到

$$C(\Delta\mathbf{r}) = \left| \int I(\hat{r}) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \Delta\mathbf{r} \cdot \hat{r}\right) d\hat{r} \right|^2. \quad (5)$$

根据范希特-泽尼克定理, 远场互相干函数和源平面光强(照明函数)的关系为



$$W(\Delta\mathbf{r}) = \int I(\hat{\mathbf{r}}) \cdot \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda z} \Delta\mathbf{r} \cdot \hat{\mathbf{r}}) d\hat{\mathbf{r}}, \quad (6)$$

式中:互相关函数  $W(\Delta\mathbf{r})$  是光场的二阶相关,可以表示为  $W(\Delta\mathbf{r}) = \langle E(\mathbf{r})E^*(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}) \rangle$ 。可见,远场互相关函数与源平面光强是相关的,可以通过远场互相关函数得到源平面光强,即实现成像。

综合(5)、(6)式,可以得到

$$C(\Delta\mathbf{r}) = |W(\Delta\mathbf{r})|^2. \quad (7)$$

(7)式表明,四阶相关  $C(\Delta\mathbf{r})$  和二阶相关  $W(\Delta\mathbf{r})$  是平方的关系。因此,通过测量散斑场的  $C(\Delta\mathbf{r})$  只能得到  $W(\Delta\mathbf{r})$  的模,要得到完整的光场信息,必须解决相位丢失的问题。可以通过相位恢复算法、高阶干涉测量或全息等方法求解相位<sup>[54-55]</sup>。

参考文献[56]采用的离轴全息方法,通过引入离轴的参考相干函数  $W_R(\Delta\mathbf{r})$  来解决相位丢失的问题,这种情况下  $W(\Delta\mathbf{r}) = W_O(\Delta\mathbf{r}) + W_R(\Delta\mathbf{r})$ , 则

$$|W(\Delta\mathbf{r})|^2 = |W_O(\Delta\mathbf{r})|^2 + |W_R(\Delta\mathbf{r})|^2 + W_O(\Delta\mathbf{r}) \times W_R^*(\Delta\mathbf{r}) + W_O^*(\Delta\mathbf{r}) \times W_R(\Delta\mathbf{r}), \quad (8)$$

式中:  $W_O(\Delta\mathbf{r})$  为物光的远场互相关函数。(8)式为强度相关全息的表示方法,传统的全息技术有类似的表达式:  $H(X, Y) = |O(X, Y)|^2 + |R(X, Y)|^2 + O(X, Y) \times R^*(X, Y) + O^*(X, Y) \times R(X, Y)$ , 其中  $H(X, Y)$ 、 $O(X, Y)$ 、 $R(X, Y)$  分别表示全息图强度、物光的电场和参考光的电场,  $(X, Y)$  为空间位置坐标。(8)式的前两项分别是物相干函数的自相关和参考相干函数的自相关,对应傅里叶变换的中间直流分量,第三项是物相干函数,第四项是物相干函数的共轭项,通过离轴的参考相干函数可将第三项和第四项分开。利用(8)式的傅里叶变换,可得到散射平面的全息图光强,进而重建物体振幅和相位信息。

## 4 基于全息技术实现散射成像的研究进展

### 4.1 基于传统全息技术的散射成像

20世纪60年代,研究人员就已经提出了实现散射成像的全息技术<sup>[57-59]</sup>。其中,Goodman等<sup>[57]</sup>提出,必须在离散射介质很近的地方记录全息图,以保证物光和参考光具有相同的相位变化。随后,Kogelnik等<sup>[58]</sup>借助成像系统的设计解决了该问题,但是该方法要求全息图必须精确地放置以便消除散射介质引入的随机相位。Leith等<sup>[59]</sup>利用波前校正的方式实现了全息散射成像。七八十年代,研究人员利用全息的方法实现了散射环境(如雾、湍流等)

下的成像。Cathey等<sup>[60]</sup>利用全息的方法降低了湍流引起的图像失真。Lohmann等<sup>[61]</sup>利用同轴全息技术实现了透过雾的成像。Gerritsen<sup>[62]</sup>将全息技术和非线性光学效应结合,实现了透过人体组织的成像。数字全息的出现进一步促进了全息散射成像技术的发展<sup>[63-64]</sup>。Singh等<sup>[65]</sup>将数字全息技术应用用于三维物体的散射成像中。暨南大学的钟金钢课题组基于数字全息实现了动态散射成像<sup>[66]</sup>。

### 4.2 利用基于光场二阶统计的相干全息实现散射成像

2009年,研究人员将基于光场二阶相关的相干全息技术用于散射成像<sup>[53]</sup>,使用Sagnac径向剪切干涉仪重建了Leith型相干全息图,与传统的基于迈克耳孙干涉仪的同轴Gabor型相干全息技术相比,这种全息方法能够以更高的保真度和稳定性重建3D物体。2010年,文献[67]利用计算机生成相移全息图,再通过Leith型相干全息术重建离轴物体,从而避免了利用机械旋转半波片的几何相移方法的不稳定性。同年,文献[68]基于相干全息实现了物体经过散射介质的实时成像,该方法将光场分布编码为对应的相干函数分布;此类相干函数能够转为图像的干涉条纹对比度,并利用Mach-Zehnder干涉仪产生了相干全息图,同时用Sagnac径向剪切干涉仪进行了实时重建。2011年,研究人员进一步将相干全息技术推广到矢量场中,提出了矢量相干全息技术,其中,两正交偏振方向的物体振幅和相位信息可以通过测量相干偏振矩阵(coherence-polarization matrix)的两对角元来获得<sup>[69]</sup>。

### 4.3 利用基于光场四阶统计的相关全息实现散射成像

2011年,Naik等<sup>[50]</sup>验证了基于电场四阶统计(强度相关)的相关全息技术从散斑场中提取物体信息的可行性,即在实验探测散斑场的基础上,通过计算散斑场的光强相关,进而得到入射散射介质前的全息图,最终实现被散射物体的重建。他们的研究表明,散斑场的四阶统计(强度相关)计算既可以是空间域的统计,也可以是时间域的统计。2014年,研究人员基于电场四阶统计的相关全息,进一步证明了利用单帧散斑光强就可以恢复被散射的物光(涡旋光束)的复振幅,其所采用的实验光路如图3所示<sup>[56]</sup>。物光和参考光发生干涉,形成全息图(plane 1),其中,全息图被随机介质(GG1)散射,物镜通过引入另外一路离轴的参考光来解决相位丢失的问题,即离轴参考光可以将强度相关的傅里叶



变换频谱和中心直流分量分开,如图4(a)~(c)所示。然后利用傅里叶条纹分析的方法<sup>[70]</sup>,从全息图中恢复得到物体的振幅和相位信息。图4(d)~(f)

所示为重建的具有不同拓扑荷数的涡旋光场的振幅和相位信息。这种相关全息技术可以提供一种新的定量相衬散射成像方法<sup>[71]</sup>。

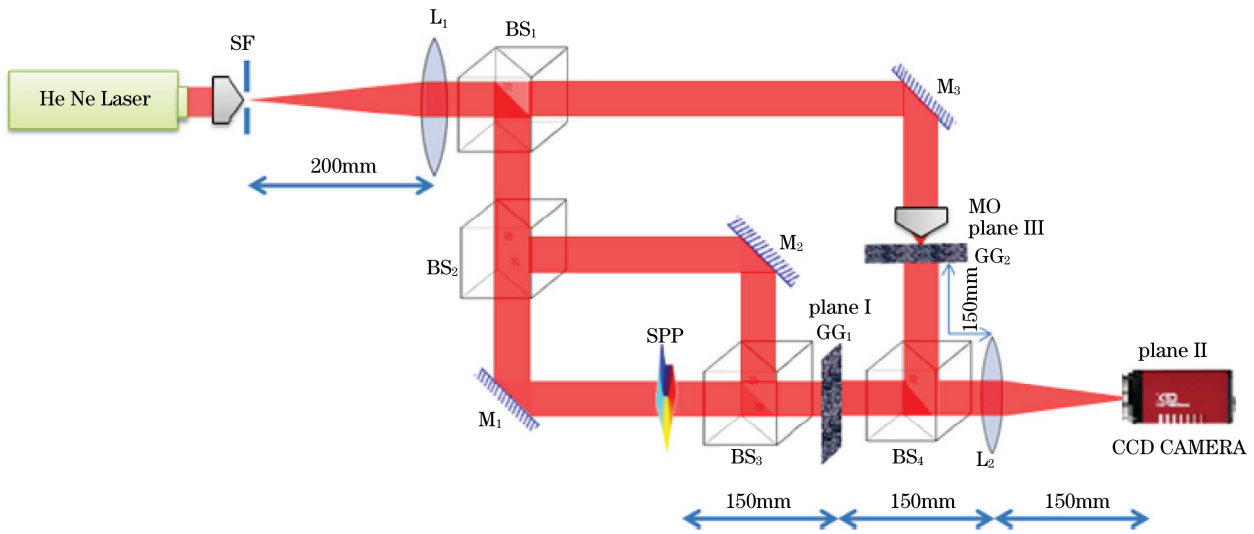


图3 从两点强度相关测量中恢复复值物体的实验装置图<sup>[56]</sup>

Fig.3 Experimental setup for recovery of complex-valued objects from two-point intensity correlation measurement<sup>[56]</sup>

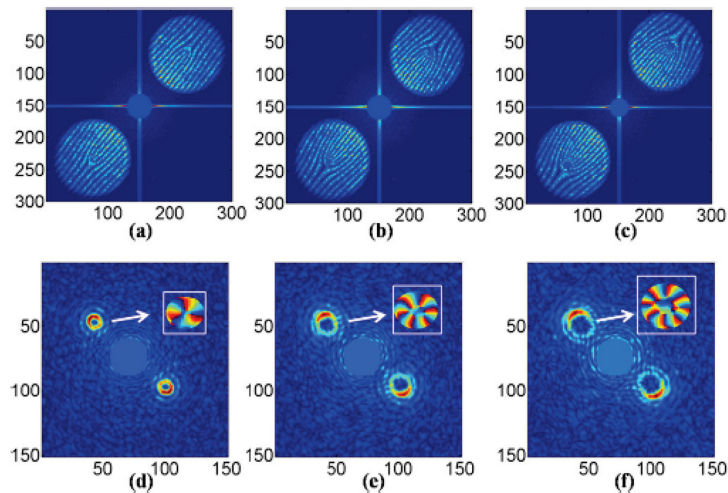


图4 具有不同拓扑荷数的涡旋光的散射成像(箭头所指为涡旋相位)<sup>[56]</sup>。(a)拓扑荷数为3的涡旋光的协方差的傅里叶变换结果;(b)拓扑荷数为6的涡旋光的协方差的傅里叶变换结果;(c)拓扑荷数为8的涡旋光的协方差的傅里叶变换结果;(d)对应图(a)的重建的复相干函数;(e)对应图(b)的重建的复相干函数;(f)对应图(c)的重建的复相干函数

Fig.4 Scattering imaging of vortex beams with different topological charges (vortex phases indicated by arrows)<sup>[56]</sup>. (a) Fourier transform of cross-covariance distribution of vortex beam with topological charge of 3; (b) Fourier transform of cross-covariance distribution of vortex beam with topological charge of 6; (c) Fourier transform of cross-covariance distribution of vortex beam with topological charge of 8; (d) reconstructed complex coherence function corresponding to Fig. (a); (e) reconstructed complex coherence function corresponding to Fig. (b); (f) reconstructed complex coherence function corresponding to Fig. (c)

由于基于离轴参考光的相关全息技术的实验光路(图3)较为复杂,为了简化光路,研究人员提出借助共轴干涉来实现物体的散射成像<sup>[72-73]</sup>。利用共

轴全息(in-line holography)原理,并通过引入相移技术,Kodama等<sup>[74]</sup>实现了三维散射成像,成像分辨率可以达到微米量级。在实验中,物光和参考光

基本沿着共同的光路传输,因此对于两束光,散射介质引入的随机相位是相同的,进而在全息记录的过程中该随机相位可以被消除。以上技术路线与Kogelnik等<sup>[58]</sup>的实验方案类似,同样需要精准的光路校准。文献[75]借助共轴干涉原理,结合相关全息技术,通过散斑场的光强相关计算,获取了

隐藏在散射介质后的同轴全息图,并在此基础上消除了孪生像的影响,获得了物体的深度信息,原理如图5所示。图6是相关的实验结果,通过从散斑图[图6(a)]中恢复同轴全息图[图6(b)],可求解得到物体的振幅[图6(c)]和相位[图6(d)]信息。

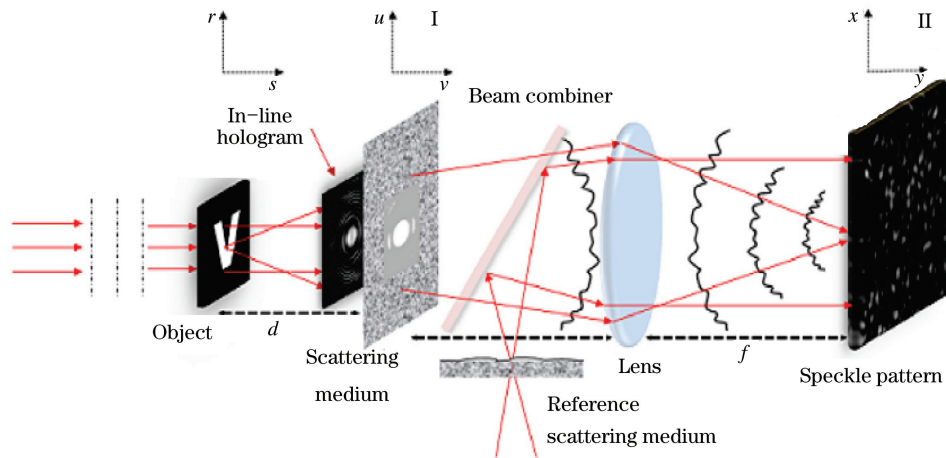


图5 利用共轴相关全息实现散射成像的示意图<sup>[75]</sup>

Fig. 5 Schematic of scattering imaging realized by in-line correlation holography<sup>[75]</sup>

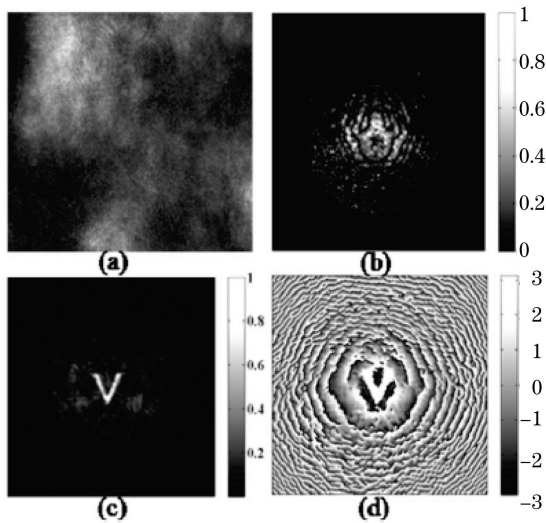


图6 实验结果<sup>[75]</sup>。(a)记录的物体“V”的散斑图;  
(b)恢复的同轴全息图;恢复的(c)振幅和(d)相位分布  
Fig. 6 Experimental results<sup>[75]</sup>. (a) Recorded speckle pattern  
of object “V”; (b) recovered in-line hologram;  
recovered (c) amplitude and (d) phase distributions

相关全息技术的理论基础是范希特-泽尼克定理,该定理一般应用于标量场。文献[54]将范希特-泽尼克定理推广到矢量(偏振)光场中。在矢量场中,通常用 $2 \times 2$ 的相干-偏振矩阵 $\begin{pmatrix} W_{xx} & W_{xy} \\ W_{yx} & W_{yy} \end{pmatrix}$ 或

者斯托克斯参量描述随机电磁束的相干偏振特性,并且相干-偏振矩阵的矩阵元与随机波动场的强度是相关联的<sup>[76-77]</sup>。因此,可以通过测量随机场的强度相关来获得相干-偏振矩阵的矩阵元。在实验上,相干-偏振矩阵的四个矩阵元可以通过由四分之一波片(QWP)和偏振片(P)组成的装置测量得到,通过控制四分之一波片的旋转角度可以将四个矩阵元分离<sup>[56,78]</sup>,物体的信息包含在相干-偏振矩阵的两个非对角元中。如图7所示,实验测得的物体信息(涡旋相位)只包含在交叉项 $W_{xy}^S(\Delta\mathbf{r})$ 和 $W_{yx}^S(\Delta\mathbf{r})$ 中。

除了二维物体的散射成像,相关全息技术同样可被用于实现三维物体的散射成像<sup>[79-81]</sup>。文献[79]将三维物体编码成傅里叶变换全息图,并将其加载在空间光调制器上,利用强度相关技术,结合散斑全息图,则只需要通过单帧测量就可以实现三维物体的散射成像,如图8所示。文献[82]利用散射平面上的斯托克斯参数(Stokes Parameters)与随机场(探测平面)的广义斯托克斯参数(Generalized Stokes Parameters)之间的傅立叶变换关系,实现了三维物体深度信息的获取。文献[83]采用光学和数字技术相结合的方式,通过单像素探测器即可重建三维物体。

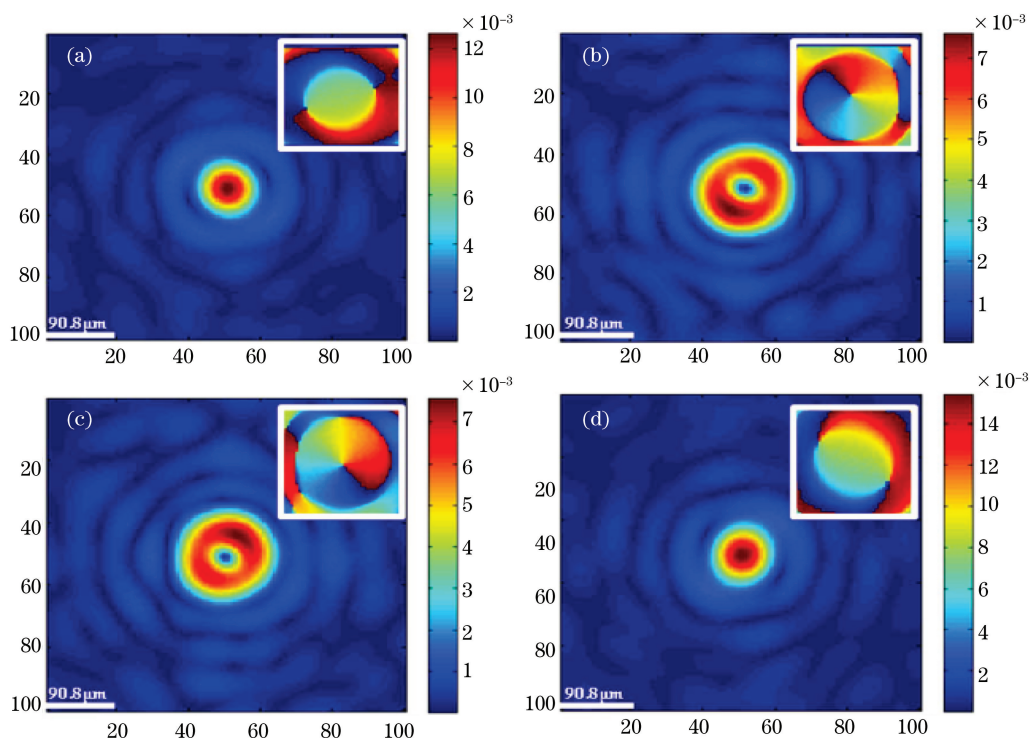


图7 相干-偏振矩阵元中的振幅和相位(插图)分布<sup>[78]</sup>。(a)  $W_{xx}^S(\Delta r)$ ; (b)  $W_{xy}^S(\Delta r)$ ; (c)  $W_{yx}^S(\Delta r)$ ; (d)  $W_{yy}^S(\Delta r)$

Fig.7 Amplitude and phase (inset) distributions for coherence-polarization matrix elements<sup>[78]</sup>. (a)  $W_{xx}^S(\Delta r)$ ; (b)  $W_{xy}^S(\Delta r)$ ; (c)  $W_{yx}^S(\Delta r)$ ; (d)  $W_{yy}^S(\Delta r)$

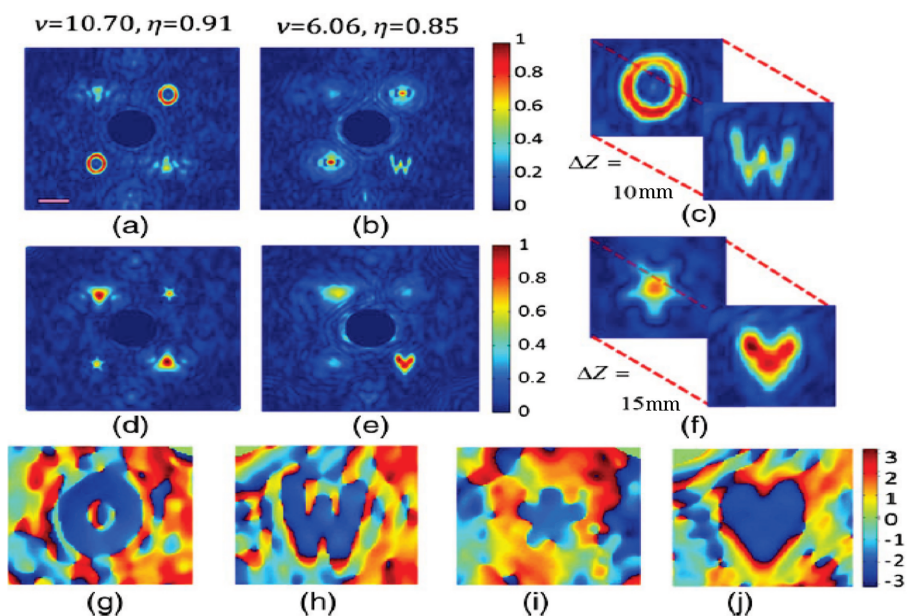


图8 三维物体的散射成像<sup>[79]</sup>。(a) 重建的字母O的振幅;(b) 重建的字母W的振幅;(c) O与W的示意图,间距为10 mm;(d) 重建的五角星振幅;(e) 重建的心形振幅;(f) 心形与五角星的示意图,间距为15 mm;(g) 重建的字母O的相位;(h) 重建的字母W的相位;(i) 重建的五角星相位;(j) 重建的心形相位

Fig.8 Scattering imaging of 3D objects<sup>[79]</sup>. (a) Amplitude of reconstructed letter "O"; (b) amplitude of reconstructed letter "W"; (c) diagrams of letters "O" and "W" with depth separation of 10 mm; (d) amplitude of reconstructed star; (e) amplitude of reconstructed heart; (f) diagrams of star and heart with depth separation of 15 mm; (g) phase of reconstructed letter "O"; (h) amplitude of reconstructed letter "W"; (i) phase of reconstructed star; (j) phase of reconstructed heart



此外,压缩感知和相位迭代等方法也被应用于基于相关全息的散射成像技术中。压缩感知相关全息<sup>[84]</sup>可以有效减少采样数。在传统的两点强度相关的方法中,采样数指的是系综平均(通过空间平均或者时间平均来实现)的次数。利用空间平均来实现系综平均的方法只需要单张散斑图;通过时间平均来实现系综平均的方法则需要多次采样,在实验上可通过旋转散射介质来实现<sup>[65]</sup>。典型的相位迭代算法利用实验探测的光强(振幅)替换算法中的猜测光强(振幅),借助迭代过程实现物体的重建。该方法也被应用于相关全息中,如文献[85]采用相位恢复算法中常用的HIO-ER算法,重建了散射介质前的光场复振幅信息。采用迭代算法可以简化实验装置,无需额外引入离轴参考光,并且可以提供一种无透镜成像的方式。这种无透镜成像方式的原理是利用范西特-泽尼克定理,将远场散斑与散射平面的强度联系起来,在远场条件下无需利用透镜就可以实现成像。

#### 4.4 本课题组的研究进展

相干光经过毛玻璃入射到物体上会形成散

斑,利用关联成像(或称为鬼成像)技术可以从散斑场中提取出物体的信息。传统的关联成像技术仅能实现物体振幅信息的重建,而无法获取物体的相位信息。本课题组在鬼成像中引入全息及显微技术,提出了鬼像衍射全息显微技术(ghost diffraction holographic microscopy, GDHM),首次在实验上通过结合鬼成像和全息显微技术,实现了物体振幅和相位信息的同步定量测量<sup>[86]</sup>。通过实验和理论模拟,证明了该成像方法适用于不同物体的振幅和相位信息的同步定量检测,且最高能达到 $3.9\ \mu\text{m}$ 的超高空间分辨率,如图9所示。该成像方法使用的是赝热光源的瞬时光场,利用的是瞬时光强的空间统计特性,因此只需考虑空间上的各态历经平均,无需长时间探测的时间平均。在实验装置上,只需两个CCD分别同时采集一张散斑图像,并利用空间上的互相关算法,即可同时恢复待测物体的振幅和相位信息。该方法无需考虑传统算法中的迭代收敛问题,极大地提高了成像速度。

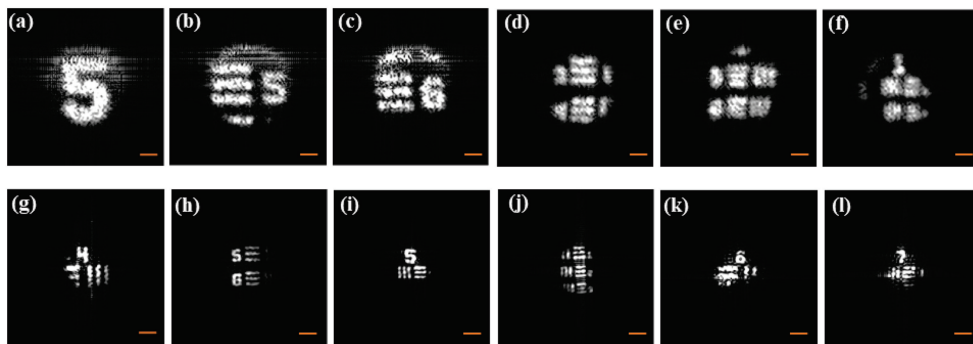


图9 不同标度尺下鬼衍射全息(上)与鬼衍射全息显微(下)的实验结果<sup>[86]</sup>。(a)~(f) 1.15 mm;(g)~(j) 57.5  $\mu\text{m}$ ;(k) 23.0  $\mu\text{m}$ ;(l) 11.5  $\mu\text{m}$

Fig.9 Experimental results of ghost diffraction holography (upper) and ghost diffraction holographic microscopy (down) for different scale bars<sup>[86]</sup>. (a) - (f) 1.15 mm; (g) - (j) 57.5  $\mu\text{m}$ ; (k) 23.0  $\mu\text{m}$ ; (l) 11.5  $\mu\text{m}$

尽管离轴全息技术能够实现中间直流分量与离轴共轭像的分离,但是当两者在空间中发生重叠时,离轴分量携带有部分直流分量的信息,导致重建质量的下降。当重叠部分较大时,则难以获得理想的重建效果。为了解决以上问题,本课题组将相移全息应用到基于相关全息的散射成像技术中<sup>[87]</sup>。实验结果表明,当中间直流分量和离轴共轭像有较大幅度的重叠时,该方法依然能够获得很高的重建质量。以上实验结果表明,该方法可以有效增大成像视场范围。对于复杂相位型物体,传统的基于相关全息的散射成像技术的重建效果很差;本课题组的方法同样能够实现高质量的重建,其重建效果与不

存在散射介质时的效果基本相当,结果如图10所示。

对于复杂相位型物体,本课题组提出的基于相移全息的散射成像技术能够实现高质量的图像重建,但是该方法需要引入额外的参考光,因此光路较为复杂,抗干扰能力较弱。为了进一步增强该方法的抗干扰能力,简化实验光路,本课题组提出了偏振相移相关全息技术,并将其应用于被散射物体的成像中<sup>[88]</sup>。该方法巧妙地利用了空间光调制器的相位调制特点,即只对一个特定方向的光进行调制。因此,当一束线偏振光(其偏振方向与该特定方向成一定夹角)入射到空间光调制器上时,只有沿着该特

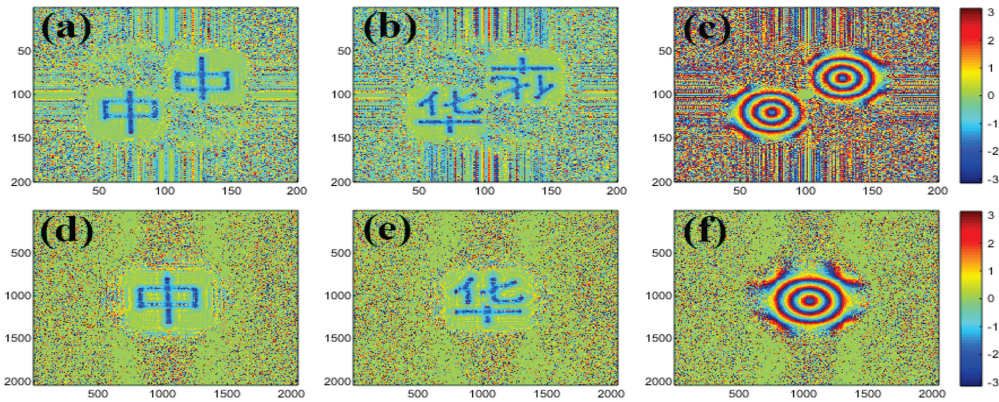


图 10 存在(上)和不存在(下)散射介质时,基于相移全息技术实现相位型物体的散射成像<sup>[87]</sup>。(a)(d)汉字“中”; (b)(e)汉字“华”;(c)(f)轴棱锥相位

Fig. 10 Scattering imaging of phase image realized by phase shifting holography with (upper) and without (down) scattering media<sup>[87]</sup>. (a) (d) Chinese character of “中”; (b) (e) Chinese character of “华”; (c) (f) axicon phases

定方向的光分量才能受到相位调制,而与该特定方向垂直的光分量则未受到调制。可在被调制的分量中加载物光的信息,将未被调制的分量作为参考光(取代独立的参考光路),进而从散斑场中成功还原出被散射物体的信息。由于实验装置相对简单,并且物光和参考光基本沿着相同的路径传输,因此该方法具有很强的抗干扰能力。实验结果表明,该方

法分别在稳定平台、震动平台和动态散射介质(转动的毛玻璃)三种测试条件下,均可以有效实现散射成像,结果如图 11 所示。在图 12 中,以 12 mm 的汉字“物”作为被散射的相位型物体,相较于传统的离轴相关全息技术,本课题组提出的相移相关全息技术和偏振相移相关全息技术具有较高的成像信噪比和高质量的成像结果。



图 11 不同条件下基于偏振相移相关全息技术实现散射成像<sup>[88]</sup>。(a) 稳定平台;(b) 震动平台;(c) 动态散射介质(转动的毛玻璃)

Fig. 11 Scattering imaging realized by polarization-based phase shifting correlation holography under different conditions<sup>[88]</sup>. (a) Static platform; (b) vibration platform; (c) dynamic scattering medium (rotational ground glass)

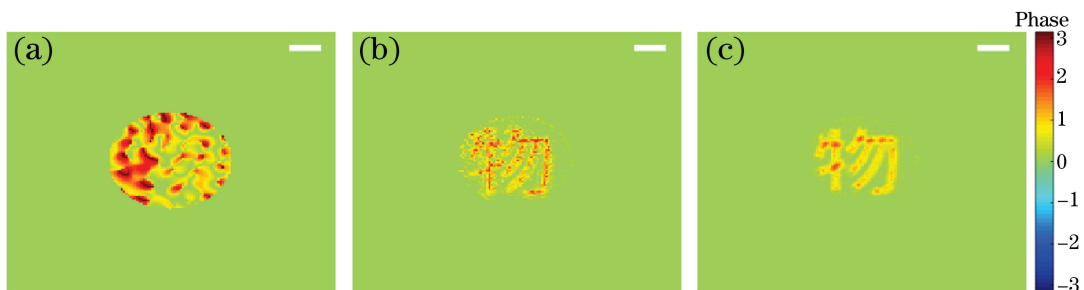


图 12 不同相关全息方法实现物体散射成像的结果。(a) 离轴相关全息;(b) 相移相关全息;(c) 偏振相移相关全息

Fig. 12 Scattering imaging results of object realized by different correlation holography methods. (a) Off-axis correlation holography; (b) phase-shifting correlation holography; (c) polarization-based phase-shifting correlation holography



## 5 结束语

介绍了相关全息技术的发展历史、基本原理和研究进展。基于全息原理,能够同时获得光场的振幅和相位信息。在全息基础上发展出来的相关全息,基于光场的涨落统计实现散射成像,因此具有很强的抗干扰能力。与常见的几种散射成像技术相比,基于光场四阶统计相关全息的散射成像方法具有以下特点:1)基于散斑相关的成像技术通常需要利用相位迭代算法获得物体功率谱的相位信息,该迭代过程具有不确定性,而相关全息无需这种具有不确定性的迭代过程。2)基于传输矩阵的成像技术需要测量矩阵和记录过程,耗时较长,而基于空间统计的相关全息技术仅需要记录单帧散斑图。3)基于波前整形的成像技术需要通过长时间的迭代来获得合适的波前整形,进而实现散射介质的成像功能,而相关全息技术基于散斑场的系综统计实现成像,无需对波前进行整形。4)基于深度学习的成像技术需要记录大量的数据,训练和学习过程耗时较长,而相关全息技术仅需要记录单帧或者数帧散斑光强就可以实现被散射物体的重建。

基于相关全息的散射成像技术发展迅速,取得了一系列重要的进展和突破,但同时也存在一定的局限性。分析目前存在的不足,基于相关全息的散射成像技术进一步发展的方向可包括以下几个方面:1)动态散射成像。目前的相关研究大多采用静止的散射介质,然而实际的很多应用场景都是比较复杂的动态环境,实现真实动态环境下的散射成像是一个值得深入研究的方向。2)厚散射介质的成像。目前的相关研究大多集中于薄散射介质,当散射介质较厚时,成像质量较差,甚至无法成像,因此物体经过厚散射介质后的成像是一个具有重要现实意义的课题。3)大视场成像。由于该技术本身的限制,成像视场较小,大视场成像是一个具有应用价值的研究方向。4)无参考光的成像。现有的技术大多需要引入额外的参考光,因此光路较为复杂。考虑到很多实际应用场合无法引入参考光,无参考光的成像技术是一个很有意义的研究课题。5)三维物体的成像。关于二维平面物体的散射成像技术的研究较多,然而很多应用场合需要对三维立体物体进行成像,三维物体的高质量成像是一个亟待解决的问题。

在生活场景和科学研究中会碰到各种各样的散射环境和散射介质,各种散射现象对光学成像是一

个挑战。例如,在空间遥感探测中,经常碰到各种复杂的天气条件,如浓雾和雾霾等,这些散射体是获得理想探测结果的障碍。在生物医学中,体内的检测经常会因为各种生物组织的存在而无法获得清晰的影像。在浑浊的水下探测中,因为水中微粒的散射以及水的吸收,难以识别目标。随着技术的进一步发展,散射成像技术有望逐步解决这些问题,并将在更广阔的领域中发挥越来越重要的作用。

## 参 考 文 献

- [1] Hardy J W. Adaptive optics for astronomical telescopes [M]. Oxford: Oxford University Press, 1998.
- [2] Tyson R K. Principles of adaptive optics [M]. Pittsburgh: Academic Press, 1998.
- [3] Bridges W B, Brunner P T, Lazzara S P, et al. Coherent optical adaptive techniques [J]. Applied Optics, 1974, 13(2): 291-300.
- [4] Freund I. Looking through walls and around corners [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 1990, 168(1):49-65.
- [5] van Rossum M C W, Nieuwenhuizen T M. Multiple scattering of classical waves: microscopy, mesoscopy, and diffusion [J]. Reviews of Modern Physics, 1999, 71(1): 313.
- [6] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media [J]. Optics Letters, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [7] Park J H, Yu Z P, Lee K, et al. Perspective: wavefront shaping techniques for controlling multiple light scattering in biological tissues: toward *in vivo* applications [J]. APL Photonics, 2018, 3(10): 100901.
- [8] Rotter S, Gigan S. Light fields in complex media: mesoscopic scattering meets wave control [J]. Reviews of Modern Physics, 2017, 89: 015005.
- [9] He H X, Zhou J Y. Optical imaging beyond conventional limits: an introduction to scattering light imaging techniques [J]. Physics, 2016, 45(10): 660-666.  
和河向, 周建英. 超常规光学透视成像研究进展: 散射光成像技术介绍 [J]. 物理, 2016, 45(10): 660-666.
- [10] Zhu L, Shao X P. Research progress on scattering imaging technology [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(1): 0111005.



- 朱磊, 邵晓鹏. 散射成像技术的研究进展[J]. 光学学报, 2020, 40(1): 0111005.
- [11] Zheng S S, Yang W Q, Situ G H. Application of computational optical imaging in scattering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(6): 0603005.  
郑珊珊, 杨婉琴, 司徒国海. 计算光学成像在散射中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6): 0603005.
- [12] Wang L, Ho P P, Liu C, et al. Ballistic 2-D imaging through scattering walls using an ultrafast optical Kerr gate[J]. *Science*, 1991, 253(5021): 769-771.
- [13] Kang S, Jeong S, Choi W, et al. Imaging deep within a scattering medium using collective accumulation of single-scattered waves [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9(4): 253-258.
- [14] Velten A, Willwacher T, Gupta O, et al. Recovering three-dimensional shape around a corner using ultrafast time-of-flight imaging [J]. *Nature Communications*, 2012, 3: 745.
- [15] Sticker M, Hitzenberger C K, Leitgeb R, et al. Quantitative differential phase measurement and imaging in transparent and turbid media by optical coherence tomography[J]. *Optics Letters*, 2001, 26(8): 518-520.
- [16] Li F, Xu T, Nguyen D H, et al. Label-free evaluation of angiogenic sprouting in microengineered devices using ultrahigh-resolution optical coherence microscopy[J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2014, 19(1): 16006.
- [17] Tyo J S, Rowe M P, Pugh E N, et al. Target detection in optically scattering media by polarization-difference imaging [J]. *Applied Optics*, 1996, 35(11): 1855-1870.
- [18] Vellekoop I M. Feedback-based wavefront shaping [J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12189-12206.
- [19] Yang Q, Cao L C, Jin G F. Progress in optical focusing techniques aiming to suppress scattering effect in biomedical tissues [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(9): 0901001.  
杨强, 曹良才, 金国藩. 可抑制生物组织散射效应的光学聚焦技术研究进展 [J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0901001.
- [20] Wen Z B, Wu Y L, Zhang X D, et al. A real time imaging method for internal targets of strongly scattering media with high resolution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2): 0211006.  
文政博, 吴雨霖, 张秀达, 等. 强散射体内部目标的实时高分辨率成像方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(2): 0211006.
- [21] 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.
- [22] Yaqoob Z, Psaltis D, Feld M S, et al. Optical phase conjugation for turbidity suppression in biological samples [J]. *Nature Photonics*, 2008, 2(2): 110-115.
- [23] Si K, Fiolka R, Cui M. Fluorescence imaging beyond the ballistic regime by ultrasound pulse guided digital phase conjugation [J]. *Nature Photonics*, 2012, 6(10): 657-661.
- [24] Papadopoulos I N, Jouhannau J S, Poulet J F A, et al. Scattering compensation by focus scanning holographic aberration probing (F-SHARP) [J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(2): 116-123.
- [25] Zhang H B, Zhang X R. Coherence of digital phase conjugation for implementing time reversal in scattering media [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(5): 054201.  
张洪波, 张希仁. 用于实现散射介质中时间反演的数字相位共轭的相干性 [J]. 物理学报, 2018, 67(5): 054201.
- [26] Ma C, Di J, Zhang Y, et al. Reconstruction of structured laser beams through a multimode fiber based on digital optical phase conjugation [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(14): 3333-3336.
- [27] Lyu M, Wang H, Li G W, et al. Learning-based lensless imaging through optically thick scattering media [J]. *Advanced Photonics*, 2019, 1(3): 36002.
- [28] Chen H, Gao Y S, Liu X Z, et al. Imaging through scattering media using speckle pattern classification based support vector regression [J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26663-26678.
- [29] Guo E L, Zhu S, Sun Y, et al. Learning-based method to reconstruct complex targets through scattering medium beyond the memory effect [J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 2433-2446.
- [30] Li Y Z, Xue Y J, Tian L. Deep speckle correlation: a deep learning approach toward scalable imaging through scattering media [J]. *Optica*, 2018, 5(10): 1181-1190.
- [31] Barbastathis G, Ozcan A, Situ G H. On the use of deep learning for computational imaging [J]. *Optica*, 2019, 6(8): 921-943.
- [32] van Putten E, Mosk A. The information age in

- optics: measuring the transmission matrix [J]. *Physics*, 2010, 3(22): 1-3.
- [33] Katz O, Ramaz F, Gigan S, et al. Controlling light in complex media beyond the acoustic diffraction-limit using the acousto-optic transmission matrix [J]. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 717.
- [34] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Image transmission through an opaque material[J]. *Nature Communications*, 2010, 1: 81.
- [35] Popoff S M, Lerosey G, Carminati R, et al. Measuring the transmission matrix in optics: an approach to the study and control of light propagation in disordered media [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 104(10): 100601.
- [36] Popoff S, Lerosey G, Fink M, et al. Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(12): 123021.
- [37] Xie X S, Liu Y K, Liang H W, et al. Speckle correlation imaging: from point spread functions to light field plenoptics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(1): 0111004.  
谢向生, 刘忆琨, 梁浩文, 等. 散斑相关成像: 从点扩展函数到光场全要素 [J]. *光学学报*, 2020, 40(1): 0111004.
- [38] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, et al. Non-invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [39] Katz O, Heidmann P, Fink M, et al. Non-invasive single-shot imaging through scattering layers and around corners via speckle correlations [J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(10): 784-790.
- [40] Han J H, Tian Y Z, Fan X H, et al. A single-pixel imaging system with a target in the middle of double scattering medium[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0611001.  
韩建辉, 田勇志, 范晓杭, 等. 一种双层散射介质中间目标单像素成像系统研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0611001.
- [41] Mahalati R N, Gu R Y, Kahn J M. Resolution limits for imaging through multi-mode fiber [J]. *Optics Express*, 2013, 21(2): 1656-1668.
- [42] Gabor D. A new microscopic principle[J]. *Nature*, 1948, 161(4098): 777-778.
- [43] Leith E N, Upatnieks J. Wavefront reconstruction with continuous-tone objects [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1963, 53(12): 1377-1381.
- [44] Goodman J W, Lawrence R W. Digital image formation from electronically detected holograms[J]. *Applied Physics Letters*, 1967, 11(3): 77-79.
- [45] Schnars U, Jüptner W P O. Digital recording and numerical reconstruction of holograms [J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(9): R85-R101.
- [46] Yamaguchi I. Phase-shifting digital holography [M]// Poon T C. *Digital holography and three-dimensional display*. Boston: Springer, 2006: 145-171.
- [47] Lатычевскаиа T. Iterative phase retrieval for digital holography: tutorial [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2019, 36(12): D31-D40.
- [48] Lатычевскаиа T, Fink H W. Solution to the twin image problem in holography [J]. *Physical Review Letters*, 2007, 98(23): 233901.
- [49] Takeda M, Wang W, Duan Z H, et al. Coherence holography [J]. *Optics Express*, 2005, 13(23): 9629-9635.
- [50] Naik D N, Singh R K, Ezawa T, et al. Photon correlation holography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(2): 1408-1421.
- [51] Michelson A A, Pease F G. Measurement of the diameter of alpha-orionis by the interferometer [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1921, 7(5): 143-146.
- [52] Brown R H, Twiss R Q. Correlation between photons in two coherent beams of light [J]. *Nature*, 1956, 177(4497): 27-29.
- [53] Naik D N, Ezawa T, Miyamoto Y, et al. 3-D coherence holography using a modified Sagnac radial shearing interferometer with geometric phase shift [J]. *Optics Express*, 2009, 17(13): 10633-10641.
- [54] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [55] Takeda M. Spatial stationarity of statistical optical fields for coherence holography and photon correlation holography [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(17): 3452-3455.
- [56] Singh R K, Vinu R V, Anandraj S M. Recovery of complex valued objects from two-point intensity correlation measurement [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 104(11): 111108.
- [57] Goodman J W, Huntley W H, Jr, Jackson D W, et al. Wavefront-reconstruction imaging through random media [J]. *Applied Physics Letters*, 1966, 8(12): 311-313.

- [58] Kogelnik H, Pennington K S. Holographic imaging through a random medium[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1968, 58(2): 273-274.
- [59] Leith E N, Upatnieks J. Holographic imagery through diffusing media[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1966, 56(4): 523.
- [60] Cathey W T, Hadwin J F, Pace J D. Imaging through turbulent water using speckle reference holography[J]. *Applied Optics*, 1973, 12(11): 2683-2685.
- [61] Lohmann A W, Schmalfluss H. Holography through fog. A new version[J]. *Optics Communications*, 1978, 26(3):318-321.
- [62] Gerritsen H J. Holography and four-wave mixing to see through the skin[J]. *Proceedings of SPIE*, 1985, 0519: 128-131.
- [63] Xu W, Jericho M H, Meinertzhagen I A, et al. Digital in-line holography for biological applications[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2001, 98(20): 11301-11305.
- [64] Leith E, Chen C, Chen H, et al. Imaging through scattering media with holography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1992, 9(7): 1148-1153.
- [65] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Looking through a diffuser and around an opaque surface: a holographic approach[J]. *Optics Express*, 2014, 22(7): 7694-7701.
- [66] Li S, Zhong J. Dynamic imaging through turbid media based on digital holography[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2014, 31(3): 480-486.
- [67] Naik D N, Ezawa T, Miyamoto Y, et al. Phase-shift coherence holography[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(10): 1728-1730.
- [68] Naik D N, Ezawa T, Miyamoto Y, et al. Real-time coherence holography[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13782-13787.
- [69] Singh R K, Naik D N, Itou H, et al. Vectorial coherence holography[J]. *Optics Express*, 2011, 19(12): 11558-11567.
- [70] Takeda M, Ina H, Kobayashi S. Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry[J]. *Journal of Optical Society of American*, 1982, 72(1): 156-160.
- [71] Singh R K, Sharma A M, Das B. Quantitative phase-contrast imaging through a scattering media[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(17): 5054-5057.
- [72] Harm W, Roeder C, Jesacher A, et al. Lensless imaging through thin diffusive media[J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 22146-22156.
- [73] Zhang H, Liu S, Cao L, et al. Noise suppression for ballistic-photons based on compressive in-line holographic imaging through an inhomogeneous medium[J]. *Optics Express*, 2020, 28(7): 10337-10349.
- [74] Kodama S, Ohta M, Ikeda K, et al. Three-dimensional microscopic imaging through scattering media based on in-line phase-shift digital holography[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): G345-G350.
- [75] R V V, Kim K, Somkuwar A S, et al. Imaging through scattering media using digital holography[J]. *Optics Communications*, 2019, 439:218-223.
- [76] Munro P R T. Introduction to the theory of coherence and polarization of light[J]. *Contemporary Physics*, 2009, 50(6): 661-662.
- [77] Wolf E. Introduction to the theory of coherence and polarization of light[M]. Pu J X, Transl. Beijing: Peking University Press, 2014.  
沃尔夫.光的相干与偏振理论导论[M]. 蒲继雄,译.北京:北京大学出版社,2014.
- [78] Vinu R V, Singh R K. Synthesis of statistical properties of a randomly fluctuating polarized field[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6491-6497.
- [79] Somkuwar A S, Das B, Vinu R V, et al. Holographic imaging through a scattering layer using speckle interferometry[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2017, 34(8): 1392-1399.
- [80] Singh A K, Naik D N, Pedrini G, et al. Exploiting scattering media for exploring 3D objects[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(2): e16219.
- [81] Takeda M, Singh A K, Naik D N, et al. Holographic correloscopy: unconventional holographic techniques for imaging a three-dimensional object through an opaque diffuser or via a scattering wall: a review[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2016, 12(4): 1631-1640.
- [82] Singh D, Singh R K. Lensless Stokes holography with the Hanbury Brown-Twiss approach[J]. *Optics Express*, 2018, 26(8): 10801-10812.
- [83] Singh R K. Hybrid correlation holography with a single pixel detector[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(13): 2515-2518.
- [84] Saluja R, Subrahmanyam G R K S, Mishra D, et al. Compressive correlation holography[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(24): 6949-6955.



- [85] Das B, Bisht N S, Vinu R V, et al. Lensless complex amplitude image retrieval through a visually opaque scattering medium[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(16): 4591-4597.
- [86] Vinu R V, Chen Z, Singh R K, et al. Ghost diffraction holographic microscopy[J]. *Optica*, 2020, 7(12): 1697-1704.
- [87] Chen L, Singh R K, Chen Z, et al. Phase shifting digital holography with the Hanbury Brown - Twiss approach[J]. *Optics Letters*, 2020, 45(1): 212-215.
- [88] Chen L, Chen Z Y, Chen Z Y, et al. Imaging of polarimetric-phase object through scattering medium by phase shifting[J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 8145-8155.