

# 基于解卷积透过散射介质大视场成像恢复方法

曹 玥, 辛 煜\*, 赵 琦

南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京  
Email: \*yxin@njust.edu.cn

收稿日期: 2020年10月12日; 录用日期: 2020年10月27日; 发布日期: 2020年11月3日

## 摘 要

通过基于光学记忆效应的解卷积方法, 我们可以实现薄散射介质后物体的成像恢复。但是, 单个光学记忆效应范围受到散射介质厚度的限制, 成像的视场非常狭小, 不利于实际应用。本文中, 我们展示了两种通过散射介质实现大视场成像恢复的方法, 即前人提出的基于不同区域点扩散函数的去相关性和我们提出的不同区域散斑的独立获取方法, 实验结果表明这两种方法对超过单个记忆效应范围的物体进行散射成像恢复效果良好。

## 关键词

散射成像恢复, 解卷积, 光学记忆效应, 大视场成像

# Large Field of View Imaging Restoration Method Based on Deconvolution through Scattering Media

Yue Cao, Yu Xin\*, Qi Zhao

School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu  
Email: \*yxin@njust.edu.cn

Received: Oct. 12<sup>th</sup>, 2020; accepted: Oct. 27<sup>th</sup>, 2020; published: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2020

## Abstract

By deconvolution method based on optical memory effect, we can realize the image restoration of objects through thin scattering medium. However, the range of single optical memory effect is li-

\*通讯作者。

mitted by the thickness of scattering medium, and the field of view is very narrow, which is not conducive to practical application. In this paper, we show two methods to achieve large field of view imaging recovery through scattering media, the decorrelation based on point spread function in different regions and the independent acquisition of speckle in different regions. The experimental results show that both methods are effective for scattering imaging recovery of objects beyond the range of single memory effect.

## Keywords

Scattering Imaging Recovery, Deconvolution, Optical Memory Effect, Large FOV Imaging

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

一直以来, 光学成像都是人类采集事物信息的重要手段之一, 但是如何克服散射影响进行光学成像恢复仍然是限制人类社会活动的重要科学问题[1]。科学家经过不懈的努力, 提出了多种克服散射影响的成像恢复方法, 包括自适应光学技术, 波前整形, 相位共轭, 传输矩阵法, 散斑相关[2]等。其中, 散斑相关因为采用非相干光照明, 光路结构较为简单, 成像恢复结果好等优点被广泛地研究应用于通过散射介质成像恢复领域中。散斑相关包括解自相关方法和解卷积方法。Bertolotti 等和 Katz 等分别实现了非侵入式的散斑相关成像, 利用解自相关方法实现了通过单帧散斑非侵入式的成像恢复[3] [4]。然而, 解自相关方法忽略了散射系统的点扩展函数这一特征, 而点扩展函数在一定的范围里满足线性平移不变性, 我们可以把天文光学和显微成像领域的解卷积技术应用于散斑相关方法中, 这就形成了散斑相关的解卷积方法。2016年, 周建英等提出将解卷积技术应用于薄散射体后的成像恢复中, 得到了实时、彩色、超分辨的恢复结果[5]。

解卷积和解自相关方法都基于散斑相关这一原理[6] [7], 但前者成像恢复具有更好的恢复质量, 更高的信噪比和更快的恢复速度等优点, 因此, 在散射系统点扩散函数已知的情况下, 我们通常采用解卷积的方法来实现通过散射介质成像恢复。散斑相关成像所依赖的物理基础和关键是光学记忆效应, 而光学记忆效应范围通常比较小。对于大视场的物体来说, 是超出单个记忆效应范围的。为了解决这个问题, 本文提出了基于不同区域点扩散函数的去相关性和不同区域散斑的独立获取的方法。实验结果表明, 两种方法对于大视场物体的散射成像恢复效果良好, 重建细节清晰。

## 2. 散斑相关物理基础和解卷积原理

### 2.1. 光学记忆效应

散斑相关成像技术的物理基础和依赖的关键是光学记忆效应。Feng 和 Freund 等研究表明: 当前后两束光束入射到散射介质同一位置上, 且入射角差很小时, 探测器上接收的散斑仅仅是对应入射角方向整体平移了一段距离, 这种现象被称为光学记忆效应。光学记忆效应的范围可以通过计算散斑之间的相关函数来获得, 表达式为:

$$C(qL) = [qL / \sinh(qL)]^2 \quad (1)$$

其中,  $q = 2\pi\Delta\theta/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光的波长,  $\Delta\theta$  为转动角度,  $L$  为散射介质的厚度。记忆效应的有效角度范围随着散射介质厚度的增加而减小, 最大角度  $\Delta\theta$  约为  $\lambda/2\pi L$ 。而当目标物体和散射介质距离确定时(设为  $u$ ), 目标尺寸  $\Delta x$  满足:

$$\frac{\Delta x}{u} \approx 2\Delta\theta \quad (2)$$

由于  $\Delta\theta$  最大为  $\lambda/2\pi L$ , 因此在散射成像中, 目标物体的尺寸局限于:

$$\Delta x \leq u \frac{\lambda}{\pi L} \quad (3)$$

图 1 为光学记忆效应范围的示意图。

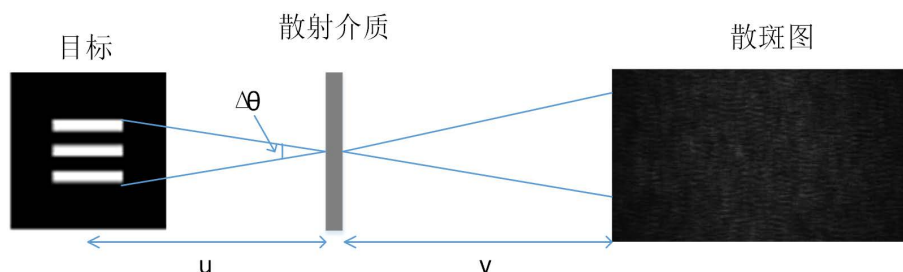


Figure 1. Schematic diagram of the range of optical memory effects

图 1. 光学记忆效应范围示意图

## 2.2. 解卷积法原理

由于光学记忆效应的存在, 散射介质所在光学系统可以看作是具有移位不变性的点扩散函数(PSF)的非相干成像系统。在记忆效应范围里, 整个成像过程可以表示为散射成像系统的 PSF 和物体光强分布的卷积, 可以由下式表示:

$$I(x_i, y_i) = F(x_i, y_i) \iint PSF(x_i, y_i; x_o, y_o) O(x_o, y_o) dx_o dy_o \quad (4)$$

式中, 下标  $i$  和  $o$  分别表示像平面和物平面,  $F(\cdot)$  表示形状因子函数, 即为放在焦平面上限制视场角的光阑。上式可以用卷积的形式简写为:

$$I = F \cdot (O * PSF) \quad (5)$$

因此, 当忽略  $F$  函数, 在记忆效应范围内, 我们可以将整个成像系统视作一个黑盒子, 如果检测或估计了薄散射介质的 PSF 后, 即可用解卷积运算  $O \approx deconv(I, PSF)$  来重建物体的图像[8] [9] [10] [11]。人们提出了很多解卷积的算法, 较为常见的解卷积算法是维纳解卷积滤波[12] [13], 它可以表示为:

$$F\{O\} = \frac{F\{PSF\}^*}{|F\{PSF\}|^2 + \frac{S_N}{S_o}} F\{I\} \quad (6)$$

式中:  $S_N = |F\{N\}|^2$  为噪声  $N$  的功率谱;  $S_o = |F\{O\}|^2$  为未退化图像的功率谱。而噪声的功率谱和未退化图像的功率谱不一定能获得, 所以我们通常把它设为常数项, 即  $\frac{S_N}{S_o} = \frac{1}{R_{SN}} \approx k$ , 其中  $R_{SN}$  是信噪比,  $k$

值取决于实验条件适当的选择。这样, 在获取到散射系统的散斑信息以及对应的点扩散函数信息后, 我们就可以利用维纳解卷积滤波算法实现单个记忆效应范围内物体的重建。

### 3. 基于解卷积的大视场成像方法原理

#### 3.1. 不同区域 PSF 的去相关性

对于处于单个记忆效应范围里的物体，我们可以通过测量物体的散斑以及对应的此记忆效应范围的 PSF，利用维纳解卷积滤波算法，实现物体的重建。

实验中我们采用非相干光照明的方式，当物体尺寸超过单个记忆效应范围时，物体产生的总散斑可以看作处于不同记忆效应范围的子物体产生的散斑复合响应，用公式表示为：

$$I = \sum_m I_m = \sum_m O_m * PSF_m \quad (7)$$

式中， $I_m$  和  $O_m$  表示不同区域的散斑像和子物体光强分布， $I$  为总的散斑像。

由于散射介质复杂随机的结构，当物体超过单个记忆效应范围时，像面也是产生独立均匀分布的散斑图案。而对于两个距离超过单个记忆效应范围的点来说，他们所产生的散斑图案(即 PSF)是完全不相干的，用公式可以表示为：

$$PSF_m * PSF_n \approx \begin{cases} 0 & m \neq n \\ \delta & m = n \end{cases} \quad (8)$$

其中，‘ $\star$ ’表示互相关操作。将不同区域的 PSF 与总散斑进行互相关操作，得到：

$$I \star PSF_n = \sum_m (O_m * PSF_m) \star PSF_n = \sum_{m \neq n} (O_m * PSF_m) \star PSF_n + (O_n * PSF_n) \star PSF_n \quad (9)$$

式中  $m \geq n$ 。根据不同区域 PSF 的去相干性，等式右边第一项就约为 0，而第二项等于对应区域的子物体的分布，上式就可以简化为：

$$I \star PSF_n \approx O_n + C \quad (10)$$

其中， $C$  为噪声项， $PSF_n$  和  $O_n$  分别代表对应区域的点扩散函数和子物体分布。通过采集不同区域的 PSF 可以从总散斑图中重建对应区域的物体，可以用下式来表示：

$$O_n = deconv(I, PSF_n) \quad (11)$$

利用维纳滤波解卷积算法，就可以实现不同区域的子物体的重建。最后把重叠区域加权平均，将不同位置的恢复结果合成在同一张图上，即可实现透过散射介质对大视场目标的恢复。

#### 3.2. 不同区域散斑的独立获取

不同于基于不同区域 PSF 的去相关性原理的方法，我们把大视场的物体看作是几个不同部分的组合，通过对大视场物体进行逐区域扫描，获得物体不同区域的散斑。在散射介质固定的情况下，先用针孔采集视场中心的 PSF，然后把物体的不同部分移动到视场中心，通过光阑控制入射光的尺寸分别对不同部分物体成像，获得其对应的散斑图。之后利用采集的 PSF 与不同部分物体的散斑解卷积，就可以得到对应的恢复图。最后把不同部分的恢复结果拼接起来，就实现了透过散射介质对大视场目标的恢复。用公式可以表示为：

$$O = \sum_n O_n = \sum_n deconv(I_n, PSF) \quad (12)$$

其中， $O$  为待恢复的大视场目标， $O_n$  为目标的不同部分。同样的，利用维纳滤波解卷积算法，对实验结果进行拼接，即可实现透过散射介质对大视场目标的成像恢复。

#### 4. 实验系统和实验结果

我们采用两种光路结构来实现大视场目标的散射成像恢复。首先我们设计了用于采集 PSF 的实验光路，如图 2 所示。我们采用氦氖激光器作为光源，通过旋转的磨砂玻璃把入射光调制为非相干光，然后经过焦距为 200 mm 的透镜准直为平行光；随后光束经过一个孔径光阑，用于控制光束的尺寸照射在目标上，提高信噪比。为了采集 PSF，我们的目标选用 100  $\mu\text{m}$  的针孔，将它放置在位移台上用于采集不同区域的 PSF。散射介质(毛玻璃，圆形光漫射器)放置在距离针孔 200 mm 处，用 sCMOS 接收散斑，将它放置在散射介质 100 mm 处。

然后，我们将分辨率板放置在光路中，用于替代针孔的位置，其他的器材均不用移动，用于采集不同区域目标散斑。如图 3 所示。

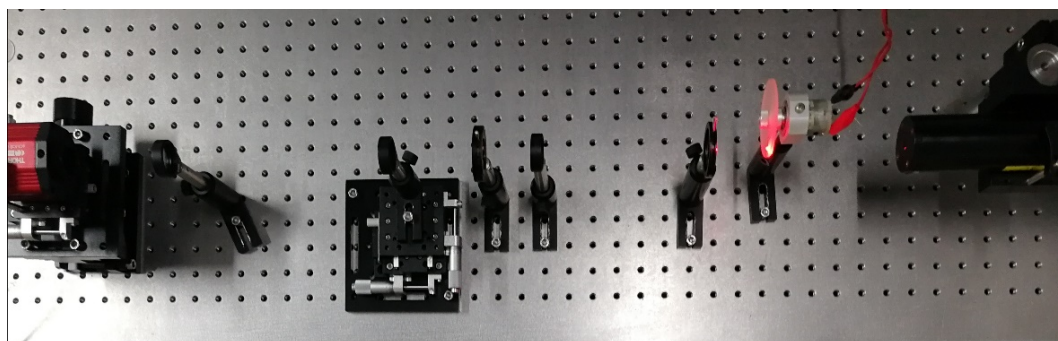


Figure 2. Experimental system diagrams for different PSFs

图 2. 采集不同 PSF 的实验系统图

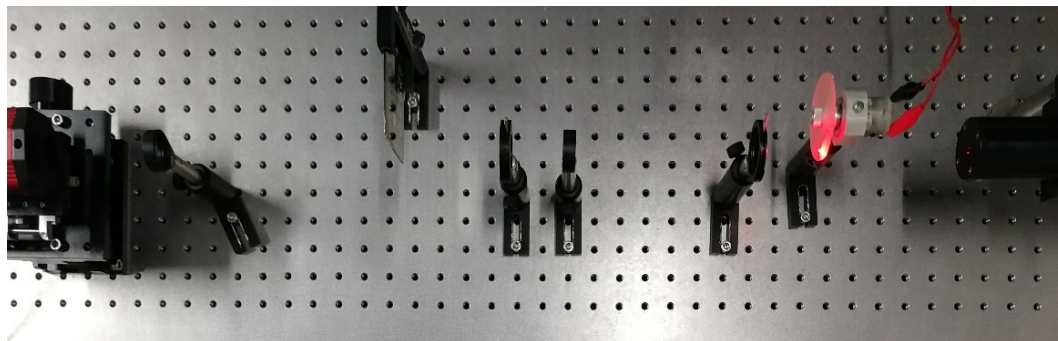


Figure 3. Experimental system diagram of target speckle in different regions

图 3. 采集不同区域目标散斑实验系统图

对于基于不同区域 PSF 的去相关性方法，我们用框架图来阐述，如图 4 所示。

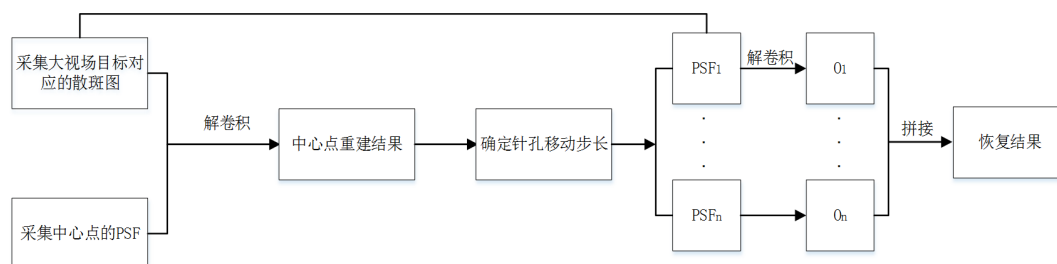


Figure 4. Block diagram of the method of decoherence based on PSF in different regions

图 4. 基于不同区域 PSF 的去相关性方法的框架图

首先我们用图 3 所示的光路来获得大视场物体的总散斑图，通过调节孔径光阑，来控制入射光仅照射在选中的物体上。然后，用图 2 所示的光路来获取视场中心的 PSF。之后用维纳滤波解卷积的算法得到中心 PSF 的恢复结果，如图 5 所示。

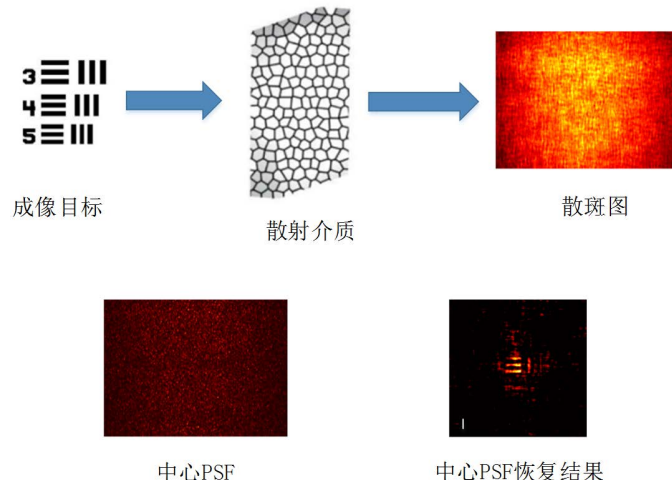


Figure 5. Central PSF image recovery results  
图 5. 中心 PSF 图像恢复结果

其中，中心 PSF 恢复结果比例尺为 50 像素。而我们的 sCMOS 像素尺寸为  $5.04 \mu\text{m}$ ，所以，依据中心 PSF 恢复的结果，通过图 2 的实验系统，我们以 2 mm 的步长移动针孔，采集对应区域的 PSF。之后将获得的不同区域 PSF 与总散斑图进行维纳滤波解卷积，最后将不同区域的重建结果按照实际目标各个部分的距离拼接起来，重叠的部分进行加权平均，得到的结果如图 6 所示。

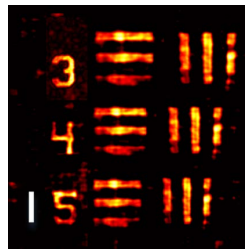


Figure 6. Reconstruction results of decoherent large field of view imaging based on PSFs of different regions

图 6. 基于不同区域 PSF 的去相干性大视场成像恢复结果

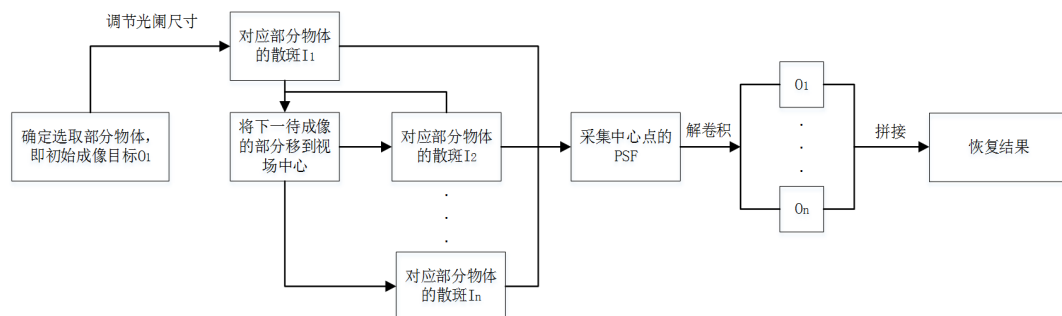
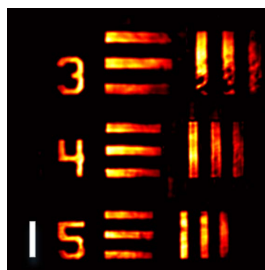


Figure 7. Frame map of speckle independent acquisition in different regions  
图 7. 不同区域散斑独立获取的框架图

从重建的结果可以看出，基于不同区域 PSF 的去相干性方法应用于大视场目标成像恢复，虽然存在着噪声和伪影，但是重建物体的对比度较好，恢复的效果也比较清晰。

对于不同区域散斑独立获取的方法，同样的，我们制定其对应的框架图。如图 7 所示。

我们先用图 2 的光路测得中心视场的 PSF，即图 4 中的中心 PSF 图。之后，通过控制光阑采用合适的尺寸，以最大的目标即右上角的目标物三竖的尺寸作为光阑尺寸，仅仅照射部分目标，比如数字 5，然后依据已知的各个部分之间的间隔将分辨率板移动相应的距离，将下一个待成像的部分移动到视场的中心成像，得到的散斑分别与测得的中心 PSF 进行解卷积恢复出对应的子物体，最后将它们拼接起来，重叠的部分进行加权平均，得到的结果如图 8 所示。



**Figure 8.** Image restoration results of speckle independent acquisition in different regions

**图 8.** 不同区域散斑独立获取的成像恢复结果

## 5. 结论

本文通过基于不同区域 PSF 的去相关性和不同区域散斑的独立获取这两种方法，实现了透过大视场散射介质的成像恢复，解决了单个记忆效应范围成像视场狭窄的问题，提高了成像视场的范围，对超过单个记忆效应范围的物体成像恢复的效果明显。其中，不同区域散斑的独立获取这种方法相较于基于不同区域 PSF 的去相关性方法，恢复的效果更好，成像的细节更为清晰。从理论上分析，基于不同区域 PSF 去相关性的方法是采集不同区域的 PSF 与物体总散斑进行解卷积来恢复，这就会导致待成像目标部分的恢复效果会受到物体其他部分散斑的影响形成噪声，而对于不同区域散斑的独立获取的方法，由于不同区域形成的散斑是独立获取的，因此不存在其他部分对其恢复效果的影响。从实验流程中分析，前者是通过移动针孔来采集不同区域的 PSF，后者是移动目标物体(分辨率板)到视场中心来采集其对应不同部分的散斑，实验的复杂程度相当。但是，后者光阑的尺寸是小于前者的，所以后者的恢复信噪比更高，效果更好。但是基于不同区域 PSF 的去相关性方法也是有其独特优势的，当实际物体无法被移动或者难以准确移动确定距离时，这种方法就有很好的适用性。我们的研究为透过散射介质大视场成像恢复提供了有效的解决手段，拓宽了成像视场的范围。

## 基金项目

我们的研究得到了国家自然科学基金(61675098,61107011)的支持。

## 参考文献

- [1] Wiersma, D.S. (2013) Disordered Photonics. *Nature Photonics*, **7**, 188-196. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.29>
- [2] Stern, G. and Katz, O. (2019) Noninvasive Focusing through Scattering Layers Using Speckle Correlations. *Optics Letters*, **44**, 143-146. <https://doi.org/10.1364/OL.44.000143>
- [3] Bertolotti, J., Van Putten, E.G., Blum, C., *et al.* (2012) Non-Invasive Imaging through Opaque Scattering Layers. *Nature*, **491**, 232-234. <https://doi.org/10.1038/nature11578>

- 
- [4] Katz, O., Heidmann, P., Fink, M., *et al.* (2014) Non-Invasive Single-Shot Imaging through Scattering Layers and around Corners via Speckle Correlations. *Nature Photonics*, **8**, 784-790. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.189>
- [5] Zhuang, H., He, H., Xie, X., *et al.* (2016) High Speed Color Imaging through Scattering Media with a Large Field of View. *Scientific Reports*, **6**, Article ID: 32696. <https://doi.org/10.1038/srep32696>
- [6] Singh, A.K., Naik, D.N., Pedrini, G., *et al.* (2016) Exploiting Scattering Media for Exploring 3D Objects. *Light: Science & Applications*, **6**, e16219. <https://doi.org/10.1038/lsa.2016.219>
- [7] Guo, C.F., Liu, J.T., Wu, T.F., *et al.* (2018) Tracking Moving Targets behind a Scattering Medium via Speckle Correlation. *Applied Optics*, **57**, 905. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000905>
- [8] Lu, D., Liao, M., He, W., *et al.* (2018) Imaging Dynamic Objects Hidden behind Scattering Medium by Retrieving the Point Spread Function. *SPECKLE 2018: VII International Conference on Speckle Metrology*, Janów Podlaski, 7 September 2018, 1083428. <https://doi.org/10.1117/12.2319734>
- [9] Yang, W.Q., Li, G.W. and Situ, G. (2018) Imaging through Scattering Media with the Auxiliary of a Known Reference Object. *Scientific Reports*, **8**, Article Number: 9614. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27754-x>
- [10] Wang, Z., Jin, X., Hu, Y., *et al.* (2017) Non-Invasive Imaging Based on Speckle Pattern Estimation and Deconvolution. *2017 IEEE Visual Communications and Image Processing (VCIP)*, St. Petersburg, 10-13 December 2017, 1-4. <https://doi.org/10.1109/VCIP.2017.8305122>
- [11] Guo, C., Liu, J., Li, W., *et al.* (2018) Imaging through Scattering Layers Exceeding Memory Effect Range by Exploiting Prior Information. *Optics Communications*, **434**, 203-208. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.11.005>
- [12] Xie, J., Xie, X., Gao, Y., *et al.* (2019) Depth Detection Capability and Ultra-Large Depth of Field in Imaging through a Thin Scattering Layer. *Journal of Optics*, **21**, Article ID: 085606. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ab2972>
- [13] Chen, Q., He, H., Xu, X., *et al.* (2018) Memory Effect Based Filter to Improve Imaging Quality through Scattering Layers. *IEEE Photonics Journal*, **10**, 1-10. <https://doi.org/10.1109/JPHOT.2018.2873089>