

基于光学传输矩阵实现透过散射介质的动态目标成像

孙雪莹, 王剑南, 李伟, 刘杰涛, 王纲, 计婷, 邵晓鹏*

西安电子科技大学物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071

摘要 提出了一种实现动态目标散射成像的方法。通过四步相移干涉法测量得到光学传输矩阵, 数值仿真了相位共轭、Tikhnov 正则化和全变分最小化三种重建算法对透过散射介质的不同动态目标的跟踪与重建, 并搭建实验装置, 验证了此方法的可行性, 分析比较了三种算法的重建能力。结果表明, 全变分最小化算法的重建效果最好。该方法为生物医学领域中透过散射介质对动态目标成像提供了新思路。

关键词 散射; 光学传输矩阵; 动态成像; 重建算法

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1205001

Dynamic Target Imaging through Scattering Media Based on Optical Transmission Matrix

Sun Xueying, Wang Jiannan, Li Wei, Liu Jietao, Wang Gang, Ji Ting, Shao Xiaopeng*

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China

Abstract Herein, we proposed a dynamic target scattering imaging method. First, we measured the optical transmission matrix by using a four-step phase-shifting interferometry method. Then, we performed numerical simulations of tracking and reconstruction for different dynamic targets through the scattering medium based on phase conjugation, Tikhnov regularization, and total variation minimization algorithms. The feasibility of this method was experimentally verified, and the properties of the three algorithms were compared. The results show that the antinoise ability of the total variation minimization algorithm is the best. The proposed method provides a new idea for dynamic target imaging through scattering media in the biomedical field.

Key words scattering; optical transmission matrix; dynamic imaging; reconstruction algorithm

OCIS codes 290.7050; 290.2558; 290.5820

1 引 言

光与随机散射介质的作用机理很复杂, 不仅与入射光波的特性有关, 而且与散射介质的微观结构有密切关系。传统透过散射介质成像的方式大致可以归结为四类: 1) 研究统计散斑场的随机特性, 如 2012 年意大利科学家 Bertolotti 等^[1]在 *Nature* 上提出利用散斑相关技术 (Speckle Correlation Technique, SCT), 即利用散斑与目标的自相关相似性实现透过散射介质成像; 2) 研究散射介质引入的波前畸变, 使用波前整形技术对散射介质进行波前补偿^[2], 将其变为可控光学元件, 如 2015 年 Horstmeyer 等^[3]利用波前整形技术实现了在散射

介质内部的聚焦; 3) 研究散射介质的散射特性, 并利用传输矩阵表示光场输入输出的变换作用, 如 2010 年法国科学家 Popoff 等^[4]首次利用光学传输矩阵 (Optical Transmission Matrix, OTM) 方法, 实现了透过散射介质的目标成像; 4) 研究透过散射介质的弹道光子, 通过分析特定的时域廓线, 遴选出直接透过散射介质的弹道光子进行成像, 如 2015 年美国科学家 Badon 等^[5]利用时间门控反射本征通道实现了对深度目标的成像。其中, 散斑相关技术受限于光学记忆效应和成像光源谱宽等因素; 波前整形技术对不同目标成像时需要进行多次迭代优化, 且需要用引导星 (guidestar) 标记; 门控技术对成像设备的性能要求较高, 且只针对静态目标有效。考

收稿日期: 2018-06-05; 修回日期: 2018-07-19; 录用日期: 2018-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(61575154)、中央高校基本科研业务费(SA-ZD160501)、111 引智计划(B17035)

* E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

考虑到实际应用需求,透过散射介质的动态目标成像可应用于医学成像领域,对动态细胞进行成像;在军事作战领域中,可对障碍物后的动态目标进行探测与识别;还可对运动的星系进行成像观测等^[6]。研究一种透过散射介质对动态目标成像的方法,需求迫切,意义重大。

本文提出了一种不受光学记忆效应限制的动态目标散射成像方法,介绍了基于四步相移干涉法^[4]测量散射介质的光学传输矩阵以及成像原理,进行数值仿真并利用光学相位共轭^[5](Optical Phase Conjugation, OPC), Tikhnov 正则化算法^[7](Tikhnov Regularization Algorithm, TRA)以及基于增广拉格朗日法和交替方向法的全变分最小化方法^[8](Total Variation Minimization by Augmented Lagrangian and Alternating Direction Algorithms, TVAL3)对动态目标进行重建,搭建了实验系统,验证了方法可行性与可靠性,并使用峰值信噪比(Peaks Signal Noise Ratio, PSNR)以及图像相似度函数分析了三种重建算法的优劣,讨论了不同算法对两种不同运动目标的重建能力。仿真及实验结果表明,TVAL3 算法的抗噪性能最强,重建目标相似度最高。

2 矩阵测量及成像原理

当随机散射介质处于稳态时,入射到散射介质上的光场 \mathbf{E}_{in} 与出射光场 \mathbf{E}_{out} 之间的关系可以离散化表示为复矩阵 \mathbf{K}_{mn} ,复矩阵中的各项元素为 k_{mn} ,其中输入场第 n 个模式与输出场第 m 个模式的关系可以写为

$$\mathbf{E}_{out_m} = \sum_{n=1}^N k_{mn} \mathbf{E}_{in_n}. \quad (1)$$

考虑到单臂干涉光路的设定,将入射场分为调制部分 $\mathbf{E}_{in_mod_n}$ 和参考部分 \mathbf{S}_m ,则第 m 个输出模式光强可以表示为

$$\mathbf{I}_m^\alpha = |\mathbf{E}_{out_m}|^2 = |\mathbf{S}_m|^2 +$$

$$\left| \sum_{n=1}^N k_{mn} \mathbf{E}_{in_mod_n} \right|^2 + 2\text{Re} \left[\exp(i\alpha) \bar{\mathbf{S}}_m \sum_{n=1}^N k_{mn} \mathbf{E}_{in_mod_n} \right], \quad (2)$$

式中: $\bar{\mathbf{S}}_m$ 为 \mathbf{S}_m 的转置共轭; $\text{Re}(\cdot)$ 算子为复数取实部; α 为相移。通过引入不同的相移 $\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$,输入光场与第 m 个输出模式光强 \mathbf{I}_m^α 间的关系为^[4]

$$\frac{\mathbf{I}_m^0 - \mathbf{I}_m^\pi}{4} + i \frac{\mathbf{I}_m^{(3\pi/2)} - \mathbf{I}_m^{(\pi/2)}}{4} = \bar{\mathbf{S}}_m \sum_{n=1}^N k_{mn} \mathbf{E}_{in_mod_n}. \quad (3)$$

由于参考光 $\bar{\mathbf{S}}_m$ 是已知且恒定的,通过给定一组线性无关的输入 $\mathbf{E}_{in_mod_n}$,测量出四步相移对应的光强 $\mathbf{I}_m^{(\alpha)}$ ($\alpha = 0, \pi/2, \pi, 3\pi/2$) 即可联立方程组求解出复矩阵 \mathbf{K}_{mn} 中的所有元素。

本实验中空间光调制器(Spatial light modulator, SLM)为纯相位型,无法直接对入射场的振幅进行调制^[9],故使用“两个相位板”法^[10]生成虚拟物体,进行透过散射介质成像。其中,加载到 SLM 上的参考相位板 \mathbf{P}_{ref} 第 m 个模式与目标相位板 \mathbf{P}_{obj} 第 m 个模式的关系为

$$\mathbf{P}_{obj_m} = \mathbf{P}_{ref_m} \exp(i\mathbf{S}_{obj_m} \pi), \quad (4)$$

式中: \mathbf{S}_{obj_m} 为待重建运动目标。虚拟物体 E_{obj} 的振幅 E_{amp} 可以由两个相位板差值的模值决定,即

$$E_{amp} = |\mathbf{P}_{obj} - \mathbf{P}_{ref}| = 2\sin(E_{obj} \pi/2). \quad (5)$$

通过四步相移干涉的方式,分别获取两个相位板的输出光场,再利用所测量的光学传输矩阵以及重建算法,即可实现对运动目标的成像。

3 数值仿真及结果

利用高斯圆型分布矩阵^[11-12]原理仿真散射介质。基于角谱传输理论仿真光波在自由空间的衍射与传输。考虑到 SLM 的纯相位调制特性,为保证相同的强度调制,仿真四步相移法测量传输矩阵过程所用的输入场为哈达玛基(Hadamard basis)^[12]。由于哈达玛基的元素为 ± 1 ,故可提高最大波前强度利用率,降低对噪声的敏感度。最后用三种重建算法仿真重建出动态目标。测量 OTM 的矩阵维度是 64×64 ,仿真设置的两类运动目标分别是“追迹”类目标和“扩散”类目标,其中“追迹”类目标采用目标“☆”,“扩散”类目标采用“西电”。图 1 中 Moving trace 表示目标“☆”的运动轨迹,将总运动时间为 0.02 s 的目标视频划分为 36 帧图像并进行轨迹跟踪与重建。以 3 ms 的相同时间间隔选取 8 帧图像示意,如图 1 所示,其中(a-h)表示不同时刻下目标的运动位置,第 1 行是原目标图像,其余每行对应不同重建算法的结果图。图 2 中用笔画书写方式代表“扩散”类目标,由于随着时间的变化,汉字笔画数增多,此过程类似于生物医学中细胞团扩散。同样,由于此类目标复杂,将“扩散”时长为 0.02 s 的视频划分为 72 帧图像仿真重建,以时间间隔为 3 ms 选出图 2 中(a-h)的 8 帧示意,OPC、TRA 和 TVAL3 算法的重建结果如图 2 中第 2 至 4 行所示。

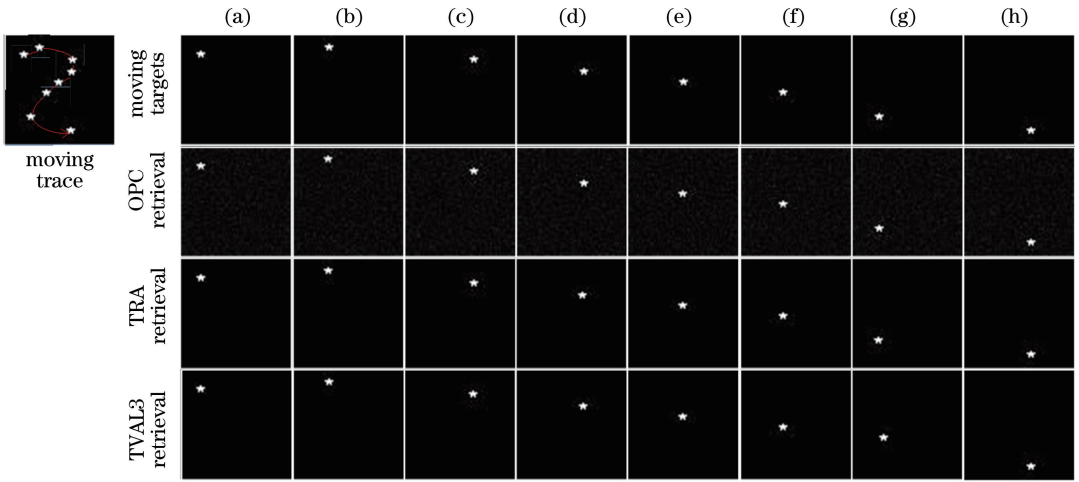


图 1 “追迹”类目标成像仿真结果

Fig. 1 Imaging simulation of 'tracking' target

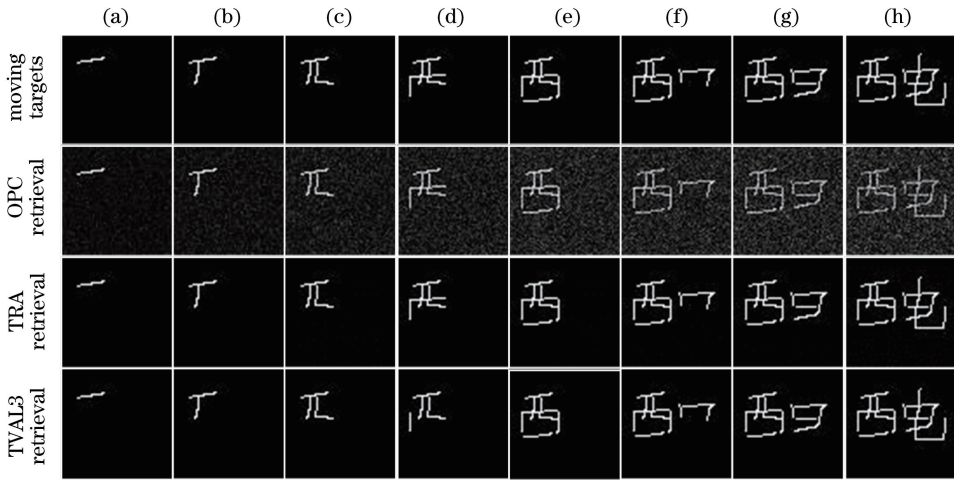


图 2 “扩散”类目标成像仿真结果

Fig. 2 Imaging simulation of 'diffusing' target

4 实验装置及结果

测量随机散射介质 OTM 的实验装置如图 3 所

示。实验光源系统部分选择波长为 532 nm 单色激光器(Nd:YAG, Cobolt, Inc., Sweden), 经过扩束后的激光通过半波片 P_1 选择出与 SLM 最佳调制偏振

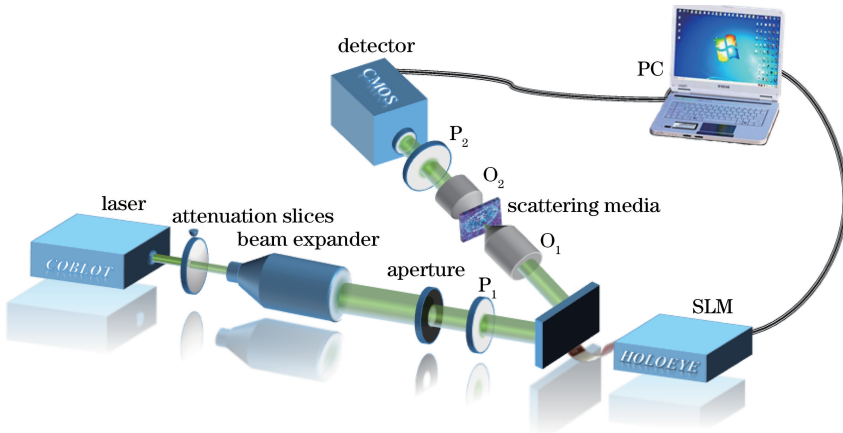


图 3 实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental apparatus

方向相同的偏振方向。照射在纯相位调制型 SLM (VIS-016, Holoeye Pluto, Germany) 上的光被分为调制部分与参考部分, 其比例近似为 13:7, 经过 SLM 反射的光由显微物镜 O_1 ($10\times$, 数值孔径 $NA=0.25$) 聚焦在散射介质上。随机散射介质采用磨砂玻璃 (220-grit)。毛玻璃后的显微物镜 O_2 ($40\times$, $NA=0.65$) 用来收集散射光。携带部分弹道光子的散射光通过偏振片 P_2 滤除弹道光子, 最后由 sCMOS 相机 (Andor Zyla 5.5) 接收散斑图像。通过外接计算机 (PC) 控制 SLM 对入射场的调制及 sCMOS 对散斑场的采集, 结合四步相移法测量光学传输矩阵, 并采用重建算法对动态目标成像。

两类动态目标的参数设置与仿真相同, 实验重

建结果如图 4、图 5 所示。对于“追迹”类目标, 从图 1、图 4 可以看出, 三种重建算法都可较好地对动态目标实现成像, 实验重建出的目标边缘没有仿真重建效果清晰。其中, 成像效果最好的是 TVAL3 算法, OPC 和 TRA 算法重建的结果相比 TVAL3 略微逊色。由于“扩散”类目标复杂, 从视觉效果直观图 2 和图 5, 图 2 仿真图像中目标 (白色区域) 与背景 (黑色区域) 的颜色差异大, 即目标与背景的对比度高, 重建目标图像的效果好, 图 5 中三种重建算法重建出的图像噪点较多, 目标与背景的颜色差异小, 即重建图像对比度降低, 三种算法对目标成像的实验结果相比仿真结果都略逊色, 但 TVAL3 算法重建效果较其余两种算法依然更为有效。

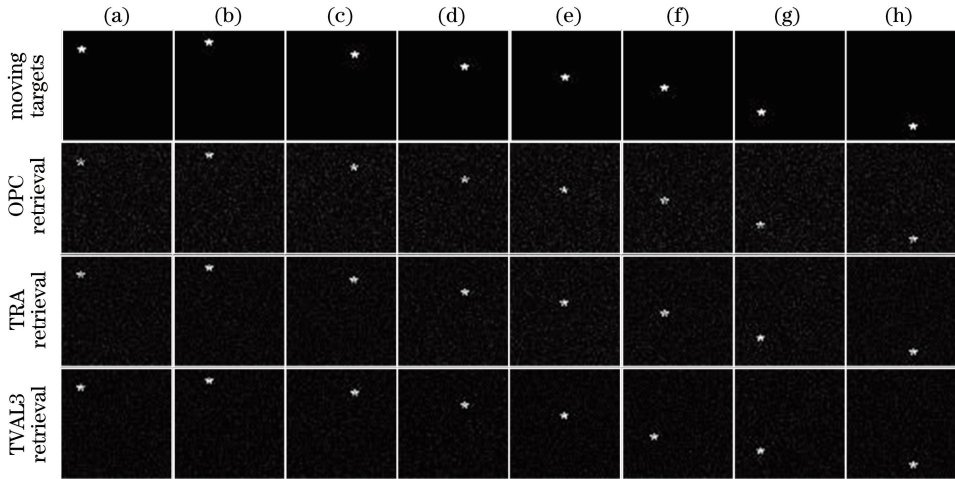


图 4 “追迹”类目标成像实验结果

Fig. 4 Imaging experiment of 'tracking' target

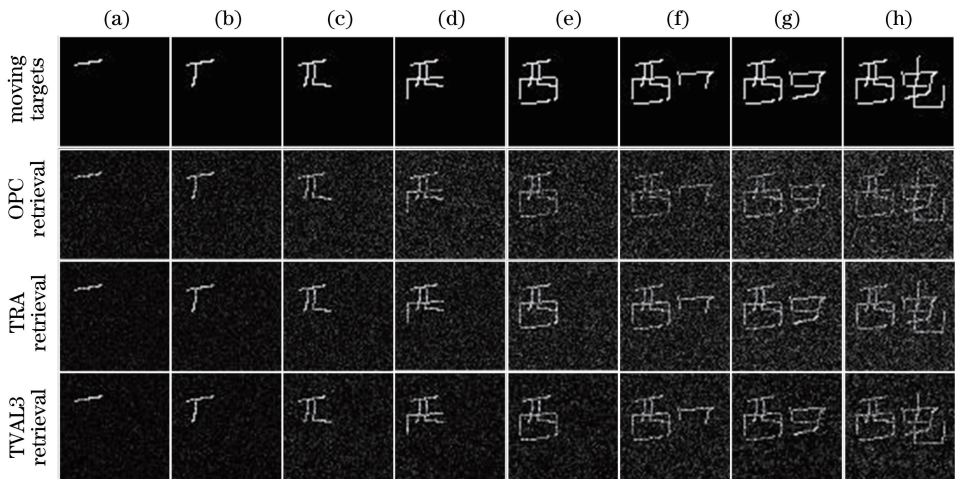


图 5 “扩散”类目标成像实验结果

Fig. 5 Imaging experiment of 'diffusing' target

5 分析与讨论

通过分析原目标与重建目标之间的相关系数和 PSNR,可比较出三种算法重建效果的差异。“追迹”类动态目标的数据分析曲线如图 6(a)、(b)所示,

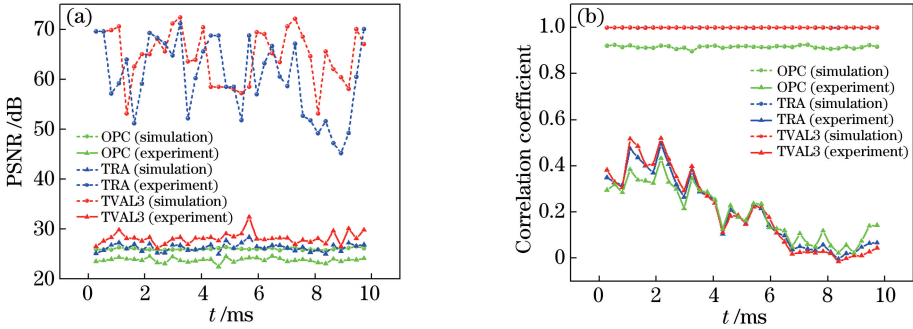


图 6 三种重建算法不同时刻对“追迹”类目标重建的参数变化趋势。(a) PSNR 变化曲线;(b)图像还原度曲线
Fig. 6 Parameters variation trend of three reconstruction algorithms for the ‘tracking’ targets at different time.

(a) PSNR curve; (b) image correlation coefficient curve

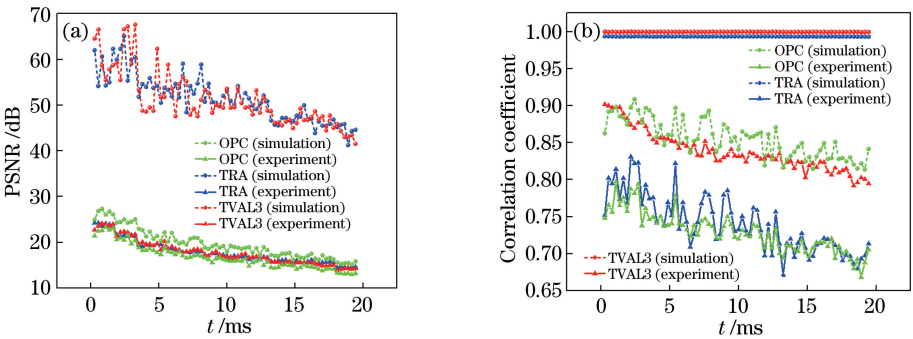


图 7 三种重建算法不同时刻对“扩散”类目标重建的参数变化趋势。(a) PSNR 变化曲线;(b)图像还原度曲线
Fig. 7 Parameters variation trend of three reconstruction algorithms for the ‘diffusing’ targets at different time.

(a) PSNR curve; (b) image correlation coefficient curve

如图 6 所示,当目标为“☆”时,随着运动时间的变化,仿真与实验中,TVAL3 算法的 PSNR 和图像还原度最高,抗噪性能也较好。图 6(b)中 TRA 算法与 TVAL3 算法的两条仿真曲线数值非常接近,且相关系数近乎为 1,但 TRA 算法的 PSNR 参数变化波动较大。仿真和实验中 OPC 算法的 PSNR 数值都为最低,但变化趋于平稳,重建图像与原图像的相关系数较其余两种算法略低。由于实验过程中存在不可避免的噪声,如探测器噪声、杂散光噪声、传输矩阵测量噪声等^[13-14],三种重建算法的图像还原度均较仿真数据低。为获得更好的目标重建图像,在矩阵测量和重建的过程中应尽可能地保证实验光路的稳定性和暗室条件。

因为“扩散”类运动目标较为复杂,PSNR 数值相比“追迹”类运动目标略低。从图 7 可看出,TVAL3 重建算法比 TRA 和 OPC 图像还原度更

高,算法更具优势。

6 结 论

提出了一种透过散射介质对运动目标成像的方法,通过全场四步相移干涉法获得光学传输矩阵,利用该矩阵对单一追迹类目标及变化扩散类目标进行透过散射介质成像的仿真及实验,对比了 OPC、TRA 和 TVAL3 三种不同重建算法的重建效果,并进行了 PSNR 与相关系数分析。实验结果基本符合预期效果,表明利用本文实验装置以及相关算法可以实现透过散射介质对动态目标成像。本文研究方法及其结果对生物医学中动态细胞观测、星系运动探测以及研究特殊介质性质等具有重要意义。

参 考 文 献

[1] Bertolotti J, van Putten E G, Blum C, *et al.* Non-

- invasive imaging through opaque scattering layers[J]. *Nature*, 2012, 491(7423): 232-234.
- [2] Huang H L, Chen Z Y, Sun C Z, *et al.* Focusing laser beams through opaque scattering media [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(6): 0602004. 黄惠玲, 陈子阳, 孙存志, 等. 激光光束经过不透明散射介质的聚焦 [J]. *中国激光*, 2015, 42(6): 0602004.
- [3] Horstmeyer R, Ruan H, Yang C. Guidestar-assisted wavefront-shaping methods for focusing light into biological tissue [J]. *Nature Photonics*, 2015, 9: 563-571.
- [4] 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.
- [5] Badon A, Li D, Lerosey G, *et al.* Smart optical coherence tomography for ultra-deep imaging through highly scattering media[J]. *Science Advances*, 2016, 2(11): e1600370.
- [6] Guo C F, Liu J T, Wu T F, *et al.* Tracking moving targets behind a scattering medium via speckle correlation[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 905-913.
- [7] Xu X, Liu H, Wang L V. Time-reversed ultrasonically encoded optical focusing into scattering media[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5: 154-157.
- [8] Li C. An efficient algorithm for total variation regularization with applications to the single pixel camera and compressive sensing [D]. Houston: Rice University, 2010.
- [9] Zhao M, Zhao M J, Sun C W, *et al.* Measurement and light focusing by transmission matrices of scattering media based on phase-only modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0129001. 赵明, 赵美晶, 孙程伟, 等. 基于纯相位调制的散射介质传输矩阵测量与光波聚焦[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0129001.
- [10] Tikhonov A. Solution of incorrectly formulated problems and the regularization method [J]. *Soviet Math Dokl*, 1963, 5(4): 1035-1038.
- [11] Vellekoop I M, Mosk A P. Focusing coherent light through opaque strongly scattering media[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(16): 2309-2311.
- [12] Rotter S, Gigan S. Light fields in complex media: Mesoscopic scattering meets wave control [J]. *Reviews of Modern Physics*, 2017, 89(1): 015005.
- [13] Gong C M, Shao X P, Wu T F, *et al.* Total variation optimization for imaging through turbid media with transmission matrix [J]. *Optical Engineering*, 2016, 55(12): 121703.
- [14] Popoff S M, Lerosey G, Fink M, *et al.* Controlling light through optical disordered media: transmission matrix approach[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(12): 123021.