

宽视场偏振调制成像的变指数正则化重构方法

吴穹¹, 高昆^{1*}, 张震洲¹, 豆泽阳¹, 刘卫平², 熊吉川²

¹北京理工大学光电学院光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081;

²南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

摘要 提出了一种针对宽视场偏振调制显微成像的顾及多降晰因素的点扩展函数(PSF)估计与图像重构的正则化方法,对降晰过程中图像因偏振角调制曲线的拟合偏差、光学系统退化和电荷耦合器件(CCD)离散欠采样而退化的 PSF 估计选用了自适应的变指数函数正则化模型,充分利用获取的图像内容特性选用可变的正则化范数,有效抑制了全变分(TV)正则化的阶梯效应和 Tikhonov 正则化保边性差的缺点。求解过程采用了优化的 Split-Bregman 迭代算法,在保证估计精度的同时降低了计算复杂度。实验结果表明,本文提出的方法能有效估计出成像退化的 PSF,重建的噪声鲁棒性更好。

关键词 成像系统; 变指数正则化; 图像重构; 偏振成像

中图分类号 TP391; TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202040.0111025

Reconstruction of Variable Exponential Regularization for Wide-Field Polarization-Modulated Imaging

Wu Qiong¹, Gan Kun^{1*}, Zhang Zhenzhou¹, Dou Zeyang¹, Liu Weiping², Xiong Jichuan²

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China

Abstract In this study, a regularization method of point spread function (PSF) estimation and image reconstruction considering multiple blur factors about image degradation is proposed for wide-field polarization-modulated microscopic imaging. The adaptive regularization model of variable exponential function is used for the PSF estimation, which is degraded due to the fitting deviation of polarization-angle modulation curve, the degradation of optical system, and discrete under-sampling of charge-coupled device (CCD) during the blurring process. The aim is to fully utilize the acquired image content features, adaptively select a variable regularization norm, and effectively restrain the staircase effect of total variation regularization and the disadvantage of poor edge-preserving property of Tikhonov regularization. The optimized Split-Bregman iterative algorithm is adopted in the solution process, which can ensure the estimation accuracy and reduce the computational complexity as well. Experimental results show that the proposed method can effectively estimate the degraded PSF and improve the noise robustness of image reconstruction.

Key words image system; variable exponential regularization; image reconstruction; polarization imaging

OCIS codes 110.3010; 110.5405; 110.3200

1 引 言

宽视场亚波长纳米粒子特征的检测和高分辨率可视化在成像和光谱学领域有着广泛的应用^[1-5],也

给有效的成像观测技术带来了新的挑战。传统的显微成像^[6-13]一般采用探针点扫描的方式获取待测目标的近场倏逝波信息,以实现突破衍射极限的超分辨成像。但这类方法的视场窄、扫描速度慢、输出图

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2019-10-21; 录用日期: 2019-11-09

基金项目: 科技部重大科学仪器设备开发专项(2017YFF0107102)、国家自然科学基金(61875013,61827814)、北京市自然科学基金(Z19J0018)

* E-mail: gaokun@bit.edu.cn

像帧间延迟大,因此只适用于静态场景成像,无法实现宽视场快速成像。

随着计算成像^[14-15]技术的发展,通过光场调制的方式实现宽视场高分辨率快速成像^[16-17]已成为可能。这类方法又称“非直观成像”^[18-20],即不采用点扫描而通过对成像光路入射光的偏振态、波矢方向、波面相位等表征光波矢量状态的参数进行调制,对于采集的图像序列,根据麦克斯韦方程求解出近场光波参数变化信息,反演重建出远场超分辨图像。如王海娟等^[21]提出了一种基于 Stokes 矢量方法的分孔径全偏振态同时探测的实时彩色偏振成像系统,提升了探测视场和分辨率。刘震等^[22]提出了一种空间调制型全偏振成像系统,通过计算不同偏振角下的 Stokes 参数来优化测量精度。Ullah 等^[18]提出了一种针对氧化亚铜粒子的参数化非直观显微成像算法,通过最小二乘拟合偏振参数,突破了衍射极限,提升了分辨率。

然而,光学系统退化、离散成像器件欠采样效应,以及由于光的偏振态的波阵面和样本介质分布各向异性的波阵面耦合的矢量和进行相位拟合与滤波而导致的拟合误差,都会对重建结果的分辨率有影响^[19-20, 23-25]。将多降晰因素耦合的结果表征在成像系统退化的点扩展函数 (PSF) 上,呈现出复杂的特性(也有文献认为可以近似看作一个带噪声的高斯退化模型^[12]),通过降晰图像来精确估计 PSF 是保证图像重建质量的前提^[26-27]。正则化方法是解决图像重建问题求解中的病态性的最有效的方法之一^[28]。典型的退化模型常采用全变分 (TV) 正则

化^[13]或 Tikhonov 正则化^[23]求解:前者能够平滑 PSF 的平坦区域,但保边性不好;后者能对 PSF 边缘进行强化,但在平坦区域会形成“阶梯效应”^[29]。由此,本文提出了一种基于变指数正则化^[30]的自适应 PSF 估计方法,构建了适用于不同偏振角下 PSF 估计的 $L^{p(x)}$ 变指数正则化模型,能根据图像的特点自适应确定范数 $p(x)$ 的值,从而有效抑制传统 TV 正则化和 Tikhonov 正则化的缺点,使 PSF 的估计和重建更加灵活有效,也保证了图像重建的质量和噪声鲁棒性。在退化的先验知识已知的情况下,本课题组^[30]将清晰遥感图像与其他方法进行了对比,证明了本文使用的变指数正则化方法更有效。

2 基本原理

2.1 实验光路

宽视场偏振调制成像系统使用的光路如图 1 所示,选用了波长为 532 nm 的汞灯作为光源 (LS),出射光被旋转偏振片调制成等间隔偏振角的线偏振光,再经过分束镜 (BS) 和物镜 (objective) 入射到硅胞样本介质,物镜采用 100× 物镜,数值孔径为 0.90。样本介质的后向散射光经由 1/4 波片和 analyzer 组成的检偏器后经 CCD 接收成像,利用计算机对 CCD 采集的图像进行反演重构得到最终结果。

2.2 偏振调制成像 Stokes 分量反演

在偏振调制过程中,CCD 所感知到的光强取决于不同偏振角(即慢轴的偏振方向与水平坐标轴的夹角)下线偏光的偏振态和样本介质分布各向异性的两个波阵面耦合形成的矢量和,可表示为

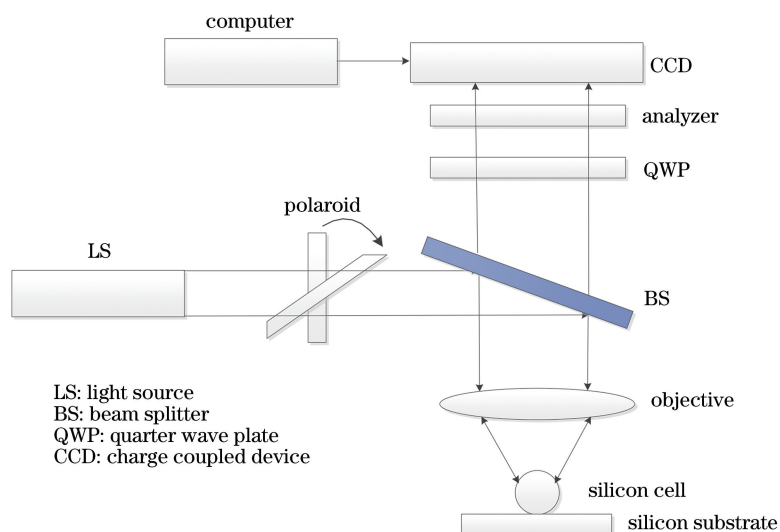


图 1 宽视场偏振调制成像系统的实验光路

Fig. 1 Experimental optical path of wide-field polarization-modulated imaging system

$$I = \frac{I_0}{2} \{1 + \sin[2(\alpha - \varphi)] \sin \delta\}, \quad (1)$$

式中： I_0 为无偏光强； α 为入射角； φ 为偏振角； δ 为偏振相位差（即 x 轴和 y 轴方向上的相位差）。

对(1)式进行三角函数展开，可以得到

$$I = \frac{1}{2} I_0 + \frac{1}{2} I_0 \sin \delta \cos 2\varphi \sin 2\alpha + \frac{1}{2} I_0 \sin \delta \sin 2\varphi \cos 2\alpha, \quad (2)$$

将(2)式改成 α 的函数，则每次调制的光强 I_i 可表示为

$$I_i = a_0 + a_1 \sin \alpha + a_2 \cos \alpha, \quad (3)$$

式中：

$$a_0 = \frac{1}{2} I_0, \quad a_1 = \frac{1}{2} I_0 \sin \delta \cos 2\varphi, \quad a_2 = -\frac{1}{2} I_0 \sin \delta \sin 2\varphi. \quad (4)$$

偏振调制是将旋转偏振片以每次 $\frac{360^\circ}{N}$ 等间隔地旋转一周，由 CCD 采集不同偏振角下 N 个样本的图像序列。利用最小二乘拟合法，可以得到拟合的系数为

$$\bar{a}_0 = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} I_i, \quad \bar{a}_1 = \sum_{i=1}^N \frac{2}{N} I_i \sin \alpha_i, \quad \bar{a}_2 = \sum_{i=1}^N \frac{2}{N} I_i \cos \alpha_i, \quad (5)$$

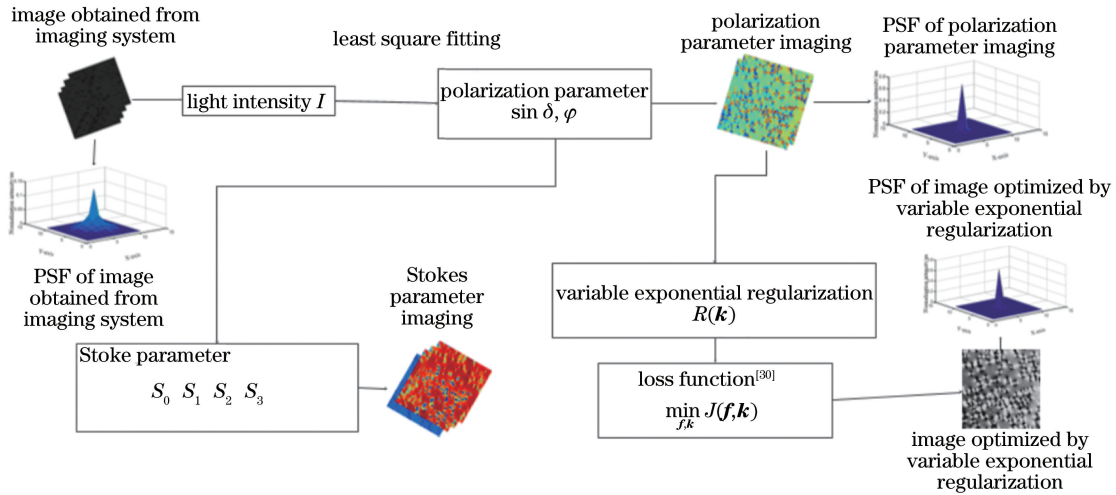


图 2 偏振调制成像阶段获得的 PSF 模型

Fig. 2 Model of PSF obtained during polarization-modulated imaging stage

对于在非相干照明下的衍射受限离散成像系统，从文献[31]可以看出，在光路中只有一个主透镜的情况下，其调制传递函数(MTF) X_{MTFimg} 主要取决于光学系统的 X_{MTFOpt} 与 CCD 离散采样的 X_{MTFCCD} 。因此本文将光学系统看作一个整体，提出退化模型，即

式中： α_i 是不同偏振角下线偏光的入射偏振角， i 表示同一序列中的图像序号； $\bar{a}_0, \bar{a}_1, \bar{a}_2$ 分别表示拟合系数 a_0, a_1, a_2 的均值。联立(4)式和(5)式，可得样本的偏振参数为

$$I_{\text{dp}} = \bar{a}_0, \quad \sin \delta = \frac{(\bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2)^{1/2}}{\bar{a}_0}, \quad \varphi = \frac{1}{2} \arccos \left[\frac{(\bar{a}_1^2 + \bar{a}_2^2)^{1/2}}{\bar{a}_0} \right], \quad (6)$$

式中： I_{dp} 为所有样本偏振光强的均值。

根据(6)式，可以利用 Jones 模型与 Muller 模型之间的相互关系计算出 Stokes 参数，可表示为

$$\begin{cases} S_0 = I_{\text{dp}} (1 + \sin \delta) = E_{0x}^2 + E_{0y}^2 \\ S_1 = I_{\text{dp}} (1 + \sin \delta) \cos 2\varphi = E_{0x}^2 - E_{0y}^2 \\ S_2 = 2\sqrt{I_{\text{dp}}} (1 + \sin \delta) \cos 2\varphi = 2E_{0x}E_{0y} \sin \delta \\ S_3 = 2\sqrt{I_{\text{dp}}} (1 + \sin \delta) \sin 2\varphi = 2E_{0x}E_{0y} \cos \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中： E_{0x} 和 E_{0y} 分别为电场分量在 x 和 y 方向上的振幅。

2.3 偏振调制成像 PSF 模型

偏振调制成像系统在生成图像时对图像的降晰因素主要有不同偏振角对 PSF 的影响、入射光偏振角相位拟合误差、图像序列至单幅图像的多光谱融合、成像光路衍射能量弥散、CCD 欠采样效应等，如图 2 所示。

$$\begin{cases} X_{\text{MTFimg}} = X_{\text{MTFOpt}} X_{\text{MTFCCD}} \\ X_{\text{MTFOpt}} = \frac{2}{\pi} \left[\arccos \left(\frac{f}{f_{\text{max}}} \right) - \left(\frac{f}{f_{\text{max}}} \right) \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_{\text{max}}} \right)^2} \right] \\ X_{\text{MTFCCD}} = \frac{\sin(\pi p f)}{\pi p f} \end{cases} \quad (8)$$

式中: f 为空间频率(lp/mm); f/f_{\max} 为归一化空间频率, 这里 f_{\max} 为光学系统的空间截止频率, $f_{\max} = \frac{1}{\lambda F}$, F 为相机 F 数; p 为 CCD 像元尺寸。

文献[18]分析了偏振调制阶段的降晰模型, 其调制传递函数可近似视为高斯模型, 即

$$X_{\text{MTFpmd}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\mathbf{P}_2 - \mathbf{P}_1)^2, \quad (9)$$

式中: \mathbf{P}_2 表示拟合后的图像; \mathbf{P}_1 表示拟合前的图像; n 表示图像序列中的图像总数。

整个偏振调制成像系统的 PSF 为

$$F_{\text{PS}} = \mathcal{F}^{-1} | X_{\text{MTFpmd}} X_{\text{MTFimg}} |, \quad (10)$$

式中: \mathcal{F}^{-1} 表示傅里叶逆变换。

由此可知, 根据偏振调制成像多降晰因素形成的 PSF 形式相当复杂。文献[12]认为, 多降晰因素共同耦合而导致的图像退化表征在 PSF 上可以近似看作一个带噪声的高斯退化模型, 需要通过降晰图像来精确估计 PSF 以提高图像重建质量。正则化方法是解决图像重建问题求解中病态性的最有效的方法之一。为了优化估计的过程参数, 本文提出了变指数正则化的方法来精确估计 PSF 和实现估计的自适应性, 旨在进一步提升偏振调制成像阶段的图像重建质量。

2.4 变指数正则化模型

根据线性系统理论, 光电成像系统的降晰模型可以表示为

$$\mathbf{u} = \mathbf{k}\mathbf{f} + \mathbf{n}, \quad (11)$$

式中: \mathbf{u} 、 \mathbf{k} 、 \mathbf{f} 、 \mathbf{n} 分别表示降晰图像、降晰的 PSF、未知清晰图像、加性噪声。利用降晰图像估计 PSF 是一个典型的病态问题, 为了保证有解, 而且考虑到 PSF 形态较为复杂, 本文提出了一种变指数正则化项, 表达式为

$$R(\mathbf{k}) = \int |\nabla \mathbf{k}|^{p(|\nabla \mathbf{c}|)} d\sigma, \quad (12)$$

式中: \mathbf{k} 为降晰的 PSF; c 表示未降晰的真实 PSF; $|\nabla \mathbf{k}| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$, k_x 和 k_y 为 \mathbf{k} 在 x 、 y 方向上的偏导数。PSF 估计自适应优化指数为

$$p(s) = 1 + \frac{1}{1 + ts^2}, \quad (13)$$

式中: t 为一个控制曲线下速率的阈值, 当 t 较大时, 正则化方式以 TV 正则化为主, 而当 t 较小时, Tikhonov 正则化起主导作用; s 则用以区分边缘区域和平坦区域。当在边缘区域时, s 较大, $p(s)$ 趋近于 1; 当在平坦区域时, s 较小, $p(s)$ 趋向于 2。变指

数正则化方法通过控制指数项 $p(s)$ 的变化, 自适应地重构图像。可见, 变指数正则化方法充分结合了 Tikhonov 正则化和 TV 正则化的优势, 构成的代价函数为

$$\min_{f, \mathbf{k}} J(\mathbf{f}, \mathbf{k}) = \min_{f, \mathbf{k}} \left[\gamma \|\mathbf{k}\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_2^2 + \alpha' R(\mathbf{k}) + \beta \int |\nabla \mathbf{f}| d\sigma \right], \quad (14)$$

式中: $\mathbf{k} \geq 0$, $\int_D \mathbf{k} d\sigma = 1$, D 为 PSF 的支撑域; $|\mathbf{f}| \geq 0$; α' 、 β 、 γ 为正的常数。

考虑到 $J(\mathbf{f}, \mathbf{k})$ 中的 L2 范数, 可将此问题看作一个凸优化问题。对于 (14) 式的求解, 可以采用 Split-Bregman 算法^[32-33] 来迭代优化, 转化为求解

$$\min_{f, \mathbf{k}} J(\mathbf{f}, \mathbf{k}) = \min_{f, \mathbf{k}} \left[\gamma \|\mathbf{K}\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_2^2 + \alpha' \sum |\mathbf{b}_1|^{p(|\nabla \mathbf{c}|)} + \beta \sum |\mathbf{b}_2| + \lambda_1 \|\mathbf{b}_1 - \nabla \mathbf{k}\|_2^2 + \lambda_2 \|\mathbf{b}_2 - \nabla \mathbf{f}\|_2^2 \right], \quad (15)$$

式中: $\mathbf{b}_1 = \nabla \mathbf{k}$, $\mathbf{b}_2 = \nabla \mathbf{f}$, $|\mathbf{b}| = \sqrt{b_1^2 + b_2^2}$, $\nabla \mathbf{k} = (k_x, k_y)$, $\nabla \mathbf{f} = (f_x, f_y)$; \mathbf{K} 为基于 \mathbf{k} 的分块循环矩阵; f_x, f_y (或 k_x, k_y) 表示 \mathbf{u} (或 \mathbf{k}) 在水平和垂直方向上的一阶有限差分; λ_1 和 λ_2 为正常数。

根据 Split-Bregman 算法, (15) 式的优化迭代方式为

$$\begin{aligned} (\mathbf{k}^{(i+1)}, \mathbf{f}^{(i+1)}, \mathbf{b}_1^{(i+1)}, \mathbf{b}_2^{(i+1)}) = \\ \operatorname{argmin}_{\mathbf{k}, \mathbf{f}, \mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2} \left[\gamma \|\mathbf{K}\mathbf{f} - \mathbf{u}\|_2^2 + \alpha' \sum |\mathbf{b}_1|^{p(|\nabla \mathbf{c}|)} + \beta \sum |\mathbf{b}_2| + \lambda_1 \|\mathbf{b}_1 - \nabla \mathbf{k} - \mathbf{t}_1^{(i)}\|_2^2 + \lambda_2 \|\mathbf{b}_2 - \nabla \mathbf{f} - \mathbf{t}_2^{(i)}\|_2^2 \right], \end{aligned} \quad (16)$$

式中: $\mathbf{t}_1^{(i+1)} = \mathbf{t}_1^{(i)} + \nabla \mathbf{k}^{(i+1)} - \mathbf{b}_1^{(i+1)}$; $\mathbf{t}_2^{(i+1)} = \mathbf{t}_2^{(i)} + \nabla \mathbf{f}^{(i+1)} - \mathbf{b}_2^{(i+1)}$; i 表示迭代步数。

首先固定 $\mathbf{b}_1, \mathbf{t}_1, \mathbf{f}$, 对于 \mathbf{k} 的子问题, 利用变分原理可得

$$\mathbf{k}^{(i+1)} = \operatorname{argmin}_{\mathbf{k}} \left[\gamma \|\mathbf{F}^{(i)} \mathbf{k} - \mathbf{u}\|_2^2 + \lambda_1 \|\mathbf{b}_1^{(i)} - \nabla \mathbf{k} - \mathbf{t}_1^{(i)}\|_2^2 \right], \quad (17)$$

式中: $\mathbf{F}^{(i)}$ 为基于 \mathbf{f} 的分块循环矩阵。

当 \mathbf{k} 满足 (18) 式时, 迭代结束。

$$\begin{aligned} \gamma (\mathbf{F}^{(i)})^T (\mathbf{F}^{(i)} \mathbf{k}^{(i+1)} - \mathbf{u}) - \lambda_1 \Delta \mathbf{k}^{(i+1)} + \\ \operatorname{div}(\mathbf{b}_1^{(i)} - \mathbf{t}_1^{(i)}) = 0, \end{aligned} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{T}, \Delta, \operatorname{div}$ 表示共轭变换、拉普拉斯变换和散度变换。

然后固定 $\mathbf{k}^{(i+1)}, \mathbf{t}_1, \mathbf{f}$, 对于 \mathbf{b}_1 的子问题, 利用变分原理可得

$$\mathbf{b}_1^{(i+1)} = \underset{\mathbf{b}_1}{\operatorname{argmin}} \left[\alpha' \sum |\mathbf{b}_1|^{p(|\nabla c|)} + \lambda_1 \|\mathbf{b}_1 - \nabla \mathbf{k}^{(i+1)} - \mathbf{t}_1^{(i)}\|_2^2 \right], \quad (19)$$

根据 Euler-Lagrangian 算法可得

$$\alpha' p(|\nabla c|) |\mathbf{b}_1|^{p(|\nabla c|)-\frac{1}{2}} \mathbf{b}_1 + 2\lambda_1 [\mathbf{b}_1 - \nabla \mathbf{k}^{(i+1)} - \mathbf{t}_1^{(i)}] = \mathbf{0}, \quad (20)$$

令 $\mathbf{b}_1 = (b_{11}, b_{12})$, $\mathbf{t}_1 = (t_{11}, t_{12})$, (20)式可转化为

$$\begin{cases} (a + 2\lambda_1)b_{11} - 2\lambda_1 k_x^{(i+1)} - 2\lambda_1 t_{11}^{(i)} = 0 \\ (a + 2\lambda_1)b_{12} - 2\lambda_1 k_y^{(i+1)} - 2\lambda_1 t_{12}^{(i)} = 0 \end{cases}, \quad (21)$$

式中:

$$a = \alpha' p(|\nabla c|) (b_{11}^2 + b_{12}^2)^{\frac{p(|\nabla c|)}{2}-1}. \quad (22)$$

由于(22)式不易求解,本文采用牛顿法优化求解,即

$$b_{11} = \frac{k_x^{(i+1)} + t_{11}^{(i)}}{k_y^{(i+1)} + t_{12}^{(i)}} b_{12}, \quad (23)$$

然后更新 \mathbf{t}_1 , 可得

$$\mathbf{t}_1^{(i+1)} = \mathbf{t}_1^{(i)} + \nabla \mathbf{k}^{(i+1)} - \mathbf{b}_1^{(i+1)}, \quad (24)$$

最后,固定 $\mathbf{b}_1, \mathbf{t}_1, \mathbf{k}$, 计算 $\mathbf{b}_2, \mathbf{t}_2, \mathbf{f}$ 。

在获取 PSF 以后,根据快速傅里叶变换可以重

构出高分辨率图像,表示为

$$\mathbf{u}' = \left\{ \mathcal{F}^{-1} \left[\frac{\gamma}{\lambda_2} (|\mathcal{F}(\mathbf{K})|^2) \right] \right\}^{\left[\frac{\gamma}{\lambda_2} (|\mathcal{F}^{-1}(\mathbf{K})|^2) - \mathcal{F}(\mathbf{k}) \right]}, \quad (25)$$

式中: \mathbf{u}' 的实部即重建出的图像; \mathcal{F} 为傅里叶变换。

3 实验结果与分析

3.1 偏振调制成像参数反演结果

对硅衬底上的硅粒子介质进行偏振调制,会形成 19 张偏振角等间隔的图像序列,如图 3 所示,图像规模为 $1836 \text{ pixel} \times 1537 \text{ pixel}$,本文对这些图像进行分析。图 4 所示为偏振调制成像的偏振参数 $\sin \delta$ 和 φ 的反演结果。图 4(a)为原图,图 4(b)、4(c)为 $\sin \delta$ 和 φ 的全斑成像的场分布。为了更好地展示本文使用的算法对原图的分辨率的优化,从图 4(a)~图 4(c)所示的全场分布图像的相同位置(黑框)提取了几个粒子,这些粒子放大图如图 5(a)~(c)所示。从图 5 中可以看到,本文所采用的方法较明显地显示出了待测样本介质的内部散射特性。

将偏振参数成像与时域有限差分法(FDTD)仿

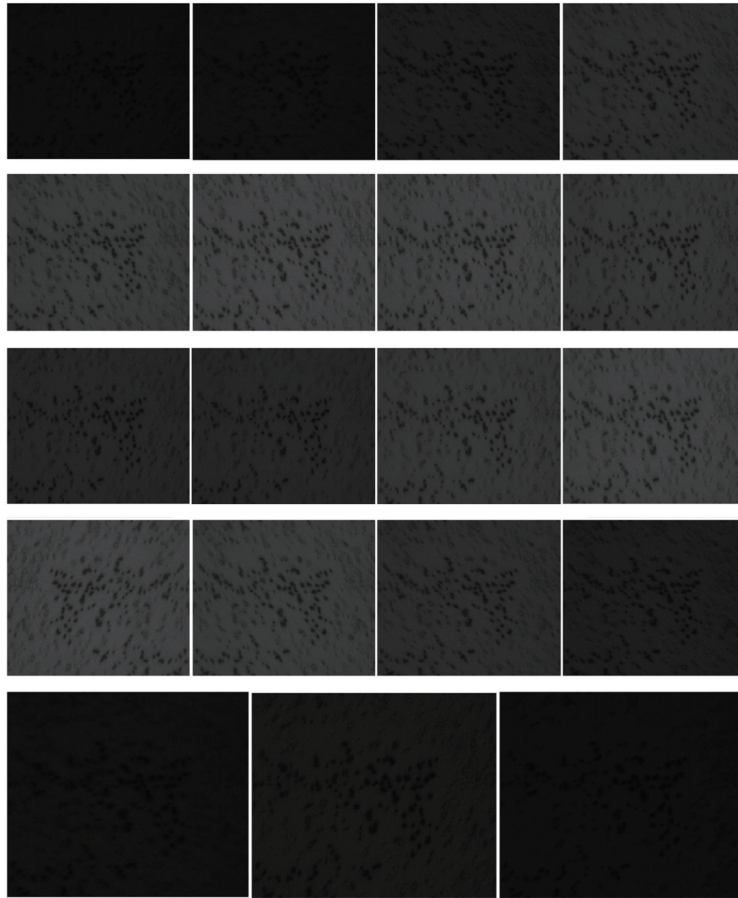


图 3 实验所用数据集

Fig. 3 Dataset for experiments

真所得的结果进行对比,如图 6 所示。可以看出,在中心区域,偏振成像算法的结果与 FDTD 相似,由

此证明偏振参数成像既能准确描述粒子近场信息,也能够突破衍射极限,提升图像分辨率。

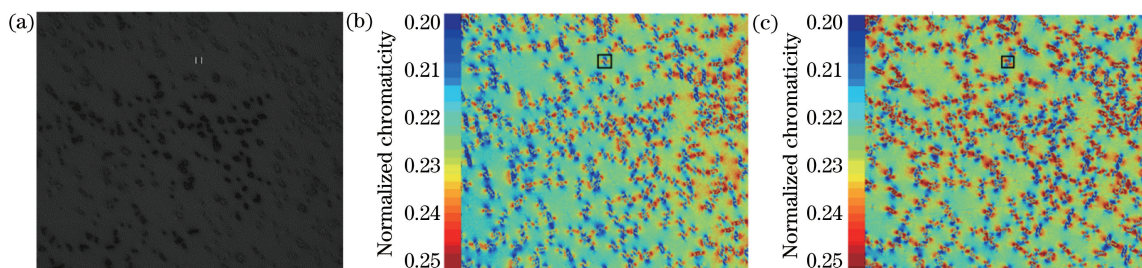


图 4 原图与偏振成像图对比。(a)原图;(b) $\sin \delta$ 成像图;(c) φ 成像图

Fig. 4 Comparison of original and polarimetric images. (a) Original image; (b) $\sin \delta$ image; (c) φ image

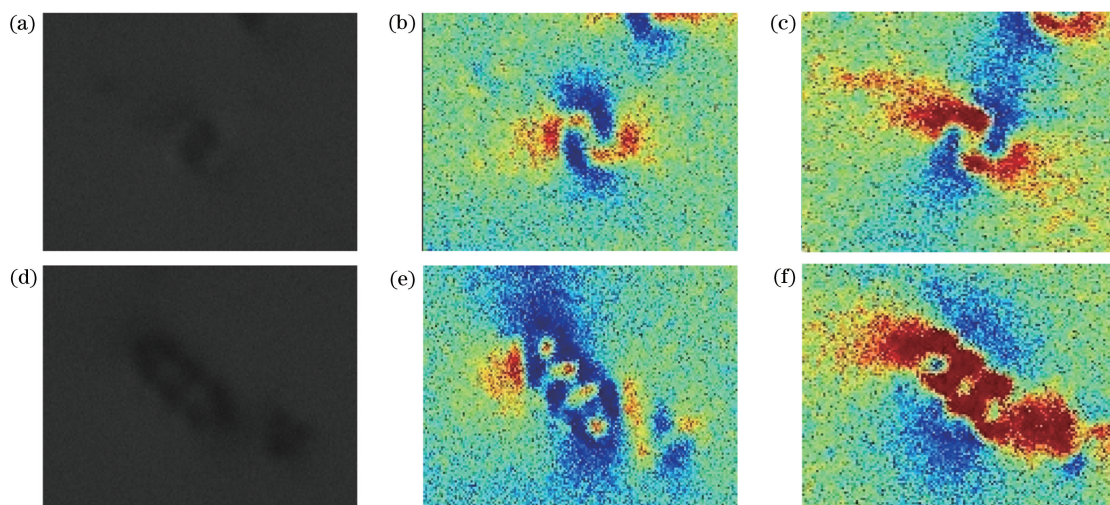


图 5 原图与偏振成像图对比。(a)(d)原图;(b)(e) $\sin \delta$ 成像图;(c)(f) φ 成像图

Fig. 5 Comparison of original and polarimetric images. (a)(d) Original images; (b)(e) $\sin \delta$ images; (c)(f) φ images

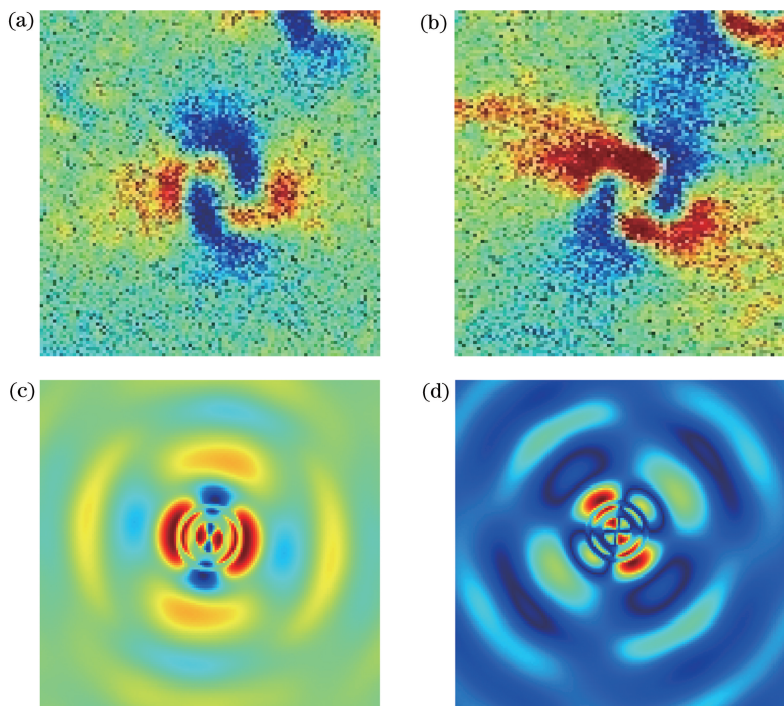


图 6 偏振成像图与 FDTD 仿真图对比。(a) $\sin \delta$ 成像图;(b) φ 成像图;(c) 仿真 $\sin \delta$ 成像图;(d) 仿真 φ 成像图

Fig. 6 Comparison of polarimetric and FDTD-simulated images. (a) $\sin \delta$ image; (b) φ image; (c) simulated $\sin \delta$ image; (d) simulated φ image

图 7 所示为图 5(a)~(b)中粒子延切线方向的光强剖面图,尺寸为 100 pixel×100 pixel。图 7(c)~(d)所示为切线方向上的光强变化曲线,图 7(e)~(f)表示部分粒子区域的光强变化曲线。从图 7(c)~(d)可以看出,原图的灰度变化区间为 [36,54],本文算法将灰度变化范围扩大到[0,255];从图 7(e)~(f)也可看出,原图的灰度变化小,可近

似视为 1 个波谷,而本文所得结果表现为数个有明显灰度变化的波谷,改善了人眼观测的感受。

根据瑞利判据,本文所采用的实验光路入射光波长为 532 nm、数值孔径为 0.9,其衍射极限为 591 nm,半峰全宽为 1530 nm。本文的重构算法在 [55,65]的像素 DN 值范围内两个波谷的半峰全宽为 48 nm 和 94 nm,已突破了衍射极限。

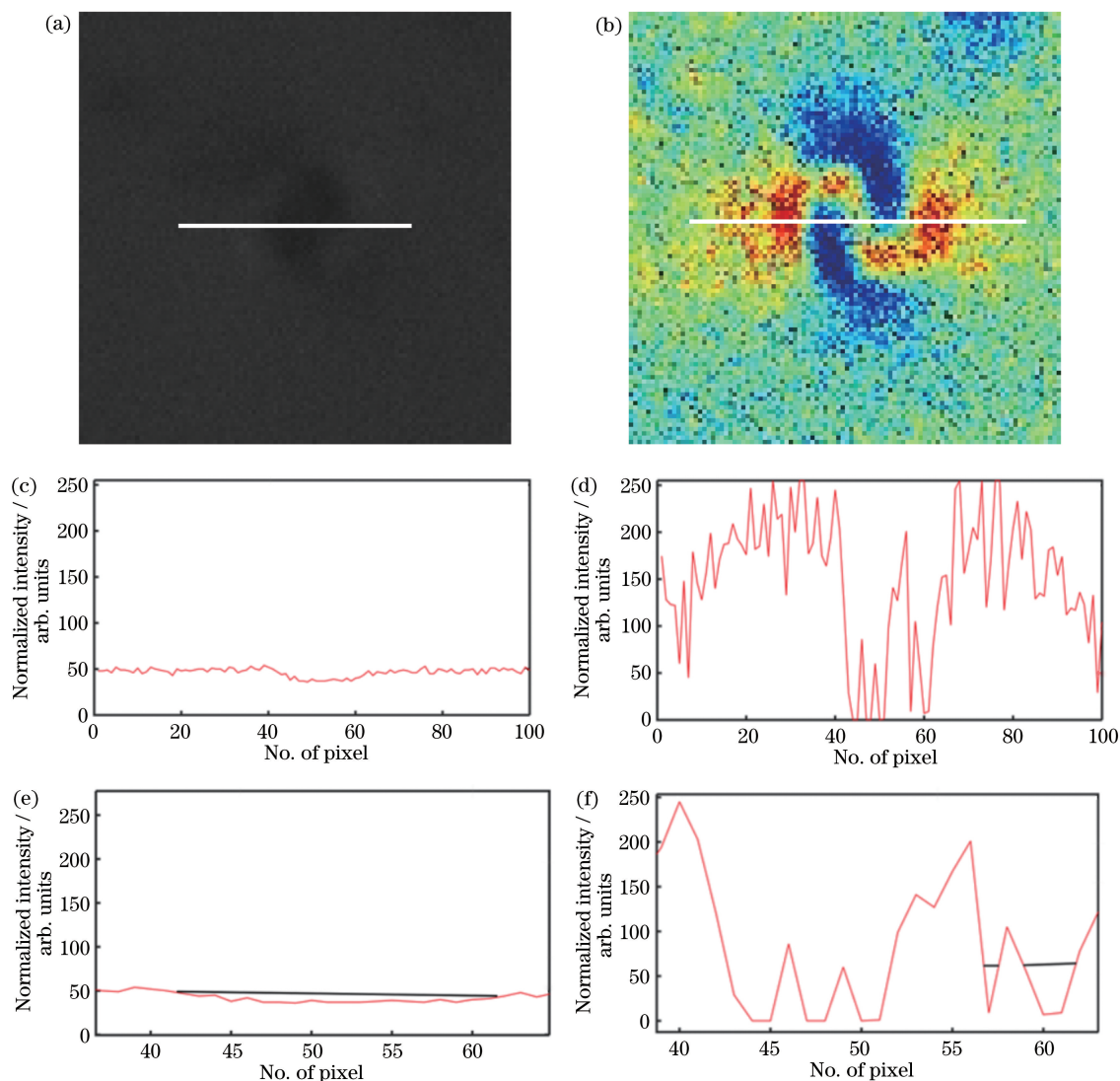


图 7 粒子沿切线方向的光强剖面图。(a)原图;(b)偏振成像图;(c)原图所有像素点光强变化曲线;(d)偏振成像图所有像素点光强变化曲线;(e)原图粒子光强变化曲线;(f)偏振成像图粒子光强变化曲线

Fig. 7 Light-intensity profiles of particle along tangent direction. (a) Original image; (b) polarimetric image; (c) light-intensity change of all pixel points in origin image; (d) light-intensity change of all pixel points in polarimetric image; (e) light-intensity change of particle pixel points in origin image; (f) light-intensity change of particle pixel points in polarimetric image

同时也计算了 Stokes 参数,FDTD 仿真结果也验证了该系统对待测样本散射场的映射能力。从图 8(a)~(d)的相同位置提取几个粒子,如图 8(e)~(h)所示。从样本粒子的散射场分布可以看出,高强度波

瓣出现在粒子的垂直边缘,由此表明本文算法成像结果耦合了粒子近场散射场波矢面的信息。

3.2 偏振调制成像 PSF 参数估计结果

图 9 所示为原图和偏振参数的 PSF 估计效果

对比。图 9(a)~(c)为图 4 所示的未优化的待测样本成像图、 $\sin \delta$ 成像图和 φ 成像图的 PSF 模型,图 9(d)~(f)展示了采用本文提出的方法所估计的原图、 $\sin \delta$ 成像图和 φ 成像图的 PSF 模型,分析可见

估计结果与理论值相似性很高。

利用本文所提出的 PSF 估计结果重建得到优化后的图像,如图 10 所示。可以看出,和原图相比,优化后的图像的分辨率和像质得到了进一步的提升。

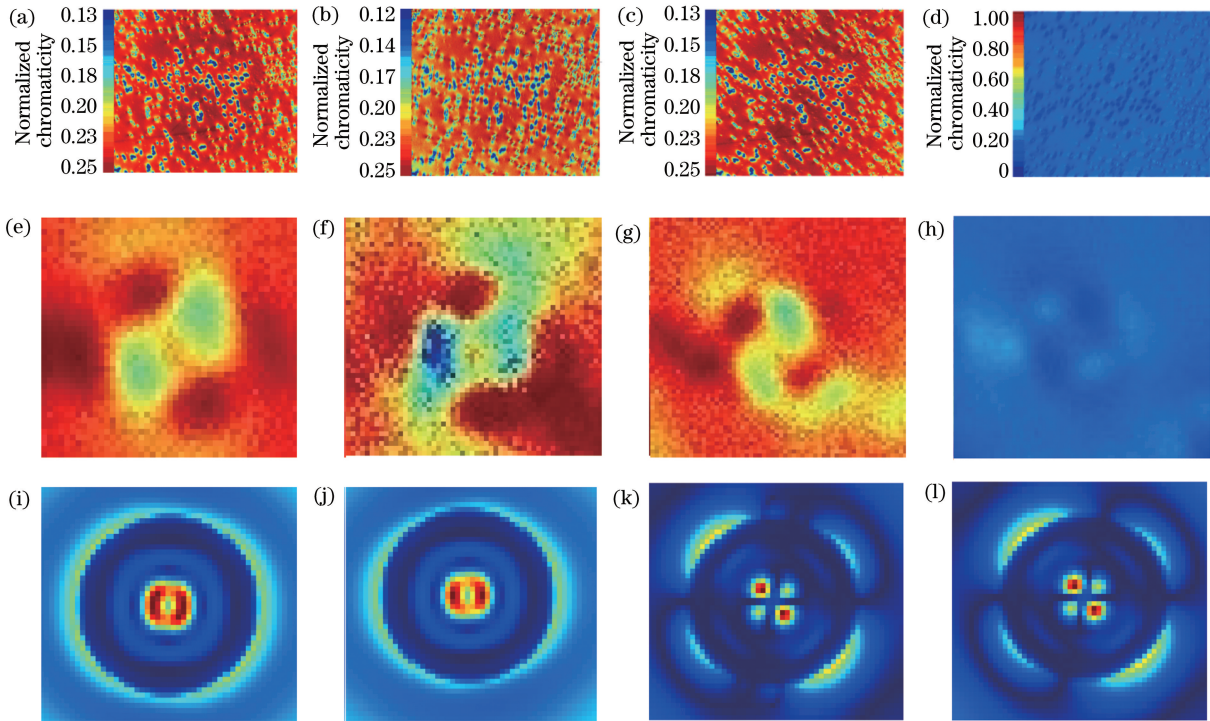


图 8 Stokes 参数图像。(a)~(d)参数 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 的图像;(e)~(h)从参数 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 图像中相同位置提取的一个粒子;(i)~(l) FDTD 仿真的参数 S_0 、 S_1 、 S_2 、 S_3 图像

Fig. 8 Images of Stokes parameters. (a)–(d) Images of S_0 , S_1 , S_2 , and S_3 parameters; (e)–(h) one particle extracted from images of S_0 , S_1 , S_2 , and S_3 parameters at same place; (i)–(l) images of S_0 , S_1 , S_2 , and S_3 parameters obtained from FDTD simulations

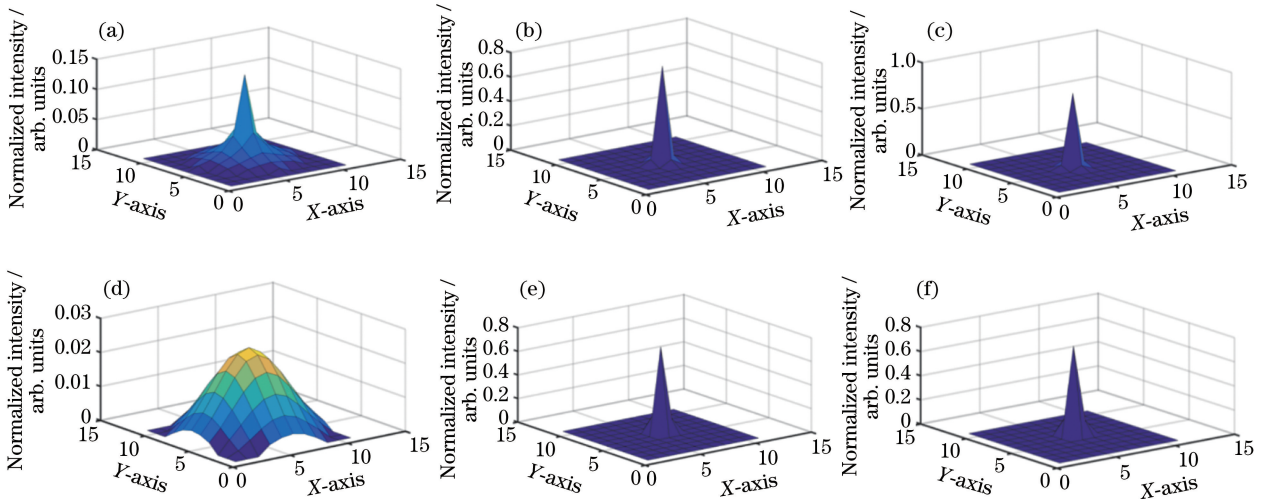


图 9 偏振调制成像结果的 PSF。(a)~(c)未优化的待测样本成像图、 $\sin \delta$ 成像图和 φ 成像图的 PSF 模型;(d)~(f)优化后的原图、 $\sin \delta$ 成像图、 φ 成像图的 PSF 模型

Fig. 9 PSF models of polarization-modulated imaging results. (a)–(c) Non-optimized PSF models of original image of sample to be tested, $\sin \delta$ image, and φ image; (d)–(f) optimized PSF models of original image, $\sin \delta$ image, and φ image

图 11 是利用本文所提方法重建的 φ 成像图结果。可以看出,和原图相比,优化后的图像的分辨率和像质得到了进一步的提升。

图 12 是本文算法、TV 正则化和 Tikhonov 正则化的成像效果对比。从图 12 可以看出,本文算法相较于其他两种算法,成像质量有很大提升。

表 1 为优化后图像客观评价指标。从理论和成像效果上看,本文算法的去噪能力优于传统的 TV 正则化、Tikhonov 正则化。因为本文将退化了的偏振参数图像作为原图进行效果对比,而原图本身带

有噪声,所以在计算方均误差(MSE)、峰值信噪比(PSNR)和图像平均结构相似性(MSSIM)时,原图的噪声像元提供了大量的高频信息,本文去除这些噪声等同于丢失了这些高频信息,因此和原图及传统的 TV 正则化、Tikhonov 正则化成像效果相比,本文算法所得图像 MSE、PSNR、MSSIM 较低。同时,用信息熵表征图像信息的分散程度。本文算法的图像信息熵较低,说明本文算法能够很好地去噪,平滑图像的平坦区域,锐化图像的边缘区域,使成像像元分布高度有序;而传统算法成像低度有序,

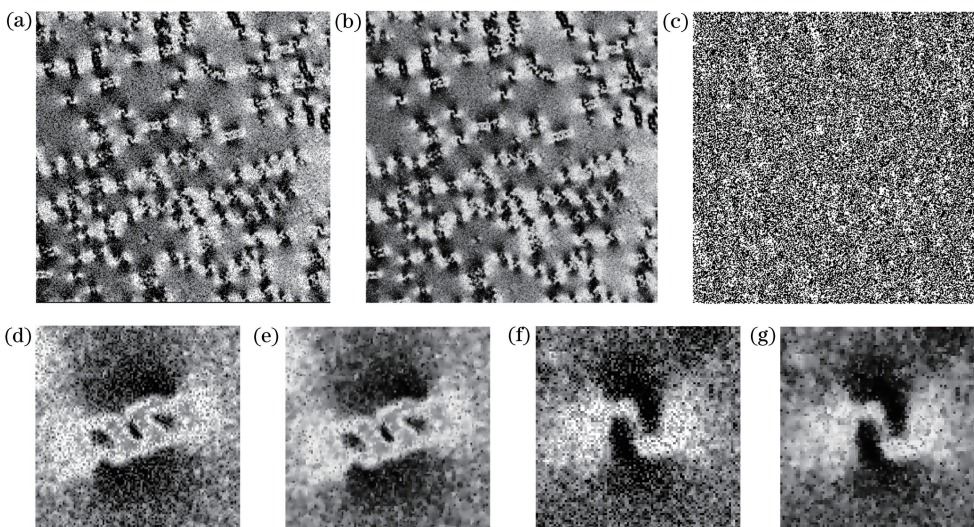


图 10 利用所提方法对 $\sin \delta$ 成像图进行重建的效果比较。(a)(d)(f) $\sin \delta$ 成像图原图;(b)(e)(g)本文算法优化结果;(c)图 10(a)和(b)图像差值

Fig. 10 Comparison of reconstruction effects of $\sin \delta$ images by proposed method. (a)(d)(f) Original $\sin \delta$ images; (b)(e)(g) optimized results by proposed method; (c) image difference between Fig. 10(a) and Fig. 10(b)

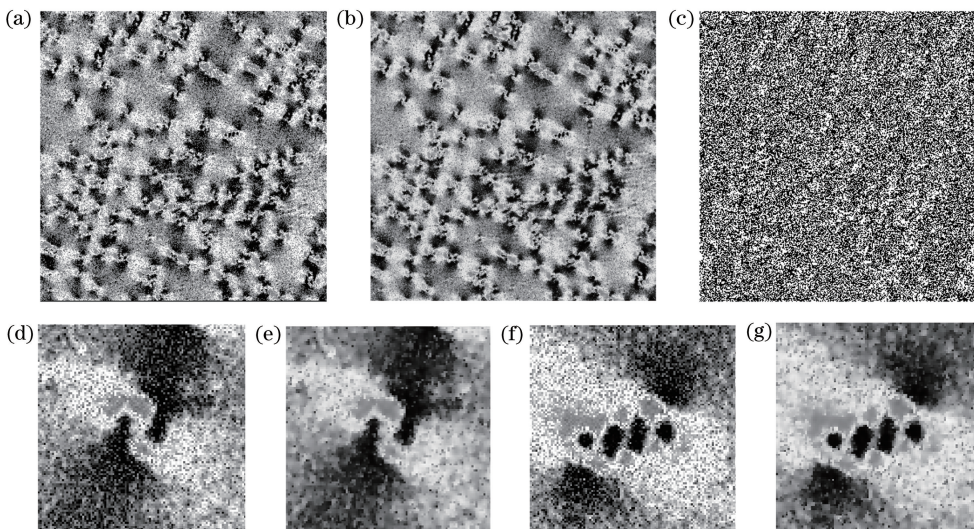


图 11 本文算法对 φ 成像图进行优化的成像效果比较。(a)(d)(f) φ 成像图原图;(b)(e)(g)变指数优化结果;(c)图 11(a)和(b)图像差值

Fig. 11 Comparison of reconstruction effects of φ images by proposed method. (a)(d)(f) Original φ images; (b)(e)(g) results of variable exponential optimization; (c) image difference between Fig. 11(a) and Fig. 11(b)

则显示出较高的信息熵。

本文算法也在聚苯乙烯球成像上进行了验证。

图 13 所示为聚苯乙烯球样本偏振参数调制成像的

PSF 估计效果对比,图 14和图 15是本文算法重建

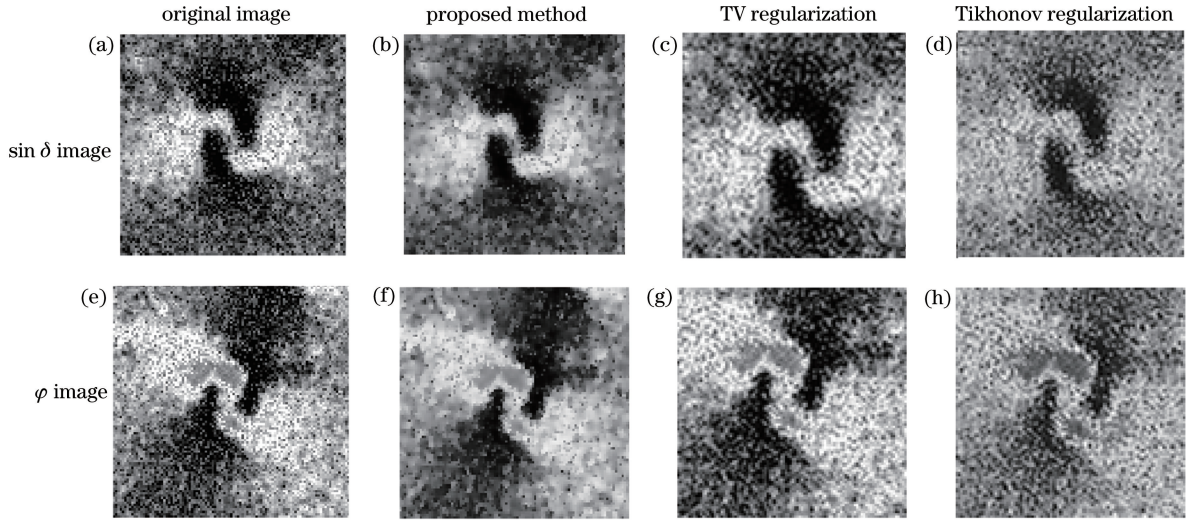


图 12 本文算法、TV 正则化和 Tikhonov 正则化的成像效果比较

Fig. 12 Comparison of imaging effects among proposed method, TV regularization, and Tikhonov regularization

表 1 通过三种算法优化所得图像的客观评价指标

Table 1 Objective evaluation indexes of $\sin \delta$ and φ images optimized by three methods

Image	Method	Mean	Variance	MSE	PSNR	MSSIM	Entropy
$\sin \delta$	Raw	123.5	5453.8	—	—	—	7.5
	Ours	123.5	5453.8	2327.1	14.5	0.15	7.7
	TV	126.3	4761.7	537.7	20.8	0.17	7.8
	Tikhonov	134.9	2707.6	1667.8	15.9	0.12	7.7
φ	Raw	140.8	5408.0	—	—	—	7.5
	Ours	140.8	5408.0	2385.6	14.4	0.30	7.8
	TV	141.5	4687.2	560.9	20.6	0.17	7.8
	Tikhonov	140.6	2750.4	1647.8	16.1	0.13	7.6

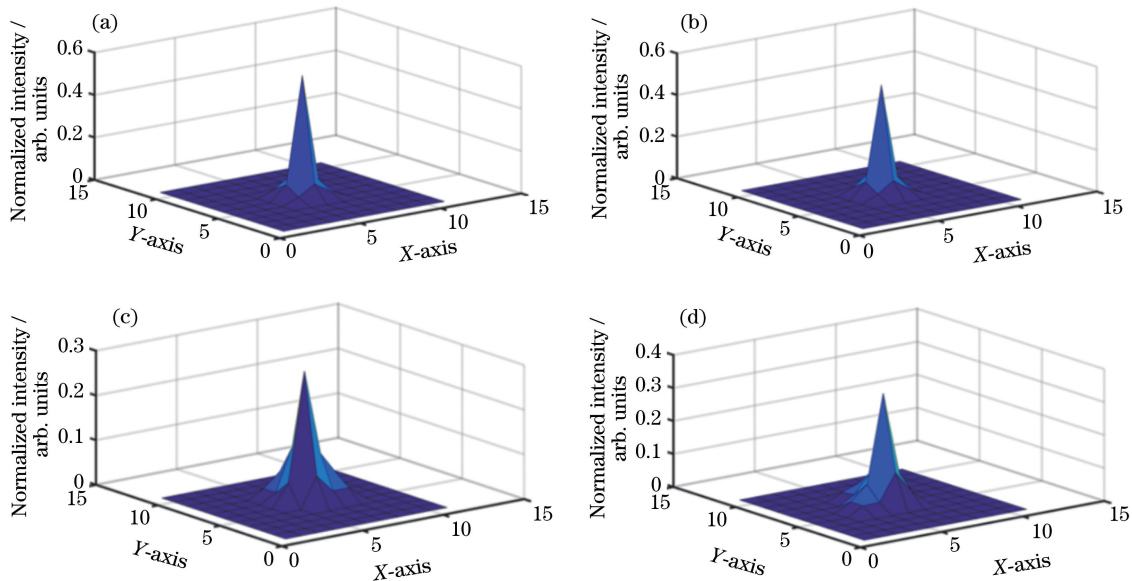


图 13 聚苯乙烯球偏振调制成像结果的 PSF 模型。(a)未优化的待测样本 $\sin \delta$ 成像图 PSF 模型;(b)未优化的待测样本 φ 成像图 PSF 模型;(c)优化后的 $\sin \delta$ 成像图 PSF 模型;(d)优化后的 φ 成像图 PSF 模型

Fig. 13 PSF models of polarization-modulated imaging results of polyethylene spheres. (a) PSF model of non-optimized $\sin \delta$ image of sample to be tested; (b) PSF model of non-optimized φ image of sample to be tested; (c) PSF model of optimized $\sin \delta$ image; (d) PSF model of optimized φ image

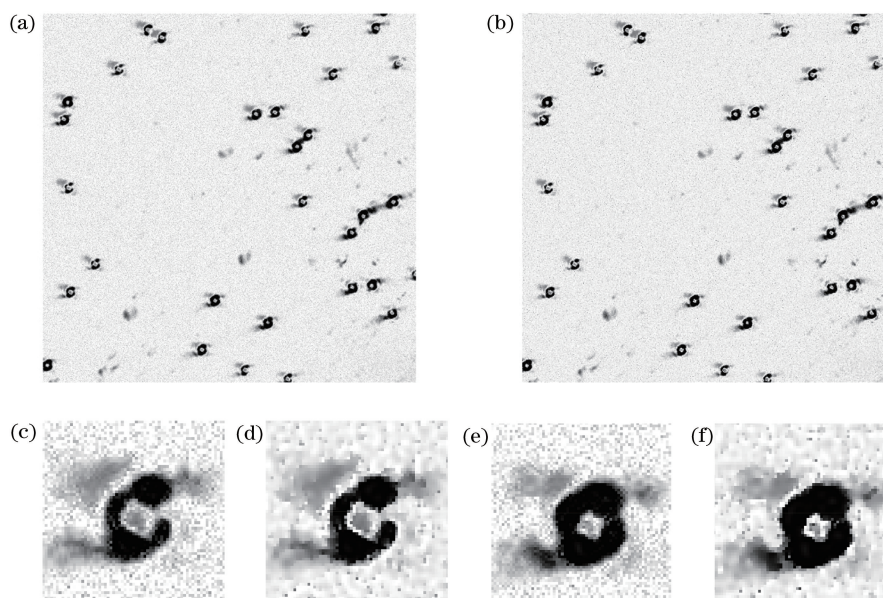


图 14 利用所提方法对 $\sin \delta$ 成像图重建的效果。(a)(c)(e) $\sin \delta$ 成像图原图;(b)(d)(f)本文算法优化结果

Fig. 14 Reconstruction effects of $\sin \delta$ image by proposed method. (a)(c)(e) Original $\sin \delta$ image;
(b)(d)(f) optimized results by proposed method

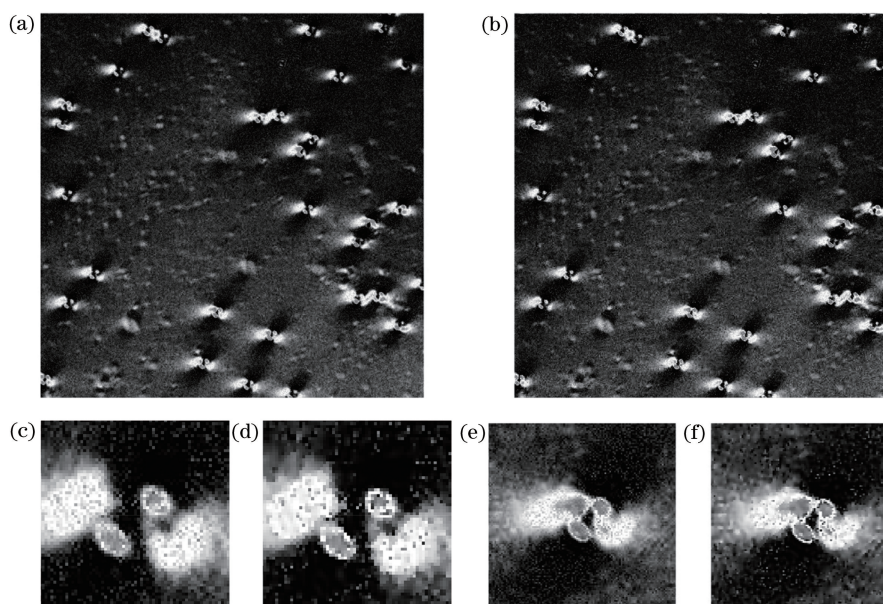


图 15 利用所提方法对 φ 成像图重建的效果。(a)(c)(e) φ 成像图原图;(b)(d)(f)本文算法优化结果

Fig. 15 Reconstruction effects of φ image by proposed method. (a)(c)(e) Original φ images;
(b)(d)(f) optimized results by proposed method

出的图像与聚苯乙烯球样本偏振参数成像的对比,可以看出,本文算法在成像效果上有显著的提升。

图 16 是本文算法和 TV 正则化、Tikhonov 正则化在聚苯乙烯球样本上的重建效果对比。从图 16 可以看出,本文算法相较于其他两种算法,成像质量有很大提升。

表 2 为聚苯乙烯球样本优化后的图像客观质

量指标值。可以看出,相对于退化的原始图像,和传统的 TV 正则化、Tikhonov 正则化成像效果相比,本文算法的 MSE、PSNR、MSSIM 较低,表明本文算法的去噪能力较好。相较于传统算法,本文算法的图像信息熵低,证明本文算法能够显著地平滑图像的平坦区域,锐化图像的边缘区域。

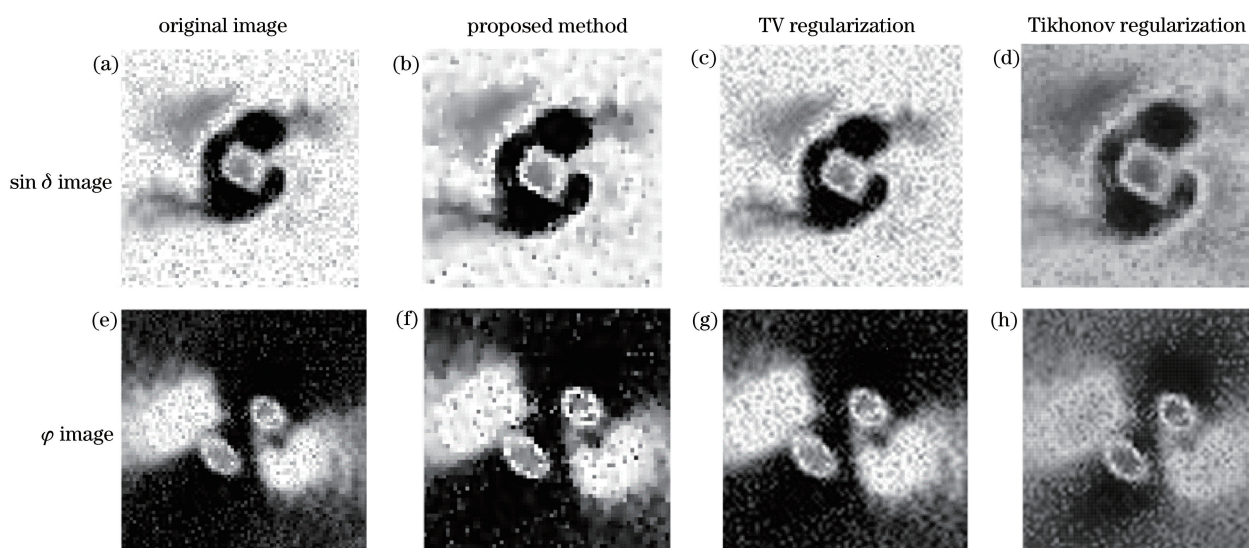


图 16 本文算法和 TV 正则化、Tikhonov 正则化的成像效果比较

Fig. 16 Comparison of imaging effects among proposed method, TV regularization, and Tikhonov regularization

表 2 通过三种算法优化所得图像的客观评价指标

Table 2 Objective evaluation indexes of $\sin \delta$ and φ images optimized by three methods

Image	Method	Mean	Variance	MSE	PSNR	MSSIM	Entropy
$\sin \delta$	Raw	235.9	1234.6	—	—	—	6.6
	Ours	235.7	1147.0	540.9	20.8	0.29	5.5
	TV	229.3	1167.5	161.6	26.0	0.26	5.9
	Tikhonov	188.7	772.3	2610.3	14.0	0.28	6.5
φ	Raw	47.9	1980.1	—	—	—	7.1
	Ours	48.3	1996.4	684.0	19.8	0.27	6.9
	TV	54.4	1893.0	142.4	26.6	0.30	7.0
	Tikhonov	103.6	867.2	3682.3	12.5	0.33	6.9

4 结 论

偏振调制成像是实现宽视场亚波长纳米粒子显微成像的重要手段。通过对成像光路入射光的偏振态进行调制,将调制后的光入射到各向异性的待测样本介质,采集的图像经过偏振角调制曲线的滤波和拟合,可以反演出反映样本近场纳米尺度特性的偏振参数图像序列,继而重建出突破光学衍射极限的图像。本文提出了一种基于变指数正则化的多降晰因素影响的成像系统 PSF 估计方法,有效抑制了传统 TV 正则化的阶梯效应和 Tikhonov 正则化保边性差的缺点。对硅晶胞和聚苯乙烯球的成像结果表明,与传统方法相比,本文提出的 PSF 估计方法能在保证重构图像质量的同时,有效提升图像分辨率,且噪声鲁棒性更好。

参 考 文 献

- [1] Liu Y J, Xin J P, Wan L Y, et al. Optimization design of optical antenna with wide field-of-view high-gain subwavelength structure[J]. Laser Technology, 2017, 41(1): 34-39.
刘玉佳, 辛杰萍, 万玲玉, 等. 宽视场高增益亚波长结构集光天线的优化设计[J]. 激光技术, 2017, 41(1): 34-39.
- [2] Cheng W N. Optical system design of a star sensor with wide spectrum and wide field of view [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009: 1-6.
程伟宁. 宽谱段宽视场星敏感器光学系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009: 1-6.
- [3] Chen W, Zheng Y Q, Xue Q S. Airborne imaging spectrometer with wide field of view and large relative-aperture [J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 15-21.

- 陈伟, 郑玉权, 薛庆生. 机载宽视场大相对孔径成像光谱仪[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 15-21.
- [4] Yu M X, Zhou W C, Zhou S, et al. Near-field diffraction enhanced structured illumination microscopy based on metallic grating[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0318001.
余慕欣, 周文超, 周松, 等. 基于金属光栅近场衍射增强的结构照明技术[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0318001.
- [5] Lao B Q, An T, Chen X, et al. Research on wide-field imaging technologies for low-frequency radio array[J]. Acta Astronomica Sinica, 2017, 58(5): 110-131.
劳保强, 安涛, 陈骁, 等. 低频射电望远镜阵列宽视场成像技术研究[J]. 天文学报, 2017, 58(5): 110-131.
- [6] Chen Z Y, Lü L J. Design of initial structure of fisheye lens post-group optical system[J]. Optical Instruments, 2018, 40(6): 54-60.
陈子粤, 吕丽军. 鱼眼镜头后光组初值设计[J]. 光学仪器, 2018, 40(6): 54-60.
- [7] Lü L J, Wu X W. Design of initial structure of fisheye lens[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0208001.
吕丽军, 吴学伟. 鱼眼镜头初始结构的设计[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0208001.
- [8] He X, Li C H, Zhang X H, et al. Research on precision measurement of image stabilization by space telescope with large orifice diameter[C] // The 17th national optometry examination and learning exchange meeting. Beijing: Chinese Optical Society, 2018: 112.
何煦, 李成浩, 张晓辉, 等. 大口径空间天文望远镜稳像精度测试技术研究[C] // 第十七届全国光学测试学术交流会议论文集. 北京: 中国光学学会, 2018: 112.
- [9] Hu C. Research on high-resolution image reconstruction splicing method of ONSET [D]. Kunming: Kunming Institute of Technology, 2018: 11-20.
胡超. ONSET 高分辨图像重建拼接方法研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018: 11-20.
- [10] Gaietta G, Deerinck T J, Adams S R, et al. Multicolor and electron microscopic imaging of connexin trafficking[J]. Science, 2002, 296(5567): 503-507.
- [11] Masters B R, So P T C. Multi-photon excitation microscopy and confocal microscopy imaging of *in vivo* human skin: a comparison[J]. Microscopy and Microanalysis, 1999, 5(4): 282-289.
- [12] Zou M Y. Deconvolution and signal recovery[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 189-194.
- 邹谋炎. 反卷积和信号复原[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 189-194.
- [13] Allag A, Drai R, Benammar A, et al. X-rays tomographic reconstruction images using proximal methods based on L_1 norm and TV regularization[J]. Procedia Computer Science, 2018, 127: 236-245.
- [14] Sun C S, Ding Y L, Wang D J. Advances in studies of wide-field high-resolution camera based on computational imaging[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030006.
孙崇尚, 丁亚林, 王德江. 基于计算成像的宽视场高分辨相机研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030006.
- [15] Lü Y, Ning Y, Ma H T, et al. Research on computationally adaptive plenoptic imaging[J]. Opto-Electronic Engineering, 2018, 45(3): 180075.
吕洋, 宁禹, 马浩统, 等. 计算光场自适应光学成像技术研究[J]. 光电工程, 2018, 45(3): 180075.
- [16] Lange M, Guénon S, Lever F, et al. A high-resolution combined scanning laser and widefield polarizing microscope for imaging at temperatures from 4 K to 300 K [J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(12): 123705.
- [17] Dumripatanachod M, Piyawattanametha W. Wide-field high-resolution fiber bundle based endomicroscope for cervical epithelium cells imaging [C] // 2016 9th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), December 7-9, 2016, Laung Prabang, Laos. New York: IEEE, 2016: 16706354.
- [18] Ullah K, Liu X, Habib M, et al. Subwavelength far field imaging of nanoparticles with parametric indirect microscopic imaging [J]. ACS Photonics, 2018, 5(4): 1388-1397.
- [19] Liu G Y. Far field inversion theory and method for indirect microscopic imaging based on polarization-modulated [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016: 24-39.
刘国彦. 基于偏振调制的非直观显微成像远场反演理论与方法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 24-39.
- [20] Ullah K, Liu X, Yadav N P, et al. Light scattering by subwavelength Cu_2O particles [J]. Nanotechnology, 2017, 28(13): 134002.
- [21] Ju H J, Liang J, Zhang W F, et al. Simultaneous, real-time, chromatic polarimetric imaging technology with full-polarization-state detection [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2017, 36(6): 744-748.

- 巨海娟, 梁健, 张文飞, 等. 全偏振态同时探测实时彩色偏振成像技术[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(6): 744-748.
- [22] Liu Z, Hong J, Gong G Y, et al. Alignment error optimization of spatially modulated imaging polarimeter system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 0117003.
刘震, 洪津, 龚冠源, 等. 空间调制型全偏振成像系统的角度误差优化[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(1): 0117003.
- [23] Ma Y, Li C, Li H, et al. Hyperspectral image classification with discriminative kernel collaborative representation and Tikhonov regularization[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(4): 587-591.
- [24] Zhaxi B M, Fan W R, Hu X S, et al. Polarization modulation along longitudinal direction of speckle field formed by laser beam through multimode fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 0126018.
扎西巴毛, 范伟如, 胡显声, 等. 多模光纤散斑场的纵向偏振调控 [J]. 光学学报, 2019, 39(1): 0126018.
- [25] Azinfar L, Ravanfar M, Wang Y, et al. High resolution imaging of the fibrous microstructure in bovine common carotid artery using optical polarization tractography [J]. *Journal of Biophotonics*, 2017, 10(2): 231-241.
- [26] Lü Z, Jia Y, Zhang Q. Joint image registration and point spread function estimation for the super-resolution of satellite images[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 2017, 58: 199-211.
- [27] Senshiki H, Motohashi S, Goto T, et al. PSF estimation using total variation regularization and shock filter for blind deconvolution[C] // 2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), January 8-10, 2017, Las Vegas, NV, USA. New York: IEEE, 2017: 16777509.
- [28] 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.
- [29] Lefkimiatis S, Bourquard A, Unser M. Hessian-based regularization for 3-D microscopy image restoration[C] // 2012 9th IEEE International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI), May 2-5, 2012, Barcelona, Spain. New York: IEEE, 2012: 1731-1734.
- [30] Gao K, Zhu Z, Dou Z, et al. Variable exponent regularization approach for blur kernel estimation of remote sensing image blind restoration [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 4352-4374.
- [31] Stefaniuk M, Gualda E J, Pawłowska M, et al. Light-sheet microscopy imaging of a whole cleared rat brain with Thy1-GFP transgene [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28209.
- [32] Li F, Abascal J F P J, Desco M, et al. Total variation regularization with split Bregman-based method in magnetic induction tomography using experimental data[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(4): 976-985.
- [33] Chen L, Zheng Z W, Bao L J, et al. Weighted total variation using split Bregman fast quantitative susceptibility mapping reconstruction method [J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(8): 088701.