

水下推扫式计算鬼成像的方法

赵明*, 王钰, 田芷铭, 赵美晶

大连海事大学信息科学与技术学院, 辽宁 大连 116026

摘要 针对水下成像环境中的后向散射问题,开展了推扫式计算鬼成像方法的研究。介绍推扫式计算鬼成像模式,利用行间相关性研究了多行联合压缩感知模型,基于迭代收缩阈值算法提出了模型的求解方法。搭建了水下计算鬼成像实验装置,并在两种不同浑浊度情况下通过实验对比了推扫式计算鬼成像和传统面阵式计算鬼成像的效果,实验结果表明,推扫式计算鬼成像能够有效地降低后向散射的影响。

关键词 成像系统; 水下成像; 鬼成像; 推扫成像; 压缩感知

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.161101

Method of Push-Broom Underwater Ghost Imaging Computation

Zhao Ming*, Wang Yu, Tian Zhiming, Zhao Meijing

College of Information Science Technology, Dalian Maritime University, Dalian, Liaoning 116026, China

Abstract To address the problem of backscattering in underwater optical imaging, a method of push-broom underwater ghost imaging computation is studied. A push-broom computation mode for ghost imaging is introduced. Multiple detection lines are combined to form a joint compressive sensing model by exploiting the inter-line correlation. Iterative shrinkage thresholding method is used to solve the model. An experiment setup of underwater ghost imaging computation is established. The proposed method is experimentally compared with traditional plane-array ghost imaging computation methods under different turbidities. Experimental results show that the proposed scheme can reduce the backscattering effectively.

Key words imaging system; underwater imaging; ghost imaging; push-broom imaging; compressive sensing

OCIS codes 110.0113; 110.1758; 280.1350

1 引言

光学探测技术是目前水下高分辨率、高清晰探测的主要手段,在水下目标探测、水下科学考察、水下考古、水下安保和水下摄影摄像等领域中具有重要的应用。水下光学探测技术受到了光在水中传输特性的严重影响,研究新型的水下增距光电探测技术具有重要意义。

“计算成像”技术是近年来发展起来的新型成像技术,也是目前研究的前沿和热点。而其分支之一的“鬼成像技术”也受到了广泛关注,其原理是通过二维编码图案照射目标,并利用无分辨率的光电探测器接收目标信号,最终通过数学算法重建二维目

标图像。其主要优点在于可利用高灵敏度的光电探测器(如光电倍增管、单光子计数器等)显著提高探测系统的灵敏度。而“计算鬼成像”作为鬼成像的一个分支,主要是将测量光场预先设计好并存储在空间光调制器中形成测量矩阵,而后利用空间光调制器对光源光进行调制,形成预设的测量光场分布,代替传统鬼成像中的参考臂部分,最终进行关联重建并获得被测物体图像。更为重要的是,将压缩感知理论应用于计算鬼成像技术的测量矩阵中,可降低探测次数并提高鬼成像质量^[1-4]。

近几年来,国内外研究人员开始研究单像素成像技术在散射和湍流媒质中的应用。华南理工大学 Cheng^[5]于 2009 年讨论了在大气湍流中的鬼成像

收稿日期: 2019-01-09; 修回日期: 2019-02-28; 录用日期: 2019-03-27

基金项目: 国家自然科学基金(61501077)、中央高校基本科研业务费(3132018186)

* E-mail: eachzhao@126.com

问题。2010年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Zhang 等^[6]利用解析法分析了大气湍流对鬼成像分辨率的影响,并与直接成像进行了对比,研究表明在大气湍流情况下,鬼成像的分辨率高于直接成像。2012年,美国喷气动力实验室的 Erkmen^[7]将计算鬼成像技术应用于遥感探测中,设计了鬼成像遥感探测结构,并详细分析了大气湍流、背景辐射和探测器噪声对鬼成像遥感分辨率和信噪比的影响。2011年,中国科学院上海光学精密机械研究所 Gong 等^[8]首次将鬼成像技术应用于散射媒质的成像,并将悬浮溶液作为散射媒质,拍摄得到图像。在水下成像方面,中国科学院西安光学精密机械研究所吕沛等^[9-10]将单像素相机应用于水下距离选通成像系统的接收端,并通过理论分析指出利用单像素相机能够提高成像距离。西安交通大学 Le 等^[11]研究了水下浑浊度和视线角对计算鬼成像的影响。本课题组与国外单位合作探索了利用水波纹作为照射图案进行鬼成像探测的可能性^[12]。北京航空航天大学刘保磊等^[13]建立了存在散射介质条件下的计算鬼成像模型,分析了不同路径散射介质对计算鬼成像和传统直接成像的影响。佛罗里达大西洋大学的 Ouyang 等^[14]提出了一种面向移动平台的推扫式压缩感知成像方式,该成像方式利用一维光场照射目标,类似于激光同步扫描成像系统。该方法减小了光源的照射范围,降低了水体后向散射的影响,在水下应用领域具有较广阔的前景。

本文介绍了推扫式计算鬼成像模式,针对推扫式计算鬼成像逐行采集数据,研究了多行联合压缩感知模型,并基于迭代收缩阈值算法提出了模型的求解方法;最后搭建了实验平台,对推扫式计算鬼成像方法进行了验证。

2 水下推扫式计算鬼成像模式

为实现推扫式计算鬼成像,可将一维投影光源和光电探测器分别放置在水下载体平台(如船舶或水下自主巡航器)的前后端。投影光源以高速方式向水底投影一维编码图案照射水底目标(编码图案方向与载体运行方向垂直),调整光电探测器使其对投影光源照射区域进行探测,采集目标的反射光强,从而实现单行水下目标的探测。投影光源和光电探测器随水下载体平台缓慢向前方运动,实现对水下二维面目标的探测,工作方式如图1所示。

推扫式计算鬼成像模式类似于激光同步扫描成像系统。激光同步扫描成像系统^[15]将照明系统和

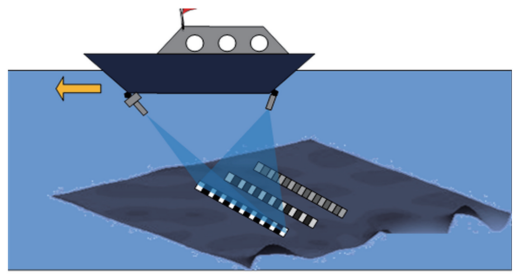


图1 水下推扫式计算鬼成像示意图

Fig. 1 Diagram of push-broom underwater ghost imaging computation

接收器放置在同一个运动平台上,成像元件一次扫描目标的一行,并依靠平台的向前运动以快速推扫的方式完成整个场景图像的扫描。由于利用线光源替代了面光源,故该方法可以有效降低后向散射的影响。

3 多行联合压缩感知重建算法

3.1 多行联合压缩感知模型

推扫式计算鬼成像是逐行进行探测的,理论上可以对每行数据单独进行重建,而后再将所有行数据拼接在一起形成完整图像。然而,从第三部分的仿真中可以看到,为了得到较好的重建结果需要至少50%以上的采样率。事实上,在线扫描过程中,由于地物的空间变化较为缓慢,因此图像行与行之间具有很高的相关度,可以利用这种关联性进一步提高重建结果的性能。

令 $\mathbf{x}_i \in \mathbf{R}^N$ ($i \in (1, 2, \dots, L)$) 为第 i 行图像数据,由于每行图像数据之间的差异较小,因此可借鉴分布式压缩感知中 JSM-1 模型 (joint sparsity model) 将每行图像数据分解为^[14,16]

$$\mathbf{x}_i = \mathbf{x}'_i + \mathbf{x}_c, i \in (1, 2, \dots, L), \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_c 表示 L 行图像数据之间的共有信号; \mathbf{x}'_i 表示 L 行图像数据之间的差异信号; i 表示图像块中的第 i 行。

下面考虑压缩感知探测过程。令 $\boldsymbol{\varphi}_i \in \mathbf{R}^{M \times N}$ 为第 i 行数据所对应的测量矩阵 (M 为每行的测量次数), 则第 i 行数据 \mathbf{x}_i 经过压缩感知探测后所得到的测量信号 \mathbf{y}_i 为

$$\mathbf{y}_i = \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{x}_i, \quad (2)$$

式中: \mathbf{y}_i 为压缩感知探测后所得到的测量信号; $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为测量矩阵。

将(1)式代入(2)式中,则有

$$\mathbf{y}_i = \boldsymbol{\varphi}_i (\mathbf{x}'_i + \mathbf{x}_c) = \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{x}'_i + \boldsymbol{\varphi}_i \mathbf{x}_c. \quad (3)$$

可以看到,上述测量过程可以分解为对 \mathbf{x}_c 和 \mathbf{x}'_i 的

探测过程。

将(3)式进行整理,可以得到

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_L \end{bmatrix} = \Phi \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \varphi_1 & 0 & \cdots & 0 & \varphi_1 \\ 0 & \varphi_2 & \cdots & 0 & \varphi_2 \\ 0 & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \varphi_L & \varphi_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_1 \\ x'_2 \\ \vdots \\ x'_L \\ x_c \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中: Φ 为由 $\varphi_1, \dots, \varphi_L$ 组成的 $L \times (L+1)$ 块的测量矩阵,前 $L \times L$ 块为非零对角线的矩阵,表示对差异信号 x'_i 的测量。 Φ 中的最后一列表示对共有信号 x_c 的测量。

3.2 多行联合压缩感知重建算法

考虑共有数据和差异数据在变分域的稀疏性约束,根据压缩感知原理可知,(4)式对应的反向重建模型可写为下述最小化问题,即

$$\mathbf{X} = \arg \min_{\mathbf{X}} \left[\frac{1}{2} \|\mathbf{Y} - \Phi \mathbf{X}\|_2^2 + \phi(\mathbf{X}) \right], \quad (5)$$

式中: $\phi(\mathbf{X})$ 表示对 \mathbf{X} 的先验性稀疏约束。考虑 x'_1, \dots, x'_L, x_c 在变分域内的稀疏性约束,则 $\phi(\mathbf{X})$ 可写为

$$\phi(\mathbf{X}) = \lambda_1 \|\nabla x'_1\|_1 + \cdots + \lambda_L \|\nabla x'_L\|_1 + \lambda_c \|\nabla x_c\|_1, \quad (6)$$

式中: $\lambda_1, \dots, \lambda_L, \lambda_c$ 为正则化参数。

为了对(5)式进行求解,考虑使用迭代收缩阈值(IST)算法。根据IST算法,可以将(5)式转化为^[17]

$$\mathbf{X}^{t+1} = \Psi\{\mathbf{X}^t + \Phi^T(\mathbf{Y} - \Phi \mathbf{X}^t)\}, \quad (7)$$

式中: t 表示第 t 次迭代; $\Psi\{\cdot\}$ 表示降噪函数。令 $\mathbf{Z} = \mathbf{X}^t + \Phi^T(\mathbf{Y} - \Phi \mathbf{X}^t)$,则(7)式等价于最小化问题

$$\mathbf{X} = \Psi\{\mathbf{Z}\} = \arg \min_{\mathbf{X}} \left[\frac{1}{2} \|\mathbf{Z} - \mathbf{X}\|^2 + \phi(\mathbf{X}) \right]. \quad (8)$$

将(6)式代入(8)式中,则(8)式中的最小化问题可写为

$$\Psi\{\mathbf{Z}\} =$$

$$\begin{aligned} & \arg \min \left(\frac{1}{2} \|\mathbf{Z} - \mathbf{X}\|^2 + \lambda_1 \|\nabla x'_1\|_1 + \cdots + \right. \\ & \quad \left. \lambda_L \|\nabla x'_L\|_1 + \lambda_c \|\nabla x_c\|_1 \right) = \\ & \arg \min \left(\frac{1}{2} \|z'_1 - x'_1\|^2 + \lambda_1 \|\nabla x'_1\|_1 \right) + \cdots + \\ & \arg \min \left(\frac{1}{2} \|z'_L - x'_L\|^2 + \lambda_L \|\nabla x'_L\|_1 \right) + \\ & \arg \min \left(\frac{1}{2} \|z_c - x_c\|^2 + \lambda_c \|\nabla x_c\|_1 \right), \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $(z'_1, \dots, z'_L, z_c) \in \mathbf{Z}$ 表示按 $(x'_1, \dots, x'_L, x_c) \in$

\mathbf{X} 相同顺序截取的向量。

由上述可以看到,经过分解后,可将 $\Psi(\mathbf{Z})$ 的最小化问题转化为对各分量 (z'_1, \dots, z'_L, z_c) 的降噪问题。由于本文选择了变分域的稀疏性约束,因此按照原有IST算法,降噪过程 $\Psi\{\cdot\}$ 可以通过Chambolle降噪算法实现^[17]。

4 实验验证

4.1 实验装置

为了对水下推扫式计算鬼成像方法进行验证,搭建了实验系统。实验系统主要包括目标、水槽、基于数字微反射镜阵列的投影仪、光电倍增管(PMT)、数据采集卡(DAQ)和计算机等,实验系统原理图如图2所示。实验系统工作方式如下:投影仪投射图案,经过水槽后照射到目标上,而后利用光电倍增管同步采集目标反射光强,使用数据采集卡采集光强并记录至计算机中,最后用收集到的数据进行图像的重构。将投影仪投射图案设置为单行图案时,即可模拟推扫式计算鬼成像,而将投射图案设置为二维图案时,上述系统可实现传统二维鬼成像。

实验中,为了模拟水体后向散射的影响,通过在水槽中添加牛奶的方式来改变水体的浑浊度,浑浊度的单位用FTU来表示,1 FTU相当于1 L水中含有1 mg二氧化硅时的浑浊程度,数值越大表示浑浊度越高,实验中采用Seapoint浊度仪对其进行测量。

4.2 实验结果及分析

利用鬼成像实验系统,对推扫式计算鬼成像方法进行了实验研究。实验中投影仪投射图案设置为单行图案,采用二进制伯努利随机测量矩阵,且在每行采用不同的测量矩阵。测量中,每行测量点 $N = 128$,每行实验数据按照100%的采样率进行数据采集,分别对128行数据进行测量,并记录相应数据,此时探测目标的总分辨率为 128×128 。为与传统计算鬼成像进行对比,将投影仪投射图案设置为二维图案,并采用二进制伯努利随机测量矩阵,所测目标的分辨率与推扫鬼成像的分辨率相同。针对两种浑浊度情况(浑浊度为10 FTU和浑浊度为20 FTU),重复上述采集过程,并记录实验数据。

在推扫鬼成像重建中,采用采样率(SR)为12.5%、25%、50%的数据,分别在无联合($L = 1$)、4行联合($L = 4$)、8行联合($L = 8$)和16行联合($L = 16$)4种情况下进行重建,同时使用相同采样率的传统计算鬼成像算法进行探测和重建,重建结果分别如图3和图4所示。

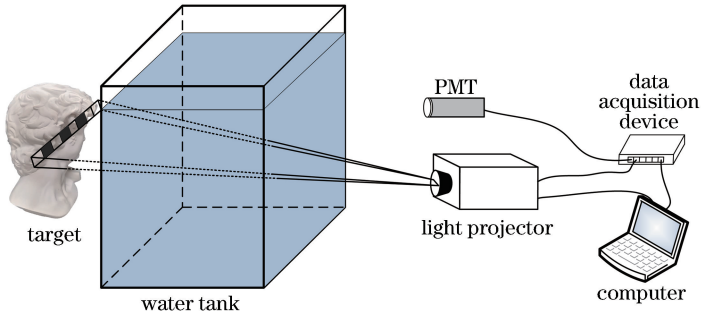


图 2 鬼成像实验原理图

Fig. 2 Experimental principle of underwater ghost imaging

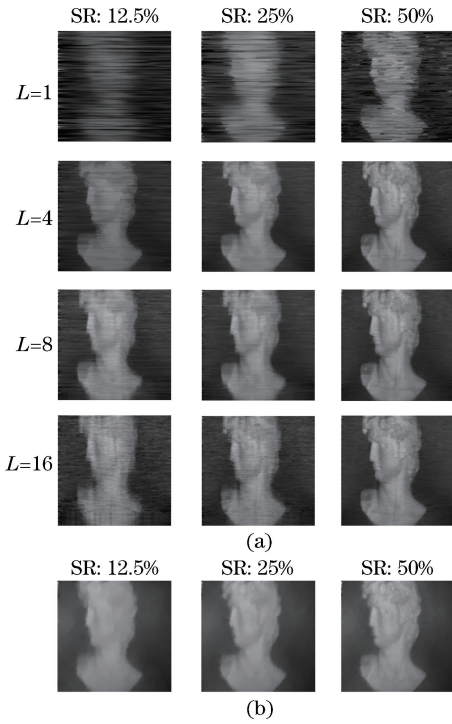


图 3 浑浊度为 10 FTU 时推扫式计算鬼成像与传统面阵式计算鬼成像实验结果对比。(a)推扫式计算鬼成像结果；(b)传统面阵式计算鬼成像结果

Fig. 3 Experimental results of push-broom ghost imaging and traditional ghost imaging under turbidity of 10 FTU. (a) Results of push-broom ghost imaging; (b) results of traditional plane-array ghost imaging

从图 3 中可看出,采用联合重建方法显著提高了推扫鬼成像的质量。当对单行进行独立重建时,由于各行恢复的结果存在一定差异,因此重构结果中出现了明显的横纹;4 行联合和 8 行联合重构的效果较好,而 16 行联合重建图像较为模糊,这是由于当使用较多行联合重建时,求解的共有信号远大于各行之间的差异,导致重建中各行之间的差异较小。此外,当浑浊度为 10 FTU 时,对比推扫式计算鬼成像的质量

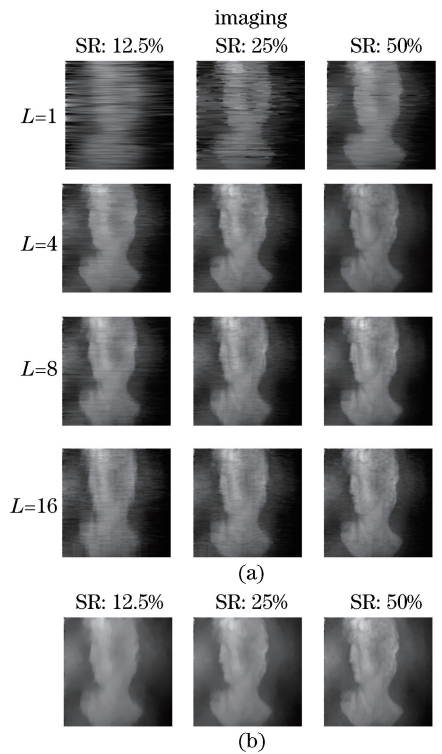


图 4 浑浊度为 20 FTU 时推扫式计算鬼成像与传统面阵式计算鬼成像实验结果对比。(a)推扫式计算鬼成像结果；(b)传统面阵式计算鬼成像结果

Fig. 4 Experimental results of push-broom ghost imaging and traditional ghost imaging under turbidity of 20 FTU. (a) Results of push-broom ghost imaging; (b) results of traditional plane-array ghost imaging

和传统面阵式计算鬼成像可看出,面阵式计算鬼成像的重建结果中具有较强的后向散射光,而推扫式计算鬼成像的重建结果中后向散射光较小。当浑浊度为 20 FTU 时,推扫鬼成像能看到部分后向散射,这是因为本实验中采用了线光源照射目标,所采用的光电探测器直接对整个目标面进行探测,因此增大了探测器所接收到的后向散射光,但与传统面阵式计算鬼成像

相比,推扫式计算鬼成像重建结果中的后向散射小得多。通过本实验可看出推扫式计算鬼成像能够在一定程度上降低后向散射光的影响。

5 结 论

针对水下成像环境中的后向散射问题,开展了推扫式计算鬼成像方法研究。介绍推扫式计算鬼成像模式,研究了多行联合压缩感知模型,基于迭代压缩阈值算法提出了模型的求解方法。搭建了水下鬼成像实验装置,在两种不同浑浊度情况下通过实验对比了推扫式计算鬼成像和传统面阵式计算鬼成像的效果。实验结果表明,推扫式计算鬼成像具有较好的重建结果,与传统面阵式计算鬼成像相比,能够有效降低后向散射的影响。

参 考 文 献

- [1] Lu M H, Shen X, Han S S. Ghost imaging via compressive sampling based on digital micromirror device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31 (7): 0711002.
陆明海, 沈夏, 韩申生. 基于数字微镜器件的压缩感知关联成像研究 [J]. *光学学报*, 2011, 31 (7): 0711002.
- [2] Zhou C, Huang H Y, Liu B, *et al.* Hybrid speckle-pattern compressive computational ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(9): 0911001.
周成, 黄贺艳, 刘兵, 等. 基于混合散斑图的压缩计算鬼成像方法研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(9): 0911001.
- [3] Liu S Y, Liu Z T, Wu J R, *et al.* Hyperspectral camera based on ghost imaging via sparsity constraints with application of flat-field grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0511004.
刘盛盈, 刘震涛, 吴建荣, 等. 基于平场光栅的稀疏约束鬼成像高光谱相机 [J]. *光学学报*, 2017, 37 (5): 0511004.
- [4] Chen Y, Fan X, Cheng Y B, *et al.* Compressive sensing ghost imaging based on neighbor similarity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(7): 0711001.
陈熠, 樊祥, 程玉宝, 等. 基于邻域相似度的压缩感知鬼成像 [J]. *光学学报*, 2018, 38(7): 0711001.
- [5] Cheng J. Ghost imaging through turbulent atmosphere [J]. *Optics Express*, 2009, 17 (10): 7916-7921.
- [6] Zhang P L, Gong W L, Shen X, *et al.* Correlated imaging through atmospheric turbulence [J]. *Physical Review A*, 2010, 82(3): 033817.
- [7] Erkmen B I. Computational ghost imaging for remote sensing [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2012, 29(5): 782-789.
- [8] Gong W L, Han S S. Correlated imaging in scattering media [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 394-396.
- [9] Lü P, Zhou R K, He J H, *et al.* Research on underwater single-pixel imaging system [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(9): 1425-1430.
吕沛, 周仁魁, 何俊华, 等. 水下单像素成像系统研究 [J]. *光电子 • 激光*, 2011, 22(9): 1425-1430.
- [10] Lü P. Research of underwater imaging technology and image compression technology based on compressive sensing theory [D]. Xi'an: University of Chinese Academy of Sciences, 2012.
吕沛. 基于压缩感知理论的水下成像技术和图像压缩编码技术研究 [D]. 西安: 中国科学院大学, 2012.
- [11] Le M N, Wang G, Zheng H B, *et al.* Underwater computational ghost imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(19): 22859-22868.
- [12] Zhao M, Uhlmann J, Lanzagorta M, *et al.* Passive ghost imaging using caustics modeling [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10188: 101880H.
- [13] Liu B L, Yang Z H, Qu S F, *et al.* Influence of turbid media at different locations in computational ghost imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(10): 1026017.
刘保磊, 杨照华, 曲少凡, 等. 不同路径下散射介质对计算关联成像的影响 [J]. *光学学报*, 2016, 36 (10): 1026017.
- [14] Ouyang B, Dagleish F R, Caimi F M, *et al.* Compressive line sensing underwater imaging system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(5): 051409.
- [15] Jin W Q, Wang X, Cao F M, *et al.* Review of underwater opto-electrical imaging technology and equipment (II) [J]. *Infrared Technology*, 2011, 33 (3): 125-132.
金伟其, 王霞, 曹峰梅, 等. 水下光电成像技术与装备研究进展(下) [J]. *红外技术*, 2011, 33(3): 125-132.
- [16] Baron D, Duarte M F, Sarvotham S, *et al.* An information-theoretic approach to distributed compressed sensing [C] // 43rd Conference on Communication, Control and Computing. [S. l.: s. n.], 2005, 24: 1537-1541.
- [17] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2007, 16(12): 2992-3004.