

基于自校验的单像素成像系统动态干扰去除方法*

张健¹⁾ 陈家霖¹⁾ 陈笑然¹⁾ 冒添逸²⁾ 沈姗姗³⁾ 何睿清^{1)†}

1) (南京工程学院信息与通信工程学院, 南京 211167)

2) (南京邮电大学地理与生物信息学院, 南京 210023)

3) (南京工业职业技术大学航空工程学院, 南京 210023)

(2022 年 10 月 5 日收到; 2022 年 11 月 7 日收到修改稿)

单像素成像系统通过对目标场景的多次调制, 获取相应的单像素测量值, 并由此重构图像. 在这一过程中, 如果其他物体侵入成像场景, 会严重影响测量值的准确性, 降低重构图像质量. 由于侵入物体的反射率, 形态均具有一定的随机性, 因此从桶探测器信号的角度很难有效分离出受干扰信号. 针对这一问题, 基于哈达玛矩阵的特征, 提出了一套自校验方法, 即利用桶探测器自身测量值进行正确性校验, 筛选出未受干扰的桶探测器信号, 显著提升了重构图像的质量. 该方法适用于一般性成像场景, 且不需要引入额外的调制图像辅助校验, 有力推动了单像素成像技术的实用化进程.

关键词: 单像素成像, 自校验, 动态干扰**PACS:** 42.30.Va, 42.30.-d**DOI:** 10.7498/aps.72.20221918

1 引言

单像素成像技术起源于量子成像技术^[1,2], 近年来得到广泛关注. 与传统成像方法相比, 单像素成像技术具有更宽的光谱响应范围, 更快的响应速度以及更高的灵敏度, 在高速成像^[3-6]、微光成像^[7-9]以及特殊波段成像^[10-13]方面具有极大的应用潜力.

当前制约单像素成像实际应用的关键因素是采样时间长和成像质量低. 为了提高效率应减少采样时间, 学者们在单像素成像的求解过程和调制方法方面开展了大量研究. 在求解方法方面, 单像素成像的求解主要依赖于压缩感知算法^[14], 该算法利用图像的稀疏性, 打破了奈奎斯特采样定理的限制, 为低采样率下的图像重构提供了有效手段. 在调制方法方面, 研究人员通常采用正交性较好的哈

达玛矩阵作为测量矩阵, 该方法也称为哈达玛单像素成像 (HSI). 为了获得更好的重构效率, HSI 可以采用特定的采样顺序来获取系数, 让更重要的系数排在前面以便实时获取目标图像的绝大部分信息^[15]. 为此, Zhang 等^[16]研究了 HSI 中使用的锯齿形、方形和圆形采样顺序. 此外, 其他采样顺序如俄罗斯套娃 (Russian doll)^[17]、蛋糕切割法 (cake cut)^[18]和折纸法 (origami)^[19]等都比自然顺序表现更好.

另一方面, 由于单像素成像机理与传统成像完全不同, 研究人员从多个角度建立了单像素成像的成像模型, 分析噪声对于其成像性能的影响. Jauregui-Sánchez 等^[20]建立了一个单像素相机的模型, 不仅考虑了入射光的特性, 还考虑了探测器的物理特性. 特别是该模型考虑了用作光检测器的光电二极管的光电流、暗电流、光电流散粒噪声、暗电流散粒噪声和约翰逊-奈奎斯特 (热) 噪声的影

* 国家自然科学基金 (批准号: 61905108, 62005128, 62205144)、江苏省高等学校自然科学研究项目 (批准号: 19KJB140010) 和南京工程学院校级科研基金 (批准号: YKJ201868) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: njheruiqing@hotmail.com

响. 在电信号和最终图像质量之间建立了清晰的关系. Sun 等^[21]对基于焦平面调制的单像素成像系统中影响重建图像质量的每个系统组件的噪声进行了研究, 建立了一个噪声模型来描述这些不同噪声源的综合影响, 并进行了数值模拟量化影响的分析. 该项研究为评估单像素成像系统的性能提供了一种简单而准确的方法. Jiang 等^[22]提出将信号采集过程中的噪声分为乘性噪声(如照明强度的波动噪声、采样矩阵畸变产生的噪声和传输介质散射噪声等)和加性噪声(如光电探测器的暗噪声和背景杂散光产生的噪声等), 并分析了不同重构算法、不同采样策略对图像质量的影响.

现有的单像素成像系统的理论模型大部分都是在成像环境稳定的情况下建立的. 但在实际成像情况下, 可能存在其他物体“侵入”目标场景. 这种动态干扰使得桶探测器测量值无效, 并导致重构图像质量严重下降. 由于目标场景与动态干扰都具有随意性, 因此其反射率、干扰时间、干扰物的移动路径均不确定, 从而难以直接通过桶探测器的测量值进行去除.

针对这一问题, 本文提出了一种检验正确信号的方法, 有效筛选了无干扰或受干扰较小的信号, 剔除了受干扰严重的信号. 仿真和实验均表明, 本方法可以有效提高重构图像质量, 也为单像素成像技术的实用化开辟了新的思路.

2 原理

本文采用哈达玛矩阵作为测量矩阵, 记为 \mathbf{H}_i , 其中 i 表示第 i 个调制矩阵. 哈达玛矩阵是一种由“+1”和“-1”组成的矩阵, 正交性较好, 常用于单像素成像中. 但在实际测量时, 由于采样矩阵为-1无法直接测得, 因此将 \mathbf{H}_i 中所有元素-1置0获得矩阵 \mathbf{H}_i^+ , 将 \mathbf{H}_i 的+1置0, -1取反获得矩阵 \mathbf{H}_i^- , \mathbf{H}_i^+ 和 \mathbf{H}_i^- 对应的测量值为 y_i^+ 和 y_i^- , 两者大小如(1)式所示. 将 y_i^+ 和 y_i^- 相减, 得到 \mathbf{H}_i 的测量值 l_i , 用于重构, 如(2)式所示:

$$\begin{cases} y_i^+ = \sum_{x,y} \mathbf{H}_i^+(x,y) T(x,y), \\ y_i^- = \sum_{x,y} \mathbf{H}_i^-(x,y) T(x,y), \end{cases} \quad (1)$$

$$l_i = y_i^+ - y_i^-, \quad (2)$$

$$u_i = y_i^+ + y_i^- = \sum_{x,y} T(x,y). \quad (3)$$

y_i^+ 与 y_i^- 之和 u_i 为一个常数, 如(3)式所示. 其中 T 为目标反射率函数, (x,y) 为目标平面的坐标.

当 T 不变时, u_i 在不考虑干扰和噪声的情况下是一个常数, 因此可以利用 u_i 的大小判断是否存在动态干扰. 但在实际情况中, 探测器噪声、背景光照等因素使得 u_i 不可能为一个常数. 此外, 动态干扰的类型, 对探测器的扰动程度都不确定. 针对这个问题, 本文提出通过统计的方法, 对因动态干扰导致的错误信号进行识别和剔除. 为了保证一般性, 本文主要考虑非稀疏场景(稀疏度较低)的异常信号去除, 因此在实验中采用全采样, 同时默认大部分信号没有受到干扰, 干扰的总比例作为先验知识, 但是在哪一帧存在干扰未知. 算法如图1所示, 流程如下:

步骤 1 计算 u_i . 假设 \mathbf{H}_i 的大小为 $N \times N$, 那么共有 N^2 个 u_i 需要计算. 如图1(a)—(d)所示.

步骤 2 统计 u_i 的直方图, 如图1(e)所示. 横坐标为 u_i 的强度, 假设采集到的 u_i 最大值, 最小值分别记为 $u_{i_{\max}}$ 和 $u_{i_{\min}}$. 分段区域个数为 K , 那么每一段的强度范围为 $(u_{i_{\max}} - u_{i_{\min}})/K$, 纵坐标为第 k 个区间内包含的组数, 记为 $N_k (k = 1, 2, \dots, K)$, 那么 u_i 对应的分布直方图如图1(e)所示.

步骤 3 无干扰信号的生长方法. 选择直方图中 $N_k (k = 1, 2, \dots, K)$ 中的最大值对应的下标作为初始生长位置, 并将其标记为红色, 然后从初始生长位置向两边生长(如图1(e)中黄色箭头所示), 每一次迭代向两侧生长一个位置, 经过生长的区域所包含的总组数的比例记为 η . 在迭代过程中如果遇到了边界, 则该方向生长停止. 当 $\eta > \eta_0$, 则迭代停止, η_0 为生长比例阈值, 通常不小于干扰比例 ε . 当生长停止时, 生长部分为不受干扰的信号, 该方法可以获取正确的 u_i 的数值范围, 标记为红色(如图1(f)所示), 这些正确的组对应的桶探测器数值同样被标记为红色(如图1(g)和图1(h)所示), 用于重构. 本文采用压缩感知算法进行重构:

$$\hat{\mathbf{I}} = \operatorname{argmin} \frac{1}{2} \|\mathbf{l} - \boldsymbol{\theta} \mathbf{I}\|_2 + \lambda \Psi(\mathbf{I}), \quad (4)$$

其中 \mathbf{I} 为待测图像, $\hat{\mathbf{I}}$ 为利用(4)式得到的求解结果; $\boldsymbol{\theta}$ 为测量矩阵, $\boldsymbol{\theta}$ 中每一行表示为 $\boldsymbol{\theta}_m$, $\boldsymbol{\theta}_m = g(\mathbf{H}_i)$, $g(\cdot)$ 表示将二维矩阵写成一维行向量的运

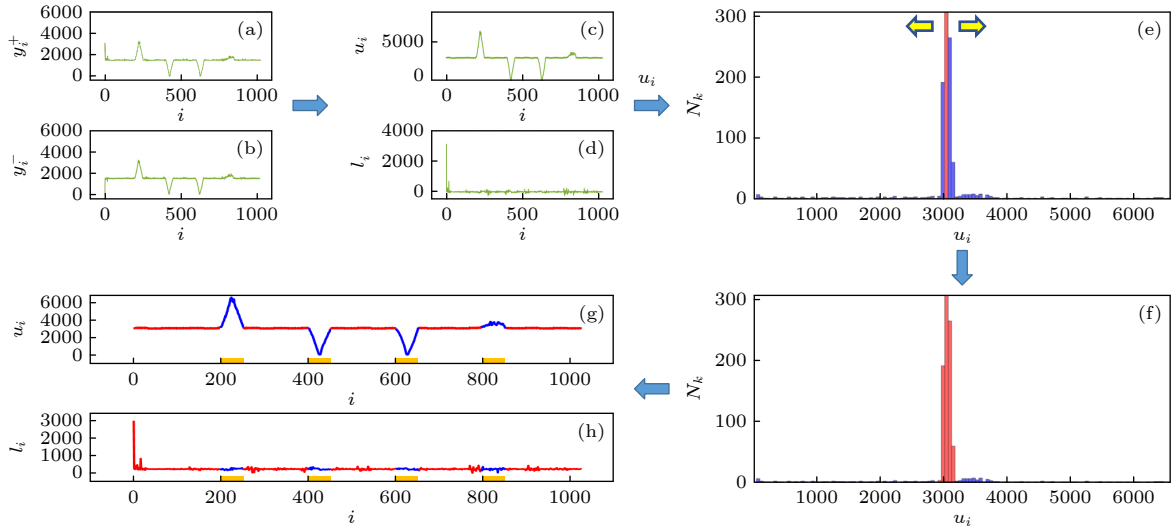


图 1 受干扰信号去除流程图 (a) H_i^+ 对应测量信号 y_i^+ ; (b) H_i^- 对应测量信号 y_i^- ; (c) H_i 对应的自校验信号 u_i ; (d) H_i 对应的用于重构的信号 l_i ; (e) u_i 的统计直方图, 红色区域表示已经生长的区域, 黄色箭头表示生长方向, 蓝色区域表示未生长区域; (f) 使用本文算法后的 u_i 统计直方图, 红色、蓝色区域分别表示正确和受干扰的桶探测器数值范围; (g), (h) 分别是使用本文算法筛选后的 u_i 和 l_i , 红色和蓝色分别表示正确和错误测量值, 黄色色块表示真实干扰存在的帧数

Fig. 1. Flowchart of abnormal signal removal: (a) y_i^+ , measurement value of the pattern H_i^+ ; (b) y_i^- , measurement value of the pattern H_i^- ; (c) u_i , the signal for self-check, corresponding to H_i ; (d) l_i , the signal for reconstruction, corresponding to H_i ; (e) statistical histogram of u_i ; red areas indicate the area that have grown, yellow arrows indicate growth direction, blue areas indicate ungrown areas; (f) statistical histogram of u_i obtained by the proposed algorithm in this paper, the red and blue areas represent the ranges of correct and disturbed bucket detector value respectively; (g), (h) u_i and l_i obtained by the proposed algorithm in this paper, respectively, red and blue dots indicate correct and incorrect measurements, respectively, the yellow color block indicates the number of frames where the real occlusion exists.

算; l 为 l_i 组成的向量; $\Psi(I)$ 为待测图像的正则项, λ 为常数, 用于调节正则项在优化算法中的权重. 这里使用 TVL3 算法^[23] 求解凸优化过程:

本文采用均方误差 (MSE) 作为重构图像的像质评价函数:

$$\text{MSE} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N (I_{\text{ref}}(x, y) - I'(x, y))^2}{MN}, \quad (5)$$

其中 I_{ref} 和 I' 分别是无干扰时的重构图像和待评价图像, M 和 N 是图像大小:

3 实验结果分析

3.1 实验系统

实验系统如图 2(a) 所示. 这个系统包含了一个投影仪 (DLP 4500)、一个单像素探测器、一个目标场景以及一套数据采集系统 (未画出). 投影仪向场景投射一系列调制矩阵, 单像素探测器探测反射光能量, 并将其传入控制系统. 干扰物动态穿梭于探测器与待测场景之间, 如图 2(a) 所示. 在实验中, 共设置了两种成像场景 (无干扰的场景重构图

分别如图 2(b) 和图 2(c) 所示), 每种场景采用了 3 种干扰物, 分别是白色 A4 纸、黑绒布以及彩色水果图案 3 种干扰物 (如图 2(f1)—(f3) 所示).

3.2 实验结果

首先展示了两个具有不同干扰物体的场景, 在不同干扰时间情况下的重构图像. 场景 1 的重构情况如图 3 所示, 场景 2 的重构情况如图 4 所示.

可以看出, 当成像系统包含单一干扰物时, 本方法可以较好地删除受干扰信号 (直方图中标记为蓝色), 保留正确信号 (直方图中标记为红色). 要强调的是, 在图 3 和图 4 对应场景中, 证实了本方法的优势, 即在所有干扰类型中, 受干扰信息均淹没 l_i 中, 不具有区分性. 而如果单纯从 y_i^+ 或 y_i^- 的数据大小分析有干扰信号的位置, 又难以区分第一帧测量结果 (因为第一帧是全 1 的投影, 因此数值较高) 与干扰信号之间的区别.

利用本方法剔除错误信号之后, 重构图像质量显著提高, 背景噪声显著减少, 图像细节显著提高. 而且在大部分情况下, 第一帧测量值没有被当作干扰信号被删去, 体现了本方法的优越性.

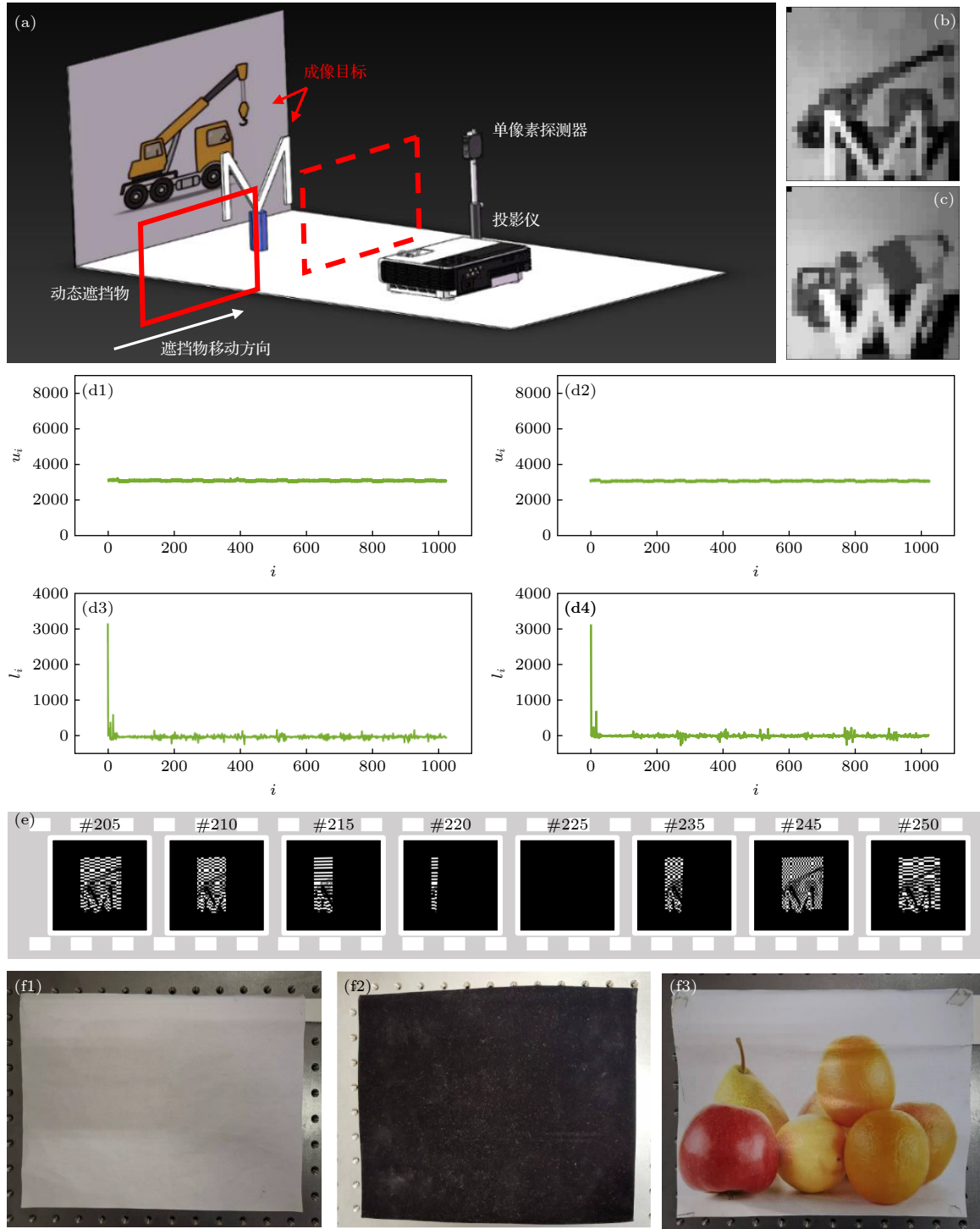


图2 成像系统示意图 (a) 成像系统; (b) 场景1无干扰情况下的重构图像; (c) 场景2无干扰情况下的重构图像; (d1), (d2) 场景1, 2无干扰时 u_i 曲线; (d3), (d4) 场景1, 2无干扰时 l_i 曲线; (e) 干扰物为黑布时, 目标成像过程中的遮挡情况; (f1)–(f3) 干扰物 (A4纸、黑绒布、彩色水果图案)

Fig. 2. Schematic diagram of imaging system: (a) Imaging system; (b) reconstructed image of scene 1 without occlusion; (c) reconstructed image of scene 2 without occlusion; (d1), (d2) u_i curves of scene 1 and 2 respectively; (d3), (d4) l_i curves of scene 1 and 2 respectively; (e) occlusion (black cloth) during single-pixel imaging; (f1)–(f3) occlusion (A4 paper, black cloth and color fruit pattern).

其次, 为了研究本方法的鲁棒性, 在一次单像素成像实验中, 使用了3种干扰. 场景1和场景2中干扰类型分别如图5(a4)和(b4)中, 黑色箭头

所示. 从图5(a3)和(b3)可以看出, 本方法在多种干扰条件下, 仍保持了较好的鲁棒性, 重构图像质量明显提升, 具有较好的实用性价值.

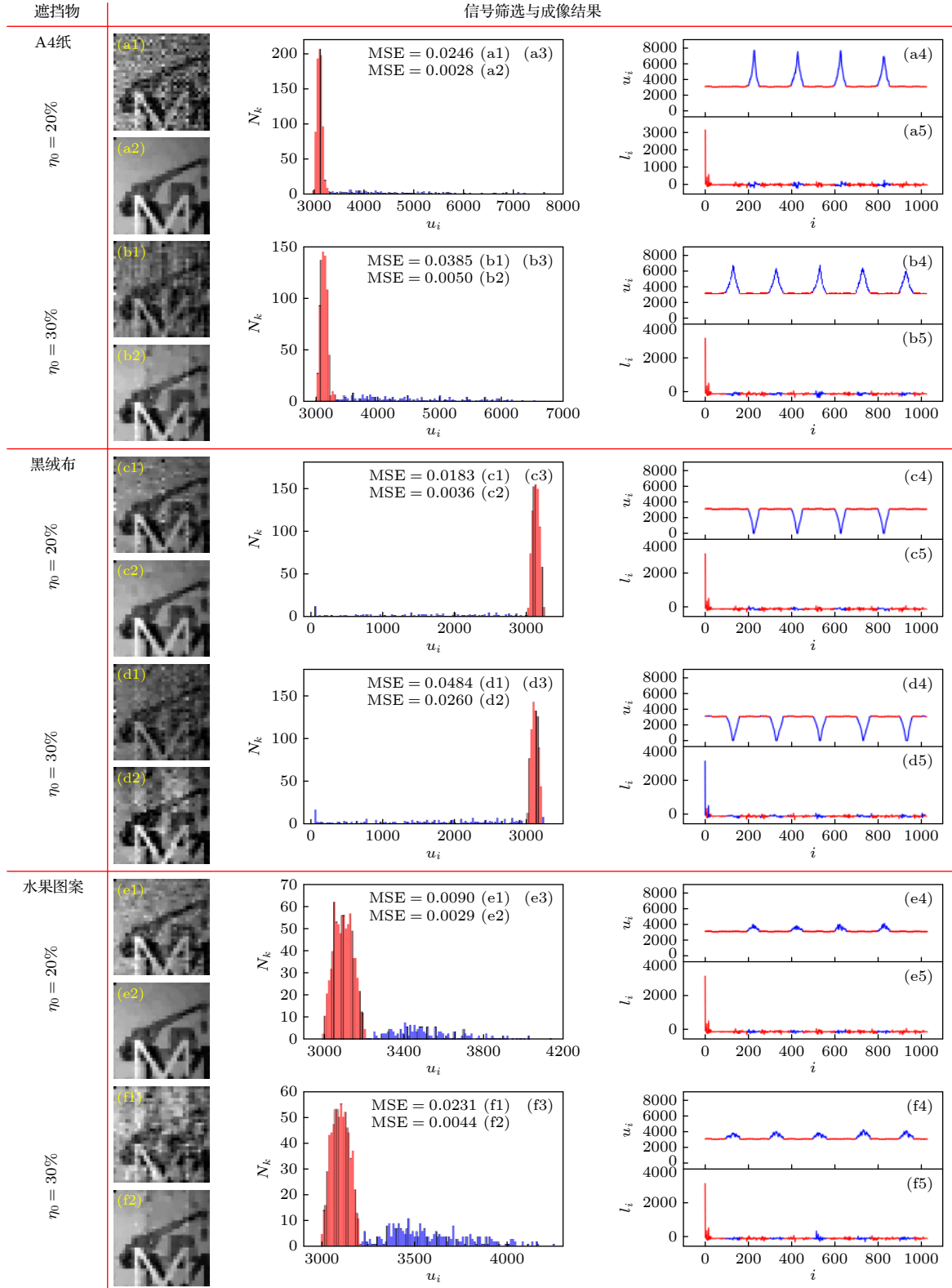


图 3 场景 1 重构情况 (a1)–(f1) 未去除干扰的重构图像; (a2)–(f2) 去除干扰后的重构图像; (a3)–(f3) u_i 的统计直方图; (a4)–(f4) u_i 强度值; (a5)–(f5) l_i 强度值; 图中红色表示使用本方法得到的正确桶探测器检验值 u_i (直方图中为 u_i 的强度范围) 和用于重构的强度值 l_i , 蓝色表示由本方法得到的干扰值

Fig. 3. Reconstruction in scene 1: (a1)–(f1) Reconstructed image without removing occlusion; (a2)–(f2) reconstructed image after removing occlusion; (a3)–(f3) statistical histogram of u_i ; (a4)–(f4) u_i value; (a5)–(f5) l_i value; in the figure, red represents the correct value of u_i (or the intensity range of u_i in the histogram) and the value of l_i used for reconstruction, while blue one represents the wrong values.

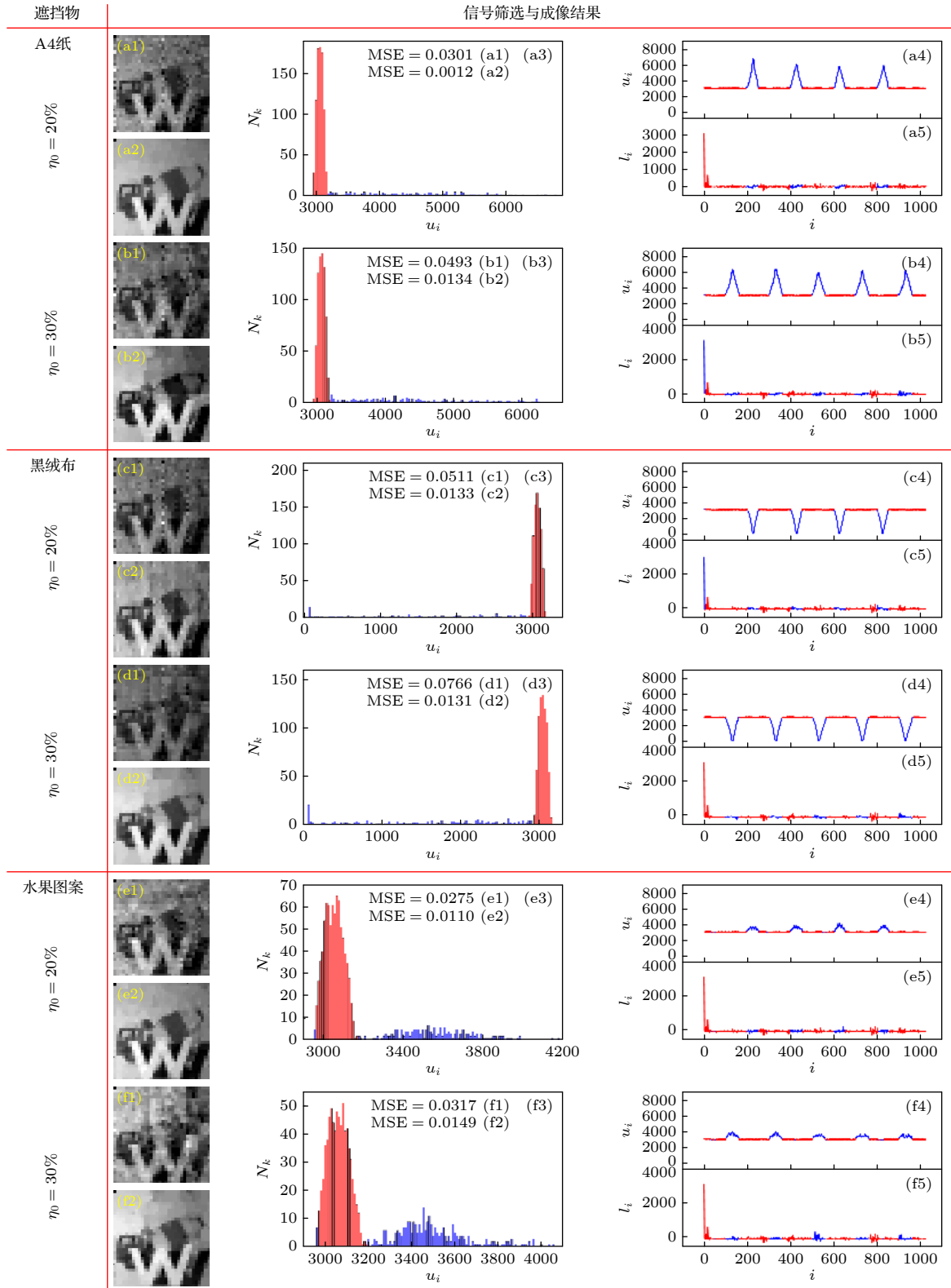


图 4 场景 2 重构情况 (a1)–(f1) 未去除干扰的重构图像; (a2)–(f2) 去除干扰后的重构图像; (a3)–(f3) u_i 的统计直方图; (a4)–(f4) u_i 强度值; (a5)–(f5) l_i 强度值; 图中红色表示使用本方法得到的正确桶探测器检验值 u_i (直方图中为 u_i 的强度范围) 和用于重构的强度值 l_i , 蓝色表示由本方法得到的干扰值

Fig. 4. Reconstruction in scene 2: (a1)–(f1) Reconstructed image without removing occlusion; (a2)–(f2) reconstructed image after removing occlusion; (a3)–(f3) statistical histogram of u_i ; (a4)–(f4) u_i value; (a5)–(f5) l_i value; the red curves represents the correct value of u_i (or the intensity range of u_i in the histogram) and the value of l_i used for reconstruction, while blue one represents the wrong values.

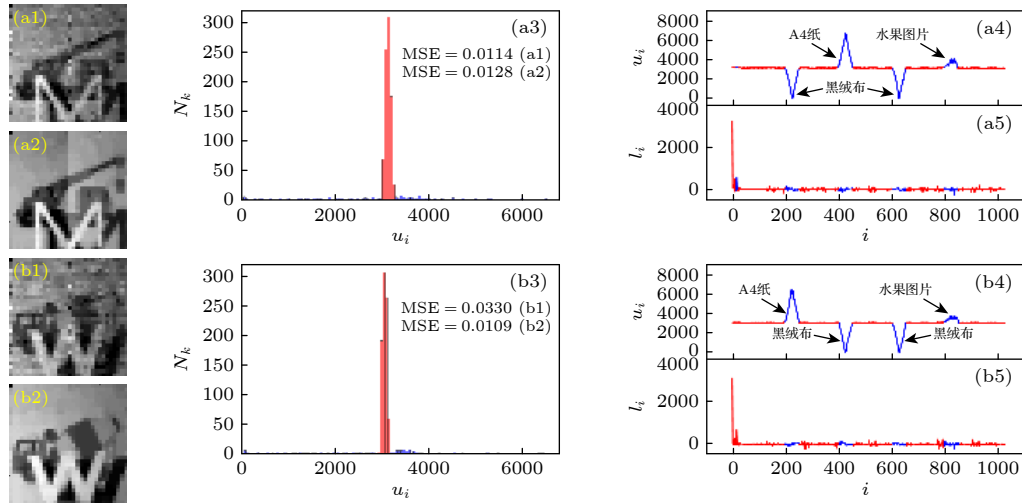


图 5 多种干扰条件下的单像素系统抗干扰能力测试 (a1), (b1) 未去除干扰的重构图像; (a2), (b2) 去除干扰后的重构图像; (a3), (b3) u_i 的统计直方图; (a4), (b4) u_i 强度值; (a5), (b5) l_i 强度值; 图中红色表示使用本方法得到的正确桶探测器检验值 u_i (直方图中为 u_i 的强度范围) 和用于重构的强度值 l_i , 蓝色表示由本方法得到的干扰值

Fig. 5. Test of dynamic occlusion removal under various occlusion conditions: (a1), (b1) Reconstructed image without removing occlusion; (a2), (b2) reconstructed image after removing occlusion; (a3), (b3) statistical histogram of u_i ; (a4), (b4) the value of u_i ; (a5), (b5) the value of l_i ; the red curves represents the correct value of u_i (or the intensity range of u_i in the histogram) and the value of l_i used for reconstruction, while blue one represents the wrong values.

4 结 论

单像素成像技术容易受到外界干扰, 产生错误的测量值, 从而降低重构图像质量. 本文基于哈达玛矩阵的性质, 设计了一种自校验的方法, 成功分离出由动态干扰造成的错误信号. 实验证明该方法对不同场景、不同干扰物以及不同干扰时间都具有显著效果. 利用本方法重构的图像质量明显优于直接重构的图像. 本文中的方法可以应用于前景遮挡、背景环境不稳定等情况. 在高速成像, 目标跟踪等领域具有较广的应用前景, 推动了单像素成像技术的实用化.

参考文献

- [1] Pittman T B, Shih Y H, Strekalov D V, Sergienko A V 1995 *Phys. Rev. A* **52** R3429
- [2] Bennink R S, Bentley S J, Boyd R W 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 113601
- [3] Guo Q, Wang Y X, Chen H W, Chen M H, Yang S Y, Xie S Z 2017 *Front. Inf. Tech. EL* **18** 1261
- [4] Yang Z H, Chen X, Zhao Z H, Song, M Y, Liu Y, Zhao Z D, Lei H D, Yu, Y J, Wu, L A 2022 *Opt. Express* **30** 864
- [5] Sefi O, Klein Y, Strizhevsky E, Dolbnya, I. P., Shwartz S 2020 *Opt. Express* **28** 24568
- [6] Liu S, Yao X R, Liu X F, Xu D Z, Wang X D, Liu B, Wang C, Zhai G J, Zhao Q 2019 *Opt. Express* **27** 22138
- [7] Meyers R E, Deacon K S, Shih Y H 2011 *Appl. Phys. Lett.* **98** 111115
- [8] Yang X, Liu Y, Mou X Y, Hu T Y, Yuan F, Cheng E 2021 *Opt. Express* **29** 12010
- [9] Zhang C G, He W Q, Han B N, Liao M H, Lu D J, Peng X, Xu C 2019 *Opt. Express* **27** 13469
- [10] Jiao S M, Feng J, Gao Y, Lei T, Yuan X C 2020 *Opt. Express* **28** 7301
- [11] Tian N, Guo Q C, Wang A L, Xu D L, Fu L 2011 *Opt. Lett.* **36** 3302
- [12] Ma Y Y, Yin Y K, Jiang S, Li X Y, Huang F, Sun B Q 2021 *Opt. Lasers. Eng.* **140** 106532
- [13] Li X Y, Yin Y K, He W Q, Liu X L, Tang Q J, Peng X 2021 *Opt. Express* **29** 36675
- [14] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, Laska J N, Sun T, Kelly K F, Baraniuk R G 2008 *IEEE. Signal. Process. Mag* **25** 83
- [15] Vaz P G, Amaral D, Ferreira L F R, Morgado M, Cardoso J 2020 *Opt. Express* **28** 11666
- [16] Zhang Z B, Wang X Y, Zheng G A, Zhong J G 2017 *Opt. Express* **25** 19619
- [17] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, Padgett M J, Radwell N 2017 *Sci. Rep.* **7** 3464
- [18] Yu W K 2019 *Sensors* **19** 4122
- [19] Yu W K, Liu Y M 2019 *Sensors* **19** 5135
- [20] Jauregui-Sanchez Y, Clemente P, Latorre-Carmona P, Tajahuerce E, Lancis J 2018 *Appl. Opt.* **57** B67
- [21] Sun M. J, Xu Z H, Wu L A 2018 *Opt. Lasers. Eng.* **100** 18
- [22] Jiang S, Li X Y, Zhang Z X, Jiang W J, Wang Y P, He G B, Wang Y R, Sun B Q 2019 *Opt. Express* **27** 22499
- [23] Li C, Yin W, Jiang H, Zhang Y 2013 *Comput Optim Appl.* **56** 507

Dynamic occlusion removal in single-pixel imaging system based on self-check*

Zhang Jian¹⁾ Chen Jia-Lin¹⁾ Chen Xiao-Ran¹⁾ Mao Tian-Yi²⁾
 Shen Shan-Shan³⁾ He Rui-Qing^{1)†}

1) (*School of Information and Communication Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China*)

2) (*School of Geographic and Biologic Information, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

3) (*School of Aeronautic Engineering, Nanjing Vocational University of Industry Technology, Nanjing 210023, China*)

(Received 5 October 2022; revised manuscript received 7 November 2022)

Abstract

Single-pixel imaging (SPI) system modulates the object with a series of patterns, records the corresponding measurements of a bucket detector and forms an image by the algorithm of compressed sensing. In this process, if other objects enter into the field of view of SPI, the accuracy of measurement will be seriously affected, and the quality of the reconstructed image will decrease. Owing to the randomness of the reflectivity and shape of the occlusion, it is difficult to effectively separate the disturbed part from the bucket detector signal. To solve this problem, we propose a self-check method based on the characteristics of Hadamard matrix, that is, using the measurement values of bucket detector to verify the correctness of signal. Usually when using the Hadamard matrix as the measurement matrix in SPI, it is divided into complementary positive pattern and negative pattern. The measurements of these two patterns are subtracted to form the image (the difference value marked by l). Owing to the complementarity of the two patterns, the sum of the corresponding measurements should be a constant (marked by u). When dynamic occlusion appears, the value of u will fluctuate significantly, so we choose u as the standard to judge whether an occlusion appears. In order to reduce the influence of other factors (such as system noise or fluctuation of the illumination) in the imaging process, we further propose a dynamic occlusion removal method based on the statistical histogram of the values of u . We first find the position of the maximum value in the histogram, and then expand from this position to both sides of the histogram. We calculate the area of the expanded region, and stop the expansion when this area is greater than the threshold. Then the l corresponding to u in the expanded region is the measured value without interference. Experiments show that this method can retain the undisturbed signals of the bucket detector and significantly improve the quality of the reconstructed image. This method is simple and effective, and it is also suitable for general imaging scenes. More importantly, it does not need to introduce additional patterns for verification, which effectively promotes the practical process of single pixel imaging technology.

Keywords: single pixel imaging, self-check, dynamic occlusion

PACS: 42.30.Va, 42.30.-d

DOI: 10.7498/aps.72.20221918

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61905108, 62005128, 62205144), the Natural Science Research Project of the Jiangsu Higher Education Institutions, China (Grant No. 19KJB140010), and the Scientific Research Foundation of Nanjing Institute of Technology, China (Grant No. YKJ201868).

† Corresponding author. E-mail: njheruiqing@hotmail.com



基于自校验的单像素成像系统动态干扰去除方法

张健 陈家霖 陈笑然 冒添逸 沈珊珊 何睿清

Dynamic occlusion removal in single-pixel imaging system based on self-check

Zhang Jian Chen Jia-Lin Chen Xiao-Ran Mao Tian-Yi Shen Shan-Shan He Rui-Qing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 034201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221918

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221918>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于Hadamard矩阵优化排序的快速单像素成像

Fast single-pixel imaging based on optimized reordering Hadamard basis

物理学报. 2019, 68(6): 064202 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181886>

结合虚拟单像素成像解卷积的双边照明光片荧光显微技术

Dual-sided illumination light-sheet fluorescence microscopy with virtual single-pixel imaging deconvolution

物理学报. 2022, 71(2): 028701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211358>

日光强度涨落自关联消湍流成像

Turbulence-free intensity fluctuation self-correlation imaging with sunlight

物理学报. 2019, 68(9): 094204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182181>

线性剪切空间调制快拍成像动态定标技术

Dynamic calibration of linear shear spatial modulation snapshot imaging polarimeter

物理学报. 2022, 71(15): 154205 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220229>

基于赝热光照明的单发光学散斑成像

Single-shot optical speckle imaging based on pseudothermal illumination

物理学报. 2019, 68(3): 034201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181723>

光子计数成像系统的自适应累积时间扫描方法

Adaptive acquisition time scanning method for photon counting imaging system

物理学报. 2022, 71(15): 158702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220173>