



·前沿技术与交叉科学·

基于分块平滑投影二次重构算法的单像素成像系统

牟晓霜¹, 黎淼¹, 王玺¹, 梁文凯¹, 王峰², 理玉龙²,
关赞洋², 余泊汕¹, 张磊¹, 高翊喆¹, 张佳杰¹

(1. 重庆邮电大学 光电信息感测与传输技术重庆市重点实验室, 重庆 400000; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 单像素成像系统是通过无空间分辨能力的单像素探测器来获取目标二维分布信息的计算光学成像技术, 与传统直接成像技术相比具有高能量收集效率、高灵敏度等一系列优点, 在高能物理诊断技术领域有着广阔的应用前景。针对实际单像素压缩感知成像系统在复杂诊断环境中存在的重建噪声较大的问题, 提出并实现了基于分块平滑投影 Landweber 二次重构算法的单像素成像系统。根据算法观测矩阵分布特性以及数字微镜硬件输入要求实现了实际投影观测矩阵的变换, 利用二次重构算法实现了单像素诊断的仿真分析与实验测试。仿真结果表明, 在采样率为 20%~30% 的条件下, 重建图像峰值信噪比大于 20 dB, 结构相似性高于 0.8。进一步搭建单像素成像平台完成实验研究及验证, 实验结果表明, 利用二次重构算法模型对目标场景进行恢复的效果优于其余两种传统算法。二次重构单像素成像系统在采样率仅为 20% 的条件下能够重建出清晰的原始图像, 具有较好的噪声抑制特性。

关键词: 单像素成像; 光学成像系统; 压缩感知; 平滑投影 Landweber 算法; 观测矩阵
中图分类号: O439 文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202234.220190

Single-pixel imaging system based on block smoothed projected quadratic reconstruction algorithm

Mou Xiaoshuang¹, Li Miao¹, Wang Xi¹, Liang Wenkai¹, Wang Feng², Li Yulong²,
Guan Zanyang², Yu Boshan¹, Zhang Lei¹, Gao Yizhe¹, Zhang Jiajie¹

(1. Chongqing Key Laboratory of Photoelectric Information Sensing and Transmission Technology,
Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400000, China;
2. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The single-pixel imaging system is a computational optical imaging technology that obtains the two-dimensional distribution information of the target through a single-pixel detector without spatial resolution. Compared with traditional direct imaging technology, it has a series of advantages such as high energy collection efficiency and high sensitivity. In the field of high-energy physical diagnosis technology it has broad application prospects. Aiming at the problem that the actual single-pixel compressed sensing imaging system has large reconstruction noise in complex diagnostic environments, this paper proposes and implements a single-pixel imaging system based on the block smooth projection Landweber quadratic reconstruction algorithm. According to the distribution characteristics of the algorithm's observation matrix and the digital micromirror hardware input requirements, the transformation of the actual projection observation matrix is realized, and the simulation analysis and experimental test of the single-pixel diagnosis are realized by using the quadratic reconstruction algorithm. The simulation results show that under the condition of a 20% to 30% sampling rate, the peak signal-to-noise ratio of the reconstructed image is greater than 20 dB, and the structural similarity is higher than 0.8. The single-pixel imaging platform is further built to complete the experimental research and verification. The experimental results show that the recovery effect of the target scene using the quadratic reconstruction algorithm model is better than the other two traditional algorithms. The quadratic

* 收稿日期: 2022-06-06; 修订日期: 2022-09-13
基金项目: 国家自然科学基金项目 (61604028)
联系方式: 牟晓霜, 2016210786@stu.cqupt.edu.cn。
通信作者: 王 玺, xiwang@cqupt.edu.cn。

reconstruction single-pixel imaging system can reconstruct a clear original image with a sampling rate of only 20%, and has good noise suppression characteristics.

Key words: single-pixel imaging, optical imaging system, compressed sensing, smoothed projected Landweber algorithm, observation matrix

激光驱动惯性约束聚变(ICF)研究是当前国际前沿科学具有挑战性的研究领域,目前相关研究人员致力于用更加先进的诊断技术去研究更极端条件下的压力、温度、时间、空间尺度以及其他物理问题,为更精细地研究物理问题提供强有力的技术支撑,进而推动物理认识的进步^[1],对于极端瞬态条件下的诊断技术研究是目前惯性约束聚变研究领域的重要研究方向。近年来发展的压缩感知(CS)理论^[2-4]是一种全新的信息获取与处理原理,目前已经在ICF诊断领域有了广泛的应用^[5-6]。由于压缩感知的实现机理与单像素成像高度吻合^[7],因此,基于压缩感知理论的单像素成像系统(SPI)成为了一种极具潜力的新型诊断技术。单像素成像系统利用单像素传感器替代传统的面元阵列成像探测器,通过不同的照明图案对目标场景进行编码扫描,并结合相应的重构算法完成观测值的重建^[8]。基于压缩感知理论的单像素成像方式可以成功避免传统采样过程中对原始信号高速率采样后再压缩造成的存储和计算资源浪费^[9],突破了奈奎斯特采样定理对采样率的限制,能够以远小于奈奎斯特采样定理所要求的采样数恢复出原始信号。

基于压缩感知的单像素成像技术具有十分灵活的成像模式,其成像质量主要受观测矩阵、重构算法和硬件平台的影响。陈涛等人^[10]采用稀疏二进制矩阵作为测量矩阵,在采样率为20%~30%的条件下实现了对目标图像的重构。Wu Shaohua等人^[11]提出了基于光纤收集的单像素相机成像系统,该系统具有很好的噪声抑制效果,能够在采样率为30%的条件下重建原始目标场景。Wei Ziran等人^[12]为了提高单像素相机的成像精度,提出了新的算法模型和初始化压缩感知测量矩阵的新方法,完成了在采样率为25%的条件下对目标场景的精确重建。目前国内单像素成像技术相关研究主要通过采用不同的方案提升单像素成像系统的恢复准确性,通常需要在具有较低背景噪声条件下,如光纤收集、光学屏蔽及准直条件下获得高质量的重构图像,且所需采样率较高。

对于包含大量信息的二维图像,利用压缩感知理论进行重构,观测矩阵占用的内存较大,且重构计算复杂度较高。分块压缩感知理论(BCS)将原始图像分成大小相同且互不重叠的小块,分别对每个图像小块进行重构,能够有效降低观测矩阵所需的存储空间和计算复杂度,但重建图像存在块效应,从而降低了图像的质量。为了降低图像块效应,提高图像重构质量,Mun S等人^[13]提出了平滑投影Landweber算法(BCS-SPL),该算法通过不断迭代去除图像块效应和噪声,在重建速度和重建质量两方面都具有显著优势,但BCS-SPL算法不能直接对单像素探测器获得的观测信号进行重构。因此针对无光学准直、高噪声条件诊断环境,本文提出一种具有强噪声抑制特性BCS-SPL二次重构算法模型,选择传统的正交匹配追踪算法(OMP)作为初次重构算法,根据BCS-SPL算法及数字微镜阵列(DMD)的输入要求对观测矩阵进行变换,进一步利用BCS-SPL算法完成二次重构,通过仿真重建研究并分析了所建立单像素系统的重建复原效果。进一步在所搭建的开放诊断环境单像素硬件平台完成了研究及验证,实现了无准直、高背景噪声、低采样率条件下对目标场景的高质量成像。仿真及实验结果表明,与传统的单像素相机成像系统相比,本文所建立的单像素成像系统抗干扰能力强、重建精度高,具有理论意义和实际应用价值。

1 压缩感知单像素成像原理

压缩感知理论在对信号进行采样的同时完成压缩编码,从而降低信号采集和传输的成本。基于压缩感知理论的单像素成像系统利用重构算法对单像素相机探测得到的测量值进行重建,能够解决传统单像素成像系统所需测量次数较多,成像效率较低等问题。压缩感知理论的矩阵形式表示为

$$\mathbf{y} = \boldsymbol{\phi}\mathbf{x} \quad (1)$$

如图1所示,原始图像的大小为 $N \times N$, \mathbf{x} 是将图像展开的列向量。 $\boldsymbol{\phi}$ 为满足约束等距性^[14]的观测矩阵,包含 $M \times N^2$ 个元素,每一行表示一张结构光图案。 \mathbf{y} 是 $M \times 1$ 维的单像素测量值,其中第 i 个元素是由观测矩阵的第 i 行测量得到。重构算法对观测值 \mathbf{y} 进行重建并将一维数组转换为二维矩阵从而得到重构图像。

重构算法的设计是压缩感知理论的重难点之一,其核心是如何从低维观测数据中恢复得到原始高维数据。压缩感知中常用的重构算法有:(1)凸优化算法——此类算法用 l_1 范数取代 l_0 范数,包括基追踪算法(BP)^[15]和稀疏梯度投影算法(GPSR)^[16]等;(2)贪婪算法——该类算法通过迭代来选择最优匹配的原子,包括匹配追踪算法(MP)^[17],

OMP 算法^[18]和压缩采样匹配追踪算法 (CoSaMP)^[19]等；(3)BCS-SPL 算法^[13]——该算法是针对图像分块测量情形下的重建算法,主要包含维纳滤波、迭代凸投影和硬阈值处理三大步骤。

压缩感知单像素成像系统由光调制模块、数据采集模块和图像重构模块三大部分组成,具体结构如图 2 所示。DMD 是该系统的关键器件,将仅包含“0”、“1”元素的观测矩阵转化成编码图案并投影到目标物体上,实现对目标物体的编码。光源照射到 DMD,经过 DMD 调制后的光通过透镜汇聚照射目标物体,由目标物体反射的光信号经透镜汇聚到 APD 探测器进行光电转换,数据采集卡将 APD 输出的电信号转换为数字信号,采集到的数据导入 PC 端,结合重构算法完成图像的重建^[20]。

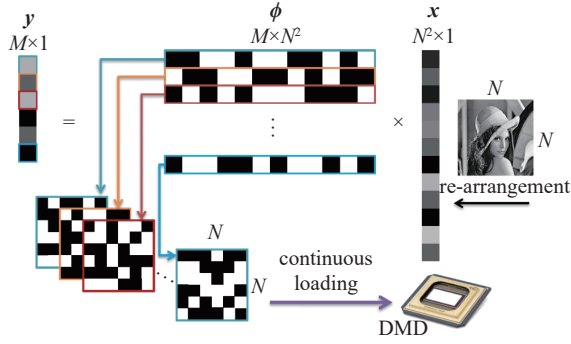


Fig. 1 Mathematical model of compressed sensing single-pixel imaging

图 1 压缩感知单像素成像数学模型

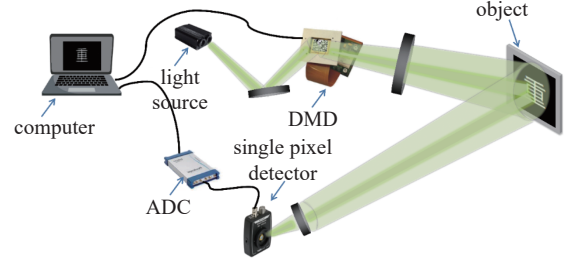


Fig. 2 Quadratic reconstruction experimental system based on compressed sensing single-pixel imaging

图 2 基于压缩感知单像素成像二次重构实验系统

2 BCS-SPL 二次重构算法模型

2.1 BCS-SPL 算法

BCS-SPL 算法是针对图像分块测量情形下的重建,其基于分块压缩感知理论^[21]将图像分成大小相等且互不重叠的小块,对每个图像块进行独立的处理,从而减小观测矩阵占用的内存,降低计算的复杂度。BCS-SPL 算法主要由维纳滤波、迭代凸投影和硬阈值处理三部分组成^[13]。初始图像的计算如式(2)所示,该算法使用维纳滤波对初始图像进行平滑处理,其原理是利用相邻的像素统计推测出当前像素的估值,从而缓解图像产生的块效应。迭代解通过维纳滤波后得到的结果可能不在原始解集中,凸集投影将迭代解投影到原始解集中,使其满足重构条件。进一步对图像块进行稀疏变换处理,公式如下

$$\mathbf{x}_0 = \Phi_B^T \mathbf{y}_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{x}'_n = \mathbf{x}_n + \Phi_B^T (\mathbf{y}_0 - \Phi_B \mathbf{x}_n) \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}'_n = \Psi \mathbf{x}'_n \quad (4)$$

硬阈值处理的本质是一个滤波的过程,通过设定一个合适的阈值参数达到去除迭代解中噪声分量的目的,计算方式如下

$$\tilde{\mathbf{x}}'_n = \begin{cases} \tilde{\mathbf{x}}'_n, & |\tilde{\mathbf{x}}'_n| > \tau_n \\ 0, & |\tilde{\mathbf{x}}'_n| \leq \tau_n \end{cases} \quad (5)$$

其中, τ_n 为阈值大小。经过阈值处理过后的图像需再次进行凸集投影,使迭代解回到原始解集中,重复迭代,直至满足预先设定的迭代停止条件。BCS-SPL 算法通过不断迭代从而去除图像块效应和噪声,实现在短时间内对图像高质量的重建,其具体流程如图 3 所示^[22]。

2.2 BCS-SPL 二次重构算法模型

在压缩感知理论层面的相关研究中,常选择凸优化算法^[23]、OMP 算法^[24-25]以及 BCS-SPL 算法^[26]作为重建算法。但在实际的压缩感知单像素成像系统实验中,受 DMD 限制,使用较多的重构算法为凸优化算法^[27]和 OMP 算法^[12]。OMP 算法是贪婪算法中的一种经典算法,该算法具有稳定性好,重构速度快等特点。BCS-SPL 算法通过不断迭代从而去除图像块效应和噪声,在重建速度和重建质量两方面都具有显著优势。

在实际的单像素成像系统中,DMD 通过控制每个微镜翻转的角度实现对光信号的调制,当导入的数据为“1”,偏转+12°,光线被反射到投影镜头;当导入的信号为“0”,偏转-12°,反射的光束则不能通过投影透镜。DMD 将仅

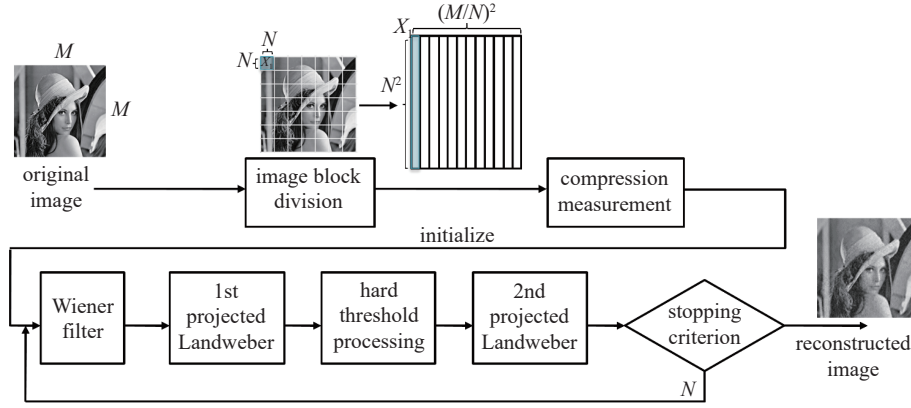


Fig. 3 BCS-SPL algorithm flow chart^[22]

图 3 BCS-SPL 算法流程图^[22]

包含“0”、“1”元素的观测矩阵转化成编码图案并投影到目标物体上,实现对目标物体的编码。BCS-SPL 算法需选择正交的观测矩阵完成图像的重建,而不是简单的二值矩阵,因此 BCS-SPL 算法不能直接对单像素探测器获得的观测信号进行重构。

本文为了提升单像素成像系统噪声抑制特性,建立 BCS-SPL 算法二次重构算法模型,选择传统 OMP 算法作为初次重构算法,根据 BCS-SPL 算法观测矩阵分布特性以及 DMD 硬件模块输入要求实现了实际投影观测矩阵的变换,进一步利用 BCS-SPL 算法完成二次重构。构造单像素成像系统中 DMD 硬件能够实现的观测矩阵需要先生成一个 $M \times N^2$ 维的部分哈达玛矩阵 ϕ , 该矩阵中的元素只有 +1、-1。由于硬件 DMD 只能在二值信号条件下实现 4 kHz 高速转换,因此首先将矩阵 ϕ 中为 -1 的元素替换为 0,从而生成矩阵 ϕ_1 ,进一步将矩阵 ϕ_1 中的元素扩大 $2/N$ 倍,得到 ϕ_2 ;利用 OMP 算法结合观测矩阵 ϕ_2 和单像素成像系统获得观测值 Y ,便能计算得到初始的图像 X_1 ,即存在以下关系

$$Y = \phi_2 X_1 \quad (6)$$

生成一个矩阵元素全为 $1/N$ 的矩阵 ϕ_3 。将初始矩阵 ϕ 中的元素同时扩大 $1/N$ 倍,即 $\phi_4 = (1/N)\phi$,上述观测矩阵具有以下关系

$$\phi_2 = \phi_3 + \phi_4 \quad (7)$$

结合式(6)和式(7)可得

$$Y = (\phi_3 + \phi_4) X_1 \quad (8)$$

$$Y - \phi_3 X_1 = \phi_4 X_1 \quad (9)$$

令 $Y_1 = Y - \phi_3 X_1$, 即

$$Y_1 = \phi_4 X_1 \quad (10)$$

通过上述变换,式(10)中的矩阵 ϕ_4 既符实际硬件条件,也满足 BCS-SPL 算法对观测矩阵的要求,基于公式(10)的关系即可进行二次重构,由观测值 Y_1 恢复得到原始图像 X_2 。

3 仿真分析

在所建立基于 BCS-SPL 算法为主的二次重构模型基础上完成了单像素成像仿真研究,分析和对比了传统 BP 算法、OMP 算法和 BCS-SPL 二次重构算法的重建性能。仿真实验选取大小为 256×256 的标准灰度图“Lena”作为测试图像,设计部分哈达玛矩阵作为初始观测矩阵。实验选用峰值信噪比 (PSNR) 和结构相似性 (SSIM) 作为衡量重构图像的质量的指标^[28]。

图 4 展示了在采样率 (SR) 为 30% 的条件下, BP 算法、OMP 算法和本文提出的二次重构算法分别对“Lena”图像重构的效果。从主观视觉上来看,三种算法都能够恢复出图像,但 BP 算法和 OMP 算法恢复的图像较模糊,只呈现出了人物的大体轮廓,损失了五官、头发、帽子等部位的细节。二次重构算法恢复的整体效果清晰,轮廓感强,在细节部分的重构效果也更优。表 1 为重构图像各项性能指标的具体数值。对比分析可知, BP 算法重构质量

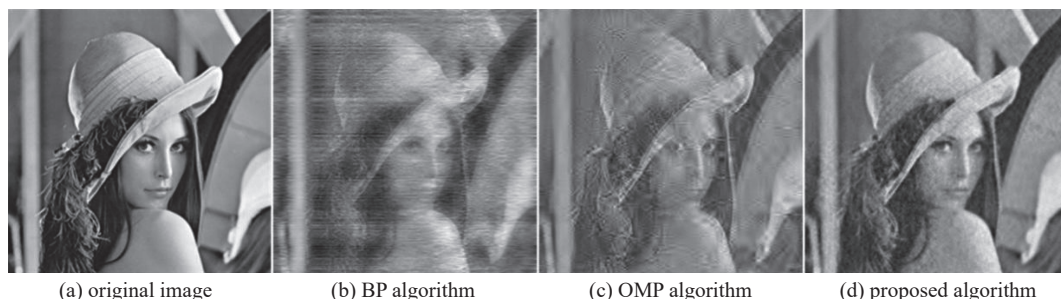


Fig. 4 Effect of different algorithms on image reconstruction at 30% sampling rate

图 4 采样率 30% 时, 不同算法对图像重构的效果

表 1 采样率 30% 时, 不同重构算法间性能的比较

Table 1 Performance comparison between different reconstruction algorithms at 30% sampling rate

algorithm	SSIM	PSNR/dB	reconstruction time/s
BP	0.44	19.19	79.5
OMP	0.53	22.26	1.4
proposed algorithm	0.76	27.61	4.6

较差, SSIM 仅为 0.44, 所需要的重构时间达到 79.5 s, 远远高于 OMP 算法和二次重构算法, 不适用于对实时图像的重建。OMP 算法的重构速度最快, 但重构的质量低于二次重构算法; 二次重构算法的重构时间相比 OMP 算法增加了约 3.2 s, 但 SSIM 达到 0.76, 提升约 43%, 相比 BP 算法, SSIM 提升了约 73%; 二次重构算法的 PSNR 值达到了 27.61 dB, 相比 BP 算法提升了 44%, 相比 OMP 算法提升了 24%。仿真结果表明, 单像素成像 BCS-SPL 二次重构算法的重构质量更优。

通过上述对重构结果的分析, BCS-SPL 二次重构算法模型重建的图像质量明显优于其余两种传统算法。综合考虑实际单像素成像系统硬件性能、算法重构速度和图像重构质量等多种因素, 进一步对本文提出的 BCS-SPL 二次重构算法模型进行仿真验证。针对实际单像素成像系统性能模拟, 仿真实验选取 3 张大小为 64×64 的物体图像, 设计初始观测矩阵为部分哈达玛矩阵, SR 取值范围在 10%~30%, BCS-SPL 二次重构模型图像恢复效果如图 5 所示。

根据图 5 的恢复结果对比分析了不同采样率条件下物体图像重建质量。当采样率为 10% 时, 可以恢复出低复杂度的图像, 如图 5(a2) 单字“重”与图 5(c2)“兔子”所示, 图像的轮廓清晰, 能够判断出原始图像形状。而对于高复杂度图像, 如字母词组“CQUPT”, 恢复的图像边缘轮廓分布不均匀, 中心字母相较边缘位置字母具有更好的重建效果。其原因在于, 低采样率条件下, 一方面中间部分观测数据从可选的基中进行选择时, 更容易获得匹配度较高的基向量; 因此, 经过 BCS-SPL 算法重新排列后, 两侧数据对应的权重相对较低, 从而出现收敛到局部最优解。另一方面, 按列重排过程中不同字符对应的数据冗余度导致了不同结构字体的重建效果具有一定差异。当采样率为 20% 时, 重构的质量有较大提升, 三种重建物体图像整体都能够恢复出纹理较复杂的清晰图像, 此外, “CQUPT”词组边缘位置字母也能获得较好的重建效果。表 2 给出了恢复图像的具体 PSNR 值和 SSIM 值。随着采样率的增加, PSNR 及 SSIM 指标值均明显提升, 当采样率为 20% 时, PSNR 值达到 20 dB 以上, SSIM 均高于 0.80, 图像恢复质量较好, 和主观视觉具有相同的规律。

4 实验测试及分析

利用单像素成像系统对目标场景进行重建需要经过多次采样, 在采样的过程中除了受周围环境的干扰, 系统内部的噪声也会影响成像的质量^[29]。针对无光学准直、高背景噪声条件诊断环境, 为了验证所建立 BCS-SPL 二次重构算法模型噪声抑制性能及成像重建效果, 基于 DMD 模块搭建了单像素成像系统硬件平台完成了相关单像素成像实验测试及数据分析。实验选用美国德州仪器公司生产的 DLP4500 芯片组, 芯片分辨率为 912×1140 , 工作波段为 420~700 nm。数据采集模块中的探测器为索雷博公司生产的光电探测器 PDA100A2, 带宽为 0~11 MHz, 工作波段为 320~1100 nm。实验数据的采集选取普源公司生产的 DS1202Z-E 示波器, 带宽为 0~200 MHz, 最大存储深度为 24 Mpts。

实验选择 64×64 大小的汉字“重”、英文“CQUPT”和图形“兔子”三幅图像作为目标场景, SR 取值在 10%~

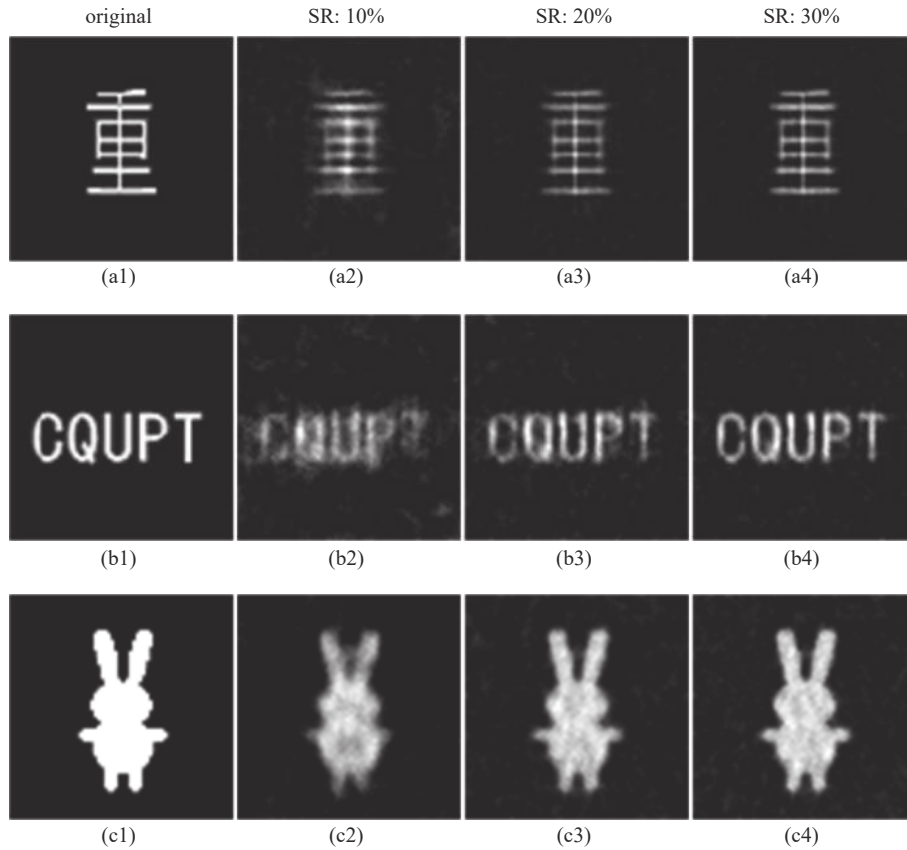


Fig. 5 Image reconstruction effect of SPL quadratic reconstruction model under different sampling rates

图 5 不同采样率下 SPL 二次重构模型图像重建效果

表 2 不同采样率下重建图像的 PSNR 和 SSIM

Table 2 PSNR and SSIM of reconstructed images at different sampling rates

image	PSNR at different sampling rate/dB			SSIM at different sampling rate		
	10%	20%	30%	10%	20%	30%
“重”	19.46	21.60	23.66	0.61	0.83	0.86
“CQUPT”	16.90	20.44	23.19	0.56	0.80	0.82
rabbit	18.56	21.48	22.70	0.58	0.81	0.83

30% 的范围内, 采用传统的 BP 算法、OMP 算法以及本文所提的 BCS-SPL 二次重构算法模型进行重建, 重构恢复效果如图 6 所示, 重构时间如表 3 所示。实验结果表明, 在压缩感知单像素成像实验系统中, 本文提出的方法具有可行性。利用传统的 BP 算法和 OMP 算法重构, 采样率至少需要 30% 才能分辨出图像, 且整体较模糊, 轮廓不清晰, 丢失了图像的部分细节, 恢复质量较差。利用本文提出的 BCS-SPL 二次重构算法对单像素成像系统探测得到的观测值进行重构, 能够有效消除噪声, 采样率仅需 20% 便能恢复出原始目标图像, 且复原图像的整体效果好, 轮廓感强, 重构质量较高。图像恢复所需的时间随着采样率的增大而增大, BP 算法重构图像的速度远远慢于其他两种算法。在采样率为 20% 的条件下, BP 算法所需重构时间约为 574 s, 是 OMP 算法的 319 倍, 二次重构算法的 155 倍, 不利于对实时图像进行重构。OMP 算法的成像速度最快, 采样率为 20% 时, 重建时间约为 2 s, 但其成像质量不如二次重构算法。实验结果表明, 在单像素成像系统中, 选用本文提出的二次重构算法模型对目标场景进行复原, 具有较强的噪声抑制性能, 可以在短时间内获得高质量的重构图像, 具有实际的应用价值。

5 结 论

针对实际单像素压缩感知成像系统在复杂诊断环境中存在的重建噪声较大的问题, 本文提出并实现了基于 BCS-SPL 二次重构算法的单像素成像系统。根据 BCS-SPL 算法观测矩阵分布特性以及 DMD 硬件输入要求实现了实际投影观测矩阵的变换, 利用所建立的 BCS-SPL 二次重构算法实现了单像素诊断的仿真分析与实验测试。仿真结果表明, 在采样率 20% 条件下, 重建图像峰值信噪比大于 20 dB, 结构相似性高于 0.8。进一步搭建单像素成

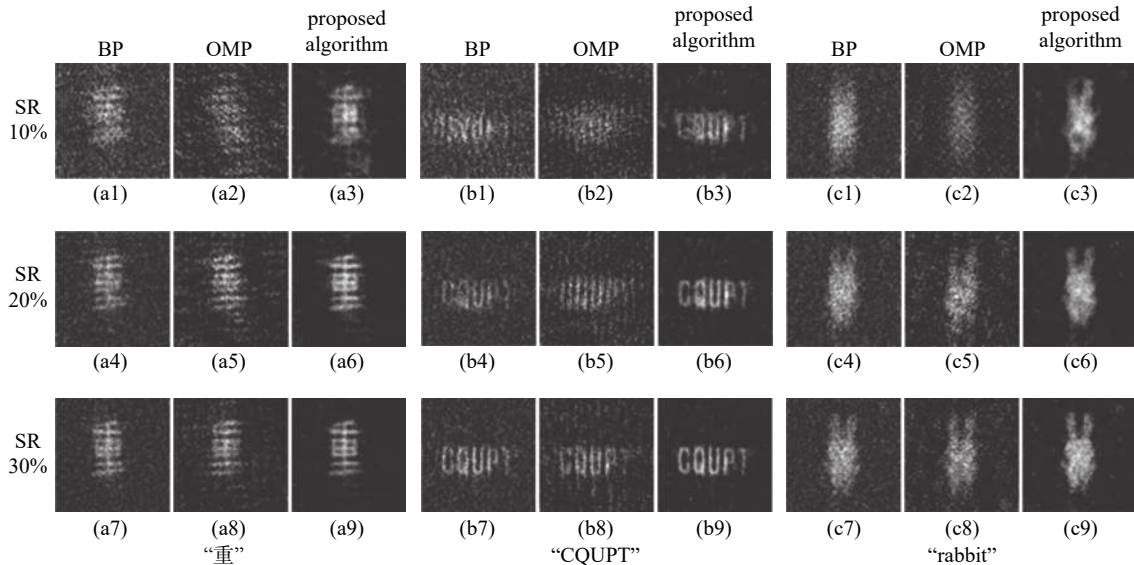


Fig. 6 Effect of image reconstruction under different algorithms and sampling rates

图 6 不同算法和采样率下图像重构的效果

表 3 不同算法和采样率下图像重构所需时间

Table 3 Time required for image reconstruction under different algorithms and sampling rates

image	algorithm	time at different sampling rate/s		
		10%	20%	30%
“重”	BP	161.5	566.7	1026.1
	OMP	0.9	1.8	2.9
	proposed algorithm	2.6	3.6	4.7
“CQUPT”	BP	155.5	566.6	1026.1
	OMP	0.9	1.8	2.9
	proposed algorithm	2.5	3.6	4.8
rabbit	BP	155.8	589.1	1204.3
	OMP	0.9	1.9	2.8
	proposed algorithm	2.6	3.8	4.7

像平台完成实验研究及验证,实验结果表明,选用BP算法和OMP算法对观测信号进行重构,采样率至少需要30%才能粗略地恢复出原始目标场景。二次重构算法仅需在采样率为20%的条件下就能完成精确重构,利用BCS-SPL二次重构算法模型对目标场景进行恢复的效果优于其余两种传统算法。二次重构单像素成像系统在采样率仅为20%的条件下能够重建出清晰的原始图像,具有较好的噪声抑制特性。利用本文提出的以BCS-SPL算法为主的二次重构算法模型对观测值进行重建,有利于提升成像系统的抗干扰能力,能够在短时间内获得较好的重建效果,可以广泛用于复杂诊断环境下的单像素成像诊断,具有理论意义和实际应用价值。

参考文献:

[1] 王峰,关赞洋,理玉龙,等.基于神光Ⅲ装置的光学诊断系统介绍[J].中国科学:物理学、力学、天文学,2018,48(6):48-58.(Wang Feng, Guan Zanyang, Li Yulong, et al. Optical diagnostic systems based on Shenguang III [J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, 48(6): 48-58)

[2] Donoho D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.

[3] Candes E J, Romberg J, Tao T. Robust uncertainty principles: exact signal reconstruction from highly incomplete frequency information[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(2): 489-509.

[4] Candes E J, Tao T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(12): 5406-5425.

[5] Guan Zanyang, Li Yulong, Wang Feng, et al. Study on the length of diagnostic time window of CUP-VISAR[J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32: 125208.

[6] 王峰,理玉龙,关赞洋,等.压缩感知技术在激光惯性约束聚变研究中的应用[J].强激光与粒子束,2022,34:031021.(Wang Feng, Li Yulong, Guan

- Zanyang, et al. Application of compressed sensing technology in laser inertial confinement fusion[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 031021)
- [7] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling[J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- [8] 李明飞, 阎璐, 杨然, 等. 基于Hadamard矩阵优化排序的快速单像素成像[J]. *物理学报*, 2019, 68: 064202. (Li Mingfei, Yan Lu, Yang Ran, et al. Fast single-pixel imaging based on optimized reordering Hadamard basis[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68: 064202)
- [9] 马彦鹏, 王亚南, 王义坤, 等. 基于压缩感知的单点探测计算成像技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33: 1211007. (Ma Yanpeng, Wang Yanan, Wang Yikun, et al. Study of single-pixel detection computational imaging technology based on compressive sensing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33: 1211007)
- [10] 陈涛, 李正炜, 王建立, 等. 应用压缩传感理论的单像素相机成像系统[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11): 2523-2530. (Chen Tao, Li Zhengwei, Wang Jianli, et al. Imaging system of single pixel camera based on compressed sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(11): 2523-2530)
- [11] Wu Shaohua, Zhang Tiantian, Wu Bo, et al. Single-pixel camera in the visible band with fiber signal collection[J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 17768-17775.
- [12] Wei Ziran, Zhang Jianlin, Xu Zhiyong, et al. Optimization methods of compressively sensed image reconstruction based on single-pixel imaging[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10: 3288.
- [13] Mun S, Fowler J E. Block compressed sensing of images using directional transforms[C]//2009 16th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). Cairo: IEEE, 2009: 3021-3024.
- [14] Candès E J. The restricted isometry property and its implications for compressed sensing[J]. *Comptes Rendus Mathématique*, 2008, 346(9/10): 589-592.
- [15] Chen S S, Donoho D L, Saunders M A. Atomic decomposition by basis pursuit[J]. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 1998, 20(1): 33-61.
- [16] Figueiredo M A T, Nowak R D, Wright S J. Gradient projection for sparse reconstruction: Application to compressed sensing and other inverse problems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2007, 1(4): 586-597.
- [17] Mallat S G, Zhang Zhifeng. Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 1993, 41(12): 3397-3415.
- [18] Tropp J A, Gilbert A C. Signal recovery from random measurements via orthogonal matching pursuit[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2007, 53(12): 4655-4666.
- [19] Needell D, Tropp J A. CoSaMP: iterative signal recovery from incomplete and inaccurate samples[J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(12): 93-100.
- [20] 苏杰, 翟爱平, 赵文静, 等. 自适应斜Z字形采样Hadamard单像素成像[J]. *光子学报*, 2021, 50: 0311003. (Su Jie, Zhai Aiping, Zhao Wenjing, et al. Hadamard single-pixel imaging using adaptive oblique zigzag sampling[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2021, 50: 0311003)
- [21] Gan Lu. Block compressed sensing of natural images[C]//2007 15th International Conference on Digital Signal Processing. Cardiff: IEEE, 2007: 403-406.
- [22] Van Trinh C, Dinh K Q, Jeon B. Edge-preserving block compressive sensing with projected Landweber[C]//2013 20th International Conference on Systems, Signals and Image Processing (IWSSIP). Bucharest: IEEE, 2013: 71-74.
- [23] 张赛文, 于斌, 陈丹妮, 等. 基于压缩感知的高密度分子定位算法比较[J]. *中国激光*, 2018, 45: 0307014. (Zhang Saiwen, Yu Bin, Chen Danni, et al. Comparison of algorithms of high-density molecule localization based on compressed sensing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45: 0307014)
- [24] 吴光文, 张爱军, 王昌明. 一种用于压缩感知理论的投影矩阵优化算法[J]. *电子与信息学报*, 2015, 37(7): 1682-1687. (Wu Guangwen, Zhang Aijun, Wang Changming, et al. Novel optimization method for projection matrix in compress sensing theory[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2015, 37(7): 1682-1687)
- [25] Li Shufeng, Cao Guangjing, Wei Shanshan. Improved measurement matrix and reconstruction algorithm for compressed sensing[C]//2018 8th International Conference on Electronics Information and Emergency Communication (ICEIEC). 2018: 136-139.
- [26] Wan Rentao, Zhou Jinjia, Huang Bowen, et al. APMC: adjacent pixels based measurement coding system for compressively sensed images[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2021, 24: 3558-3569.
- [27] Kuusela T A. Single-pixel camera[J]. *American Journal of Physics*, 2019, 87(10): 846-850.
- [28] 王之润, 赵文静, 翟爱平, 等. 不同正交变换深度Q网络单像素成像性能比较[J]. *光子学报*, 2022, 51: 0311003. (Wang Zhirun, Zhao Wenjing, Zhai Aiping, et al. Comparison on performance of deep Q network based single-pixel imaging using different orthogonal transformations[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2022, 51: 0311003)
- [29] Sun Mingjie, Xu Zihao, Wu Ling'an. Collective noise model for focal plane modulated single-pixel imaging[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 100: 18-22.