

doi:10.3788/gzxb20154412.1211003

基于压缩感知成像系统的动态背景去噪

庄佳衍¹, 何伟基², 陈钱¹, 冯维一¹

(1 南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

(2 江苏省智能感知与光谱成像重点实验室, 南京 210094)

摘要:为了消除背景光强动态变化引起的非线性误差,提出了基于压缩感知成像系统的动态背景去噪算法. 算法将测量中不同背景光强下所得测量值的平均值之差作为补偿系数,通过补偿系数消除动态背景噪声对压缩感知成像系统的非线性影响. 仿真结果表明,在总数为 900 次的采样过程中,背景噪声动态变化 300 次时,算法能够将重建图像的峰值信噪比由 29.5 dB 提高到 62 dB;在动态背景噪声的影响下,本文算法能够大大提高目标图像的可读性,提高成像质量,增加压缩感知成像系统的鲁棒性.

关键词: 成像; 压缩感知; 非线性; 背景噪声; 动态

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)12-1211003-7

Reducing the Error Caused by Dynamic Background in the Imaging System Based on Compressed Sensing

ZHUANG Jia-yan¹, HE Wei-ji², CHEN Qian¹, FENG Wei-yi¹

(1 Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2 Jiangsu Key Lab of Spectral Imaging & Intelligence Sense (SIIS), Nanjing 210094, China)

Abstract: A algorithm which uses the compensation factor to eliminate nonlinear errors was proposed to reduce the nonlinear errors caused by sudden change of background in the imaging system based on compressed sensing. The compensation factor was calculated from the mean value of measured data under different background. The simulation results show that the proposed algorithm improve the peak signal to noise ratio of reconstructed image from 29.5 dB to 62 dB when the background noise change as many as 300 times during 900 times sampling. The reconstructed image is more readable and the imaging system is more robust with the proposed algorithm.

Key words: Imaging; Compressed sensing; Nonlinear; Dynamic background

OCIS Codes: 110.1080; 110.3010; 070.4340

0 引言

压缩感知算法^[1-3]被提出以来,一直是科研工作者的研究热点,被广泛应用于成像系统^[4-6],例如,利用压缩感知成像系统用于透过混沌散射介质的成像^[9-10].此外,压缩感知算法在医学、生物学、遥感等领域的应用也不断在扩大^[8-11].

虽然压缩感知能够解决很多成像的难题,但是由于受自身算法特性的限制^[12],在成像中,系统鲁棒性不强,测量值易产生非线性误差^[13-15]等,这些缺点会造

成大量的还原误差,导致系统还原质量下降.文献[13]研究了探测器非线性响应对压缩感知成像系统造成的影响.动态背景噪声是影响压缩感知成像系统成像质量的重要因素之一.在压缩感知成像系统采样时,如果遇到静态的背景噪声,只需获取静态噪声的数值,在后期处理时减去即可.当背景噪声是动态的,则不可能随时获取噪声数值,此时用传统 l1-magic、正交匹配追踪算法等会导致图像重建质量大大下降,原始目标图像无法复原.因此,如何有效去除背景噪声,特别是动态的背景噪声意义重大.

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 61101196, 61271332, 61177091)和国防预研项目(No. 40405080401)资助

第一作者:庄佳衍(1988-),男,博士研究生,主要研究方向为光电传感成像及基于压缩感知算法的成像系统. Email: z_j_y1988@126.com

导师(通讯作者):陈钱(1964-),男,教授,博导,主要研究方向为光电传感成像. Email: chenqian@njust.edu.cn

收稿日期:2015-07-08; **录用日期:**2015-09-15

<http://www.photon.ac.cn>

为消除压缩感知成像系统动态背景噪声,从理论建模的角度入手,推导并提出了动态背景去噪算法(Algorithm for Improving Reconstructed Quality in Dynamic Background, IRQDB). 计算仿真和实验表明本文算法能够使成像系统在动态背景光的影响下获得较高的图像质量.

1 理论解释及算法介绍

1.1 基于压缩感知的成像系统

图1是压缩感知单像素成像系统示意图. 该系统是参照rice大学的单像素成像系统^[8], 是一个典型的压缩感知成像系统.

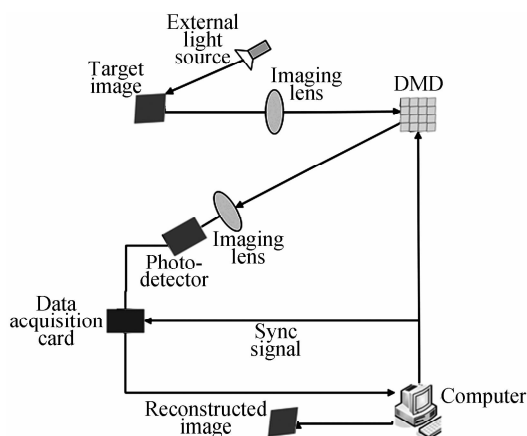


图1 基于混沌介质的单像素成像系统

Fig. 1 Imaging system based on compressed sensing

1.2 理论和算法

对于压缩感知成像系统,理想情况下,当光路经过空间光调制器调制以后,测量值的获取可以表示为^[13]

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

式(1)中, \mathbf{y} 是测量值, Φ 是调制测量矩阵, \mathbf{x} 是目标图像. 对于 M 次的采样测量,式(1)表示为

$$\begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & \Phi_{1,2} & \cdots & \Phi_{1,N} \\ \Phi_{2,1} & \Phi_{2,2} & \cdots & \Phi_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{M,1} & \Phi_{M,2} & \cdots & \Phi_{M,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, M 表示测量的次数, N 表示一维信号的长度,其中 $M \ll N$.

将背景噪声加入压缩感知成像系统后,式(1)变为

$$\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3)$$

则式(2)写成

$$\begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & \Phi_{1,2} & \cdots & \Phi_{1,N} \\ \Phi_{2,1} & \Phi_{2,2} & \cdots & \Phi_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{M,1} & \Phi_{M,2} & \cdots & \Phi_{M,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + n_1 \\ y_2 + n_2 \\ y_3 + n_3 \\ \vdots \\ y_M + n_M \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设背景光强在整个采样过程中没有发生改变,则 $n_1 = n_2 = \cdots = n_M$. 这时,只需要在测量之前多测一次,获取背景噪声 n ,在还原之前将其减去即可.

但是当 n 在测量中发生改变时,不可能及时获得所改变的背景噪声的数值,比如原始噪声值为 n ,当经过 L 次采样后,由于背景光强的变化, n 变为 n_1 ,则式(4)表示为

$$\begin{bmatrix} \Phi_{1,1} & \Phi_{1,2} & \cdots & \Phi_{1,N} \\ \Phi_{2,1} & \Phi_{2,2} & \cdots & \Phi_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Phi_{M,1} & \Phi_{M,2} & \cdots & \Phi_{M,N} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n \\ n \\ n \\ \vdots \\ n_1 \\ n_1 \\ \vdots \\ n_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + n \\ y_2 + n \\ y_3 + n \\ \vdots \\ y_L + n_1 \\ \vdots \\ y_{L+1} + n_1 \\ \vdots \\ y_M + n_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \\ \vdots \\ y'_L \\ y'_{L+1} \\ \vdots \\ y'_M \end{bmatrix} \quad (5)$$

类似式(5)所述的情况,在实际采样中,背景光强改变往往不止一次,因此无法及时获知动态噪声的数值,使得测量值受到影响,势必导致成像重建质量的下降.

本文提出的动态背景噪声去除算法流程为:

1) 将所得到的测量值根据背景噪声的不同分成几个部分,相同背景噪声下所测得的测量值归为一个部分(这个可以由测量值大小来区分,因为根据压缩感知算法的特点,相同背景光强下产生的测量值大小波动并不明显,只有在背景噪声发生明显改变时,测量值大小会发生较明显的可以被辨认的突变);

2) 求出所划分的每部分的测量平均值;

3) 将测量平均值最小的测量值区域作为基础区域即被减数,与其它测量值区域的平均值作减法运算,即可求得各个区域的补偿系数;

4) 将测量值减去相应的补偿系数;

5) 将 1)~4) 步处理后的测量值进行压缩感知还原.

以式(5)为例,当背景噪声变化一次时,其算法过程表示为

$$\begin{cases} a = \overline{\sum_{L}^M y'_i} \\ b = \overline{\sum_{1}^{L-1} y'_j} \\ C_{\text{补偿系数}} = a - b \\ \text{new } y_i = y_i - C_{\text{补偿系数}}, i = L, L+1, \dots, M \end{cases} \quad (6)$$

如式(6),处理后的测量值去除了动态背景噪声带来的影响,再将上述测量值进行重建,即可提高系统的重建效率. 当背景光强变化多次时,也可以依上述步骤类推,原理相同.

2 计算机仿真

利用计算机对成像系统进行仿真验证,采用的压缩感知还原算法是 l1-magic 中的 l1-eq^[16]. 目标 R 图像如图 2,图像分辨率为 64×48 .



图 2 仿真目标图像
Fig. 2 The target image

仿真中,将背景噪声系数加入成像系统中,发现当成像过程中存在静态背景噪声时,会对成像重建效果产生一定的影响,但影响不明显.

还原效率为

$$M\text{-rate} = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x(i) + x'(i))^2}{\sum_{i=1}^n (x(i) - x'(i))^2}} \quad (7)$$

式中 x 为原始图像灰度值, x' 为仿真后图像灰度值.

背景噪声数值分别为无背景噪声时平均测量值的 0%, 5%, 10%, 20%, 50% 的重建结果如图 3.

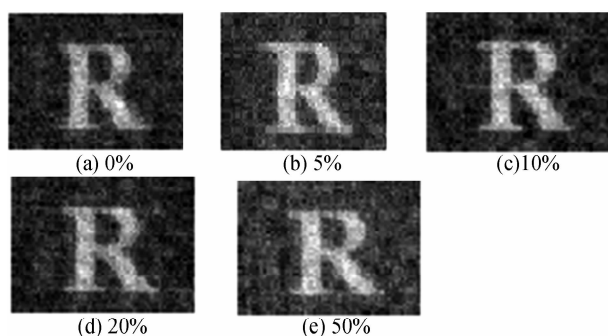


图 3 不同背景噪声下目标图像重建结果
Fig. 3 Reconstructed images with different background noise

表 1 不同噪声值影响下的 M_{rate} 值

Table 1 The M_{rate} with different background noise

Added noise value	0%	5%	10%	20%	50%
M_{rate}	0.7443	0.7431	0.7484	0.7401	0.7228

由表 1 可知,静态背景噪声对成像结果影响不大,即压缩感知成像系统对静态噪声有较强的鲁棒性.

当背景噪声为动态时,仿真结果如图 4,表 2 为其 M_{rate} 值,仿真分辨率为 64×48 ,采样数为 900. 本次仿真选择在测量进行到一半时背景噪声发生改变,改变量分别为无背景噪声时平均测量值的 0%, 5%, 10%, 20%, 50%.

从图 4 可知,当背景噪声动态变化时,对重建结果

表 2 不同程度的背景噪声强度变化后使用传统还原方法所得重建结果的 M_{rate} 值

Table 2 The M_{rate} under different dynamic background noise (without IRQDB)

Added noise value	0%	5%	10%	20%	50%
M_{rate}	0.7443	0.6109	0.4316	0.2870	0.1363

图 4 不同程度的背景噪声强度变化后使用传统还原方法所得重建结果

Fig. 4 Reconstructed images under dynamic background with traditional l1-eq algorithm

产生非常大的影响,单从重建的目标图像可以看出. 当附加的背景噪声为测量值的 10% 以上时,重建结果基本没有可读性. 噪声数值越大,影响的结果越明显. 因此解决动态背景噪声对压缩感知成像系统的影响是非常有必要的.

按照 ZRQDB 算法,对图 4 仿真中的动态背景噪声进行校正,其还原结果如图 5,重建结果的 M_{rate} 值见表 3.

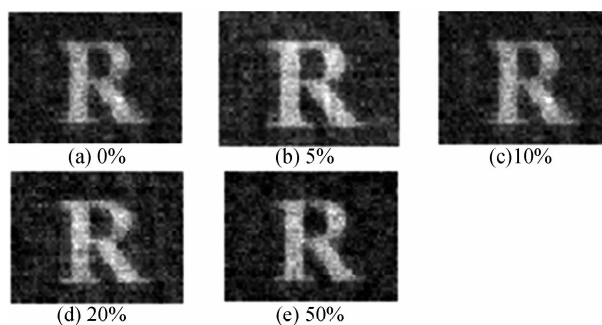


图 5 不同程度的背景噪声强度变化后使用 ZRQDB 算法所得重建结果

Fig. 5 Reconstructed images under dynamic background with the proposed IRQDB

表 3 不同程度的背景噪声强度变化后使用本文算法所得重建结果的 M_{rate} 值

Table 3 The M_{rate} under different dynamic background (with IRQDB)

Added noise value	0%	5%	10%	20%	50%
M_{rate}	0.7443	0.7431	0.7478	0.7401	0.7228

经过算法修复后的重建图像如图 5,可以看出重建图像的可读性大大增强,并且还原的效果不受噪声大小的影响。

对于算法中的补偿系数 $C_{补偿系数}$,其仿真结果如表 4。

表 4 仿真所加入噪声值与计算所得补偿噪声值对比表
Table 4 The comparison between real simulation noise and calculated compensation noise

Real noise value	10	20	40	100
Calculated noise value with IRQDB	8.8	19.8	40.7	99.7

由表 4 可知,算法的补偿系数与原始噪声值较接近,能够帮助成像系统有效消除背景噪声。

实际测量中背景噪声会发生多次变化,当背景噪声发生 5 次改变时,未用算法的还原图像和用了算法的还原图像对比如图 6。



图 6 5 次改变后的图像重建结果
Fig. 6 Reconstructed result of 5 changes

图 7 为测量值的数值分布图。可以看出当使用了本文的矫正算法后,测量值明显得到了矫正,显得更加的平整。而重建图像质量也得到了提高。

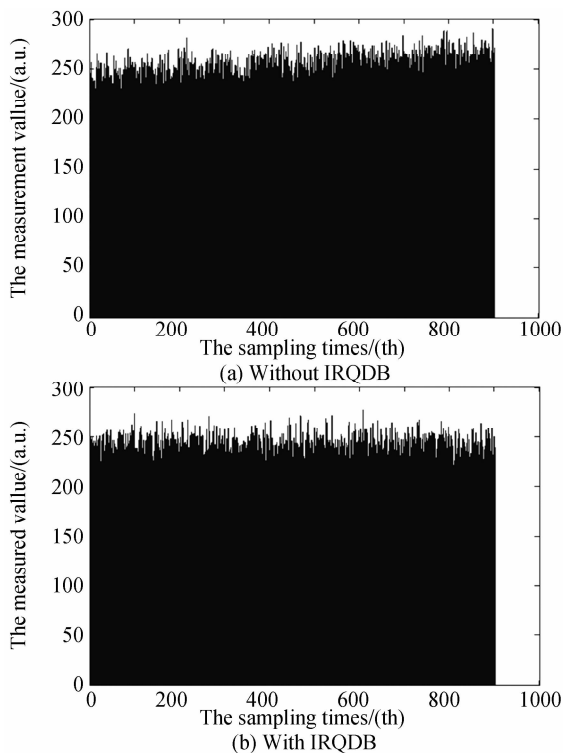


图 7 测量值分布
Fig. 7 The distribution for measured data

当背景噪声发生 30 次改变,未用算法的还原图像和用了算法的还原图像对比如图 8,测量值分布如图 9。

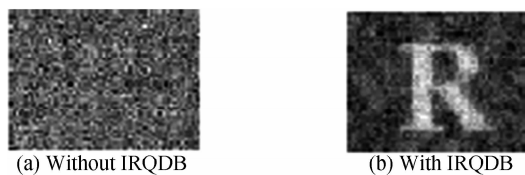


图 8 30 次改变后的图像重建结果
Fig. 8 Reconstructed result of 30 changes

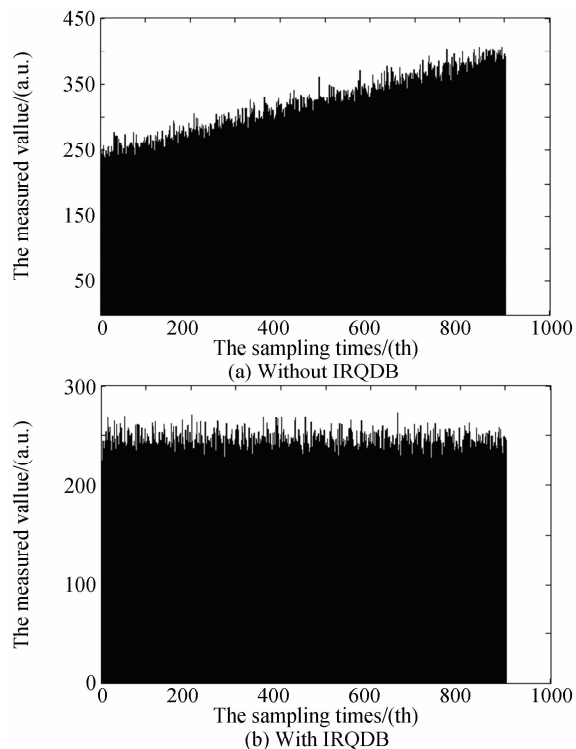


图 9 测量值分布
Fig. 9 The distribution for measured data

当背景噪声发生 100 次改变,未用算法的还原图像和用了算法的还原图像对比如图 10,测量值分布如图 11。

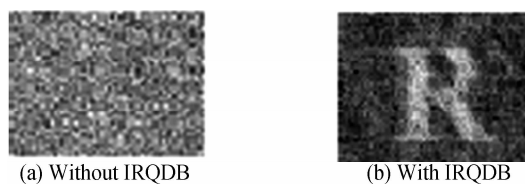
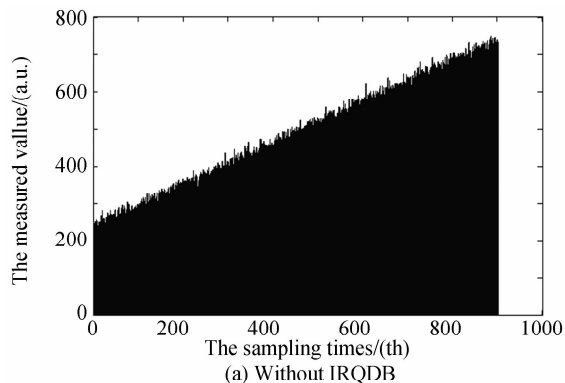


图 10 100 次改变后的图像重建结果
Fig. 10 Reconstructed result of 100 changes



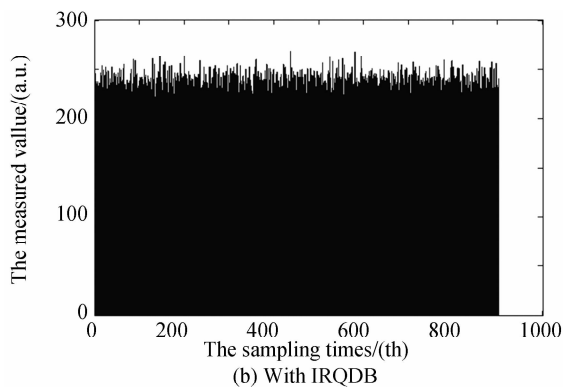


图 11 测量值分布图

Fig. 11 The distribution for measured data

当背景噪声发生 300 次改变,未用算法的还原图像和用了算法的还原图像对比如图 12,测量值分布如图 13.

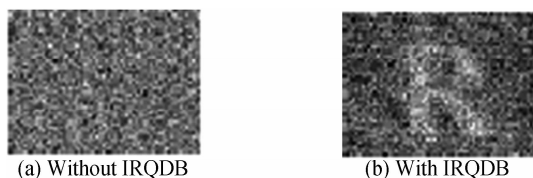


图 12 300 次改变后的图像重建结果

Fig. 12 Reconstructed result of 300 changes

未用算法的测量值和用了算法的测量值对比如图 13.

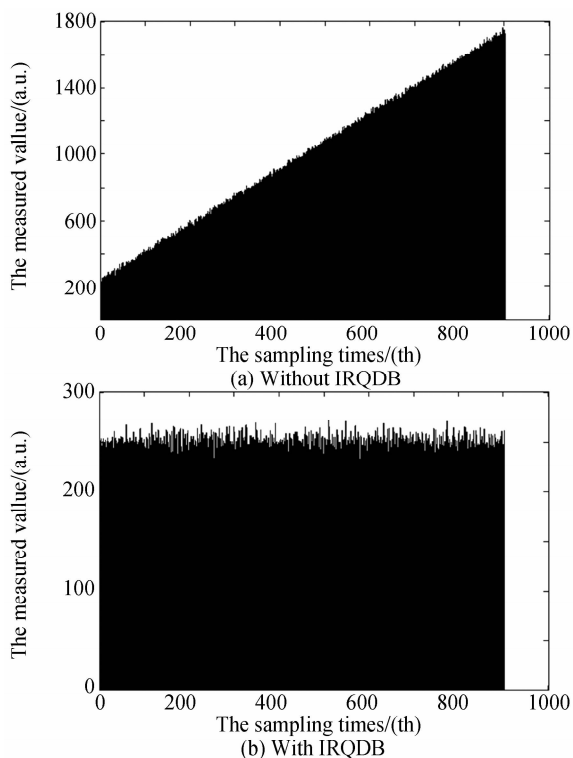


图 13 测量值分布

Fig. 13 The distribution for measured data

为了印证本文算法对随机噪声的鲁棒性,将 300 次叠加的噪声随机打乱,其重建结果和测量值分布情况如图 14.

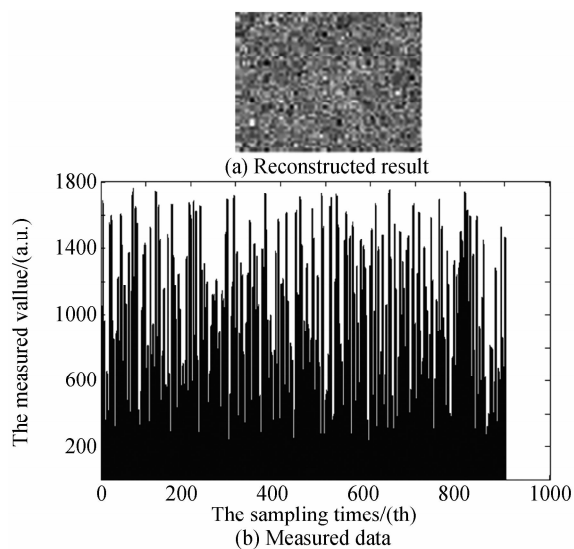


图 14 未使用本文算法后的重建图像和测量值分布

Fig. 14 The reconstructed result and the distribution for measured data without IRQDB

当使用了本文算法以后,其重建结果大大提升,可以明显的辨别出目标图像,而且测量值分布也更加的平缓. 仿真结果如图 15.

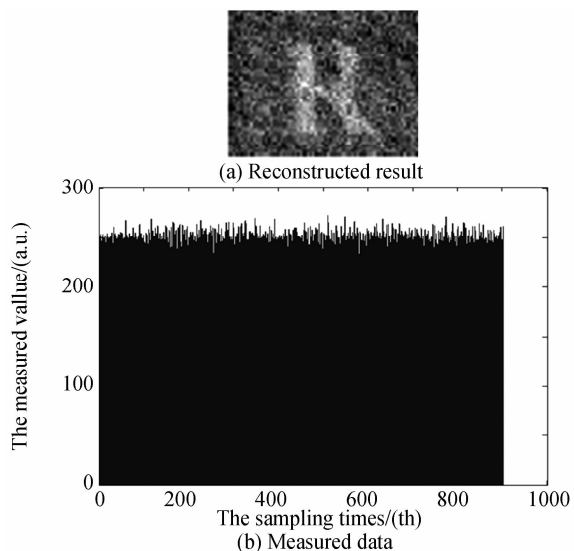


图 15 使用本文算法后的重建图像和测量值分布

Fig. 15 The reconstructed result and the distribution for measured data with IRQDB

由图 16 可以看出,在背景发生动态改变时,本算法能够有效的遏制由此产生的非线性重建误差,而且随着动态次数的增加本文算法依然具有很好的鲁棒性.当动态次数到 300 时,还原图像的 PSNR 依然高于 60,而此时不使用算法的 PSNR 却不到 30,说明本文

算法能够在背景噪声动态变化的环境中提高成像系统的成像效率。

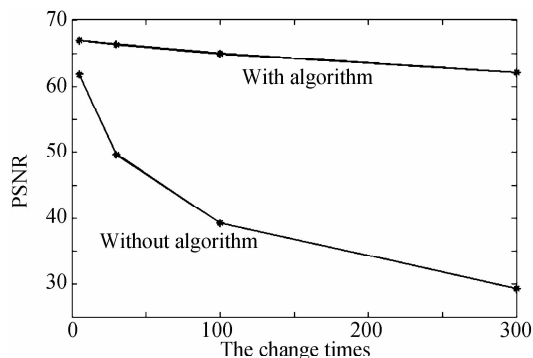


图 16 动态次数与 PSNR 的关系

Fig. 16 The relationship between dynamic times and PSNR of reconstructed images

3 实验

根据仿真结果和理论推理,搭建了实验平台进行验证.使用分辨率为 492×656 的 CCD 采集所看到的图像如图 17.



图 17 实验系统目标图像

Fig. 17 Target image for experiment

当实验采样处于暗环境时,使用成像系统(采样 30%,分辨率为 64×48)看到的图像如图 18.



图 18 使用单像素相机看到的图像

Fig. 18 Reconstructed image with single-pixel imaging system

当实验采样中,先是处于亮环境中,随后关闭灯光,不使用本文算法所看到的重建图像如图 19.

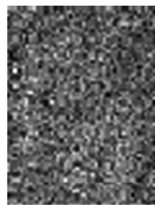


图 19 背景噪声动态变化后不使用本文算法还原图像

Fig. 19 The reconstructed image under dynamic background without IRQDB

使用本文算法后重建的结果如图 20.



图 20 背景噪声动态变化后使用本文算法还原图像

Fig. 20 The reconstructed image under dynamic background with IRQDB

其测量值的分布如图 21.

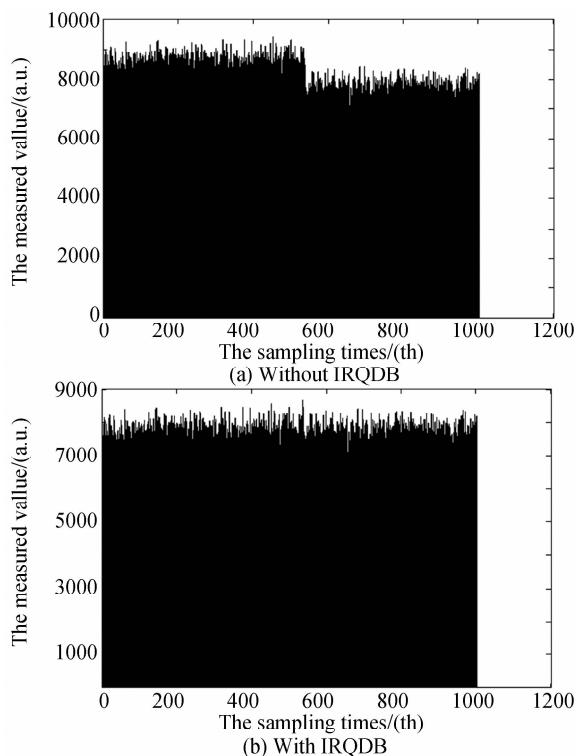


图 21 测量值的变化

Fig. 21 Distribution for measured data

由实验结果可以看出,采样中有过一次背景光强的改变(关灯)就会导致重建的目标图像质量下降.而使用本算法后可以大幅提高成像效率并且只需改变获得的测量值即可,原理上也简便可行.

4 结论

成像系统中动态背景噪声发生变化时,传统的压缩感知算法不能够很好地重建出目标图像.而本文的算法弥补了这个缺点,将原本受到动态背景影响产生非线性效应的测量值进行线性拉伸,从而减小了非线性误差,使得成像系统在动态背景噪声中能够重建目标图像.

参考文献

- [1] XU Jian, CHANG Zhi-guo. Self-adaptive image sparse representation algorithm based on clustering and its application [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2):316-320.

- 徐健,常志国. 基于聚类的自适应图像稀疏表示算法及其应用[J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 316-320.
- [2] HILLMAN R T, YAMAUCHI T, CHOI W, *et al.* Digital optical phase conjugation for delivering two-dimensional images through turbid media[J], 2013, *Scientific Reports*, **3**:1909.
- [3] CHUMNG K, WALLACE J, KIM S Y, *et al.* Structural and molecular interrogation of intact biological systems [J]. *Nature*, 2013, **497**:332-337.
- [4] LIU Hai-ying, LI Yun-song, WU Cheng-ke. A method for compressive sensing of images based on zone control of digital micromirror device and super-resolution[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0510002
 刘海英, 李云松, 吴成柯. 一种数字微镜阵列分区控制和超分辨重建的压缩感知成像法[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0510002.
- [5] CONKEY D B, CARAVACA-AGUIRRE A M. High-speed scattering medium characterization with application to focusing light through turbid media[J]. *Optical Express*, 2012, **20**: 1733-1740.
- [6] CANDES E J, WAKIN M B. An Introduction to compressive sampling[C]. *IEEE Signal Process Magazine*, 2008, **25**: 21-30.
- [7] LU Pei, LIU Xiao-yong, LU Xi, *et al.* Image information encryption by compressed sensing and optical theory[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(9): 0910002.
 卢佩, 刘效勇, 卢熙, 等. 基于压缩感知及光学理论的图像信息加密[J]. 光子学报, 2014, **43**(9): 0910002.
- [8] DUARTE M F. Single-pixel imaging via compressive sampling [C]. *IEEE Signal Process*, 2008, **25**(2): 83-91.
- [9] RODRIGUEZ A D. Resolution analysis in computational imaging with patterned illumination and bucket detection[J]. *Optical Letters*, 2014, **39**(13): 3888-3891.
- [10] ENRIQUE T. Image transmission through dynamic scattering media by single-pixel photodetection[J]. *Optical Express*, 2014, **22**(14): 16945-16955.
- [11] YING Jin-pin, LIU Feng, ALFANO, *et al.* Effect of scattering on nonlinear optical scanning microscopy imaging of highly scattering media[J]. *Applied Optical*, 2000, **39**(4): 509-514.
- [12] ZIMNVAKOV, DMITRY A, ISAEV A, *et al.* Analysis of the scatter growth in dispersive media with the use of dynamic light scattering[J]. *Applied Optical*, 2012, **51**(10): C62-C69.
- [13] ZHUANG Jia-yan, CHEN Qian, HE Wei-ji, *et al.* Novel algorithm to compensate nonlinear response of photo detector to improve quality of image reconstruction for compressed sensing[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(4): 0432041.
- [14] CANDES E, ROMBERG J, TAO T. Stable signal recovery from incomplete and inaccurate measurements [J]. *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 2006, **59**(8): 1207-1223.
- [15] CANDES E, 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.
- [16] Software: ll-magic, <http://www.dsp.ece.rice.edu/cs>.