

基于压缩感知的动态散射成像

庄佳衍 陈钱 何伟基 冒添逸

Imaging through dynamic scattering media with compressed sensing

Zhuang Jia-Yan Chen Qian He Wei-Ji Mao Tian-Yi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 040501 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.040501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.040501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一种基于相邻数据依赖性的混沌分析方法

[A chaotic analyzing method based on the dependence of neighbor sub-sequences in the data series](#)

物理学报.2016, 65(3): 030503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.030503>

一种基于模糊 C 均值聚类小数据量计算最大 Lyapunov 指数的新方法

[A novel method based on the fuzzy C-means clustering to calculate the maximal Lyapunov exponent from small data](#)

物理学报.2016, 65(2): 020502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.020502>

基于忆阻器的数模混合随机数发生器

[A digital-analog hybrid random number generator based on memristor](#)

物理学报.2015, 64(24): 240503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.240503>

空间关联白噪声影响下小世界神经元网络系统的同步动力学

[Synchronous dynamics of small-world neuronal network system with spatially correlated white noise](#)

物理学报.2015, 64(22): 220503 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.220503>

六边形格子态斑图的数值模拟

[Numerical simulations of hexagonal grid state patterns](#)

物理学报.2015, 64(21): 210505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.210505>

基于压缩感知的动态散射成像*

庄佳衍¹⁾ 陈钱^{1)†} 何伟基²⁾ 冒添逸¹⁾

1)(南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

2)(江苏省光谱成像与智能感知重点实验室, 南京 210094)

(2015年9月15日收到; 2015年11月25日收到修改稿)

利用基于压缩感知的成像系统可以透过静态的散射介质获得高质量的重建图像. 但是当散射介质动态变化时, 因为采样所得的测量值受到散射介质衰减系数非线性变化的影响, 重建图像质量会大大下降. 针对上述情况, 本文提出基于压缩感知成像系统的测量值线性拉伸算法, 该算法能够对所得到的非线性测量值进行分析, 根据测量值大小的不同将测量值划分成数个区域并计算补偿系数, 从而根据补偿系数进行测量值线性拉伸变换, 使测量值线性化. 最后再对变换后的测量值进行压缩感知重建计算. 通过理论分析、计算机仿真和实验证明了所提算法能够有效地应对动态的散射介质, 提高基于压缩感知成像系统在透过动态散射介质时的图像重建质量.

关键词: 成像, 压缩感知, 散射, 动态

PACS: 05.45.-a, 07.05.Pj, 24.10.Ht, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.65.040501

1 引言

透过散射介质去噪成像^[1-5]一直以来都是研究的热点, 如李广明和吕善翔^[6]利用噪声方差估计, 以及依据动态的稀疏度将观测值往确定的过完备字典上投影的方法, 进行基于压缩感知的混沌去噪成像. 近期, 提出了利用压缩感知成像系统^[7-11]透过散射介质成像且经证明是可行的. 文献^[12-14]得出在散射介质静态或者宏观静态时, 其成像系统的重建图像分辨率只和其光学投影的数值孔径有关, 然而所得出的结论是基于散射介质静态或者宏观静态的条件. 实际中, 很多的散射介质并不能看成宏观上的静态, 而是在宏观上运动的. 比如, 大雾天气中, 宏观的雾气忽然遇到大风就会产生非常明显的变化. 因为动态的散射介质会使得光强的透过率在时间上非线性^[15,16], 从而影响采样系统得到非线性的测量值^[17], 大大降低成像

质量, 甚至可能完全还原不出所需要的图像^[18,19]. 要利用压缩感知算法透过散射介质成像, 就需要解决散射介质的动态干扰.

本文针对于散射介质的动态变化情况, 提出了测量值线性拉伸算法 (algorithm of linear transformation for measured data, LTMD). 该算法能够利用线性校正因子 ξ , 将得到的非线性测量值进行线性化处理, 使得所有的测量值尽可能地线性化从而提高成像系统的成像质量. 实验证明该方法能够有效地应对宏观动态的散射介质进行高质量成像, 且在采样过程中随着散射介质宏观动态次数的增加依然具有较好的重建能力.

2 实验所用成像系统

图1所示为压缩感知单像素成像系统, 该系统加入了散射介质进行计算机仿真和实验.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61101196, 61271332, 61177091)、国防预研项目 (批准号: 40405080401) 和教育部重点实验室创新基金 (批准号: JYB201509) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: chenqian@njust.edu.cn

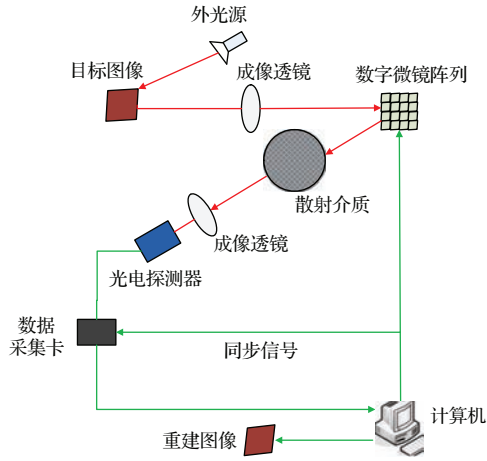


图1 压缩感知成像系统示意图

Fig. 1. The single-pixel imaging system.

3 理论建模及算法介绍

3.1 理论建模

以下理论分析是对基于压缩感知成像系统在受到散射介质影响情况下所进行的建模。

对于单像素相机的成像过程中,当光路经过空间光调制器调制以后,测量值的获取可以简单地用(1)式表示^[17]:

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

(1)式中, \mathbf{y} 是测量值, Φ 是调制测量矩阵. 对于 M 次的采样测量, (1)式也能够进行如下表示:

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

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

而成像光路经过散射介质后, 受到散射介质的影响, 测量值会发生变化. 当散射介质不发生变化或者处于宏观静态时, 暂时可以认为每一次的衰减系数 ξ 是固定的^[14], 所以可以得到(3)式:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \xrightarrow{\text{通过混沌散射介质之后}} \begin{bmatrix} y'_1 \\ y'_2 \\ y'_3 \\ \vdots \\ y'_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \xi y_1 \\ \xi y_2 \\ \xi y_3 \\ \vdots \\ \xi y_M \end{bmatrix} = \xi \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix}. \quad (3)$$

除去系数 ξ , 在理论上经过压缩感知算法还原可以得到没有误差的原始信号。

但是当散射介质的宏观动态非常明显时散射模型中的参数 ξ 会发生较明显的变化, 这使得动态变化后得到的测量值也会产生数值上明显的差异, 这个差异甚至是一个数量级以上的. 所以根据测量值随着散射介质变化而变化的这个特点, 可以找出产生明显变化后的数值, 并对其做线性拉伸。

假设在第 $L-1$ 次测量后, 散射介质的衰减系数 ξ 发生了较明显的变化, 记为 ξ_1 , 这使得经过 M 次测量后得到下式:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \xrightarrow{\substack{\text{通过动态混沌} \\ \text{散射介质之后}}} \begin{bmatrix} \xi y_1 \\ \xi y_2 \\ \vdots \\ \xi y_{L-1} \\ \xi_1 y_L \\ \vdots \\ \xi_1 y_M \end{bmatrix}, \quad (4)$$

从而可以得到

$$\begin{bmatrix} \xi y_1 \\ \xi y_2 \\ \vdots \\ \xi y_{L-1} \\ \xi_1 y_L \\ \vdots \\ \xi_1 y_M \end{bmatrix} = \xi \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{L-1} \\ (\xi_1/\xi)y_L \\ (\xi_1/\xi)y_{L+1} \\ \vdots \\ (\xi_1/\xi)y_M \end{bmatrix}. \quad (5)$$

假设介质在第 L 和第 L' 发生了两次动态的变化, 也可以得到

$$\begin{bmatrix} \xi y_1 \\ \xi y_2 \\ \vdots \\ \xi y_{L-1} \\ \xi_1 y_L \\ \xi_1 y_{L+1} \\ \vdots \\ \xi_1 y_{L'-1} \\ \xi_2 y_{L'} \\ \vdots \\ \xi_2 y_M \end{bmatrix} = \xi \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{L-1} \\ (\xi_1/\xi)y_L \\ (\xi_1/\xi)y_{L+1} \\ \vdots \\ (\xi_1/\xi)y_{L'-1} \\ (\xi_2/\xi)y_{L'} \\ (\xi_2/\xi)y_{L'+1} \\ \vdots \\ (\xi_2/\xi)y_M \end{bmatrix}. \quad (6)$$

由 (5) 和 (6) 式可以看出, 在动态散射介质下, 测量值产生了不可逆的非线性变化, 而这种变化会大大影响成像系统的还原效率^[17].

3.2 算法介绍

在通过静态的或者是均匀的散射介质时, 根据压缩感知的特性, 其测量值会稳定在一个范围内. 而当散射介质发生宏观改变时, 就会影响系数 ξ 产生大的变化, 从而使得测量值发生了较为明显的改变.

从 (5) 式可以看出, 为了消除这种测量值非线性的误差, 需要对发生变化的测量值乘以系数 ξ/ξ_1 , 这样就得到如下结果:

$$\begin{bmatrix} \xi y_1 \\ \xi y_2 \\ \vdots \\ \xi y_{L-1} \\ \xi_1 y_L \\ \vdots \\ \xi_1 y_M \end{bmatrix} \rightarrow \xi \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{L-1} \\ \frac{\xi}{\xi_1} \cdot \frac{\xi_1}{\xi} y_L \\ \frac{\xi}{\xi_1} \cdot \frac{\xi_1}{\xi} y_{L+1} \\ \vdots \\ \frac{\xi}{\xi_1} \cdot \frac{\xi_1}{\xi} y_M \end{bmatrix} \rightarrow \xi \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_{L-1} \\ y_L \\ \vdots \\ y_M \end{bmatrix} \quad (7)$$

(7) 式就是在经过测量值的线性变化后所得到的结果, 可以看出测量值已经线性化, 再使用变化后的测量值进行还原, 就能得到较好的图像质量.

当然在实际中并不知道 ξ , 也不知道 ξ_1 , 因此不能求得精准的矫正因子 ξ/ξ_1 , 不能做精确的线性变换.

但是, 由压缩感知的特性来看, 可以考虑 $\frac{\overline{\sum_1^{L-1} y_j}}{\overline{\sum_L^M y_i}}$ 近似于 1, 即 $\frac{\overline{\sum_1^{L-1} y_j}}{\overline{\sum_L^M y_i}} \approx 1$. (8)

因此, 当把动态变化之前的测量值平均值和动态变化之后的测量值平均值相除, 可以得到如下变化:

$$\frac{\overline{\sum_1^{L-1} \xi y_j}}{\overline{\sum_L^M \xi_1 y_i}} = \frac{\xi}{\xi_1} \frac{\overline{\sum_1^{L-1} y_j}}{\overline{\sum_L^M y_i}} \approx \frac{\xi}{\xi_1}. \quad (9)$$

其中 M 表示测量值采样数, 分子部分表示动态变化之前所获取的测量值平均值, 分母表示动态变化之后所获取的测量值平均值. 由 (9) 式可以看出, 只要将动态变化之前的测量值的平均值作为基础与动态变化后的测量值平均值做除法运算, 即可得到近似的补偿因子.

所以在得到受到动态变化的混沌介质影响的测量值后, 只要判断出其动态变化的突变点, 即可计算出补偿因子, 从而消除混沌介质所带来的非线性影响, 提高系统成像效率. 根据压缩感知算法的特性, 采样的测量值虽然每一次都不同, 但都是在一定范围内动态变化, 其总体分布也是趋于平稳的. 而当采样过程中散射介质的衰减系数发生了改变, 势必会导致采样测量值的大小发生突变, 由采集到的数值就能明显地区分出来, 如此就能找出测量值的突变点从而进行补偿因子的计算.

将 (9) 式的计算结果作为矫正因子参与矫正, 之前由于动态混沌介质受到非线性影响的测量值经过重新矫正可以得到如下新的结果:

$$newy_i = \frac{\overline{\sum_1^{L-1} \xi y_j}}{\overline{\sum_L^M \xi_1 y_i}} \xi_1 y_i, \quad i = L, L+1, \dots, M. \quad (10)$$

经过上述方程转变后的测量值再使用还原算法还原, 最后就能得到较好的消除动态散射介质带来的非线性误差, 大幅提高成像的效率.

当然, 散射介质在整个采样过程中往往会进行多次的宏观改变, 但计算方法与 (10) 式类似. 如 (6) 式所示, 在采样过程中发生了两次动态变化, 这时需要对测量值做如下变化:

$$newy_i = \frac{\overline{\sum_1^{L-1} \xi y_j}}{\overline{\sum_{L'-1}^L \xi_1 y_i}} \xi_1 y_i, \quad i = L, L+1, \dots, L'-1,$$

$$newy_i = \frac{\overline{\sum_1^{L-1} \xi y_j}}{\overline{\sum_{L'}^M \xi_2 y_i}} \xi_2 y_i, \quad i = L', L'+1, \dots, M. \quad (11)$$

从(11)式可以看出, 当动态变化次数达到2次时, 也只需将变化后的测量值的平均值与变化之前的测量值的平均值相除, 将相除后所得到的数值作为矫正因子分别进行矫正即可. 若在采样过程中发生了多次变化, 也可以依此类推进行线性拉伸.

4 计算机仿真

本文利用计算机对基于散射介质的单像素成像系统进行了仿真验证, 采用的压缩感知还原算法是l1-magic中的l1-eq^[20]. 仿真结果如下.

目标R图像如图2所示, 图像分辨率为64×48.



图2 仿真目标图像
Fig. 2. The target image R.

4.1 透过宏观动态散射介质干扰成像

为了模拟散射介质宏观动态的改变, 本文在仿真时改变衰减系数 ξ , 从而改变部分测量值的大小. 仿真采用30%的采样率.

图3所示为成像系统只经过静态散射介质时测量值大小的分布, 可以看出, 在散射介质衰减系数 ξ 不发生明显改变时, 测量值分布比较平稳.

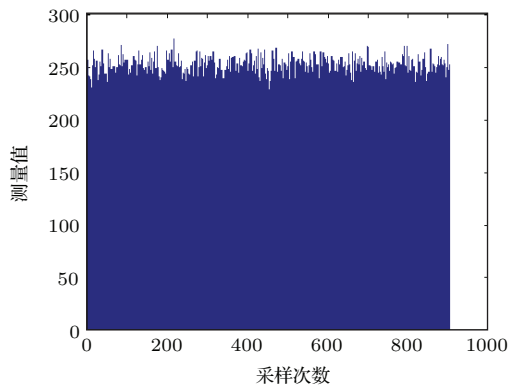


图3 透过静态散射介质后测量值分布
Fig. 3. Measured data with stationary scattering media.

此时用压缩感知算法l1-eq还原该测量数据, 可以得出重建图像, 如图4所示.

接下来的仿真设定测量值在第600次采样时混沌介质发生了明显变化, 其衰减率设定为原来的10倍, 从而测量值的大小在采样的过程中也发生

了一次明显的改变. 从图5可以看出, 当采样到第600次后, 散射介质的透过率发生了变化, 导致测量值的大小发生了改变. 而此时再用压缩感知算法l1-eq还原所得的测量值数据, 只能得到如图6所示的重建结果.

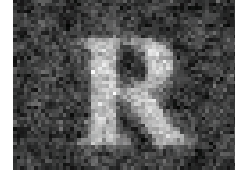


图4 透过静态散射介质使用l1-eq算法重建的图像
Fig. 4. Reconstructed image through stationary scattering media.

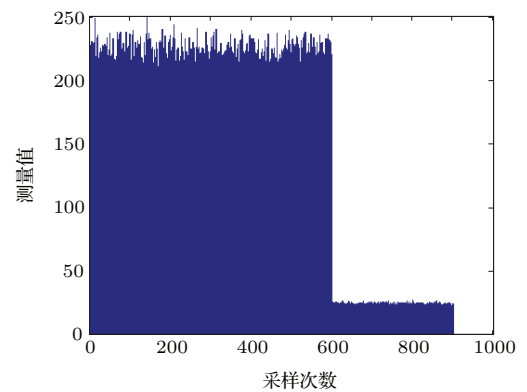


图5 散射介质动态变化后所得到的测量值分布
Fig. 5. Measured data with dynamic scattering media.

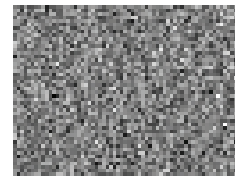


图6 使用l1-eq透过动态散射介质重建结果
Fig. 6. Reconstructed image through dynamic scattering media.

但是如果将上述动态散射介质中所得的测量值用LTMD算法进行拉伸, 再使用l1-eq算法还原, 则可以得到如图7所示的重建图像. 而其测量值也变得和透过静态散射介质时一样平滑, 如图8所示.

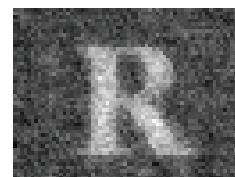


图7 使用LTMD算法后, 再使用还原算法重建的图像
Fig. 7. Reconstructed image through dynamic scattering media with LTMD.

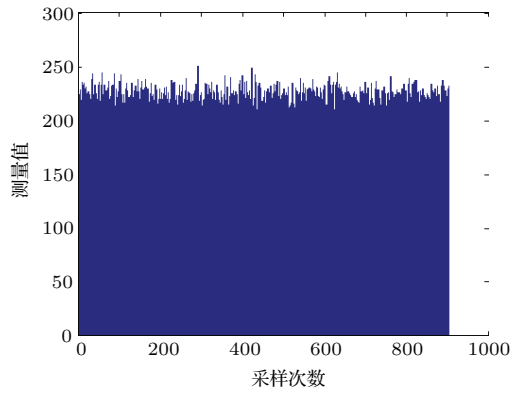


图8 使用LTMD算法后测量值分布图

Fig. 8. Measured data with LTMD after passing through dynamic scattering media.

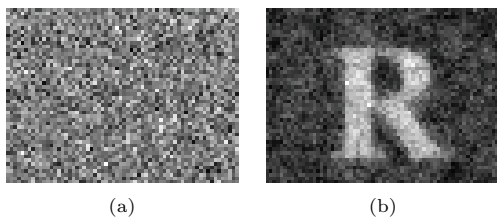


图9 散射介质发生2次宏观动态变化 (a)不使用本文算法所得到的还原结果; (b)使用本文算法所得到的结果

Fig. 9. Scattering media changes twice: (a) The reconstructed image without LTMD; (b) the reconstructed image with LTMD.

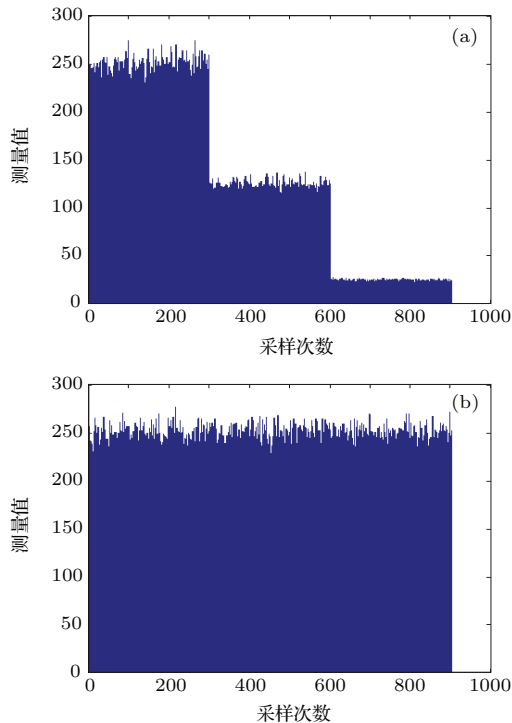


图10 2次宏观动态变化后测量值的变化 (a)不使用本文算法所得到的测量值; (b)使用本文算法所得到的测量值

Fig. 10. The changes of measured data when scattering media changes twice: (a) The measured data without LTMD; (b) the measured data with LTMD.

上述仿真中, 在散射介质经过了1次动态变化之后, 如果不使用LTMD算法, 则只能得到充满噪声的图6, 而当使用了LTMD算法以后, 重建结果如图7所示, 很明显图像的可读性大大增加, 并且图像的峰值信噪比(PSNR)由图6的42.0476提高到了图7的66.7711, 而测量值分布也从图5的有突变演变为图8. 由图8可以看出, 经过LTMD算法处理后的测量值分布更加平稳, 更加接近于不受非线性影响的测量值状态. 上述结果说明LTMD算法能够很好地处理散射介质动态变化的情况. 为了更好地说明算法在处理动态散射介质方面的作用, 仿真将增大采样中散射介质变化的次数.

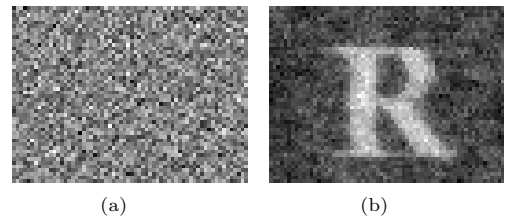


图11 散射介质发生5次宏观动态变化 (a)不使用本文算法所得到的还原结果; (b)使用本文算法所得到的结果

Fig. 11. Scattering media changes five times: (a) The reconstructed image without LTMD; (b) the reconstructed image with LTMD.

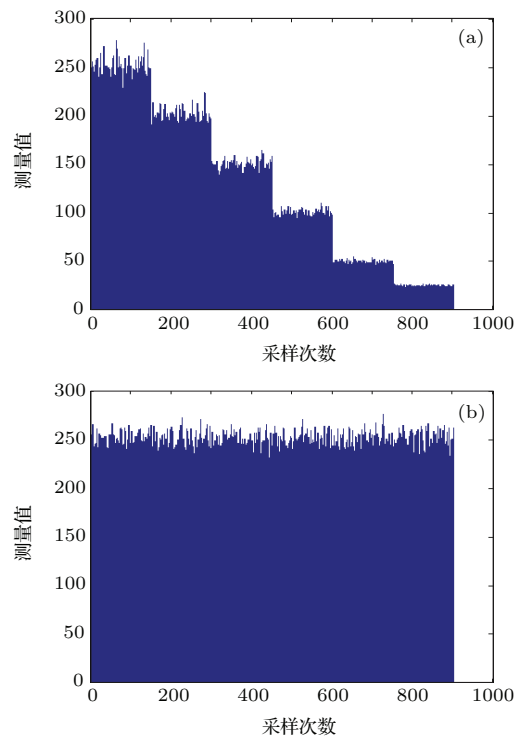


图12 5次宏观动态变化后测量值的变化 (a)不使用本文算法所得到的测量值; (b)使用本文算法所得到的测量值

Fig. 12. The changes of measured data when scattering media changes five times: (a) The measured data without LTMD; (b) the measured data with LTMD.

当散射介质在采样中发生2次宏观变化时, 所得结果如图9和图10所示; 当散射介质发生5次变化时, 所得结果如图11和图12所示; 当散射介质发生30次变化时, 所得结果如图13和图14所示; 当散射介质发生100次变化时, 所得结果如图15和图16所示.

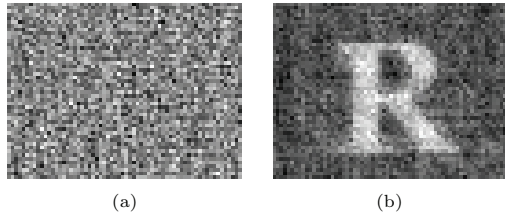


图13 散射介质发生30次宏观动态变化 (a) 不使用本文算法所得到的还原结果; (b) 使用本文算法所得到的结果
Fig. 13. Scattering media changes thirty times: (a) The reconstructed image without LTMD; (b) the reconstructed image with LTMD.

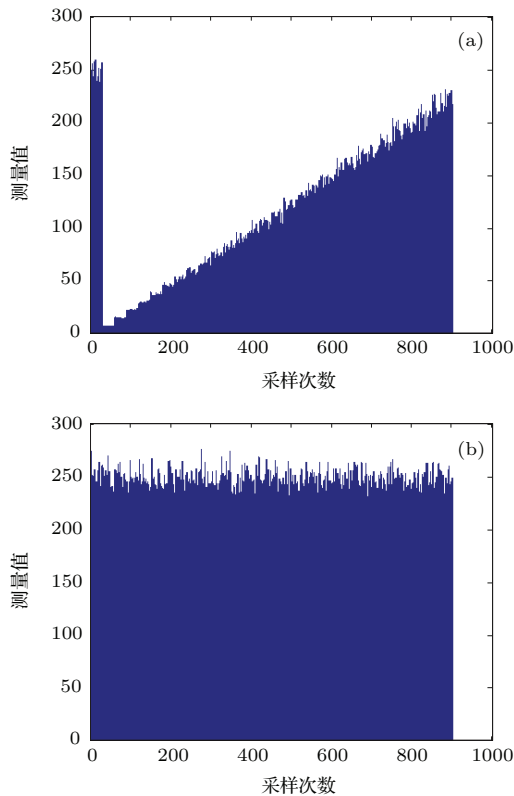


图14 30次宏观动态变化后测量值的变化 (a) 不使用本文算法所得到的测量值; (b) 使用本文算法所得到的测量值
Fig. 14. The changes of measured data when scattering media changes thirty times: (a) The measured data without LTMD; (b) the measured data with LTMD.

当散射介质分别发生2次、5次、30次和100次变化时, 使用LTMD算法后重建图像在可读性上有了明显的提升, 且PSNR也分别由43.1134, 41.0236, 42.7645和45.7382上升为67.0492, 66.9344, 66.4067和64.9883. 而测量值的

分布在经过LTMD算法拉伸以后变得平缓, 更接近于不受非线性影响的情况.

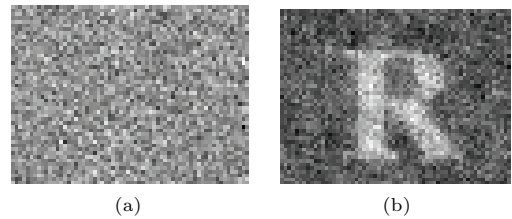


图15 散射介质发生100次宏观动态变化 (a) 不使用本文算法所得到的还原结果; (b) 使用本文算法所得到的结果
Fig. 15. Scattering media changes one hundred times: (a) The reconstructed image without LTMD; (b) the reconstructed image with LTMD.

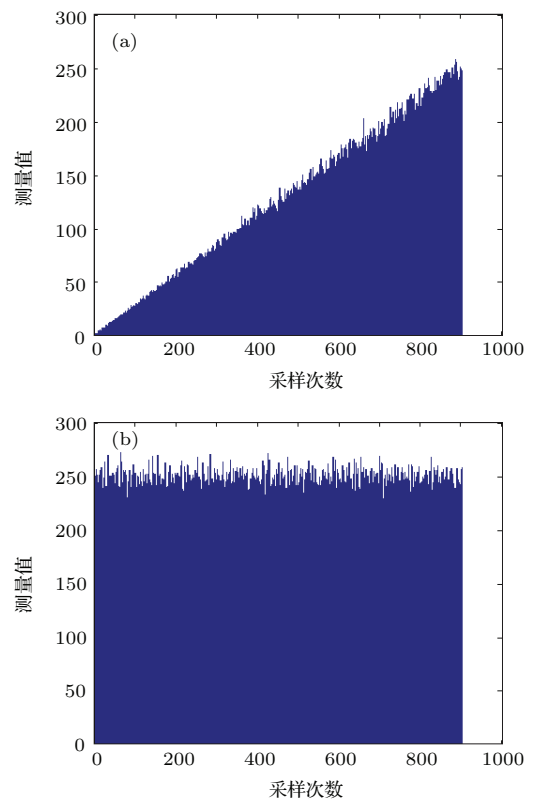


图16 100次宏观动态变化后测量值的变化 (a) 不使用本文算法所得到的测量值; (b) 使用本文算法所得到的测量值
Fig. 16. The changes of measured data when scattering media changes one hundred times: (a) The measured data without LTMD; (b) the measured data with LTMD.

上述仿真结果足以说明本文算法能够帮助压缩感知成像系统透过动态混沌散射介质成像, 而随着动态变化次数的增加, 其重建效率也会有所影响, 图17是使用本文算法后, 动态变化次数和重建图像PSNR的关系.

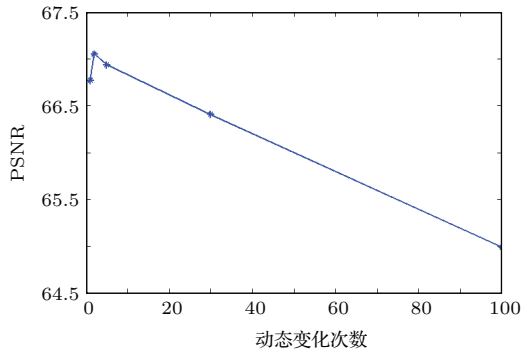


图 17 动态次数与 PSNR 的关系

Fig. 17. The relationship between changing times of scattering media and PSNR of reconstructed images.

从图 17 可以看出, 在散射介质发生动态改变时, LTMD 算法能够有效地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, LTMD 算法依然具有很好的鲁棒性. 从图 17 可以看出, 即使在一次测量中, 散射介质的动态变化次数达到了 100 次, 其重建图像的 PSNR 也能够到达近 65, 而散射介质不变时, 其重建图像的 PSNR 也不到 67, 所以从仿真结果来看 LTMD 算法在应对散射介质衰减系数动态变化的过程中能够起到很好的作用, 可大幅提高成像系统的成像效率.

5 实验

根据上文的仿真结果和理论推理, 本文搭建了实验平台进行验证. 本文的目标图像如图 18 所示, 使用分辨率为 492×656 的电荷耦合器 (CCD) 采集到的图像.



图 18 实验系统目标图像

Fig. 18. The target image taken by CCD

当有散射介质时, 使用 CCD 采集到的图像如图 19 所示.

本文通过改变塑料片的薄厚程度来模拟实际中动态的散射成像中衰减系数变化的情况. 实验

中共采样 1000 次, 采样分辨率为 64×48 , 实验开始时塑料散射片为两片, 中间时段抽去一片, 以此模拟散射介质动态变化过程. 前 518 次使用两片塑料片、后 482 次使用一张塑料片作为散射介质, 其测量值变化过程如图 20 所示.



图 19 使用高分辨率 CCD 透过散射介质采集的图像

Fig. 19. Image taken by a high resolution CCD.

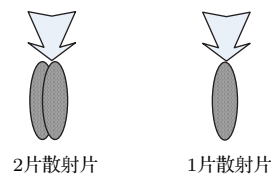
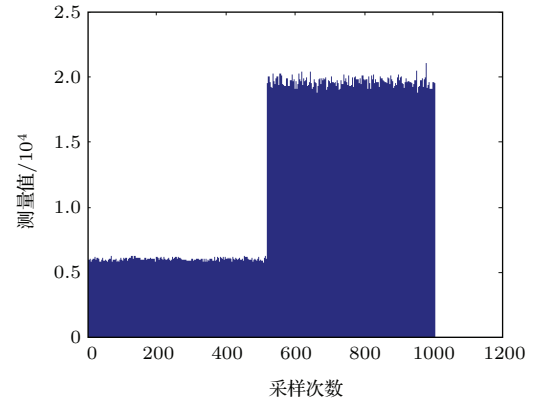


图 20 使用散射薄片模拟 1 次动态变化示意图

Fig. 20. The measured data without LTMD.

按照文献 [14] 中所述, 在基于压缩感知的成像系统中, 当散射介质静态或者宏观静态时, 只需要按照传统的还原算法还原即可. 文献 [14] 使用了 Rice 大学的 l1-magic 算法来应对成像系统中出现静态散射介质的情况. 为了更好地说明本文算法的优势, 采用了传统的正交匹配追踪 (OMP) 还原算法和 Rice 大学新型改良的 Tval3 还原算法来和本文中以 l1-magic 算法为基础经过改进后得到的 LTMD 算法进行比较.

图 21 从左至右是文献 [14] 的 l1-magic 算法、传统 OMP 算法、新型 Tval3 算法和本文 LTMD 算法

分别得到的重建结果。

上述实验中, 由于塑料散射片数量的改变, 成像系统采集的测量值发生了非线性的变化, 如果不使用 LTMD 算法对测量值进行线性拉伸, 只能得到如图 21 (a)—(c) 所示的还原结果。本文 LTMD 算法进行线性拉伸以后, 重建图像质量大幅提升, 具有较强的可读性。

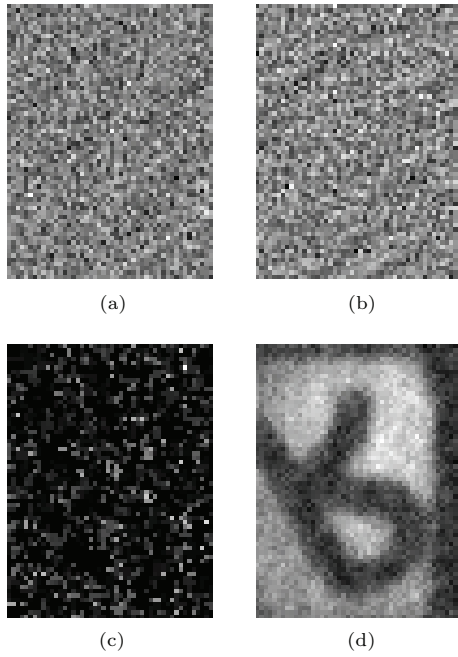


图 21 动态散射时利用单像素相机成像 (a) 文献 [14] l1-magic 算法的还原结果; (b) 传统 OMP 算法还原结果; (c) 新型 Tval3 算法还原结果; (d) LTMD 算法后的还原结果

Fig. 21. Imaging through dynamic scattering media with single-pixel system: (a) Experiment result with L1-magic; (b) experiment result with OMP; (c) experiment result with Tval3; (d) experiment result with LTMD.

使用 LTMD 算法线性拉伸了以后的测量值结果如图 22 所示。

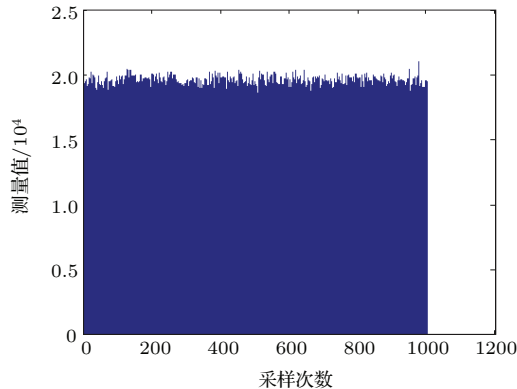


图 22 使用 LTMD 算法所得到的测量值分布

Fig. 22. The measured data with LTMD.

为了进一步证明 LTMD 算法的适用性, 本文在采样中控制散射介质发生 5 次变化, 变化情况如图 23 所示。使用不同还原算法的还原结果如图 24 所示; 使用 LTMD 算法线性拉伸后的测量值结果如图 25 所示。

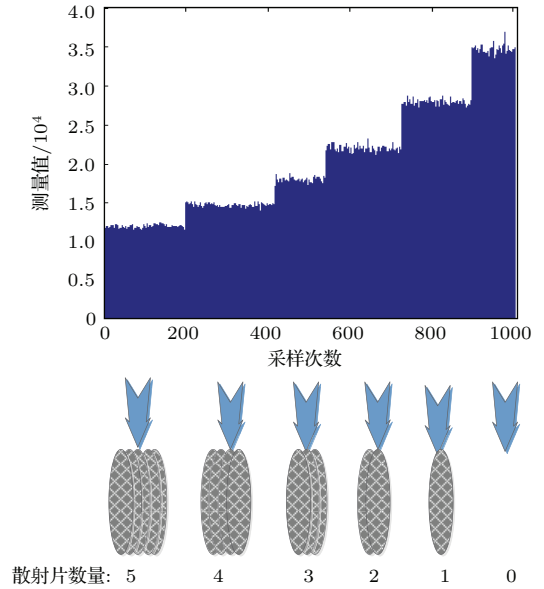


图 23 使用散射薄片模拟 5 次动态变化示意图

Fig. 23. The measured data without LTMD.

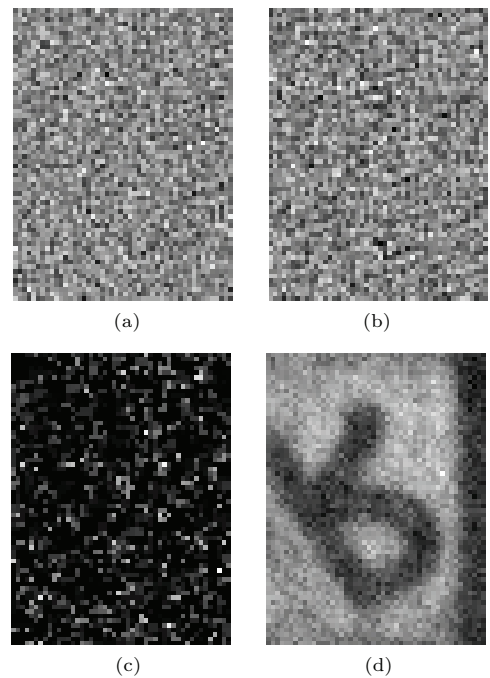


图 24 动态散射时利用单像素相机成像 (a) 使用传统 l1-magic 算法的还原结果; (b) 使用 OMP 算法的还原结果; (c) 使用 tval3 算法的还原结果; (d) 使用 LTMD 算法后的还原结果

Fig. 24. Imaging through dynamic scattering media with single-pixel system: (a) Experiment result with L1-magic; (b) experiment result with OMP; (c) experiment result with Tval3; (d) experiment result with LTMD.

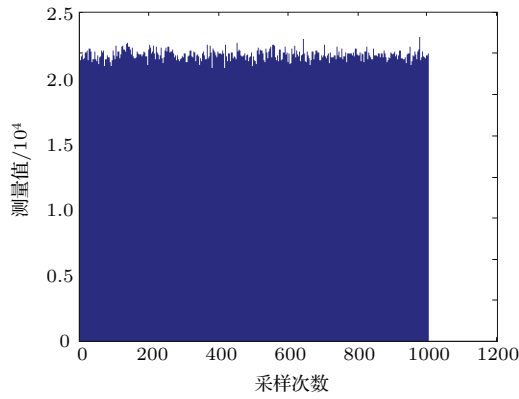


图 25 使用 LTMD 算法所得到的测量值分布

Fig. 25. The measured data with LTMD.

上述散射介质发生 5 次变化的实验中, 使用 LTMD 算法后, 重建图像的质量和可读性也发生了明显的提升. 图 26 所示为不同算法还原图像 PSNR 的对比.

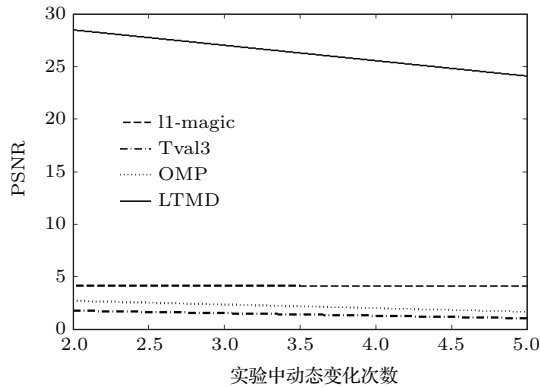


图 26 不同算法还原结果的 PSNR 比

Fig. 26. PSNR of the reconstructed images with different algorithms.

由图 26 可以看出, 在处理动态散射介质时, 本文的 LTMD 算法比同类传统还原算法都要好, LTMD 算法使得还原图像的 PSNR 有了明显的提升. 因此, 结合以上两组实验, 可以得出结论: 当散射介质发生动态的改变以后, 使用传统的压缩感知还原算法很难还原出高质量的重建图像, 而本文的 LTMD 算法能够在保持测量值原有特性的情况下有效拉伸测量值, 使得测量值恢复平滑分布, 大大提高了系统重建图像的质量.

6 结 论

基于压缩感知成像系统在处理宏观静态散射介质时能够透过散射介质进行成像. 但是当介质发生动态变化时, 由于每次采样的光强非线性衰减, 导致测量值的非线性误差, 从而影响单像素系统在

压缩感知还原时产生非常大的噪声干扰. 本文从理论角度出发提出应对的算法, 实验和仿真验证说明本文算法能够将原本非线性的测量值进行线性拉伸, 从而大大减小了测量的非线性误差, 使得压缩感知成像系统适应宏观动态的散射成像, 更好地将基于压缩感知的成像系统应用于医学、大气学等领域.

参考文献

- [1] Popoff S, Lerosey G, Fink M, Boccara A C, Gigan S 2010 *Nat. Commun.* **1** 81
- [2] Hillman R T, Yamauchi T, Choi W, Dasari R R, Feld M S 2013 *Sci. Rep.* **3** 1909
- [3] Chung K, Wallace J, Kim S, Kalyanasundaram S, Andalman A S, Davidson T J, Mirzabekov J J, Zalocusky K A, Mattis J, Denisin A K, Pak S, Bernstein H, Ramakrishnan C, Grosenick L, Gradinaru V, Deisseroth K 2013 *Nature* **497** 332
- [4] Gong W L, Bo Z W, Li E R 2013 *Appl. Opt.* **52** 15
- [5] Conkey D B, Caravaca-Aguirre A M 2012 *Opt. Express* **20** 1733
- [6] Li G M, Lü S X 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 160502 (in Chinese) [李广明, 吕善翔 2015 物理学报 **64** 160502]
- [7] Tsaig Y, Donoho D L 2004 *Technical Report* (Palo Alto: Department of Statistics, Stanford University)
- [8] Duarte M F, Davenport M A, Takhar D, Takhar D, Laska J N, Sun T, Kelly K F, Baraniuk R G 2008 *IEEE Signal Process. Mag.* **25** 83
- [9] Candes E J, Wakin M B 2008 *IEEE Signal Process. Mag.* **25** 21
- [10] Li L Z, Yao X R, Liu X F, Yu W K, Zhai G J 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 224201 (in Chinese) [李龙珍, 姚旭日, 刘雪峰, 俞文凯, 翟光杰 2014 物理学报 **63** 224201]
- [11] Wen F Q, Zhang G, Tao Y, Liu S, Feng J J 2015 *Acta Phys. Sin.* **64** 084301 (in Chinese) [文方青, 张弓, 陶宇, 刘苏, 冯俊杰 2015 物理学报 **64** 084301]
- [12] Rodríguez A D, Clemente P, Irlés E, Tajahuerce E, Lancis J 2014 *Opt. Lett.* **39** 3888
- [13] Dur'an V, Soldevila F, Irlés E, Tajahuerce E, Lancis J 2015 *Opt. Express* **23** 14424
- [14] Tajahuerce E, Dur'an V, Clemente P, Torres-Company V, Jes L 2014 *Opt. Express* **22** 16945
- [15] Ying J P, Liu F, Alfano R R 2000 *Appl. Opt.* **39** 509
- [16] Zimnyakov D A, Isaeva A A, Isaeva E A, Ushakova O V, Chekmasov S P, Yuvchenko S A 2012 *Appl. Opt.* **51** C62
- [17] Zhuang J Y, Chen Q, He W J, Feng W Y 2013 *Opt. Eng.* **52** 4
- [18] Candès E J, Romberg J K, Tao T 2006 *Commun. Pure Appl. Math.* **59** 1207
- [19] Candès E J, Romberg J K, Tao T 2006 *IEEE Trans. Infom. Theory* **52** 489
- [20] Software:l1-magic, <http://www.dsp.ece.rice.edu/cs> [2015-11-23]

Imaging through dynamic scattering media with compressed sensing*

Zhuang Jia-Yan¹⁾ Chen Qian^{1)†} He Wei-Ji²⁾ Mao Tian-Yi¹⁾

1) (School of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

2) (Jiangsu Key Laboratory of Spectral Imaging and Intelligence Sense, Nanjing 210094, China)

(Received 15 September 2015; revised manuscript received 25 November 2015)

Abstract

Imaging through scattering media has been a focus in research because of its meaningful applications in many fields. Recently, it has been proposed that high quality images can be recovered after passing through stationary scattering media by using the single-pixel imaging system based on compressed sensing. No doubt, it is a very interesting discovery about compressed sensing. However, it is also reported that high quality image can be recovered only with stationary scattering media. Mostly, the scattering media will not remain stationary, for example, the properties of the fog will be dynamically changed when there is wind. Thus, in a dynamic case, the transmittance of the scattering media will be nonlinear over the time, which will make the measured data nonlinear and the reconstructed image quality decrease. In this paper, a novel algorithm of linear transformation for measured data (LTMD) is proposed to make the nonlinear attenuation factor gain a linear transformation after passing through the dynamic scattering media. The factor ξ is proposed from the theoretical calculus based on compressed sensing, and this correction factor ξ can help to eliminate the nonlinear errors caused by dynamic scattering media and make the measured data linear. So the transformed data will greatly upgrade the reconstructed image quality. Simulation results show that high peak signal to noise ratio images can still be recovered even when the dynamic frequency reaches 300 times in the 900 times of sampling. In experiments, plastic films are used as scattering media, and the number of films can be changed during the sampling to simulate the dynamic state of scattering media. With LTMD, high quality image with a resolution of 64×48 is recovered after passing through dynamic plastic films while the recovered result without LTMD is still hard to be distinguished. The traditional reconstructed algorithms orthogonal matching pursuit, Tval3 and L1-magic are also used in the experiments, and the image is still hard to recover with any of the three traditional algorithms. In a word, the proposed LTMD algorithm uses the correction factor ξ to make the affected nonlinear-measured data linear, so as to increase the reconstructed quality of the imaging system based on the compressed sensing even when passing through scattering media with highly dynamic frequency.

Keywords: imaging, compressed sensing, scattering media, dynamic

PACS: 05.45.-a, 07.05.Pj, 24.10.Ht, 07.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.65.040501

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61101196, 61271332, 61177091), the Weaponry Pre-research Project, China (Grant No. 40405080401), and the Innovation Fund Project of Key Laboratory of Ministry of Education, China (Grant No. JYB201509).

† Corresponding author. E-mail: chenqian@njust.edu.cn