

Hadamard 编码调制关联成像的阈值处理研究

安晓峰^{1,2}, 李艳秋^{1,2}, 马海钰³, 桑爱军³

- (1. 吉林工程技术师范学院 信息工程学院, 吉林 长春 130052;
2. 吉林省量子信息技术工程实验室, 吉林 长春 130052;
3. 吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 关联成像是一种通过单像素探测器以成像时间换取空间分辨率的新颖成像方案, 然而, 其存在重建质量低、数据采集时间长的问题。Hadamard 编码调制计算关联成像能够实现高效率的成像, 显著提高了关联成像方案的适用性, 但是其独特的图像噪声集中现象是影响其实用化亟待解决的难题。通过分析 Hadamard 矩阵作为测量矩阵计算关联成像重建结果的噪声特点, 基于图像分割理论, 提出了一种利用阈值处理和形态学图像增强的 Hadamard 编码调制关联成像噪声压制方案, 并通过实验验证了该方案的可行性, 获得接近 8 dB 的光学图像增强。该方案对二值图像和灰度图像都有比较好的效果, 其工作促进了关联成像技术的实用化。

关键词: 关联成像; Hadamard 编码调制; 阈值处理; 图像噪声

中图分类号: O431.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.1041002

Research on thresholding method of Hadamard coded modulation correlation imaging

An Xiaofeng^{1,2}, Li Yanqiu^{1,2}, Ma Haiyu³, Sang Aijun³

- (1. School of Information Engineering, Jilin Engineering Normal University, Changchun 130052, China;
2. Jilin Engineering Laboratory for Quantum Information Technology, Changchun 130052, China;
3. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Correlation imaging is an innovative imaging scheme, which transforms the imaging time to a spatial resolution by a single pixel detector. However, there are problems of low reconstruction quality and long data acquisition time. Hadamard coded modulation computation correlation imaging can achieve efficient imaging and significantly improve the applicability, but the noise in imaging reconstruction, which restricted the practicability, is a challenge needs to be tackled urgently. A correlation imaging related noise suppression scheme was proposed by thresholding method and morphological image enhancement, by analyzing the noise characteristics of the reconstructed results of the correlation imaging, which the Hadamard matrix as a measurement matrix and the feasibility of this scheme was verified by experiments, and nearly 8 dB enhancement of optical image was achieved. This imaging scheme is efficient for two valued images and grayscale images, and its work promotes the practicability of correlation imaging technology.

Key words: correlation imaging; Hadamard coded modulation; thresholding method; image noise

收稿日期: 2018-05-16; 修订日期: 2018-06-18

基金项目: 吉林省省级产业创新专项资金(2018C040-4)

作者简介: 安晓峰(1970-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事数字图像处理领域等方面的研究。Email: an.xf@jleu.edu.cn

0 引言

关联成像又称量子成像、鬼成像,是一种利用空间光场强度涨落关联性实现图像重构的新技术。不同于传统光学成像采用“点对点”记录目标物体信息的成像方式,关联成像采用一个不具有空间分辨能力的单像素探测器(又称桶探测器)记录含有物体信息光场的总强度值,与照射物体的调制光场进行关联计算,重构目标物体的图像信息^[1-2]。

经典关联成像采用双光路方案,调制光场经分束器分束后,一条光束经物体被单像素探测器接收;另一条光束直接被面阵探测器接收,用于记录光场分布信息。随着关联成像技术的发展,计算关联成像于 2008 年由美国麻省理工学院的 Shapiro 提出^[3],主要是通过预置光场的分布信息,经调制器件调制后直接照射到物体,并被单像素探测器探测,可以只通过一条光路实现图像重构^[4]。目前计算关联成像研究热点集中在成像质量改善和成像效率上。

经典计算关联成像采用高斯随机分布矩阵进行光场调制,高斯矩阵的非正交性会引入散斑相关性噪声,降低重构图像的信噪比和成像效率。寻找更有效率的测量矩阵,减少测量时间、提高成像质量,是计算关联成像实用化研究的重要课题。2013 年,加利福尼亚大学的 Olivas 研究了不同变换基(Noiselet、Hadamard、DCT)调制照射光场对单像素相机成像质量的影响,指出 Hadamard 变换基是单像素成像满足成像效率和成像质量平衡的最佳调制光场方案^[5]。Hadamard 矩阵具有的任意两列不相关性质,能有效避免各个像素点间的相关性噪声,能够实现更好的重构效率。有研究表明采用 Hadamard 矩阵作为测量矩阵,目标图像像素 64 pixel×64 pixel,仅 4 000 次测量即可达到采用高斯随机分布矩阵作为测量矩阵 35 000 次的测量效果^[6]。

采用 Hadamard 变换基的计算关联成像存在重构图像整体灰度值低、具有明显的噪声点状集中现象(特别是左上角噪声集中更加明显)等限制因素^[7]。由于噪声图像亮度高,目标图像亮度相对较低,图像信息被淹没,无法观察到清晰图像。

文中主要研究基于 Hadamard 调制计算关联成像的噪声压制问题,分别选取二值图像和灰度图像

作为目标物体,分析了系统和背景噪声对成像质量的影响,有针对性的提出了一种基于灰度直方图阈值分隔目标区域的噪声压制方案。

1 Hadamard 关联成像理论分析

1.1 关联成像方案

计算关联成像原理如图 1 所示,投影仪 DLP 发射出经过 Hadamard 矩阵调制的照射光场 $I^{(m)}(x, y)$,经由目标物体反射通过收集透镜汇聚后被单像素探测器接收,形成光电信号,即桶探测强度信号 $I_o^{(m)}$ 。

$$I_o^{(m)} = \int I^{(m)}(x, y)O(x, y)dxdy \quad (1)$$

式中: (x, y) 代表二维空间位置坐标; m 表示第 m 次测量; $I^{(m)}(x, y)$ 表示第 m 次测量时单个散斑图空间强度分布值; $O(x, y)$ 表示物体反射率系数。

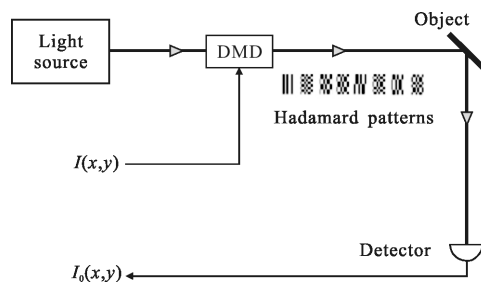


图 1 计算关联成像原理图

Fig.1 Schematic diagram of computational correlation imaging

通过 $I^{(m)}(x, y)$ 和 $I_o^{(m)}$ 的二阶关联运算,可以获得目标物体的成像。经典二阶强度关联成像公式为:

$$G^{(2)}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I^{(m)}(x, y)I_o^{(m)} - \frac{1}{N^2} \sum_{i=1}^N I^{(m)}(x, y) \sum_{i=1}^N I_o^{(m)} \quad (2)$$

式中: N 为总测量次数, $i=1, 2, 3, \dots, N$; $I_o^{(m)}$ 表示第 m 次测量得到的桶探测器强度; $I^{(m)}(x, y)$ 表示第 m 次测量时单个散斑图空间强度分布值; $G^{(2)}(x, y)$ 表示关联成像目标物体绝对透过率反射函数重建^[7]。基于强度涨落关联量子成像的问题是测量次数 N 必须满足远大于图像像素个数,重建图像的背景噪声才能得到滤除,重构图像才能获得较好的信噪比。而要满足测量次数的需要,会导致成像时间较长,难以满足快速成像的要求。

1.2 Hadamard 变换成像

量子关联成像是基于光场强度涨落的成像技

术, 要求相邻测试矩阵不相关。Hadamard 矩阵是由 +1 与 -1 组成的 n 阶方阵, 其行(列)不相关特性和任意两行(两列)正交特性使其成为很好的测量矩阵, 能够实现更好的重构效果。Hadamard 矩阵还具有产生速度快、具有与傅里叶变换类似的快速算法等优点, 是关联成像理想的测量矩阵。

Hadamard 矩阵可以按如下方式产生:

$$\begin{cases} H_2 = \begin{bmatrix} +1 & +1 \\ +1 & -1 \end{bmatrix} \\ H_{2^n} = \begin{bmatrix} +H_{2^{n-1}} & +H_{2^{n-1}} \\ +H_{2^{n-1}} & -H_{2^{n-1}} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (3)$$

式中: n 是大于 2 的正整数。

利用 Hadamard 矩阵作为测量基, 关联成像的桶探测信号的获得和图像重构过程可以看作 Hadamard 变换的过程^[7-9]:

$$I_o^{(p)} = \sum_{q=1}^Q H(p, q) O(q) \quad (4)$$

式中: $I_o^{(p)}$ 为桶探测强度信号; p 表示第 p 次测量; $H(p, q)$ 为 Hadamard 测量矩阵; $O(q)$ 为目标物体反射率函数矩阵。其逆变换即可得到物体透过率函数矩阵 $O'(q)$, 即

$$O'(q) = \frac{1}{P} \sum_{p=1}^P H(p, q) I_o^{(p)} \quad (5)$$

实验中利用 $H_{2^n}^*$ 进行测量矩阵构造, 来解决 ± 1 很难用光强来表征的问题^[10], 用 0 替换原来矩阵中的 -1, 测量矩阵改造如公式(6)所示:

$$H_{2^n}^* = \frac{1}{2} (H_{2^n} + 1) \quad (6)$$

除了图像的第一个像点灰度为零不能被重建外, 理论上其他空间位置均可以得到物体绝对透过率的完美恢复。

2 阈值处理图像增强方案

Hadamard 调制关联成像的成像噪声主要由环境噪声和系统噪声组成, 噪声分布呈现高斯分布特征, 其统计特性在多次采样后在频域上呈均匀分布。重构图像噪声表现为点状离散分布, 其空间分布特征与 Hadamard 矩阵的空间频域能量集中特性存在关联^[11]。

图 2 是按照计算关联成像方案获得的一个二值图像的 Hadamard 测量矩阵调制关联成像重构图像的灰度直方图。直方图存在两个明显的峰值, 灰度分

量集中于灰度级低端, 按照灰度由低到高的顺序, 明显分隔为三个区域: 背景区域、图像区域、点状噪声区域, 直方图高灰度像素出现频率与图像上离散分布的点状噪声有明显相关性。

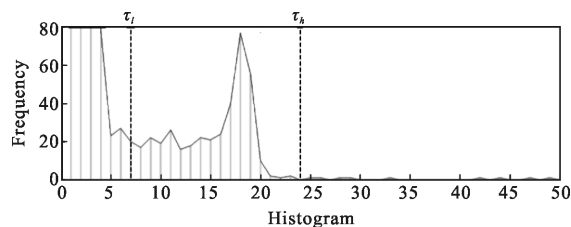
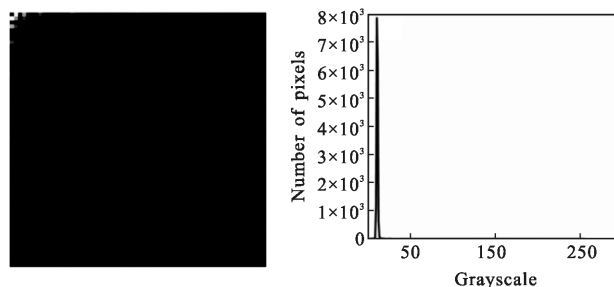


图 2 关联成像重构图像直方图分析

Fig.2 Histogram analysis of reconstruction on correlation imaging

为验证 Hadamard 调制计算关联成像重构图像的灰度统计分布特性, 采用黑纸(无图)作为对比实验组目标图像, 得到了没有物像的重构图像, 如图 3(a)所示, 其灰度直方图如图 3(b)所示。灰度直方图统计分析显示, 重构图像直方图在低灰度端存在一个峰值

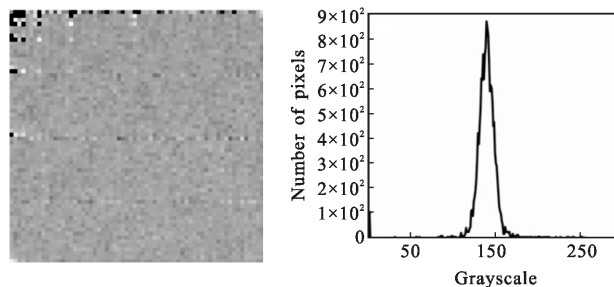


(a) 背景图像重建

(b) 背景图像重建的直方图

(a) Background image reconstruction

(b) Histogram of background image reconstruction



(c) 抑制高灰度点状噪声后图像

(d) 抑制高灰度点状噪声后图像直方图

(c) Image of high gray dot images noise suppression

(d) Histogram of high gray dot noise suppression

图 3 Hadamard 调制关联成像背景图像重建及其直方图

Fig.3 Background image reconstruction and its histogram of Hadamard modulated correlation imaging

区域;灰度中高端像素出现频度表现为离散分布,且分布规律与有物体关联成像重构图像直方图相似。

为获取高质量图像信息、增强图像可观察性、降

低点状噪声集中现象的影响,文中提出了基于阈值处理目标区域图像分割、采用形态学滤波对灰度阈值处理结果进行图像增强的去噪方案,流程如图 4 所示。

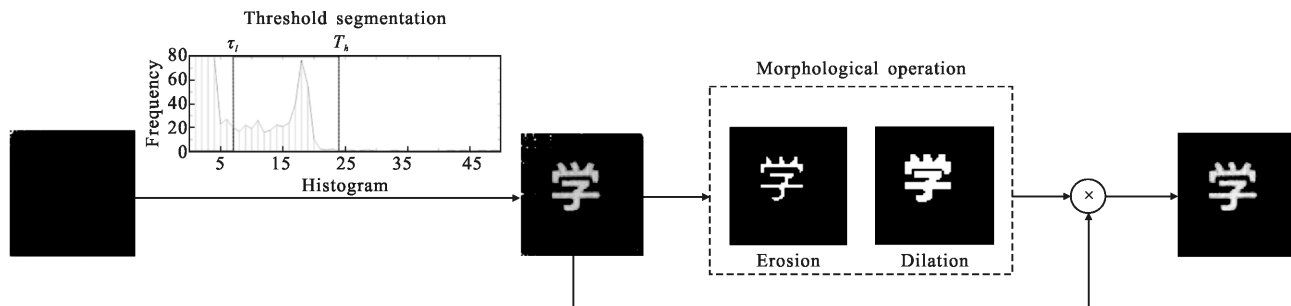


图 4 图像去噪流程图

Fig.4 Process flow chart of denoising module

目标区域图像分割过程如下。

分割的图像 $G(x,y)$ 由公式(7)给出^[12]:

$$G(x,y) = \begin{cases} 0, & \tau(x,y) \leq \tau_l \\ G(x,y), & \tau_l < \tau(x,y) \leq \tau_h \\ 0, & \tau(x,y) > \tau_h \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\tau(x,y)$ 为图像灰度值; τ_l 为低灰度背景与图像分割点(谷点); τ_h 为高灰度分割点。

分隔阈值是根据重构图像直方图特征进行估计的:

(1) 阈值 τ_l 的估计, 采用经典的基于图像数据自动选择的迭代算法得出(运行程序参见参考文献[12]);

(2) 阈值 τ_h 的估计, 选取重构图像灰度直方图第二峰值后出现的第一个灰度为 0 的值。

灰度值高于 τ_h 为点状噪声区域; 灰度值低于 τ_l 为背景区域; 灰度值属于 $[\tau_l, \tau_h]$ 为图像区域。

形态学滤波过程:

(1) 腐蚀, 对经过阈值处理的图像进行腐蚀操作, 以消除图像中的点状噪声;

(2) 膨胀, 对消除点状噪声的腐蚀后图像再进行膨胀操作, 得到图像的目标区域轮廓的二值图像;

(3) 增强, 用轮廓图像对经阈值处理后图像进行增强, 去除目标图像外围点状噪声^[13]。

3 实验与讨论

3.1 实验系统

文中采用计算关联成像方案实验系统如图 5 所示。实验中采用的光源是 3LCD 工作机制的日立投影机 HCP-3050X, 其亮度为 3 000 lm, 照射光束为

128 pixel×128 pixel 区域, 是将每个 64×64 的测量矩阵扩充为最小单元为 2 pixel×2 pixel 的投影图像投射到待测物体, 经物体反射后由单像素探测器(硅基跨阻放大光电探测器 Thorlabs PDA100A-EC)接收, 获得目标物体的光电探测信号——桶探测值。

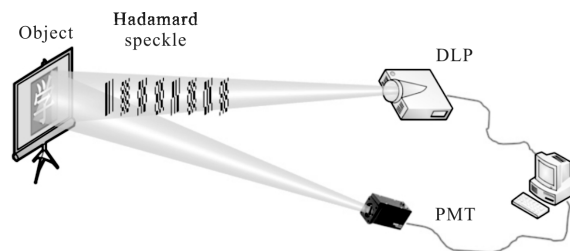


图 5 实验装置示意图

Fig.5 Schematic diagram of experimental setup

测量矩阵是通过 Matlab 软件的 Hadamard 生成函数构造。首先生成 4 096×4 096 的 Hadamard 矩阵; 然后用 4 096×4 096 矩阵的每一行构造 64×64 的方阵, 建立包含 4 096 幅互不相关矩阵的 Hadamard 矩阵集, 形成过程如图 6 所示^[14-15]。

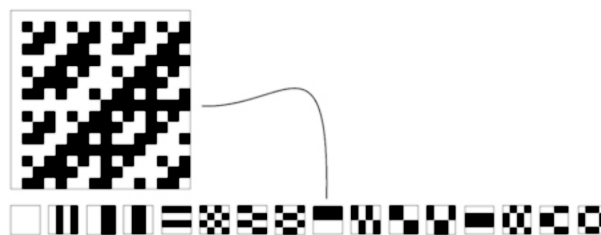


图 6 Hadamard (16×16)自然序 Hadamard 编码调制光场示意图

Fig.6 Schematic diagram of light field on Hadamard coded modulation of Hadamard (16×16) natural order

3.2 实验验证

根据上述理论分析,按照如图 5 所示实验系统,采用图 4 所示阈值处理和形态学图像增强 Hadamard 调制关联成像去噪方案进行实验,其结果如图 7 所示。可见,原重构图像整体较暗,灰度值被

压缩,存在明显的点状噪声集中现象,图像左上角和上边高亮度点状集中现象较为明显,如图 7(a)所示;图像的灰度直方图显示,灰度分量集中于低端,存在两个明显的峰值,高灰度像素出现频率低且离散分布,如图 7(b)所示。

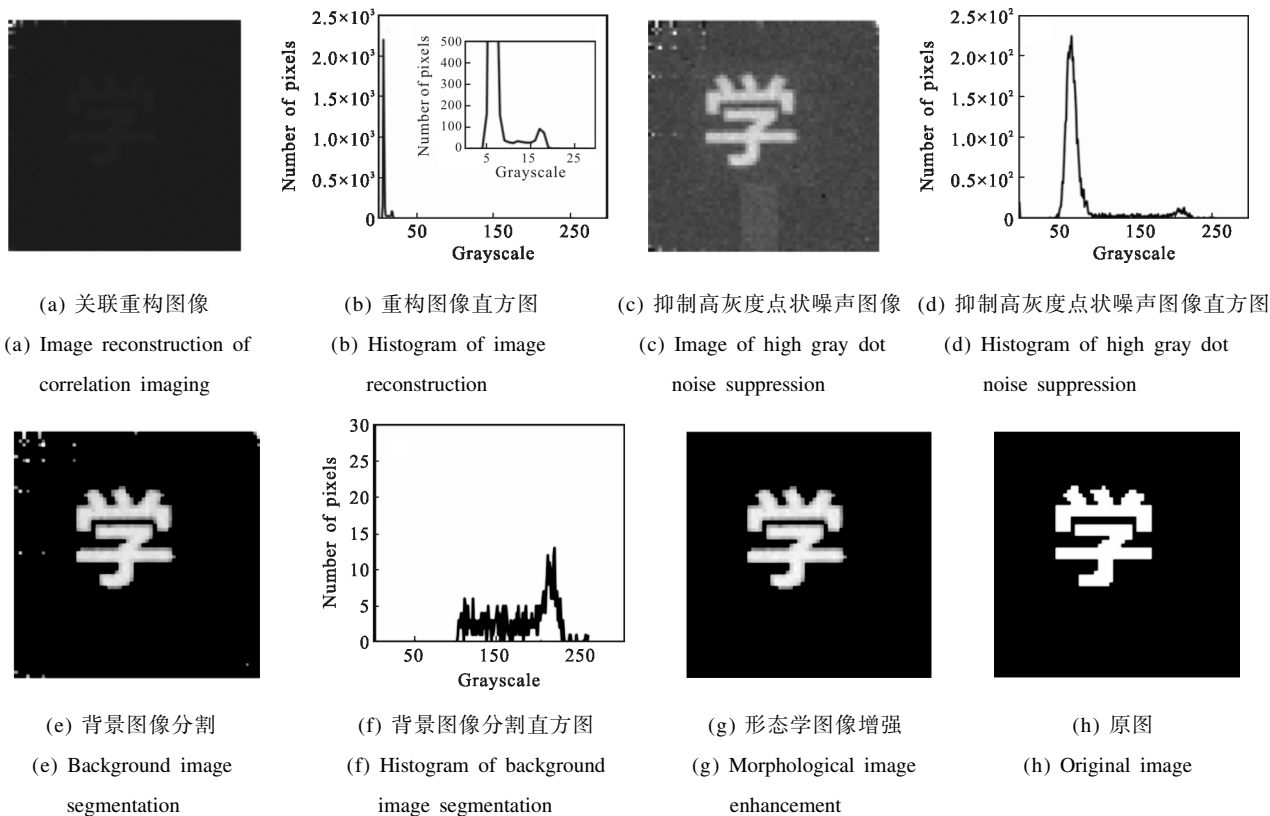


图 7 Hadamard 调制关联成像阈值处理二值图像实验结果

Fig.7 Binary image experiment of thresholding separation on Hadamard coded modulation correlation imaging

实验对象选取同样大小的二值图像“学”和灰度图像“飞机”进行实验,灰度图像实验结果如图 8 所

示。实验结果显示按照该方案处理后的图像对比度和可观察性明显提高。

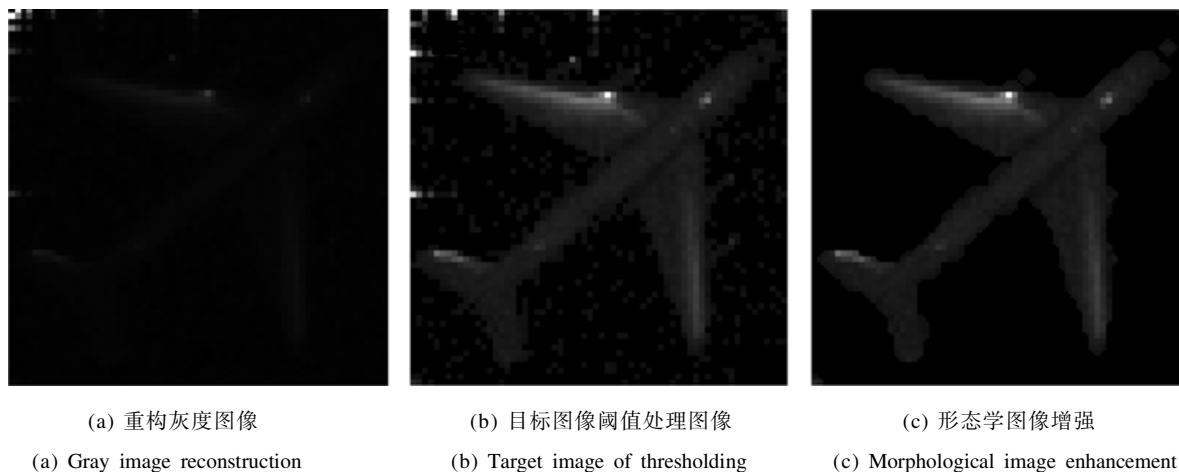


图 8 Hadamard 调制关联成像阈值处理灰度图像实验

Fig.8 Gray image experiment of thresholding method on Hadamard code modulation correlation imaging

4 结 论

基于灰度直方图统计阈值处理的图像增强方案是针对 Hadamard 编码调制关联成像的噪声特征采取的一种后处理方案,该方案特别适用于大背景环境下目标图像的增强。2016 年,Zhiping Chen 采用经典鬼成像方案通过形态学图像增强方案 5 000 次测量二值图像实验,峰值信噪比(PSNR)从 11.35 dB 提升到了 14.78 dB,获得了 3.43 dB 的提升^[13];该实验采用 Hadamard 编码调制关联成像方案 4 096 次测量二值图像实验,经阈值处理和形态学图像增强后,峰值信噪比从 11.19 dB 提升到了 19.10 dB,获得了 7.91 dB 的提升。

Hadamard 编码调制光场关联成像效果与经典调制方式的关联成像相比在消除图像相关噪声方面效果明显,其特有的点状噪声集中现象可以采用重建图像灰度直方图阈值处理结合形态学滤波图像增强方案消除。该方案是目前比较理想的关联成像点状图像噪声抑制方案,在关联成像技术的实用化方面具有一定的应用价值。

参 考 文 献:

- [1] Han Shensheng. Intensity correlation imaging technology for remote sensing [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2011, 32(5): 44–50. (in Chinese)
韩申生. 强度关联遥感成像技术 [J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(5): 44–50.
- [2] Han Shensheng, Gong Wenlin, Chen Mingliang, et al. Research progress of GISC lidar [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(9): 2547–2555. (in Chinese)
韩申生, 龚文林, 陈明亮, 等. 基于稀疏和冗余表象的鬼成像雷达研究进展[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2547–2555.
- [3] Shapiro J H. Computational ghost imaging [J]. *Phys Rev A*, 2008, 78: 061802.
- [4] Zhang Erfeng, Lin Huizu, Liu Weitao. Corrected imaging technology [J]. *National Defense Science & Technology*, 2014, 35(6): 14–18. (in Chinese)
张二峰, 林惠祖, 刘伟涛. 量子关联成像技术 [J]. 国防科技, 2014, 35(6): 14–18.
- [5] Olivas S J, Rachlin Y, Gu L, et al. Characterization of a compressive imaging system using laboratory and natural light scenes[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(19): 4515–4526.
- [6] Zhang Weiliang, Zhang Wenwen, He Ruiqing, et al. Iterative denoising ghost imaging based on local Hadamard modulation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0411001. (in Chinese)
张伟良, 张闻文, 何睿清, 等. 基于局部 Hadamard 调制的迭代去噪鬼成像[J]. 光学学报, 2016, 36(4): 0411001.
- [7] Li Mingfei, Mo Xiaofan, Zhao Lianjie, et al. Single-pixel remote imaging based on Walsh-Hadamard transform [J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 064201. (in Chinese)
李明飞, 莫小范, 赵连洁, 等. 基于 Walsh-Hadamard 变换的单像素遥感成像[J]. 物理学报, 2016, 65(6): 064201.
- [8] Huo Juan, Li Mingfei, Yang Ran, et al. High sensitive near infrared imaging system based on single element detectors[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S1): S104001. (in Chinese)
霍娟, 李明飞, 杨然, 等. 基于单像素探测器的高灵敏度近红外成像系统[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S1): S104001.
- [9] Zhang Yi, Wang Yong, Yue Jiang, et al. High sensitivity imaging based on DMD coding Hadamard transform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3819–3824. (in Chinese)
张毅, 王勇, 岳江, 等. DMD 编码哈达玛变换高灵敏成像 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3819–3824.
- [10] Zhang Zibang, Wang Xueying, Zheng Guoan, et al. Hadamard single-pixel imaging versus Fourier single-pixel imaging[J]. *Optics Express*, 2017, 25(16): 19619–19639.
- [11] Wang Le, Zhao Shengmei. Fast reconstructed and high-quality ghost imaging with fast Walsh-Hadamard transform [J]. *Photonics Research*, 2016, 4(6): 240–244.
- [12] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L. Digital Image Processing Using MATLAB [M]. Ruan Qiuqi, translated. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 387–388. (in Chinese)
冈萨雷斯, 伍兹, 艾丁斯. 数字图像处理的 MATLAB 实现[M]. 阮秋琦, 译. 第 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2013: 387–388.
- [13] Chen Zhipeng, Shi Jianhong, Zeng Guihua. Thermal light ghost imaging based on morphology [J]. *Optics Communications*, 2016, 381: 63–71.
- [14] Shibuya K, Nakae K, Mizutani Y, et al. Comparison of reconstructed images between ghost imaging and Hadamard transform imaging[J]. *Optical Review*, 2015, 22(6): 897–902.
- [15] Sun M J, Meng L T, Edgar M P, et al. A Russian Dolls ordering of the Hadamard basis for compressive single-pixel imaging[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3464.