

文章编号:1007-2780(2018)10-0893-08

基于哈达玛矩阵编码测量的自适应压缩成像

骆 乐, 陈 钱, 戴慧东, 顾国华, 何伟基*

(南京理工大学 电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210000)

摘要:为了消除采样过程中的噪声干扰, 进一步提高重构图像质量, 针对数字微镜阵列(DMD)与桶探测器在测量过程中点对点采样产生的起伏噪声导致图像信噪比降低的问题, 提出基于哈达玛矩阵编码测量的压缩采样成像方法。首先采用 DMD 分区控制方法, 利用哈达玛编码测量, 计算获得低分辨率的粗糙图像, 接着在预测的重要小波系数所在区域, 对同一尺度上的重要区域利用哈达玛矩阵进行投影, 同时计算出这些区域的小波系数, 最后通过小波逆变换获得重构图像。实验表明, 在测量噪声为 0.2 倍的热噪声下, 只需要 10% 的采样率, 通过哈达玛编码测量, 图像峰值信噪比从 13.98 dB 最高提高到 34.56 dB, 提高了 20.58 dB, 成像质量明显改善, 清晰度高。当存在较大的测量噪声时, 该方法可以大幅提高图像的信噪比, 尤其适用于微弱光信号条件下的高灵敏压缩采样成像。

关 键 词:压缩成像; 哈达玛矩阵; 小波系数; 数字微镜阵列

中图分类号:TP751 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183310.0893

Adaptive compressed sampling imaging based on hadamard matrix coding measurement

LUO Le, CHEN Qian, DAI Hui-dong, GU Guo-hua, HE Wei-ji*

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

Abstract: In order to eliminate the noise interference in the sampling process and to further improve the quality of reconstructed images, a compressed sampling imaging method based on Hadamard matrix encoding measurement is proposed to reduce the signal to noise ratio of the Digital Micro-mirror Device (DMD) and the bucket detector in the measurement process. First, using the DMD zoning control method, the rough image of low resolution is obtained by the Hadamard coding measurement. Then, the important region of the predicted wavelet coefficients is projected with the Hadamard matrix on the important region on the same scale, and the wavelet coefficients of these regions are calculated. Finally, the wavelet inverse transformation is used to get the reconstructed images. The experiment shows that under 0.2 times the thermal noise, only 10% of the sampling rate is needed. The peak signal to noise ratio(PSNR) of the image is increased from 13.98 dB to 34.56 dB by the Hadamard code, which is improved by 20.58 dB, the image quality is obviously improved and the defini-

收稿日期:2018-08-08; 修订日期:2018-09-10.

基金项目:武器装备预先研究项目(No. 30102070201)

Supported by Advance Research Projects of Weapon Equipment(No. 30102070201)

* 通信联系人, E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn

tion is better. Under weak light signal, when there is a large measurement noise, the method can achieve high SNR with low sampling rate.

Key words: compressed sampling; hadamar matrix; wavelet coefficients; digital micro-mirror device

1 引言

压缩感知理论^[1-5]指出,稀疏信号可以由远低于 Nyquist 频率的采样率进行采样,并通过重建算法以高概率精确重构原始信号。与传统的“先采样,后压缩”的方法不同,原始信号在采样过程中就被压缩了。第一个运用压缩感知理论的成像是美国 Rice 大学研制的单像素相机^[6],通过将探测器阵列简化为灵敏度高、噪声小的单元探测器,降低了传感器数量与硬件成本,同时拓宽了成像光谱范围,这种压缩采样成像方法已成功应用于医学成像、雷达成像、光谱成像等领域^[7-8]。

单像素相机结合压缩感知理论的成像系统,因为常用的测量矩阵为随机矩阵,随着图像分辨率的提高,这些矩阵所需的存储空间与计算复杂度都会迅速增大,尤其在高分辨成像时缺陷较为明显。针对这个问题,Berinde 和 LU 等人设计了测量矩阵^[9-10],但具有一定的局限性,无法进一步推广。随着数字微镜阵列(DMD)及单像素相机的应用,Duarte 和 Wakin 等人将光学复用技术运用于单像素相机成像^[11-12],通过使用空间光调制器进行一系列编码投影,利用桶探测器记录光强,经过解码计算获得图像。作为一种传统的光学复用技术,哈达玛编码成像技术^[13-15]已被广泛应用于二维成像。相比于常用的二维成像技术,该技术计算复杂度低,同时可获得更高信噪比的图像。

由于 DMD 与桶探测器在测量过程中存在一定的起伏噪声,成像信噪比受影响较大。为进一步减少采样过程中的噪声干扰,本文将哈达玛矩阵编码测量与扩展小波树理论^[16]结合,在采样阶段利用扩展小波树中小波系数的父子与兄弟关系确定小波系数的重要性,同时将光学复用技术用于图像压缩采样与成像过程。首先采用 DMD 分区控制方法,利用哈达玛编码测量,计算获得低分辨率的粗糙图像,接着在预测的重要小波系数所在区域,对同一尺度上的重要区域利用哈达玛矩阵进行投影,同时计算出这些区域的小波系数,最后通过小波逆变换获得重构图像,既降低了采样次数,又减

少了噪声影响,灰度图像信噪比有效提升。

2 哈达玛矩阵和编码成像模型

哈达玛编码测量作为一种多路复用技术,具有高通量和多通道的双重显著优点。基于哈达玛编码的成像是通过在空间上进行光学调制,经过多次选择不同的像元组合方式进行测量,然后对测量值进行解码计算出原始信号值,完成图像重构的一种成像技术。这种成像技术的雏形来源于统计学中的称重设计理论,该理论是 20 世纪 70 年代,由 Harwit 和 Sloane 首次运用到光学领域^[17]。近年来 DMD 技术的发展进一步促进了哈达玛编码技术的研究和相关光谱仪的研制^[18-19]。

2.1 哈达玛矩阵

哈达玛编码成像是使用哈达玛矩阵对实际场景的光信号进行多次不同方式的组合测量。哈达玛矩阵是编码的基础,该矩阵是只含有一 1 和 1 两种元素的正交矩阵,且矩阵阶数为 2^n ($n \in \mathbb{Z}$),其各阶矩阵有如下形式:

$$\begin{aligned} H_1 &= [1], \quad H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}, \\ H_4 &= \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}, \\ H_N &= H_{2^n} = H_2 \otimes H_{2^{n-1}} = \begin{bmatrix} H_{2^{n-1}} & H_{2^{n-1}} \\ H_{2^{n-1}} & -H_{2^{n-1}} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (1)$$

可见,哈达玛矩阵的最大优点在于它具有简单的递推关系,即高阶矩阵可用两个低阶矩阵的克罗内克积求得。由于只含有两种元素,因此可以设计哈达玛矩阵的编码模板,用类似于开关的硬件实现。在基于 DMD 的成像系统中,当编码矩阵中的元素为 1 时,对应 DMD 微镜状态为开,相应像元的光照信号反射进探测器中;当编码矩阵中的元素为 0 时,对应 DMD 微镜状态为关,相应像元的光照信号未能反射进探测器中。这与哈

达玛矩阵并不一致,仅仅将-1用0表示,会造成图像重建过程的错误,因此设计哈达玛矩阵的编码模板的关键是在硬件中实现-1的取值。

目前绝大部分基于哈达玛变换的光谱仪都是使用的哈达玛循环S矩阵及改进的互补S矩阵进行编码成像的,这两个矩阵都是通过对哈达玛矩阵进行一系列变换后得到的,只含有1和0。由于理论上最优的编码矩阵依旧是哈达玛矩阵,上述两种

矩阵在编码成像中,测量次数为使用全哈达玛矩阵的一半,但经重构所得的图像信噪比依旧低于全哈达玛矩阵编码成像。因此需要设计算法,实现用尽量少的测量次数获得较高的图像信噪比。

由于哈达玛矩阵只有两个元素,可以通过简单的矩阵加减,将原先的哈达玛矩阵分解为只含1和0的矩阵与全1矩阵的线性组合。以4阶哈达玛矩阵为例,可得如下分解:

$$\frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由式(2)可知,哈达玛矩阵可由一个只含有1和0两个元素的矩阵和一个全1矩阵线性表示,前者只需将原来的哈达玛矩阵中的-1变为0。测量过程中, $\{0,1\}$ 矩阵的每一行元素对图像进行一次编码,当完成所有编码后,全1矩阵对应于所有DMD微镜状态为开,因此只需测量一次即可,由此获得全哈达玛矩阵下的所有测量值。相比于基于全哈达玛矩阵的编码,测量次数减半,且能够获得同等的图像信噪比。

2.2 基于哈达玛矩阵编码的成像模型

在光学成像系统中获取一幅二维图像的信息,实际上就是通过探测器获取图像光强信号的空间分布及信号量的大小。假设在编码区域,以 (x,y) 作为图像的空间坐标,对应的像元强度记

为 $f(x,y)$ 。随着坐标的改变,函数 $f(x,y)$ 反映了图像的灰度分布。设编码区域的像元数为 $N=m \times n$,则二维图像离散化处理后的信息可表示为如下矩阵:

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f(x_1, y_1) & f(x_1, y_2) & \cdots & f(x_1, y_n) \\ f(x_2, y_1) & f(x_2, y_2) & \cdots & f(x_2, y_n) \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ f(x_m, y_1) & f(x_m, y_2) & \cdots & f(x_m, y_n) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

设第 i 次测量时产生的噪声为 e_i ,是独立于像元灰度值的随机变量,满足期望为零,且独立同分布,即 $E(e_i)=0, E(e_i e_j)=\sigma \delta(i,j)$ 。由哈达玛编码测量原理可得如下线性方程组:

$$\begin{aligned} y_1 &= w_{11} f(x_1, y_1) + w_{12} f(x_1, y_2) + \cdots + w_{1N} f(x_m, y_n) + e_1 \\ y_2 &= w_{21} f(x_1, y_1) + w_{22} f(x_1, y_2) + \cdots + w_{2N} f(x_m, y_n) + e_2 \\ &\vdots \\ y_N &= w_{N1} f(x_1, y_1) + w_{N2} f(x_1, y_2) + \cdots + w_{NN} f(x_m, y_n) + e_N \end{aligned} \quad (4)$$

其中: $\mathbf{W} = (w_{ij})_{N \times N}$ 为哈达玛组合测量矩阵, y_i 为第 i 次的组合测量值,记 $\mathbf{Y} = (y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_N)^T$, $\mathbf{E} = (e_1 \ e_2 \ \cdots \ e_N)^T$, 则式(4)可表示为矩阵形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{E}, \quad (5)$$

式(5)即为哈达玛矩阵的编码模型。

原信号可通过求解式(6)的无约束最优化问题得到:

$$\min \hat{L}(\mathbf{F}) = \|\mathbf{Y} - \mathbf{W}\mathbf{F}\|_2^2, \quad (6)$$

式(6)的解可由最小二乘法计算,即:

$$\hat{\mathbf{F}} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{Y}, \quad (7)$$

根据哈达玛矩阵的正交性,式(7)可化简为:

$$\hat{\mathbf{F}} = \mathbf{W}^T \mathbf{Y} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{Y}. \quad (8)$$

由于哈达玛矩阵的优良性质,基于哈达玛变换的编码模型,在图像重构时只需线性变换即可恢复图像。式(8)重构出的像元的灰度噪声为:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\varepsilon} &= \hat{\mathbf{F}} - \mathbf{F} = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{Y} - \mathbf{F} = \\ &\mathbf{W}^{-1}(\mathbf{W}\mathbf{F} + \mathbf{E}) - \mathbf{F} = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{E}\end{aligned}\quad (9)$$

则对应于第 i 个像元的噪声的方差为:

$$\begin{aligned}D(\varepsilon_i) &= E(\varepsilon_i^2) = \\ &\sigma^2 [(\mathbf{W}_{i1}^{-1})^2 + (\mathbf{W}_{i2}^{-1})^2 + \cdots + (\mathbf{W}_{iN}^{-1})^2].\end{aligned}\quad (10)$$

式(10)中, σ^2 是每次测量产生的噪声的方差, $(\mathbf{W}_{i1}^{-1}, \mathbf{W}_{i2}^{-1}, \cdots, \mathbf{W}_{iN}^{-1})$ 是矩阵 $\mathbf{W}^{-1}$ 的第 i 行所对应的元素, 因此 N 个像元的平均方差为:

$$\begin{aligned}\overline{D(\varepsilon)} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E(\varepsilon_i^2) = \frac{\sigma^2}{N} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (\mathbf{W}_{ij}^{-1})^2 = \\ &\frac{\sigma^2}{N} \text{tr}[(\mathbf{W}^{-1})(\mathbf{W}^{-1})^T] = \frac{\sigma^2}{N} \text{tr}[(\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1}],\end{aligned}\quad (11)$$

式(11)中, $\text{tr}()$ 表示矩阵的迹, 可由矩阵对角线上的和计算得到。

由信噪比的定义, 单独测量单个像元时的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{f}{\sigma}.\quad (12)$$

组合测量时的信噪比为:

$$\text{SNR} = \frac{f}{\sqrt{D(\varepsilon)}} = \frac{f \sqrt{N}}{\sigma \sqrt{\text{tr}[(\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1}]}}.\quad (13)$$

根据哈达玛矩阵 $\mathbf{W}$ 的正交性, 利用哈达玛矩阵编码组合测量的信噪比增益为:

$$G_H = \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{\text{tr}[(\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1}]}} = \sqrt{N},\quad (14)$$

由式(14)可知, 每次编码测量的像元数量越多, 信噪比提升越大。

3 基于哈达玛矩阵编码测量的成像方法

对于 $N \times N$ 大小的图像, 记小波分解的层数为 J 。在哈达玛矩阵的编码算法下, 我们首先由 DMD 分区控制将每 $2^{j-1} \times 2^{j-1}$ ($j = J$) 个微镜组合成一个区域, 通过哈达玛编码成像技术采样并重构出分辨率为 $\frac{N}{2^{j-1}} \times \frac{N}{2^{j-1}}$ 的低分辨率图像。接着, 基于扩展小波树结构, 对各高频子带上的重要小波系数所在空间区域进行预测并在实际图像中标记这些区域。将预测所得区

域合并, 作为待采样集合, 放大一倍后, 利用哈达玛编码技术, 对放大后的图像细节区域进行更精细的采样。当集合中的像元个数不是 2 的幂次方时, 按照式(15)所示的编码矩阵进行采样:

$$\mathbf{M}_j = (m_{ik,j})_{L_j \times L_j} \quad m_{ik,j} = \begin{cases} h_{ik,j} & x \in D \\ 0 & x \notin D \end{cases},\quad (15)$$

其中: $\mathbf{M}_j$ 为第 j 层的编码矩阵, 大小为 $L_j \times L_j$ 。 D 为待采样集合, 记 $|D| = d$, $L_j = \lceil \log_2 d \rceil$ 。 $h_{ik,j}$ 对应于大小为 $L_j \times L_j$ 的哈达玛矩阵中第 i 行、第 k 列的数值。修改后的编码矩阵仍然按照哈达玛编码的规则对集合中元素进行采样, 采样方式依旧按照式(2)进行。

当采集完一层上重要小波系数所在区域的图像灰度值, 获得更高级分辨率的图像后, 进行一层小波变换获取该层高频子带上的重要小波系数, 再在更精细尺度上对重要小波系数所在空间区域采样, 由此循环, 直到达到初始设定的最小的尺度, 最后由小波逆变换重构图像。整个方法的流程图如图 1 所示。

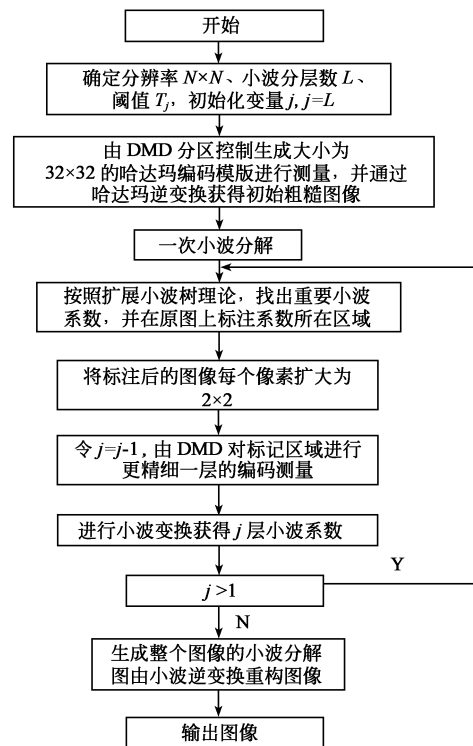


图 1 基于哈达玛编码测量的压缩采样方法流程

Fig.1 Compressed sampling method flow based on Hadamard coding measurement

4 实验测试与分析

本节给出基于哈达玛编码的自适应压缩采样与成像的仿真实验,并将实验结果与其他算法进行了比较分析。在每次采样过程中均添加相同强度的高斯白噪声,作为探测器噪声。首先考虑由 DMD 分区控制,将图像分块成较小的投影区域,获得低分辨率粗糙图像。由于图像分辨率较低,

只采用单一模版,进行一次哈达玛编码测量。接着选取 haar 小波基对图像进行一次小波分解。根据扩展小波树理论,设置阈值,确定采样掩模,对分辨率放大 4 倍的图像进行采样,实际采样中,当采样过大时,所需的哈达玛矩阵阶数过高,影响采样速度以及采样效率,因此采用分块测量的思想。设待测量集合中的元素所构成的向量记为 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$, 分块后 $X = [X_1, X_2, \dots, X_l]$, 其中 $X_j (j = 1, 2, \dots, l)$ 如式(16)所示。

$$X_j = \begin{cases} [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jt}]^T, & j = 1, \dots, l-1 \\ [x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_n, 0, \dots, 0]^T, & j = l \end{cases}, \quad t = 2^k, l = \left\lceil \frac{n}{t} \right\rceil, \quad (16)$$

此时对应的哈达玛测量模型为:

$$Y_{t \times l} = W_{t \times l} X_{t \times l} + E_{t \times l}, \quad (17)$$

其中: $Y_{t \times l}$ 为测量值, $W_{t \times l}$ 为哈达玛测量矩阵, $E_{t \times l}$ 为测量噪声。依旧根据式(8)可重构出矩阵 $\hat{X}_{t \times l}$ 。最后将所得矩阵按列排列成向量,即为编码测量所得结果。将测量所得图像经过小波分解得到该分辨率下的小波系数,并仿真记录 DMD 的测量次数,最后由小波逆变换,获得重构图像。

为了更好地确定编码长度与测量模版,实验中对不同分区编码模版下的成像的峰值信噪比进

行了统计,证明峰值信噪比与编码长度指数次方呈现线性增长关系。然而随着编码长度的加长,图像重建时间逐渐成倍数增加。综合上述两个因素,在实验中选取码长为 1 024 的编码模版 32×32 对图像进行测量采样。

实验选取图像纹理与轮廓构成有较大差异的灰度图像 boat、man 和 liftingbody 作为测试图像,小波分解层数为 4 层,图像大小为 512×512 ,添加 0.5 倍热噪声。图 2 给出了 4 幅图像在不同采样率时的成像结果,第 1~3 列分别对应的整体采样率为 3%、5% 和 10%。



(a1) 采样率为 3%
(a1) Sampling rates of 3%



(a2) 采样率为 5%
(a2) Sampling rates of 5%



(a3) 采样率为 10%
(a3) Sampling rates of 10%



(b1) 采样率为 3%
(b1) Sampling rates of 3%



(b2) 采样率为 5%
(b2) Sampling rates of 5%



(b3) 采样率为 10%
(b3) Sampling rates of 10%

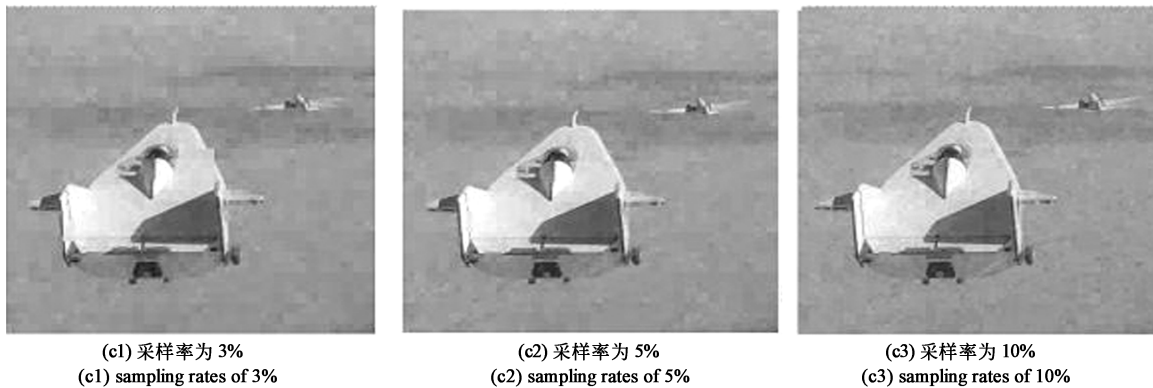


图 2 三幅图像在不同采样率时的成像结果

Fig. 2 imaging results of three images at different sampling rates

如图 2 所示,从视觉角度看,最后一列的成像效果最好,对应着较高的采样率。尤其 boat、man 这两幅图像,随着采样率的提高,图像清晰度明显提升。为了进一步分析该成像方法受噪声影响的情况,本文给出了 3 幅图像在不同噪声强度下成

像的峰值信噪比的曲线图,如图 3 所示。其中,横轴为标准热噪声强度的倍数,采样率为 10%,编码模版为 32×32 的哈达玛矩阵,成像分辨率为 512×512 ,按四层小波分解重构获得。

由图 3 所示,随着引入的测量噪声强度的提

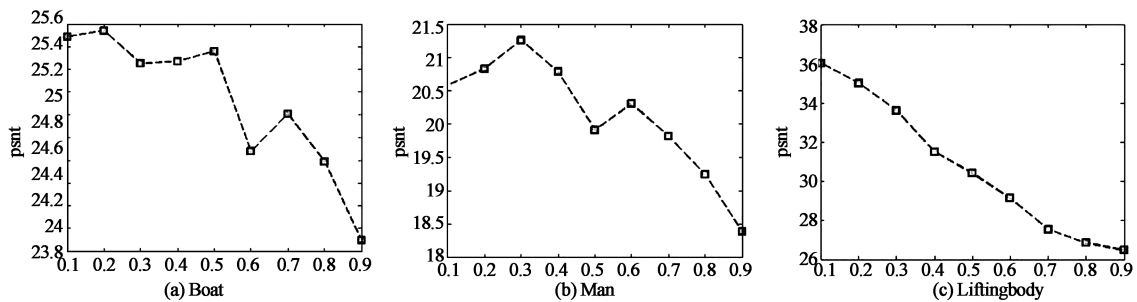


图 3 不同噪声强度下图像的峰值信噪比曲线图

Fig.3 PSNR graphs at different noise intensities

高,所成图像的峰值信噪比呈现下降趋势,由于噪声的随机性,信噪比的值会出现一定程度的波动,但整体趋势不变。从数值上来看,当噪声强度为 0.9 倍的热噪声时,由本文方法,只需 10% 的采样率就能得到峰值信噪比均大于 18 dB 的图像,降噪能力强。

图 4 分别给出了 4 幅图像在 10% 的采样率下,添加噪声强度分别为 0.2、0.5 和 0.8 倍的标准热噪声时对应的压缩采样成像的仿真结果。其中,第一列是采用经典成像方法得到的图像。

如图 4 所示,当添加噪声强度为 0.2 倍的热噪声时,按照经典成像方式所得的四幅图像的峰

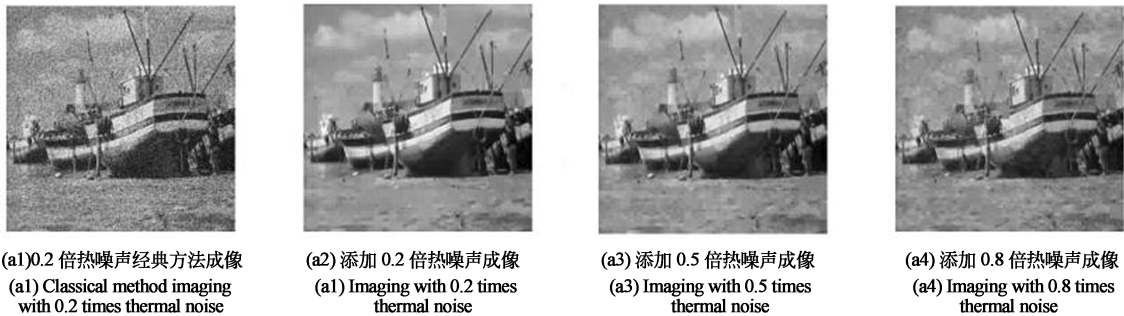




图 4 三幅图像添加不同强度噪声时的成像效果

Fig.4 Imaging effects of three images added with different intensity noise

值信噪比分别为:13.98,13.97,13.98 dB,成像效果很差,整个图像受噪声影响严重,图像的部分纹理细节分辨不清。按照本文的方法,即使在更大的噪声下,只需要 10% 的采样率,通过哈达玛编码测量,所得图像质量都有很大改善,满足实际使用要求。其中,liftingbody 图像在 0.2 倍的热噪声下,使用本文算法的成像的峰值信噪比达到 34.56 dB,相比于经典的成像方法,高出了 20.58 dB,成像效果好,清晰度高。

5 结 论

在基于小波树结构的采样过程中,探测器只独立地对重要小波系数的空间位置进行探测,整个模型没有考虑 DMD 与桶探测器在测量过程中存在统计分布的起伏噪声,该噪声地存在会降低

实验中的成像信噪比。为了消除采样过程中的噪声干扰,提高目标成像的信噪比,本文将光学复用技术用于压缩采样与成像过程中,采用哈达玛矩阵编码对重要小波系数所对应的空间区域进行采样,将粗糙图像的获取及重要小波系数的采样过程统一,均采用哈达玛矩阵编码对相应的空间区域进行采样,利用采样获得的高分辨率图像,通过小波变换获得高频子带的重要小波系数,最后由计算所得的小波在各尺度上的高频小波系数与低分辨率图像,通过小波逆变换获得成像。实验结果表明,当存在较大的测量噪声时,只需要 10% 的采样率,通过哈达玛编码测量,图像峰值信噪比从 13.98 dB 最高提高到 34.56 dB,提高了 20.58 dB,图像信噪比大幅提高。该方法能够极大地减少噪声影响,尤其适用于微弱光信号条件下的高灵敏压缩采样成像。

参 考 文 献:

- [1] 张杰,史小平. 结合压缩感知和曲波的天文图像去噪[J]. 光学精密工程, 2017,25(5): 1387-1394.
ZhANG J, SHI X P, Astronomical image denoising with compressed sensing and curvelet[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017,25(5): 1387-1394. (in Chinese)
- [2] 闫歌,许廷发,马旭,等. 动态测量的高光谱图像压缩感知[J]. 中国光学, 2018,11(4): 550-559.
YAN G, XU T F, MA X, *et al.* Hyperspectral image compression sensing based on dynamic measurement[J]. *Ed-*

- itorial Committee of Chinese Optics, 2018, 11(4): 550-559. (in Chinese)
- [3] 王昕, 吉桐伯, 刘富. 结合目标提取和压缩感知的红外与可见光图像融合[J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1743-1753.
WANG X, JI B T, LIU F. Fusion of infrared and visible images based on target segmentation and compressed sensing[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(7): 1743-1753. (in Chinese)
- [4] LI Q F, GUO K Y, TANG B, et al. Scattering center modelling based on compressed sensing principle from under-sampling scattering field data[C]. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE*, 2016: 2672-2675.
- [5] 朱明, 高文, 郭立强. 压缩感知理论在图像处理领域的应用[J]. 中国光学, 2011, 4(5): 441-447
ZHU M, GAO W, GUO L Q. Application of compressed sensing theory in image processing[J]. *Chinese Optics*, 2011, 4(5): 441-447 (in Chinese)
- [6] DUARTE M F, Davenport M A, Takhar D, et al. Single-Pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, Special Issue on Compressive Sampling, 2008, 25(2): 83-91.
- [7] 杨鹰, 孔玲君, 刘真. 基于压缩感知的多光谱图像去马赛克算法[J]. 液晶与显示, 2017, 32(1): 56-61.
YANG Y, KONG L J, LIU Z. Multi-spectral demosaicking method based on compressive sensing[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2017, 32(1): 56-61.
- [8] 任越美, 张艳宁, 李映. 压缩感知及其图像处理应用研究进展与展望[J]. 自动化学报, 2014, 40(8): 1563-1575.
REN Y M, ZHANG Y N, LI Y. Advances and perspective on compressed sensing and application on image processing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 1563-1575.
- [9] BERINDE R, INDIK P. Sparse recovery using sparse random matrices[R]. Latin American Conference on Theoretical Informatics, 2010, 6034: 157-157.
- [10] LU G, DO T T, TRAN T D. Fast compressive imaging using scrambled block Hadamard ensemble[C]. European Signal Processing Conference, 2010: 1-5.
- [11] DUARTE M, DAVENPORT M, TAKHAR D, et al. Single-pixel imaging via compressive sampling[J]. *IEEE Signal Process Magazine*, 2008, 25(2): 83-91.
- [12] WAKIN M, LASKA J, DUARTE M, et al. An architecture for compressive imaging[C]. *Proceedings of IEEE Conference on Image Processing*, 2006, 1273-1276.
- [13] STREETER L, BURLINGCLARIDGE G R, CREE M J, et al. Optical full Hadamard matrix multiplexing and noise effects[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(11): 2078-2085.
- [14] MIZUNO T, IWATA T. Hadamard-transform fluorescence-lifetime imaging[J]. *Optics Express*, 2016, 24(8): 8202-8013.
- [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 Report*, 2017, 7(1): 3464-3470.
- [16] DAI H D, GU G H, HE W J, et al. Adaptive compressed sampling based on extended wavelet trees[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): 6619-6628.
- [17] HARWIT M, SLOANE N J A. *Hadamard Transform Optics* [M]. New York: Academic Press, 1979.
- [18] ZHANG W K, ZHANG Z H, GAO L X. Study of using complementary S matrix to enhance SNR in Hadamard spectrometer[J]. *International Journal for Light and Electron Optics*, 2014, 125(3): 1124-1127.
- [19] 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.
ZHANG Y, WANG Y, YUE J, et al. High sensitivity imaging based on DMD coding Hadamard Transform[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3819-3824.

作者简介: 骆乐(1986—), 男, 江苏宿迁人, 博士研究生, 主要从事光学成像和光电探测等方面的研究。E-mail: wsl1a@126.com.

何伟基(1981—), 男, 广东韶关人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事光电成像与光电探测等方面的研究。E-mail: hewj@mail.njust.edu.cn