

引用格式:李雪珍,凌永发. 基于混合混沌序列的测量矩阵构造算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2021, 38(9): 23-30. [LI X Z, LING Y F. Research on the construction algorithm of measurement matrix based on mixed chaotic[J]. Microelectronics & Computer, 2021, 38(9): 23-30]

基于混合混沌序列的测量矩阵构造算法研究

李雪珍¹, 凌永发^{1,2}

(1 桂林电子科技大学 信息与通信学院, 广西 桂林 541004;
2 贺州学院 人工智能学院, 广西 贺州 542899)

摘 要: 为了提高测量矩阵的性能, 提出了一种基于异或混合混沌序列的测量矩阵构造算法. 基于 Chebyshev 混沌映射和改进型 Logistic 混沌映射, 提出了一种混合混沌映射的数学模型, 采用阈值函数法对实值混沌序列进行二值量化, 将实值的混沌序列转化为二进制混沌序列; 然后通过异或的方式将两种二进制混沌序列结合起来得到混合混沌序列, 最后将该混合混沌序列采用循环移位的方式构造成压缩感知测量矩阵. 实验结果表明: 该算法构造的测量矩阵的重构成功率得到了提高, 当压缩比小于 0.4 时, PSNR 提升了大约 12 dB.

关键词: 压缩感知; 混沌映射; 循环移位; 贝努利分布; 测量矩阵

中图分类号: TN911.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7180(2021)09-0023-08

Research on the construction algorithm of measurement matrix based on mixed chaotic

LI Xuezhen¹, LING Yongfa^{1,2}

(1 School of Information and Communication, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China;
2 School of Artificial Intelligence, Hezhou University, Hezhou 542899, China)

Abstract: In order to improve the performance of measurement matrix, an algorithm of measurement matrix construction based on XOR mixed chaotic sequence is proposed. Based on Chebyshev chaotic map and advanced Logistic chaotic mapping, a mathematical model of the mixed chaotic map was proposed. By the method of threshold function, real value quantitative chaotic sequence for binary and real value of chaotic sequence can be converted to binary chaotic sequence. Then the mixed chaotic sequence is obtained by combining the two binary chaotic sequences in the way of XOR. Finally, the mixed chaotic sequence is constructed into the compressed sensing measurement matrix by means of cyclic shift. The experimental results show that the success rate of the reconstruction of the measurement matrix constructed by the algorithm is improved, and the PSNR of the measurement matrix is improved by about 12 dB when the compression ratio is less than 0.4.

Key words: compressed sensing; chaotic mapping; cyclic shift; bernoulli distribution; measurement matrix

1 引言

测量矩阵的构造是压缩感知^[1-3]的主要研究内容之一, 构造的测量矩阵关系到信号重构的质量, 同

时也决定着压缩感知理论在硬件上实现的难易度. 混沌系统产生的混沌序列是确定性和随机性的统一, 由混沌序列构造的测量矩阵是一个确定性矩阵, 它能够有效的解决常用随机测量矩阵在实验当中存

在的不稳定性、需要多次测量等问题. 因此有学者提出将混沌序列用于压缩感知测量矩阵的构造. 如: Yu 在文献[4]中提出采用 Logistic 混沌序列来构造测量矩阵, 并证明了该矩阵满足 RIP 条件; Frunzete 等人在证明了采用 Tent 混沌序列构造的测量矩阵能够满足 RIP 条件^[5]; 随后, 栗娟等人在文献[6]中证明了 Chebyshev 扩频序列以用来构造测量矩阵; 文献[7]中作者提出了一种基于复合混沌映射的测量矩阵构造算法; 韩公飞^[8]提出了一种基于 Hybrid 混沌系统的构造测量矩阵的构造方法; Gan 等人^[9]设计了一种由伯努利移位序列产生的混沌测量矩阵, 该矩阵对噪音和干扰具有良好的抵抗能力; Zhu 等人^[10]采用了由服从高斯分布的切比雪夫映射构成随机测量矩阵, 有效地克服了随机矩阵不易硬件实现的缺陷; 文献[11]结合 Logistic 混沌映射与 Contourlet 变换变换生成随机测量矩阵来进行语音加密, 利用混沌的初始值敏感性扩展了密钥大小, 提高了加密强度, 等等. 然而上述测量矩阵的构造方法都是采用单一混沌映射生成的混沌序列来构造测量矩阵.

由于单一混沌映射生成的混沌序列的性能略差于混合型混沌序列的性能, 而测量矩阵的性能又受到混沌序列性能的影响^[12]. 因此, 使用单一混沌序列构造的测量矩阵的性能也会略差于混合型混沌序列构造的测量矩阵的性能. 为了避免因单一混沌序列性能的不足影响到信号的重构效果, 本文提出一种基于异或混沌序列的测量矩阵构造算法来提高测量矩阵的重构成功率和峰值信噪比. 该算法首先由改进型 Logistic 映射和 Chebyshev 映射分别生成的混沌序列, 然后通过符号函数转化后生成元素为 0, 1 的二进制混沌序列, 再将二值混沌序列异或生成混合混沌序列, 并证明该混合混沌序列满足贝努利分布, 最后用该序列构造测量矩阵. 仿真结果表明, 该方法是可行且有效的.

2 压缩感知理论数学描述

对于给定的一维信号 $x \in R^{N \times 1}$, 可用一组正交基 $\Psi \in R^{N \times N}$ 来表示^[13]:

$$x = \Psi\theta \quad (1)$$

式中, $\theta \in R^{N \times 1}$ 是信号 x 在 Ψ 上的系数向量. 如果向量 x 在 Ψ 上由 k ($k \ll N$) 个非零向量时, 则称信号 x 是稀疏信号. 通常来说, 时域信号本身并不是稀疏的, 它是经过某种变化, 如傅里叶变换^[14]、离散小波变换等^[15], 后才变成稀疏信号的.

对于一个稀疏信号 $x \in R^{N \times 1}$, 并不直接对其进行压缩采样, 而是用矩阵 $\Phi \in R^{M \times N}$ ($M < N$) 对其进行测量上, 得到测量值 $y \in R^{M \times 1}$ ^[16], 即:

$$y = \Phi x \quad (2)$$

式中, $\Phi \in R^{M \times N}$ 为测量机矩阵. 将式(1) 带入式(2) 可得:

$$y = \Phi x = \Phi \Psi \theta \quad (3)$$

在对上式求解的过程中, 由于 $M < N$, 该方程有无数多个解, 这会导致无法求出方程的真实解, 所以对于该方程不能直接通过求逆的方法来重构原始信号. 文献[4] 中, 如果测量矩阵满足 RIP 条件, 可以通过重构算法精确重构出原始信号. RIP 准则为^[4]: 对于即对于测量矩阵 Φ , 若存在一个等距约束常数 $\delta \in (0, 1)$, 使得测量矩阵 Φ 满足

$$(1 - \delta) \|x\|_2^2 \leq \|\Phi x\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|x\|_2^2 \quad (4)$$

式中, x 是 k - 稀疏信号.

在满足上述条件下, 信号 x 可以通过 l_0 范数最优化问题求解^[13-14]:

$$\min_x \|x\|_0, \text{ s. t. } y = \Phi x \quad (5)$$

对于公式(5) 的求解过程是一个求解 NP 难问题, 求解过程复杂, 因此可在一定条件下进行等价转换, 把 l_0 范数最优化问题等价转化为 l_1 范数最优化问题进行求解^[14-15]:

$$\min_x \|x\|_1, \text{ s. t. } y = \Phi x \quad (6)$$

压缩感知重构算法包括: 正交匹配追踪 (OMP)^[16]、迭代阈值法 (IHT)^[14]、基追踪算法^[11]、匹配追踪 (MP)^[6]、梯度投影法 (GP)^[15]等.

3 混沌理论数学描述

3.1 Chebyshev 混沌序列

混沌^[16-17]是一种确定性非线性系统中的类随机、无规则的运动(内在随机性), 它在自然界中普遍存在. 由于混沌系统具有的初值敏感性、伪随机性、确定性、确定性等性质, 在天体运动、生物学、医学、物理等领域被广泛应用.

Chebyshev 映射作为常见的映射方法, 其表达式如下^[17]:

$$Z_{n+1} = \cos(\omega \cdot \arccos z_n) \quad z_n \in [-1, 1] \quad (7)$$

式中, ω 为系统阶数. 当阶数 $\omega > 2$ 时, 映射进入混沌状态, 可以由公式(7) 生成混沌序列. 当 $\omega > 4$ 时, Chebyshev 映射处于满秩映射状态, 由系统迭代生成的混沌序列在区间 $[-1, 1]$ 上遍历. 由 Chebyshev

映射生成的混沌序列的均值为0,概率密度函数为:

$$p(z) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{1-z^2}}, & z \in (-1, 1) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

3.2 Logistic 混沌序列

改进型 Logistic 映射的定义如下^[18]:

$$x_{n+1} = 1 - \lambda x_n, x_n \in [-1, 1] \quad (9)$$

式中, λ 为系统参数. 当分型参数 $\lambda \in [1.872, 2]$ 时, 系统的 Lyapunov 指数均大于0, 此时映射处于混沌状态. 当 $\lambda = 2$, Logistic 映射为满映射, 由公式(9)迭代生成的混沌序列具有良好的伪随机性, 且生成的混沌序列分布在区间 $[-1, 1]$. Logistic 混沌序列的概率密度函数为:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{1}{\pi \sqrt{1-x^2}}, & x \in (-1, 1) \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

3.3 混合混沌扩频序列

上述混沌系统生成的混沌序列是一种实值序列, 并不适用于数字通信系统中的传输与处理, 因此需要对实值的混沌序列转化成二进制混沌序列. 目前常用的二进制转换方法主要有: 阈值函数法^[19]、二进制化法^[20]. 本文主要采用阈值函数法将实值混沌序列转化为二进制扩频序列.

阈值函数法^[19]主要是利用符号函数将实值序列的值与门限函数的门限值进行对比, 当实值序列的值小于门限值时, 则二进制序列的值为0; 当实值序列的值大于门限值时, 则二进制序列的值为1. 门限函数的表达式为:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 0 & x < c \\ 1 & x \geq c \end{cases} \quad (11)$$

式中, c 为门限值, x 为实值序列的值.

定理1: 由 Chebyshev 混沌映射生成的混沌序列 $\{z_n\}$ 经符号函数映射后产生的扩频序列 $\{z'_n\}$ 满足贝努利 (Bernoulli) 分布, 称之为 Chebyshev-Bernoulli (C-B) 序列.

证明1: 通过文献[6]可知, Chebyshev 混沌扩频序列 $\{z'_n\}$ 是随机且统计独立的, 扩频序列 $\{z'_n\}$ 是 Bernoulli 随机序列, 其概率分布为:

$$p(z'_{n+1} = 0) = 0.5 \quad (12)$$

定理2: Logistic 映射迭代生成的混沌序列 $\{x_n\}$ 经符号函数转换后生成的扩频序列 $\{x'_n\}$ 是 Bernoulli 随机序列, 即 Logistic-Bernoulli (L-B) 序列.

证明2: 参考文献[18] 可知得出结论: Logistic

扩频序列 $\{x'_n\}$ 是 Bernoulli 随机序列, 且是序列 $\{x'_n\}$ 是独立统计的, 当 x'_{n+1} 取值为0或者1时, 概率都是1/2.

混和混沌扩频序列 $\{t_n\}$ 主要是由 Logistic 扩频序列 $\{x'_n\}$ 和 Chebyshev 扩频序列 $\{z'_n\}$ 异或生成, 生成方式如下:

$$\{t_n\} = \{x'_n\} \oplus \{z'_n\} \quad (13)$$

定理3: 两个 Bernoulli 随机序列异或后生成的还是 Bernoulli 随机序列.

证明3: 由公式(7)给出的 Chebyshev 混沌序列 $\{z_n\}$ 的概率密度函数可知, 序列 $\{z_n\}$ 在区间 $[-1, 1]$ 上是均匀分布的^[6]. 由公式(8)和(11)可以求出 z'_{n+1} 取值为0或1时所对应的 z_n 在区间 $[-1, 1]$ 上的分布情况:

$$\text{sgn}(z'_{n+1}) = \begin{cases} 0, & z_n \in (\cos \frac{7\pi}{8}, \cos \frac{5\pi}{8}) \cup (\cos \frac{3\pi}{8}, \cos \frac{\pi}{8}) \\ 1, & z_n \in (-1, \cos \frac{7\pi}{8}) \cup (\cos \frac{5\pi}{8}, \cos \frac{3\pi}{8}) \cup (\cos \frac{\pi}{8}, 1) \end{cases} \quad (14)$$

同理, Logistic 混沌序列 $\{x_n\}$ 在 $[-1, 1]$ 上也是均匀分布的. 由公式(10)和(11)可以得出 x'_{n+1} 分别为0和1时相对应的 x_n 在 $[-1, 1]$ 上的分布情况:

$$\text{sgn}(x'_{n+1}) = \begin{cases} 0, & x_n \in (-1, -\frac{\sqrt{2}}{2}) \cup (\frac{\sqrt{2}}{2}, 1) \\ 1, & x_n \in (-\frac{\sqrt{2}}{2}, \frac{\sqrt{2}}{2}) \end{cases} \quad (15)$$

混合混沌扩频序列 $\{t_n\}$ 是由 $\{x'_n\}$ 和 $\{z'_n\}$ 异或生成, 异或不改变序列分布的状态. 所以, 参考文献[6, 18]可以得知, 序列 $\{t_n\}$ 在 $[-1, 1]$ 上也是均匀分布的. 由公式(13)~(15)可以得出 t_{n+1} 取值为0和1时所对应的 t_n 在 $[-1, 1]$ 上的分布情况为:

$$\text{sgn}(t_{n+1}) = \begin{cases} 0, & t_n \in (\cos \frac{\pi}{8}, \cos \frac{2\pi}{8}) \cup (\cos \frac{3\pi}{8}, \cos \frac{5\pi}{8}) \cup (\cos \frac{6\pi}{8}, \cos \frac{7\pi}{8}) \\ 1, & t_n \in (-1, \cos \frac{7\pi}{8}) \cup (\cos \frac{5\pi}{8}, \cos \frac{6\pi}{8}) \cup (\cos \frac{2\pi}{8}, \cos \frac{3\pi}{8}) \cup (\cos \frac{\pi}{8}, 1) \end{cases} \quad (16)$$

由公式(16)可知, t_{n+1} 取值为 0 或取值为 1 的概率都是 1/2. 将 $\{t_n\}$ 当做 Markov 链, 其一步转移概率矩阵为:

$$P = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \quad (17)$$

由公式(17)可求得 i 步转移概率矩阵 $P^i = P(i \geq 1)$. 根据 Markov 链的性质, 可以证明序列 $\{t_n\}$ 是随机且独立统计的, 所以序列 $\{t_n\}$ 是 Bernoulli 随机序列, 称之为 Mixed chaotic-Bernoulli(MCB) 序列. 证毕.

4 基于混合混沌序列的测量矩阵的构造算法设计

贝努利随机观测矩阵作为常用随机测量矩阵, 它能够以极大的概率满足 RIP 性质, 而且组成贝努利随机观测矩阵的元素只有两种取值, 该元素是相互独立的且服从伯努利分布^[21]. 而本文所提出的混合混沌序列是随机且独立统计的 Bernoulli 随机序列, 所以由混合混沌序列构造的测量矩阵满足 RIP 性质. 因此, 本文提出了一种基于混合混沌序列的测量矩阵的构造算法.

本文基于 Chebyshev 混沌映射和改进型 Logistic 混沌映射, 提出了一种基于异或混合混沌序列的测量矩阵数学模型, 采用阈值函数法对实值混沌序列进行二值量化, 将实值混沌序列转化为二进制混沌序列, 然后通过异或的方式将两种二进制混沌序列结合起来得到混合混沌序列, 最后采用循环移位的方法构造出测量矩阵. 测量矩阵的流程图如图 1 所示.

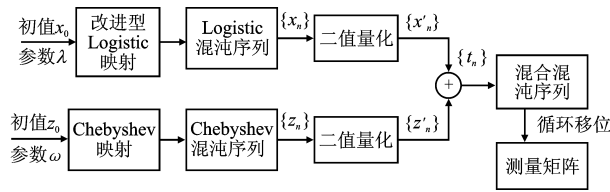


图1 混合混沌—贝努利测量矩阵流程图

图1中的提到的 Logistic 混沌序列 $\{x_n\}$ 是由式(9)所给出的改进型 Logistic 混沌映射的定义式迭代生成, 且参数 λ 即为式(9)中的参数; Chebyshev 混沌序列 $\{z_n\}$ 是由式(7)所给出的 Chebyshev 混沌映射数学表达式迭代生成, 且参数 ω 即为式(7)中的参数; 二进制混沌序列 $\{x'_n\}$ 是序列 $\{x_n\}$ 通过式(11)二值量化而得到的; 同理, 二进制混沌序列 $\{z'_n\}$ 也是由式(11)二值量化而来; 混合混沌序列式

(13) 异或得来.

测量矩阵的构造步骤如下:

Step1: 设公式(7)的参数 $\omega = 4$, 给定初值 z_0 . 由公式(1)迭代生成长度为 N 的 Chebyshev 混沌序列 $\{z_n\}$;

Step2: 设公式(9)中的参数 $\lambda = 2$, 给定初值 x_0 . 通过公式(1)迭代生成长度为 N 的 Logistic 混沌序列 $\{x_n\}$;

Step3: 分别将序列 $\{z_n\}$ 和 $\{x_n\}$ 通过公式(11)转化为扩频序列 $\{z'_n\}$ 和 $\{x'_n\}$;

Step4: 将序列 $\{z'_n\}$ 和 $\{x'_n\}$ 按照(13)进行异或, 生成混合混沌序列 $\{t_n\}$;

Step5: 将序列 $\{t_n\}$ 按行循环移位生成大小为 $M \times N$ 的测量矩阵 Φ , 并称其为混合混沌——贝努利测量矩阵(Mixed chaotic-Bernoulli matrix, MBM), 其表示为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} t_1 & t_2 & \cdots & t_n \\ t_n & t_1 & \cdots & t_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_2 & t_3 & \cdots & t_1 \end{bmatrix}$$

5 仿真分析

本文选择通过一维信号和二维图像仿真实验来验证混合混沌—贝努利测量矩阵(MBM)可效性和有效性, 并将 MBM 与 Logistic—贝努利矩阵(Logistic—Bernoulli matrix, LBM), Chebyshev—贝努利矩阵(Chebyshev—Bernoulli matrix, CBM), 贝努利矩阵(Bernoulli matrix, BM), 高斯随机矩阵(Gaussian matrix, GM)进行对比.

5.1 一维信号仿真

仿真实验主要是在 MATLAB 环境下进行, 重构算法主要采用正交匹配追踪法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP). 图1基于混合混沌—贝努利测量矩阵(MBM)的一维信号重构图. 本文选择选取稀疏度 $K=30$, 长度 $N=256$, 测量数 $M=64$ 的一维信号进行重构, 结果如图2所示.

在同一条件下, 信号的重构成功率越高, 信号的恢复质量越好, 信号的重构效果会受到信号的稀疏度和测量数的影响^[8]. 本文采用信号的重构成功率作为信号恢复的效果的评价指标, 一维信号相对误差的定义为:

$$\beta = \frac{\|x - \hat{x}\|_2}{\|x\|_2} \quad (18)$$

式中, x 为原始信号, $\hat{x} = 32$ 为重构信号. 在同一条

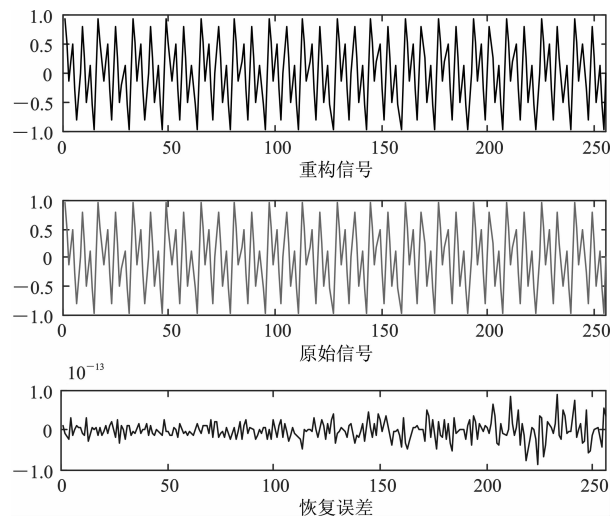


图 2 一维信号的重构图

件下,信号的重构成功率越高,信号的恢复质量越好.

混沌系统生成的混沌序列具有良好的初值敏感性,选取的初值不同,生成的混沌序列也不同,所构造的测量矩阵也不同. 而异或生成的混合混沌序列同样具有良好的初值敏感性,为了清晰的了解初值对测量矩阵的影响,本文对不同初值产生的混沌序列所构造的 MBM 测量矩阵的重构效果进行了分析,结果如图 3 所示.

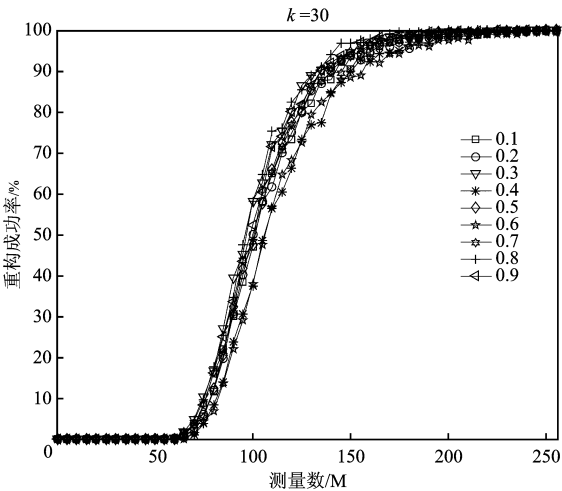


图 3 初值对 MBM 的重构成功率的影响

从图 3 中可以看出,混沌系统选取不同的初值,对 MBM 测量矩阵的重构效果没有太大的影响.

信号的重构效果会受到信号的稀疏度和测量数的影响. 图 4 为在固定信号的稀疏度这一条件下,不同测量数目对信号的重构概率的影响. 设定信号长度 $N=256$, 稀疏度 $K=32$, 对每一个测量值进行 1 000 次重复实验. 从图 4 可知,信号的重构成功率

随着测量数的增大而增大,当 $M<70$ 时,五种测量矩阵都不能将信号重构出来;当 $M>190$ 时,五种测量矩阵都能将信号以极大的概率重构出来;当 $70<M<190$ 时,MBM 的信号重构成功率虽然略低于 BM 和 GM,但是却要高于其他混沌测量矩阵.

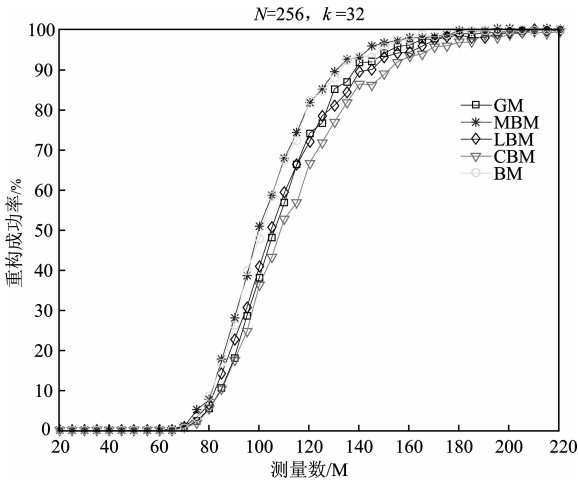


图 4 相同稀疏度下,不同测量矩阵重构成功率

然后测试在固定信号的测量数这一条件下,改变信号稀疏度时信号重构成功率的变化,结果如图 5 所示. 图 5 中信号长度为 $N=256$, 测量数 $M=128$, 对每一组数据进行 1000 次重复实验. 从图 4 可以看出,信号的重构成功率随稀疏度的增大而减小,当 $K<15$ 时,都能以极大的概率将信号重构出来;当 $K>60$ 时,五种测量矩阵的重构成功率已下降至 0,都不能将信号重构出来;当 $15<K<60$ 时,本文构造的测量矩阵的信号重构成功率曲线略微高于其它测量矩阵.

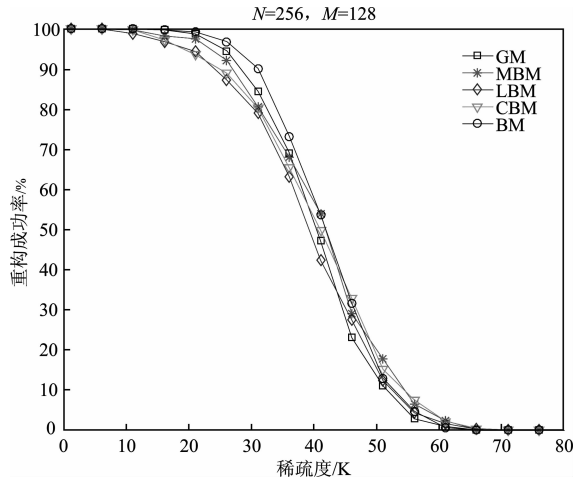


图 5 相同测量数下,不同测量矩阵重构成功率

从图 4 和图 5 中可以看出,MBM 在一维信号重构上具有其他测量矩阵类似的性质,而且在某些

方面还要优于其他测量矩阵. 但是, 随机测量矩阵不确定性和占用存储空间大、难于在硬件上实现. 相对于给定初值后生成混沌序列所构造的混沌测量矩阵易于硬件实现, 而且其具有的内在确定性, 不需要做大量的重复实验, 可以节约存储空间. 而且, 混合混沌序列构造的混沌测量矩阵的重构效果比采用单一映射生成的混沌序列构造的测量矩阵的重构效果好. 因此, 本文多构造的测量矩阵相对于其他测量矩阵来说, 在一维信号重构方面优于其他测量矩阵.

5.2 二维图像仿真

本文选取大小为 256×256 的“Lena”图像, 采用小波变换(DWT)将图像稀疏化, 在运用 OMP 算法对图像进行重构. 选择 LBM,CBM,BM,GM 与 MBM 通过实验比较不同测量矩阵对图像的恢复效果. 为了减小 BM 和 GM 的不稳定性, 将对其进行 100 次实验在求取平均值, 固定混沌系统的参数后, 构造的测量矩阵具有内在确定性, 是确定性测量矩阵, 因此不需要重复实验. 本文采用峰值信噪比(PSNR)、均方误差(MSE)作为恢复图像的评价指标^[8]. 峰值信噪比、均方误差的定义分别为:

$$PSNR=10\lg \frac{255^2}{MSE} \tag{19}$$

$$MSE=\frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^1 \sum_{j=1}^1 (X(i, j)-Y(i, j))^2 \tag{20}$$

式中, $M \times N$ 为 256×256 , $X(i, j)$ 为原始图像中像素点上的值, $Y(i, j)$ 为重构图像中像素点上的值.

图 6 为压缩比为 0.6 时, 不同测量矩阵对 Lena 图像重构的效果图与原始图像, 从图中可以看出 MBM 的恢复效果最明显, 更接近原始图像.

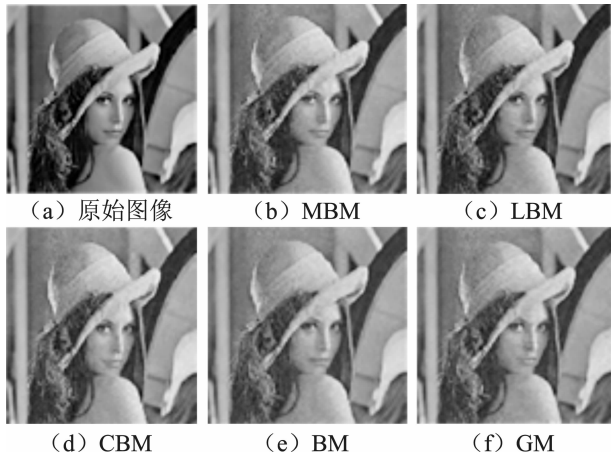


图 6 压缩比为 0.6 时, 不同测量矩阵的恢复图

为了能够更好的了解 MBM 的性能, 表 1 给出了在压缩比为 0.6 时, 五种测量矩阵在峰值信噪比、

匹配度、相对误差、重构时间的实验数据. 从表中的数据可以得知, MBM 在峰值信噪比、相对误差和重构时间上都要优于其他几种测量矩阵. 虽然 MBM 在匹配度上不是最好的, 但是介于 BM、GM 和 LBM、CBM 之间.

表 1 压缩比为 0.6 时, 不同测量矩阵的性能对比

测量矩阵	峰值信噪比/dB	均方误差	相对误差	重构时间/s
BM	28.81	85.63	0.018 3	19.50
GM	28.63	89.15	0.018 8	19.90
CBM	29.07	80.55	0.016 9	19.04
LBM	28.72	87.31	0.020 0	19.30
MBM	29.67	70.18	0.018 5	19.13

图 7 反映了 LBM,CBM,BM,GM 与 MBM 这五种测量矩阵在不同压缩比的情况下 Lena 图像重构时, 图像的峰值信噪比对压缩比的变化情况. 从图 7 中可以看出, 这五种不同的测量矩阵的峰值信噪比会随着压缩比的增大而增大. 在压缩比小于 0.4 时, MBM 的峰值信噪比增长速度最快, 此时 MBM 的峰值信噪比的增长速度也是最快的; 压缩比大于 0.5 之后, 五种不同测量矩阵的增长速度趋于平缓, 从整体的增长趋势上看, MBM 的恢复效果要优于其他四种测量矩阵.

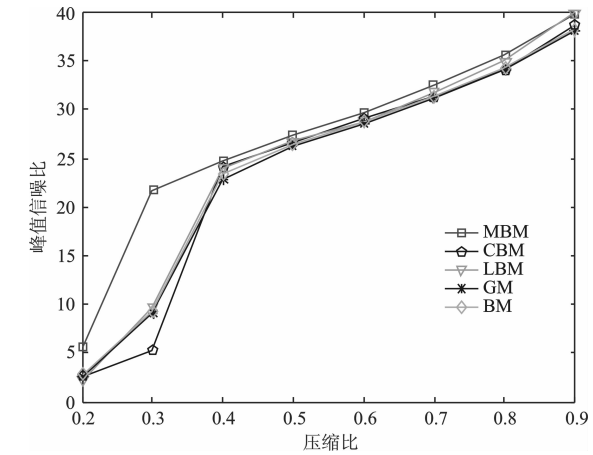


图 7 不同测量矩阵的峰值信噪比对比图

6 结束语

本文提出了一种基于混合混沌序列的测量矩阵构造算法. 该算法采用的混和混沌序列是由 Logistic 混沌序列和 Chebyshev 混沌序列异或生成, MBM 测量矩阵克服了随机测量矩阵的不稳定性及在硬件和存储空间上的不足, 易于硬件实现. 仿真实

验分析表明,该算法构造的测量矩阵具有与其他四种测量矩阵类似的性质,不仅提高了信号的重构成功率,还提升了图像还原的效果.后期将对MBM测量矩阵的优化展开研究,使其能够达到更好的重构效果.

参考文献:

- [1] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306. DOI: 10.1109/TIT.2006.871582.
- [2] BARANIUK R G. Compressive sensing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(4): 118-121. DOI: 10.1109/MSP.2007.4286571.
- [3] CANDÉS E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30. DOI: 10.1109/MSP.2007.914731.
- [4] YU L, BARBOT J P, ZHENG G, et al. Compressive sensing with chaotic sequence[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2010, 17(8): 731-734. DOI: 10.1109/LSP.2010.2052243.
- [5] FRUNZETE M, YU L, BARBOT J P, et al. Compressive sensing matrix designed by tent map, for secure data transmission[C]//Proceedings of 2011 Signal Processing Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications SPA. Poznan: IEEE, 2011: 1-6.
- [6] 栗娟, 李智, 李健. 基于切比雪夫扩频序列的测量矩阵构造算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2015, 47(S2): 155-160. DOI: 10.15961/j.jsuese.2015.s2.024.
SU J, LI Z, LI J. Measurement matrix construction algorithm based on chebyshev spreading sequence[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(S2): 155-160. DOI: 10.15961/j.jsuese.2015.s2.024.
- [7] 周伟, 景博, 张航, 等. 一种基于复合混沌映射的压缩感知测量矩阵构造方法研究[J]. 电子学报, 2017, 45(9): 2177-2183. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.018.
ZHOU W, JING B, ZHANG H, et al. Construction of measurement matrix in compressive sensing based on composite chaotic mapping[J]. Acta Electronica Sinica, 2017, 45(9): 2177-2183. DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.09.018.
- [8] 韩公飞. 基于混沌理论的压缩感知测量矩阵的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
HAN G F. Research on the measurement matrix of compressed sensing based on chaos theory[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.
- [9] GAN H P, XIAO S, ZHAO Y M. A novel secure data transmission scheme using chaotic compressed sensing[J]. IEEE Access, 2018(6): 4587-4598. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2780323.
- [10] ZHU S Q, ZHU C X, WANG W H. A novel image compression-encryption scheme based on chaos and compression sensing[J]. IEEE Access, 2018(6): 67095-67107. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2874336.
- [11] AL-AZAWI M K M, GAZE A M. Combined speech compression and encryption using chaotic compressive sensing with large key size[J]. IET Signal Processing, 2018, 12(2): 214-218. DOI: 10.1049/iet-spr.2016.0708.
- [12] 罗沅, 党娇娇, 宋祖勋, 等. 离散混沌测量矩阵构造及其性能研究[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(4): 749-755. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2020.04.03.
LUO Y, DANG J J, SONG Z X, et al. Construction and performance research of discrete chaotic measurement matrix[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(4): 749-755. DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2020.04.03.
- [13] WU Y, ZHOU Y C, BAO L. Discrete wheel-switching chaotic system and applications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(12): 3469-3477. DOI: 10.1109/TCSI.2014.2336512.
- [14] 刘蕾. 傅里叶变换的红外舰船图像复原方法[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(20): 169-171.
LIU L. Infrared image reconstruction method based on Fourier transform[J]. Ship Science and Technology, 2008, 40(20): 169-171.
- [15] 潘榕, 刘昱, 侯正信, 等. 基于局部DCT系数的图像压缩感知编码与重构[J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 674-681. DOI: 10.3724/SP.J.1004.2011.00674.
PAN R, LIU Y, HOU Z X, et al. Image coding and reconstruction via compressed sensing based on partial DCT coefficients[J]. Acta Automatica Sinica, 2011, 37(6): 674-681. DOI: 10.3724/SP.J.1004.2011.00674.
- [16] 魏巍. 混沌序列在扩频通信中的研究[D]. 成都: 西华大学, 2011.
WEI W. The studies of chaotic sequences in spread spectrum communication[D]. Chengdu: Xihua University, 2011.
- [17] 赖强. 混沌分析及其反控制研究[D]. 武汉: 华中科技大学

- 大学, 2014.
- LAI Q. Analysis and anti-control of chaos[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.
- [18] 凌聪, 孙松庚. Logistic 映射扩频序列的相关分布[J]. 电子学报, 1999, 27(1): 140-141. DOI: CUKI; SUN: EZXU, 0. 1999-01-037.
- LING C, SUN S G. Correlation distribution of spreading sequences by logistic maps[J]. Acta Electronica Sinica, 1999, 27(1): 140-141. DOI: CUKI; SUN: EZXU, 0. 1999-01-037.
- [19] 韩晓娟. 基于混沌序列的扩频通信系统的研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013.
- HAN X J. Research of the spread spectrum communication system based on the chaotic sequence[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013.
- [20] 赵晓丰. 基于级联法构造的混沌扩频序列的研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- ZHAO X F. Research and design on chaotic spread spectrum sequence base on cascade[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [21] ZHANG Y P, ZHANG G X, ZHOU Z M. A fast algorithm of compressed sensing for 2D signals[J]. IE-TE Technical Review, 2016, 33(5): 455-465. DOI: 10.1080/02564602.2015.1117401.

作者简介:

李雪珍 女, (1995-), 硕士. 研究方向为压缩感知.

凌永发(通讯作者) 男, (1972-), 博士, 教授. 研究方向为压缩感知、无线传感器网络. E-mail: yfling73@163.com.