

DOI:10.11992/tis. 201606037

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20170404.1218.002.html>

易于硬件实现的压缩感知观测矩阵的研究与构造

李霞丽, 吴立成, 樊艳明

(中央民族大学 信息工程学院, 北京 100081)

摘要:在压缩感知过程中,观测矩阵在信号采样及重构中具有重要作用,构造易于硬件实现、结构简单且占内存较小的观测矩阵是压缩感知理论能否实际应用的关键问题之一。提出两种易于硬件实现的观测矩阵,即顺序部分哈达玛观测矩阵和循环伪随机观测矩阵,其中循环伪随机观测矩阵可分为循环 m 序列和循环 gold 序列,并证明了伪随机序列所构造的观测矩阵满足有限等距准则。为验证上述两种观测矩阵性能,对二维图像信号进行仿真,结果表明,在较低的采样率下顺序部分哈达玛观测矩阵的重构效果最优,但是采样信号长度必须是 2 的 k 次幂;循环伪随机观测矩阵的重构效果虽然弱于顺序部分哈达玛观测矩阵,但是明显优于高斯随机观测矩阵,克服了顺序部分哈达玛观测矩阵观测信号必须是 2 的 k 次幂的限制。提出的两种观测矩阵易于硬件实现,避免了随机矩阵的不确定性且克服了随机矩阵浪费存储资源的缺陷,具有良好的实际应用价值。

关键词:图像处理;机器视觉;压缩感知;采样及重构;观测矩阵;顺序部分哈达玛;循环伪随机矩阵;有限等距

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4785(2017)03-0279-07

中文引用格式:李霞丽,吴立成,樊艳明.易于硬件实现的压缩感知观测矩阵的研究与构造[J].智能系统学报,2017,12(3):279-285.

英文引用格式:LI Xiali, WU Licheng, FAN Yanming. Study and construction of a compressed sensing measurement matrix that is easy to implement in hardware[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2017, 12(3): 279-285.

Study and construction of a compressed sensing measurement matrix that is easy to implement in hardware

LI Xiali, WU Licheng, FAN Yanming

(School of Information Engineering, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

Abstract: In the compressed sensing process, the measurement matrix plays a significant role in signal sampling and reconstruction. Therefore, a measurement matrix that is simple in structure, has a small memory, and is easy to implement in hardware is the key to applying compressed sensing theory. Based on the partial Hadamard measurement matrix and a circulating pseudo-random sequence, this paper presents two measurement matrixes that are easy to implement in hardware, namely the sequence partial Hadamard measurement matrix and the recycled pseudo-random sequence measurement matrix. The latter consists of a recycled m sequence and a recycled gold sequence measurement matrix. This further proves that a measurement matrix constructed by a pseudo-random sequence complies with the RIP principle. To test the performance of the two measurement matrixes, a two-dimensional image signal was simulated. It was found that under a low sampling rate, the reconstruction of the sequence partial Hadamard measurement matrix is optimal provided that the length of the sampling signal is 2^k . Although reconstruction of the recycled pseudo-random sequence measurement matrix is inferior to the sequence partial Hadamard measurement matrix, it exceeds the Gaussian random measurement matrix, and also overcomes the sequence partial Hadamard measurement matrix's limitation of a 2^k signal length. These two types of measurement matrix are easy to implement in hardware, and avoid the uncertainty and storage waste of a random matrix. Therefore, they are suitable for practical application.

Keywords: image processing; machine vision; compressed sensing; sampling and reconstruction; measurement matrix; sequence partial Hadamard; sequence pseudo-random; restricted isometry property

压缩感知(compressed sensing, CS)^[1-3]通过利用信号的稀疏特性,在远小于 Nyquist 采样率的条件

下,用随机采样获取信号的离散样本,然后通过非线性重建算法重建信号。由于压缩感知理论具有“轻编码、重解码”的特点,压缩感知理论应用到低功耗无线传输的硬件系统中是一个比较合理的选择。压缩感知主要解决的 3 个问题分别为信号的稀

疏表示、观测矩阵的构造以及重构算法的设计^[4]。观测矩阵性能的好坏直接关系到是否可以精确重构出原始的数据,因此观测矩阵在压缩感知过程中的数据采样和信号重构环节起着至关重要的作用。

目前,从观测矩阵元素构造分析,观测矩阵可分为两类:1)随机观测矩阵,如高斯随机、伯努利等,元素都服从相互独立的同分布,与稀疏矩阵的非相干性较强,能够以较大的概率满足 RIP^[5]条件,但是计算量和时间复杂度较大,存储量大的缺点使其难以在硬件上实现;2)确定性观测矩阵,如托普利兹矩阵、多项式矩阵等^[6-7],它们元素确定且结构固定,适合硬件实现,但是重建效果一般。另外,还有一些针对特定信号的测量矩阵,例如部分哈达玛观测矩阵^[8]、雷达信号的卷积观测矩阵^[9]、语音信号的观测矩阵^[10]等。虽然这些矩阵在特定条件下优于高斯随机观测矩阵,但是其普适性不高,比如部分哈达玛观测矩阵的观测数据必须是2的 k 次幂。目前,也有学者基于伪随机序列来构建观测矩阵^[11-15],并验证了伪随机序列的性能要优于高斯随机矩阵,但是相关观测矩阵的构造方式较为烦琐。因此,需要研究易于硬件实现、构造简单且重构效果较好的观测矩阵,这种研究对于压缩感知理论能够应用于实际具有重要价值。

本文在深入研究确定性观测矩阵的基础上,对在硬件上容易实现且重构效果好的观测矩阵进行重点研究。首先,针对部分哈达玛观测矩阵提出一种改进的构造方式,即顺序选取行向量构造观测矩阵,经过仿真验证采用这种简单的构造方式,在相同的重构算法下信号重构效果更优。然后,依据伪随机序列的特点和循环思想,提出了构造简单的观测矩阵——循环 m 序列观测矩阵和循环gold序列观测矩阵。最后,经过仿真验证本文所提出的两种观测矩阵具有良好的适应性和实用性。

1 观测矩阵的改进与构造

目前,嵌入式硬件系统面临的主要问题包括能源受限、计算能力较弱、存储有限。因此,设计易于硬件实现的观测矩阵需要遵循如下原则:

- 1) 观测矩阵的存储空间较少,元素简单;
- 2) 计算尽量只涉及加减法,元素必须是实数;
- 3) 观测矩阵与稀疏矩阵不相干性较强;
- 4) 能够快速采样和重建。

确定性观测矩阵如托普利兹、哈达玛等,它们的元素都是由 ± 1 或者0、1构成,矩阵的计算只涉及

加减法运算,没有复杂的乘法运算,因此,确定性观测矩阵的这些优势可以作为构造易于硬件实现观测矩阵的出发点。

1.1 顺序部分哈达玛观测矩阵的构造

部分哈达玛观测矩阵具有优良的观测性能,可以在更少的观测值下重构出原始信号,并且在同样采样率下,信号的重构效果明显优于其他观测矩阵。哈达玛矩阵的元素由1和-1构成,其构造过程如下:

$$H_1 = [1] \quad (1)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$H_4 = \begin{bmatrix} H_2 & H_2 \\ H_2 & -H_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$H_N = H_{2^n} = H_2 \times H_{2^{n-1}} = \begin{bmatrix} H_{2^{n-1}} & H_{2^{n-1}} \\ H_{2^{n-1}} & -H_{2^{n-1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{\frac{N}{2}} & H_{\frac{N}{2}} \\ H_{\frac{N}{2}} & -H_{\frac{N}{2}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

由上述构造过程可以发现,其构造方式是生成 $N \cdot N$ 大小的哈达玛正交矩阵, $N=2^k, k=1, 2, \dots$,然后在随机选取 M 行后,形成 $M \cdot N$ 大小的部分哈达玛观测矩阵,但是通过此种方式所构成的观测矩阵与稀疏矩阵之间的非相干性会减弱。在重点分析哈达玛观测矩阵后,本文提出一种简化的构造方式,即在选取 M 行向量时,不是随机选取,而是连续顺序选取,比如可以选取 $1:M$ 行或者 $N-M+1:N$ 行向量形成观测矩阵,这样形成的观测矩阵更能保持哈达玛矩阵的正交性和不相干性,并且构造方式简单更加易于硬件实现,仿真结果表明这种构造方式能够达到更好的重构效果,仿真结果详见3.1节。本文将顺序选取行向量构造的部分哈达玛观测矩阵称为顺序部分哈达玛观测矩阵。

1.2 循环伪随机序列观测矩阵的构造

部分哈达玛矩阵虽然能够在采样率较低的情况下精确重建原始信号,但是信号的长度必须是2的 k 次幂,应用范围受到了限制。有没有既可以突破信号长度限制又可以满足 RIP 条件和非相干性原则的确定性观测矩阵呢?

已有相关文献证明,当观测矩阵 Φ 的元素满足式(5)和式(6)平衡均匀分布时,能够满足 RIP 条件^[16-20]。比如部分哈达玛矩阵就是满足式(5)的特殊均匀分布的观测矩阵,其中元素 ± 1 各占1/2。

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} -1, & p = \frac{1}{2} \\ 1, & p = \frac{1}{2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\varphi_{i,j} = \begin{cases} -\frac{1}{\sqrt{3}}, & p = \frac{1}{6} \\ 0, & p = \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{3}}, & p = \frac{1}{6} \end{cases} \quad (6)$$

本文将伪随机序列 m 序列和 gold 序列作为压缩感知观测矩阵构造的突破点,提出一种由简单的 m 序列和 gold 序列构造观测矩阵的方式。

如果一个序列,一方面它是可以预先确定的,并且是可以重复地生产和复制的,另一方面它又具有某种随机序列的随机特性(即统计特性),这种序列即为伪随机序列。伪随机序列又称为伪噪声序列,即 PN 码,它具有 3 个特点:

- 1) 序列中各元素接近等概率出现,即元素 0 与 1 出现的个数相差不超过 1 个;
- 2) 序列中连续出现相同元素被称为游程,在同长度的游程中,“0”的游程数和“1”的游程数大致相等;
- 3) 具有类似白噪声的自相关特性。

m 序列和 gold 序列同属于伪随机序列,满足上述序列的特点。 m 序列是最长线性移位寄存器序列,线性移位寄存器是由移位寄存器加上反馈系数后所产生的(见图 1),反馈系数 c_i 一旦确定,产生的 m 序列就确定了。产生的 m 序列根据反馈系数不同而变化,序列的长度与线性移位寄存器(反馈系数)的级数有关,即长度 $\text{len} = 2^n - 1$ 。每一个级数 n 都有一个与之对应的多项式:

$$f(x) = \sum_i^n c_i x^i \quad (7)$$

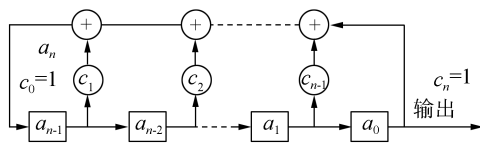


图 1 n 位线性反馈移位寄存器结构

Fig.1 n -bit linear feedback shift register structure

多项式(7)为级数 n 的本原多项式,即反馈系数多项式。文中讨论的序列均由(0,1)或者(-1,1)组成,这两种序列所产生伪随机序列的相关性是相同的,本文构成的观测矩阵元素选用的是(-1,1)。

根据 m 序列的性质所生成序列 1 元素比 -1 元素多一个,可以认为各个元素都占 1/2,因此可以推测 m 序列构成的观测矩阵能够精确重建原始信号。

如果把两个码长相等,码速相同的 m 序列发生器产生的优选对序列作模 2 加运算,生成的新的码序列即为 gold 序列。每改变两个 m 序列相对位移就可得到一个新的 gold 序列。因为总共有 $2^n - 1$ 个不同的相对位移,加上原来的两个 m 序列本身,所以两个 n 级移位寄存器可以产生 $2^n + 1$ 个 Gold 序列。该序列的自相关函数具有三值特性,虽然这三个值出现的概率不同,却仍然具有良好的自相关和互相关特性,生产的序列 -1 和 1 的次数相差不大,可以近似认为各占 1/2,而且形成 gold 序列的数量要比 m 序列大很多,一对 m 序列优选对就能够生成 $2^n + 1$ 条 gold 码,这也是 gold 序列的优点之一。

简单地介绍了上述两种序列的产生过程和性质,下面详细介绍用 m 序列和 gold 序列构造观测矩阵的具体方法。

m 序列观测矩阵构造方法,主要利用循环矩阵的思想,将生成的 m 序列每次循环右移一位,构成 N 列,最后再顺序选取 M 行构成观测矩阵。

- 1) 首先生成周期 $L = 2^n - 1$ 的 m 序列(元素为 ± 1),其中 $L > N$ (N 为原始信号长度),作为观测矩阵的第一列;
- 2) 将 m 序列元素循环右移一位,产生新的序列,作为观测矩阵的第二列;
- 3) 依次将前一行的 m 序列右移一位,产生新的序列,作为观测矩阵的下一列;
- 4) 重复步骤 3,直到生成 N 列,构成 $L \times N$ 的矩阵;
- 5) 顺序选取 $1:M$ 行构成观测矩阵 M_x 。

生成的矩阵形式如式(8)所示,可以看成循环 m 序列矩阵,本文称为循环 m 序列观测矩阵。

$$M_x = \begin{bmatrix} m_1 & m_n & \cdots & m_n \\ m_2 & m_1 & \cdots & m_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_n & m_{n-1} & \cdots & m_1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Gold 序列观测矩阵的构造方法与循环 m 序列观测矩阵类似。利用循环矩阵的思想生成 gold 序列观测矩阵的步骤如下:

- 1) 首先生成周期 $L = 2^n - 1$ 的 gold 序列(元素为 ± 1),gold 序列是两个 m 序列优选对,其中 $L > N$ (原始信号长度),作为观测矩阵的第 1 列;
- 2) 将 m 序列元素循环右移一位,产生新的序

列,作为观测矩阵的第 2 列;

3)其他步骤参见循环 m 序列观测矩阵的构造方法。

生成的矩阵形式如式(9)所示,同样可以看成循环 gold 序列矩阵,本文称为循环 gold 序列观测矩阵。

$$\mathbf{G}_x = \begin{bmatrix} g_1 & g_n & \cdots & g_n \\ g_2 & g_1 & \cdots & g_{n-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ g_n & g_{n-1} & \cdots & g_1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

上述步骤中之所以要顺序选取 M 行向量构成观测矩阵,也是出于计算能力的考虑,毕竟嵌入式系统硬件计算能力较弱,随机选取会增加计算消耗。

2 伪随机观测矩阵相关证明

m 序列和 gold 序列都是伪随机序列,1 与 0 出现的概率约为 1/2,可以认为伪随机序列是二值序列,因此由伪随机序列构成的观测矩阵元素是服从均匀分布的。上一个章节已经说明,当观测矩阵 Φ 满足式(5)分布时,将以极大的概率满足 RIP 条件。本文可以将按照式(5)分布的观测矩阵划分为两个随机二进制矩阵:

$$\Phi_s = \Phi_a - \Phi_b \quad (10)$$

压缩感知观测过程为

$$\mathbf{y} = \Phi_x \quad (11)$$

将其等价成如下形式:

$$y_i = \langle x, \varphi_i \rangle, i = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

则对于每一个观测值有

$$y_i(x, \Phi_s) = y_i(x, \Phi_a) - y_i(x, \Phi_b), \quad 1 \leq i \leq n \quad (13)$$

由式(13)可以看出,当 Φ_s 获取原始信号 x 的全部信息时, Φ_a 只获取了一部分信息。假设 Φ_s 所获取的信息量为 1,则当 n 足够大的时候, Φ_a 获取的信息量将以(14)式所示的概率变化:

$$1 - (1/2)^n = 1 - 2^{-n} \quad (14)$$

最终获得的信息量也接近 1。根据文献[14-15]可以得出结论: Φ_a 是一个服从随机二值分布的大小为 $n \times N$ 的矩阵,给定 $n, N, \delta \in (0, 1)$ 和 $k \leq cn/\log_2(N/k)$,存在 $c_1, c_2 > 0$,则当存在一个相应的服从式(5)的随机均匀分布矩阵 Φ_s 以概率 $p \geq 1 - 2\exp(-nc_2)$ 满足 RIP 时,随机二进制矩阵 Φ_a 能使可压缩信号以概率 $p \geq [1 - 2\exp(-nc_2)](1 - 2^{-n})$ 精确重构。其中:

$$c_2 \leq \frac{(3\delta^2 - \delta^3)}{48} - c_1 \left[1 + \frac{\log_2(12/\delta)}{\log_2(N/k)} \right] \quad (15)$$

式中 k 为信号的稀疏度。

从矩阵的构造方法来看,循环 m 序列和循环 gold 序列观测矩阵具有良好的互相关特性,与非相干性条件恰好吻合,由于构造的观测矩阵满足一定的线性独立随机性,符合观测传感对观测矩阵的要求。

3 仿真验证与分析

本文通过改进部分哈达玛观测矩阵的构造方式,构造了顺序部分哈达玛观测矩阵;利用伪随机序列中的 m 序列和 gold 序列的特性构造了循环 m 序列和循环 gold 序列观测矩阵,并给出了简单的数学证明来说明伪随机序列可以作为观测矩阵。下面通过仿真来验证所构造的观测矩阵的性能。首先,将顺序部分哈达玛矩阵与部分哈达玛矩阵进行对比;然后,将所构造的循环伪随机序列的可用性与其他观测矩阵进行对比;最后,将所构造的观测矩阵在常用重构算法上进行对比分析。

本文仿真采用二维 Lena 标准图像进行分块压缩采样和重建,选取大小为 8×8 块,采用离散余弦变换(DCT)进行稀疏变换,采样率分别为 0.25, 0.5 和 0.75。

3.1 顺序部分哈达玛观测矩阵仿真分析

对顺序部分哈达玛观测矩阵进行仿真实验分析,重建算法选用的是正交匹配追踪(OMP)算法,其仿真结果如表 1 所示。

表 1 重构图像 PSNR 值

Table 1 PSNR value of reconstructed image	dB		
部分哈达玛矩阵	0.25	0.5	0.75
顺序 1:M	25.10	29.82	29.92
顺序 N-M+1:N	25.06	29.82	29.92
随机选取	20.07	24.92	29.37

通过表 1 可以看出,当采样率较低时,顺序部分哈达玛观测矩阵重建后图像的 PSNR 值要比随机选取的部分哈达玛矩阵明显高出近 5 dB;当采样率较高时,两者之间的差距就不大了。这种顺序选取的部分哈达玛矩阵,结构固定,无需多次测量,可以在采样率较低的情况下达到很好的重构效果。另外,哈达玛观测矩阵存在蝶型快速算法,非常适用于硬件系统,从而减少系统的能源消耗,为硬件实现压缩感知原理提供了较好的支持。

3.2 循环伪随机序列构造的观测矩阵可用性验证

文中简单证明了循环伪随机可以作为观测矩阵的理论可能性,下面通过仿真来验证构造的观测矩阵的适应性和实用性。表2列出了高斯随机观测矩阵、托普利兹观测矩阵、顺序部分哈达玛观测矩阵的对比结果,重建算法选用的是OMP算法;并且展示了这几种观测矩阵在不同采样率下,重建后的图像的PSNR值。

表2 同观测矩阵重构时的PSNR值

Table 2 PSNR value of different measurement matrix reconstruction dB					
采样率	高斯随机	托普利兹	顺序部分哈达玛	循环m序列	循环gold序列
0.25	16.31	20.91	25.10	20.56	20.09
0.50	23.56	24.30	29.82	24.98	24.66
0.75	27.76	28.40	29.97	29.69	29.17

图2展示了采样率为0.25时,各观测矩阵采样时重建的图像仿真效果图。由表2和图2可知,当采样率较低时,顺序部分哈达玛的观测效果最佳,比高斯随机矩阵高出将近9 dB,其他确定性观测矩阵也比高斯随机矩阵高出4 dB;当采样率提升到0.50时,顺序部分哈达玛矩阵也要高出6 dB,而其他观测矩阵也高出1 dB;随着采样率提高到0.75时,各个观测矩阵的重建效果差距就较小了。通过仿真结果可以看出,在采样率较低时,确定性观测矩阵的重建效果较好,其中改进的顺序部分哈达玛矩阵采样效果最好,而构造的循环伪随机(循环m序列和循环gold序列)观测矩阵也表现出较好的采样效果。



图2 采样率为0.25时仿真结果图
Fig.2 Simulation result at sampling rate 0.25

3.3 构造的观测矩阵在常用重构算法上的对比分析

仿真实验依然沿用上文的条件,测试图像为256×256的Lena图像,重构算法选用的是求解最小 l_0 -范数和 l_1 -范数各类别中有代表性的BP算法、OMP算法以及OMP算法的改进算法分段正交匹配追踪算法(StOMP),对比的观测矩阵包括高斯随机矩阵、顺序部分哈达玛矩阵、循环m序列矩阵和循环gold序列矩阵,m序列采用7级反馈系数,选用的本原多项式为 $f(x)=x^7+x^6+x^3+x^1$,即各寄存器的初始状态为[1 1 0 0 1 0 1]。

本次仿真与上文不同的是,稀疏基为小波变换,每次处理256个像素,采样率从0.2到0.8变化,步长为0.05。高斯随机观测矩阵、顺序部分哈达玛观测矩阵、循环m序列观测矩阵和循环gold序列观测矩阵在不同的重建算法下的PSNR仿真结果分别如图3~6所示。

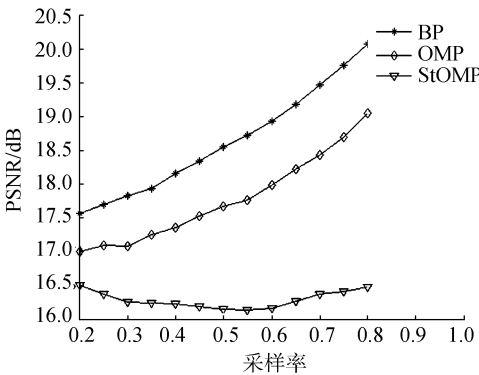


图3 高斯随机矩阵在不同重建算法下的PSNR仿真结果
Fig.3 PSNR simulation result of Gaussian random matrix under different reconstruction algorithm

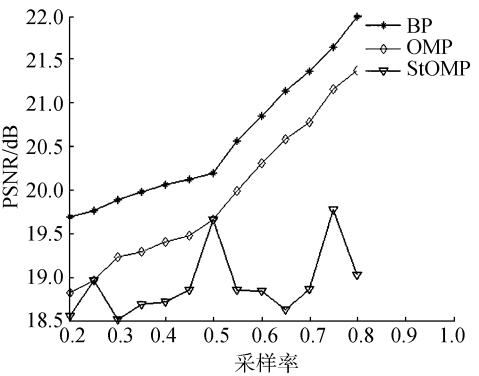


图4 顺序部分哈达玛矩阵在不同重建算法下的PSNR仿真结果
Fig.4 PSNR simulation result of partial order Hadamard matrix under different reconstruction algorithm

由图3~6可知,顺序部分哈达玛观测矩阵的重建效果最好,比高斯随机矩阵高出近2 dB,4种观测矩阵在BP算法和OMP算法上的重建效果总体趋

势一样,都是随着采样率的提升而提升,在 StOMP 算法上顺序部分哈达玛观测矩阵重建效果成跳跃变化,而其他两种观测矩阵重建效果趋于稳定提高。循环伪随机观测矩阵的重建效果也要优于高斯随机矩阵。

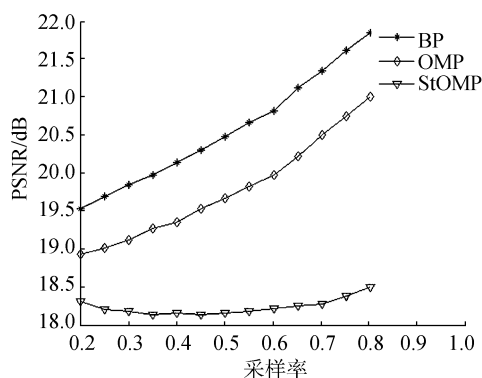


图5 循环 m 序列矩阵的 PSNR 仿真结果

Fig.5 PSNR simulation result of recycled m sequence measurement matrix

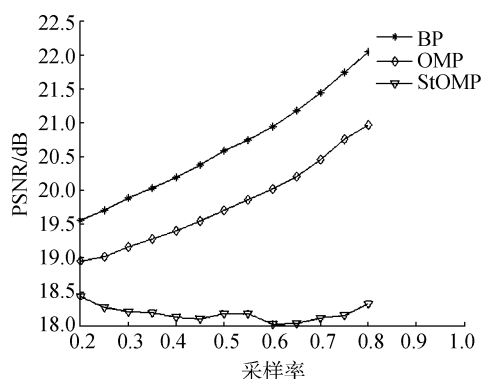


图6 循环 gold 序列矩阵在不同重建算法下的 PSNR 仿真结果

Fig.6 PSNR simulation result of recycled gold sequence measurement matrix under different reconstruction algorithm

本文对 4 种观测矩阵在重建算法重构时间上进行对比分析,如表 3 所示。

表 3 观测矩阵重建耗时对比表

Table 3 Construction consuming time comparison among different measurement matrix

观测矩阵名称	BP	OMP	StOMP
高斯随机	33.5	4.4	3.2
顺序部分哈达玛	19.8	2.7	2.6
循环 m 序列	28.4	3.6	2.8
循环 gold 序列	28.8	3.7	2.9

表 3 是在采样率为 0.6 条件下的记录,通过表 3 对比分析,可以得出在同等条件下顺序部分哈达玛矩阵和循环伪随机序列矩阵的重建运行时间要比

高斯随机矩阵少。由上述对比可以验证,顺序部分哈达玛矩阵和循环伪随机序列矩阵的性能要优于高斯随机观测矩阵。

4 结束语

本文针对嵌入式硬件系统能源有限,存储较小,计算能力差的特点,提出了两种易于硬件实现,且占内存较小的观测矩阵,即顺序部分哈达玛观测矩阵和循环伪随机观测矩阵(循环 m 序列矩阵和循环 gold 序列矩阵)。经过仿真分析可知,这两类观测矩阵在重建效果上要比高斯随机矩阵优越。另外,这两类矩阵在构造上也比较简单,具有递推特性,易于硬件实现,避免了随机矩阵的不确定性且克服了随机矩阵浪费存储资源的缺陷,节省大量存储空间。其中,循环伪随机观测矩阵还克服了部分哈达玛矩阵对信号长度的限制,构造的观测矩阵不但具有一定的理论意义,还为硬件实现压缩感知观测矩阵提供了一种新的思路,具有良好的实际应用价值。

参考文献:

- [1] CANDES E, ROMBERG J. Robust signal recovery from incomplete observations [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing. Atlanta, GA: IEEE, 2006: 1281-1284.
- [2] CANDES E J, TAO T. Decoding by linear programming[J]. IEEE transactions on information theory, 2005, 51(12): 4203-4215.
- [3] DONOHO D L. Compressed sensing[J]. IEEE transactions on information theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [4] 戴琼海,付长军,季向阳. 压缩感知研究[J]. 计算机学报, 2011, 34(3): 425-434.
- DAI Qionghai, FU Changjun, JI Xiangyang. Research on compressed sensing [J]. Chinese journal of computers, 2011, 34(3): 425-434.
- [5] CANDES E J, TAO T. Near-optimal signal recovery from random projections: universal encoding strategies? [J]. IEEE transactions on information theory, 2007, 52(12): 5406-5425.
- [6] HAUPT J, BAJWA W U, RAZ G, et al. Toeplitz compressed sensing matrices with applications to sparse channel estimation [J]. IEEE transactions on information theory, 2010, 56(11): 5862-5875.
- [7] DEVORE R A. Deterministic constructions of compressed sensing matrices[J]. Journal of complexity, 2007, 23(4/5/6): 918-925.

- [8] 蒋留兵, 黄韬, 沈翰宁, 等. 基于局部随机化哈达玛矩阵的正交多匹配追踪算法[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(5): 914-919.
JIANG Liubing, HUANG Tao, SHEN Hanning, et al. Orthogonal multi matching pursuit algorithm based on local randomized Hadamard matrix[J]. Systems engineering and electronics, 2013, 35(5): 914-919.
- [9] 刘记红, 徐少坤, 高勋章, 等. 基于随机卷积的压缩感知雷达成像[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(7): 1485-1490.
LIU Jihong, XU Shaokun, GAO Xunzhang, et al. Compressed sensing radar imaging based on random convolution[J]. Systems engineering and electronics, 2011, 33(7): 1485-1490.
- [10] 徐皓波, 于凤芹. 基于稀疏预处理和循环观测的语音压缩感知[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(23): 220-224.
XU Haobo, YU Fengqin. Speech compressed sensing based on sparse pre-treatment and circulant measurement[J]. Computer engineering and applications, 2014, 50(23): 220-224.
- [11] 党骅, 马林华, 田雨, 等. M 序列压缩感知测量矩阵构造[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2015(2): 186-192.
DANG Kui, MA Linhua, TIAN Yu, et al. Construction of the compressive sensing measurement matrix based on m sequences[J]. Journal of Xidian University: Natural Science, 2015(2): 186-192.
- [12] 王学伟, 崔广伟, 王琳, 等. 基于平衡 GOLD 序列的压缩感知测量矩阵的构造[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 97-102.
WANG Xuewei, CUI Guangwei, WANG Lin, et al. Construction of measurement matrix in compressed sensing based on balanced Gold sequence[J]. Chinese journal of scientific instrument, 2014, 35(1): 97-102.
- [13] BARANIUK R, DAVENPORT M, DEVORE R, et al. A Simple proof of the restricted isometry property for random matrices[J]. Constructive approximation, 2008, 28(3): 253-263.
- [14] ZHANG G S, JIAO S H, XU X L, et al. Compressed sensing and reconstruction with bernoulli matrices[C]// Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). Harbin: IEEE, 2010: 455-460.
- [15] ZHANG G S, JIAO S H, XU X L. Compressed sensing and reconstruction with Semi-Hadamard matrices[C]// Proceedings of 2010 2nd International Conference on Signal Processing Systems (ICSPPS). Dalian: IEEE, 2010: V1-194-V1-197.
- [16] SONG, YUN CAO Wei, SHEN Yanfei, et al. Compressed sensing image reconstruction using intra prediction[J]. Neurocomputing, 151(3): 1171-1179.
- [17] WU X, HUANG G, WANG J, et al. Image reconstruction method of electrical capacitance tomography based on compressed sensing principle[J]. Measurement science and technology, 2013, 24(7): 075-085.
- [18] LANGET H, RIDDELL C, TROUSSET Y, et al. Compressed sensing dynamic reconstruction in rotational angiography[J]. Med image comput assist interv, 2012, 7510(1): 223-230.
- [19] SHCHUCKINA A, KASPRZAK P, DASS R, et al. Pitfalls in compressed sensing reconstruction and how to avoid them[J]. Journal of biomolecular Nmr, 2016: 1-20.
- [20] PARK JY, YAP HL, ROZELL CJ, et al. Concentration of measure for block diagonal matrices with applications to compressive signal processing[J]. IEEE transactions on signal processing, 2011, 59(12): 5859-5875.

作者简介:



李霞丽,女,1979年生,副教授,研究方向为计算机博弈、智能系统及其应用。主持国家自然科学基金项目1项,发表学术论文20余篇,出版专著1部。



吴立成,男,1972年生,教授,主要研究方向为智能系统及其应用、机器人。主持国家级项目5项,发表学术论文50余篇,出版专著2部。



樊艳明,男,1991年生,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。发表学术论文3篇。