

文章编号:1004-4213(2011)09-1322-6

# 托普利兹-循环块相位掩膜矩阵压缩成像

张成, 杨海蓉, 韦穗

(安徽大学 计算智能与信号处理重点实验室, 合肥 230039)

**摘 要:**在托普利兹和循环矩阵的基础上,提出一种新的托普利兹-循环块相位掩膜矩阵可压缩双透镜成像方法.模拟实验结果表明:新的相位掩膜矩阵压缩成像可以在显著减少测量的同时,有效地捕获图像信息来重建原始图像;新相位掩膜矩阵的研究为确定性测量在压缩成像领域的应用提供了更多的支撑,在拥有原托普利兹和循环确定性测量优点的同时,还拥有自身的块结构特点,可以进一步减少物理实现成本,为新的照相机的设计提供若干理论、计算和技术支撑.

**关键词:**压缩传感;压缩成像;相位掩膜;确定性测量;托普利兹-循环块矩阵

中图分类号:TN911.74

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114009.1322

## 0 引言

Shannon/Nyquist 采样定理是半个多世纪以来信号获取的基础,其核心思想是信号可以以其带宽的两倍采样重建原始信号.最近出现的压缩传感(Compressive Sensing, CS)表明:假设信号在某个变换域上稀疏或可压缩,那么 CS 理论可以保证从少量数目的线性和非适应性测量中准确恢复一个稀疏信号.在模拟-数字转换应用领域,压缩传感已经改变工程师关于信号获取的思考方式.

压缩成像(Compressive Imaging, CI)是压缩传感理论的一个重要研究领域.目前关于压缩成像方面的研究很多,比较重要的有单像素摄像机<sup>[1-2]</sup>、单视点压缩成像<sup>[3]</sup>、压缩编码孔径成像<sup>[4-5]</sup>和压缩雷达成像<sup>[6-9]</sup>等.目前的压缩成像研究中多数是采用随机投影作为测量矩阵,如 Gaussian 或 Bernoulli 矩阵.但是在不少应用中,因为物理条件的限制,都强调了在测量矩阵  $\Phi$  中降低随机性的需要.近期的理论研究提出某些确定性测量作为压缩传感测量是有效的<sup>[10-14]</sup>.

本文的贡献在于对可压缩双透镜成像方法中的相位掩膜矩阵进行了深入的研究,提出托普利兹-循环块相位掩膜矩阵压缩成像方法.详细比较本文提出的相位掩膜矩阵在可压缩双透镜成像系统中不同测量次数下与随机高斯、托普利兹和循环相位掩膜矩阵的成像效果.此外还测试比较了本文的相位掩

膜矩阵在相同的测量次数和不同噪音条件下成像效果,对于压缩成像理论的研究与实际应用具有积极的意义.

## 1 双透镜相位掩膜压缩成像

对于在某一个基  $\Psi$  上稀疏或可压缩的信号  $f$ ,可以通过解决最小化问题估计系数  $\theta$

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|\theta\|_1, g = \Phi f = \Phi \Psi \theta \quad (1)$$

式中  $\|\theta\|_1 = \sum_{i=1}^N |\theta_i|$ ,  $g = \Phi f$  是测量向量,  $\Phi$  是测量矩阵,  $\Phi \Psi$  是传感矩阵. 通过从所有的系数向量  $\theta$  中选择发现具有最小  $l_1$  范数的  $\hat{\theta}$ , 最终通过  $f = \Psi \hat{\theta}$  重建原图像.

在实际测量过程中,需要考虑到各种误差对成像模型的影响,此时,式(1)就变成

$$\hat{\theta} = \operatorname{argmin} \|\theta\|_1, \|g - \Phi \Psi \theta\|_2 \leq \epsilon \quad (2)$$

图 1 给出使用光学相位掩膜的一种可能光学压缩成像系统,其原理是通过光学相位掩膜对光的不同相位延时实现压缩传感测量中的随机投影算子  $\Phi$ <sup>[3]</sup>. 在此系统中,物体被放在距离透镜  $z_1$  的位置处,在两透镜中间紧贴的是一个满足特定分布的光学相位掩膜,物体发射出来的光经过通过直径为  $D_1$ 、焦距为  $f_{L_1}$  的透镜  $L_1$  聚焦,再经过光学相位掩膜进行随机调制后的散射光经过直径为  $D_2$ 、焦距为  $f_{L_2}$  的透镜  $L_2$  聚集. 散射光到达透镜后面距离为  $z_2$  的一个 CCD 检测阵列. 这里值得注意地是这个系统

**基金项目:**国家自然科学基金(No. 60872106)、安徽大学青年科学研究基金(No. kjqn1010)和高校省级自然科学基金项目(No. KJ2010B017)资助

**第一作者(通讯作者):**张成(1984—),男,博士研究生,主要研究方向为光学成像与相位恢复. Email:question1996@163.com

**导 师:**韦穗(1946—),女,教授,博导,主要研究方向为图像处理与三维全息显示. Email:swei@ahu.edu.cn

**收稿日期:**2011-04-05; **修回日期:**2011-05-18

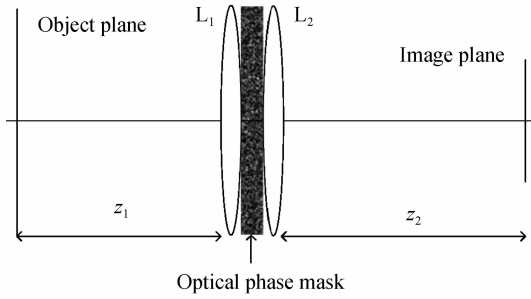


图1 实现CS图像采集的光学系统

Fig.1 Optical setup to implement image acquisition using CS

获得的压缩图像是通过单次曝光拍照获取的。

物体平面上的点  $r_o$  与图像平面上的点  $r_i$  之间关系的可以用式(3)描述

$$u(r_i, r_o) = K_0 \int \left\{ \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda z_1} (r_o - r_\varphi)^2 \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda f_{L_1}} r_\varphi^2 \right] \exp [j\varphi(r_\varphi)] \cdot \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda f_{L_2}} r_\varphi^2 \right] \exp \left[ j \frac{2\pi}{\lambda z_2} (r_i - r_\varphi)^2 \right] \right\} dr_\varphi \quad (3)$$

式中:  $\lambda$  是波长,  $\varphi(r_\varphi)$  是满足一定分布的光学相位掩膜,  $f_{L_1}$  和  $f_{L_2}$  分别是透镜  $L_1$  和  $L_2$  的焦距,  $K_0$  是一个固定的乘法系数. 式(3)定义了输入输出场之间的相互关系. 在CS测量模型中, 式(3)定义了连续随机投影算符  $\Phi$ . 在参考文献[3]中表明如果相关长度  $\rho$  关于成像系统的其他维足够小, 然后离散算符  $u(r_i, r_o)$  就是需要的随机投影.

在实际处理中, 需要对上面的连续算符进行离散化处理. 在均匀网格中,  $f(x_o)$  在点  $x_o = n\Delta_o$ ,  $-N/2 \leq n \leq N/2 - 1, n \in Z$  处的采样和  $g(x_i)$  在点  $x_i = m\Delta_i$ ,  $-M/2 \leq m \leq M/2 - 1, m \in z$  之间的关系通过式(3)的离散形式给出

$$u(m\Delta_i, n\Delta_o) = K_0 \int_{-L/2}^{L/2} \left\{ \exp \left[ j \frac{\pi}{\lambda z_1} (n\Delta_o - \xi)^2 \right] \cdot \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda f_{L_1}} \xi^2 \right] \exp [j\varphi(\xi)] \cdot \exp \left[ -j \frac{\pi}{\lambda f_{L_2}} \xi^2 \right] \exp \left[ j \frac{\pi}{\lambda z_2} (m\Delta_i - \xi)^2 \right] \right\} d\xi \quad (4)$$

式中:  $L$  是光学相位掩膜的大小, 向量  $\mathbf{g}$  由  $M$  个  $g(x_i)$  采样组成, 向量  $\mathbf{f}$  由  $N$  个  $f(x_o)$  采样组成,  $\mathbf{g}$  和  $\mathbf{f}$  关系通过线性方程  $\mathbf{g} = \Phi \mathbf{f}$  描述, 测量矩阵  $\Phi$  是  $M \times N$  大小, 其中的元可以表示为

$$\Phi_{m,n} = u(m\Delta_i, n\Delta_o) \quad (5)$$

本文希望  $\Phi$  实现非相关随机投影, 因此需要  $\Phi$  的列是非相关的. 该需要的物理意义是任意两个物体点的点冲激响应被  $k\Delta_o, k \in Z$  分开.

## 2 托普利兹-循环块相位掩膜矩阵

本节主要讨论可以用于光学相位掩膜的特定分

布. 目前研究压缩传感中使用最多的是采用随机投影进行测量, 即测量矩阵  $\Phi$  是  $M \times N$  大小的随机高斯矩阵, 其中的元素  $a_{i,j} \sim N(0, 1)$  的 i. i. d 高斯分布, 矩阵  $\Phi_{\text{Gauss}}$  有  $MN$  个自由元素. 在理论上, 虽然高斯矩阵随机性最好, 却也因为高斯矩阵由于自由元素太多, 不能实现或实现成本太高, 不利于广泛使用. 由于物理条件的限制, 许多应用领域都强调需要降低测量矩阵  $\Phi$  的随机性. 近期有人提出某些确定性矩阵如  $\Phi_{\text{Toeplitz}}$  和  $\Phi_{\text{Circulant}}$  也可以用来作为测量矩阵<sup>[10-14]</sup>, 它们分别有  $N+M-1$  和  $N$  个自由元素. 本文在现有的托普利兹和循环矩阵的基础上, 提出托普利兹-循环块相位掩膜矩阵  $\Phi_{\text{Toep-Circ}}$ , 其自由元素个数是  $O(k(p+q-1)) \approx O(N+M-1)$ , 各种测量矩阵的具体形式如式(6)~(9)

$$\Phi_{\text{Gauss}} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & \cdots & a_{1,N} \\ a_{2,1} & a_{2,2} & \cdots & a_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{M,1} & a_{M,2} & \cdots & a_{M,N} \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$\Phi_{\text{Toeplitz}} = \begin{pmatrix} a_N & a_{N-1} & \cdots & a_1 \\ a_{N+1} & a_N & \cdots & a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N+M-1} & a_{N+M-2} & \cdots & a_M \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\Phi_{\text{Circulant}} = \begin{pmatrix} a_N & a_{N-1} & \cdots & a_1 \\ a_1 & a_N & \cdots & a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{N-1} & a_{N-2} & \cdots & a_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\Phi_{\text{Toep-Circ}} = \begin{pmatrix} \varphi_k & \varphi_{k-1} & \cdots & \varphi_2 & \varphi_1 \\ \varphi_{k+1} & \varphi_k & \cdots & \varphi_3 & \varphi_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{k+s-1} & \varphi_{s-2} & \cdots & \cdots & \varphi_s \end{pmatrix} \in R^{p \times kq} \quad (9)$$

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} a_q & a_{q-1} & \cdots & a_2 & a_1 \\ a_1 & a_q & \cdots & a_3 & a_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{p-1} & a_{q+p-2} & \cdots & \cdots & a_p \end{pmatrix} \in R^{p \times q} \quad (10)$$

式(10)所表示的矩阵是式(9)中的子矩阵,  $\{\Phi_i\}_{i=1}^{k+s-1}$  表示  $k+s-1$  个形式如式(10)所示的矩阵,  $\Phi_i$  中的独立元素  $\{a_j\}_{j=1}^q$  服从  $N(0, 1)$  的高斯概率分布.

针对上述各种测量矩阵的测试实验. 压缩传感的重建算法众多<sup>[15-16]</sup>, 本文选用子空间追踪算法 (Subspace Pursuit algorithm, SP)<sup>[17]</sup>. SP 算法是目前求解式(1)和(2)的最有效算法之一, 无论是在重建概率和重建速度方面都有良好的性能表现.

图2是一维信号的CS重建实验, 测试信号的长度  $N = 256$ , 稀疏度  $K = 30$ , 测量次数  $M = 128$ .

为简单起见,假定稀疏矩阵  $\Psi$  是单位矩阵(该假定不影响最终结果),  $K$  个非零值的大小是  $\pm 1$ . 图 2 (a)是原始信号  $x$ ; 图 2(b)是测量向量  $y$ ; 图 2(c)是重建信号  $\hat{x}$ ; 图 2(d)是原始信号  $x$  和重建信号  $\hat{x}$  之间的误差. 测量矩阵是随机 Gauss 矩阵, 当  $\text{norm}(x - \hat{x})$  小于某一阈值(本文选取  $10^{-6}$ ), 表示重建成功.

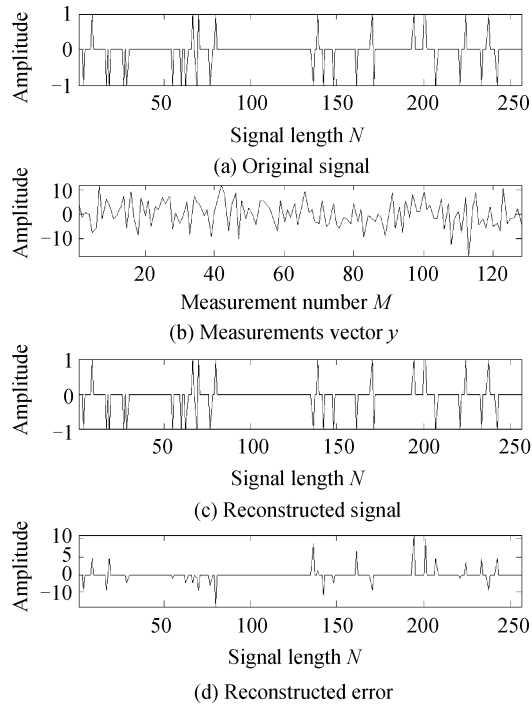


图 2 一维信号 CS 重建

Fig. 2 CS reconstruction for one dimensional signal

各种测量矩阵重建效果的比较如图 3 和图 4, 其中图 3 中信号长度  $N = 256$ , 固定稀疏度  $K = 30$ , 测量次数  $M$  从 80 逐渐变化到 140, 测量次数每次增加 3. 图 4 的实验中信号长度  $N = 256$ , 固定测量次数  $M = 128$ , 稀疏度  $K$  从 20 逐渐增加到 60, 每次增加 2. 对每一组固定的参量 ( $N, M, K$ ) 分别测试 10 000 次, 计算其重建成功率. 从图 3 和图 4 的实验

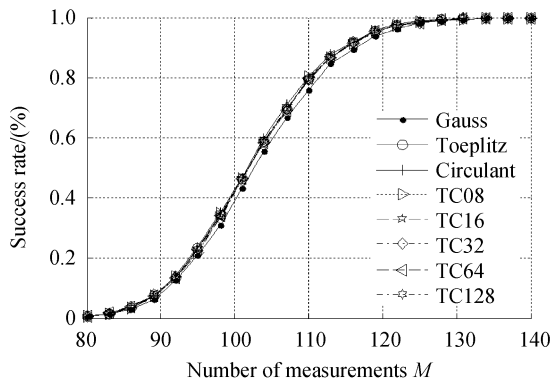


图 3 重建成功率 vs 测量次数  $M$

Fig. 3 Probability of success rate as a function of the number of measurements  $M$

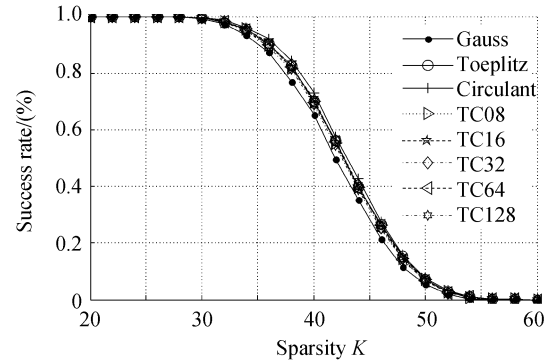


图 4 重建成功概率 vs 稀疏度  $K$

Fig. 4 Probability of success as a function of sparsity level  $K$

结果可以看出本文提出的托普利兹-循环块测量矩阵 (TC08、TC16、TC32、TC64 和 TC128, 其中 TC08 表示式(10)中的子矩阵的是  $8 \times 8$  托普利兹矩阵, 其它与此类似) 完全可以满足测量随机性的要求, 因此可以选用循环-托普利兹块矩阵作为光学相位掩膜的分布.

### 3 模拟实验

本文运用 Matlab 软件得到模拟由图 1 中所示的 CI 系统获得的模拟图像. 在模拟实验中, 假设物体的像素大小为  $1 \text{ mm}$ , CCD 像素大小为  $100 \mu\text{m}$ , 中心波长是  $\lambda_0 = 0.55 \mu\text{m}$ ,  $z_1 = z_2 = 140 \text{ mm}$ ,  $f_{1_1} = f_{1_2} = 280 \text{ mm}$ . 光学相位掩膜的分布分别是 Gauss、Toeplitz、Circulant TC08、TC16、TC32、TC64 和 TC128, 其相干波长为  $\rho = 5 \mu\text{m}$ . 透镜的直径是  $D_1 = D_2 = 50 \text{ mm}$ . 这个模拟系统的条件满足参考文献 [3] 中所列的随机投影矩阵的要求. 由于计算机资源的限制, 限定物体有  $64 \times 64 \text{ pixel}^2$ . 对应于这种大小的物体, 矩阵  $\Phi$  和  $\Psi$  的大小是  $4096 \times 4096$ . 其中,  $\Phi$  的每行表示一个大小为  $4096$  的移变点扩散函数, 选  $\Phi$  的前  $M$  行作为测量矩阵.

图 5 是 Lena 图像重建结果, 其中图 5(a) 是原始图像, 采用 Daubechies5 小波作为稀疏基  $\Psi$ , 对应的稀疏度  $K = 868$ , 测量次数  $M = 2400$ , 是原有总像素数目的 58.6%. 图 5(b)~(i) 是分别采用 Gauss、Toeplitz、Circulant、TC08、TC16、TC32、TC64 和 TC128 相位掩膜矩阵的重建结果. 图 6 是 Cameraman 图像重建结果, 其中图 6(a) 是原始图像, 采用 Daubechies1 小波作为稀疏基  $\Psi$ , 对应的稀疏度  $K = 734$ , 测量次数  $M = 2400$ , 是原有总像素数目的 58.6%. 图 6(b)~(i) 是分别采用 Gauss、Toeplitz、Circulant、TC08、TC16、TC32、TC64 和 TC128 相位掩膜的重建结果. 重建信噪比如表 1.

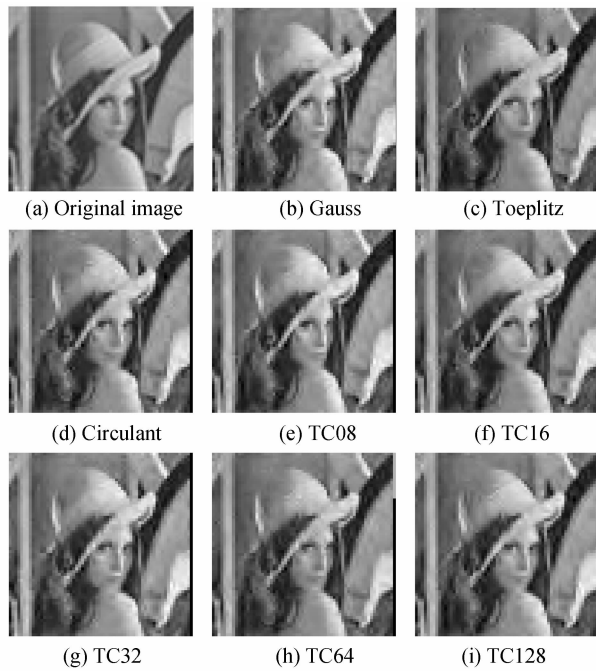


图 5 Lena 图像重建

Fig. 5 Simulations of Lena image

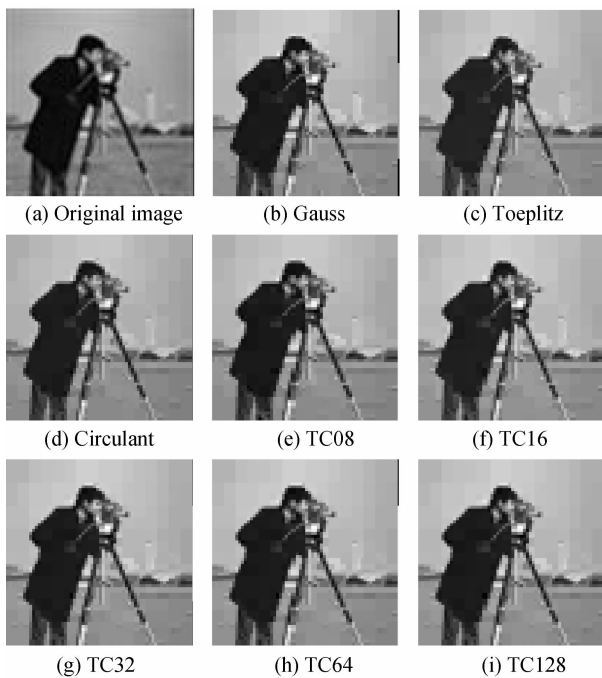


图 6 Cameraman 图像重建

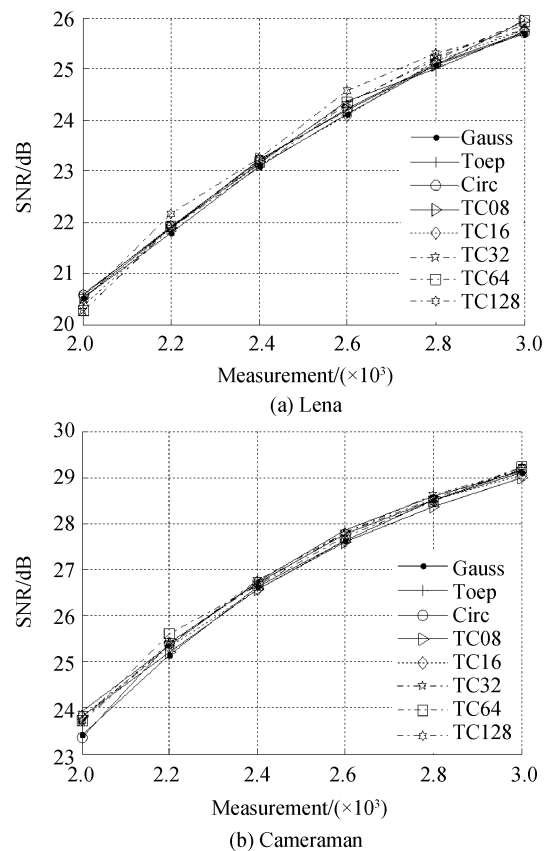
Fig. 6 Simulations of Cameraman image

表 1 不同相位掩膜测量下的图像重建信噪比

Table 1 SNR of reconstruction image with the different phase mask

Phase mask	Lena/SNR/dB	Cameraman/SNR/dB
Gauss	23.10	26.64
Toeplitz	23.14	26.73
Circulant	23.20	26.72
TC08	23.24	26.57
TC16	23.14	26.56
TC32	23.07	26.78
TC64	23.18	26.66
TC128	23.25	26.74

CS 理论的两个重要优点是鲁棒性和渐进性. 鲁棒性是指信号的测量与重建对噪音具有较好的抑制作用, 渐进性是随着测量次数  $M$  的增加, 重建的结果也越来越精确. 因此在此处测试本文提出的相位掩膜矩阵的渐进性, 数据进行归一化处理 (如图像的灰度值在  $[0, 1]$  之间, 测量矩阵的每一行归一化, 即每一行的  $l_2$  范数之和为 1, 噪音向量也进行归一化, 其  $l_2$  范数之和为 1), 噪音的方差  $\sigma^2 = 1.0$ , 测试上面各种相位掩膜矩阵在不同测量次数下的重建结果. 测量次  $M = [2\ 000, 2\ 200, 2\ 400, 2\ 600, 2\ 800, 3\ 000]$  下的重建结果. 本文计算 10 次测量重建结果信噪比的均值, 结果如图 7.

图 7 不同测量次数 ( $M$ ) 下的 CS 重建Fig. 7 CS reconstruction with different numbers ( $M$ )

在实际成像处理过程中, 由于各种因素的影响, 往往会引入各种各样噪音, 比如成像 CCD 上产生的随机高斯噪音等等, 所以, 在此测试本文提出的 CI 系统在方差  $\sigma^2 = [0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0]$  的随机高斯噪音情况下的重建. 考虑到噪音的随机性, 为了具有一定的普遍性, 对数据进行归一化处理. 如测量矩阵  $\Phi$  的每一行归一化, 随机产生的高斯噪音向量  $\text{noise}$  归一化, 此时测量值  $\mathbf{g} = \Phi\mathbf{f} + \text{noise} * \sigma^2$ , 测量次数  $M = 3K$  (其中 Lena 图像的稀疏度  $K = 868$ , Cameraman 图像的稀疏度  $K = 734$ ), 图像像素灰度值归一化到  $[0, 1]$  之间. 本

文在每一种方差  $\sigma^2$  噪音下测试 10 次,取其信噪比的均值,结果如图 7. 从图中可以看出,对于不同方差的噪音,图 7(a) 和 (b) 分别是 Lena 图像和 Cameraman 图像重建的信噪比随噪音方差增加的变化趋势. 由此可以看出,本文提出的相位掩膜矩阵对噪音具有较好的鲁棒性.

成像 CCD 上产生的随机误差也是在实际成像中容易引入的误差,所以,本文测试了相位掩膜矩阵在方差  $\sigma^2 = [0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0]$  的随机高斯噪音情况下的重建. 测量次数  $M=2400$  考虑到噪音的随机性,本文在每一种方差  $\sigma^2$  噪音下测试 10 次,取其信噪比的均值,结果如图 8. 从图中可以看出,对于不同方差的噪音,图 8(a) 是 Lena 图像重建结果,图 8(b) 是 Cameraman 图像重建结果. 从图 8 的实验结果可以看出,本文的循环-托普利兹块相位掩膜矩阵具有较好的鲁棒性.

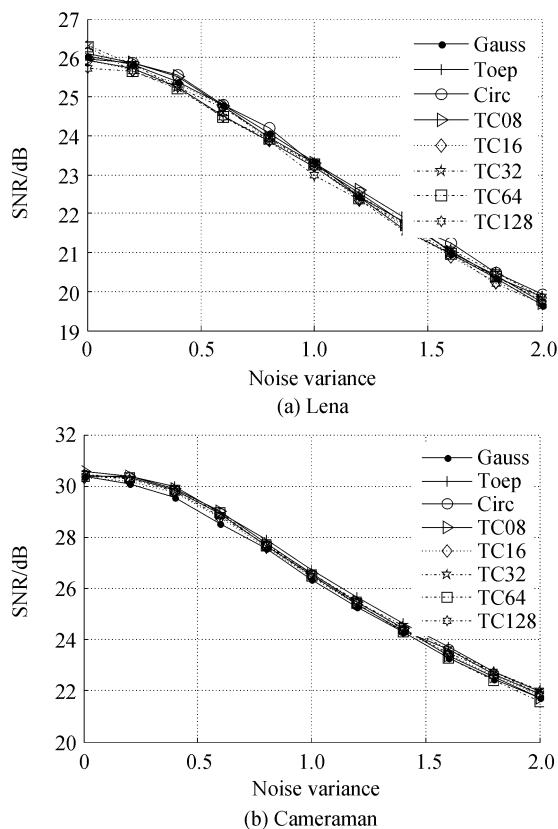


图 8 不同噪音方差下 CS 重建

Fig. 8 CS reconstruction with different noise variances of measurements

## 4 结论

本文给出一种新的托普利兹-循环块确定性相位掩膜矩阵可压缩双透镜成像方法,详细地比较了托普利兹-循环块相位掩膜矩阵在可压缩双透镜成像系统下可以在图像平面上充分捕获物体的场信

息. 实验结果表明对于在基  $\Psi$  上稀疏的图像,相位掩膜矩阵可以在单次曝光下(一次测量所有值,这一点对物理实现意义重大,可以节约大量的测量时间)从原始图像上捕获比原像素数目小的压缩测量中准确的重建原图像. 另外,本文还比较了在不同噪音条件下利用 CI 获得的测量值来重建图像,实验结果表明采用新的托普利兹-循环块相位掩膜矩阵,可以在同样的重建准确度的情况下有效地降低物理实现成本,获得较好的渐进性和鲁棒性.

## 参考文献

- [1] DUARTE M F, DAVENPORT M A, TAKHAR D, *et al.* Single-pixel imaging via compressive sampling [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2008, **25**(2):83-91.
- [2] BOUFONOS P T, BARANIUK R G. 1-Bit compressive sensing[C]. Information sciences and systems, 2008. CISS 2008. 42nd Annual Conference on. vol. , no. , pp.16-21.
- [3] STERN A, JAVIDI B. Random projections imaging with extended space-bandwidth product [J]. *Journal of Display Technology*, 2007, **3**(3): 315-320.
- [4] MARCIA R F, WILLETT R M. Compressive coded aperture superresolution image reconstruction [C]. Acoustics, Speech and Signal Processing, 2008 ICASSP 2008. IEEE International Conference on, 2008: 833-836.
- [5] MARCIA R F, HARMANY Z T, WILLETT R M. Compressive coded apertures for high-resolution imaging [C]. *SPIE*, 2010, **7723**: 772304-772304-11.
- [6] BARANIUK R G, STEEGHS P. Compressive radar imaging [C]. 2007 IEEE Radar Conference, 2007:128-133.
- [7] HERMAN M A, STROHMER T. High-resolution radar via compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2009, **57**(6): 2275-2284.
- [8] XIE Xiao-chun, ZHANG Yun-hua. 2D radar imaging scheme based on compressive sensing technique [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(5): 1234-1238.  
谢晓春, 张云华. 基于压缩感知的二维雷达成像算法 [J], 电子与信息学报, 2010, **32**(5): 1234-1238.
- [9] YU Hui-min, FANG Guang-you. Research on compressive sensing based 3D imaging method applied to ground penetrating radar [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2010, **32**(1): 12-16.  
余慧敏, 方广有. 压缩感知理论在探地雷达三维成像中的应用 [J], 电子与信息学报, 2010, **32**(1): 12-16.
- [10] BAJWA W U, HAUPT J D, RAZ G M, *et al.* Toeplitz-structured compressed sensing matrices [C]. Proceedings of the 2007 IEEE/SP 14th Workshop on Statistical Signal Processing, 2007, 294-298.
- [11] DEVORE R. Deterministic constructions of compressed sensing matrices [J]. *Journal of Complexity*, 2007, **8**(23): 918-925.
- [12] RAUHUT H. Circulant and Toeplitz matrices in compressed sensing [C]. In Proc. SPARS'09, Saint Malo, 2009.
- [13] 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.
- [14] WANG Kai, Liu Yu-lin, ZHANG Jian-xin. RIP analysis for quasi-Toeplitz CS matrices [C]. 2010 International Conference on Future Information Technology and

- Management Engineering (FITME). 2010, vol. 2, no. , pp. 223-226, 9-10.
- [15] SHI Guang-ming, LIU Dan-hua, GAO Da-hua, *et al.* Advance in theory and application of compressed sensing[J]. *Acta Sinica Electronica*, 2009, **37**(5): 1070-1081.  
石光明, 刘丹化, 高大化, 等. 压缩感知理论及其研究发展 [J], 电子学报, 2009, **37**(5):1070-1081.
- [16] LI Shu-tao, WEI Dan. A survey on compressive sensing[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, **35**(11): 1369-1377.  
李树涛, 魏丹. 压缩传感综述[J]. 自动化学报, 2009, **35**(11):1369-1377.
- [17] DAI W, MILENKOVIC O. Subspace pursuit for compressive sensing signal reconstruction [ J ]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2009, **55**(5): 2230-2249.

## Compressive Imaging Using Toeplitz-circulant-block Phase Mask Matrices

ZHANG Cheng, YANG Hai-rong, WEI Sui

(Key Laboratory of Intelligent Computing & Signal Processing, Anhui University, Hefei 230039, China)

**Abstract:** Toeplitz-Circulant-Block phase mask matrices are proposed to implement image acquisition based on Toeplitz and Circulant matrices. Simulation results show that novel phase mask matrices can effectively capture the information of image with a significant reduction of measurements. The new research of phase mask matrices provides more supports for deterministic measurement in the application of compressive imaging. Due to its specific structure, the proposed matrices have more advantages than Toeplitz and Circulant matrices, reduce the difficulty and costs of the physical realization, and provide some theoretical, computing and technical support for new design of camera.

**Key words:** Compressive sensing; Compressive imaging; Phase mask; Deterministic measurement; Toeplitz-Circulant-Block matrices