

压缩感知三维重建算法控制参数对太赫兹 数字全息再现的影响

袁静**, 李琦*, 巩文盼

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 太赫兹三维成像技术是太赫兹成像技术的重要研究方向,因为基于样本的三维图像可以获取比二维图像更丰富的分布信息。影响压缩感知方法三维重建结果精度的算法控制参数主要有迭代次数和稀疏限制参数。利用主观及客观评价法,首先分析了理想情况下迭代次数和稀疏限制参数对再现结果的影响。考虑到实际目标板的不均匀等现象会引入噪声,因此研究了存在高斯噪声时再现算法控制参数对再现结果的影响。结果表明:当迭代次数均为 200 次,理想情况和高斯噪声方差分别为 0.0005 和 0.001 时,稀疏限制参数分别为 0.02、0.1、0.1。

关键词 成像系统; 太赫兹三维成像技术; 控制参数; 高斯噪声; 压缩感知; 客观评价

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1014001

Influences of Compressive Sensing 3D Reconstruction Algorithm Control Parameters on Terahertz Digital Holography Reconstruction

Yuan Jing**, Li Qi*, Gong Wenpan

National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150080, China

Abstract Terahertz three-dimensional (3D) imaging is an important research direction for terahertz (THz) imaging technology, because 3D images of a sample can provide richer distribution information than 2D images. The main algorithm-control parameters that affect the accuracy of compressed 3D reconstructions are the number of iteration and the sparse restriction parameter. In this paper, we use subjective and objective evaluations to analyze the influences of these parameters on the reconstruction results for an ideal situation. Considering that noise is generated because the actual target plate is inhomogeneous, we mainly study the influences of the control parameters in reconstruction algorithms containing different levels of Gaussian noise on reconstructed results. The results show that when the number of iteration is 200, sparse restriction parameter is 0.02, 0.1 and 0.1 for the ideal case and Gaussian noise variance of 0.0005 and 0.001, respectively.

Key words imaging systems; terahertz 3D imaging technology; control parameter; Gaussian noise; compressive sensing; objective evaluation

OCIS codes 110.6795; 090.1995; 110.6880

1 引言

太赫兹波可以穿透对可见光不透明的有机材料,同时还具有光子能量较低的特点,不会对生物体造成损伤,因此太赫兹成像技术可广泛应用于无损检测及人体安全检查等领域^[1]。随着信息和材料科学等技术的迅猛发展,太赫兹成像技术已成为国内

外的研究热点^[2]。

太赫兹三维成像技术是太赫兹成像技术的重要研究方向。与二维图像相比,根据样本的三维图像可以获取更加丰富的分布信息。目前,压缩感知已成功应用于数字全息。2009年,Brady等^[3]应用压缩传感技术完成了数字全息三维成像;2011年,吴迎春等^[4]在卷积理论的基础上,利用压缩感知技术

收稿日期: 2018-03-09; 修回日期: 2018-04-22; 录用日期: 2018-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)

* E-mail: liqi2013@hit.edu.cn; ** E-mail: HIT_yuanjing@163.com

对全息图进行稀疏重建;2016年,翁嘉文等^[5]根据离轴菲涅耳全息图的光学记录过程,结合压缩感知理论与数字全息数值重构技术,建立与菲涅耳衍射相适应的传感矩阵,构建层析算法。但以上的研究都是在可见光波段,且都只是初步证明了本身方法的可操作性。本课题组将压缩感知数字全息技术引入到太赫兹波段,率先证明了压缩感知在连续2.52 THz全息重建时的适用性,获得了三维断层图像^[6];此外,本课题组的李运达^[7]初步讨论了重建算法控制参数对再现结果的影响,但该讨论仅考虑了部分理想情况,而实际目标及其背底材质不均匀等情况会引入噪声。实际中的多帧全息图叠加后,噪声会以散斑噪声为主,且近似为高斯噪声。为了方便起见,本研究将整体噪声近似为高斯噪声,分析了存在高斯噪声时压缩感知重建三维图像的效果;此外,还进一步对理想情况进行仿真,并将仿真结果与实际情况进行对比。

影响压缩感知方法三维重建精度的算法控制参数主要有迭代次数和稀疏限制参数。本文选取10个稀疏限制参数,将迭代次数设置为50~400(以50为间隔)进行研究。首先,对理想情况下迭代次数和稀疏限制参数对再现结果的影响进行主观分析;然后利用峰值信噪比(PSNR)和平均结构相似度(MSSIM)这两种客观评价指标对再现结果进行分析。由于在实际情况中会存在噪声,因此,本文进一步研究了在高斯噪声存在的情况下,稀疏限制参数和迭代次数对全息再现结果的影响。

2 原理简介

2.1 压缩感知再现原理

根据压缩感知原理可知数字全息图满足稀疏条件,因此,可以利用单幅全息图通过压缩感知方法进行样本的三维重建^[3]。

设样本的三维散射振幅分布为 $\eta(m_0, n_0, z_0)$,并假设全息面 m_H-n_H-z 沿 x 和 y 方向的采样间隔分别为 $\Delta x=\Delta y=\Delta$, z 方向的采样间隔为 Δz ,且全息面在 x 和 y 方向的采样点数均为 N , z 轴方向的平面个数为 N_z 。根据瑞利-索末菲-衍射积分公式,全息面上记录的数字全息图 \mathbf{I} 可离散化为^[8]

$$\mathbf{I} = |\mathbf{1} + \mathbf{U}_H(m_H, n_H)|^2 = \left| \mathbf{1} + \sum_{k_0=1}^{N_z} \sum_{m_0=1}^N \sum_{n_0=1}^N \boldsymbol{\eta}_{k_0}(m_0\Delta, n_0\Delta, k_0\Delta_z) \times h_{k_0}[(m_H - m_0)\Delta, (n_H - n_0)\Delta, k_0\Delta_z] \right|^2, \quad (1)$$

式中: h_{k_0} 为系统的脉冲响应函数; $\mathbf{U}_H(m_H, n_H)$ 为全息面物光场分布; $\boldsymbol{\eta}_{k_0}$ 为某一二维平面振幅分布。

使用振幅为1的准直平面波进行重建且忽略(1)式中直流项及自相关项的非线性时,可认为物体的衍射场与全息图的测量值满足线性映射,是线性测量过程。此时全息图分布 \mathbf{I} 可以表示为^[3]

$$\mathbf{I} = 2\text{Re}\{\mathbf{H}\boldsymbol{\eta}\} + \mathbf{e}, \quad (2)$$

式中: $\boldsymbol{\eta}$ 为样本三维振幅分布的离散表示; \mathbf{H} 为系统测量矩阵; \mathbf{e} 为直流项、自相关项及附加噪声等误差影响项。

由压缩感知原理可知,可通过求全变差范数最小值完成目标三维空间振幅分布的重建。引入稀疏限制参数来控制全变差项对重建结果的作用,则(1)式的解即是满足(3)式等号右边项最小化的解:

$$\boldsymbol{\eta} = \arg \min_{\boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}} (\|\mathbf{I} - \mathbf{H}\boldsymbol{\eta}\|_2^2 + \tau \|\boldsymbol{\eta}_k\|_{\text{TV}}), \quad (3)$$

式中: τ 为稀疏限制参数; $\|\boldsymbol{\eta}_k\|_{\text{TV}} = \sum_{k_0=1}^{N_z} \sum_{m_0=1}^{N_1} \sum_{n_0=1}^{N_2} |\nabla[\boldsymbol{\eta}_{k_0}(m_0, n_0)]|$ 。

在实际计算中,采用两步迭代收缩/阈值方法(TwIST)对(3)式进行求解,可以表示为^[9-10]

$$\boldsymbol{\eta}_1 = [\boldsymbol{\eta}_0 + \mathbf{H}'(\mathbf{I} - \mathbf{H}\boldsymbol{\eta}_0)/\nu] - 0.5\tau/[\nu \|\boldsymbol{\eta}_0 + \mathbf{H}'(\mathbf{I} - \mathbf{H}\boldsymbol{\eta}_0)/\nu\|_{\text{TV}}], \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\eta}_{t+1} = (1 - \alpha)\boldsymbol{\eta}_t + (\alpha - \beta)\boldsymbol{\eta} + \beta\{[\boldsymbol{\eta}_t + \mathbf{H}'(\mathbf{I} - \mathbf{H}\boldsymbol{\eta}_t)/\nu] - 0.5\tau/[\nu \|\boldsymbol{\eta}_t + \mathbf{H}'(\mathbf{I} - \mathbf{H}\boldsymbol{\eta}_t)/\nu\|_{\text{TV}}]\}, \quad (5)$$

式中: $\alpha = 2 \left/ \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1 - \kappa}{1 + \kappa} \right)^2} \right] \right.$; $\beta = \frac{2\alpha}{\lambda_1 + \lambda_N}$; $\kappa =$

$\frac{\lambda_1}{\lambda_N}$; λ_1 和 λ_N 分别为矩阵 $\mathbf{H}' \times \mathbf{H}$ 的最小本征值和最大本征值,为便于计算,本研究分别取 $\lambda_1 = 10^{-4}$, $\lambda_N = 1$; ν 为逆比例因子,通过控制参数 τ 及 $\mathbf{H}'(\mathbf{I} - \mathbf{H}\boldsymbol{\eta}_t)$ 项在公式中的大小来保证迭代的正常进行; t 为迭代次数; ν 为逆比例因子; $\boldsymbol{\eta}_0$ 为 $N \times N \times N_z$ 的全1的初始矩阵; $\boldsymbol{\eta}_t$ 为迭代 t 次的矩阵结果; $\boldsymbol{\eta}_{t+1}$ 为迭代 $t+1$ 次的矩阵结果。

由(4)~(5)式可知,对每次迭代结果求全变差后,图像边缘及高频噪声位置处的梯度值较大,其余位置的梯度值接近于0。将迭代结果与全变差值相减即可实现滤波。通过选择合适的限制参数 τ 及迭代次数 t 即可控制滤波强度的大小,从而实现样本空间振幅分布的精确重建。

2.2 MSSIM 和 PSNR

利用MSSIM和PSNR这两个客观评价标准对

再现结果进行分析。MSSIM 的指数表达式为^[11]

$$M_{SSIM}(\mathbf{F}, \mathbf{F}^t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N l(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t) \times c(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t) \times s(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t), \quad (6)$$

式中： \mathbf{F} 、 \mathbf{F}^t 分别为参考图像和测试图像； $l(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t)$ 为测试图像与参考图像中对应像素的亮度； $c(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t)$ 为测试图像和参考图像中对应像素的对比度； $s(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t)$ 为测试图像和参考图像中对应像素的结构度。它们的表达式分别为

$$l(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t) = \frac{2\mu_{F_j} \mu_{F_j^t} + C_1}{\mu_{F_j}^2 + \mu_{F_j^t}^2 + C_1}, \quad (7)$$

$$c(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t) = \frac{2\sigma_{F_j} \sigma_{F_j^t} + C_2}{\sigma_{F_j}^2 + \sigma_{F_j^t}^2 + C_2}, \quad (8)$$

$$s(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}_j^t) = \frac{\sigma_{F_j F_j^t} + C_3}{\sigma_{F_j} \sigma_{F_j^t} + C_3}, \quad (9)$$

式中： μ_{F_j} 和 $\mu_{F_j^t}$ 为以对应参考图像和测试图像像素为中心的窗口均值； σ_{F_j} 和 $\sigma_{F_j^t}$ 为以对应参考图像和测试图像像素为中心的窗口方差； $\sigma_{F_j F_j^t}$ 为以对应参考图像和测试图像像素为中心的窗口协方差； C_1 、 C_2 、 C_3 均为常数， $C_1 = (K_1 L)^2$ ， $C_2 = (K_2 L)^2$ ， $C_3 = C_2$ 。在本研究中， $L = 1$ ， $K_1 = 0.01$ ， $K_2 = 0.03$ 。MSSIM 值越接近 1，测试图像的亮度、对比度和结构度就越接近标准图像。

PSNR 是衡量图像品质的重要参数，其单位是

dB。对于两幅大小为 $M \times N$ 的参考图像 \mathbf{X} 和其含噪声图像 \mathbf{Y} ，PSNR 计算公式为^[12]

$$R_{PSNR} = 10 \times \lg \left[\frac{255^2 \times M \times N}{\sum_{i=1}^{M \times N} (X_i - Y_i)^2} \right]. \quad (10)$$

PSNR 值越高，说明经过处理后的图像质量越高，即越接近标准图像。

3 2.52 THz 仿真结果分析

根据压缩感知原理可知，迭代次数 t 和稀疏限制参数 τ 这两个重建算法控制参数会影响压缩感知方法三维重建结果的精度。由于压缩感知的再现方法满足稀疏条件，为了便于仿真，令仿真样本的灰度值为 1，背景灰度值为 0，此时全息图中非零数据点的数目较少，所需计算时间也少。仿真样本是尺寸均为 $1.2 \text{ mm} \times 1.2 \text{ mm}$ ，且线宽均为 0.4 mm 的“T”样本和“H”样本。

在仿真再现中，太赫兹波长为 $118.83 \mu\text{m}$ ，初始位置（即距探测器最近的物面） $z_{\text{off}} = 13 \text{ mm}$ ，再现层数为 5，层间隔 $d_z = 3 \text{ mm}$ ，“T”样本和“H”样本分别距电荷耦合器件 (CCD) 19 mm 和 25 mm 。仿真中使用的同轴数字全息记录原理图如图 1 所示。在同轴数字全息系统中，将光波照射物体得到的散射光与未散射光分别作为物光和参考光，两者共路传播，然后通过对全息图进行数值计算产生再现图像。

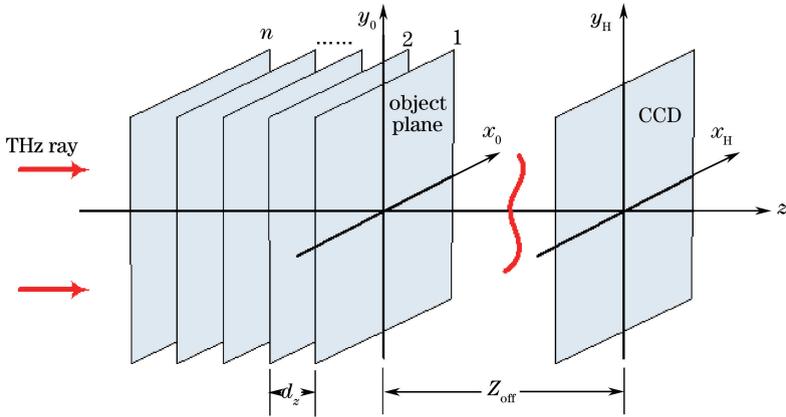


图 1 数字全息记录原理图

Fig. 1 Schematic of the digital holographic record

理想情况下断层的仿真场景如图 2(a) 所示。假设样本背景材料的均匀性呈正态分布，在两个字母背底上加入均值为 0、方差分别为 0.0005 和 0.001 的高斯噪声，如图 2(b)、(c) 所示。与理想情况下的断层仿真场景相比，存在高斯噪声的断层仿真场景在样本面的目标及背景上都增加了点状物，且随着

高斯噪声方差增大，点状物越来越密集。

仿真全息图如图 3 所示。从图 3 可以看出，当在字母背景中增加高斯噪声后，全息图中目标的对亮度明显下降，新增了点状物，条纹模糊，图像左下及上中部分的背景条纹越来越模糊，以上两个高斯噪声生成的全息图出现了微小变化。

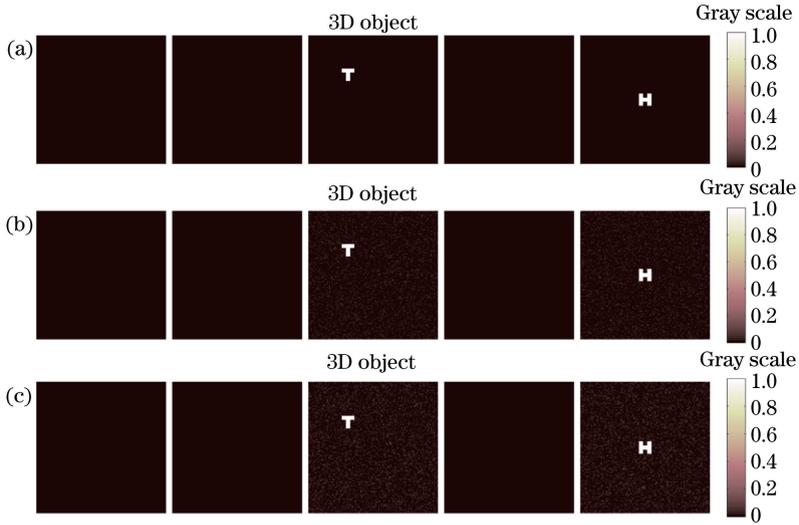


图 2 不同情况下的断层仿真场景。(a)理想情况;(b)高斯噪声方差为 0.0005;(c)高斯噪声方差为 0.001
 Fig. 2 Sample simulation scenario obtained under different conditions. (a) Ideal case; (b) a case with Gaussian noise variance of 0.0005; (c) a case with Gaussian noise variance of 0.001

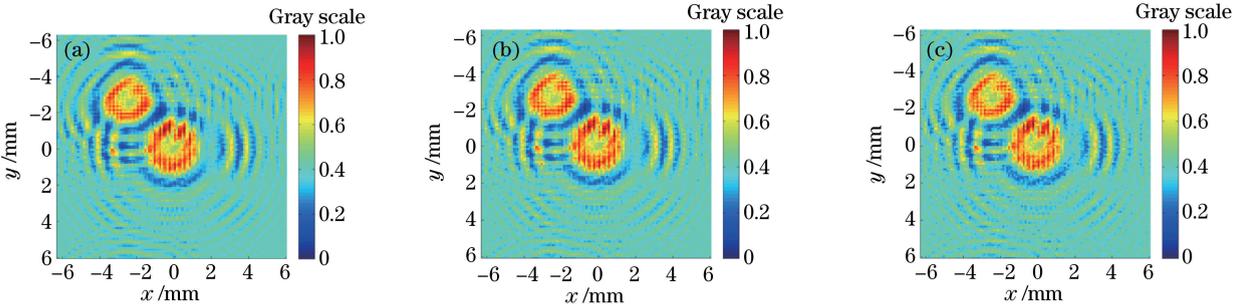


图 3 不同情况下的仿真全息图。(a)理想情况;(b)高斯噪声方差为 0.0005;(c)高斯噪声方差为 0.001
 Fig. 3 Simulation holograms obtained under different conditions. (a) Ideal case; (b) a case with Gaussian noise variance of 0.0005; (c) a case with Gaussian noise variance of 0.001

仿真的系统原理示意图如图 4 所示。在建立如图 2(a)所示的仿真场景后,在目标样本“T”和“H”的背底上分别增加不同方差的高斯噪声,分别得到如图 2 所示的断层仿真场景,其中理想情况可视为在背底上增加方差为 0 的高斯噪声;然后利用角谱法实现全息图记录过程,分别得到如图 3 所示的全

息图;再分别输入 t 和 τ 的初始值,根据两步迭代收缩/阈值法得到太赫兹数字全息再现结果,对得到的再现结果计算 PSNR 值和 MSSIM 值;然后再改变 t 和 τ 的值,循环这个过程。在所有的再现结果计算完后,利用得到的所有的 PSNR 值和 MSSIM 值获得需要的曲线。

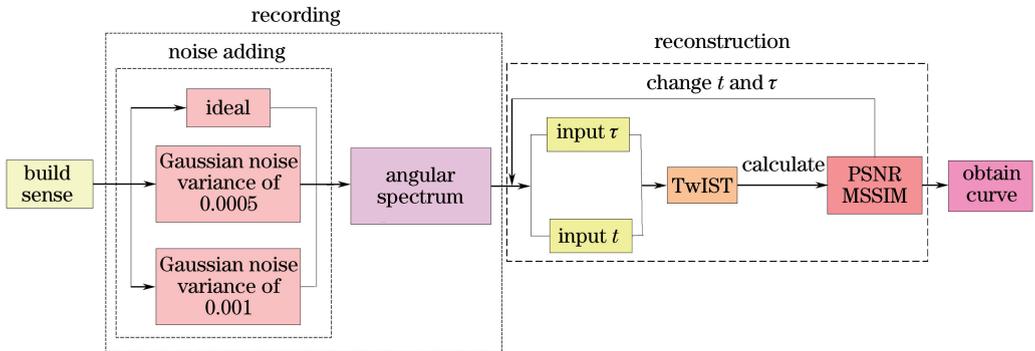


图 4 仿真系统原理示意图
 Fig. 4 Schematic outline of simulation system

3.1 理想情况下的仿真结果

3.1.1 稀疏限制参数 $\tau=0.1$ 时,迭代次数对再现效果的影响

首先令稀疏限制参数 $\tau=0.1$,图 5 给出了此时样本“T”和“H”层面不同迭代次数的再现结果。根据图 5 对再现结果进行主观分析,主观分析是指依靠人眼观察图像的清晰度和均匀性。从图 5 中可以看到,整体上,当迭代次数相同时,“T”样本的重建图像背景均匀性比“H”样本好。由图 5(a)可观察

到,当迭代 50 次时,重建图像背景的均匀性最差,“T”和“H”周围的图像分布很不均匀,图像质量也最差。由图 5(b)可知,迭代 100 次和 150 次时,重建图像质量明显改善,虽然两个样本的背景都不均匀,但“T”样本的背景比“H”样本的背景更均匀。由图 5(c)~(h)可知,迭代次数为 200、250、300、350、400 时,“T”样本重建图像背景均匀性较好,图像质量也较好,而“H”样本的重建图像均匀性没有明显改善。

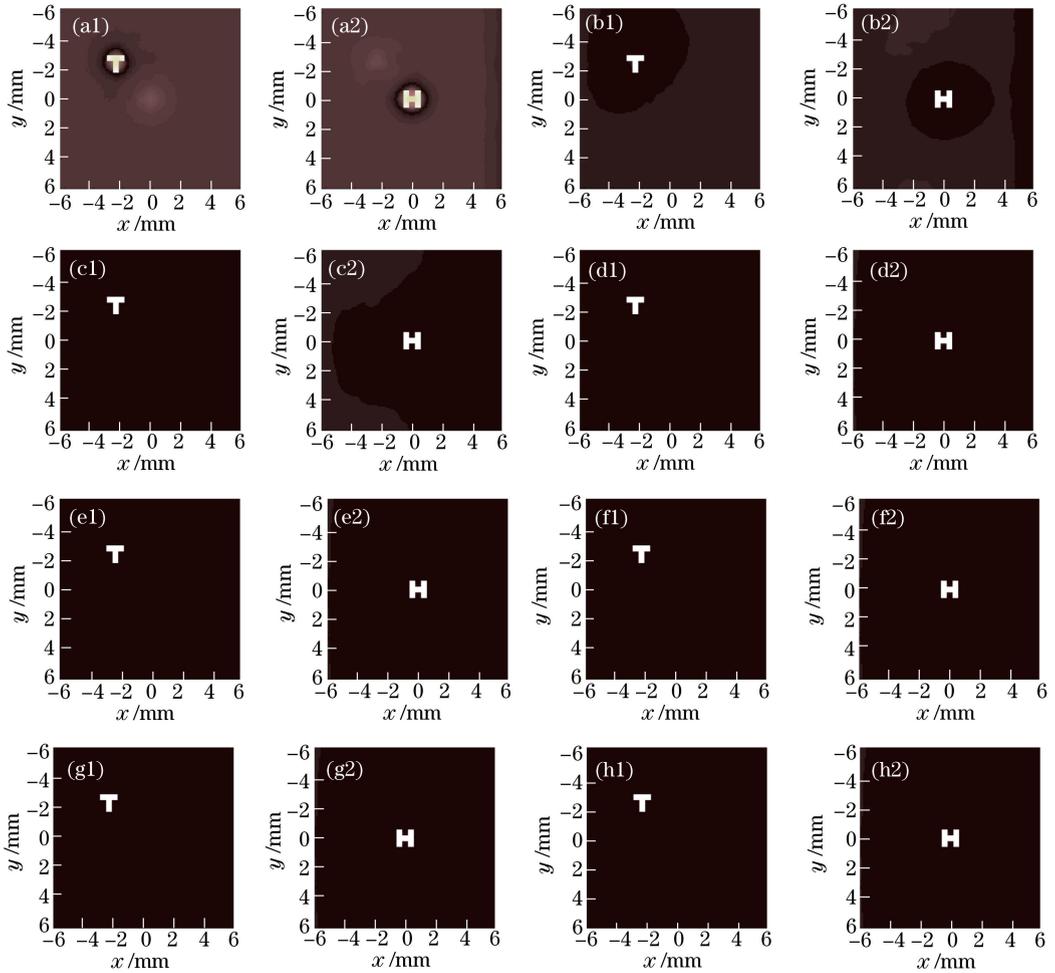


图 5 $\tau=0.1$ 时不同迭代次数的再现结果。(a) $t=50$; (b) $t=100$; (c) $t=150$;
(d) $t=200$; (e) $t=250$; (f) $t=300$; (g) $t=350$; (h) $t=400$

Fig. 5 Reconstruction results for different iteration times when $\tau=0.1$. (a) $t=50$; (b) $t=100$;
(c) $t=150$; (d) $t=200$; (e) $t=250$; (f) $t=300$; (g) $t=350$; (h) $t=400$

图 6 给出了样本“T”和“H”迭代次数与 PSNR、MSSIM 的关系。从图 6 中不难看出,PSNR 和 MSSIM 均表现为离探测器近的“T”比离探测器远的“H”高,这与主观分析相吻合。随着迭代次数增加,PSNR 和 MSSIM 值均有所增大,也就是说,再

现图像质量逐渐提高。就同一目标而言,基于这些计算结果并考虑计算时间后认为,迭代次数取 200 次左右为宜。当迭代 200 次时,“T”样本和“H”样本的 PSNR 值分别为 51.5 和 41.24, MSSIM 值分别为 0.941 和 0.6343,此时重建质量相对较好。

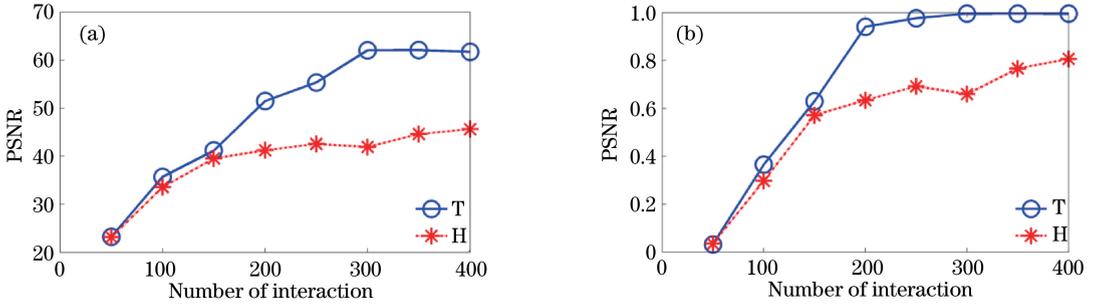


图 6 理想情况下,迭代次数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系

Fig. 6 Relationship between number of iteration and (a) PSNR or (b) MSSIM under ideal condition

3.1.2 迭代次数 $t=200$ 时,控制参数 τ 对再现效果的影响

由上述分析可知,迭代次数取 200 次为宜。其他参数不变,当稀疏限制参数 τ 分别为 0.005、0.0075、0.01、0.0125、0.015、0.0175、0.02、0.05、0.075、0.1 时,稀疏限制参数 τ 与样本“T”、样本“H”的 PSNR 和 MSSIM 的关系如图 7 所示。

由图 7 可以看到,随着 τ 增加,“T”样本和“H”样本重建图像的 PSNR 和 MSSIM 呈先减小后增大

再减小的趋势。从计算结果可以看出,一般 τ 取 0.02 可使两个样本的再现结果较接近。这时,“T”样本和“H”样本的 PSNR 分别为 50.57 和 41.69, MSSIM 分别为 0.926 和 0.6584。当 τ 超过 0.02 时,重建图像的质量下降,也就是说,在理想情况下,当迭代次数 $t=200$ 及稀疏限制参数 $\tau=0.02$ 时,太赫兹数字全息再现图像的质量最好,如图 8 所示。可以看到,此时样本“T”和样本“H”的重建图像背景均匀性较好,图像质量也较好,与上述客观分析吻合。

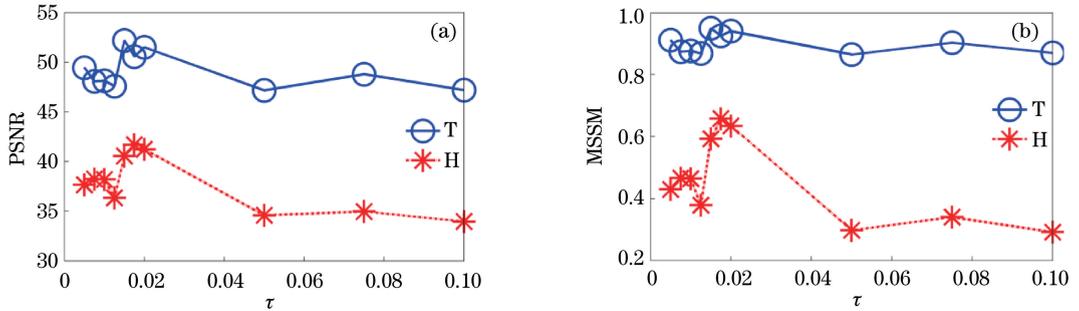


图 7 理想情况下,稀疏限制参数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系

Fig. 7 Relationship between sparse restriction parameter and (a) PSNR or (b) MSSIM under ideal condition

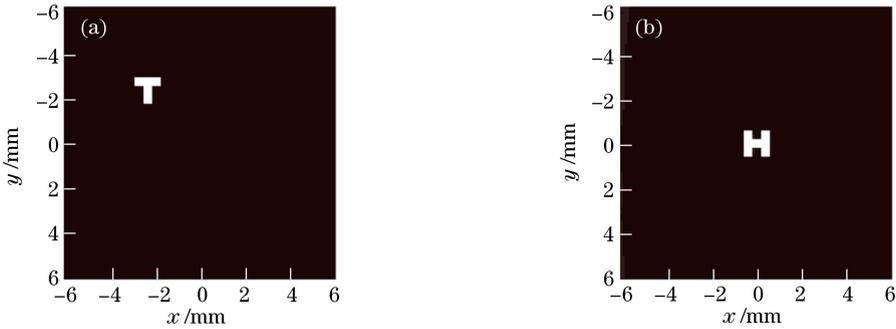


图 8 理想情况下的再现图像。(a) 样本“T”;(b) 样本“H”

Fig. 8 Ideal reconstructed images. (a) “T” sample; (b) “H” sample

3.2 存在高斯噪声时的仿真结果

3.2.1 高斯噪声方差为 0.0005 时的仿真再现结果
由理想情况的仿真结果可知,当迭代次数为

200 时,再现结果相对较好。因此,在存在高斯噪声的仿真中,首先假设迭代次数为 200,高斯噪声参数为 0.0005,稀疏限制参数与样本“T”、样本

“H”的 PSNR、MSSIM 关系如图 9 所示。从图 9 中可以看到:随着 τ 增加,样本“T”和样本“H”重建图像的 PSNR 和 MSSIM 都呈持续增大的趋势,变化趋势与理想情况下的相差很大;对于仿真图像, τ 取 0.1 时可使两个样本的再现结果比较接近。但同时可以看到, $\tau=0.1$ 时的结果与理想情况下

的结果不符。当 $\tau < 0.05$ 时,两个样本再现图像的计算结果都比较差。所以,为了更全面、高效地分析稀疏限制参数对重建图像质量的影响,保持其他参数不变,令 τ 的范围为从 0.05 增加到 0.14(以 0.1 为步长),得到的稀疏限制参数与 PSNR、MSSIM 的关系如图 10 所示。

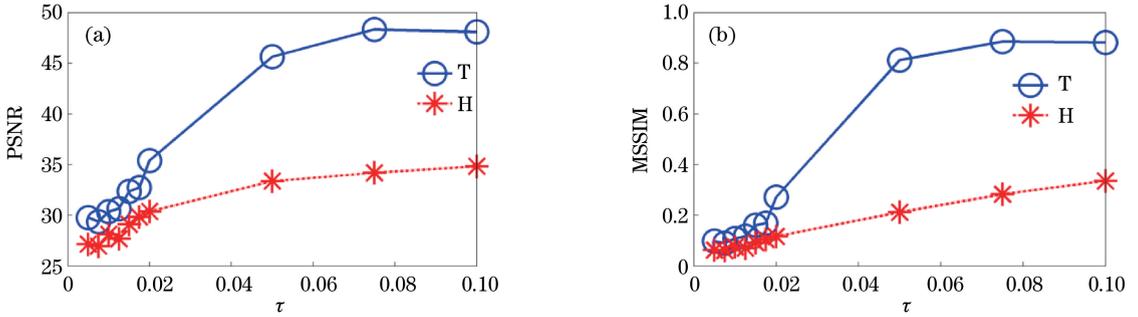


图 9 高斯噪声方差为 0.0005 时,稀疏限制参数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系

Fig. 9 Relationship between sparse restriction parameter and (a) PSNR or (b) MSSIM when Gaussian noise variance is 0.0005

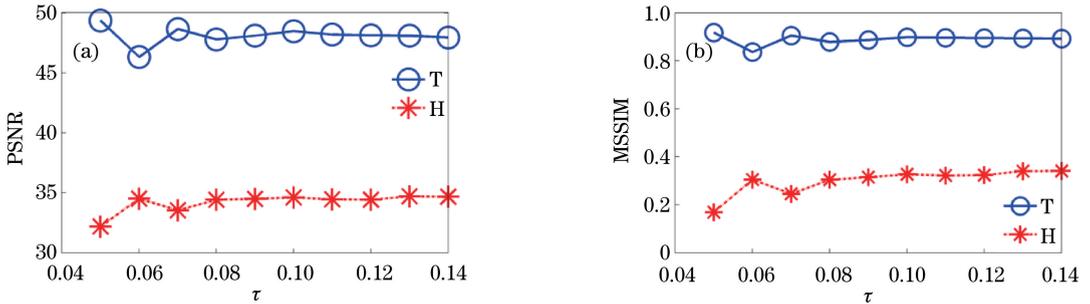


图 10 高斯噪声方差为 0.0005 时,稀疏限制参数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系(0.05 ≤ τ ≤ 0.14)

Fig. 10 Relationship between sparse restriction parameter (0.05 ≤ τ ≤ 0.14) and (a) PSNR or (b) MSSIM when Gaussian noise variance is 0.0005

从图 9~10 可以看到,随着 τ 值增加,样本“T”和样本“H”重建图像的 PSNR 和 MSSIM 都呈先增大后趋于平稳的趋势。因此,当高斯噪声方差为 0.0005, τ 取 0.1 时,两个再现结果相对较好。接着,令稀疏限制参数 $\tau=0.1$ 不变,改变迭代次数,得到如图 11 所示的关系图。

从图 11 可以看到,随着迭代次数增加,样本“T”和样本“H”重建图像的 PSNR 和 MSSIM 整体趋势与理想情况下的基本相同,即整体下降。综合考虑计算时间和重建图像的质量,迭代次数仍然取 200。也就是说,当高斯噪声方差为 0.0005,迭代次数 $t=200$,稀疏限制参数 $\tau=0.1$ 时,太赫兹数字全息再现图像质量相对于选取其他参数的情况要好一些。在这种情况下,两个样本得到的最佳参数的 PSNR 比理想情况下最佳参数的 PSNR 分别下降 4.79% 和

25.38%,MSSIM 分别下降 4.74% 和 49.0%。因此,离全息面远的样本“H”的再现图像受到噪声的影响较大,而样本“T”的再现图像则受到噪声的影响较小。得到最佳参数的再现图像如图 12 所示。

从再现图像中可以看到:样本“T”的再现图像质量仍然很好,背景也很均匀,主观上分析和理想情况相比没有明显变化;而样本“H”的再现图像目标质量没有明显变化,但背景图像两边明显不均匀,和理想情况相比差别较大,也就是说受到噪声的影响较大,和上述客观分析相吻合。

3.2.2 高斯噪声方差为 0.001 时的仿真再现结果

当高斯噪声的方差为 0.001,迭代次数 $t=200$ 时,分析这种情况下稀疏限制参数 τ 的选取对重建图像质量的影响。稀疏限制参数与 PSNR、MSSIM 的关系如图 13 所示。

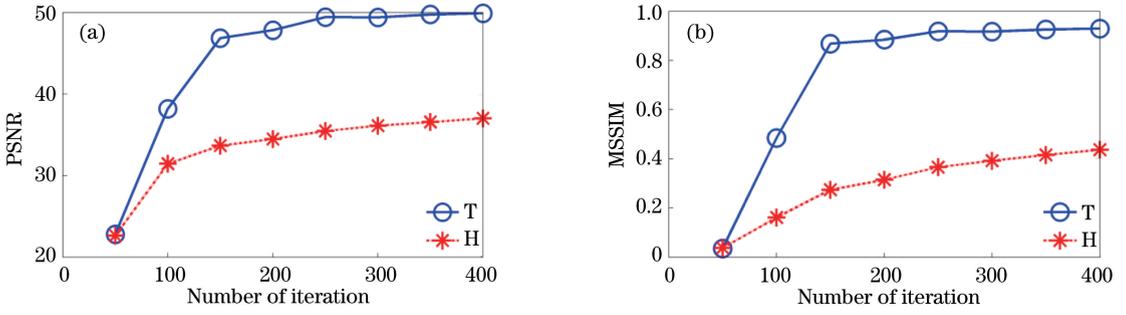


图 11 高斯噪声方差为 0.0005 时,迭代次数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系

Fig. 11 Relationship between number of iteration and (a) PSNR or (b) MSSIM when Gaussian noise variance is 0.0005

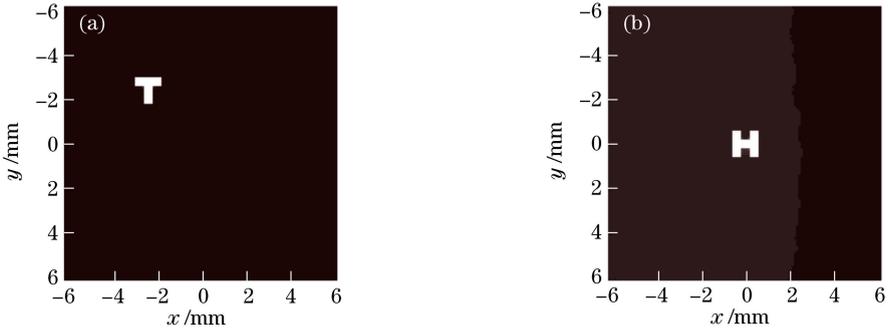


图 12 高斯噪声方差为 0.0005 时的最佳再现图像。(a) 样本“T”;(b) 样本“H”

Fig. 12 The best reconstructed images with Gaussian noise variance of 0.0005. (a) “T” sample; (b) “H” sample

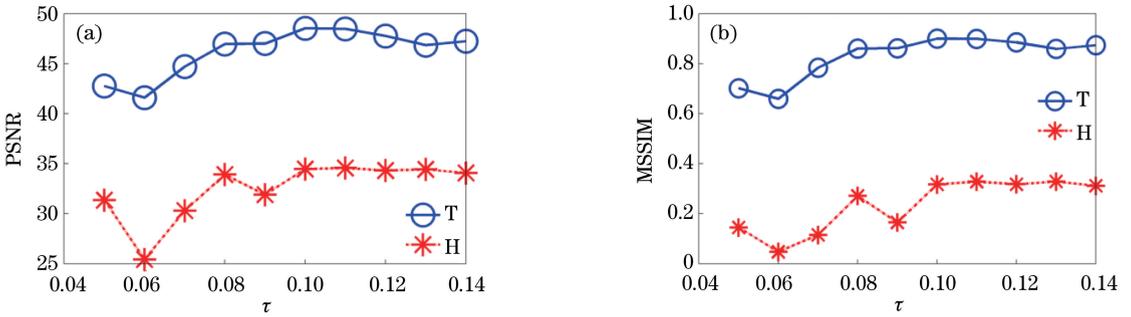


图 13 高斯噪声方差为 0.001 时,稀疏限制参数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系

Fig. 13 Relationship between sparse restriction parameter and (a) PSNR or (b) MSSIM when Gaussian noise variance is 0.0001

可以看到,图 13 的整体趋势与图 10 相似。当 τ 取 0.1 时两个再现结果均较好。当稀疏限制参数 $\tau=0.1$ 时,改变迭代次数得到迭代次数与 PSNR、MSSIM 的关系,如图 14 所示。

可以看到,图 14 的变化趋势与图 10 基本相同。考虑到计算时间,迭代次数仍然取 200。这时,样本“T”和样本“H”再现图像的 PSNR 值与图 10 相比分别变化了 0.92% 和 1.10%, MSSIM 分别变化了 1.98% 和 5.51%,变化很小。也就是说,高斯噪声方

差为 0.001 的再现图像与高斯噪声方差为 0.0005 时的相比变化很小,两者再现图像的质量差别很小。因此,当迭代次数 $t=200$,稀疏限制参数 $\tau=0.10$ 时,太赫兹数字全息再现图像的质量相对较好,这时的再现图像如图 15 所示:样本“T”的背景均匀,再现图像质量较好;样本“H”左边和右边的背景有差异,且不均匀。从主观方面分析,高斯噪声方差为 0.001 时的再现图像比 0.0005 时的更加不均匀,在背景上也更加不平整。

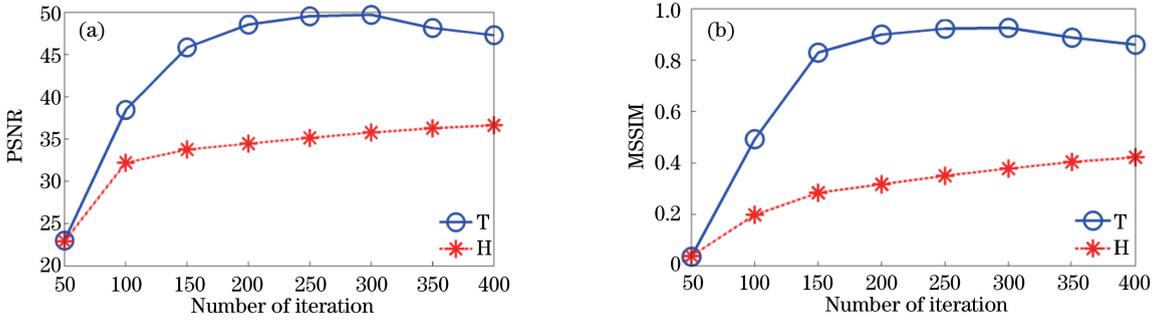


图 14 高斯噪声方差为 0.001 时,迭代次数与(a) PSNR、(b) MSSIM 的关系

Fig. 14 Relationship between number of iteration values and (a) PSNR or (b) MSSIM when Gaussian noise variance is 0.001

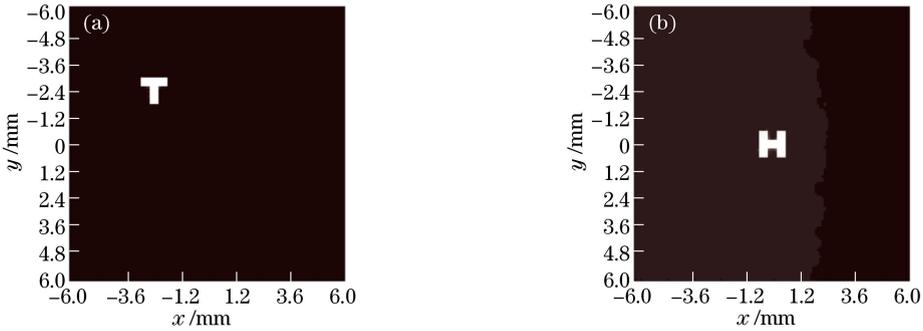


图 15 高斯噪声的方差为 0.001 时的最佳再现结果。(a)样本“T”;(b)样本“H”

Fig. 15 The best reconstructed images with Gaussian noise variance of 0.001.

(a) “T” sample; (b) “H” sample

3.3 仿真结果总结

为了更加清晰、全面地研究存在不同高斯噪声时,迭代次数和稀疏限制参数对再现结果的影响,研

究了高斯噪声方差分别为 0.005 和 0.01 时的再现结果。再根据 3.1 和 3.2 节的再现结果得到了如表 1 所示的仿真结果汇总。

表 1 仿真结果汇总

Table 1 Summary of simulation results

Item	PSNR of “T” sample	PSNR of “H” sample	MSSIM of “T” sample	MSSIM of “H” sample	t	τ
Ideal	50.57	41.68	0.93	0.66	200	0.02
Gaussian noise variance of 0.0005	51.30	37.47	0.93	0.41	200	0.1
Gaussian noise variance of 0.001	48.54	34.46	0.90	0.32	200	0.1
Gaussian noise variance of 0.005	42.89	32.08	0.72	0.22	200	0.12
Gaussian noise variance of 0.01	38.22	31.02	0.53	0.20	200	0.14

从表 1 中可以看出,随着高斯噪声方差由 0 逐渐增加到 0.01,最佳的迭代次数都是 200 次,最佳的稀疏限制参数逐渐增大。

为了验证仿真结果的正确性,将其与实验结果进行比较。实验中的波长与仿真中的相同,轴向间隔 2 mm,初始位置为 0 mm,再现层数为 20,采用的实验样本是利用 0.5 mm 厚聚四氟乙烯印制电路板上覆铜箔自制的“T”、“H”和“Z”样本,样本分别距全息面约 20,28,36 mm,迭代次数 $t=200$ 。由于样本材料分布不够均匀,因此实验中会存在噪声。全

息图进行 40 帧叠加平均后,噪声近似为高斯噪声。使用 40 帧真实全息图进行叠加平均^[7]后的再现结果如图 16 所示。

从主观分析来看,在 $\tau=0.02$ 时,样本“T”、“H”和“Z”再现结果的背景比 $\tau=0.1$ 的背景更加不均匀。由于实际实验中没有参考的图像,而 PSNR 和 MSSM 的计算都需要参考图像,因此,分别计算了三个字母背景均值与方差比值,即信噪比。信噪比越大,则再现图像质量越好。当 $\tau=0.02$ 和 $\tau=0.1$ 时,样本“T”(47~124 行)的信噪比分别为 5.27 和

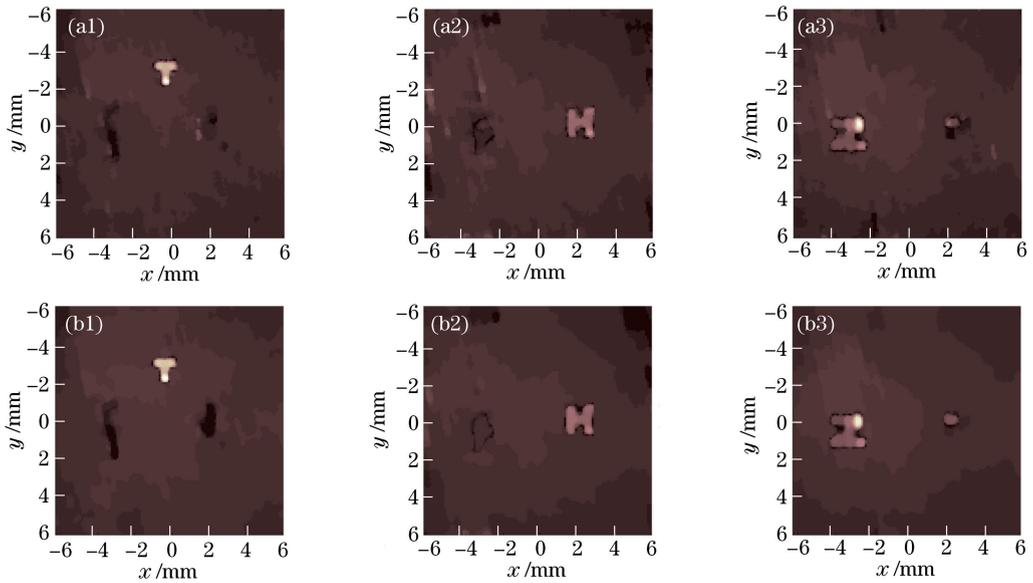


图 16 真实的全息图再现。(a) $\tau=0.02$; (b) $\tau=0.1$

Fig. 16 Reality hologram reconstruction. (a) $\tau=0.02$; (b) $\tau=0.1$

5.32, 样本“H”(1~73 列)的信噪比分别为 4.05 和 5.21, 样本“Z”(43~124 列)的信噪比分别为 3.85 和 4.57。可见, $\tau=0.1$ 时的再现结果比 $\tau=0.02$ 时的再现结果更好, 这与上述的仿真分析相吻合。

4 结 论

本研究利用主观与客观评价分别分析了理想情况和存在不同高斯噪声时, 迭代次数和稀疏限制参数对太赫兹数字全息再现结果的影响。实验结果表明, 迭代次数取 200 次为宜。在理想情况下, 当迭代次数为 200 时, τ 取 0.02 最好; 当高斯噪声方差分别为 0.0005 和 0.001 时, τ 取 0.1 最好, 是理想情况下的 5 倍, 这与实际目标的再现参数相吻合。

此研究对实际应用具有指导作用, 今后需要进一步研究其他参数的影响。该仿真方法可用于研究其他波长压缩感知数字全息再现参数的选择。

参 考 文 献

[1] Li W J, Wang T Y, Zhou Y, *et al.* Terahertz non-destructive inspection of air defect within adhesive layers of multi-layer bonded structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0111002.
李文军, 王天一, 周宇, 等. 多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测 [J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0111002.

[2] Wang Z W, Li Q, Yuan J. Image quality evaluation and analysis of zero-order diffraction elimination method in terahertz off-axis digital holography [J].

Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 111102.

汪泽文, 李琦, 袁静. 太赫兹离轴数字全息消零级方法的像质评价及其分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 111102.

[3] Brady D J, Choi K, Marks D L, *et al.* Compressive holography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 13040-13049.

[4] Wu Y C, Wu X C, Wang Z H, *et al.* Reconstruction of digital inline hologram with compressed sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(11): 1109001.
吴迎春, 吴学成, 王智化, 等. 压缩感知重建数字同轴全息 [J]. *光学学报*, 2011, 31(11): 1109001.

[5] Weng J W, Tan S Y. Imaging resolution of self-interference incoherent digital holographic system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(6): 0609006.
翁嘉文, 谭穗妍. 自干涉非相干全息成像系统分辨率 [J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0609006.

[6] Li Q, Li Y D. Continuous-wave 2.52 terahertz Gabor inline compressive holographic tomography [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 585-596.

[7] Li Y D. Research on CW 2.52 THz 3D imaging methods [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
李运达. 连续 2.52 太赫兹三维成像方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.

[8] Xue K, Li Q, Wang Q, *et al.* Experimental research on terahertz Gabor inline digital holography of concealed objects [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(29): 7052-7058.

[9] Lim S, Marks D L, Brady D J. Sampling and

- processing for compressive holography [Invited] [J]. Applied Optics, 2011, 50(34): 75-86.
- [10] Bioucas-Dias J M, Figueiredo M A T. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for image restoration [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(12): 2992-3004.
- [11] Zhou W, Bovik A C, Sheikh H R, *et al.* Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2004, 13(4): 600-612.
- [12] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2002, 9(3): 81-84.