

连续场景太赫兹数字全息三维重建图像的参数影响

林平^{**}, 李琦^{*}, 申作春

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080

摘要 采用压缩感知太赫兹数字全息技术进行连续场景的三维重建, 其中, 影响重建结果的控制参数主要有迭代次数和稀疏限制参数。首先, 仿真重建了三个层面的连续场景与分立场景全息图, 并进行了对比分析。其次, 改变迭代次数, 给出重建结果随稀疏限制参数的变化曲线, 找到本次实验的最佳控制参数。仿真结果表明, 当重建平面数目为 4, 迭代次数为 300 次, 稀疏限制参数为不大于 0.02 时, 重建图像的质量较好。

关键词 成像系统; 太赫兹三维成像技术; 压缩感知; 连续型场景; 控制参数

中图分类号 TN249

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.220901

Influence of Parameters on Terahertz Digital Holography 3D Image Reconstruction of a Continuous Scene

Lin Ping^{**}, Li Qi^{*}, Shen Zuochun

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

Abstract Compressed sensing terahertz digital holography technology is utilized to reconstruct three-dimensional images of a continuous scene. The control parameters affecting the reconstruction results primarily include the numbers of iterations and the sparse limit parameter. First, the holograms of a continuous scene and a discrete scene on three dimensions were reconstructed, simulated and compared. Then, the number of iterations was changed, and the reconstruction results varying with sparse limit parameters was used to find the best control parameters. Simulation results show that the reconstructed image quality is optimal when the number of reconstruction planes is 4, number of iterations is 300, and sparse restriction parameter is not greater than 0.02.

Key words imaging system; terahertz 3D imaging technology; compressed sensing; continuous scene; control parameter

OCIS codes 110.6795; 110.6880; 090.1995

1 引言

太赫兹(Terahertz, 简称 THz)辐射具有穿透非金属和非极性物质的能力, 且与 X 射线相比具有较低的光子能量, 这使得太赫兹技术在医学检查和无损检测等领域展现出广阔的应用前景^[1-2]。近年来, 随着信息和材料科学等的不断发展、完善, 太赫兹成像技术已成为前沿热点话题^[3-4]。

太赫兹三维数字全息成像技术可以获得样本的二维截面分布, 并能够重建出样本的距离信息, 即样本的振幅和相位分布。目前, 获取目标三维信

息的方式主要有: 多波长数字全息、多距离数字全息、迭代相位恢复法以及基于压缩感知的数字全息等。2012 年, 韩冰等^[5]利用多距离相位恢复算法去除共轭像的影响, 记录多幅全息图, 重建精度较高, 收敛速度较快; 2016 年, Hu 等^[6]针对非孤立物体, 提出了一种基于阈值分割和形态学滤波的计算物面支持域的图像处理方法, 并对迭代相位恢复算法进行了改进; 2019 年, 李倩等^[7]通过在望远镜瞳面添加非冗余孔径掩模, 改进 Gerchberg-Saxton(GS)算法, 实现了更快的收敛速度和更高的运算精度。然而这些算法都有一定的局限性, 多波长、多距离

收稿日期: 2020-03-30; 修回日期: 2020-04-01; 录用日期: 2020-04-03

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)

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

数字全息需要记录多幅全息图,实验操作困难;迭代法虽然利用单幅全息图即可获得具有较好质量的重建像,但重构的相位会被包裹在 $[-\pi, \pi]$ 。本课题组中的李运达利用改进的压缩感知算法对太赫兹 Gabor 同轴数字全息三维成像进行研究^[8],获得了较清晰的三维图像;本课题组中的袁静^[9]在李运达的基础上研究了相关参数对重构算法的影响。但两者的研究工作均是针对分立型目标,而现实中这样的目标物体少之又少,因此有必要针对连续型目标进行相应的研究。任何三维目标都可以看作是由多个二维层面的目标叠加而成。本文认为连续即为任何两层面的目标之间从轴向来看都是交叠的,即从投影到一个平面的图像来看,各目标字母之间不是完全全分立开来的,而是存在有相互重叠的

部分,本文仿真的连续型场景为投影至一个平面后各个字母之间刚要重叠但还未重叠的临界状态。

本文首先仿真了具有三个层面的连续型和分立型场景的重建结果,并进行对比分析。接着,改变算法中的迭代次数和稀疏限制参数这两个控制参数,采用主观评价和客观评价相结合的方法,研究参数的改变对连续型场景重建结果的影响。

2 基本原理简介

2.1 压缩感知三维重建基本原理

连续太赫兹 Gabor 同轴数字全息成像光路如图 1 所示。THz 波照射样本后,物体的衍射光场和直透光场在探测器表面发生干涉,形成全息图,经计算机重建即可获得重建图像。

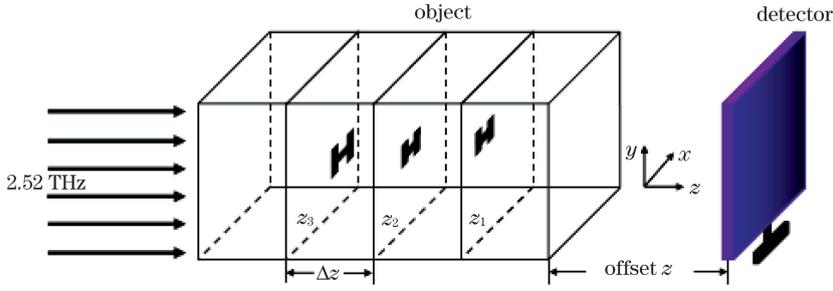


图 1 连续太赫兹 Gabor 同轴数字全息成像光路图

Fig. 1 Optical path of continuous terahertz Gabor in-line digital holographic imaging

假设单位振幅的平面光波垂直照射目标,设物体的振幅分布为 $\eta(x_0, y_0, z_0)$, 全息面 x 和 y 方向的采样间隔为 $\Delta x = \Delta y = \Delta$, z 方向间隔为 Δz , 像素个数为 $n_x \times n_y$ ($n_x = n_y$), z 方向的平面个数为 n_z 。由瑞利-索末非衍射积分公式,可得探测器记录的全息图强度为^[10]

$$I(m_H, n_H) = |1 + U_H(m_H, n_H)|^2 = 1 + 2\text{Re}\{U_H(m_H, n_H)\} + |U_H(m_H, n_H)|^2, \quad (1)$$

式中: $U_H(m_H, n_H)$ 为全息面光场分布; 1 为直透光场; $|U_H(m_H, n_H)|^2$ 为自相关项; $\text{Re}\{\cdot\}$ 表示取实部; m_H 和 n_H 分别为全息面像素对应的横坐标和纵坐标。忽略直流项的影响和自相关项的非线性作用时,可将全息图看作是对目标场强的线性记录,即近似为^[11]

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

式中: \mathbf{I} 为 $I(m_H, n_H)$ 组成的矩阵; \mathbf{H} 为系统测量矩阵; \mathbf{o} 为物体振幅三维分布的离散表示; \mathbf{e} 为误差小项。

在图像满足稀疏性条件时,压缩感知可由少数

测量值完成目标重建,可以通过求解全变差(TV)范数最小值重建目标的三维振幅分布,即

$$\mathbf{o} = \underset{\mathbf{o} \in \mathbf{R}}{\text{argmin}} (\|\mathbf{I} - \mathbf{H}\mathbf{o}\|_2^2 + \tau \|\mathbf{o}\|_{\text{TV}}), \quad (3)$$

式中 $\|\mathbf{o}\|_{\text{TV}} = \sum_{l_0=1}^{n_z} \sum_{m_0=1}^{n_x} \sum_{n_0=1}^{n_y} |\nabla(o_{l_0}(m_0, n_0))|$ 。满足(3)式右边项最小化的解即(1)式的解。

本研究引入稀疏限制参数 τ 来控制全变差项对重建结果的作用。常用两步迭代收缩/阈值(TwIST)对(3)式求解,可得^[12]

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

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

$$\alpha = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1-\kappa}{1+\kappa}\right)^2}}, \beta = \frac{2\alpha}{\lambda_1 + \lambda_N}, \kappa = \frac{\lambda_1}{\lambda_N}, \quad (6)$$

式中: λ_1 和 λ_N 为矩阵 $\mathbf{H}' \times \mathbf{H}$ 的最小和最大本征值,取 $\lambda_1 = 10^{-4}$, $\lambda_N = 1$; ν 为逆比例因子; t 为迭代次数; \mathbf{o}_0 为全 1 三维矩阵; \mathbf{o}_t 为迭代 t 次的矩阵结果;

\mathbf{o}_{t+1} 为迭代 $t+1$ 次的结果。由(5)式和(6)式可知,对每次迭代结果求全变差后图像边缘梯度较大,其余位置接近于 0,将迭代结果与全变差相减可实现滤波。通过选择合适的迭代次数 t 和系数限制参数 τ 即可实现不同程度的滤波,重建目标的三维分布。

2.2 客观评价指标

选取峰值信噪比 (PSNR, R_{PSN})^[13] 和平均结构相似度指数 (MSSIM, M_{MSSI})^[14] 来客观评价成像质量的好坏。PSNR 的表达式为

$$R_{\text{PSN}} = 10 \times \lg \left(\frac{P_{\max}^2 \times M \times N}{\sum_{\substack{i=1,2,\dots,M \\ k=1,2,\dots,N}} |P(i,k) - K(i,k)|^2} \right), \quad (7)$$

式中: $K(i,k)$ 和 $P(i,k)$ 分别为初始和重建的物光波前; $M \times N$ 为探测器的像素数; P_{\max} 为像素最大值。图像的 PSNR 值越高,说明重建像质量越好。MSSIM 的计算公式为

$$M_{\text{MSSI}}(\mathbf{F}, \mathbf{F}') = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N l(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j) \cdot c(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j) \cdot s(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j), \quad (8)$$

式中: \mathbf{F} 和 \mathbf{F}' 分别为参考图像和测试图像; $l(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j)$ 为像素的亮度; $c(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j)$ 为像素的对比度; $s(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j)$ 为像素的结构度。它们的表达式分别为

$$l(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j) = \frac{2\mu_{F_j}\mu_{F'_j} + C_1}{\mu_{F_j}^2 + \mu_{F'_j}^2 + C_1}, \quad (9)$$

$$c(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j) = \frac{2\sigma_{F_j}\sigma_{F'_j} + C_2}{\sigma_{F_j}^2 + \sigma_{F'_j}^2 + C_2}, \quad (10)$$

$$s(\mathbf{F}_j, \mathbf{F}'_j) = \frac{\sigma_{F_j F'_j} + C_3}{\sigma_{F_j}\sigma_{F'_j} + C_3}, \quad (11)$$

式中: μ_{F_j} 和 $\mu_{F'_j}$ 分别为以参考和测试图像像素为中心的窗口均值(窗口大小 3×3); $\sigma_{F_j}^2$ 和 $\sigma_{F'_j}^2$ 为相应的窗口方差; $\sigma_{F_j F'_j}$ 为窗口协方差; $C_1 = (K_1 L)^2$, $C_2 = (K_2 L)^2$, $C_3 = C_2/2$, 其中, $L = 255$, $K_1 = 0.01$, $K_2 = 0.03$ 。MSSIM 值越接近于 1,测试图像越接近标准图像。

3 仿真实验结果与分析

根据图 2,建立连续型仿真场景,样本灰度为 0,背景为 1。样本“H1”位于距离探测器 15 mm 处,“H2”和“H3”分别位于距离探测器 20 mm 和 25 mm 处,由分辨率计算公式: $\Delta_x = \lambda \sqrt{1 + (2z/D)^2} / 2$, $\Delta_z = \lambda (2z/D)^2$ 可知,在图像尺寸 D 为 12.4 mm 时,样本“H2”处横向分辨率 Δ_x 约为 0.20 mm,轴向分辨率 Δ_z 约为 1.24 mm,所以样本“H1”和“H2”的线宽选取 0.2 mm,尺寸为 0.6 mm \times 0.6 mm;样本“H3”处的横向分辨率约为 0.25 mm,轴向分辨率约为 1.93 mm,所以“H3”的线宽选取 0.3 mm,尺寸为 0.9 mm \times 0.9 mm。投影到一个平面的情况如图 3(a)所示,由左上至右下的三个样本依次为“H1”、“H2”和“H3”。图 3(b)和图 3(c)为相应全

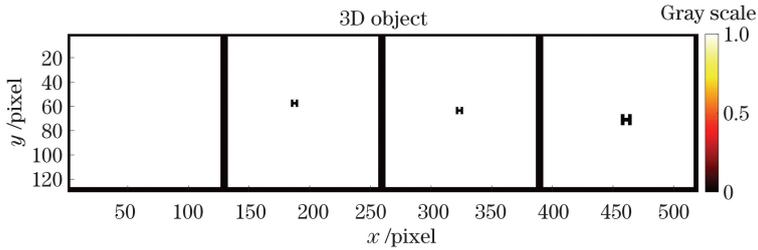


图 2 仿真场景

Fig. 2 Simulation scene

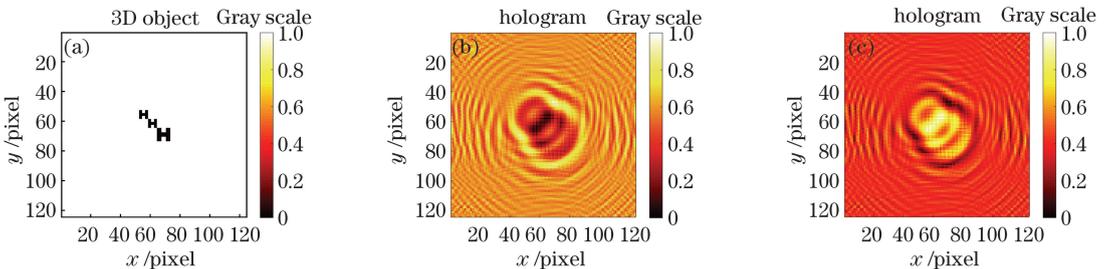


图 3 场景的投影及全息图。(a)场景的投影;(b)归一化全息图;(c)反色变换后的全息图

Fig. 3 Scene projection and holograms. (a) Scene projection; (b) normalized hologram; (c) inverted hologram

息图。太赫兹目标的非零像素远多于零像素值,不满足压缩感知(CS)算法的稀疏性条件,所以需对全息图进行反色处理,以便进行三维重构。

根据CS原理,可知影响重建结果的主要参数为稀疏限制参数 τ 和迭代次数 t 。本文针对连续场景,研究其对CS太赫兹三维重建像的影响,给出理想参数。仿真基本参数:THz波的波长为 $118.83\ \mu\text{m}$,初始面到探测器的距离为 $10\ \text{mm}$, $n_z = 4$, $\Delta z = 5\ \text{mm}$ 且 τ 为 $0.0050, 0.0075, 0.0100, 0.0125, 0.0150, 0.0175, 0.0200, 0.0500, 0.0750, 0.1000$,连续型样本由上到下命名为“H1”、“H2”和“H3”。此外,为便于观察,本研究使用反色变换后的图像即背景为黑的图像进行MSSIM的计算。

3.1 连续及分立场景全息图重建效果比较

为考察连续型目标各层之间相互影响,选取分立型场景进行对比研究,分立型即投影图像目标字母之间相隔很远,如图4所示。分立型场景对应样本命名为“H11”、“H21”和“H31”。

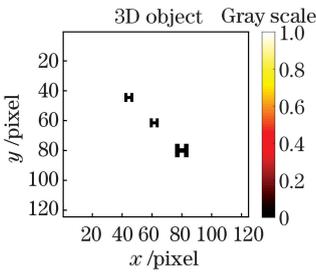


图4 分立型仿真场景

Fig. 4 Discrete simulation scene

图5为 $t = 300$ 时各样本的客观评价曲线,图6为 $\tau = 0.0200$ 时的重建图像及其与标准图像的差值图像。本实验针对图1所示的三维场景,即三个目标字母分布在三个相互独立的层面。为方便分析,本文针对各个目标字母所在层面进行对比。

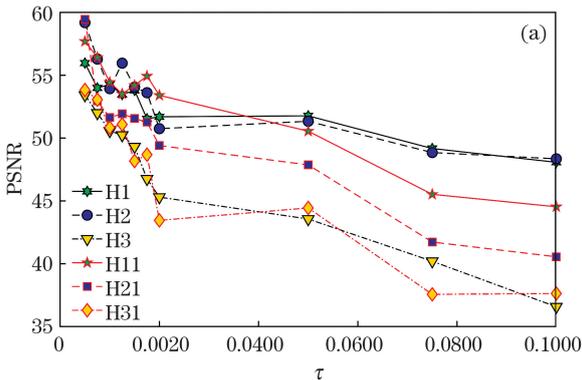


图6(a1)~(a3)分别为重建的样本“H1”、“H2”和“H3”;图6(b1)~(b3)为对应的分立型样本“H11”、“H21”和“H31”。综合来看,PSNR和MSSIM的变化趋势相同,且随 τ 的增大,波动下降。分析以PSNR为主且主要考虑 $\tau \leq 0.0200$ 的情况。此时分立型“H11”在各 τ 值处PSNR均不同程度地高于连续型“H1”,且“H11”的PSNR在55上下波动而“H1”在53.5上下波动;分立型“H31”除 τ 为 0.0150 和 0.0200 两点外客观值均高于“H3”, $0.0150, 0.0200$ 两样本的PSNR均值均约为50;分立型“H21”的PSNR除 τ 为 0.0050 外均低于“H2”,可以看出 τ 这一参数对重建结果是有影响的。从图6的差值图像来看分立型“H21”的背景不够均匀,但连续型“H2”目标及周围的误差更大,这是由于“H31”和“H11”对“H21”的背景产生了较大的影响,样本“H3”和“H1”对“H2”目标有较大影响;连续型“H1”的背景较“H11”均匀,但目标偏离真值更多;相较于“H31”,“H3”目标偏离真值较多,但背景均匀,与PSNR的结果相符。总的来讲,两场各样本的客观评价结果均相差不多,这是因为太赫兹图像具有目标小、像素点较少的特点;样本“H3”和“H31”的客观值均较低,成像质量略差于其他样本,这是因为该样本偏离探测器较远且目标分辨率较低。

图7为 $t = 300$ 时连续和分立型场景1、3样本在 $\tau = 0.0175$ 处的重建图像及其与标准图像的差值图像。连续型样本“H1”和“H3”无论背景还是目标部分均偏离真值更多,样本“H1”和“H3”背景偏离真值分别约为 $1.5\ \text{pixel}$ 和 $2\ \text{pixel}$,而“H11”和“H31”背景像素偏离真值约为 $1\ \text{pixel}$ 和 $1.6\ \text{pixel}$ 。此时,分立型两样本的成像质量相对更好,与客观评价结果相符合。

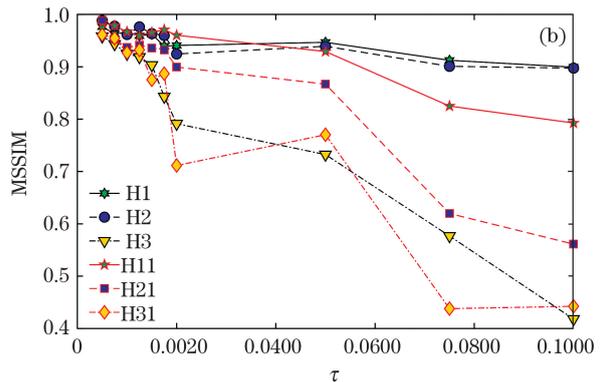


图5 $t = 300$ 时各样本的PSNR和MSSIM随 τ 的变化。(a) PSNR; (b) MSSIM

Fig. 5 PSNR and MSSIM of each sample changed with τ at $t = 300$. (a) PSNR; (b) MSSIM

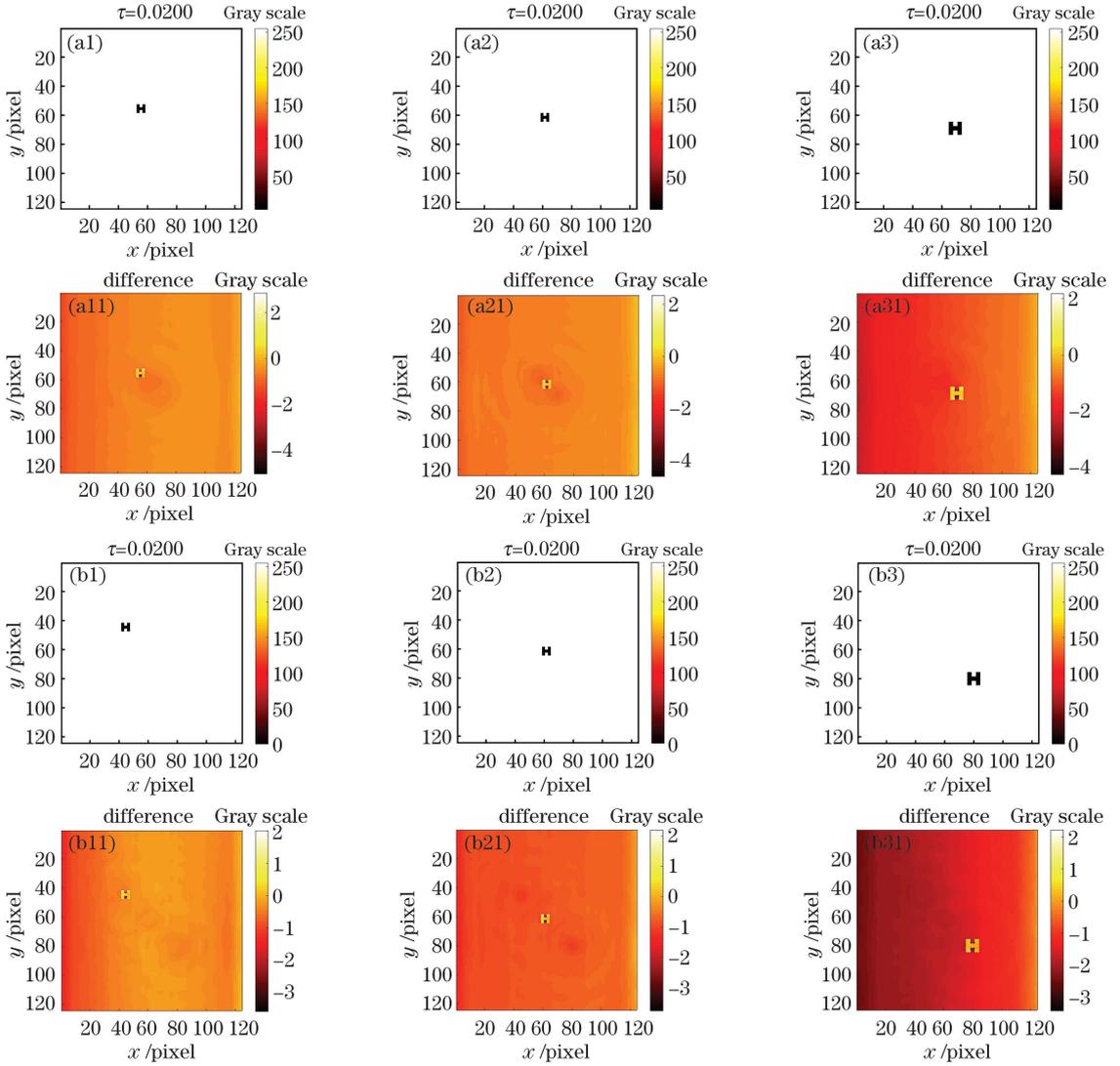


图 6 $t = 300$ 时的重建图像及其与标准图像的差值。(a)连续型;(b)分立型

Fig. 6 Reconstructed images and their differences with the standard images at $t = 300$. (a) Continuous; (b) discrete

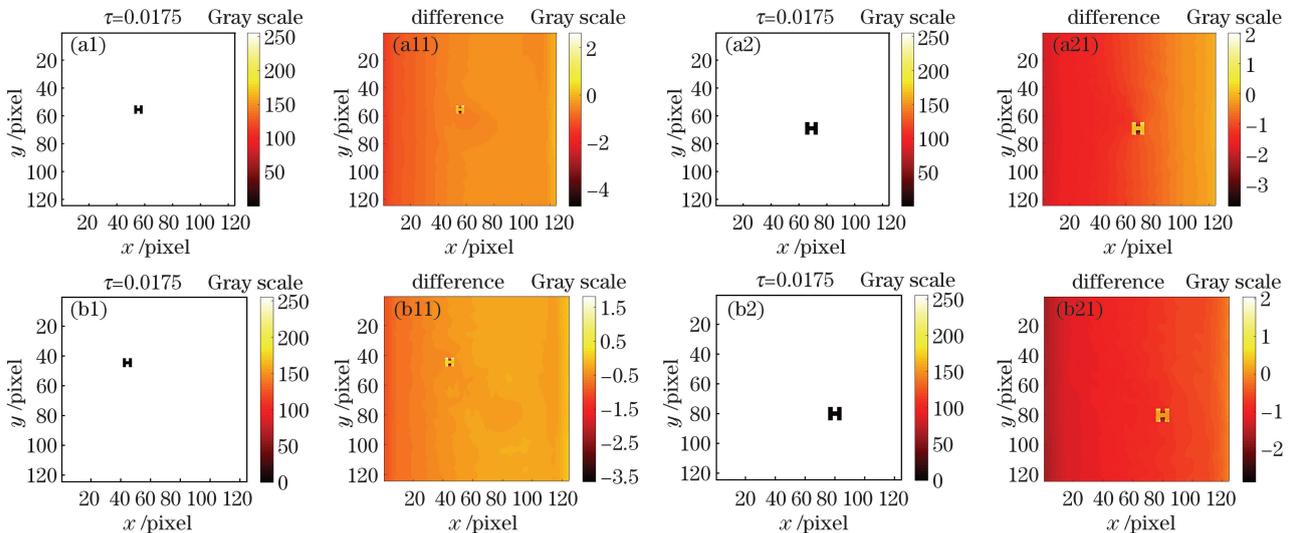


图 7 $t = 300$ 时 1、3 样本的重建像及其与标准图像的差值。(a)连续型“H1”和“H3”;(b)分立型“H11”和“H31”

Fig. 7 Reconstructed images of samples 1 and 3 and their differences with the standard images at $t = 300$. (a) Continuous “H1” and “H3”; (b) discrete “H11” and “H31”

由于目标本身的重建质量至关重要,因此给出各样本目标部分的 PSNR 曲线,如图 8 所示。因为各目标均为不规则的“H”形状,无法进行 MSSIM 计算,所以仅给出 PSNR 的计算结果。就目标的重建效果而言,各样本的 PSNR 随 τ 的增大而逐渐下降,其中,分立型“H11”和“H31”的 PSNR 略高于“H1”和“H3”;而样本“H21”和“H2”两者几乎无差别。这与前面的分析相吻合。

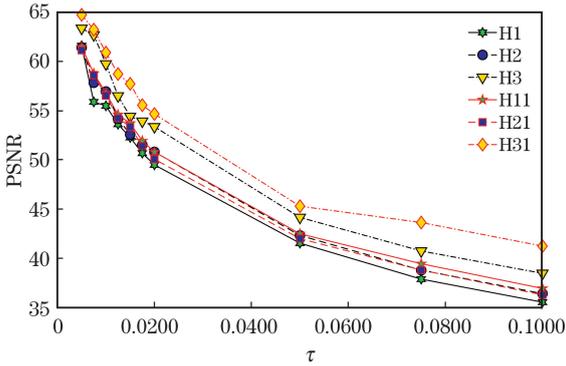


图 8 $t = 300$ 时样本目标部分的 PSNR 随 τ 的变化
Fig. 8 PSNR of the target part of the sample changed with τ at $t = 300$

综上,场景各层之间是相互影响的,当 $\tau \leq 0.0200$ 时无论是整体还是目标部分,成像效果均较好,由图 8 可以容易地看出, $\tau > 0.0200$ 时目标的峰值信噪比下降明显,因此不予考虑。连续型场景各样本目标之间的影响较背景的影响更大,而分立型则是背景间的影响较大。因为目标是我们的研究对象且目标间的影响相对不好处理,故针对连续场景进行相关研究是有必要的。

3.2 迭代次数和稀疏限制参数的选取研究

保持样本“H1”、“H2”和“H3”位置、层数和 τ 的取值不变,研究不同迭代次数和稀疏限制参数的影响,由于每次给出的结果均为客观评价指标随稀疏限制参数的变化,因此仅改变迭代次数进行仿真。下面将从重建像和客观值两方面进行对比分析。

图 9 给出了迭代 200 和 350 次的重建图像,图 10 为相应的客观评价曲线,因已经不考虑 $\tau > 0.0200$ 时的相关应用,仅给出 $\tau \leq 0.0200$ 的相关曲线;迭代 300 次的重建像和客观曲线在图 6(a)和图 5 中已给出。由图 9 可知, $t = 200$ 目标和背景基本可恢复到预定值,获得了较好的重建像。

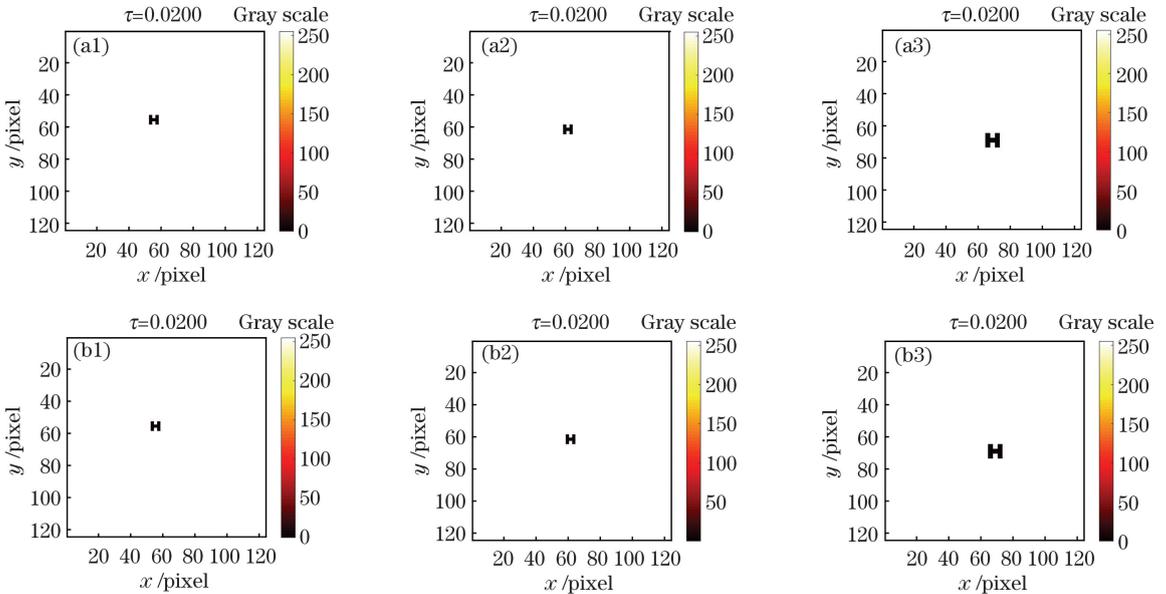


图 9 不同迭代次数下的重建像。(a) $t = 200$; (b) $t = 350$

Fig. 9 Reconstructed images with different iterations. (a) $t = 200$; (b) $t = 350$

当 $t = 200$ 时,随 τ 的增大 PSNR 和 MSSIM 均波动变化。样本“H1”、“H2”和“H3”的 PSNR 均值分别为 52.38, 51.32, 43.44; MSSIM 分别为 0.9442, 0.9317, 0.7085。

当 $t = 300$ 时,客观评价曲线整体呈下降趋

势,且相较于 $t = 200$ 的情况,样本“H3”提升最为明显, PSNR 和 MSSIM 均值分别为 49.66 和 0.8976, 相对提升 14.32% 和 26.69%; “H1”的 PSNR 平均值为 53.54, 相对迭代 200 次时提升 2.21%, MSSIM 均值为 0.9582, 提升 1.48%;

“H2”的客观值均值分别为 54.83 和 0.9646, 分别提升 6.84% 和 3.53%。

当 $t = 350$ 时, PSNR 和 MSSIM 整体与 $t = 300$ 时的变化趋势相同。“H1”的 PSNR 均值为 53.52, 相较于 $t = 300$, 各个 τ 值处的 PSNR 相对提升量可以控制在 $\pm 0.60\%$ 之内, MSSIM 均值为 0.9574, 各个 τ 值处的 MSSIM 提升范围为 $-0.40\% \sim 0.18\%$; “H2”的 PSNR 和 MSSIM 均

值分别为 54.86 和 0.9655, 各个 τ 值处 PSNR 和 MSSIM 的提升范围分别为 $-2.07\% \sim 3.5\%$ 和 $-1.17\% \sim 2.67\%$ 。可以看出, 相对迭代 300 次来讲“H1”和“H2”的提升量很小, 均在 3.5% 之内, 甚至出现客观值下降的情况。“H3”在各个 τ 值处的客观值均有提升, 但 PSNR 提升均在 4% 之内, MSSIM 提升均在 7% 之内, 两者均值分别为 51.15 和 0.9238。

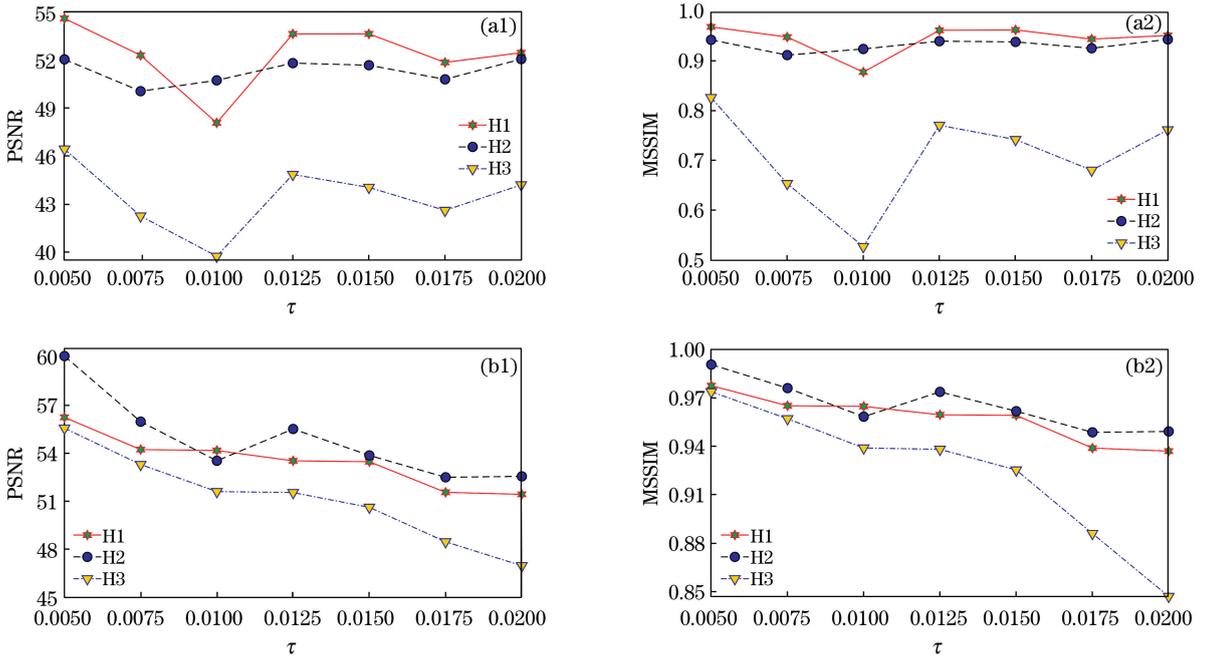


图 10 不同迭代次数下样本 PSNR 和 MSSIM 随 τ 的变化。(a) $t = 200$; (b) $t = 350$

Fig. 10 Change of sample PSNR and MSSIM with τ under different iterations. (a) $t = 200$; (b) $t = 350$

综上, 迭代 300 次相较于迭代 200 次客观值均有提升, 且“H3”提升最为明显; 继续增加迭代次数至 350 次, 样本“H1”和“H2”的客观值涨幅很小, 个别点甚至有所降低, “H3”的客观值涨幅不高, 在 7% 之内。

为验证上述结果并非特例, 选取连续型样本“T”进行仿真, 除样本字母不同之外, 其他参数均与连续型样本“H”选取的参数相同, 其投影到一个平

面的场景如图 11(a) 所示。图 11(b) 和 (c) 为 $t = 300$ 时各样本的 PSNR 随 τ 的变化, 由于 MSSIM 的变化趋势与 PSNR 相同, 仅给出 PSNR 的曲线图。从图 11(b) 来看, 场景整体的 PSNR 随 τ 的增加, 波动下降, 就图 11(c) 中的目标字母而言 PSNR 随 τ 的下降更加明显, 所以, 对于样本“T”也仅考虑 $\tau \leq 0.0200$ 的情况。

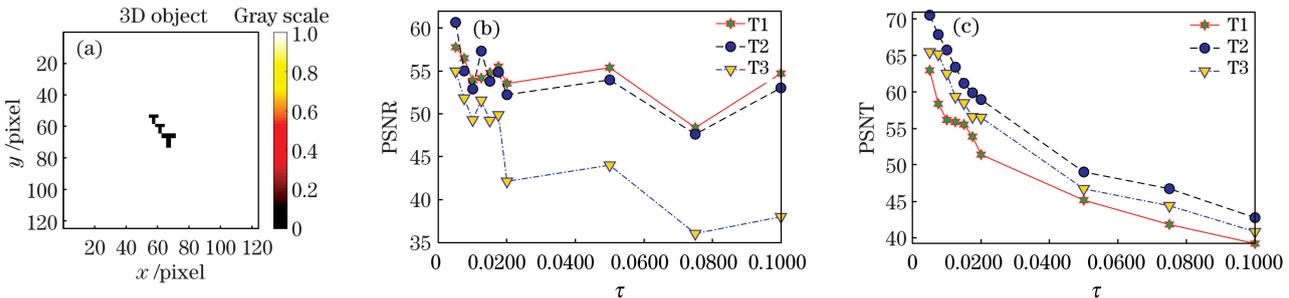
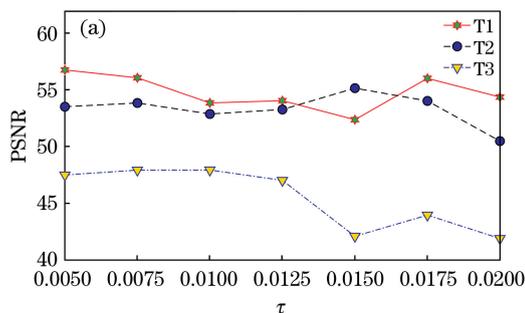


图 11 样本“T”仿真场景、 $t = 300$ 时整体和目标的 PSNR 随 τ 的变化。(a) 场景; (b) 整体; (c) 标

Fig. 11 Sample “T” simulation scene, PSNR of the sample and the target part changed with τ at $t = 300$. (a) Scene; (b) whole; (c) target

图 12 给出了不同迭代次数下样本“T”的 PSNR 随 τ 的变化。观察数据发现,当 $t=200$ 时,“T1”、“T2”和“T3”的 PSNR 均值为 54.81, 53.34, 45.49。 $t=300$ 时,各样本的 PSNR 均值分别为 55.16, 55.22, 49.85, 相较于 $t=200$ 的情况,分别提升 0.64%, 3.52%, 9.58%, 其中样本“T3”提升最为



明显;增加次数至 $t=350$ 时,各样本的 PSNR 均值变为 55.01, 56.37, 51.16, 相较于 $t=300$ 时的 PSNR 分别下降 0.27%、提升 2.08% 和 2.63%, 样本“T1”的 PSNR 均值已经有所降低, 样本“T2”和“T3”的提升也很小, 这与连续型样本“H”的结果是相吻合的。

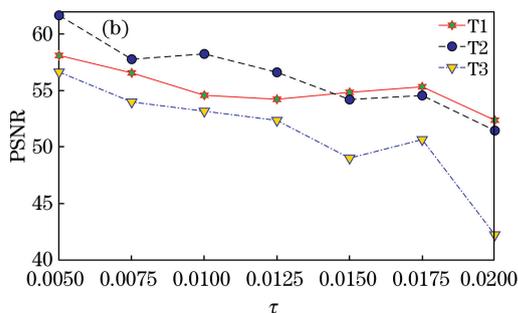


图 12 不同迭代次数下样本“T”的 PSNR 随 τ 的变化。(a) $t=200$; (b) $t=350$

Fig. 12 Change of PSNR of sample “T” with τ under different iterations. (a) $t=200$; (b) $t=350$

综合考虑样本“T”和“H”迭代 200、300 和 350 次的重建效果,认为针对连续型场景,当 $t=300$ 且 $\tau \leq 0.0200$ 时可以获得好的重建结果。

4 结 论

采用主客观评价相结合的方法,仿真给出了太赫兹三维连续场景和分立场景的对比分析,无论是整体还是仅目标本身,两类场景均在 $\tau \leq 0.0200$ 时获得好的重建像,且分立场景的目标成像质量更好。针对连续型场景,对比分析了不同实验参数对重建像的影响,实验表明,重建面个数为 $n_z=4$ 、迭代次数为 $t=300$ 时,稀疏限制参数 $\tau \leq 0.0200$ 时的重建结果较好。

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] Peng Y, Shi C J, Zhu Y M, et al. Qualitative and quantitative analysis algorithms based on terahertz spectroscopy for biomedical detection [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614002.
彭艳, 施辰君, 朱亦鸣, 等. 太赫兹光谱技术在生物医学检测中的定性定量分析算法 [J]. 中国激光,

2019, 46(6): 0614002.

- [3] Wang B, Wang X K, Yu Y, et al. Terahertz linear array fast scanning imaging [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614029.
王彪, 王新柯, 俞跃, 等. 太赫兹线阵快速扫描成像 [J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614029.
- [4] Wang Y Y, Chen L Y, Xu D G, et al. Three-dimensional reconstruction of rat brain trauma based on terahertz imaging [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(3): 0317002.
王与焯, 陈霖宇, 徐德刚, 等. 基于太赫兹波成像的鼠脑创伤三维重构 [J]. 光学学报, 2019, 39(3): 0317002.
- [5] Han B, Xiao W, Pan F, et al. Optimization of space sampling distance of phase retrieval algorithm for in-line digital holography [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(12): 120903.
韩冰, 肖文, 潘锋, 等. 同轴数字全息相位恢复算法采样距离优化研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(12): 120903.
- [6] Hu J Q, Li Q, Zhou Y. Support-domain constrained phase retrieval algorithms in terahertz in-line digital holography reconstruction of a nonisolated amplitude object [J]. Applied Optics, 2016, 55(2): 379-386.
- [7] Li Q, Wu Z, Xu J S, et al. Phase recovery algorithm based on pupil diversity [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0626001.
李倩, 吴桢, 徐节速, 等. 基于瞳面差异的相位复原算法 [J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0626001.
- [8] Li Q, Li Y D. Continuous-wave 2.52 Terahertz

- Gabor inline compressive holographic tomography [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 585-596.
- [9] Yuan J, Li Q, Gong W P. Influences of compressive sensing 3D reconstruction algorithm control parameters on terahertz digital holography reconstruction[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1014001.
袁静, 李琦, 巩文盼. 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[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1014001.
- [10] Xue K, Li Q, Li Y D, et al. Continuous-wave terahertz in-line digital holography [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(15): 3228-3230.
- [11] Brady D J, Choi K, Marks D L, et al. Compressive holography [J]. *Optics Express*, 2009, 17(15): 13040-13049.
- [12] 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.
- [13] Wang Z, Bovik A C. A universal image quality index [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2002, 9(3): 81-84.
- [14] 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.