

## 纸质遮挡物对太赫兹二次曝光数字全息的影响

成珂阳<sup>\*</sup>, 李琦

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** 太赫兹数字全息成像过程中, 遮挡物的透过率、噪声等因素均会影响成像效果; 而太赫兹成像技术在安全检测、医学成像等方面具有广泛的实际应用, 因此遮挡物成为需要研究的重要问题。针对 2.52 THz 波进行了纸质遮挡的二次曝光数字全息成像的研究。通过实验估测 B5 纸和热敏纸的噪声分布和透过率以及探测器引起的误差, 确立了仿真模型的参数, 并仿真了两种纸张遮挡的影响。通过实验获得了热敏纸遮挡的横向分辨率为 0.2 mm 的目标及 B5 纸遮挡的横向分辨率为 0.3 mm 的目标等的重建振幅像。热敏纸遮挡的 0.3 mm 分辨率目标与外围区域的对比度为 0.46, 偏差为 0.07, 这最接近遮挡物仿真结果。

**关键词** 成像系统; 太赫兹数字全息; 二次曝光; 遮挡物

中图分类号 TN29

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.2014004

## 1 引言

太赫兹成像以其较低的光子能量和对非金属以及非极性物质较高的穿透能力, 在医学检查、安全检测和环境监测等方面展现出巨大前景<sup>[1-3]</sup>。由于数字全息可以消除衍射的影响, 且分辨率较高, 因此太赫兹数字全息成像的研究受到越来越多的重视<sup>[4]</sup>。

太赫兹辐射不具有 X 射线的电离特性, 因此不会对材料和人体造成伤害, 其比 X 射线具有更明显的应用优势, 研究太赫兹成像系统对于遮挡物的穿透能力显得十分重要。2019 年, 经文等<sup>[5]</sup>利用频率为 0.14 THz 的全极化雷达, 开展了针对隐藏违禁品检测的太赫兹波站开式全极化全息成像实验研究。王彪等<sup>[6]</sup>采用 0.3 THz 辐射源和线阵探测器搭建了太赫兹线阵扫描成像系统, 高精度定位隐藏在信封内的剪刀和小刀。在基于 CO<sub>2</sub> 连续太赫兹波的数字全息以及二次曝光成像方面, 2014 年, 王大勇等<sup>[7]</sup>通过全息图预处理和相位恢复算法, 获取了样品的振幅和相衬图像, 有效抑制了共轭像。胡佳琦等<sup>[8-9]</sup>在非孤立目标的 2.52 THz 数字全息成像实验中, 比较了多种相位恢复算法<sup>[10-12]</sup>; 他们提出

的结合扩展切趾的复合二次曝光振幅约束相位恢复算法(D-APRA)可提高对比度, 且针对非孤立目标仅利用振幅约束条件比同时利用振幅和相位约束条件的效果更好。胡佳琦等<sup>[13]</sup>还利用相位恢复法仿真研究了记录距离和间隔对于太赫兹数字全息重建结果的影响。2020 年, 王大勇等<sup>[14]</sup>提出一种连续太赫兹波双物距叠层成像方法及相关重建算法。据调研, 研究人员还未对遮挡物在太赫兹二次曝光数字全息成像中的影响进行研究。此外, 纸张是常见的可见光不可透过但太赫兹波透过率较高的材料, 在实验中可通过更换材质改变噪声及透过率等条件; 因此, 研究纸质遮挡物在太赫兹成像过程中的影响对于其他材料的使用具有很好的参考价值。

本文采用波长为 118.83  $\mu\text{m}$ 、探测器像元尺寸为 0.1 mm、像元数为 124 $\times$ 124 的太赫兹二次曝光数字全息成像系统, 针对横向分辨率为 0.2 mm 和 0.3 mm 的金属目标, 研究了 B5 纸和热敏纸两种纸质遮挡物对重建振幅像结果的影响。同时, 给出了几种常用的客观评价标准<sup>[9,15]</sup>的相关结果。

收稿日期: 2021-02-21; 修回日期: 2021-03-22; 录用日期: 2021-03-29

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)

通信作者: \*c1092986874@163.com

## 2 基本原理

### 2.1 二次曝光振幅约束相位恢复算法原理及仿真流程

本文采用文献[8-9]中的复合二次曝光振幅约束相位恢复算法,在光波在物面和两个记录平面之间的独立往返传播过程中仅利用归一化全息图的幅

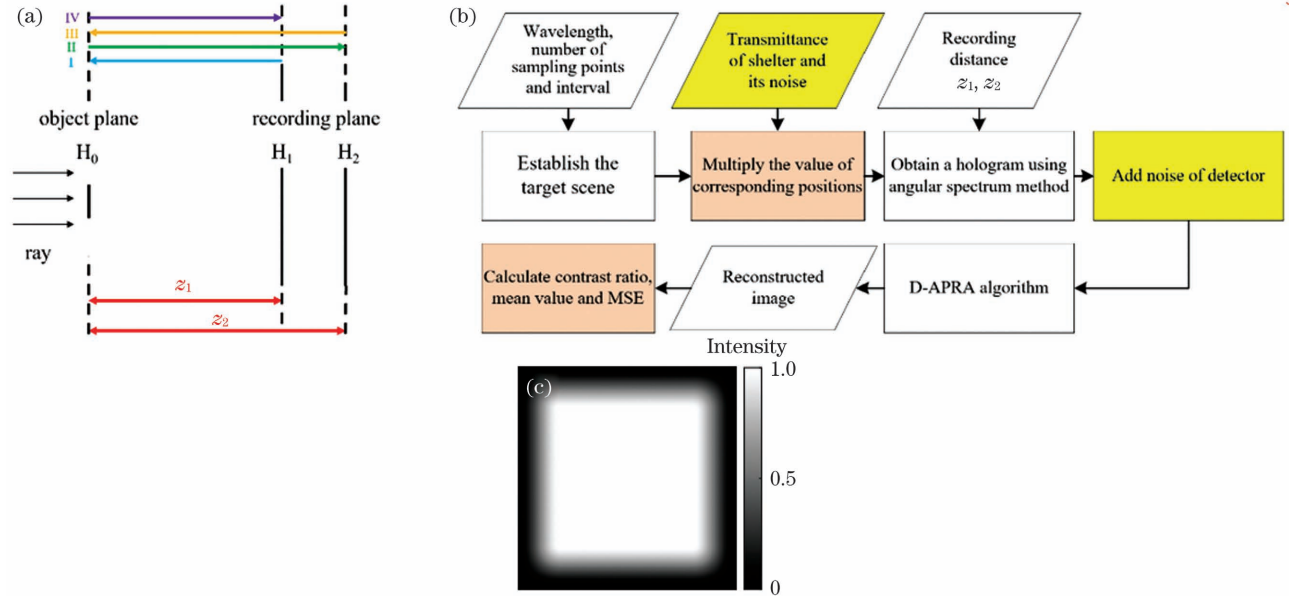


图 1 二次曝光原理示意图。(a)二次曝光迭代示意图<sup>[13]</sup>;(b)遮挡物影响的仿真流程图;(c)Tukey 窗函数示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of double exposure principle. (a) Schematic diagram of double exposure iteration<sup>[13]</sup>;

(b) simulation flowchart of influence of shelters; (c) schematic diagram of Tukey window function

记录平面  $H_1$  上光场的分布函数  $U_1^n$  为

$$U_1^n(x_1, y_1) = A_1 \exp [i\varphi_1(x_1, y_1)], \quad (1)$$

式中:  $\varphi_1$  为初始相位。

光场从记录面  $H_1$  到物面  $H_0$  反向传播,则物面的光场分布  $U_0^n$  为

$$U_0^n(x_0, y_0) = F^{-1} \{F\{U_1^n(x_1, y_1)\} H_B^{-1}(f_x, f_y)\}, \quad (2)$$

其中

$$H_B^{-1}(f_x, f_y) = \exp[-ikz_1 \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}], \quad (3)$$

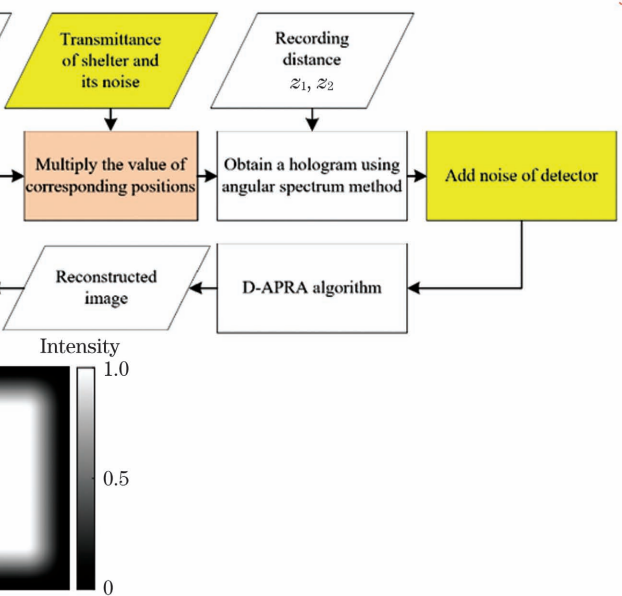
式中:  $H_B^{-1}(f_x, f_y)$  为反向角谱传递函数;  $f_x, f_y$  为  $x$  方向和  $y$  方向的频域坐标;  $k$  为波数;  $F$  代表傅里叶变换;  $F^{-1}$  代表傅里叶逆变换;  $U_1^n$  为记录面  $H_1$  的光场分布。

提取物光场  $U_0^n$  的振幅及相位后,仅采用振幅约束条件进行限制,即将幅值超过 1 的区域的幅值设为 1,其余保持不变。

调制后的物光场  $U_0^n$  从物面  $H_0$  传递到记录面  $H_2$ ,利用角谱法得到  $U_2^n$ :

值约束条件;为进一步消除噪声,还对归一化全息图振幅进行了扩展和 Tukey 窗函数切趾处理。

图 1(a)给出了二次曝光迭代示意图。首先得到  $H_1, H_2$  面的全息图,将全息图强度除以照明光强得到对应的归一化全息图;扩展、切趾后,对所得结果进行开平方,得到记录平面光场的幅值分布  $A_1$  和  $A_2$ <sup>[8]</sup>。



$$U_2^n(x_2, y_2) = F^{-1} \{F\{U_0^n(x_0, y_0)\} H_B(f_x, f_y)\}, \quad (4)$$

$$H_B(f_x, f_y) = \exp[ikz_2 \sqrt{1 - (\lambda f_x)^2 - (\lambda f_y)^2}], \quad (5)$$

式中:  $H_B(f_x, f_y)$  为正向角谱传递函数。

提取物光场  $U_2^n$  的相位并乘上  $H_2$  面光场的振幅  $A_2$ ,得到  $H_2$  面上新的光场分布函数  $U_2^n$ ,并由此计算反向传播到物面  $H_0$  上的光场分布  $U_0^n$ 。如此循环,直至达到迭代次数,该新的物光场即为重建波前,通过提取振幅获得重建像的振幅分布。

图 1(b)为遮挡物影响的仿真流程图。首先输入成像系统参数,如波长、采样点间隔等;然后建立仿真场景。根据所研究的材料特性输入遮挡物透过率及其噪声参数,并与目标场景对应位置的透过率数值相乘;再输入二次曝光记录距离,其中  $z_1$  为第一次曝光记录的距离,  $z_2$  为第二次曝光记录的距离,利用角谱法获得两个全息图并加入探测器噪声;利用 D-APRA 获得重建振幅像;最后计算对比度、均值等客观评价参数。

Tukey 窗函数切趾处理可以使重建结果更加平滑。图 1(c) 给出了本文使用的 Tukey 窗函数示

意图。

Tukey 窗函数的表达式为<sup>[16]</sup>

$$w(m, n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq |m| \leq r \frac{M}{2}, 0 \leq |n| \leq r \frac{N}{2} \\ 0.5 \left\{ 1 + \cos \left\{ \pi \left( m - r \frac{M}{2} \right) / \left[ 2(1-r) \frac{M}{2} \right] \right\} \right\} & r \frac{M}{2} \leq |m| \leq \frac{M}{2}, 0 \leq |n| \leq r \frac{N}{2} \\ 0.5 \left\{ 1 + \cos \left\{ \pi \left( n - r \frac{N}{2} \right) / \left[ 2(1-r) \frac{N}{2} \right] \right\} \right\} & 0 \leq |m| \leq r \frac{M}{2}, r \frac{N}{2} \leq |n| \leq \frac{N}{2} \\ 0.25 \left\{ 1 + \cos \left\{ \pi \left( m - r \frac{M}{2} \right) / \left[ 2(1-r) \frac{M}{2} \right] \right\} \right\} \times & r \frac{M}{2} \leq |m| \leq \frac{M}{2}, r \frac{N}{2} \leq |n| \leq \frac{N}{2} \\ \left\{ 1 + \cos \left\{ \pi \left( n - r \frac{N}{2} \right) / \left[ 2(1-r) \frac{N}{2} \right] \right\} \right\} & \end{cases}, (6)$$

式中： $m$  和  $n$  表示坐标； $M$  和  $N$  表示窗口维度。

### 2.2 客观评价指标和实验装置及参数

为了评估不同遮挡条件下的重建效果，主要以对比度为判据。重建结果中振幅分布的对比度( $C$ )定义为<sup>[9]</sup>

$$C = \frac{M_2 - M_1}{M_2}, (7)$$

式中： $M_1$  为成像目标区域的均值； $M_2$  为成像目标附近背景区域的均值。计算时要求多个目标或背景板区域的均值再取平均。

为了进一步比较不同遮挡条件下的重建像质量，引入重建图像与原始图像之间的均方差为判据。均方差( $M_{SE}$ )定义为

$$M_{SE} = \frac{\sum_i [X_r(i) - X(i)]^2}{\sum_i X(i)^2}, (8)$$

式中： $X_r$  为重建图像像素点的幅值； $X$  为原始图像像素点的幅值。

图 2 给出了 2.52 THz 二次曝光数字全息成像装置图。在原有的同轴数字全息装置中，为精密控制二次曝光的相对位置，增加了目标精密位移台。太赫兹波经离轴抛物面镜 PM1 和 PM2 准直扩束及平面反射镜 M1 反射后，沿  $z$  方向照射到精密位移台上的目标上，最终被面阵探测器接收。实验时，首先获得不加目标时的照明光；然后移动精密位移台，测量两个  $z$  值的目标全息图。实验中所用的太赫兹光源为 Coherent 公司生产的 SIFIR-50 激光器，波长为 118.83  $\mu\text{m}$ 。采用 Ophir-Spricon 公司生产的热释电面阵探测器 (Pyrocam III)，探测器像素个数为 124×124，像元间距为 0.1 mm×0.1 mm，像素大小为 85  $\mu\text{m}$ ×85  $\mu\text{m}$ 。

实验设计制作的目标场景中，基底采用聚四氟

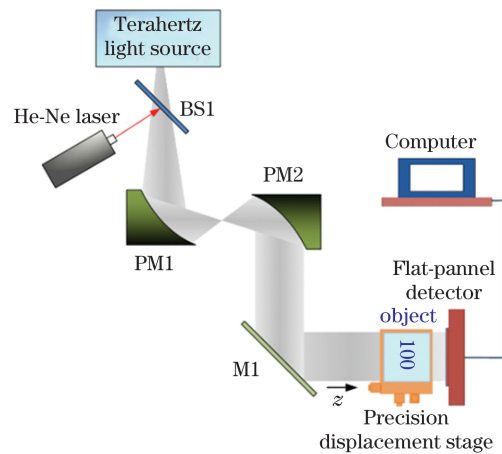


图 2 实验装置图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental setup

乙烯玻纤布覆铜箔板，基底材料透过率约为 0.7，目标为金属数字“100”。实验目标实物如图 3 所示，目标下方放置了直尺。两个目标场景中，0.2 mm 和 0.3 mm 分辨率的金属数字线条宽度及其间隔分别为 0.2 mm 和 0.3 mm，线条宽高比为 1:5，即“100”区域的宽分别为 1.8 mm 和 2.7 mm，高分别为 1.0 mm 和 1.5 mm。从照片中可见，金属数字目标周围存在透过率较低的栅格线。

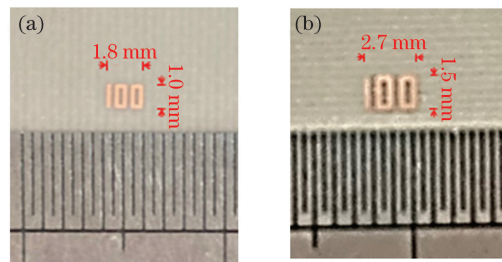


图 3 成像目标实物照片。(a) 横向分辨率为 0.2 mm；(b) 横向分辨率为 0.3 mm

Fig. 3 Actual photos of imaging targets. (a) Lateral resolution is 0.2 mm; (b) lateral resolution is 0.3 mm

### 3 仿真模型参数确立和结果分析

#### 3.1 纸质遮挡物和探测器噪声参数的估测

本文仿真和真实实验全息图重建过程中,归一化全息图通过复制边界扩展至  $558 \times 558$ ,再利用 Tukey 窗函数进行切趾处理,其中窗函数参数  $r=0.4$ 。

在研究纸质遮挡物对成像结果的影响之前,首

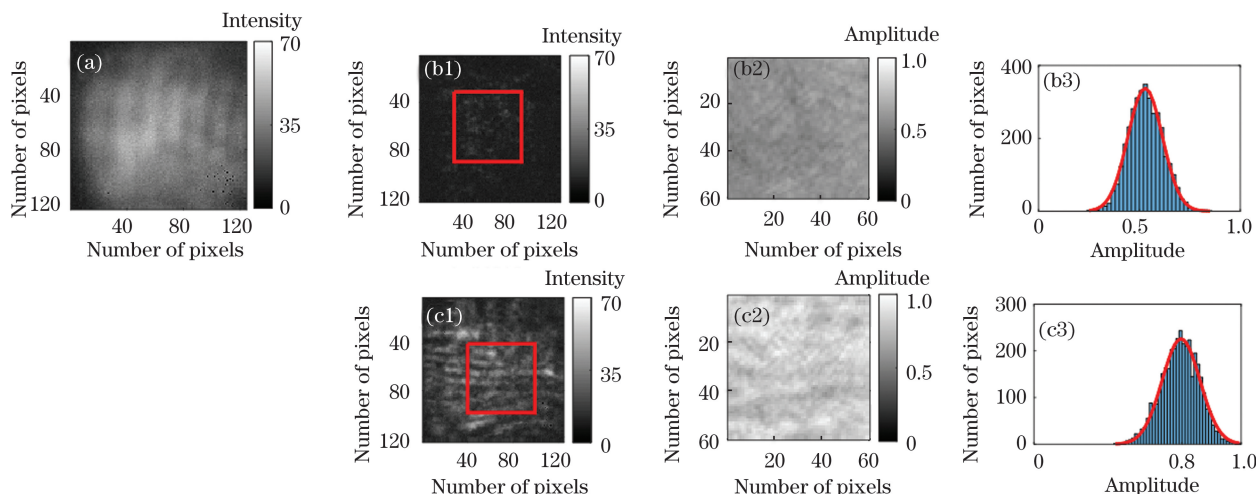


图 4 纸张参数测定实验结果。(a)照明光图像;(b1)单张 B5 纸的 60 帧平均全息图;单张 B5 纸单次曝光 APRA 获得的裁剪后(b2)重建振幅像和(b3)直方图;(c1)热敏纸的 60 帧平均全息图;热敏纸的单次曝光 APRA 获得的裁剪后(c2)重建振幅像和(c3)直方图

Fig. 4 Experimental results of paper parameter measurement. (a) Illumination light image; (b) average hologram of 60 frames of single B5 paper; (b2) reconstructed amplitude image and (b3) histogram of single B5 paper after single exposure APRA and cutting; (c1) average hologram of 60 frames of thermal paper; (c2) reconstructed amplitude image and (c3) histogram of thermal paper after single exposure APRA and cutting

从图 4(a)中可以看出,准直太赫兹辐射分布不均匀,且四周偏暗;由图 4(a)和(b1)可以清晰地看到,左上角及右下角有探测器坏点。对比两种纸张的全息图可以看出,由于 B5 纸透过率低于热敏纸,前者全息图明显偏暗,且热敏纸干涉条纹明显,说明其材质的均匀性较差,即方差较大;这也从两种纸张的重建像中再次得到验证。为尽可能减小全息图重建时记录距离不准引起的偏差,B5 纸和热敏纸分别在距离  $16.8 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$  和  $15.2 \text{ mm} \pm 0.2 \text{ mm}$  范围内,采用步长  $0.02 \text{ mm}$  重建了 20 帧物面振幅像;图 4(b2)和图 4(c2)仅为其中一幅。为避免照明光和探测器外围坏点对结果的影响,两种纸的重建像裁剪的区域范围如图 4(b1)和(c1)中方框所示。计算出单张 B5 纸和单张热敏纸的平均方差分别约为 0.002 和 0.006。另外,利用纸遮挡后全息图总能量与照明光总能量之比,分别计算得到单张 B5 和单张热敏纸透过率约为 0.4 和 0.7。图 4(b3)和

先估测了 B5 纸和热敏纸两种纸张的透过率与噪声以及探测器的噪声。本节参数的准确测量需要大量完备实验;受实验条件的限制,本文估测了这些参数,并初步建立了仿真模型。

图 4(a)是照明光图像,图 4(b1)~(b3)和图 4(c1)~(c3)分别给出了单张 B5 纸和热敏纸的 60 帧平均全息图、单次曝光 APRA 获得的裁剪后重建振幅像及其直方图。

(c3)给出对应图 4(b2)和(c2)的重建振幅像的直方图以及高斯拟合曲线;可以看出,B5 纸和热敏纸的噪声都十分接近高斯噪声,因此在后续仿真实验中可按照高斯噪声的情形设置遮挡物条件。

由于环境等因素,面阵探测器获得的全息图受到影响;为此,估测了探测器的噪声。在两张 B5 纸遮挡时,探测器信号已被环境噪声淹没,如图 5(a)所示。利用本实验系统中太赫兹照明光最大光强附近区域的平均强度,对实验结果进行归一化处理。图 5(b)是图 5(a)归一化后的直方图,其分布接近高斯噪声分布,均值约为 0.15,方差约为 0.0009。

本文得到仿真的 B5 纸和热敏纸遮挡物模型的透过率分别为 0.4 和 0.7,高斯噪声方差分别为 0.002 和 0.006;探测器噪声模型为均值为 0.15、方差为 0.0009 的高斯噪声。

#### 3.2 纸质遮挡物对成像结果影响的仿真研究

以 3.1 节确定的两种纸张及探测器模型参数,

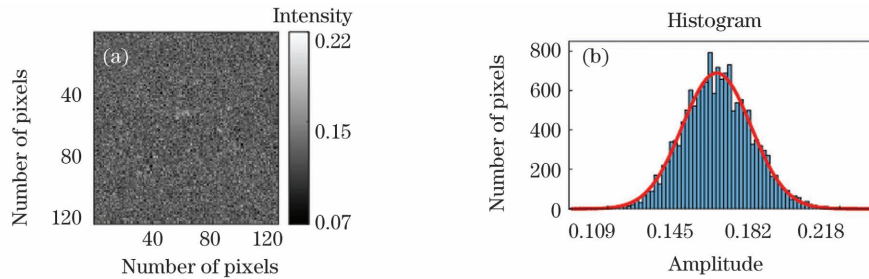


图 5 探测器噪声测定实验结果。(a)双层 B5 纸在探测器面上的图像;(b)对应的直方图和 Gaussian 拟合曲线  
 Fig. 5 Experimental results of detector noise measurement. (a) Image of double-layer B5 paper on detector surface;  
 (b) corresponding histogram and Gaussian fitting curve

对两种分辨率目标进行仿真研究。为了便于比较,增加了 0.2 mm 目标无遮挡和不考虑探测器噪声影响的情况。单张纸遮挡的仿真和实验得到的二次曝

光记录距离均为  $z_1 = 15 \text{ mm}$  和  $z_2 = 16.8 \text{ mm}$ 。背景和目标振幅透过率分别为 0.84 和 0。

图 6(a1)、(b1)和(c1)分别给出 0.2 mm 分辨率

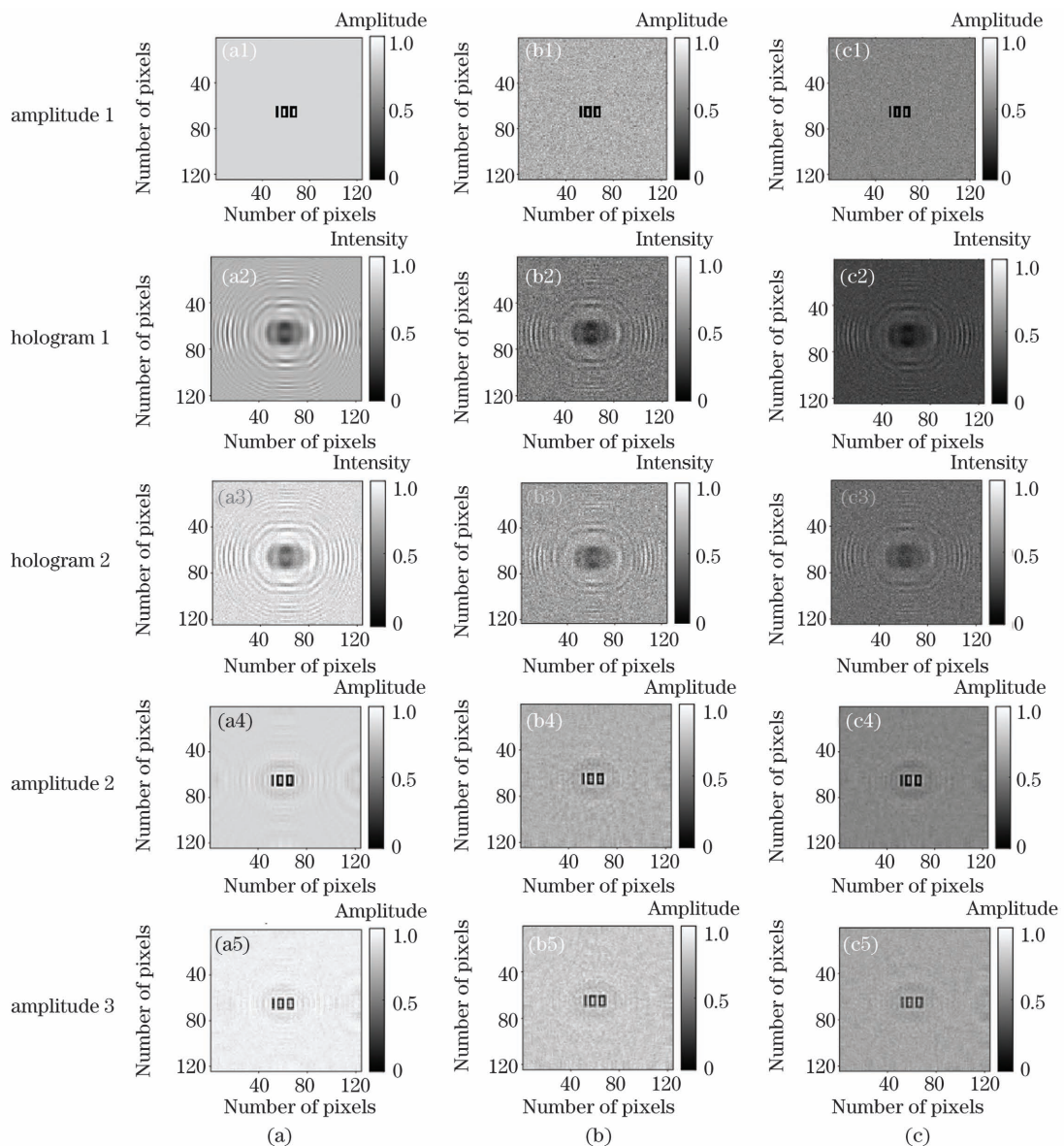


图 6 横向分辨率为 0.2 mm 目标的目标场景、全息图以及重建振幅像。(a1)~(a5)无遮挡;(b1)~(b5)热敏纸遮挡;  
 (c1)~(c5) B5 纸遮挡

Fig. 6 Target scenes, holograms, and reconstructed amplitude images of target with lateral resolution of 0.2 mm.  
 (a1)~(a5) No shelter; (b1)~(b5) thermal paper shelter; (c1)~(c5) B5 paper shelter

目标的无遮挡、热敏纸遮挡和 B5 纸遮挡时建立的 0.2 mm 分辨率目标场景。可以看出,随着物方透过率降低,图像变暗,热敏纸遮挡时噪声最大。图 6(a2)和(a3)、(b2)和(b3)和(c2)和(c3)分别给出未考虑探测器条件的  $z_1$  位置的归一化全息图、添加探测器噪声的归一化全息图。从中可以看出,衍射效应很明显,无法辨认出目标“100”;全息图随着物方透过率的增大而总体变亮;随着纸张噪声的减少,全息图噪声减少。加入探测器噪声后,由于均值的加入,对应的全息图略微变亮,但噪声也增加了。图 6(a4)和(a5)、(b4)和(b5)和(c4)和(c5)分别给出不同遮挡条件时两种全息图对应的重建振幅像。可以看出这些情况下都能分辨出  $18 \times 10$  大小的“100”的区域。显然,重建像随着物方透过率的增大而总体变亮、变清晰;加入探测器噪声后的重建像偏亮,但目标再现质量变差。

图 7(a1)、(b1)和(c1)分别给出了无遮挡、热敏纸和 B5 纸遮挡时建立的 0.3 mm 分辨率目标场景。图 7(a2)、(b2)和(c2)分别给出不同遮挡条件时添加探测器噪声的归一化全息图。图 7(a3)、(b3)和(c3)分别给出不同遮挡条件时的重建振幅像。不同

遮挡条件的图像变化趋势与 0.2 mm 分辨率时相似。但重建视觉效果好于相应的 0.2 mm 分辨率的情况。

为了更客观地评价,本文选取了目标中心和外围两个区域计算目标与背景的对比度等参数。目标区域均值记为  $M_1$ ;0.2 mm 和 0.3 mm 分辨率目标中心区域分别选取  $22 \times 14$  和  $33 \times 21$  区域(即沿“100”各向外扩充 2 和 3 个像素)内的背景,该背景区域均值记为  $M_{21}$ ,计算的对比度记为  $C_1$ ;两目标外围背景区域分别为以“100”上方第 3 和第 4 个像素开始往上的  $18 \times 10$  和  $27 \times 15$  大小的背景,该背景区域均值记为  $M_{22}$ ,将计算出的对比度记为  $C_2$ 。同时,为了减小添加探测器噪声的随机性影响,采用 20 帧添加探测器噪声全息图的重建像的对比度的均值。此外,计算重建图像与原始图像的均方差(MSE)。对于 0.2 mm 分辨率目标,不添加探测器噪声的原始图像是图 6(a1);加入探测器噪声的原始图像是图 6(a1)幅值增加 0.15 的结果。对于 0.3 mm 分辨率目标,加入探测器噪声的原始图像为图 7(a1)幅值增加 0.15 的结果。表 1 给出图 6 和图 7 重建像的客观评价结果。

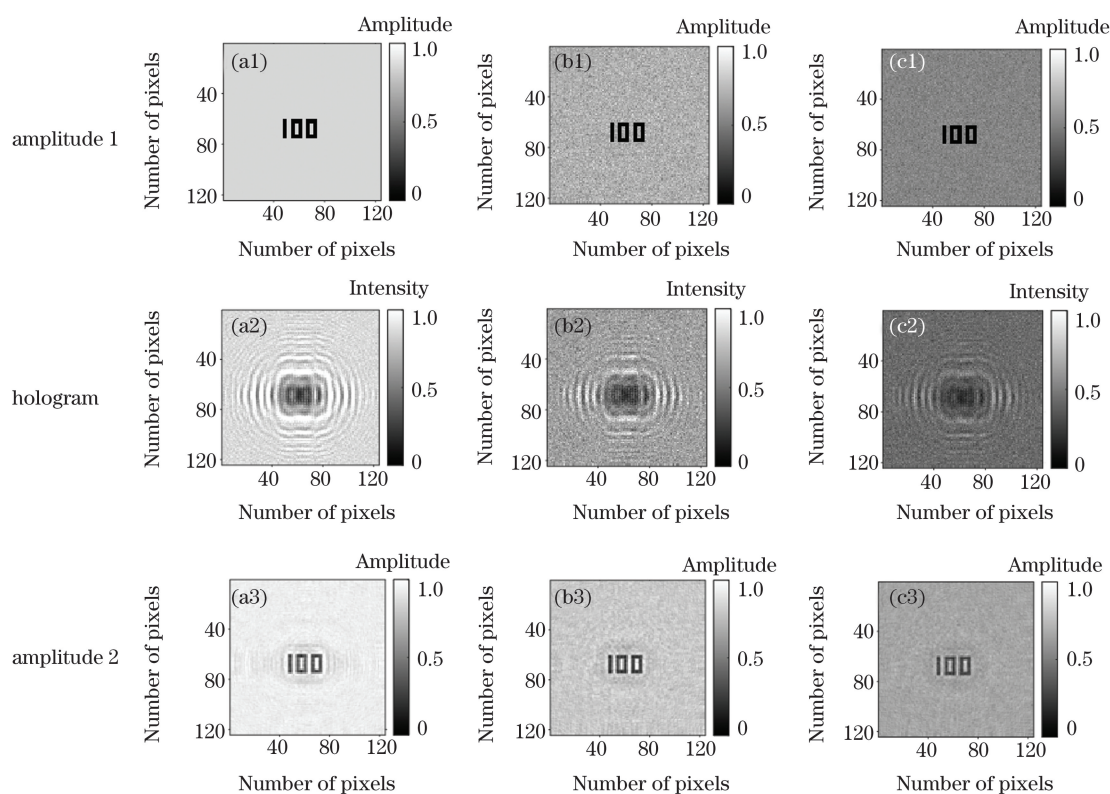


图 7 横向分辨率为 0.3 mm 目标的目标场景、全息图以及重建振幅像。(a1)~(a3)无遮挡;(b1)~(b3)热敏纸遮挡;(c1)~(c3)B5 纸遮挡

Fig. 7 Target scenes, holograms, and reconstructed amplitude images of target with lateral resolution of 0.3 mm. (a1)~(a3) No shelter; (b1)~(b3) thermal paper shelter; (c1)~(c3) B5 paper shelter

表 1 由仿真结果计算得到的均值及对比度

Table 1 Mean value and contrast ratio calculated from simulation results

Target resolution /mm	Shelter	$M_1$	$M_{21}$	$M_{22}$	$C_1$	$C_2$	$M_{SE}$
0.2	No shelter in Fig. 6(a4)	0.25	0.83	0.80	0.69	0.68	0.002
0.2	Thermal paper in Fig. 6(b4)	0.23	0.72	0.64	0.68	0.64	0.029
0.2	B5 paper in Fig. 6(c4)	0.17	0.54	0.48	0.68	0.64	0.139
0.2	No shelter in Fig. 6(a5)	0.39	0.89	0.90	0.57	0.57	0.006
0.2	Thermal paper in Fig. 6(b5)	0.38	0.80	0.76	0.54	0.50	0.037
0.2	B5 paper in Fig. 6(c5)	0.36	0.67	0.62	0.45	0.41	0.116
0.3	No shelter in Fig. 7(a3)	0.40	0.88	0.88	0.55	0.54	0.013
0.3	Thermal paper in Fig. 7(b3)	0.35	0.80	0.76	0.56	0.53	0.044
0.3	B5 paper in Fig. 7(c3)	0.34	0.66	0.63	0.48	0.45	0.122

从表 1 的均值部分的结果可以看出,目标中心区域的背景均值  $M_{21}$  几乎都高于所选外围背景均值  $M_{22}$ ,这主要由衍射增强导致,这也导致了所有目标外围对比度  $C_2$  都不高于中心对比度  $C_1$ 。另外,所选外围背景均值略低于相应的理论背景均值,这主要是因为此区域重建结果没有完全去除衍射的干扰。目标均值随着透过率的下降略有降低。

不添加探测器噪声时,两种纸张遮挡时对比度数值相等,这与本文实验结果明显不符。有无添加探测器噪声的仿真结果对比显示,未考虑探测器噪声影响时中心区域对比度为 0.68 左右;增加探测器噪声使无遮挡、热敏纸和 B5 纸遮挡的中心区域对比度  $C_1$  分别下降了 0.12, 0.14, 0.24,这与真实成像结果趋势相一致。外围对比度  $C_2$  也呈明显下降的趋势。这再次验证了加上探测噪声的必要性。

从表 1 也可以客观地对比目标分辨率对重建像的影响。0.3 mm 分辨率目标热敏纸遮挡时  $C_1$  和  $C_2$  分别较 0.2 mm 分辨率目标增加 4% 和 8%; B5 纸遮挡时  $C_1$  和  $C_2$  分别较 0.2 mm 分辨率目标增加 7% 和 10%。但无遮挡时  $C_1$  和  $C_2$  较 0.2 mm 分辨率时均有所下降;这主要是因为 0.3 mm 分辨率目标横向间隔为 3 个像素,噪声对于目标的影响更大,导致目标区域的振幅增大。此外,  $C_1$  的数值中,热敏纸遮挡的结果大于无遮挡时的结果,这主要由热敏纸的噪声导致。其次,计算得到无遮挡的背景均值  $M_{21}$  和  $M_{22}$  时的标准差分别为 0.11 和 0.04,说明由于衍射现象,选取目标中心区域计算对比度会引起较大的误差。

从均方差的计算结果可以看出,相同探测器噪

声条件下的同一目标成像仿真结果中,无遮挡情况的均方差最小, B5 纸遮挡情况的均方差最大;多数对比度计算结果相呼应。均方差对于重建图像与原始图像的偏离程度评价更加准确。

#### 4 真实实验结果及分析

实验中分别采用 50 帧和 80 帧添加遮挡的目标全息图的平均值。

图 8(a1)、(b1) 和 (c1) 分别给出了横向分辨率为 0.2 mm 的目标 B5 纸、热敏纸遮挡和无遮挡时的归一化全息图,图 8(a2)、(b2) 和 (c2) 分别给出不同遮挡条件时的重建振幅像。重建像中出现的外围两圈衍射环可能是由聚四氟乙烯复合材料的弯曲所致。从图 8(a2) 可以看出, B5 纸遮挡的目标已经完全淹没在背景中,无法分辨,因此无法准确计算对比度等客观评价参数。从图 8(c2) 可以看到,无遮挡目标最清晰,但图像整体偏亮,背景网格有些都没能复原。热敏纸遮挡后可以分辨重建像,只是不如无遮挡清晰。

图 9(a1) 和 (b1) 分别给出了横向分辨率为 0.3 mm 的目标 B5 纸、热敏纸遮挡时的归一化全息图,图 9(a2) 和 (b2) 分别给出不同遮挡条件时的重建振幅像。目标材质易弯曲,导致热敏纸背景区域有明显的干涉条纹。从图 9(a2) 可以看出,两种遮挡重建结果均较 0.2 mm 分辨率情况下有所提高;从 B5 纸遮挡的重建像也能辨认出“100”。0.3 mm 分辨率目标的成像结果好于 0.2 mm 分辨率目标的成像结果的主要原因是目标像素增多和照明光能量及其稳定性的提高。

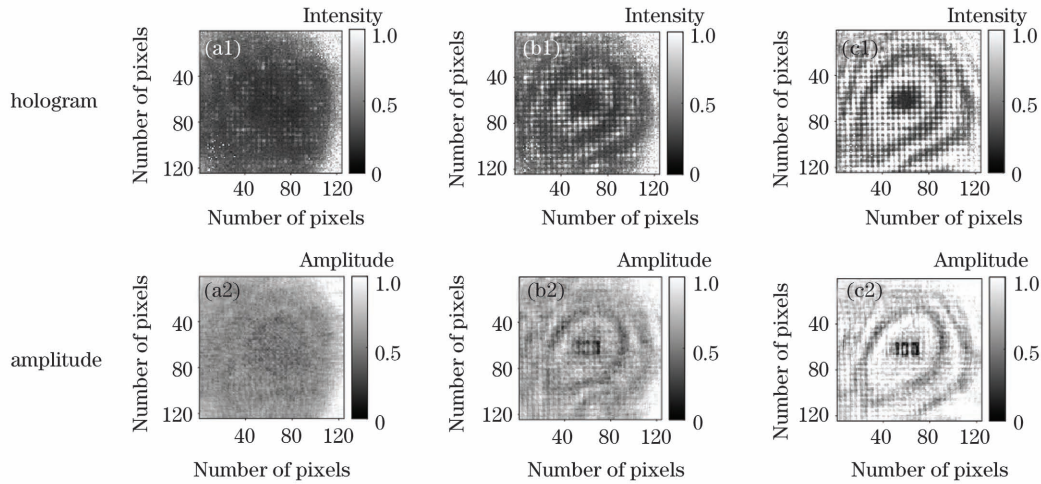


图 8 横向分辨率为 0.2 mm 的目标的归一化全息图和重建振幅像。(a1)(a2)B5 纸遮挡;(b1)(b2)热敏纸遮挡;(c1)(c2)无遮挡

Fig. 8 Normalized holograms and reconstructed amplitude images of target with lateral resolution of 0.2 mm.

(a1)(a2) B5 paper shelter; (b1)(b2) thermal paper shelter; (c1)(c2) no shelter

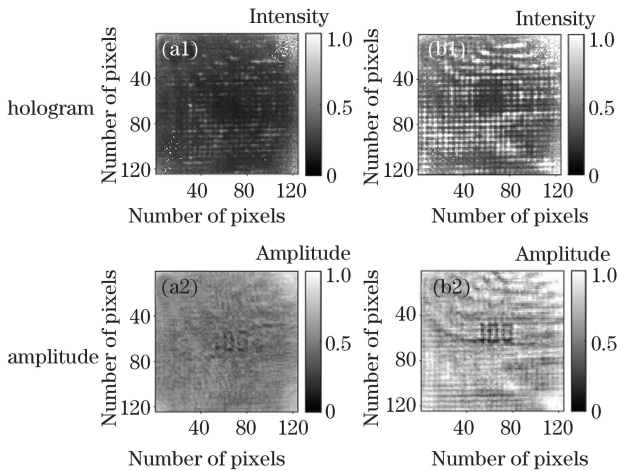


图 9 横向分辨率为 0.3 mm 的目标的归一化全息图、重建振幅像。(a1)(a2)B5 纸遮挡;(b1)(b2)热敏纸遮挡

Fig. 9 Normalized holograms and reconstructed amplitude images of the target with a lateral resolution of 0.3 mm. (a1)(a2) B5 paper shelter; (b1)(b2) thermal paper shelter

计算的实验结果客观参数如表 2 所示。对于 0.2 mm 分辨率的目标,热敏纸遮挡的目标中心  $22 \times 14$  区域对比度  $C_1$  为 0.37,比仿真结果低 0.17;热敏纸遮挡外围目标上方  $18 \times 10$  区域的对比度  $C_2$  为 0.38,比仿真低 0.12;偏差较大主要是由实

验样品材质易弯折、有网格、不均匀以及放置略微倾斜等因素造成的。无遮挡比热敏纸遮挡的重建像目标区域均值低约 0.1,前者更接近真实情况。两者目标中心区域对比度  $C_1$  相差 0.12。无遮挡和热敏纸遮挡的区域的背景区域均值差 0.27。无遮挡的中心区域的对比度为 0.59,仅比仿真结果高出 0.02;而目标与外围的对比度  $C_2$  为 0.71,高于其仿真结果 0.14。这可能主要是由于非同时测量照明光和目标过程中,激光能量抖动导致照明光能量偏低,重建像整体数值提升。

对于 0.3 mm 分辨率目标,B5 纸目标中心  $33 \times 21$  区域和目标下方  $27 \times 15$  外围区域的对比度非常接近,均比仿真结果至少低 0.2;这主要是因为透过率低导致探测器接收受限。热敏纸遮挡中心区域时对比度  $C_1$  较仿真结果低 0.14,比图 8 中 0.2 mm 分辨率目标更接近仿真结果;热敏纸遮挡的外围对比度  $C_2$  较仿真结果低 0.07,更接近仿真结果。

此外,从均方差的计算结果可以得到,无遮挡的 0.2 mm 分辨率目标成像结果的均方差最小,为 0.048;B5 纸遮挡的 0.3 mm 分辨率目标成像结果的均方差最大,为 0.239;这与真实成像结果相符,与对比度计算结果完全呼应。

表 2 由实验结果计算得到的均值及对比度

Table 2 Mean value and contrast ratio calculated from experimental results

Target resolution /mm	Shelter	$M_1$	$M_{21}$	$M_{22}$	$C_1$	$C_2$	$M_{SE}$
0.2	No shelter	0.24	0.58	0.80	0.59	0.71	0.048
0.2	Thermal paper	0.33	0.52	0.53	0.37	0.38	0.118
0.3	Thermal paper	0.38	0.65	0.71	0.42	0.46	0.103
0.3	B5 paper	0.34	0.44	0.45	0.23	0.24	0.239



为了研究太赫兹二次曝光数字全息在实际场景中的应用价值,模拟中对太赫兹波穿透包装进行内部检测。图 10 给出在横向分辨率为 0.3 mm 的目标前后各放置一张热敏纸的重建振幅像。二次曝光记录距离分别为  $z_1=15$  mm 和  $z_2=17.2$  mm。

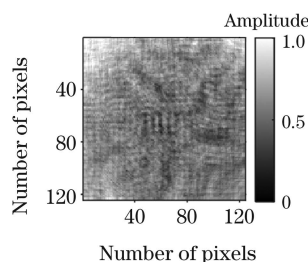


图 10 横向分辨率为 0.3 mm 目标的重建振幅像

Fig. 10 Reconstructed amplitude image of target with lateral resolution of 0.3 mm

从重建振幅像可以看出,前后各放置一张热敏纸遮挡的成像结果很差,目标几乎淹没在背景中。利用同样方式计算得到目标中心区域对比度为 0.21,该数值低于单张 B5 纸遮挡的结果;这主要由热敏纸较大的噪声以及激光器能量偏低引起。均方差计算结果为 0.182,低于单张 B5 纸遮挡的结果;其主要原因是两张热敏纸透过率高于 B5 纸,重建图像更亮,与原始图像偏差更小。

## 5 结 论

针对横向分辨率为 0.2 mm 和 0.3 mm 的两种目标,本文仿真和实验研究了 B5 纸和热敏纸遮挡物对 2.52 THz 二次曝光数字全息重建振幅像的影响。首先,为了确定遮挡物仿真参数,通过初步实验获得了单张 B5 纸与热敏纸两种纸张的透过率和噪声分布;其透过率分别约为 0.4 和 0.7,高斯噪声方差分别约为 0.002 和 0.006。其次,实验推测出探测器高斯噪声均值约为 0.15,方差约为 0.0009。仿真对比分析了两种目标在不同遮挡物下的成像效果。实验获得了 0.2 mm 横向分辨率热敏纸遮挡的较清晰重建振幅像,0.3 mm 横向分辨率 B5 纸和热敏纸遮挡的图像。实验结果的总体趋势与仿真结果相近。横向分辨率为 0.3 mm 的目标的 B5 纸遮挡的对比度比仿真结果至少低 0.2,这主要是由透过率太低造成的。热敏纸遮挡的 0.3 mm 分辨率目标与外围区域的对比度为 0.46,较接近仿真结果,仅低于仿真结果 0.07。实验还获得了无遮挡的 0.2 mm 横向分辨率目标的重建像,其目标中心区域的对比度为 0.59,仅比仿真结果高出 0.02。

实验结果与仿真结果存在差异的主要原因是其与实验中激光能量偏低且不够稳定、探测器响应偏低及环境中的噪声等条件有关。后续需要进一步研究仿真中需要添加的条件以及具体数值,完善仿真模型,减小仿真结果与实验结果的差异。另外,可以在成像系统硬件上针对探测器噪声采用暗室、屏蔽罩等方式减弱噪声的影响,在数字图像处理中针对激光波动和探测器噪声等问题改进重建算法。

## 参 考 文 献

- [1] Wan W J, Li H, Cao J C. Research progress on terahertz quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(7): 0701009.  
万文坚, 黎华, 曹俊诚. 太赫兹量子级联激光器研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(7): 0701009.
- [2] Fu Z L, Li R Z, Li H Y, et al. Progress in biomedical imaging based on terahertz quantum cascade lasers[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(2): 0207014.  
符张龙, 李锐志, 李弘义, 等. 基于太赫兹量子级联激光器的生物医学成像研究进展[J]. 中国激光, 2020, 47(2): 0207014.
- [3] Xie P F, Liu X D, Sun Y W. Inspiration for terahertz radiation induced biological effects on cells [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614013.  
谢鹏飞, 刘旭东, 孙怡雯. 太赫兹辐照细胞生物学效应研究进展[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614013.
- [4] Shi J, Wang X K, Zheng X H, et al. Recent advances in terahertz digital holography[J]. Chinese Optics, 2017, 10(1): 131-147.  
石敬, 王新柯, 郑显华, 等. 太赫兹数字全息术的研究进展[J]. 中国光学, 2017, 10(1): 131-147.
- [5] Jing W, An J F, Jiang G, et al. Standoff fully-polarimetric holographic-radar-imaging experiments in terahertz regime for concealed target detection[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(6): 0614032.  
经文, 安健飞, 江舸, 等. 针对隐藏目标检测的太赫兹波站开式全极化全息雷达成像实验[J]. 中国激光, 2019, 46(6): 0614032.
- [6] 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.
- [7] Wang D Y, Huang H C, Zhou X, et al. Phase-contrast imaging by the continuous-wave terahertz in-line digital holography [J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(8): 0809003.  
王大勇, 黄昊翀, 周逊, 等. 连续太赫兹波同轴数字

- 全息相衬成像 [J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0809003.
- [8] Hu J Q. Research on phase retrieval algorithm and resolution in CW terahertz in-line digital holography [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. 胡佳琦. 连续太赫兹同轴数字全息相位恢复算法和分辨率研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [9] Hu J Q, Li Q, Chen G H. Reconstruction of double-exposed terahertz hologram of non-isolated object [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2016, 37(4): 328-339.
- [10] Litychevskaia T, Fink H W. Solution to the twin image problem in holography [J]. Physical Review Letters, 2007, 98(23): 233901.
- [11] Litychevskaia T, Fink H W. Simultaneous reconstruction of phase and amplitude contrast from a single holographic record [J]. Optics Express, 2009, 17(13): 10697-10705.
- [12] Rong L, Pan F, Xiao W, et al. Twin image elimination from two in-line holograms via phase retrieval [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(6): 060902.
- [13] Hu J Q, Li Q, Yang Y F. Simulation research on continuous terahertz inline digital holography imaging based on phase retrieval algorithm [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(1): 011103. 胡佳琦, 李琦, 杨永发. 基于相位恢复法的连续太赫兹同轴数字全息成像仿真研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(1): 011103.
- [14] Wang D Y, Li B, Rong L, et al. Continuous-wave terahertz quantitative dual-plane ptychography [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(2): 028701. 王大勇, 李兵, 戎路, 等. 连续太赫兹波双物距叠层定量相衬成像 [J]. 物理学报, 2020, 69(2): 028701.
- [15] Chan W L, Charan K, Takhar D, et al. A single-pixel terahertz imaging system based on compressed sensing [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 121105.
- [16] Harris F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform [J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(1): 51-83.

## Influence of Paper Shelters on Terahertz Double Exposure Digital Holography

Cheng Keyang<sup>\*</sup>, Li Qi

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

### Abstract

**Objective** In terahertz digital holographic imaging, factors such as the transmittance and noise of shelters will affect the imaging effect, and when combined with practical applications of terahertz imaging technology such as security detection and medical imaging, shelters have become an important issue that needs to be studied. Double-exposure digital holography can achieve better imaging quality than single-exposure for relatively stationary targets. According to our investigation, there are no reports on the influence of shelters in terahertz double-exposure digital holography. Paper is a common material that does not transmit visible light but has high terahertz wave transmittance, and it is easy to change the noise and transmittance conditions in the experiment by changing the material; thus, studying the influence of paper shelters in the terahertz imaging process has a good reference value for the use of other materials.

**Methods** In this study, the imaging results and objective evaluation indexes of material targets with lateral resolutions of 0.2 mm and 0.3 mm under different shelters are obtained through simulation and experiments by the D-APRA (double-exposure amplitude constrained phase retrieval algorithm) using a terahertz double-exposure digital holographic imaging system with a wavelength of 118.83  $\mu\text{m}$ , a detector pixel size of 0.1 mm, and a pixel number of  $124 \times 124$ . Through comparative analysis, we study the effect of B5 paper and thermal paper on the reconstruction of amplitude images.

**Results and Discussions** First, the transmittance and noise distribution of a single sheet of B5 paper and thermal paper are measured to determine the shelter's simulation parameters (Fig. 4). The transmittances are 0.4 and 0.7, respectively, with 0.002 and 0.006 Gaussian noise variances. Second, the detector's noise parameters are deduced

from the experimental data. The mean value of the detector's Gaussian noise is about 0.15, and the variance is about 0.0009 (Fig. 5). The imaging results of two targets with resolutions of 0.2 mm and 0.3 mm under different conditions of shelters are obtained through simulations (Fig. 6 and Fig. 7), and the objective evaluation indicators of different conditions are compared and analyzed (Table 1). Finally, the imaging results of different situations are obtained through experiments (Fig. 8 and Fig. 9), and some objective evaluation indicators (Table 2) obtained by calculation are close to the simulation results. The overall change trend of the experimental results is similar to the simulation results.

**Conclusions** This research investigates the effect of B5 paper and thermal paper shelters on the amplitude image reconstruction of 2.52 THz double-exposure digital holography using experiments and simulation for the two targets with lateral resolutions of 0.2 mm and 0.3 mm. First, preliminary experiments are used to evaluate the transmittance and noise distribution of a single sheet of B5 paper and thermal paper; the transmittance is about 0.4 and 0.7, and the Gaussian noise variance is about 0.002 and 0.006, respectively. Second, the result shows that the mean value of the detector's Gaussian noise is about 0.15, and the variance is about 0.0009. The simulation imaging results of two targets with different shelters are compared and analyzed. The reconstructed amplitude image of a target with 0.2 mm lateral resolution sheltered by thermal paper and the images of a target with 0.3 mm lateral resolution sheltered by B5 paper and thermal paper are obtained through experiments. The overall trend of experimental results is similar to the results of the simulation. The contrast ratio of the 0.3 mm lateral resolution target with the B5 paper shelter is lower than the result of simulation by more than 0.2, mainly caused by the low transmittance of B5 paper. With a lateral resolution of 0.3 mm, the contrast ratio of the peripheral area sheltered by the thermal paper target is 0.46, which is similar to the simulation result and only 0.07 lower. Experiments yield a reconstruction image of an unsheltered 0.2 mm lateral resolution target, with a contrast ratio of 0.59 in the central area, which is only 0.02 higher than the simulation result. Finally, the mean square error of the simulation and experimental results in various scenarios are determined, which is more accurate in determining the deviation degree of the reconstructed images from the original images. It works in concert with the contrast ratio result.

Low and unstable laser energy, low detector sensitivity, and environmental noise are the main reasons for the discrepancy between experimental and simulation results. It is necessary to further study the conditions and specific values that need to be added in the simulation and improve the simulation model to reduce the difference between the simulation and experimental results. Darkrooms and shields can also be used in the imaging system to reduce the impact of detector noise, and the reconstruction algorithm can be improved in digital image processing to solve problems such as laser fluctuations and detector noise.

**Key words** imaging systems; terahertz digital holography; double exposure; shelter

**OCIS codes** 110.6795; 110.3000; 110.2960