

不同横向位置的小目标太赫兹同轴数字全息再现研究

李琦 胡佳琦

(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 由于 Gabor 同轴数字全息适用于透过光能量远大于目标遮挡能量, 因此, 针对小目标的不同横向位置的再现性能研究具有重要的应用价值。进行了不同横向位置的 2.52 THz Gabor 同轴全息成像实验, 将 Tukey 窗函数和角谱法结合实现二维再现, 并对再现结果进行对比分析。实验结果表明, 提出的算法抑制了孔径效应且整幅图像对比度也有所提高; 靠近探测器中心部位的目标较处于探测器边缘附近的目标再现性能略好。

关键词 太赫兹成像; 数字全息; 横向位置; 再现

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.1209001

Reconstruction Study on Terahertz On-Axis Digital Holography of Small Target at Different Lateral Positions

Li Qi Hu Jiaqi

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

Abstract Gabor on-axis digital holography is suitable for the situation that light transmission energy is much more than the energy blocked by the target. Therefore, the reconstruction study on the small target at different lateral positions has important application value. The experiments on 2.52 THz Gabor on-axis holographic imaging at different lateral positions are conducted, the Tukey window function and the angular spectral method are combined to realize two-dimensional reconstruction, and the results are compared and analyzed. The experimental results show that the algorithm proposed inhibits the aperture effect and also improves the contrast ratio of the whole image. The reconstruction performance of the target close to the central position of the detector is slightly better than that near the edge.

Key words terahertz imaging; digital holography; lateral place; reconstruction

OCIS codes 110.6795; 110.3000

1 引言

太赫兹数字全息技术具有空间分辨率高、能成三维像等优势, 国际上已开展了一些相关实验研究^[1-7], 研究最早的是脉冲方式^[4-7]。本课题组近几年开展了基于光抽运连续(CW)太赫兹激光器的 Gabor 同轴数字全息成像技术研究^[8-9]。

由于 Gabor 同轴数字全息适用于透过光能量远大于目标遮挡能量, 也就是对小目标精细结构成像, 因此, 研究针对小目标的成像算法具有重要的应用价值。原有的用于太赫兹 Gabor 同轴数字全息再现的主要算法是角谱(AS)法。对于小目标, 直流

项可以忽略不计, 即不需要考虑直流抑制。但由于探测器边缘孔径限制, 将产生孔径衍射效应, 影响再现像质; 因此需要采取相应措施减少其影响。在可见光数字全息中, 解决办法是选择合适的窗函数与全息图灰度分布矩阵相乘以实现全息图的切趾, 达到削弱孔径衍射对再现结果的影响的目的^[10-11]。本课题组也提出在 2.52 THz Gabor 同轴数字全息角谱法再现中引入 Tukey 窗函数, 消除孔径效应, 凸现探测器中心部分的目标。由于目前用于太赫兹面阵成像的探测器像元数很低, 因此图像有效成像尺寸由 124×124 缩减成 84×84 , 即以牺牲探测器

收稿日期: 2014-05-26; 收到修改稿日期: 2014-07-11

基金项目: 国家自然科学基金(61377110)、高等学校博士学科点专项科研基金(20112302110028)

作者简介: 李琦(1963—), 女, 博士, 教授, 主要从事激光与太赫兹成像及图像处理等方面的研究。

E-mail: liqi2013@hit.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

有效成像面积为代价^[12]。为了研究目标不同横向位置的成像效果,在已有研究的基础上将 Tukey 窗函数用于扩展后的 208×208 图像,保持探测器有效成像面积。

系统分辨率与目标作用距离等有关,这方面已有研究^[8]。近几年,已有人关注物体横向位置对系统单点分辨率(即系统确定一个点源位置的最小偏差)的影响,但只限于基于逆问题的再现算法的仿真研究,尚无实验验证^[13]。

本文基于已有的光抽运连续太赫兹激光器的 Gabor 同轴数字全息成像实验装置,利用自制的金属条最小宽度约 0.25 mm 的聚四氟乙烯基电路板作为目标,其矩形面积内像元数约占探测器总像元数 (124×124) 的 1%,进行不同横向位置的 2.52 THz Gabor 同轴全息成像实验,并将 Tukey 窗函数和角谱法结合实现二维再现,并对再现结果进行对比分析。

2 Gabor 同轴全息成像及再现原理

2.1 Gabor 同轴全息成像和角谱再现算法原理

Gabor 同轴数字全息记录光路原理如图 1 所

示,详见参考文献[8,14]。准直后的太赫兹平面波照射物体,被物体信息调制的光作为物光,其余透射的光作为参考光。参考光与物光在探测器表面干涉获得干涉图样。

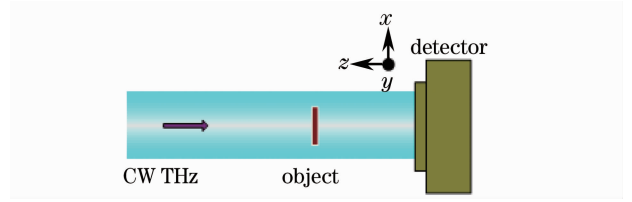


图 1 Gabor 同轴数字全息记录光路
Fig.1 Gabor on-axis digital holography recording light path

平面波垂直照射物平面 x_0-y_0 ,则透过物平面的光场分布可表示为

$$U(x_0, y_0) = 1 - a(x_0, y_0), \quad (1)$$

式中 $U(x_0, y_0)$ 表示物平面的复振幅分布, $a(x_0, y_0)$ 表示不透光物体的贡献,等式右端可看做是参考光场与物光光场的叠加。

根据瑞利-索末菲衍射积分公式,经距离 z 的传播后全息平面上记录的数字全息图可表示为

$$I(x, y, z) = |1 - a(x_0, y_0) * h_z(x_0, y_0, z_0)|^2 = 1 - a(x_0, y_0) * h_z(x_0, y_0, z_0) - a^*(x_0, y_0) * h_z^*(x_0, y_0, z_0) + |a(x_0, y_0) * h_z(x_0, y_0, z_0)|^2, \quad (2)$$

式中 $h_z(x_0, y_0, z_0)$ 为系统的脉冲响应函数, $*$ 表示卷积运算,上角标 $*$ 表示复共轭, z_0 为数字全息的记录距离。

数字全息的再现过程,使用振幅为 1 的准直平面波作为参考光通过角谱法实现,即直接对数字全息图应用角谱法。首先将全息平面上的单色光波场在 $x-y$ 平面上进行傅里叶变换以获得其频谱,即将全息图视为沿不同传播方向的平面波的叠加,其叠加重数表示为

$$A(f_x, f_y, z) = \iint_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z) \exp[-i2\pi(xf_x + yf_y)] dx dy = \mathcal{F}\{I(x, y, z)\}, \quad (3)$$

式中 $A(f_x, f_y, z)$ 代表全息面的角谱分布, \mathcal{F} 代表傅里叶变换, f_x 和 f_y 分别代表 x, y 方向的空间频率。

空间频率为 (f_x, f_y, f_z) 的平面波经距离 $-z$ 的传播后,其复振幅即为再现的物平面复振幅 $\tilde{U}(x_0, y_0)$ 可表示为全息面的角谱分布与系统的频率传递函数乘积的逆傅里叶变换:

$$\tilde{U}(x_0, y_0) = \mathcal{F}^{-1}\{A(f_x, f_y, z) \times H(f_x, f_y, -z)\}, \quad (4)$$

其中系统的频率传递函数为

$$H(f_x, f_y, -z) = \exp\left(-i \frac{2\pi}{\lambda} z \sqrt{1 - \lambda^2 f_x^2 - \lambda^2 f_y^2}\right). \quad (5)$$

由(4)式已计算得到的 $\tilde{U}(x_0, y_0)$,可得本文再现的强度像 $I'(x_0, y_0)$:

$$I'(x_0, y_0) = |\tilde{U}(x_0, y_0)|^2, \quad (6)$$

式中 $|\cdot|$ 表示复数取模。

2.2 应用 Tukey 窗函数切趾原理

数字全息图像 $I(m, n)$ 经窗函数 $w(m, n)$ 切趾的全息图 $I_a(m, n)$ 表达式为

$$I_a(m, n) = w(m, n) \times I(m, n). \quad (7)$$

切趾后全息图 $I_a(m, n)$ 的孔径函数由窗函数决定,切趾后成像系统点扩展函数是窗函数的傅里叶变换。通过选择旁瓣效应小的窗口函数,即可抑制孔径效应。

Tukey 窗函数是由余弦窗函数和矩形窗函数进行卷积运算获得的一种平顶函数,既具有较大的能量透射率又较矩形窗函数有较小的旁瓣效应,其二维表达式如下所示^[10]:

$$w(m, n) = \begin{cases} 1, & 0 \leq |m| \leq r \frac{M}{2}, 0 \leq |n| \leq r \frac{N}{2} \\ 0.5 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(m - r \frac{M}{2} \right) / \left[2(1-r) \frac{M}{2} \right] \right] \right\}, & r \frac{M}{2} \leq |m| \leq \frac{M}{2}, 0 \leq |n| \leq r \frac{N}{2} \\ 0.5 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(n - r \frac{N}{2} \right) / \left[2(1-r) \frac{N}{2} \right] \right] \right\}, & 0 \leq |m| \leq r \frac{M}{2}, r \frac{N}{2} \leq |n| \leq \frac{N}{2} \\ 0.25 \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(m - r \frac{M}{2} \right) / \left[2(1-r) \frac{M}{2} \right] \right] \right\} \times \\ \left\{ 1 + \cos \left[\pi \left(n - r \frac{N}{2} \right) / \left[2(1-r) \frac{N}{2} \right] \right] \right\}, & r \frac{M}{2} \leq |m| \leq \frac{M}{2}, r \frac{N}{2} \leq |n| \leq \frac{N}{2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 M 和 N 表示 Tukey 窗尺寸,参量 r 决定了 Tukey 窗透射率为 1 部分的大小,取值范围为 $[0, 1]$, r 越小平顶部分越大。本文取 $r=0.4$,为了尽可能保留探测器更多的可用成像像元,即保证探测器大小内切趾窗内灰度值为 1,取 M 和 N 为 208,其形状如图 2 所示。

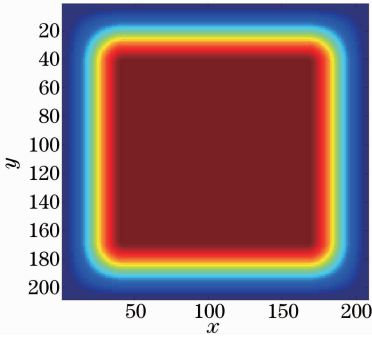


图 2 切趾窗口

Fig. 2 Apodization window

2.3 本文再现算法流程

本文提出的全息图再现算法流程如图 3 所示,首先将 124×124 大小的全息图扩展成 1024×1024 ,其中心部分 208×208 采用复制边界数据扩展,其余填零;然后进行切趾、角谱算法,再裁减成 124×124 图像;最后通过对数变换、对比度拉伸变

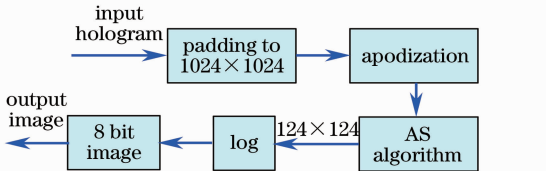


图 3 本文提出的再现算法流程

Fig. 3 Presented reconstruction algorithm in this paper

换将图像增强成 8 bit 图像。

为了与原来的角谱法对比,还采用图 4 所示的流程,进行了全息再现。首先将 124×124 大小的全息图通过填零扩展成 1024×1024 ,然后进行角谱算法再现并再裁减成 124×124 图像;最后通过对数变换、对比度拉伸变换将图像增强成 8 bit 图像。

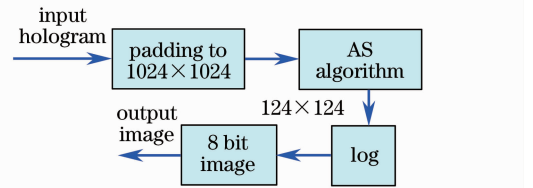


图 4 角谱再现算法流程

Fig. 4 Flow chart of AS reconstruction algorithm

为了便于表述,将图 3 和图 4 所示的算法分别简称为方法 1 和方法 2。

3 实验结果及分析

实验中使用的 CO_2 激光抽运太赫兹激光器,其波长为 $118.83 \mu\text{m}$,平均输出功率约 50 mW,近似基模高斯光束。使用热释电相机 Pyrocamm III 作为探测器记录全息图,它具有 124×124 个像元,有效面积为 $12.4 \text{ mm} \times 12.4 \text{ mm}$ 。装置图详见文献[2,8]。本文均采用 40 frame 平均的全息图作为原始全息图进行二维再现,再现距离 19.7 mm。图 5 给出目标实物照片和照明光斑,两金属条纹宽度约 0.25 mm,两条纹间隙约 0.55 mm;从照明光斑可以看出探测器边缘能量较中心偏低,且不中心对称。

图 6 给出目标置于右上角的全息图及其再现结果,图 6(a)给出原始全息图,图像中右上角有因目

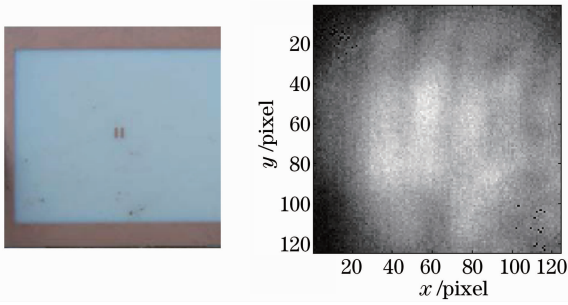


图 5 成像实物照片和照明光斑

Fig. 5 Photo of imaging object and beam profile

标引起的衍射环纹,根本无法看出两条金属条纹的

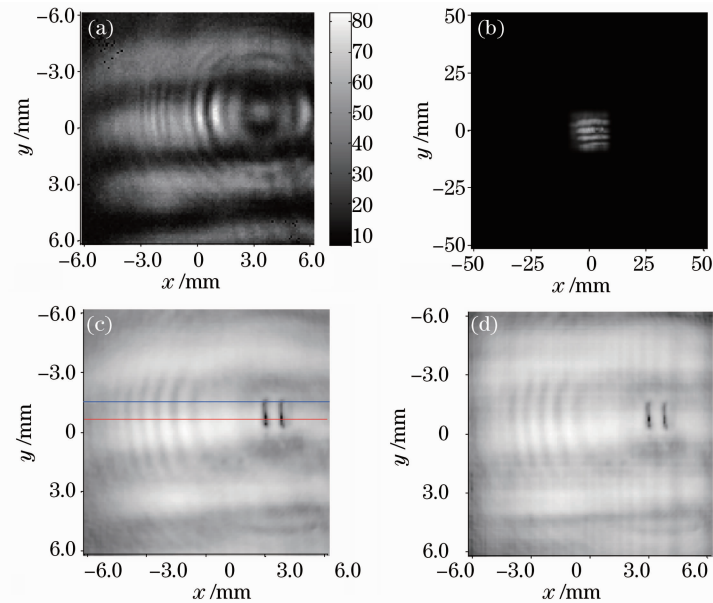


图 6 物体置于右上角的全息图及其再现结果。(a) 原始全息图;(b) 切趾后的全息图;(c) 方法 1 结果;(d) 方法 2 结果

Fig. 6 Hologram and its reconstruction results of object at top right corner. (a) Raw hologram;

(b) apodized hologram; (c) result of method 1; (d) result of method 2

图 7 给出两种算法在图 6 蓝线和红线标记的第 47 行和 56 行像素的灰度值分布。图 6(a)为整行结果;为便于对目标进行观察,图 6(b)给出了目标及其附近结果。图中蓝点线、红圈线分别代表第 1 种算法第 47 行和 56 行结果;绿叉线和褐块线分别代

表第 2 种算法第 47 行和 56 行结果。目标灰度值比背景灰度值明显降低,算法 1 尤其相差较大。两种算法再现结果均为靠近探测器边缘的目标暗纹偏窄,对比度略低。

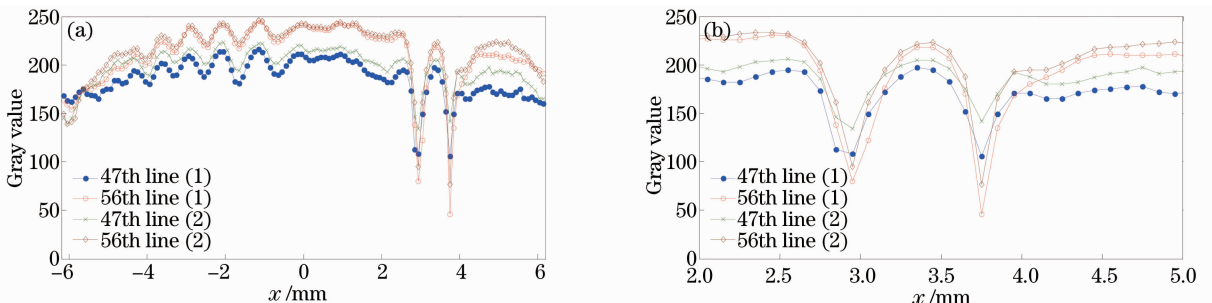


图 7 图 6 中标记行的灰度分布。(a) 全部;(b) 局部放大

Fig. 7 Grayscale distribution of marked lines in Fig. 6. (a) Whole; (b) partial enlarged

图 8 给出目标置于右下角的全息图及其再现结果。可以得出与图 6 类似结论,本文提出的算法明显

抑制了孔径效应;且整幅图像对比度也高于算法 2。

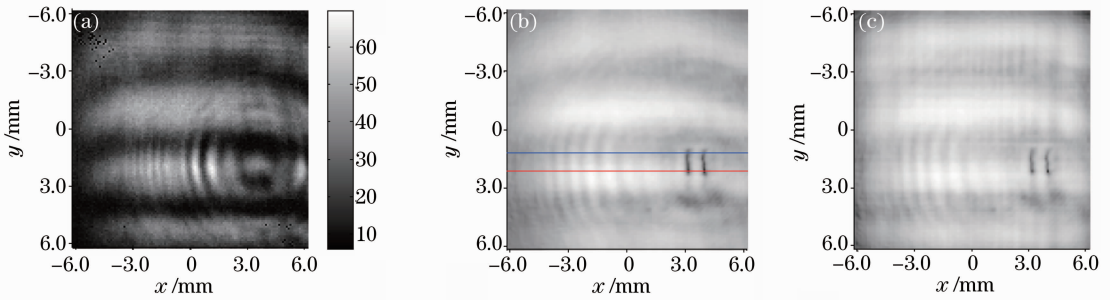


图 8 物体置于右下角的全息图及其再现结果。(a) 全息图; (b) 方法 1 结果; (c) 方法 2 结果

Fig. 8 Hologram and its reconstruction results of object at lower right corner. (a) Hologram; (b) result of method 1; (c) result of method 2

图 9 给出两种算法在图 8 蓝线和红线标记的第 75 行和 84 行像素的灰度值分布。从图中可以看出,目标上除了第 84 行横坐标 4 mm 附近的灰度值

极小值算法 1 高于算法 2 外,算法 1 目标上的灰度值均低于算法 2,也可以得出算法 1 对比度高于算法 2 的结论。

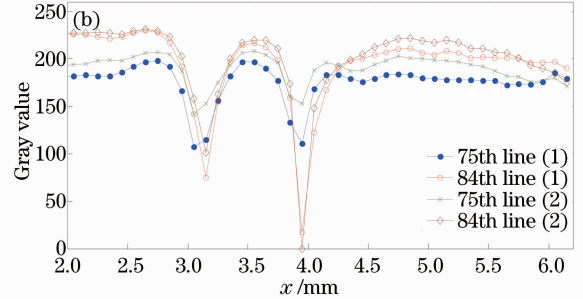
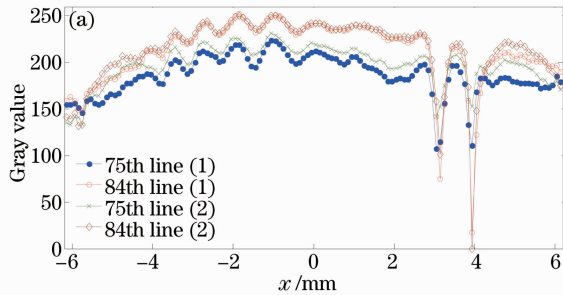


图 9 图 8 中标记行的灰度分布。(a) 全部; (b) 局部放大

Fig. 9 Grayscale distribution of marked lines in Fig. 8. (a) Whole; (b) partial enlarged

图 10 给出目标置于左上角的全息图及其再现结果。同样可以得出,本文提出的算法抑制了孔径效应且整幅图像对比度也高于算法 2;两种算法再

现结果均为靠近探测器边缘的目标暗纹偏窄,总体对比度略低。

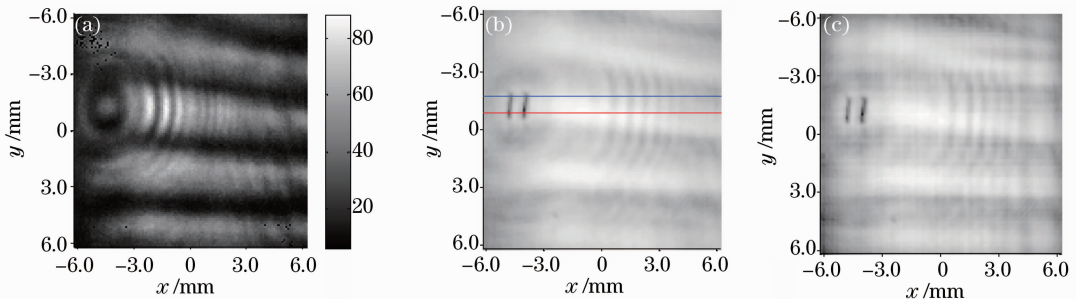


图 10 物体置于左上角的全息图及其再现结果。(a) 全息图; (b) 方法 1 结果; (c) 方法 2 结果

Fig. 10 Hologram and its reconstruction results of object at top left corner. (a) Hologram; (b) result of method 1; (c) result of method 2

图 11 给出两种算法在图 10 蓝线和红线标记的第 45 行和 54 行像素的灰度值分布。从图中可以看出,算法 1 对比度高于算法 2。也可得出,两种算法再现结果均为靠近探测器边缘的目标暗纹略窄,总体对比度略低。

从图 6~11 的对比分析中可以看出,目标置于探测器左右两侧时两种算法再现结果均为靠近探测器中心部位的暗条纹宽度略大于处于探测器边缘部位的暗条纹宽度,且处于探测器边缘附近的目标绝大多数对比度较低。说明探测器边缘较中心探测准

确性较差,即探测器边缘附近系统单点分辨率较低,这主要与太赫兹光束(扩束准直后)在探测器边缘部

分能量较低有关。这一结论与参考文献[13]基于逆问题研究方法的仿真研究结果类似。

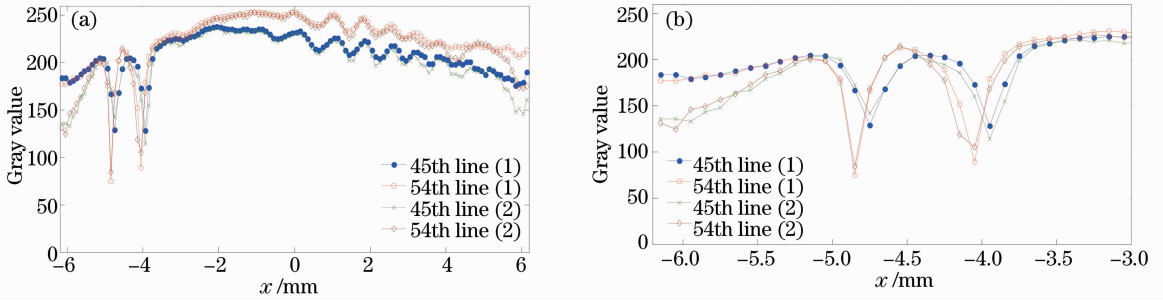


图 11 图 10 中标记行的灰度分布。(a) 全部; (b) 局部放大

Fig. 11 Grayscale distribution of marked lines in Fig. 10. (a) Whole; (b) partial enlarged

4 结 论

利用金属条最小宽度 0.25 mm 的聚四氟乙烯基电路板作为目标(其像元数约占探测器总像元数的 1%),进行了在轴向距离约为 20 mm 时,3 个横向位置的连续 2.52 THz Gabor 同轴全息成像实验。将 Tukey 窗函数和角谱法结合实现二维再现,并对再现结果与角谱法进行对比分析。实验结果表明,本文提出的算法抑制了孔径效应且整幅图像对比度也有所提高;靠近探测器中心部位的目标较处于探测器边缘附近的目标再现性能略好,即探测器中心部分系统单点分辨率略高。

目前只进行了近距离的目标不同位置的实验,实验中太赫兹源扩束质量不理想,探测器边缘能量较中心偏低,且不中心对称,而目标背景厚度不均匀等也引起衍射效应,因此实验准确性受到限制。今后还需进行更精密的实验设计,提高成像精度。另外,还要进行不同轴向位置时的目标横向位置的成像性能研究。

参 考 文 献

- 1 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Advances in research of THz digital holography imaging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(5): 050006.
李 琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 太赫兹数字全息成像的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(5): 050006.
- 2 Xue Kai, Li Qi, Wang Qi. Wavelet-based autofocus algorithm for terahertz digital holographic imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(s1): s111005.
薛 凯, 李 琦, 王 骐. 基于小波变换的太赫兹数字全息成像自动聚焦算法[J]. *中国激光*, 2012, 39(s1): s111005.
- 3 Li Qi, Ding Shenghui, Li Yunda, *et al.*. Comparison between 2.52 THz off-axis digital holography and focal-plane imaging[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(9): 0909003.
李 琦, 丁胜晖, 李运达, 等. 2.52 THz 离轴数字全息成像和焦

- 平面成像特性比较[J]. *中国激光*, 2012, 39(9): 0909003.
- 4 Y Zhang, W Zhou, X Wang, *et al.*. Terahertz digital holography[J]. *Strain*, 2008, 44(5): 380-385.
- 5 Wang Xinke, Ye Cui, Sun Wenfeng, *et al.*. Terahertz polarization real-time imaging based on balanced electro-optic detection[J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(11): 2387-2393.
- 6 Xinke Wang, Ye Cui, Dan Hu, *et al.*. Terahertz quasi-near-field real-time imaging[J]. *Opt Commun*, 2009, 282(24): 4683-4687.
- 7 Wang Xinke, Ye Cui, Sun Wenfeng, *et al.*. Terahertz real-time imaging with balanced electro-optic detection[J]. *Opt Commun*, 2010, 283(22): 4626-4632.
- 8 Li Qi, Hu Jiaqi. Experimental investigation on recording distance of terahertz gabor in-line digital holography[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0209020.
李 琦, 胡佳琦. 太赫兹伽柏同轴数字全息记录距离实验研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(2): 0209020.
- 9 Li Qi, Hu Jiaqi, Yang Yongfa. Comparisons of restoration methods on two-dimensional reconstructed images of THz in-line digital hologram[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(s1): s109010.
李 琦, 胡佳琦, 杨永发. 太赫兹同轴数字全息二维再现像复原方法比较[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s109010.
- 10 Zhang Yancao, Zhao Jianlin, Zhang Wei, *et al.*. Digital hologram apodization using Tukey window function[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(12): 2256-2259.
张延曹, 赵建林, 张 伟, 等. Tukey 窗函数用于数字全息图的切趾研究[J]. *光子学报*, 2007, 36(12): 2256-2259.
- 11 Zhang Yancao, Fan Qi. Effects of non-synchronous sampling on reconstructed image of digital hologram[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(12): 1209002.
张延曹, 范 琦. 数字全息图的非同步采样对再现像的影响[J]. *光学学报*, 2012, 32(12): 1209002.
- 12 Li Yunda. Research on CW 2.52 THz 3D Imaging Methods[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. 33-36.
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. 33-36.
- 13 C Fournier, L Denis, T Fournel. On the single point resolution of on-axis digital holography[J]. *J Opt Soc Am A*, 2010, 27(8): 1856-1862.
- 14 F DovalÁ, C Trillo. Dimensionless formulation of the convolution and angular spectrum reconstruction methods in digital holography[C]. *SPIE*, 2010, 7387: 73870U.

栏目编辑:何卓铭