

2.52 THz 离轴数字全息成像和焦平面成像特性比较

李 琦 丁胜晖 李运达 王 骐

(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 150081)

摘要 利用已搭建的 2.52 THz 焦平面成像装置和离轴数字全息装置,通过分辨率测量和水印及铅笔字成像,研究了焦平面成像和离轴数字全息成像这两种面阵成像的性能。实验证明,常规的焦平面成像由于太赫兹波长较长,很难获得较高的成像分辨率,且成像效果受放置位置的影响严重;太赫兹离轴数字全息成像可以提高成像分辨率,但成像物体大小受系统分辨率制约;焦平面成像较离轴面阵数字全息成像更适于大目标低分辨率成像。

关键词 成像系统;太赫兹成像;数字全息;焦平面成像

中图分类号 TN29 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0909003

Comparison between 2.52 THz Off-Axis Digital Holography and Focal-Plane Imaging

Li Qi Ding Shenghui Li Yunda Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

Abstract Performance of focal-plane imaging and off-axis digital holography is studied by the way of the resolution measurement and imaging of watermark and words in pencil with the built 2.52 THz focal-plane imaging and off-axis digital holographic devices. The results validate that the common focal-plane imaging can not achieve relatively high resolution because of the long wavelength of terahertz. The imaging quality is determined by the placed position. Terahertz off-axis digital hologram can improve the resolution of the imaging system; however, the imaging object size is limited by the system resolution. It can be inferred that the focal-plane imaging is more suitable for large object and low resolution imaging.

Key words imaging systems; terahertz imaging; digital holography; focal-plane imaging

OCIS codes 110.6795; 110.3000; 090.1995

1 引 言

太赫兹 (THz) 成像是当今成像技术的前沿课题之一^[1~7]。基于二维面阵探测器的太赫兹成像方式具有实时成像能力,在许多要求快速成像的领域具有重大的应用价值,备受关注^[8,9]。由于太赫兹波段波长较长,其空间传播受衍射的影响十分严重。虽然焦平面成像能够在一定程度上消除衍射的影响,但透镜的引入会增大光路设计及搭建的难度,带来一定的能量损耗及畸变。同时,对于传统的焦平面成像方式,系统焦距确定,其焦平面只能处于某一固定位置。当目标或探测器位置发生偏离时,衍射会使成像结果发生较严重的畸变。这些因素使常规

焦平面成像方式很难获得较高的成像分辨率。而数字全息技术^[10,11]为聚焦平面的自由选择提供了可能,且能够从全息图中获得目标的振幅和相位信息,对成像过程中可能出现的畸变等进行数字补偿,能够有效突破衍射对成像分辨率的限制,具有高分辨率成像的潜力。目前,俄罗斯和中国开展了面阵太赫兹数字全息成像实验研究^[11~15]。但尚无对离轴面阵太赫兹数字全息成像和焦平面成像特性的实验对比研究报道。

本文通过对已搭建的 2.52 THz 焦平面成像装置和离轴数字全息装置的成像结果进行对比分析,研究了两种成像体制的成像特性。

收稿日期: 2012-05-14; 收到修改稿日期: 2012-06-20

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研基金(20112302110028)资助课题。

作者简介: 李 琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像方面的研究。E-mail: hit_liqi@yahoo.cn

2 成像原理简介

实验均采用美国相干公司 SIFIR-50 CO₂ 抽运连续太赫兹激光器作为成像光源,输出频率为 2.52 THz,功率约为 50 mW。探测器均采用 Pyrocam III 热像仪,其成像帧频为 48 Hz,图像大小为 124×124,实际尺寸为 12.4 mm×12.4 mm。

焦平面成像系统光路如图 1 所示^[8,9],PM1-PM3 均为镀金离轴抛物面镜。PM1 焦距为 5.08 cm,PM2 焦距为 1.016 cm,PM2 焦点与太赫兹辐射经过 PM1 聚焦后的焦斑位置重合,使得成像光束经过 PM1 和 PM2 后扩束,扩大成像面积。扩束后的光束能够较为均匀地照射到目标表面,而且发散角很小。成像目标放置在 PM2 和 PM3 中,经过目标后的透射光经过 PM3 和聚乙烯透镜 L 后发散角较小,且能够完全入射到面阵探测器光敏面上,其中 PM3 焦距为 15.24 cm,L 焦距为 12 cm,进入探测器的光斑接近热像仪光敏面尺寸,本系统极限分辨率为 0.02 cm。

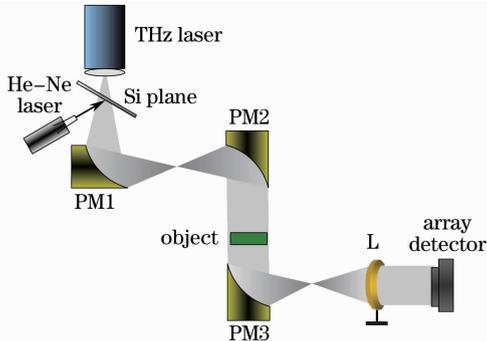


图 1 焦平面成像实验光路

Fig. 1 Experimental setup for focal-plane imaging

离轴数字全息成像系统如图 2 所示^[11,13,14]。为了对 SIFIR-50 输出进行扩束,使用了 4 个镀金离轴抛物面镜(PM1-PM4),PM1-PM3 焦距与图 1 装置相同,PM4 焦距为 10.16 cm。PM4 取代了焦平面成像装置中的聚乙烯透镜,既提高了透射率,又缩短了光程。PM1 距激光出射窗口 18.5 cm,而离轴抛物面镜之间的距离分别为 13.5、5.6、25.5 cm。经 PM4 后出射的太赫兹光束为束腰约 7 mm 的近似平行光束,其束腰位于面阵探测器 Pyrocam III 的光敏面上。BS1 和 BS2 为高阻单晶硅片,作为分束器使用,其中 BS1 对 2.52 THz 光的透射率约为 99%,而 BS2 的分束比则约为 1:1。为了消除零级衍射光的影响,使物体像与零级衍射光分离,BS2 在 x 以及 y 方向都具有一定的俯仰。从上方俯视 PM4 至面阵探测器部分光路,其中 PM4 至 BS2、BS2 至

Pyrocam III、BS2 至 M1 以及 M1 至 Pyrocam III 的距离分别约为 8.2、14.5、4.5、18.5 cm。参考光经 M1 反射后与物光在探测器表面干涉获得干涉图样。

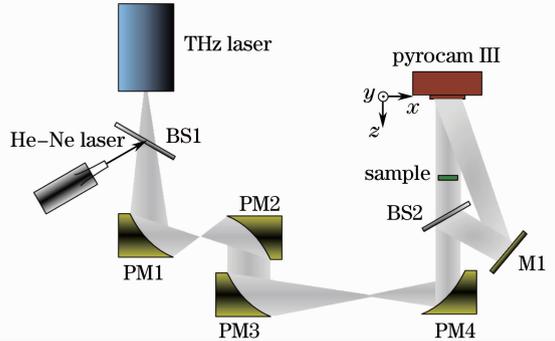


图 2 离轴数字全息成像实验光路

Fig. 2 Experimental setup for off-axis holographic recording

数字全息图记录和再现的简化系统模型如图 3 所示,设成像目标位于 x_0-y_0 平面,全息图记录位于 $x-y$ 平面,重建位于 x_i-y_i 平面,全息面距物平面和再现平面分别为 z_0 和 z_i 。用 $O(x, y)$ 及 $R(x, y)$ 分别表示位于 $x-y$ 平面上物光及参考光的复振幅分布,则位于记录面上的干涉场强度分布为

$$I(x, y) = |O(x, y) + R(x, y)|^2 = |O(x, y)|^2 + |R(x, y)|^2 + O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y). \quad (1)$$

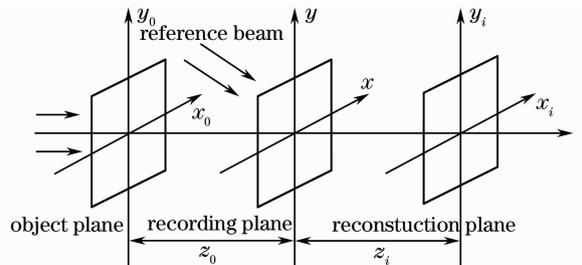


图 3 全息图的记录和再现系统

Fig. 3 Recording and reconstruction system of hologram

对波前再现有用的是(1)式后两项 [$O^*(x, y)R(x, y) + O(x, y)R^*(x, y)$],称为干涉项。为实现数值再现,需要对全息图后的衍射场分布进行计算。常见的数字全息再现方法有基于瑞利-索末菲衍射积分公式及线性系统理论的卷积法,以及基于角谱衍射理论的角谱法。

数字全息成像系统的空间分辨率由成像物体与探测器间的距离紧密相关,距离越短,分辨率越高。

3 两种成像方式的实验结果对比

3.1 分辨率板实验

利用图 1 所示的焦平面成像系统,对自制的聚四

氟乙烯分辨率测试板进行了成像, 目标为测试板上的一系列不同空间频率的等间距条纹阵列。其中对 0.6 mm 和 0.4 mm 条纹成像及其数字图像处理后的结果如图 4 所示。由 5 frame 平均的实验数据可以看出成像结果受噪声的影响较严重, 在目标附近出现了一些衍射条纹, 可分辨 0.6 mm 条纹。由图 4(c) 可以

看出, 通过数字图像处理, 0.4 mm 条纹图像的视觉效果有所改善, 且几乎未损失目标上的细节特征, 但此系统分辨率还是达不到 0.4 mm。总之, 受到系统装调误差以及透镜畸变等的影响, 焦平面成像系统的实际分辨率在 0.4~0.6 mm 之间, 且成像结果已出现了一定程度的畸变以及模糊现象。

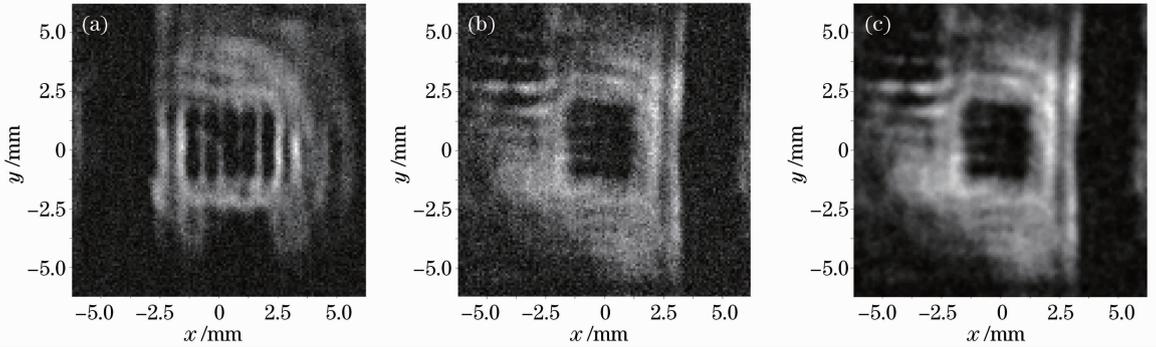


图 4 分辨率板的焦平面成像结果。(a) 0.6 mm 条纹;(b) 0.4 mm 条纹;(c) 图 4(b) 的滤波结果
Fig. 4 Focal-plane imaging results of resolution chart. (a) 0.6 mm strips; (b) 0.4 mm strips; (c) filtering result of Fig. 4(b)

利用图 2 的离轴数字全息成像系统, 首先对 0.4 mm 条纹进行了成像。此时目标放置在探测器光敏面前 3 cm 位置处, 探测器接收到的物光如图 5(a) 所示。分别对 5 frame 平均获得的全息图及 20 frame 平均的全息图进行了再现, 所得结果如图 5(b)~(e) 所示^[13,15]。根据记录距离, 可以求出

此时系统的极限分辨率为 0.294 mm。在 5 frame 平均全息的再现结果中, 由于噪声过大, 使得目标湮没在背景噪声之中; 而对于 20 frame 平均全息图的再现结果则很好地反映了目标的具体特征, 如条纹边缘的直角等, 与焦平面成像的成像结果相比, 图像分辨率有了十分明显的改进。当然, 20 frame 平均

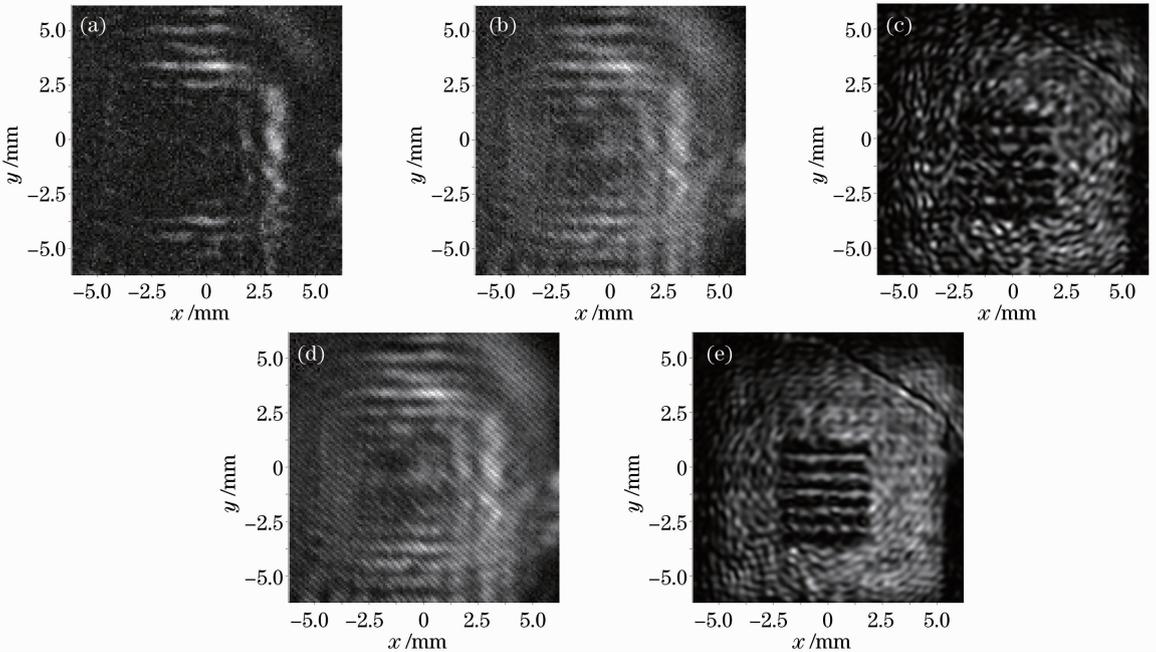


图 5 0.4 mm 分辨率板数字全息成像结果。(a) 物光 5 frame 平均结果;(b) 5 frame 平均全息图;(c) 对图 5(b) 的再现结果;(d) 20 frame 平均全息图;(e) 对图 5(d) 的再现结果

Fig. 5 Digital holographic results of 0.4 mm resolution chart. (a) 5-frame averaging object light; (b) 5-frame averaging hologram; (c) reconstruction result of Fig. 5(b); (d) 20-frame averaging hologram; (e) reconstruction result of Fig. 5(d)

导致成像帧频降为 2.4 frame/s。

此外,对一块具有不同空间频率成分的聚四氟乙烯分辨率板进行了成像实验,全息图记录距离为 2.1 cm,可以看清 0.3 mm 横向及纵向条纹图像,且 0.2 mm 纵向条纹也能够分辨^[11,14]。

3.2 对水印和文字的成像

采用图 1 的焦平面成像系统,对人民币水印进行

了成像实验。在一定范围内移动目标或者探测器,水印的数字部分会呈现出明显的明暗变化,5 frame 平均的成像结果如图 6 所示^[8]。当水印灰度级较低时,目标和探测器没有处于正确的物面和像面,应为衍射像,由于 5 元人民币水印数字笔画的大小在 1 mm 左右,因此衍射效应明显,当放在成像系统中的不同位置,数字水印会呈现出明显的明暗变化。

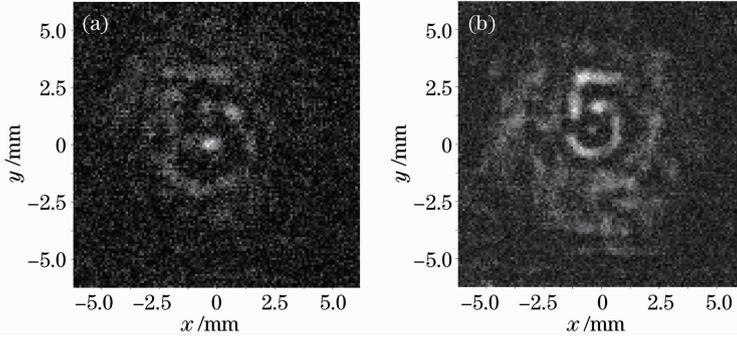


图 6 不同位置的 5 元人民币焦平面成像结果

Fig. 6 Focal-plane imaging results of ¥5 in different distances

利用图 2 的离轴数字全息成像系统对水印也进行了成像实验,以观察此系统能否对对比度较低的物体成像。成像目标为 5 元人民币上的水印“5”,为了防止目标遮挡参考光,在成像时将目标旋转了 180°,目标放置在探测器前 2.7 cm 处。获得的物光、全息图及其再现结果如图 7 所示,其中物光、全

息图均为 30 frame 平均结果,图 7(a)~(c)均进行了旋转以便于观察。从图 7(a)可以看出,由于目标结构较大,因此从物光图像即可依稀分辨出目标形状。从图 7(c)可以清楚地观察到目标的结构。实验中无焦平面成像中出现的成像结果随目标的前后移动发生明暗变化的现象。

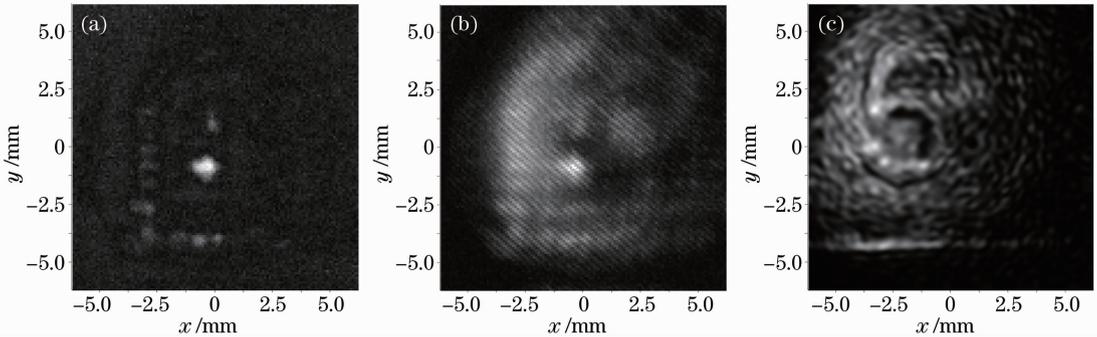


图 7 对 5 元人民币的数字全息成像结果。(a)物光;(b)全息图;(c)再现结果

Fig. 7 Digital holographic results of ¥5. (a) Object light; (b) hologram; (c) reconstruction result

利用太赫兹辐射对一些非金属成分的染料和涂料的穿透特性、对一些艺术作品进行太赫兹成像检测的实验研究已有报道。本课题组也以点扫描成像方式对一些铅笔字进行了成像,但由于信噪比、分辨率等因素,未曾使用过面阵探测器对其进行成像。利用本文的数字全息成像装置将目标放置在距探测器光敏面前 2.1 cm 处,获得的全息图及其再现结果如图 8(b)、(c)所示,所记录的物光及参考光均采用了 40 frame 平均。从全息图中可以看到,参考光的左下角受到了部分遮挡,出现了矩形阴影及衍射环。

由于目标位置处于全息图的右上角位置,因此所受影响较小,可以看到,再现结果很好地反映了目标的细节特征,成像结果与可见光图像基本一致。由于探测器的斩波频率为 48 Hz,因此,获取 40 frame 平均全息图所需的时间远远小于点扫描所需时间。

由于目标笔画较粗,为了观察字迹较轻时系统是否仍然能够对目标进行成像,重新制作了目标,如图 9(a)所示。与之前目标相比,此目标在纸面造成的凹陷较小。获得的全息图及对其再现结果分别如图 9(b)、(c)所示。由于目标对比度下降,使得在成

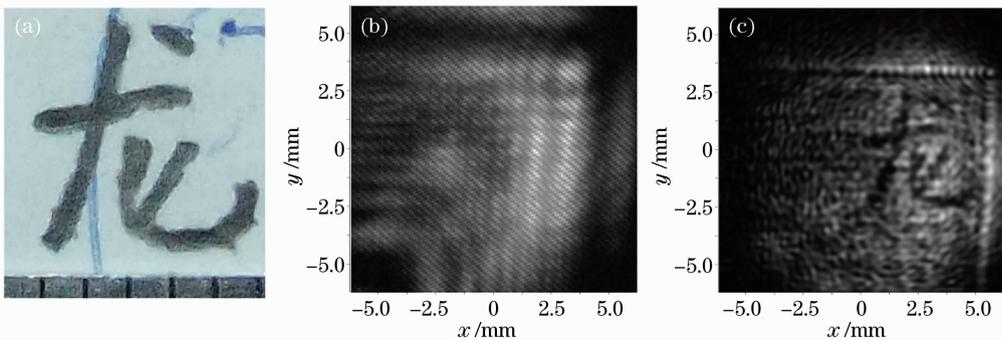


图8 “龙”字的数字全息成像结果 1。(a)实物图;(b)全息图;(c)再现结果

Fig. 8 Digital holographic result 1 of a character "dragon". (a) Photo; (b) hologram; (c) reconstruction result

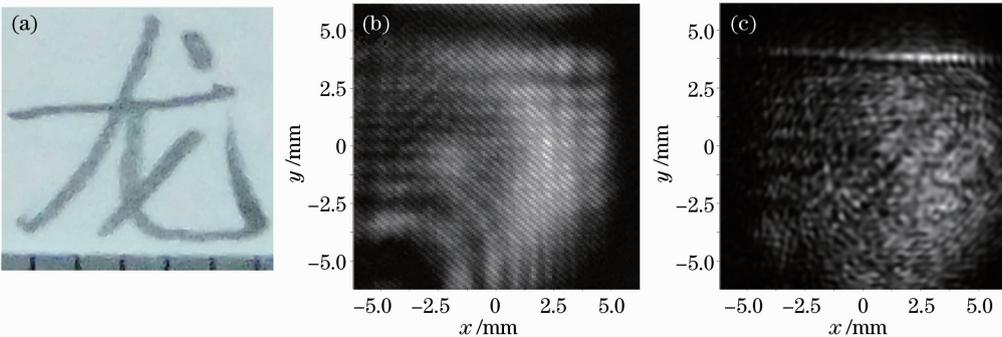


图9 “龙”字的数字全息成像结果 2。(a)实物图;(b)全息图;(c)再现结果

Fig. 9 Digital holographic result 2 of a character "dragon". (a) Photo; (b) hologram; (c) reconstruction result

像结果中目标湮没在周围的背景噪声之中,只有目标的右下部分结构还较容易识别。可见,利用数字全息进行成像在系统动态范围、信噪比等方面还有待提高。

4 结 论

由实验分析可知,与焦平面成像的成像结果相比,使用离轴面阵数字全息成像方式使图像分辨率有了十分明显的改进。数字全息法是用数值方法实现大数值孔径,焦平面成像法原则上也可实现,但是大数值孔径的透镜不易获得,带来的畸变也不易处理。受光路装调以及透镜畸变等的影响,利用现有的实验设备基于常规焦平面成像方式能够实现的分辨率仅在 0.4~0.6 mm 之间,且其成像结果受衍射的影响十分严重。而使用数字全息成像方式能将分辨率提高至 0.3 mm。当然,对于透射率较低的物体的数字全息成像,图像的分辨率还与累积的帧数有关,这导致成像速度降低。且使用数字全息成像方式成像目标的放置位置可以根据分辨率需要进行灵活调整,只需在数字再现过程中进行相应变化,使得其成像过程及光路设置更为简单。

由于数字全息中分辨率与物体到探测器的距离

紧密相关,采用离轴成像方式时,太赫兹数字全息系统空间分辨率受物体大小影响较严重,如全息图记录距离为 2.1 cm 时,物体要明显小于光敏面大小,否则参考光无法尽可能多地照射在探测器上,导致再现像质量差。对于低分辨率成像,数字全息方法原则上也可对较大物体成像,但光路较焦平面复杂,实际应用中更宜选择焦平面成像。

参 考 文 献

- Deng Chao, Xing Chunfei, Lü Mo *et al.*. CW THz standoff imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(s1): 50~52
邓朝,邢春飞,吕默等. 连续太赫兹波远距离成像[J]. *光学学报*, 2009, **29**(s1): 50~52
- Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858
杨昆,赵国忠,梁乘森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(11): 2853~2858
- Li Qi, Yao Rui, Ding Shenghui *et al.*. Experiment on 2.52 THz transmission-mode imaging for concealed objects[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0711001
李琦,姚睿,丁胜晖等. 遮挡物的 2.52 THz 透射成像实验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(7): 0711001
- Zhao Yaqin, Zhang Liangliang, Zhu Dechong *et al.*. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(s1): s111003
赵亚芹,张亮亮,祝德充等. 基于压缩传感的单点太赫兹成像[J]. *中国激光*, 2011, **38**(s1): s111003
- Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging

- [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 023001
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 023001
- 6 Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): s100402
丁胜晖, 李琦, 姚睿等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(s1): s100402
- 7 Ding Shenghui, Li Qi, Li Yunda *et al.*. Experimental research on resolution measurement of a continuous-wave terahertz reflection-mode scanning system[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1011001
丁胜晖, 李琦, 李运达等. 连续太赫兹反射扫描成像分辨率测量实验研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(10): 1011001
- 8 Yao Rui, Ding Shenghui, Li Qi *et al.*. Improvement of 2.52 THz array transmission imaging system and resolution analysis[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(1): 0111001
姚睿, 丁胜晖, 李琦等. 2.52 THz 面阵透射成像系统的改进及分辨率分析[J]. 中国激光, 2011, **38**(1): 0111001
- 9 Yao Rui. Experimental Research on the Improvement of CW-THz 2D Imaging Quality and Speed [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. 50~59
姚睿. 提高连续 THz 二维成像质量及速率的实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010. 50~59
- 10 Pan Weiqing, Lu Wei. Double wavelength one-shot in-line digital holography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 352~357
潘卫清, 鲁伟. 基于双色照明的单曝光同轴数字全息技术[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 352~357
- 11 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
- 12 B. A. Knyazev, G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov. Novosibirsk terahertz free electron laser; instrumentation development and experimental achievements[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2010, **21**(5): 054017
- 13 S. H. Ding, Q. Li, Y. D. Li *et al.*. Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(11): 1993~1995
- 14 Q. Li, S. H. Ding, Y. D. Li *et al.*. Experimental research on resolution improvement in CW THz digital holography[J]. *Appl. Phys. B*, 2012, **107**(1): 103~110
- 15 Ding Shenghui. Research on Resolution Improvement CW THz Imaging [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. 60~78
丁胜晖. 提高连续太赫兹成像分辨率的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011. 60~78

栏目编辑:何卓铭