

# 太赫兹主动关联成像技术研究

闫昱琪<sup>1,2</sup>, 赵成强<sup>1\*</sup>, 徐文东<sup>1</sup>, 李硕丰<sup>1,2</sup>, 严海月<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所激光与光电子功能材料中心, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 研究了一种基于主动关联成像方式的太赫兹成像系统, 可利用一个太赫兹单点探测器实现目标的高速、高分辨二维成像, 突破了太赫兹器件的分辨率限制。该系统采用双调幅板旋转方式产生可重复使用的测量矩阵, 大幅提高了成像速度。通过数值模拟给出了成像距离、调幅板随机图形尺寸、采样次数、采样矩阵相关性等参数对成像结果的影响, 得到最佳实验参数, 并优化了双调幅板的运动策略。搭建的太赫兹主动关联成像实验装置采用波长为 3 mm 的太赫兹源, 实验证明其成像分辨率为 4 mm, 且成像时间由调幅板的电机转速决定, 证实了此种太赫兹成像方式的可行性。

**关键词** 成像系统; 太赫兹成像; 压缩感知; 主动编码

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0814001

## Research on the Terahertz Active Ghost Imaging Technology

Yan Yuqi<sup>1,2</sup>, Zhao Chengqiang<sup>1\*</sup>, Xu Wendong<sup>1</sup>, Li Shuofeng<sup>1,2</sup>, Yan Haiyue<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Functional Materials Center of Laser and Photoelectron, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A terahertz imaging system based on active ghost imaging method is proposed. The system can achieve high speed and high resolution imaging using one single-pixel detector, breaking through the resolution limit of terahertz devices. Reusable measurement matrix is obtained by the rotation of double random amplitude plates so that the imaging speed is greatly improved. The influence of imaging distance, size of random pattern, sampling number and the relativity of sampling matrix on imaging quality are numerically analyzed. The best parameters are used for experiment. And the motion strategy of double amplitude plates is optimized. Experimental results show that the imaging resolution is 4 mm when the wavelength of terahertz source is 3 mm, and imaging speed is determined by the motor of amplitude plates. The feasibility of terahertz active ghost imaging method is proved.

**Key words** imaging systems; terahertz imaging; compressed sensing; active coding

**OCIS codes** 110.6795; 100.3010; 040.2235

## 1 引 言

太赫兹波 (THz) 是指频率为 0.1 THz ~ 10 THz (波长 30  $\mu\text{m}$  ~ 3 mm) 的电磁波, 介于毫米波与红外波段之间<sup>[1]</sup>。与其他波段电磁波相比, THz 波有很多独特的优点, 比如: 它对非极性非金属材料有很强的穿透能力, 可用于探测其内部信息; 而极性物质 (例如水) 对 THz 波的吸收较强, 可利用这一特性对生物组织等进行成像; 并且 THz 波频率低、

能量低, 对人体安全, 也不会破坏被测样品。这些优良特性, 使太赫兹成像技术在安全检测、材料分析以及生物医学研究等领域展现出广阔的应用前景<sup>[2-3]</sup>。

目前的太赫兹成像主要有点扫描<sup>[4-5]</sup>、线阵扫描和面阵相机等成像方式<sup>[6]</sup>。点扫描方式一般用振镜或电机带动反射镜做光栅扫描运动。但由于 THz 波长较长, 要获得较高分辨率图像, 在成像距离相同的情况下, 必须采用大口径反射镜, 这就限制了反射镜的转动速度, 导致其成像速度不能很高; THz 线

收稿日期: 2018-01-26; 修回日期: 2018-03-09; 录用日期: 2018-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (61501435)

\* E-mail: chqzhao@siom.ac.cn

阵和面阵探测器成像速度快,但对 THz 源的亮度有很高要求,且受阵列探测器的限制,分辨率不能做到很高。为解决目前 THz 成像时阵列探测器不成熟和成像速度慢的问题,将关联成像应用于 THz 成像领域的技术得到了少量研究。关联成像又叫鬼成像(GI)<sup>[7]</sup>,是一种利用双光子符合探测恢复待测物体空间信息的成像技术,与传统成像方式相比,其特点在于采用一个单点探测器即可实现二维空间成像,是如今成像领域的研究热点。但目前关于 THz 关联成像方面的研究,其测量矩阵产生方法主要是机械更换编码板<sup>[8-9]</sup>或利用基于半导体技术的空间光调制器<sup>[10]</sup>。第一种方法编码速度慢,无法实际应用;第二种方法速度快,但分辨率很低,甚至远低于普通 THz 相机。

为突破目前 THz 器件的限制,本文在 THz 关联成像的基础上,利用赝热光源的可重复性<sup>[11]</sup>,提出一种主动编码照明方式的 THz 关联成像技术。此技术的核心是产生可重复使用的测量矩阵,通过优化系统参数,提高了成像速度和分辨率。在此基础上搭建了一套 THz 主动关联成像实验装置,验证了利用单点探测器实现高速、高分辨 THz 成像的可行性。

## 2 关联成像及系统设计

### 2.1 关联成像原理

关联成像的原理如图 1 所示,用光束照射旋转的随机相位板或调幅板产生赝热光源<sup>[12]</sup>,将其分成相同的两路分别进入物臂和参考臂。物臂上的光场经物体调制后被无空间分辨率的桶探测器接收,参考臂用于采集与照射到物体表面相同的光场。赝热光源每变化一次就进行一次采样,每次采样参考臂都会接收到一个二维强度分布为  $I_n(x, y)$  的光场信息,同时物臂上也收集到一个单点信号。经过  $N$  次采样后参考臂上就会产生  $\mathbf{R}(x, y, N)$  的测量矩阵,相应地,物臂上记录了一维信号  $B_w(1, N)$ ,最后经过二阶关联计算<sup>[13]</sup>就可重建出目标  $T$  的像。可以看出,关联成像时物臂上照射到物体的光场信息应与参考臂采集的测量矩阵完全一致,这是保证关联成像分辨率和信噪比的关键点。

$$T_{GI}(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left( \frac{B_n}{R_n} - \frac{\langle B_n \rangle}{\langle R_n \rangle} \right) I_n(x, y), \quad (1)$$

式中  $T_{GI}(x, y)$  是通过关联运算重构所得目标的像,  $B_n$  为物臂上第  $n$  次采样收集到的信号,  $R_n$  是将  $I_n(x, y)$  各元素求和后得到的总光强,  $\langle B_n \rangle$ 、 $\langle R_n \rangle$

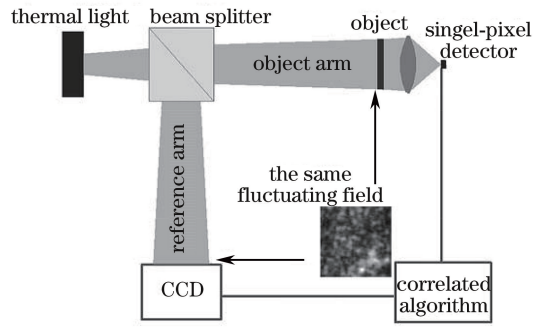


图 1 关联成像原理

Fig. 1 Principle of ghost imaging

为  $B_n$ 、 $R_n$  的平均值。

通过以上 GI 算法反演出的目标图像分辨率和信噪比与测量矩阵和目标的特性密切相关,很难得到高质量的目标图像。而将压缩感知算法<sup>[14-15]</sup>应用到关联成像中,可以在欠采样的情况下较好地重建出待测稀疏目标,获得高分辨率和信噪比的图像,这种方法称为压缩感知鬼成像(GISC),文献<sup>[16-18]</sup>描述了 GISC 的超分辨特性,它能够突破成像系统衍射极限分辨率的限制,得到超分辨鬼成像。其原理为在目标稀疏的条件下,将求解欠定方程组  $\mathbf{y} = \Phi \mathbf{x}$  ( $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^{M \times 1}$  为待重构的原始信号,  $\Phi \in \mathbf{R}^{N \times M}$  为测量矩阵)转化为求解以下凸优化问题稀疏重构出待测目标的透射像  $\mathbf{x}$ ,即

$$\min \|\mathbf{y} - \Phi \Psi^H \mathbf{f}\|_2 + \lambda \|\mathbf{f}\|_1, \quad (2)$$

式中  $\|\cdot\|_p$  表示向量的  $l_p$  范数,  $\Psi \in \mathbf{R}^{M \times M}$  为正交变换矩阵,  $\mathbf{f} = \Psi \mathbf{x}$  为  $\mathbf{x}$  在变换域下的稀疏表示,上标 H 表示转置共轭矩阵。理论上,如果  $\mathbf{f}$  是  $K$  稀疏的,在  $N \approx 4K$  或  $N \geq K \log_2(M/K)$  时,就可以较好地重构出原始信号。

### 2.2 系统设计

以往的关联成像过程中,由于赝热光源的光场涨落不可预知,成像时需要利用参考臂实时采集目标光场,很大程度上限制了成像速度。并且,受 THz 面阵探测器分辨率的限制,很难根据需要同时精确采集参考臂光场。采用可预置的主动编码方式<sup>[19]</sup>,产生可重复使用的 THz 光场,使其能够用于多次成像。由于成像过程中不需要实时采集目标光场或不断更换编码板,因此可以大幅提高成像速度。

如图 2 所示,THz 波束经准直之后先后照射到两块调幅板上,调幅板表面随机分布着若干对 THz 波不透明的正方形图案,用于调制 THz 光场。两块调幅板相对转过一定的角度,探测面上的光场就会发生变化,即为一次采样。精确控制两块调幅板的

旋转角度,使其每一步都定位在预先编码的位置上,利用 THz 单点探测器扫描记录每次采样的光场,并依次存储作为测量矩阵。在后续的每次成像过程中,只需将物体放置在探测面处,按照预先编码使调幅板高速转动,将预定的光场序列照射到物体。用 THz 单点探测器收集经物体透射或散射的光强信号,最后将光强信号序列与先前采集的测量矩阵进行 GI 或 GISC 运算,即可准确重建出物体的像。可以看出,由于产生了可重复使用的测量矩阵,此种方式的成像过程仅为物臂信号的采集过程,并且只需一个 THz 单点探测器就能够完成测量矩阵和物臂信号的采集。

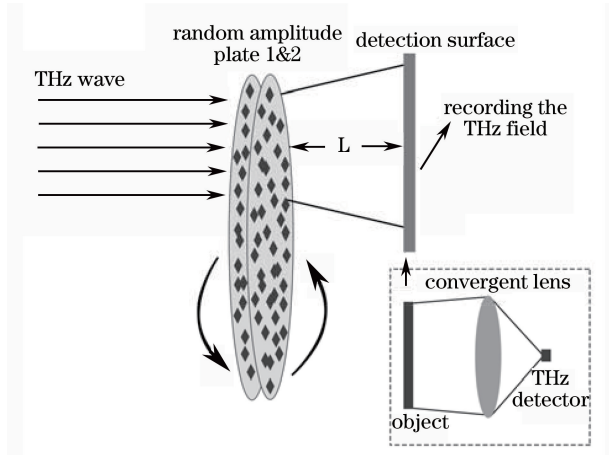


图 2 太赫兹主动关联成像系统

Fig. 2 THz active ghost imaging system

### 3 数值模拟及结果分析

#### 3.1 参数选择和评价函数

THz 主动关联成像系统的成像效果由采样次

数、调幅板上随机图形的尺寸和数量、成像距离等共同决定。通过数值模拟,比较普通关联成像算法与压缩感知算法的重建结果,并重点量化分析系统各参数对成像质量的影响,从而获得实现高分辨率 THz 主动关联成像的具体技术指标。数值模拟采用图 2 所示的系统模型,THz 波长  $\lambda = 3 \text{ mm}$ ,光斑直径为  $120 \text{ mm}$ 。调幅板参数设置:每块板上随机图形总面积占整个板的  $50\%$ ,两块板距离为  $8 \text{ mm}$ ,直径为  $240 \text{ mm}$ 。

引入信噪比(SNR)来评价关联成像的图像重建质量,其具体定义为

$$R_{\text{SN}} = 10 \lg \frac{\sum_{i,j} X_{i,j}^2}{\sum_{i,j} (X_{i,j}^2 - X_{i,j}'^2)}, \quad (3)$$

式中  $X_{i,j}$  和  $X_{i,j}'$  分别表示原图像和重建图像第  $i$  行、第  $j$  列的像素灰度。 $R_{\text{SN}}$  值越大,说明图像相对原始图像噪声越小,重建质量越好。

#### 3.2 关联算法与压缩感知算法的比较

仿真目标为图 3(a)中  $60 \text{ pixel} \times 60 \text{ pixel}$  的二值图像 ( $1 \text{ pixel} = 1 \text{ mm}$ ),其透光缝隙宽度为  $2 \text{ pixel}$ ,三条缝中心间距分别为  $4, 5, 6 \text{ pixel}$ 。图 3(b)是采用 GI 算法在采样次数  $N = 3000$  时的重构效果,可以看出,在采样次数足够大的情况下,GI 算法仍然难以分辨目标。图 3(c)是引入 GISC 算法之后在  $N = 1500$  时的重构图像,显然相比 GI 算法结果,在采样次数减半的条件下,GISC 算法仍然清晰分辨出了中心间隔为  $4 \text{ pixel}$  的目标,重构效果远远优于 GI 算法。因此,之后的仿真及实验都采用压缩感知算法进行图像重构,进一步提高成像速度和质量。

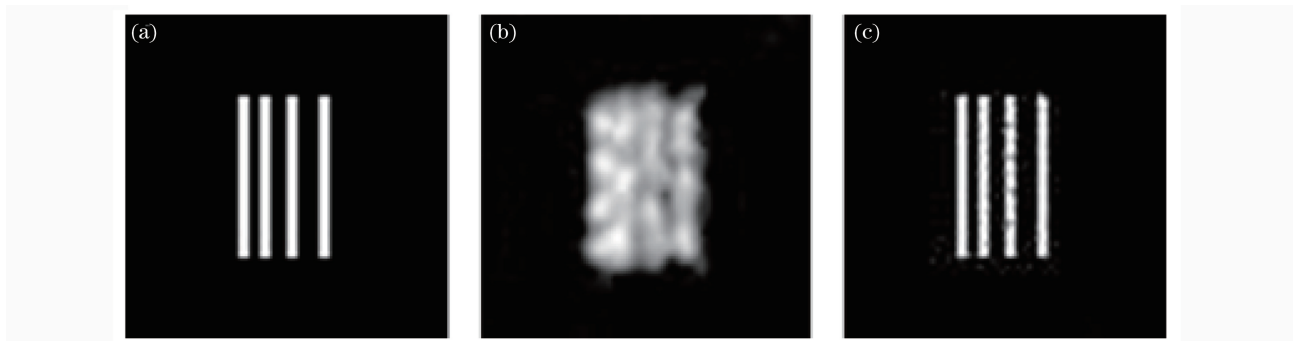


图 3 GI 与 GISC 算法重建结果。(a)原始物体;(b) GI 重建图像,  $N = 3000$ ;(c) GISC 重建图像,  $N = 1500$

Fig. 3 Reconstruction results with GI and GISC algorithm. (a) Original object;

(b) GI result with  $N = 3000$ ; (c) GISC result with  $N = 1500$

#### 3.3 成像距离和随机图形尺寸的影响

由于波长较长,THz 波经过两块调幅板时衍射现象明显,因此成像距离和随机图形尺寸对成像结

果的影响较大。令采样次数  $N = 2000$ ,图 4 为不同随机图形尺寸(正方形边长)  $d$  与成像距离  $L$  下的模拟结果,图 5 为其对应的  $L$ -SNR 和  $d$ -SNR 曲线。

显然随着  $L$  的增大,图像的信噪比和分辨率都显著下降。通过  $d$ -SNR 曲线可以看出随机图形的尺寸在 6 mm 左右时,图像重建质量最好,大于或小于 6 mm 图像质量都会逐渐下降。反演图像的分辨率主要由随机图形(采样矩阵)的分辨率决定,当图形尺寸变大时,其高频成分随之降低,导致反演图像的分辨率降低。但是,当随机图形尺寸下降到与太赫

兹波长相当时,由于存在衍射效应,其高频成分反而会随着图形尺寸的降低而降低,因此随机图形的最优尺寸与太赫兹波长直接相关。

通过上述模拟和分析,实验中要尽量减小探测面与调幅板的距离,并且将不透明图形随机分布在调幅板表面约 50% 左右的区域,单个图形尺寸设置为 6 mm。

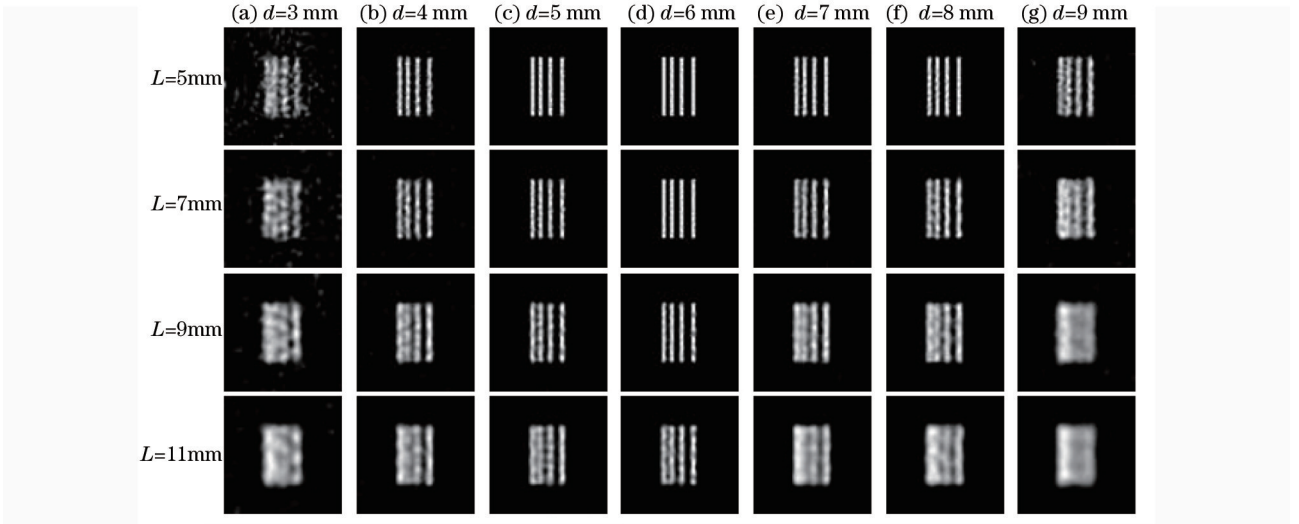


图 4 不同成像距离和随机图形尺寸下的图像重建结果

Fig. 4 Image reconstruction results of different imaging distances and sizes of random pattern

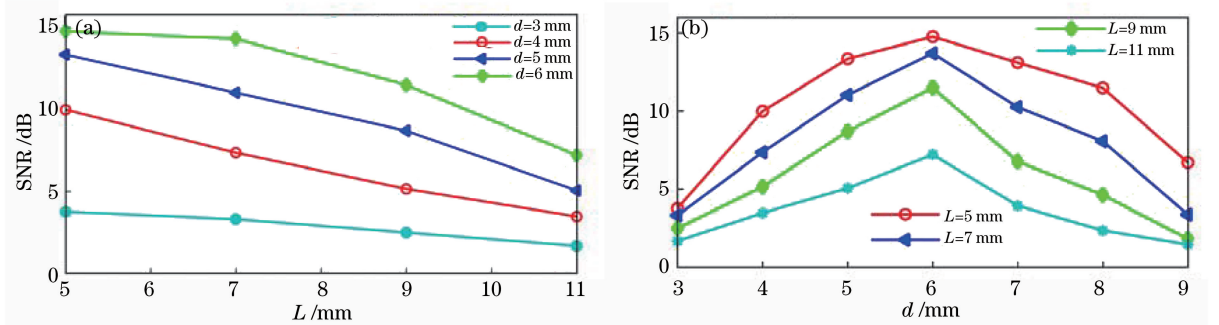


图 5 SNR 曲线。(a)  $L$ -SNR 曲线;(b)  $d$ -SNR 曲线

Fig. 5 SNR curves. (a) Relationship between  $L$  and SNR; (b) relationship between  $d$  and SNR

### 3.4 采样次数和采样矩阵的相关性

THz 主动关联成像系统中,两块调幅板常规的转动规律:将每块调幅板按角度分成  $n$  等份,对板 1 的每个位置,板 2 都旋转  $n$  次,获得  $n$  次采样。板 1 旋转一周后结束测量,最终获得的采样次数  $N = n^2$ 。由于两块调幅板的每个位置都重复使用了  $n$  次,导致采样矩阵不是理想的随机矩阵,会影响成像效果。图 6(a)~(e)和图 6(f)~(j)分别为  $N = 400, 900, 1600, 2500, 3600$  时,采用随机光场和上述非随机光场进行关联成像的结果对比。从图 7 的  $N$ -SNR 曲线可以看出,得到相同 SNR 的图像,采

用非随机光场所需的采样次数较多,约为随机光场的 1.6 倍。但当采样次数足够多时,两种方式可以得到相同的图像信噪比。

因此,实验中需要调整调幅板的转动角度和规律,使 THz 光场的相关性降到最低,尽量减少所需采样次数。因此,设计出如图 8 所示的调幅板运动控制策略:首先两块板从初始位置开始一起转动,单次采样旋转角度为  $\alpha^\circ$ 。转过一周(即采样  $360/\alpha$  次)后分别重新定位不同的初始位置继续进行旋转采样,每过两圈使板 2 的单次采样旋转角度减少一定值。两块板每圈的初始定位如图 8(b)所示,图中

的标号 1~8 分别为两块板第 1~8 圈的初始位置, 可根据所需采样次数增加初始位置分布。优化调幅板运动策略后, 得到的  $N$ -SNR 曲线为图 7 中的第 3

条曲线, 可以看出, 采用此方式能够减少约 1/3 的采样次数, 因此可进一步提高成像速度。

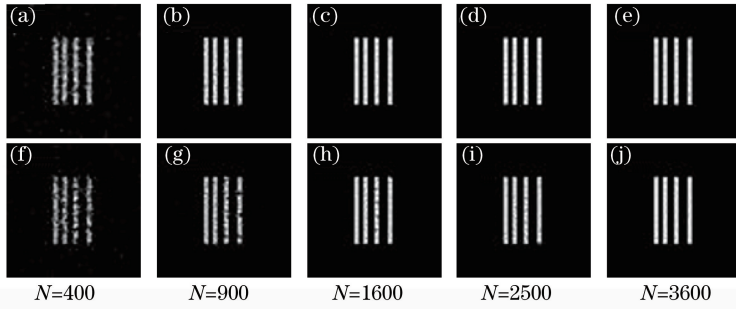


图 6 不同采样次数下的重建结果 ( $L=5\text{ mm}$ ,  $d=6\text{ mm}$ )。

(a)~(e) 采用完全随机光场的关联成像结果; (f)~(j) 采用相关光场的关联成像结果

Fig. 6 Reconstruction results of different sampling numbers ( $L=5\text{ mm}$ ,  $d=6\text{ mm}$ ).

(a)-(e) Results with random field; (f)-(j) results with related field

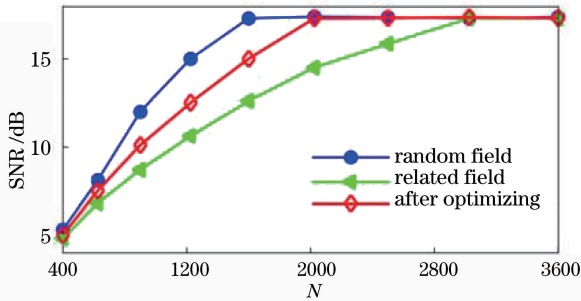


图 7  $N$ -SNR 曲线

Fig. 7 Relationship between  $N$  and SNR

THz 源作为单点探测器, 将 THz 波转换为电压信号。THz 源出射的波束经过准直镜 ( $f=400\text{ mm}$ ,  $D=120\text{ mm}$ ) 后照射在两块随机调幅板 (外径为  $150\text{ mm}$ , 内径为  $30\text{ mm}$ ) 上, 调幅板表面经过随机铝箔贴片处理, 不透光面积约占 50%, 贴片的尺寸在  $6\text{ mm}$  左右。实验中的随机调幅板、准直镜、会聚镜均采用高密度聚乙烯 (HDPE) 为材料。根据仿真结果与实际结构, 将探测面与调幅板的距离  $L$  调整到约为  $5\text{ mm}$ 。

获取测量矩阵时, 由一个二维扫描平移台带动 THz 单点探测器逐行扫描出探测面上的 THz 光场, 扫描范围为  $54\text{ mm} \times 54\text{ mm}$ , 扫描像素数为  $30\text{ pixel} \times 30\text{ pixel}$ , 即每个像素大小为  $1.8\text{ mm}$ 。带动调幅板转动的电机选用带高精度编码器的步进电机, 可以重复精确定位调幅板的旋转位置, 二维扫描平移台也由两个步进电机驱动, 这 4 个步进电机由一个带位置比较触发功能的 4 轴运动控制卡控制, 编写程序实现系统联动和数据采集。图 10 为实际扫描出的其中 4 幅 THz 光场。

精确扫描出可重复使用的测量矩阵后, 移走图 9 中的二维平移台, 将物体放置在探测面, 用会聚镜和 THz 单点探测器收集目标的透射信号, 两块调幅板按照预先编码路径高速转动进行关联成像。可以看出, 此装置的成像时间最终由调幅板电机的转速决定。

#### 4.2 成像结果及分析

实验中分别对塑料板上贴着的双缝和金属钥匙进行 THz 主动关联成像, 双缝中心间距  $\delta$  分别为  $3, 4, 5, 6, 8\text{ mm}$ , 设置不同的采样次数分析实验结

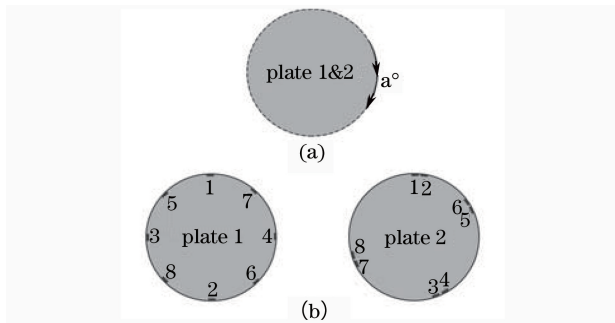


图 8 调幅板转动规律。(a) 旋转采样; (b) 初始位置

Fig. 8 Rotation rule of amplitude plates.

(a) Sampling rotationally; (b) initial position

## 4 实验研究

### 4.1 实验装置

根据以上设计和分析, 搭建出如图 9 所示的实际实验装置进行研究。使用频率为  $0.1\text{ THz}$  (波长为  $3\text{ mm}$ ) 的太赫兹雪崩二极管作为 THz 源, 其输出功率为  $10\text{ mW}$ 。超快太赫兹探测器的响应范围在  $50\text{ GHz} \sim 1\text{ THz}$ , 响应时间为  $150\text{ ps}$ , 可以匹配

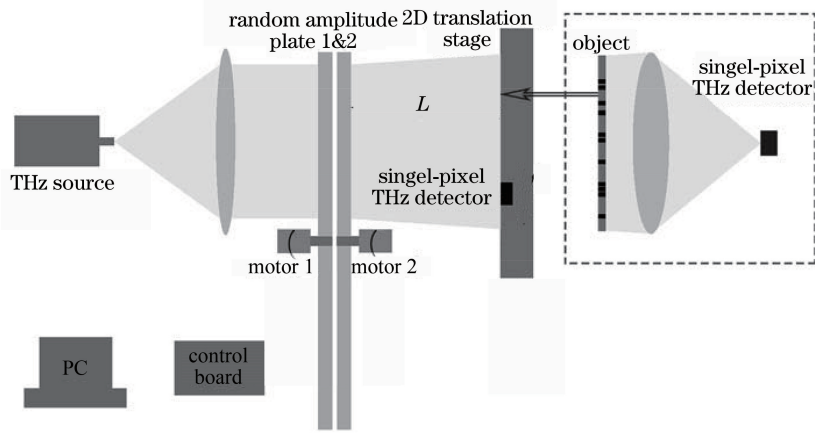


图 9 THz 主动关联成像装置图

Fig. 9 THz active correlation ghost imaging device

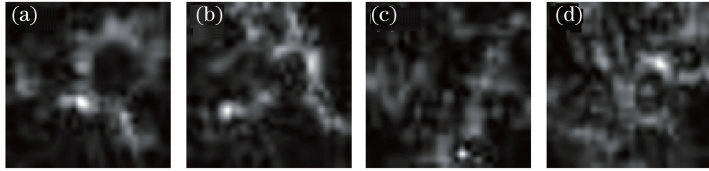


图 10 实际扫描出的 4 幅 THz 光场

Fig. 10 Four THz fields by actually scanning

果。双缝经过 GISC 成像后的结果如图 11(a)~(e) 所示, 从上行到下行采样次数依次为 200、400、600。结果表明, 采样次数越多, 重建出的目标越清晰。通过图 11(f)~(j) 的归一化投影曲线可看出, 系统能够分辨中心间隔为 4 mm (缝宽及间隙均为 2 mm) 及以上的双缝, 可判断其分辨率达到 4 mm。实验

过程中, 当电机的转速设置为  $5 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、采样次数为 600 时, 成像时间为 3 min。由于成像速度由调幅板电机转速决定, 因此可通过优化电机转速进一步提高成像速度, 实现高速成像。以采用的电机转速为  $800 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  计算, 其他条件相同时, 一幅图像的成像时间可以小于 2 s。

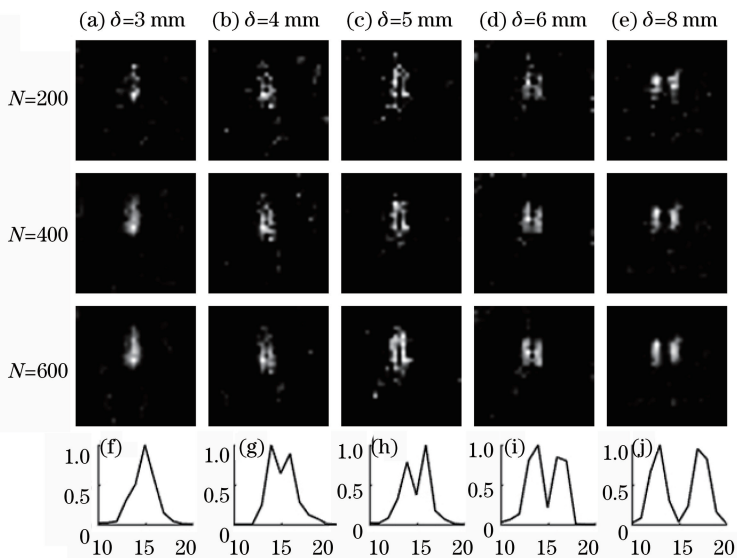


图 11 双缝实验。(a)~(e) 不同  $\delta$  时的实验结果; (f)~(j) 对应  $N=600$  时的归一化投影曲线

Fig. 11 Experiment of double-slit. (a)-(e) Results with different  $\delta$  values; (f)-(j) normalized projective curves with  $N=600$ , respectively

如图 12(a)所示,金属钥匙长度约为 50 mm,倾斜放置在成像面中。将采样次数设为 600,经过 THz 主动关联成像,钥匙形状清晰可见,图 12(b)和(c)、

(d)和(e)为分别为采用 GI 和 GISC 算法得到的强度和灰度图像。可以看出引入 GISC 算法后,重建出的目标图像边缘更加清晰,形貌更接近实际物体。

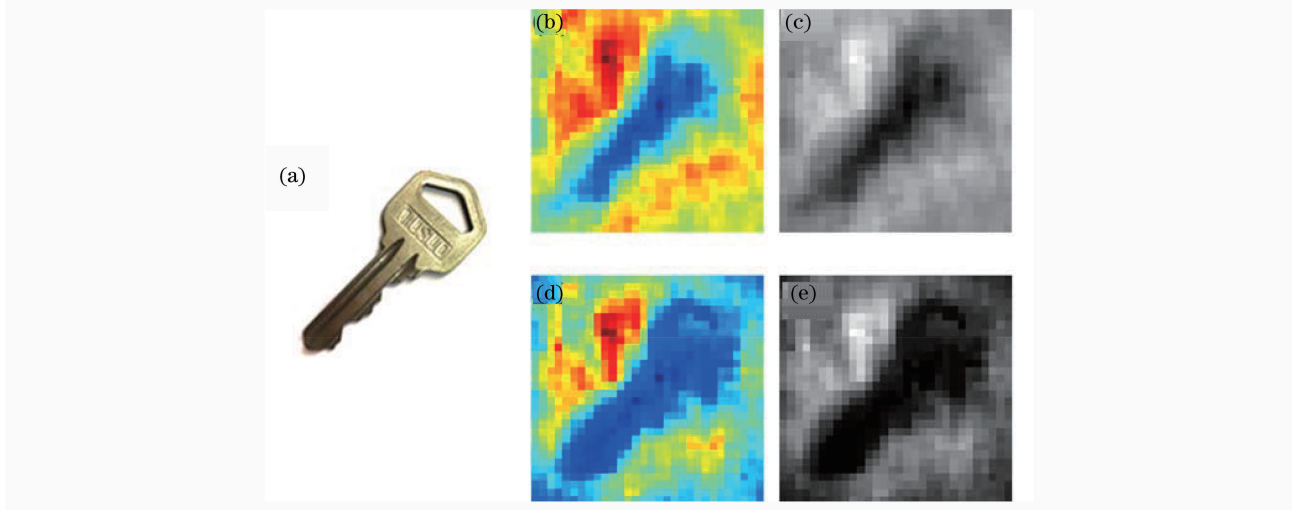


图 12 金属实物实验,  $N=600$ 。(a)实物样品;(b) GI 强度图像;(c) GI 灰度图像;(d) GISC 强度图像;(e) GISC 灰度图像  
 Fig. 12 Experiment of metal object with  $N=600$ . (a) Object picture; (b) intensity image with GI; (c) gray image with GI; (d) intensity image with GISC; (e) gray image with GISC

## 5 结 论

研究并搭建了一种太赫兹主动关联成像系统,能够利用一个单点探测器实现高速、高分辨太赫兹成像。本系统采用双调幅板旋转方式产生了可重复使用的测量矩阵,并利用压缩感知算法较好地重建出了目标。数值模拟结果表明,调幅板距成像面越近,成像质量越好,且随机图形的最佳尺寸为 6 mm。另外,通过优化调幅板的运动策略降低了采样次数,进一步提高成像速度。搭建的太赫兹主动关联成像实验装置,采用波长为 3 mm 的太赫兹源和一个单点探测器,实现了  $30 \text{ pixel} \times 30 \text{ pixel}$  的图像,成像分辨率达到 4 mm。本成像方式可通过优化调幅板的电机转速实现高速成像。模拟和实验表明,太赫兹主动关联成像系统是一种容易实现的低成本、高精度的新型太赫兹成像方式。

### 参 考 文 献

[1] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.  
 [2] Karpowicz N, Zhong H, Zhang C L, *et al.* Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5): 054105.  
 [3] Federici J F, Schulkin B, Huang F, *et al.* THz

imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs [J]. Semiconductor Science and Technology, 2005, 20(7): S266- S280.  
 [4] Li Q, Ding S H, Yao R, *et al.* Experiments on continuous-wave terahertz reflection-mode imaging for concealed objects[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(8): 0811001.  
 李琦, 丁胜晖, 姚睿, 等. 隐藏物的连续太赫兹反射扫描成像实验 [J]. 中国激光, 2012, 39(8): 0811001.  
 [5] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves [J]. Optics Letters, 1995, 20(16): 1716-1718.  
 [6] Lee W M A, Hu Q. Real-time, continuous-wave terahertz imaging by use of a microbolometer focal-plane array[J]. Optics Letters, 2005, 30(19): 2563-2565.  
 [7] Pitman T B, Shih Y H, Strekalov D V, *et al.* Optical imaging by means of two-photo quantum entanglement[J]. Physical Review A, 1995, 52(5): 3429-3432.  
 [8] 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.  
 [9] Zhao Y Q, Zhang L L, Zhu D C, *et al.* Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing [J]. Chinese Journal of 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.

- [10] Watts C M, Shrekenhamer D, Montoya J, *et al.* Terahertz compressive imaging with metamaterial spatial light modulators[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(8): 605-609.
- [11] Jiao J, Zhao C Q, Cui L J, *et al.* Research on the repeatable pseudo-thermal light based on random phase plate scanning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0911002.  
焦佳, 赵成强, 崔丽君, 等. 基于随机相位板扫描的可重复赝热光源研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0911002.
- [12] Shen X, Zhang M H, Liu H L, *et al.* Research on the pulsed pseudo-thermal light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(11): 2893-2898.  
沈夏, 张明辉, 刘洪林, 等. 脉冲式赝热光源的实验研究[J]. *中国激光*, 2009, 36(11): 2893-2898.
- [13] Sun B Q, Welsh S S, Edgar M P, *et al.* Normalized ghost imaging[J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16892-16901.
- [14] Donoho D L. Compressed sensing [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [15] Zhao C Q, Gong W L, Chen M L, *et al.* Ghost imaging lidar via sparsity constraints [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(14): 141123.
- [16] Li L Z, Yao X R, Liu X F, *et al.* Super-resolution ghost imaging via compressed sensing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(22): 224201.  
李龙珍, 姚旭日, 刘雪峰, 等. 基于压缩感知超分辨率鬼成像[J]. *物理学报*, 2014, 63(22): 224201.
- [17] Chen X H, Kong F H, Fu Q, *et al.* Sub-Rayleigh resolution ghost imaging by spatial low-pass filtering [J]. *Optics Letters*, 2017, 42(24): 5290-5293.
- [18] Gong W L, Han S S. Experimental investigation of the quality of lensless super-resolution ghost imaging via sparsity constraints[J]. *Physics Letters A*, 2012, 376(17): 1519-1522.
- [19] Mei X D, Gong W L, Yan Y, *et al.* Experimental research on prebuilt three-dimensional imaging lidar [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(7): 0710003.  
梅笑冬, 龚文林, 严毅, 等. 可预置强度关联激光三维成像雷达实验研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(7): 0710003.