文章编号：2095-4980(2017)01-0021-05

基于面阵式探测器连续太赫兹波三维层析成像

李　斌[1a]，王大勇[1a,1b*]，周　逊[2a,2b]，戎　路[1a,1b]，李赜宇[2a,2b]，
李　磊[2a,2b]，黄昊翀[1a]，万　敏[1a]，王云新[1a,1b]

(1.北京工业大学 a.应用数理学院；b.北京市精密测控技术与仪器工程技术研究中心，北京 100124；
2.中国工程物理研究院 a.激光聚变研究中心，四川 成都 610041；b.微系统与太赫兹研究中心，四川 成都 610200)

摘　要：太赫兹波层析成像技术是利用太赫兹波的穿透性对样品进行旋转投影数据采集，通过层析重建算法获得样品的二维横截面图，并实现样品的三维内部结构图的重构。本文介绍了基于面阵式探测器连续太赫兹波层析成像系统。该成像系统的优势在于利用了面阵式探测器记录二维投影数据，相比扫描层析成像系统，提高了投影采集速率。为了获得高精确度的二维投影数据，利用角谱衍射传播算法将二维投影图传播至样品后表面，实现抑制太赫兹波在物体外部衍射效应，最终利用滤波反投影算法重建出高保真的样品三维内部结构图，并进一步探索了基于面阵式探测器的连续太赫兹波层析成像技术在无损检测和安全检测上的可行性。

关键词：太赫兹波成像；层析成像；面阵式；三维成像

中图分类号：TN29　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA201701.0021

A continuous-wave terahertz 3-D computed tomography using a pyroelectric array detector

LI Bin[1a]，WANG Dayong[1a,1b*]，ZHOU Xun[2a,2b]，RONG Lu[1a,1b]，LI Zeyu[2a,2b]，
LI Lei[2a,2b]，HUANG Haochong[1a]，WAN Min[1a]，WANG Yunxin[1a,1b]

(1a.College of Applied Sciences；1b.Beijing Engineering Research Center of Precision Measurement Technology and Instruments，Beijing University of Technology，Beijing 100124，China；
2a.Research Center of Laser Fusion，China Academy of Engineering Physics，Chengdu Sichuan 610041，China；
2b.Microsystem and Terahertz Research Center，China Academy of Engineering Physics，Chengdu Sichuan 610200，China)

Abstract：Terahertz computed tomography makes use of the penetrability of terahertz radiation and obtains three-dimensional(3-D) object projection data. In this paper, continuous-wave terahertz computed tomography using a pyroelectric array detector is presented. Compared with scanning terahertz computed tomography, a pyroelectric array detector can obtain a large quantity of projection data in a short time. To obtain a high precision two-dimensional(2-D) projection data, the two-dimensional projection data is propagated by angular spectrum algorithm; then the diffraction effects are suppressed on external sample. Two-dimensional cross-sectional images and three-dimensional images of the internal structure of the object are obtained by the filtered back projection algorithm. Further, the feasibility of terahertz computed tomography is explored in non-destructive testing and security testing.

Keywords：terahertz imaging；tomography；arrays；3-D imaging

太赫兹(Terahertz，THz)波一般指频率在 0.1~10 THz(波长为 3~0.03 mm)的电磁波。一方面，THz 波对非金属和非极性物质具有穿透性，例如塑料、木材、衣服等；另一方面，THz 波相对 X 射线具有低电离性，不会因为光致电离而破坏被测物质，更适合于“活体检测”。这些特点使得太赫兹波成像技术[1-6]成为研究热点。计算机

收稿日期：2016-09-22；**修回日期：**2016-10-10
基金项目：国家自然科学基金资助项目(61675010；1475011；61307010)；北京市教委科技重点资助项目(KZ201610005008)；中国工程物理研究院太赫兹科学技术基金资助项目(201406)；日新人才和中央支持地方专项配套项目；北京工业大学研究生科技基金(ykj-2016-00001)
***通信作者：**王大勇　email:wdyong@bjut.edu.cn

层析成像技术(Computed Tomography，CT)是一种有效获得样品三维内部结构的成像方法，该技术是利用一束射线对样品某一截面进行平移旋转扫描，根据射线穿过样品后的强度值来获得物质对射线衰减系数值的一维投影数据，通过层析重建算法获得重建图像，重建图像是在物体横截面上射线衰减系数的二维分布图[7]。1997 年，美国贝尔实验室的 Mittleman 等[8]首次将太赫兹的特性与 CT 成像技术相结合，通过测量软盘不同层太赫兹脉冲的反射时间，完成了对软盘反射系数剖面成像。

太赫兹波 CT 成像[9-14]系统主要分为脉冲式太赫兹层析成像系统[15-18]和连续太赫兹波层析成像系统[16]。前者尽管可以直接测量太赫兹脉冲的振幅和相位信息，但该系统需要添加相位延迟扫描系统和光电转换系统，使得成像系统十分复杂。而后者利用光泵连续型太赫兹源和单元探测器实现了太赫兹点扫描层析成像。目前，大多数太赫兹层析成像装置是基于点扫描层析系统[15-19]，在采集数据过程中需要较长时间，对光源及成像样品的稳定性有着极高的要求，难以满足实际应用。为了快速获得在不同投影方向上的样品投影数据，将面阵式探测器替代单元探测器，实现单次曝光便可以获得在某一投影角度下的二维投影数据，节省了扫描层析成像系统中物体在横向和纵向上机械平移的时间。

本文中搭建了基于面阵式探测器的连续太赫兹波层析成像装置。通过角谱衍射传播算法将面阵式探测器采集到的投影数据回传到物体后表面上，实现抑制太赫兹波在物体外部的衍射效应，再利用滤波反投影(Filtered Back Projection，FBP)重建算法对衍射传播后的正弦图进行物体横截面的二维重建，对不同层的二维横截面图进行图像融合，最终获得聚乙烯样品三维内部结构图。

1 理论分析

建立坐标系 x_o–y_o 和 x–y，分别为物体后表面和记录面。图 1 为衍射传播原理图，表示记录面上的复振幅。角谱衍射传播严格遵守标量衍射理论[20]，则：

$$U_o(f_x,f_y,o)=U(f_x,f_y,z_1)\exp\left(\mathrm{j}kd\sqrt{1-f_x^2-f_y^2}\right) \tag{1}$$

式中：k 表示波矢；$U(f_x,f_y,z_1)$ 和 $U_o(f_x,f_y,o)$ 分别表示 $u(x,y,z_1)$ 和 $u_o(x_o,y_o,o)$ 经傅里叶变换的频谱。利用傅里叶逆变换可以得到物体后表面的复振幅分布。

$$u_o(x_o,y_o,o)=\mathrm{FT}^{-1}\{\mathrm{FT}[u(x,y,z_1)]\cdot G(f_x,f_y)\} \tag{2}$$

式中：FT 和 FT^{-1} 分别表示傅里叶变换和傅里叶反变换；$G(f_x,f_y)$ 表示空间传递函数，表达式为：

$$G(f_x,f_y)=\exp\left\{\mathrm{j}2\pi d\sqrt{(\frac{1}{\lambda})^2-(\frac{x}{N_x\Delta x})^2-(\frac{y}{N_y\Delta y})^2}\right\} \tag{3}$$

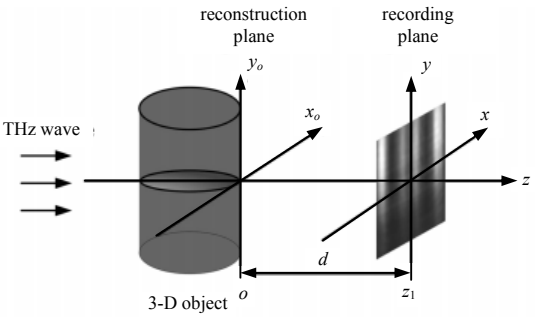


Fig.1 Principle diagram for diffraction propagation
图 1 衍射传播原理图

式中 N_x 和 N_y、Δx 和 Δy 分别为记录面上探测器在 x 和 y 方向上的像素个数和像素大小。角谱传播主要是利用一次傅里叶变换和一次傅里叶反变换，因此角谱传播后的像元尺寸大小和电荷耦合器件(Charge Coupled Device，CCD)像素尺寸保持一致。利用 $p(x_o,y_o)=|u_o(x_o,y_o,o)|^2$ 可以获得衍射传播后的投影强度值 $p(x_o,y_o)$。

图 2 为投影定理示意图，在原有的坐标系 x'–z 的基础上，建立旋转坐标系 t–s 和极坐标系 ω–θ，θ 是坐标轴 z 和坐标轴 t 的夹角。选取物体单层横截面进行分析，物体 $g(x',z)$ 在角度 θ 的平行投影的一维傅里叶变换等于物体 $g(x',z)$ 的二维傅里叶变换在同一角度上切片的值[21]。角度 θ 方向上一维投影数据由 $p(t,\theta)$ 来表示。

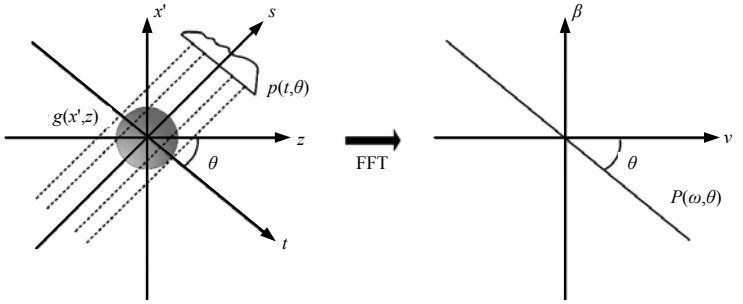


Fig.2 Illustration of the projection theorem
图 2 投影定理示意图

物体 $g(x',z)$ 可以用旋转坐标系中 $g(t,s)$ 来表示，其中 $t=z\cos\theta+x'\sin\theta$ 和 $s=-z\sin\theta+x\cos\theta$。令 $G(v,\beta)$ 为物体在频谱域中的二维分布，则：

$$g(x',z)=g(t,s)=\mathrm{FT}^{-1}[G(v,\beta)]=\int_0^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|\omega|G(v,\beta)\exp[\mathrm{j}2\pi\omega(x'\sin\theta+z\cos\theta)]\mathrm{d}\omega\mathrm{d}\theta \tag{4}$$

将 $t = x'\sin\theta + z\cos\theta$ 代入式(4)，可以得到：

$$g(x',z) = \int_0^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty}|\omega|P(\omega,\theta)\exp[j2\pi\omega(x'\sin\theta + z\cos\theta)]d\omega d\theta = \int_0^{\pi}FT^{-1}[|\omega|] * FT^{-1}\{FT[p(t,\theta)]\}d\theta \tag{5}$$

式中：*表示卷积运算；$P(\omega,\theta)$ 表示投影数据 $p(t,\theta)$ 的傅里叶变换。$FT^{-1}[|\omega|] * FT^{-1}[FT[p(t,\theta)]]$ 的意义在于经过滤波器 $|\omega|$ 滤波后并且满足方程 $t = x'\sin\theta + z\cos\theta$ 的投影数据值。滤波后角度范围为 0~π 的投影数据进行累加即可获得样品的二维横截面图。

2　实验系统及测量结果

搭建了基于面阵式探测器连续太赫兹波层析成像系统，如图 3 所示。实验系统中所使用的太赫兹源为 FIRL 100 连续太赫兹激光器，其频率为 2.52 THz，波长为 118.2 μm，实际输出功率 70 mW。为了将光斑充分投影在样品上，采用 2 个通光口径为 50.8 mm，焦距分别为 50.8 mm 和 101.6 mm 的镀金离轴抛物面镜将太赫兹激光器输出的光斑进行准直扩束，抛物面镜组间距为两者焦距之和。照射样品的光斑尺寸约为 10 mm。样品为聚乙烯材料的吸管，吸管具有各向同性，且具有吸收系数不改变的特性，直径约为 6.02 mm。由于光斑直径大于样品的直径，所以在旋转采集投影的过程中光斑始终笼罩整个样品。样品被固定在电动旋转台的中心处。投影角度间隔为 2°，采集投影数据时间约为 15 min，投影数据被探测器所采集。图像探测器采用面阵热释电探测器(Ophir-Spiricon Inc，Pyrocam IV)，热释电探测器的像素个数为 320 pixel × 320 pixel，像素尺寸为 80 μm × 80 μm。

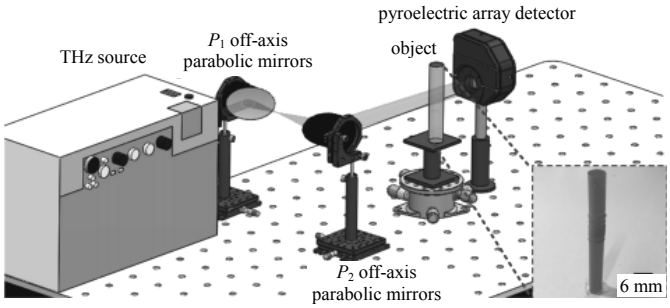
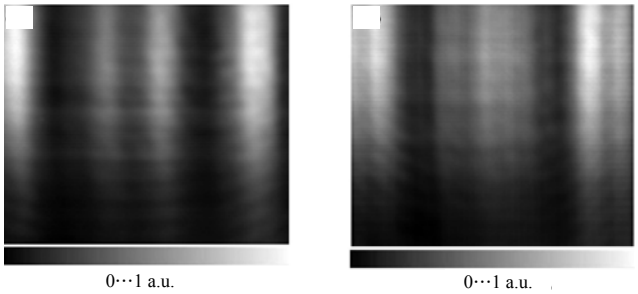


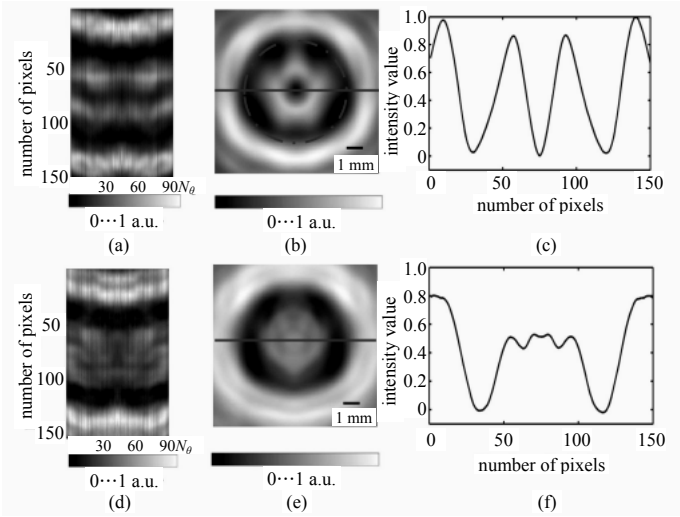
Fig.3 Setup of continuous-wave terahertz tomography with pyroelectric array detector
图 3 基于面阵式探测器连续太赫兹波层析成像系统



(a) projection on the recording plane　(b) projection on the reconstruction plane

Fig.4 2-D projection of the sample
图 4 样品的二维投影图

为了有效地抑制太赫兹波在物体外部的衍射效应，将二维投影图进行衍射传播并回传到物体后表面上。其中，样品后表面到探测器的距离约为 8.5 cm。传播后的正弦图再利用 FBP 重建算法进行样品二维横截面的重建，图 4 为样品的二维投影图。



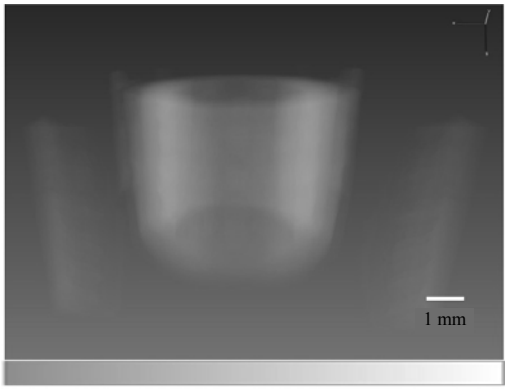
(a) sinogram; (b) 2-D cross-sectional image of (a); (c) the intensity profile of the image (b) along line; (d) sinogram after using the angular spectrum algorithm; (e) 2-D cross-sectional image of (d); (f) the intensity profile of the image (e) along line

Fig.5 2-D cross-sectional images of the straw
图 5 吸管二维内部结构重建图

图 5(a)和图 5(d)分别为正弦图和传播后投影值正弦图，横坐标表示投影角度个数 N_θ，纵坐标表示像素个数。图 5(b)和图 5(e)分别为直接 FBP 重建和传播后 FBP 重建的二维横截面图，在图 5(b)中用虚线标出了吸管壁的位置。图 5(b)可以观测到在吸管壁内部出现了一个“黑斑”，并且吸管壁上出现了大量的毛刺。图 5(e)通过角谱衍射传播后投影数据重建的横截面图，明显消除了吸管壁内侧的“黑斑”，吸管壁更加平滑，提高了重建样品二维横截面图的保真度。图 5(c)和图 5(f)分别选取在图 5(b)和图 5(e) Y=75 的位置上的强度值进行对比，图 5(c)中出现的“黑斑”现象严重影响了重建图像的质量，导致不能分辨出吸管内部结构，图 5(f)通过角谱衍射传播后重建出的横截面图不仅消除了吸管壁内部的“黑斑”现象，还可以真实地反应出吸管内部结构图。

通过图 5(f)测量得到吸管壁两端相差 80 个像素，并乘以探测器的像素尺寸 80 μm，计算出吸管的直径为 6.4 mm，与实际测量的吸管直径的相对差为 6%。

图 6 是吸管的三维内部结构。为了重建出吸管内部三维结构图，在 y 方向上选取了探测器 70~150 行的投影值进行图像重建，共 81 行，每行的高度为 80 μm，重建吸管高度为 6.48 mm。将每个角度获得投影图进行角谱衍射传播来抑制太赫兹波在物体外部的衍射效应，并将传播后的投影正弦图利用 FBP 算法进行样品横截面的重建，获得 81 行的二维横截面图再进行图像融合，最终可以获得高保真度的吸管三维内部结构图。



0…256 a.u.

Fig.6 3-D image of the straw

图 6 吸管三维内部结构重建图

3 结论

本文搭建了一套基于面阵式探测器的连续太赫兹波层析成像装置。面阵式探测器在采集方式上省去了纵向和横向上的采集过程，提高了投影数据的采集速率。利用角谱衍射传播算法对二维投影数据进行传播，抑制了太赫兹波在物体外部的衍射效应，并增强投影图像质量。通过 FBP 算法重建出吸管的二维横截面图和三维内部结构图。实验结果为面阵式探测器太赫兹层析成像技术在无损检测领域的应用提供了基础，充分体现了该技术在医学成像和安全检测的应用前景。需要指出的是，目前的实验结果仍然存在一些不足，进一步研究十分必要。例如，后续会对太赫兹波在物体内部传播特性进行研究，并利用反向传播重建算法重建出样品的二维横截面图。

参考文献：

[1] HU B B,NUSS M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995,20(16):1716-1718.

[2] WU Q,HEWITT T D,ZHANG X. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(8):1026-1028.

[3] JIANG Z,ZHANG X C. Single-shot spatio-temporal terahertz field imaging[J]. Optics Letters, 1998,23(14):1114-1116.

[4] MCCLATCHEY K,REITEN M T,CHEVILLE R A. Time resolved synthetic aperture terahertz impulse imaging[J]. Applied Physics Letters, 2001,79(27):4485-4487.

[5] HAN P Y,CHO G C,ZHANG X C. Time-domain transillumination of biological tissues with terahertz pulses[J]. Optics Letters, 2000,25(4):242-244.

[6] FUKUNAGA K,PICOLLO M. Terahertz spectroscopy applied to the analysis of artists' materials[J]. Applied Physics A, 2010,100(3):591-597.

[7] GBUR G,WOLF E. Relation between computed tomography and diffraction tomography[J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2001,18(9):2132-2138.

[8] TOMOGRAPHY T. T-ray tomography[J]. Optics Letters, 1997,22(12):904-906.

[9] SUNAGUCHI N,SASAKI Y,MAIKUSA N,et al. Depth-resolving THz imaging with tomosynthesis[J]. Optics Express, 2009, 17(12):9558-9570.

[10] JIN K H,KIM Y,YEE D S,et al. Compressed sensing pulse-echo mode terahertz reflectance tomography[J]. Optics Letters, 2009,34(24):3863-3865.

[11] CHO S H,LEE S H,NAMGUNG C,et al. Fast terahertz reflection tomography using block-based compressed sensing[J]. Optics Express, 2011,19(17):16401-16409.

[12] ABRAHAM E,OHGI Y,MINAMI M,et al. Real-time line projection for fast terahertz spectral computed tomography[J]. Optics Letters, 2011,36(11):2119-2121.

[13] JEWARIYA M,ABRAHAM E,KITAGUCHI T,et al. Fast three-dimensional terahertz computed tomography using real-time line projection of intense terahertz pulse[J]. Optics Express, 2013,21(2):2423-2433.

[14] NGUYEN K L,JOHNS M L,GLADDEN L F,et al. Three-dimensional imaging with a terahertz quantum cascade laser[J]. Optics Express, 2006,14(6):2123-2129.

[15] FERGUSON B,WANG S,GRAY D,et al. T-ray computed tomography[J]. Optics Letters, 2002,27(15):1312-1314.

[16] LI Q,LI Y D,DING S H,et al. Terahertz computed tomography using a continuous-wave gas laser[J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2012,33(5):548-558.

[17] CAUMES J P,PRADÈRe C,MAIRE P. Three-dimensional terahertz computed tomography of human bones[J]. Applied Optics, 2012,51(28):6738-6744.
[18] KATO E,NISHINA S,IRISAWA A,et al. 3-D spectroscopic computed tomography imaging using terahertz waves[C]// 35th International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz Waves. [S.l.]:IEEE, 2010:1-2.
[19] RECUR B,YOUNUS A,SALORT S,et al. Investigation on reconstruction methods applied to 3-D terahertz computed tomography[J]. Optics Express, 2011,19(6):5105-5117.
[20] GOODMAN J W. Introduction to Fourier Optics[M]. 3rd ed. New York:Roberts and Company Publishers, 2005.
[21] KAK A C,SLANEY M,WANG G. Principles of computerized tomographic imaging[J]. Medical Physics, 2001,29(1):22.

作者简介：

李　斌(1990-)，男，北京市人，在读博士研究生，主要研究方向为太赫兹层析和太赫兹数字全息.email:201306019@emails.bjut.edu.cn.

王大勇(1968-)，男，安徽省芜湖市人，博士，教授，主要研究方向为光学信息处理、数字全息和太赫兹成像等.

周　逊(1968-)，男，成都市人，博士，研究员，主要研究方向为太赫兹技术、太赫兹源和太赫兹成像等.

戎　路(1984-)，男，浙江省舟山市人，博士，副教授，主要研究方向为数字全息、太赫兹成像和相干衍射成像等.

(上接第 6 页)

[14] KALLFASS I,BOES F,MESSINGER T,et al. 64 Gbit/s transmission over 850 m fixed wireless link at 240 GHz carrier frequency[J]. Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2015(36):221-233.
[15] LIN Changxing,LU Bin,WANG Cheng,et al. A 2×40 Gbps wireless communication system using 0.14 THz band ortho-mode transducer[C]// 40th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. DOI:10.1109/IRMMW-THz.2015.7327713.
[16] VDI-WR6.5R7ZBD 1-06,1-28User Guide[Z]. Virginia Diodes Inc, 2013.

作者简介：

林长星(1986-)，男，重庆市人，博士，副研究员，主要研究方向为太赫兹通信、高速通信调制解调技术及 FPGA 实现技术研究、高速实时信号处理系统设计和嵌入式系统设计. email:starlincx@gmail.com.

陆　斌(1985-)，男，重庆市人，助理研究员，主要研究方向为太赫兹通信系统、毫米波太赫兹波电路设计.

吴秋宇(1986-)，男，广西壮族自治区龙胜各族自治县人，助理研究员，主要研究方向为太赫兹通信、自动控制技术.

邓贤进(1973-)，男，四川省安岳市人，研究员，主要研究方向为电磁场理论、仿真技术、微波技术、收发信道系统技术、太赫兹通信系统技术研究等.