

Terahertz 波计算机辅助三维层析成像技术

王少宏¹⁾ B. Ferguson¹⁾ 张存林^{2)†} 张希成^{1)‡}

¹⁾ 美国伦斯勒理工学院物理、应用物理和天体物理系)

²⁾ 首都师范大学物理系, 北京 100037)

(2002 年 4 月 8 日收到, 2002 年 5 月 9 日收到修改稿)

介绍和讨论了 Terahertz 波计算机辅助层析成像技术(Terahertz-CT)与 x 射线计算机辅助层析成像技术(XCT)相比较, Terahertz-CT 可获得更丰富的信息来处理图像. 理论上, 该技术可获得被测物在 Terahertz 波段的折射率和吸收率的三维分布. 这意味着有可能利用 Terahertz-CT 进行暗箱识别探测, 该技术的原理在安全检查和无损探测等方面的应用有着广阔的前景.

关键词: 电磁波, 无损探测, 超快光学技术, 非线性光学

PACC: 5235H, 8170L, 4280W, 4265

Terahertz (THz) 波通常指的是波长在 1mm—100 μm (300GHz—3 THz) 区间的远红外电磁辐射, 其波段位于微波和红外光之间. 自 Terahertz 波被首次用于成像以来^[1], 各种 Terahertz 成像技术相继问世^[2—37]. 如 Terahertz 近场成像技术^[9], Terahertz 层析成像技术^[9], 时域 Terahertz 逆向变换成像技术^[34] 等等.

Terahertz 波成像的基本原理是: 利用已知波形的 Terahertz 波作为成像射线, 透过成像样品 (或从样品反射) 的 Terahertz 波的强度和相位包含了样品复介电常数的空间分布. 将透射的 THz 电磁波的强度和相位的二维信息记录下来, 并经过适当的数字处理和频谱分析, 就能得到样品的 Terahertz 三维图像. Terahertz 波成像技术的一个显著特点是信息量大. 每一像源对应一个 Terahertz 时域谱, 通过对时域谱进行傅里叶变换又可得到每一点的 Terahertz 频率响应谱.

可见光、x 射线、电子束、中、近红外光和超声波是在医学诊断、材料分析以及工业生产等诸多领域中广泛应用的主要成像信号源. 与以上的光源相比, Terahertz 波对于某些电介质材料具有类似的穿透效果. 除了可测量由材料吸收而反映的空间密度分布外, 还可以通过相位测量得到折射率的空间分布, 从而获得与材料相关的更多信息, 这是 THz 时域光谱

的独特优点. 此外, Terahertz 波的光子能量极低 (1THz 约 4meV), 没有 x 射线的电离性质 (光子能量在 keV 量级), 不会对材料造成破坏. 在对一些在可见光波段不透明, 对 Terahertz 波有一定透过率, 但对 x 射线完全透明而成像对比度差的物体成像时, THz 成像技术有望在安全检测和医学检查等方面成为 x 射线检测及其他检测技术的补充手段.

Terahertz-CT 的基本原理源于 XCT, 如图 1 所示, 用一射线或射线束透过成像样品, 并以确定的角度步长旋转之, 获得一系列的物体二维投影像组.

在对射线的传播建立了较好的物理模型后, 应用计算机对这组像进行处理, 得到成像样品的三维层析立体像. 三维层析立体像与通常的三维立体像的区别在于: 三维立体层析像是包括物体内部结构的完整的像, 而通常意义的三维成像则是指物体的三维外部形貌. 在 XCT 中, 透射的 x 射线强度作为成像所要处理的物理量, 其强度的衰减量是物体在 x 射线路径上吸收率函数的积分. 而在 Terahertz-CT 中, 成像所要处理的物理量可以有多种选择性, 它可以是 Terahertz 波总强度的减小量, 可以是 Terahertz 波电场强度极大值的变化量, 可以是 Terahertz 波电场强度极大值随时间的延迟量, 也可以是某一频率 Terahertz 波强度的衰减量, 还可以是某一频率处的相位变化在选择好 Terahertz-CT 成像的物理量后, 为

† 通讯联系人, E-mail: cunlin_zhang@mail.cnu.edu.cn

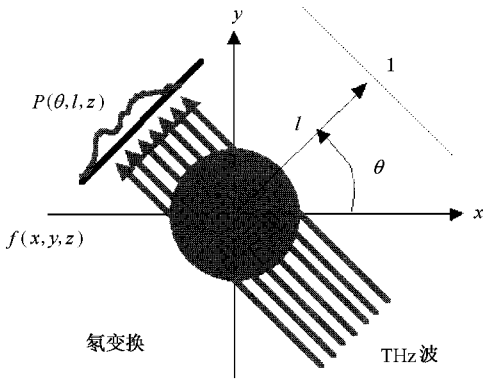


图1 Terahertz-CT的原理示意(在每一个角度 θ 和高度 z 处,待成像物体被沿 l 方向扫描,扫描结束后以确定角度的步长旋转物体,进行下一个周期的扫描,所测得的信号是一个与复介电常数相关的线性积分,这样一个以 x, y, z 为变量的空间分布函数 $f(x, y, z)$ 被转换为以 θ, l, z 为变量的空间分布函数 $P(\theta, l, z)$)

该量建立好物理模型,假定该物理量是待成像物体的空间函数 $f(x, y, z)$,所测得总的物理量的变化就是该量在 Terahertz 波传播路径上各点变化的总和,写成数学表达式

$$P(\theta, l, z) = \int_{L(\theta, l, z)} f(x, y, z) ds = \mathcal{A}(f(x, y, z)). \quad (1)$$

见图1, $L(\theta, l, z)$ 是 Terahertz 波的一条传播路径,它是待成像物体旋转 θ 角度时,位于 z 高度,距旋转轴为 l 的一条直线. $P(\theta, l, z)$ 是沿此路径 L 测得的物理量.在获得所有角度的和高度的 P 值后,最后的问题就是设法求得 $f(x, y, z)$.(1)式中的 $\mathcal{A}(f(x, y, z))$ 是 Radon 变换^[38].

在实验中,一波长为 800nm,脉宽为 130fs,单脉冲能量为 700 μ J,重复频率为 1kHz 的钛宝石锁模激光器被用于产生 Terahertz 脉冲. Terahertz 脉冲的发射体是 1.5cm \times 1.5cm 的 GaAs 光电导天线. Terahertz 波经过准直后,用焦距为 15cm 的离轴抛物面反射镜会聚在成像样品上.该系统中 Terahertz 波的焦斑为 1mm,瑞利长度为 20mm.透过样品的 Terahertz 波经准直后再由离轴抛物面反射镜将其聚焦到一块 ZnTe 电光晶体上.成像的方式是在 x 和 z 方向上平移扫描成像样品,这等效于用细 Terahertz 波束扫描成像样品.为提高成像速率,实验中应用了啁啾探测光的技术探测 Terahertz 波,该技术细节请参阅文献[7].这样就实现了在扫描样品的同时,同步的也得到了 Terahertz 波的光谱.为验证 Terahertz-CT 的可行

性,我们选 Terahertz 波振幅极大值的衰减量作为成像所需测量的物理量,并假定物体对 Terahertz 波的吸收非常弱,忽略菲涅尔损失和衍射.则在每条 Terahertz 波传播路径上测得的 $P(\theta, l, z)$ 就是 Terahertz 波在其传播路径上各点吸收的总和,即一个简单的沿传播路径的积分.我们可以直接套用 Radon 逆变换得到物体的三维层析像.应用这样一个对 Terahertz 波来讲很粗糙的物理模型,我们在实验上得到了大体与成像物体相似的三维立体层析像.对此物理模型进行改进,我们仍忽略菲涅尔损失和衍射,而令在每条 Terahertz 波传播路径上测得的 $P(\theta, l, z)$ 是 Terahertz 波在其传播路径上各点复折射率积分,即

$$P_d(\theta, l, z) = P_i \exp \left[\int_{L(\theta, l, z)} \frac{i\omega n(x, y, z, \omega)}{c} dL \right]. \quad (2)$$

这里 $L(\theta, l, z)$ 仍是 Terahertz 波的一条传播路径,它是待成像物体旋转 θ 角度时,位于 z 高度,距旋转轴为 l 的一条直线. $P(\theta, l, z)$ 是沿此路径 L 测得的 Terahertz 波在圆频率为 ω 处的复振幅. $n(x, y, z, \omega)$ 是物体空间各点的复折射率,是空间和频率的函数.在计算方法上,我们利用逆向过滤投影算法(详见文献[39]第五章).此方法假定所用的光线无衍射,所测量的量可转化为一个线性积分.因此,应用此方法要视成像物体对 Terahertz 波的响应,力求满足此方法的假定.本文制作了一个用聚乙烯薄板制成的 S 形样品,其形貌如图 2 所示.

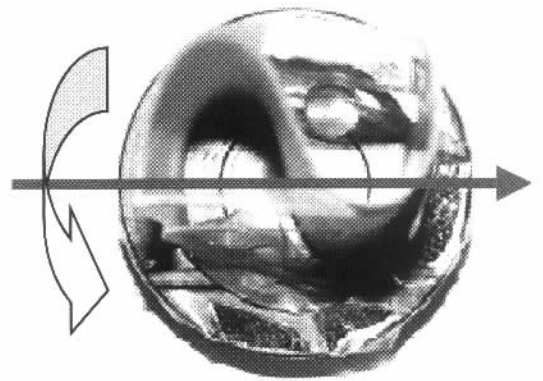


图2 折成 S 形的聚乙烯样品的俯视图(Terahertz 波的方向如箭头所示并平行于纸面,样品的旋转轴垂直于纸面)

样品被固定在一能转动的二维电动平移台上.转动和平移的角度及幅度由计算机来控制.在本实验中,样品以每 5° 为步长转动.在计算样品的层析

像时,选取了 Terahertz 波的极大值的时间迟滞及其振幅. Terahertz 波在每一频率的振幅的变化反应了物体对 Terahertz 波的吸收率,而 Terahertz 波极大值的时间迟滞则可反应出物体的折射率^[11]. 根据 Terahertz 波极大值的时间迟滞及其在每一频率的振幅作重构计算,得到的图 2 样品的断面如图 3 所示,表明计算机层析重构计算基本上是成功的.

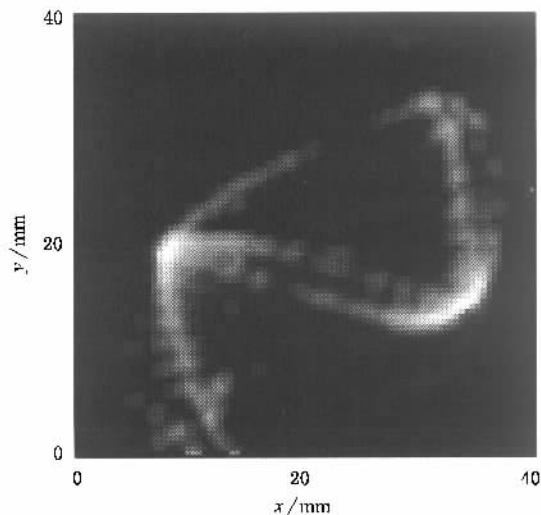


图 3 用 Terahertz 波极大值的时间迟滞产生的图 2 样品的断面层析重构像

Terahertz-CT 三维层析的实验样品是一只乒乓球. 二维平移的步长是 1mm, 旋转步长是 10° , 乒乓球的 Terahertz-CT 三维层析重构像如图 4 所示.

图 4 清晰地显示了球的空腔和固定球用的塑料棒. 重构球上显示出的经度线和纬度线波纹是由重构计算产生的假象. 如果设计出好的过滤函数和拍摄更多的像素, 此假象应该可以消除. 另一个实验中 Terahertz-CT 三维层析重构的样品是一段火鸡腿骨, 为满足逆向过滤投影算法的假定, 样品被充分除脂和干燥. 图 5 是该样品的三维层析重构像.

尽管该样品的三维层析重构像大致反应了样品的三维层析形貌, 但火鸡腿骨的断面的多孔结构未能被重构出来. 这说明我们使用的还是一个比较粗糙的模型, 需要进一步完善.

Terahertz-CT 三维层析成像的优点是获得的信息量大, 在建立了完善物理模型的前提下, 可以描绘出物体在 Terahertz 波频段复折射率的空间分布函数. 根据此分布函数, 可以推知被成像样品内部各点的密度、化学构成等信息. 这就是说, 有可能用此原理, 从外部来探测物体的内部物理和化学结构. 此探

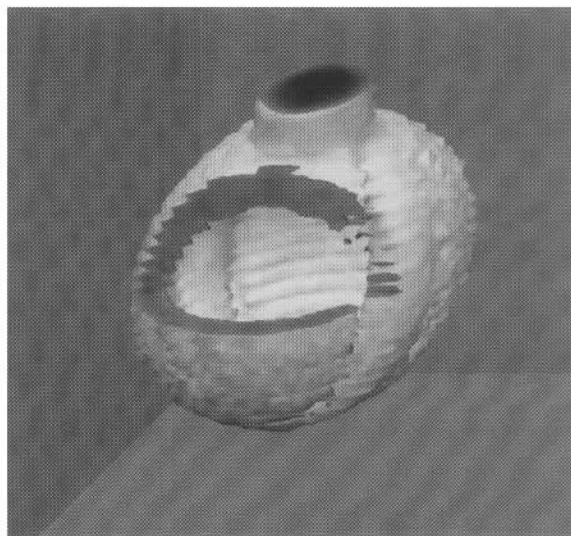


图 4 用 Terahertz 波的振幅极大值, 应用过滤逆向投影算法产生的乒乓球的三维立体层析像(该三维像是将各高度 z 产生的断面像组合得到的, 为了显示球内空腔, 移除了部分球壁)

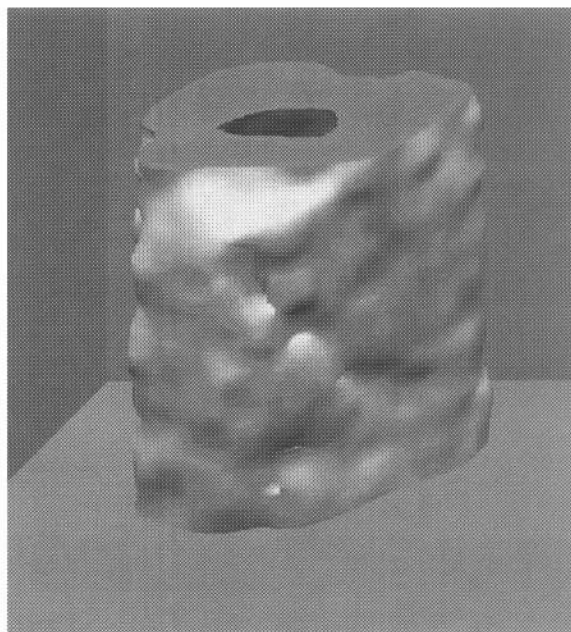


图 5 用 Terahertz 波振幅的极大值, 应用过滤逆向投影算法产生的火鸡腿骨的三维立体层析像(该三维像是将各高度 z 产生的断面像组合得到的)

测原理特别适用于无损探测、安全检查和生物医学上的活体监测. 如果我们能得到其他射线或波的频率响应和相位变化的信息, Terahertz-CT 的原理也适用于此类波或射线.

目前 Terahertz-CT 三维层析的局限性在于: 1) 如果要达到亚毫米以下的分辨率, 必须考虑 Terahertz

波的散射和折射. 因为 Terahertz 波束在复折射率有较大变化的物体中不再是简单的直线, 而是与入射角和入射点相关的. 从物体中出射的 Terahertz 波也不再是简单的相移和衰减, 而是散射波的叠加. (2) 单从光束的相移和衰减推导复折射率是非常困难的, 因为样品的厚度和折射率共同决定相移和衰减量的值. 除了以上两点原理上的制约外, 在实验上, Terahertz-CT 三维层析还受到测量系统信噪比的限制. 测量系统信噪比依赖于 Terahertz 波的强度和样品对 Terahertz 波的吸收率.

对于原理上的局限性, 我们可以建立新的、更真实的物理模型来加以解决. 真实的物理图像是 Terahertz 波会受到物体的散射和折射, Terahertz 波的散射和折射满足麦克斯韦方程. 通过测量包含待成像物体的封闭面上 Terahertz 波的分布, 可建立麦克斯韦方程的边界条件, 再根据此边界条件求得 Terahertz 波在待成像物体内的分布. 这样, 进而求得物体复折射率的空间分布. 当然, 此方法的计算量是非常大的. 此方法可称之为 Terahertz 波衍射三维计算机辅助层析成像技术. 该方法在其他波, 如超声波和微波中已有描述 (见文献 [39] 第三章). 理论上, 该方

法可实现小于波长的分辨率. 实验上, 测量方法可相应地采取 Terahertz 波 CCD 测量技术^[21], 用以加快测量速度. 如果在计算机速度足够快的前提下, 衍射波三维计算机辅助层析成像技术可能实现高分辨的实时三维层析监控.

总之, 初步的实验验证 Terahertz 波三维计算机辅助层析成像技术是成功的. 进一步的改进方向则是应用 Terahertz 波衍射三维计算机辅助层析成像技术. 实现暗箱识别探测是成像技术的一个非常重要的目标. 如果 Terahertz 波衍射三维计算机辅助层析成像技术能够实时地描绘出待成像物体的三维复折射率在 Terahertz 波频段的空间分布, 这就在很大程度上实现了暗箱识别探测. 实现暗箱识别探测在各领域的应用有着非常大的潜力, 如危险样品的检测, 非破坏性产品质量的监控等等. 如果将此成像原理拓延到其他波或射线, 则就可以对活的生物体进行实时研究和变异的检测, 这将对生物医学的研究产生深远的影响.

在本文的写作过程中, 许景周博士给予了积极的协助, 谨在此致谢!

- [1] Hu B B and Nuss M C 1995 *Opt. Lett.* **20** 1716
- [2] Wu Q, Hewitt T D and Zhang X C 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 1026
- [3] Wu Q, Sun F G, Campbell and Zhang X C 1996 *Appl. Phys. Lett.* **68** 3224
- [4] Mittleman D M, Jacobson R H and Nuss M C 1996 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **2** 679
- [5] Mittleman D M, Hunsche S, Boivin L and Nuss M C 1997 *Opt. Lett.* **22** 904
- [6] Zhang X C 1997 *OSA TOPS on Ultrafast Electronics and Optoelectronics* M Nuss and J Bowers eds 13 OSA
- [7] Jiang Z and Zhang X C 1998 *Ultrafast phenomena XI* 63(Berlin : Springer-Verlag) 197
- [8] Hunsche S, Mittleman D M, Koch M and Nuss M C 1998 *IEICE Transactions on Electronics* E **81**-C 269
- [9] Hunsche S, Koch M, Brener I and Nuss M C 1998 *Opt. Commun.* **150** 22
- [10] Jiang Z and Zhang X C 1998 *Opt. Lett.* **23** 1114
- [11] Mittleman D M, Neelamani R, Baraniuk R G and Nuss M C 1998 *Nonlinear Optics '98 : Materials, Fundamentals and Applications Topical Meeting IEEE*(Princeville, HI, U.S.A.) 294
- [12] Amone D D, Ciesla C M, Corchia A, Egusa S, Pepper M, Chamberlain J M, Bezant C, Linfield E H, Clothier R and Khammo N 1999 *Terahertz Spectroscopy and Applications SPIE*(Munich, Germany) **3828** 209
- [13] Chen Q, Jiang Z and Zhang X C 1999 *Proceedings of SPIE* **3617** 98
- [14] Jiang Z and Zhang X C 1999 *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **47** 2644
- [15] Koch M 1999 *Proceedings of SPIE* (Munich, Germany) **3828** 202
- [16] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, Baraniuk R G, Rudd J V and Koch M 1999 *Appl. Phys. B : Lasers and Optics* **68** 1085
- [17] Amone D, Ciesla C and Pepper M 2000 *Phys. World* **4** 35
- [18] Chen Q, Jiang Z, Xu G X and Zhang X C 2000 *Opt. Lett.* **25** 1122
- [19] Dorney T, Johnson J, Mittleman D and Baraniuk R 2000 *Proceedings of SPIE-Applications of Digital Image Processing XXIII*
- [20] Han P Y, Cho G C and Zhang X C 2000 *Opt. Lett.* **25** 242
- [21] Jiang Z, Xu X G and Zhang X C 2000 *Appl. Opt.* **39** 2982
- [22] Jiang Z and Zhang X C 2000 *IEEE Journal of Quantum Electronics* **36** 1214
- [23] Mickan S, Abbott D, Munch J, Zhang X C and van Doorn T 2000 *Microelectronics Journal* **31** 503
- [24] Mitrofanov O, Brener I, Harel R, Wynn J D, Pfeiffer L N, West K W and Federici J 2000 *Appl. Phys. Lett.* **77** 3496
- [25] Ferguson B, Wang S, Gray D, Abbott D and Zhang X C 2001 *Electronics and Structures for MEMS II*, N W Bergmann ed *Proceedings of SPIE* (Adelaide, Australia), **4591** 172
- [26] Chen Q and Zhang X C 2001 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **7** 608

- [27] Dorney T D , Johnson J L , Rudd J V , Baraniuk R G , Symes W W and Mittleman D M 2001 *Optics letters* **26** 1513
- [28] Johnson J L , Dorney T D and Mittleman D M 2001 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **7** 592
- [29] Johnson J L , Dorney T D and Mittleman D M 2001 *Applied Physics Letters* **78** 835
- [30] Loffler T , Bauer T , Siebert K J , Roskos H G , Fitzgerald A and Czausch S 2001 *Optics Express* **9** 12
- [31] McClatchey K , Reiten M T and Cheville R A 2001 *Appl. Phys. Lett.* **79** 4485
- [32] Mitrofanov O , Lee M , Hsu J W P , Brener I , Harel R , Federici J F , Wynn J D , Pfeiffer L N and West K W 2001 *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **7** 600
- [33] O'Hara J and Grischkowsky D 2001 *Optics Letters* **26** 1918
- [34] Ruffin A B , Decker J , Sanchez-Palencia L , Le Hors L , Whitaker J F , Norris T B and Rudd J V 2001 *Optics Letters* **26** 681
- [35] Woodward R M , Cole B , Wallace V P , Amone D D , Pye R , Linfield E H , Pepper M and Davies A G 2001 *Conference on Lasers and Electro-Optics* SPIE 329
- [36] Dorney T D , Johnson J L , Rudd J V , Baraniuk R G , Symes W W and Mittleman D M 2001 *OL* **26** 513
- [37] Herrmann M , Tani M , Sakai K and Fukasawa R 2002 *J. Appl. Phys.* **91** 1247
- [38] Ferguson B , Wang S H and Zhang X C 2001 PD1.7 in IEEE/LEOS Annual Meeting , San Jose , CA
- [39] Frank natterer 2001 *Frank Wuebbleing* (SIAM)

Terahertz computer tomography

Wang Shao-Hong¹⁾ B. Ferguson¹⁾ Zhang Cun-Lin²⁾ Zhang Xi-Cheng^{1 2)}

¹⁾Department of Physics , Applied Physics & Astronomy , Rensselaer Polytechnic Institute , Troy , New York 12180)

²⁾Department of Physics , Capital Normal University , Beijing 100037 , China)

(Received 8 April 2002 ; revised manuscript received 9 May 2002)

Abstract

In this paper , we report the Terahertz computer tomography(Terahertz-CT). Compared with the x ray computer tomography (XCT) , more information could be extracted to process the image. Theoretically , Terahertz-CT could be used to map the complex refractive index distribution in target three-dimensional space. Therefore , it is possible to employ the principle of Terahertz-CT to classify the target inside a black box. This implies potential applications is security inspection and nondestructive examination.

Keywords : electromagnetic waves , nondestructive testing , ultrafast optical techniques , nonlinear optics

PACC : 5235H , 8170L , 4280W , 4265