

Terahertz 波相干层析成像技术*

张存林¹, 胡颖¹, 沈京玲¹, 张亮亮¹, 张希成^{1,2}

(1.首都师范大学物理系,北京 100037;2.美国伦斯勒理工学院物理、应用物理和天体物理系,纽约 12180)

摘要:介绍和讨论了 Terahertz 波相干层析成像技术(T-CT)。与 X-射线计算机层析成像技术(X-CT)相比, 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 波段的复折射率的三维分布。这意味着有可能利用 Terahertz-CT 进行暗箱识别探测,该技术在安全检查和无损探测等方面有着广阔的前景。

关键词: Terahertz 波; 远红外辐射; 层析成像

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2276(2005)02-0204-04

Terahertz coherent tomography*

ZHANG Cun-lin¹, HU Ying¹, SHEN Jing-ling¹, ZHANG Liang-liang¹, ZHANG Xi-cheng^{1,2}

(1.Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100037, China; 2.Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy, Rensselaer Polytechnic Institute, New York 12180, USA)

Abstract: T-ray coherent tomography technology (T-CT) is introduced. Compared with the X-ray computer tomography (X-CT), more information could be extracted to process the image. Theoretically, Terahertz-CT could be used to map the complex refractive index distribution in target 3 D space. Therefore, it is possible to employ the principle of Terahertz-CT to classify the target inside a black box, which implies potential applications in security inspection and nondestructive examination.

Key words: Terahertz wave; Far-infrared radiation; Tomography

0 引言

Terahertz (THz) 波是指在频谱中位于红外光和微波之间的电磁辐射,它带来了全新的成像和传感技术,这种技术可以获得很多信息,而有些信息是传统的方法,如微波和 X-射线技术等所不能反映的。与相

对比较完善的微波和光波技术相比, THz 波段还未得到足够的研究。随着 THz 波(T-ray)技术的发展,新的 THz 波的应用潜力将会涉及一系列学科领域,其中包括通讯、成像、医疗诊断、健康监测、环境管理、化学和生物鉴定。它更为防御和安全方面取得革命性进步提供了机会。THz 波与其他传感和成像技术相比有如下

收稿日期:2004-04-06; 修订日期:2004-06-06

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(10390160);北京市自然科学基金资助项目(6032006);北京市教委科技发展计划资助项目(KM200310028115)

作者简介:张存林(1961-),男,北京人,教授,博士,主要从事光物理学的研究。

优点:

(1) 除了像微波和 X-射线成像形式那样生成空间密度分布图像外, T-射线成像还能够提供 THz 频段的光谱信息。生物样品在 THz 波段特有的振动和转动响应给出的信息是光学、X-射线和核磁共振成像所缺少的。对一些在可见光波段不透明, 对 THz 波有一定透过率, 但对 X-射线成像对比度差的电介质材料内部成像时, THz 波成为一种可利用并且很重要的成像光源。1995 年贝尔实验室开始了对 THz 波成像的研究和发展^[1]。

(2) THz 波相干层析成像技术(T-ray CT)是一种新型层析成像形式, THz 辐射脉冲可以探测电介质三维结构的性质。

(3) THz 波如同 X-CT 等传统的计算机辅助层析成像那样给出截面图。T-CT 系统从多个投影角度直接测量宽波带 THz 脉冲的振幅和相位, 可以从被测样品中提取大量的信息, 包括其三维结构和与频率有关的远红外光学性质。

1 THz 波相干层析成像

1.1 THz 波相干层析成像

THz 波相干层析成像是一种新型层析成像形式, 采用了 THz 脉冲和新的重构计算方法。这种技术使 THz 成像能够描绘被测物的三维结构^[2,3]。T-CT 系统从多个投影角度直接测量宽波带 THz 脉冲的振幅和相位。过滤逆向投影算法可以从被测样品中提取大量的信息, 包括它的三维结构和与频率有关的远红外光学性质。T-CT 的基本原理源于 X-CT, 其装置仅是现代透射模式 THz 成像系统的简单扩展。图 1 是 T-CT 的原理示意图。待测样品被放置在旋转平台上, 平台能使其绕轴旋转, 并在每一个投影角度获得二维 THz 图像。应用过滤逆向投影算法处理数据, 通过逆 Radon 变换可以重构出样品内部每一点的折射率和吸收系数, 其数学表达式为:

$$P(\theta, t) = \int_{L(\theta, t)} f(x, y) dl = \mathcal{R}(f(x, y)) \quad (1)$$

式中 P 是测量到的投影数据; θ 是投影角; t 是投影距旋转轴的水平偏移; $f(x, y)$ 是需要被重现的待成像物

体的空间分布函数。Radon 变换假设了一种理想模型, 即不考虑 T-CT 系统中的衍射效应和与传播方向有关的菲涅耳损耗。假设测量数据是简单的线积分。这种重构计算方法可以根据需要从测量数据中获得样品的许多特性参数。THz 脉冲的振幅和脉冲峰值的时间延迟是最重要的参数。重现的振幅图像反映了样品在远红外波段吸收(包括菲涅耳损耗)的三维情况, 而重现的时间图像则描绘了样品折射率的三维分布。然后, 重构计算, 再利用对测量数据的傅里叶变换得到样品在三维空间上每一点的折射率和吸收系数随频率的变化。THz 脉冲由超快激光器产生, 激光器输出波长 800 nm(近红外)、脉宽 100 fs 的脉冲。激光脉冲激发 GaAs 光导天线产生光电流, 形成宽波带的 THz 脉冲辐射。THz 射线被聚焦并穿透待测样品。透过的光线经抛物面镜会聚并聚焦到 ZnTe 光电晶体(EO)探测器上。数据的获取速度是所有 THz 成像系统最关心的因素, 而由于 T-CT 系统需要获得样品大量的二维截面图像, 成像速度显得更为重要。基于此问题考虑, 在 THz 脉冲 EO 探测时使用啁啾展宽的探测光束^[4]。利用这种技术, 整个 THz 波形可以同步探测, 大大加快了成像速度。然后对样品在 x 和 y 方向进行光栅扫描构成二维图像。但这种方法还是很消耗时间: 在 18 个投影角成 100×100 像素的图像需要 1 h。不过, 还可以采用其他方法来提高成像速度。使用高速的 CCD 相机(1825 个图像/s)可以使二维图像的获得时间缩短到几秒钟。

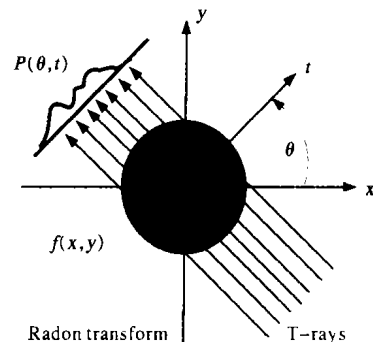


图 1 Terahertz 波相干层析成像原理示意图

Fig.1 Illustration of T-ray computed tomography

待成像物体被沿 t 方向扫描, 并以确定步长旋转。所测得的信号是样品复阻抗(衰减和相位)的线积

分。这样,以空间坐标(x,y)为变量的分布函数 $f(x,y)$ 被转化为以 (θ,t) 为变量的空间分布函数 $P(\theta,t)$,如图1所示。

1.2 图像的重构

通过对测量数据的逆向计算来实现三维样品的重构,T-CT借用已经很完善的X-CT领域的计算方法。过滤逆向投影算法在X-CT中一直占有重要位置,它利用Radon逆变换得到物体三维层析像。对于T-CT,探测的THz信号近似是线性积分,即:

$$P_d(\theta,t) = P_i \exp \left[\int_{L(\theta,t)} \frac{i\omega n(x)}{c} dx \right] \quad (2)$$

式中 $P_d(\theta,t)$ 是在投影角 θ 距旋转轴水平偏移为 t 时探测的THz信号; P_i 是入射的THz信号; L 是光源和探测器之间的直线; ω 是THz的频率; $n(x)$ 是样品的待求的复折射率。通过对测量数据进行过滤逆向投影计算可以求解出 n 。这种方法包含了一些理想的假设,求得的只是近似解,但对简单样品的重现是相当精确的,并且能够证明这种成像技术的应用价值。为了证明三维重构的可行性,对中空电介质球进行了试验,它的平移步长为1 mm,旋转步长为 10° ,如图2所示。图中小球粘在一个塑料棒上,旋转平台使塑料棒旋转。以1 mm的二维平移步长扫描样品,在18个不同的投影角获得THz图像。

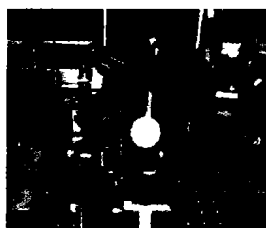


图2 利用T-CT对一中空的电介质球成像

Fig.2 Hollow dielectric sphere is imaged using T-ray CT



图3 球体每一像素上THz脉冲的强度作为过滤逆向投影算法的原数据

Fig.3 Amplitude of the THz pulse at each pixel of the sphere was used as the input to the filtered backprojection algorithm

构成三维层析立体像,为了重现内部结构需要舍掉一些数据,可以清楚地看到,球体的基本形状及附着的塑料棒,如图3所示。

1.3 THz波衍射层析成像(T-DT)

THz波衍射层析成像不同于T-CT系统。T-CT利用聚焦的THz光束,使用单独的发射器和探测器,对待测物进行扫描,其方法更接近于第一代X-射线扫描仪。在T-DT中,准直的THz光束的直径大于待测样品。透过的THz光束的二维分布图像被CCD相机同步探测。平行的THz光束穿透待测物体,被扩束的探测光探测。使用CCD相机拍摄透过样品后的THz波的分布,得到样品的二维分布。ZnTe探测晶体放在距样品3 cm处,以最优化的角度探测到衍射辐射,图4是简化的T-DT系统示意图。这种技术与T-CT相比有显著不同。首先,因为省去了 x 和 y 方向的扫描,成像速度大大加快。其次,因为T-DT收集CCD相机不同像素的THz波的分布,简单的线性积分模型不再适用,必须考虑衍射效应。

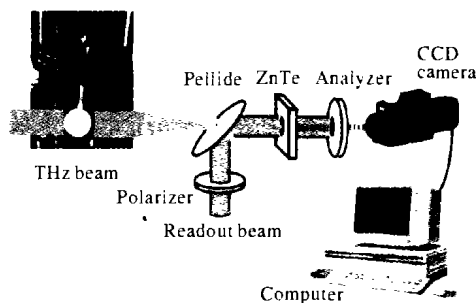


图4 简化的T-DT系统示意图

Fig.4 Simplified schematic illustrating the T-ray DT concept

T-CT和T-DT这两种技术,需要不同的重构计算方法,适用于不同的待测物体。T-DT适合小的发生衍射的样品,它可以达到小于0.1 mm的高分辨率。T-CT适合大的衍射效应可忽略的样品。

1.4 层析成像重构方法

投影数据重构样品三维层析像的计算方法已得到广泛应用,主要应用于X-射线(也包括PET和SPECT)和超声波领域。大量的工作描述了应用在射频层析成像、光学层析成像以及震动层析成像上的方法。下面简单介绍应用于上述领域的重构方法并指出THz层析成像重构的潜在研究方向。

利用每一投影角的THz脉冲的振幅来重构介质球。重现球体的每一水平切面的图,组合这些切面图

(1) X-射线重构

X-射线重构领域两种主要的方法是过滤逆向投影算法和迭代计算技术,例如估计极大值(EM)算法^[5]。这两种算法都是在假定的线性积分模型的基础上,即假定射线在发射器和探测器之间沿直线传播,衰减值是物体吸收系数的线性函数。

(2) 光学层析成像

光学层析成像的大部分研究基于逆扩散方程,并在多次散射的假定基础上。一般来说,THz 辐射的散射比光频辐射的散射要小得多,大部分样品不会造成 THz 辐射的多次散射,相当大的衍射是图像失真的主要原因。因此,光学方法运用在 THz 波段有局限性。然而,有一种光学层析成像的重构方法,它利用先被测量的光子,并假定它们经过极少的散射,然后利用线性积分法则计算。这种方法适用于 T-CT,它类似于目前采用的近似方法。

(3) 射频层析成像

射频层析成像利用逆非线性波动方程:

$$\Delta u + k^2 f(x, y)u = 0 \quad (3)$$

式中 u 是辐射场强; k 是波数。一种普遍应用的方法是对波动方程线性近似,两种最常用的近似是 Born 和 Rytov 近似。然后利用傅里叶切片定理及内插法或逆向传播法来求解物体的空间分布函数 f 。已经使用这种方法对 T-DT 的数据进行试验,证明对于非常小的待测物($< 1 \text{ mm}$)此方法是适用的,但对于较大物体不能够进行重现。这是因为采用的近似假定待测物的尺寸小于辐射波的波长。另一种方法是求解完整非线性方程迭代法。但这些方法非常费时间。

(4) 超声波层析成像

在此领域进行了大量研究。一些方法仍然采用了 Born 和 Rytov 近似,在 THz 层析重构计算中应用很有限。更有应用价值的计算方法是利用迭代有限元的方法转化非线性波动方程。由 Natterer 创建的伴随矩阵法,被称为传播-逆向传播(PBP)算法^[6],有望用于 T-DT 数据的重构计算。

2 结论

为了得到更精确和更高的分辨率,重构计算方法大大改善了 T-CT 成像系统。还需要进一步改进的是

对大规模样品成像($> \text{m}^3$),并且需要大大提高成像速度(从几分钟到几秒钟)。T-CT 使用聚焦的 THz 光束并且忽略了衍射效应。THz 衍射层析成像是一种补充的技术,利用二维光电取样和 CCD 相机可以成出待测物体的衍射图。记录下多个投影角度的衍射图,组合起来重构出样品的三维层析像。这种技术在军事,尤其是生物和化学成像和传感方面有巨大的应用潜力。理论上能够达到亚波长的分辨率和进行近实三维成像。实现这种潜在的应用必须建立在找到最佳的重构计算方法和实验装置设计的基础上。CCD 相机技术的发展对于加快成像速度也是必须的。T-CT 技术的应用主要受两方面的限制:首先是有限的 THz 能量,其次是重构计算中所做的近似。由于 T-CT 是在透射模式下成像,因此仅适用于对 THz 辐射吸收和色散都不是很强烈的样品。这对于在生物医学方面的应用是很大的限制,因为潮湿的生物组织对 THz 的吸收在 T-CT 成像中是不允许的。另外,目前简单的重构计算方法不能够完全描述 THz 波与具有复杂的结构的物体的相互作用,在能够对有强衍射效应的物体精确成像之前必须找到更成熟的计算方法。令人欣慰的是,最近在这两方面的研究工作取得了很大进步。可以预见,这种技术将会应用于非破坏性的邮件和包装物品检测、半导体器件探伤、产品质量监控,甚至在生物医学领域对于对 THz 辐射吸收不是非常剧烈的样品也有应用潜力。

参考文献:

- [1] Mittleman D M, Gupta M, Neelamani R, et al. Recent advances in terahertz imaging[J]. Applied Physics, 1999, B68: 1085-1094.
- [2] Hu B B, Nuss M C. Imaging with terahertz waves[J]. Optics Letters, 1995, 20: 1716-1718.
- [3] Ferguson B, Wang S, Zhang X C. T-ray computed tomography [A]. PD 1.7 Proceedings of LEOS Annual Meeting[C]. 2001.
- [4] Jiang Z, Zhang X C. Free-space electro-optic sampling of THz radiation with chirped optical beam[A]. Ultrafast Phenomena[C]. 1998, 63: 197.
- [5] Kak A C, Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York: IEEE Press, 1988.
- [6] Natterer F, Wubbeling F. Mathematical methods in image reconstruction[M]. Philadelphia: SIAM, 2001.