

小波变换在太赫兹三维成像探测内部缺陷中的应用

代冰 王朋 周宇 游承武 胡江胜 杨振刚 王可嘉 刘劲松

Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection

Dai Bing Wang Peng Zhou Yu You Cheng-Wu Hu Jiang-Sheng Yang Zhen-Gang Wang Ke-Jia Liu Jin-Song

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), 66, 088701 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.088701

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.088701>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I8>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

雪崩倍增 GaAs 光电导太赫兹辐射源研究进展

[Research progress on avalanche multiplication GaAs photoconductive terahertz emitter](#)

物理学报.2015, 64(22): 228702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228702>

太赫兹人工电磁媒质研究进展

[Progress of terahertz metamaterials](#)

物理学报.2015, 64(22): 228701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228701>

血凝素蛋白及抗体相互作用的太赫兹光谱主成分分析

[Principal component analysis of terahertz spectrum on hemagglutinin protein and its antibody](#)

物理学报.2015, 64(16): 168701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.168701>

相位补偿算法对提高太赫兹雷达距离像分辨率的研究

[Improvement in the range resolution of THz radar using phase compensation algorithm](#)

物理学报.2014, 63(14): 148701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.148701>

太赫兹双空芯光纤定向耦合器

[Terahertz dual air core fiber directional coupler](#)

物理学报.2013, 62(2): 028702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.028702>

小波变换在太赫兹三维成像探测 内部缺陷中的应用*

代冰¹⁾ 王朋²⁾ 周宇¹⁾ 游承武¹⁾ 胡江胜¹⁾ 杨振刚¹⁾
王可嘉¹⁾ 刘劲松^{1)†}

1)(华中科技大学, 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

2)(华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

(2016年11月30日收到; 2016年12月23日收到修改稿)

采用 Syn View Head 300 对内部有胶和空气孔的样件进行了太赫兹二维扫描 (xy 轴方向), 系统通过线性调频连续波技术得到样件内部的三维信息. 检测薄层时, 由于太赫兹源的波长在亚毫米量级, 薄层的上下表面反射峰相距太近而难以辨别. 为了提高太赫兹探测的纵向分辨率, 采用小波变换对探测信号进行处理, 对小波系数进行三维重构, 获得的三维小波系数图像比原始三维探测信号更加精确. 该方法有效提高了太赫兹成像的纵向检测精度, 纵向分辨率可达 1 mm.

关键词: 太赫兹, 无损检测, 小波变换

PACS: 87.50.U-, 81.70.Fy, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.66.088701

1 引言

太赫兹 (terahertz, THz) 波是介于红外和微波之间频率为 0.1—10 THz 的电磁辐射^[1,2], 不仅拥有与光相同的直进性, 还具有与电波相似的穿透性和吸收性^[3]. 随着 THz 辐射源及 THz 探测技术的发展, THz 在无损探伤、质量监测、内容提取、油画鉴别、THz 成像、安检等领域得到了越来越广泛的应用^[4–11]. THz 波对非导电材料 (如泡沫、陶瓷、玻璃、树脂、涂料、橡胶和复合物等) 具有良好的穿透性^[12], 采用 THz 波对这些材料的样件进行检测成像, 成像精度高于 X 射线成像, 空间分辨率高于超声波成像^[13,14]. 由于 THz 源的功率较低, 对人体没有伤害, 近年来, 一些运用太赫兹成像原理的安检产品已开始进入市场^[15]. 由于太赫兹波位于微波和远红外相交叠的波长范围, 相比 X 射线和红外光, 波长较长, 使得检测样品的成像纵向分辨率较

低. 如何提高 THz 成像的纵向分辨率是目前亟需解决的问题.

近年来小波变换的应用越来越广泛, 其特有的数学特性可以有效地分辨出信号中的特征峰^[16–18]. 本文采用小波变换对 THz 波探测的数据进行处理, 并将处理之后的小波系数进行三维重构, 采用小波系数代替原始光强信号进行成像, 有效地提高了 THz 成像的纵向分辨率.

2 基本理论

2.1 THz 三维成像原理

采用 Syn View Scan 300 在常温下对样品进行 THz 成像, 光源/探测器频率为调频 0.23—0.32 THz. 由于系统采用的是相干光成像, 存在衍射极限, 根据衍射极限的公式 $d/f = 1.22\lambda/D$, 如果采用 THz 源成像, 成像最低分辨率

* 国家自然科学基金 (批准号: 11574105, 61475054, 61405063, 61177095) 和湖北省科技条件资源开发项目 (批准号: 2015BCE052) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: jsliu4508@vip.sina.com

为1 mm. 为了避开衍射极限的限制, 将THz源放置在步进电机控制的平台上, 对检测样件进行逐点扫描成像, 系统在 x - y 平面的成像分辨率可达 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$.

系统的探测原理如图1所示, 图中BS为分束镜, 从THz源出射的光被分为两束, 各占50%, L2, L3为准直透镜, L1, L4为聚焦透镜, L4可以根据检测需求进行调整, 系统采用的是焦距50 mm的L4透镜. 为了检测样件内部结构, 即获得距离信息, 需要获得检测信号的相位信息. 系统采用线性的调频连续波(frequency modulated continuous wave, FMCW)方式, 一束光通过分束镜到达探测器, 另一束光通过样品后反射到达探测器, 在调频带宽 ω 和调频周期 T 一定的条件下, 混频器输出的中频信号频率 ω_b 与目标物体的距离 R (两束光到达探测器的时间差 Δt)成正比, 因此, 得到信号的频率 ω_b 即可计算出目标物体的距离, 如图2所示. 通过探测回波信号与发射信号的差拍信号可实现目标物体的振幅和相位成像^[19,20].

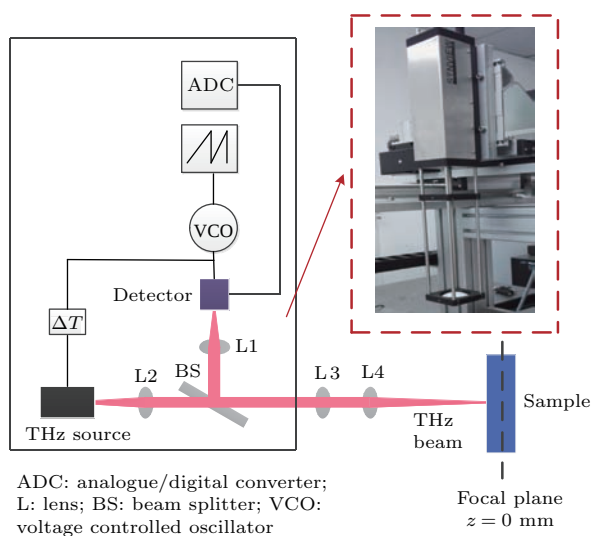


图1 对样件进行三维THz扫描成像的系统原理图
Fig. 1. Schematic of the experimental setup for three-dimensional THz imaging.

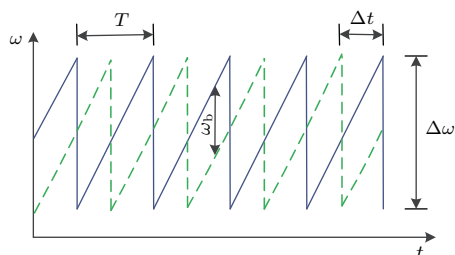


图2 线性的调频连续波探测原理图
Fig. 2. Schematic of the linear FMCW detection theory.

由图2中的比例关系可得

$$\omega_b = \frac{\Delta\omega}{T} \Delta t. \quad (1)$$

基于这种方法, 可以对检测样品的每个点进行扫描探测, 得到样品各点的纵向信息, 实现对检测样件的三维成像.

2.2 小波变换原理

待处理信号为探测方向(z 轴)上的信号, 由于信号的反射峰处对应样件的交界面, 为了更好地对应交界面信号, 采用高斯小波基的二阶导数(Gaus2)对信号 $f(x)$ 进行连续小波变换.

对于任意函数 $f(x) \in L^2(R)$ ($L^2(R)$ 为能量有限的信号空间), 连续小波变换定义为^[21]

$$W(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{u,s}^*(x) dx = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi_{u,s}^* \frac{x-u}{s} dx, \quad (2)$$

式中 $\psi_{u,s}(x)$ 由小波基函数 $\psi(x)$ 经过尺度因子 s 和时间平移因子 u 变化后得到, 小波基函数 $\psi(x)$ 必须满足容许条件

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty, \quad (3)$$

即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) dx = 0, \quad (4)$$

式中 $\hat{\psi}(\omega)$ 为 $\psi(x)$ 的傅里叶变换值. 通过对比, 信号 $f(x)$ 在小波变换的尺度2上既能很好地保持原始信号中的特征峰, 又能有效地抑制噪声, 如图3所示. 因此, 选用该尺度对信号进行处理.

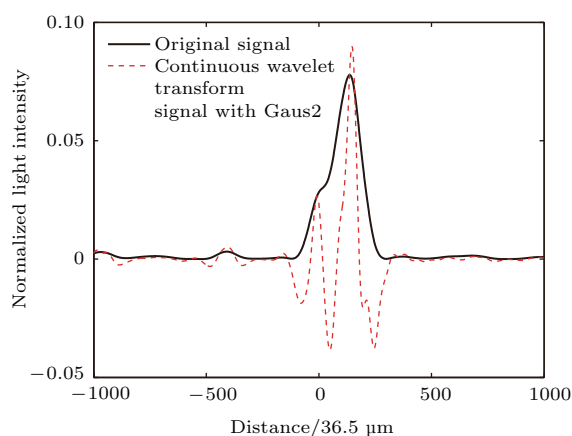


图3 z 轴方向上的光强信号及其对应的小波变换
Fig. 3. The z -direction intensity signal and the corresponding continuous wavelet transform signal.

3 实验对比与讨论

将带有预埋缺陷的样件背面向上, 放在吸波材料上, 采用 Syn View Scan 300 对样品进行逐点扫描, 探测其内部结构, 如图 4(a) 所示. 为了使检测得到的图像更加清晰, 样品尽量放置在探测系统的焦平面(即 $z = 0$ mm, 焦平面往上 1 mm 则表示为 $z = 1$ mm)附近. 检测样品的内部结构如图 4(b) 所示, 样品是大小为 50 mm $\times$ 50 mm $\times$ 5 mm 的光敏聚合物 3D 打印模型, 设置 4 组大小不同的缺陷, 缺陷孔的直径为 4 mm, 缺陷深度(孔深)分别为 4 mm (第 1 和 5 行), 3 mm (第 2 和 6 行), 2 mm (第 3 和 7 行), 1.5 mm (第 4 和 8 行). 将第 1 行的 6 个孔设置为 3 组对照组, 如图 5(b) 所示, 组 (I) 填充完好, 组 (II) 填充半完好, 组 (III) 只填充表层, 孔底部全部为空气. 对比这 3 组实验结果来辨别 THz 成像在 x - y 平面的横向分辨率. 在第 2—4 行用胶将所有孔完全填满, 与未填充胶的第 5—8 行作为参考组. 待胶干燥之后, 对样品进行扫描.

进行 2 组实验对比: 1) 第 1 行中的组 (I)、组 (II)、组 (III); 2) 填充胶水组第 2—4 行和空气组第 6—8 行. 样件的实物图如图 5(a) 所示, 通过逐点扫

描成像, 可以得到样件不同 z 轴位置处的图像, 在 $z = 5$ mm 处得到的 THz 图像如图 5(b) 所示, 从图中可以清楚地辨别出第 1 行孔中的空气部分(黄色区域)与第 5 行空气孔一致, 通过对比可以判断组 (I) 黏贴完好, 无空气, 组 (II) 只有部分黏贴较好, 一半孔为空气, 组 (III) 的胶层中有空气层. 黏贴完好的第 2—4 行一直与光敏材料成像颜色保持一致, 而空气孔在相应的分界面处呈现黄色. 从 THz 图可以准确读出孔的直径为 4 mm.

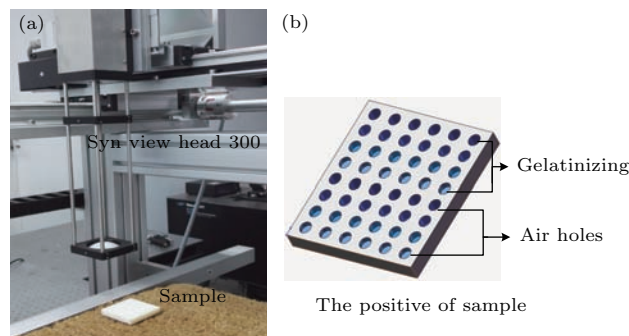


图 4 (a) 将带有预埋缺陷的样件背面向上放在吸波材料上进行扫描成像; (b) 样件的结构示意图

Fig. 4. (a) Position the sample with embedded defects back-side-up on an absorbing material and conduct image scanning; (b) schematic of the sample.

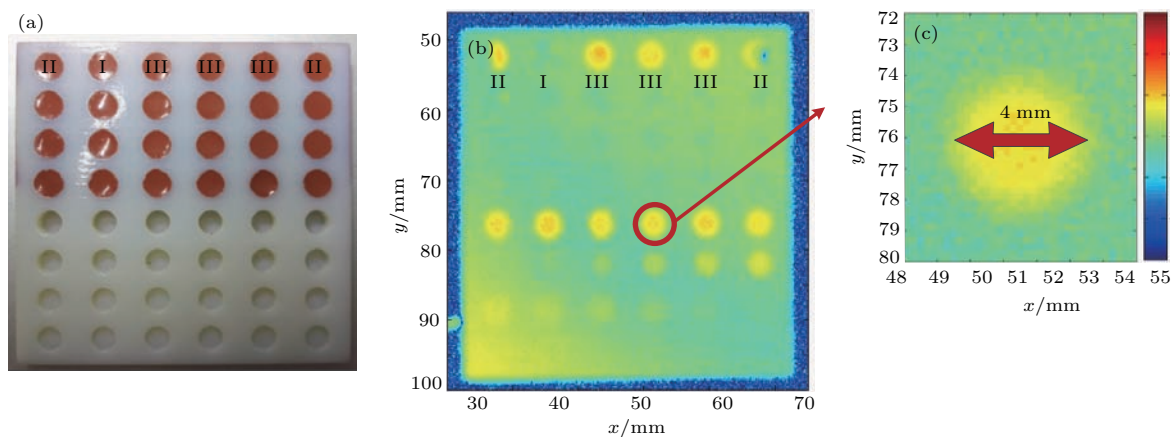


图 5 (网刊彩色) (a) 样件实物图; (b) $z = 5$ mm 处的太赫兹切片图; (c) 图 (b) 中标注处放大图

Fig. 5. (color online) (a) The picture of the sample; (b) the THz slice image at $z = 5$ mm; (c) the enlarged image of the position marked in (b).

4 小波变换对实验结果的改进

样件的上下表面太赫兹图像如图 6 所示, 上下表面分别位于 $z = 8$ mm 和 $z = 0$ mm 处, 光敏聚合物的折射率 n_o 为 1.6, 检测结果中无孔处板的光程为 8 mm, 计算厚度与实际厚度 5 mm 相符. 在计

算样件厚度的时候, 光敏聚合物材料厚度分别为 5, 3.5, 3, 2 mm 时, 检测结果与实际样件完全符合, 由于太赫兹探测的光束在 $z = 0$ mm 处聚焦, 离聚焦平面越远的面可能存在越多干扰, 因此 $z = 6$ mm 处的太赫兹图像中明显存在较多噪声. 当光敏聚合物材料厚度为 1 mm 时, 在 $z = 6, 5, 4$ mm 处都能看到该行孔, 即在 3 mm 的区域内都有该分界面信

号而难以辨别该行孔的分界面位置. 产生这个结果的主要原因在于检测过程中太赫兹自身波长较长(系统中心频率处波长为1 mm), 检测薄层时薄层的上下表面反射峰相距太近因而难以分辨, 为了解决这个问题, 采用小波变换进行处理.

分别对光敏聚合物材料厚度为1, 2, 3, 3.5 mm处的反射光强信号进行分析, 结果如图7所示, 从图中可以看到, 孔深为3, 2, 3.5 mm处曲线的反射

峰值易于判定, 在孔深为4 mm处, 样件的顶部和底部相差1 mm光敏聚合物, 波峰并不明显. 为了更加精确方便地定位该分界面位置, 采用Gaus2小波对孔深为4 mm处的信号进行处理, 结果如图7(b)所示. 进行小波变换之后, 信号极大值点刚好对应于原始信号的反射峰, 且相应的峰宽度被压缩, 将尺度2的小波系数再进行三维重构, 可以增强信号中的特征信息.

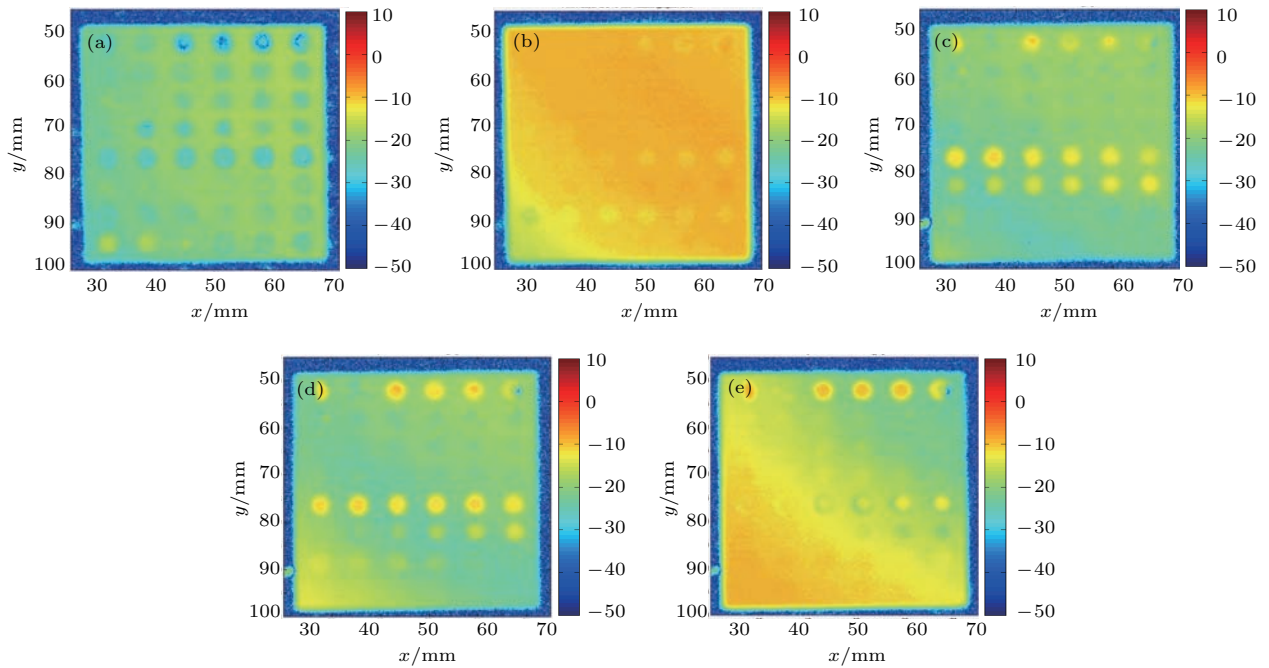


图6 (网刊彩色) (a) $z = 0$ mm 时的太赫兹图像, 对应样件的下表面; (b) $z = 8$ mm 处的太赫兹图像, 对应样件的上表面; (c) $z = 4$ mm 处的太赫兹图像; (d) $z = 5$ mm 处的太赫兹图像; (e) $z = 6$ mm 处的太赫兹图像

Fig. 6. (color online) (a) The THz slice image at $z = 0$ mm, corresponding to the back side of the sample; (b) the THz slice image at $z = 8$ mm, corresponding to the front side of the sample; (c) the THz slice image at $z = 4$ mm; (d) the THz slice image at $z = 5$ mm; (e) the THz slice image at $z = 6$ mm.

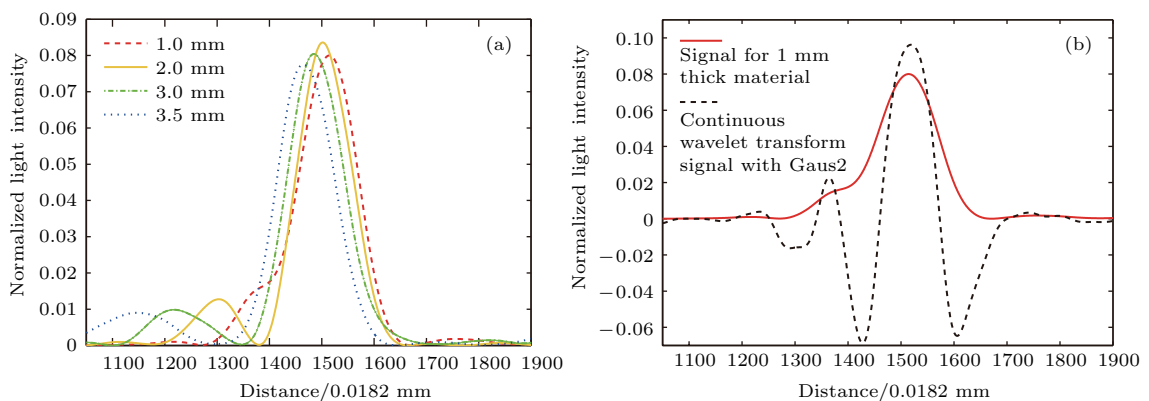


图7 (网刊彩色) (a) 光敏材料厚度分别为1, 2, 3, 3.5 mm (孔深分别为4, 3, 2, 1.5 mm) 时的反射峰对比; (b) 光敏材料厚1 mm 处信号及其对应的小波变换

Fig. 7. (color online) (a) Four z -direction intensity signals corresponding to photosensitive materials with thickness of 1, 2, 3, 3.5 mm, respectively; (b) the z -direction intensity signal from 1 mm thick photosensitive material and the corresponding continuous wavelet transform signal.

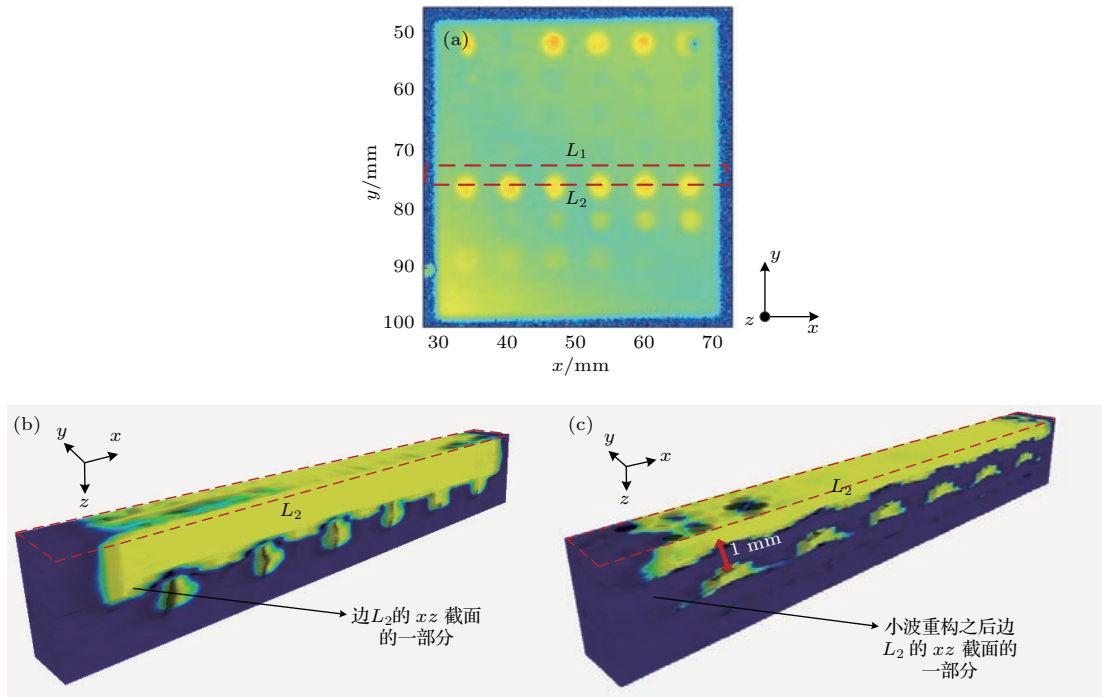


图8 (网刊彩色) (a) 截取图中红色虚线框区域中的 z 轴数据进行三维重构; (b) 原始检测数据的三维重构; (c) 对应小波系数的三维重构

Fig. 8. (color online) (a) Select the z -direction data within the dotted red line region for 3D reconstruction; (b) 3D reconstruction of the original data from part of the sample; (c) 3D reconstruction of the wavelet coefficients.

为了更清楚地对比 1 mm 厚光敏材料的 THz 三维成像信息, 选图 8(a) 所示红色虚线区域数据进行重构, 沿 L_2 边的 xz 截面对应 1 mm 厚光敏材料的上下表面. 对该区域的信号进行三维重构, 重构结果如图 8(b) 所示, 孔的顶部反射信号与样件上表面的反射信号连在一起, 难以辨别. 将该区域的 z 轴信号进行小波变换之后再重构的三维图像如图 8(c) 所示, 4 mm 孔的上表面与样件的上表面能够清晰地辨别开来. 从小波系数重构的三维图中可以准确地判断缺陷孔的顶部与样件上表面的距离为 1 mm. 采用探测小波变换对该系统的探测数据进行处理, 分辨率可以达到系统的中心波长. 这种方法提高了探测物质内部结构的纵向探测精度.

5 结 论

对 THz 波在无损检测领域的应用做了一系列研究工作, 通过 THz 成像系统, 可以很好地获得物质内部的结构变化信息. 本文采用小波系数的三维重构提高了 THz 成像的纵向精度, 这为以后的太赫兹计算机断层扫描成像和太赫兹无损探测研究提供了新的思路.

参考文献

- [1] Deng Y Q, Xing Q R, Lang L Y, Chai L, Wang Q Y, Zhang Z G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5224 (in Chinese) [邓玉强, 邢岐荣, 郎利影, 柴路, 王清月, 张志刚 2005 物理学报 **54** 5224]
- [2] Yang Z G, Liu J S, Wang K J 2013 *Journal of Optoelectronics-Laser* **24** 1158 (in Chinese) [杨振刚, 刘劲松, 王可嘉 2013 光电子·激光 **24** 1158]
- [3] Zhou S F, Reekie L, Chan H P, Luk K M, Chow Y T 2013 *Opt. Lett.* **38** 260
- [4] Sanchez A R, Karpowicz N, Xu J Z, Zhang X C 2006 *Proceedings of the 4th International Workshop on Ultrasonic and Advanced Methods for Nondestructive Testing and Material Characterization* Dartmouth, June 19, 2006 p67
- [5] Stoik C D, Bohn M J, Blackshire J L 2008 *Opt. Express* **16** 17039
- [6] Dong J L, Kim B, Locque A, Keon P M, Declercq N, Citrin D S 2015 *Compos. Part B* **79** 667
- [7] Wietzke S, Jördens C, Krumbholz N, Baudrit B, Bastian M, Koch M 2007 *J. Eur. Opt. Soc. -Rapid* **2** 07013
- [8] Jördens C, Scheller M, Wietzke S, Romeike D, Jansen C, Zentgraf T, Wiesauer K, Reisecker V, Koch M 2010 *Compos. Sci. Technol.* **70** 472
- [9] Ren J J, Li L J, Zhang D D, Qiao X L, Lu Q Y, Cao G H 2016 *Appl. Opt.* **55** 7024
- [10] Yasui T, Yasuda T, Sawanaka K, Araki T 2005 *Appl. Opt.* **44** 6849

- [11] Sanchez A R, Heshmat B, Aghasi A, Naqvi S, Zhang M J, Romberg J, Raskar R 2016 *Nat. Commun.* **7** 12665
- [12] Yan G F, Markov A, Chinifooroshan Y, Tripathi S M, Bock W J, Skorobogatiy M 2013 *Opt. Lett.* **38** 2200
- [13] Cheng B B, Li H P, An J F, Jiang K, Deng X J, Zhang J 2015 *Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology* **13** 843 (in Chinese) [成彬彬, 李慧萍, 安健飞, 江舸, 邓贤进, 张健 2015 太赫兹科学与电子信息学报 **13** 843]
- [14] Di Z G, Yao J Q, Jia C R, Bing P B, Yang P F, Xu X Y 2011 *Laser Infrared* **41** 1163 (in Chinese) [邸志刚, 姚建铨, 贾春荣, 郝丕彬, 杨鹏飞, 徐小燕 2011 激光与红外 **41** 1163]
- [15] Ge X H, Lü M, Zhong H, Zhang C L 2010 *J. Infrared Milli. Wave.* **29** 15 (in Chinese) [葛新浩, 吕默, 钟华, 张存林 2010 红外与毫米波学报 **29** 15]
- [16] Chen P F, Tian D, Qiao S J, Yang G 2014 *Spectrosc. Spect. Anal.* **34** 1969 (in Chinese) [陈鹏飞, 田地, 乔淑君, 杨光 2014 光谱学与光谱分析 **34** 1969]
- [17] Mallat S, Hwang W L 1992 *IEEE Trans. Inform. Theory* **38** 617
- [18] Yin X X, Ng B W H, Ferguson B, Abbott D 2009 *Digit. Signal Process.* **19** 750
- [19] Weg C A, Spiegela W V, Hennebergerb R, Zimmermannb R, Roskos H G 2009 *Proceedings of Terahertz Technology and Applications II* San Jose, September 15–19, 2008 p72150F-1
- [20] Anastasi R F, Madaras E I 2006 *Proceedings of Nondestructive Evaluation and Health Monitoring of Aerospace Materials, Composites, and Civil Infrastructure IV* San Diego, March 6, 2005 p356
- [21] Hong J C, Kim Y Y, Lee H C, Lee Y W 2002 *Int. J. Solids. Struct.* **39** 1803

Wavelet transform in the application of three-dimensional terahertz imaging for internal defect detection^{*}

Dai Bing¹⁾ Wang Peng²⁾ Zhou Yu¹⁾ You Cheng-Wu¹⁾ Hu Jiang-Sheng¹⁾
Yang Zhen-Gang¹⁾ Wang Ke-Jia¹⁾ Liu Jin-Song¹⁾[†]

1) (Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

2) (College of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 30 November 2016; revised manuscript received 23 December 2016)

Abstract

Spatial resolution and spectral contrast are two major bottlenecks for non-destructive testing of complex samples with current imaging technologies. We use a three-dimensional terahertz (THz) imaging system to obtain the internal structure of the sample, and exploit the wavelet transform algorithm to improve the spatial resolution and the spectral contrast. With this method, the longitudinal resolution of terahertz imaging system can be improved to the wavelength comparable thickness, while the x - y plane resolution can be as high as $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$, which benefits from the point-to-point scanning on the x - y plane. In this three-dimensional terahertz imaging system, the Syn View Head 300 with light source/detector frequency of 0.3 THz is used for two-dimensional scanning (x - y direction) of the sample, and the linear frequency modulated continuous wave technique is used to obtain the reflected terahertz light intensity at different depths (z axis) of the sample. When the sample is thin, the upper and lower interface reflection peaks are difficult to distinguish due to broad peak width of the THz source. To solve this problem efficiently, continuous wavelet transform (CWT) is used. In recent years, CWT is applied widely because of its particular mathematical properties in the feature signal recognition. Since the Gaus2 wavelet basis is better to highlight the peak signal, we choose it for CWT. After CWT, one scale of the wavelet coefficients is chosen for three-dimensional data reconstruction, for which the widths of the reflection peaks are narrower and the noise signals are weaker. That means if we reconstruct the three-dimensional wavelet coefficient data on the chosen scale, the three-dimensional image of the tested sample will be enhanced. In order to demonstrate that, the three-dimensional images reconstructed by wavelet coefficients are compared with those by original data. The tested sample has holes inside with different depths. Based on the original three-dimensional THz image, it is hard to locate the top of 4 mm deep hole (1 mm deep photosensitive material plate), while the top of the inner 4 mm deep holes (the bottom of the 1 mm deep photosensitive material plate) can be distinctly located and the noises are greatly reduced based on the three-dimensional images reconstructed by wavelet coefficients. With this method, the longitudinal resolution of terahertz detection systems can be improved to 1 mm that is comparable to the wavelength, which demonstrates advantages of this method.

Keywords: terahertz, non-destructive testing, wavelet transform

PACS: 87.50.U-, 81.70.Fy, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.66.088701

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11574105, 61475054, 61405063, 61177095) and the Science and Technology Condition Resources Development Project of Hubei Province, China (Grant No. 2015BCE052).

[†] Corresponding author. E-mail: jsliu4508@vip.sina.com