

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0276-04

太赫兹焦平面多波长相位成像

张亮亮 张岩 钟华 张存林

(首都师范大学 物理系 北京市太赫兹波谱与成像重点实验室 省部共建教育部太赫兹光电子学实验室, 北京 100048)

摘要 提出了一种对焦平面成像得到的图像去噪的数据处理方法。通常的太赫兹单波长相位成像只利用对应于单一频率的相位值重构物体, 一般来说图像噪声较大, 并且在物体引起光程差大于 2π 的位置会出现断点。太赫兹多波长相位成像是用对应于两个或多个波长的相位进行图像处理, 将不同频率的相位图作相减或拟合处理可以大大降低背景噪声。对金属垫圈和相机镜头盖的焦平面图像处理结果说明, 多波长相位成像是非常有前景的数据处理方法。

关键词 图像处理; 多波长相位成像; 焦平面; 太赫兹

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL200936s1.0276

Terahertz Focal-Plane Multiwavelength Phase Imaging

Zhang Liangliang Zhang Yan Zhong Hua Zhang Cunlin

(Department of Physics, Capital Normal University, Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Beijing 100048, China)

Abstract A terahertz focal-plane phase imaging method with multiwavelength is presented. This novel approach can image object with larger optical length compared to using the largest wavelength in the terahertz spectrum and does not involve the usual phase unwrapping in the detection of phase discontinuity. Furthermore, this technique can effectively reduce the noise background and improve the accuracy of the reconstructive images. The validity of this new method can be demonstrated by processing the reflective two dimensional (2D) image data of a metal washer and Nikon camera's lens cap. The measurements show that the multiwavelength phase imaging is a straightforward and efficient phase data processing method in terahertz imaging application.

Key words image process; multi-wavelength phase imaging; focal-plane; terahertz

1 引言

太赫兹 (THz) 波的感测和成像一直被认为在无损伤检测领域具有非常广阔的前景^[1~8]。由于具有非接触、不电离和宽带的优点, 太赫兹波技术已经应用于多个领域, 包括包裹检查、机械加工控制、安全屏蔽以及非破坏性的材料评估等。特别地, 反射式太赫兹波技术更有实际应用价值, 是探测对太赫兹波不透明基底上的目标物的唯一方式^[9~11]。

太赫兹焦平面成像技术可以大大提高图像数据的获取速度。与逐点扫描成像中将太赫兹波聚焦到样品上不同, 太赫兹波和探测光束都被扩束。探测

光束入射到大块的探测晶体上, 其横截面上的每一点都被太赫兹电场调制并携带了目标物的图像信息。由于是一次进行二维成像, 仅仅进行时间延迟扫描, 因此图像数据获取速度大大提高^[12,13]。然而, 由于太赫兹焦平面成像不能使用锁相放大器, 因此系统的信噪比一般较低。所以提出了多波长相位成像技术, 不仅可以应用于三维成像, 而且可以大大降低背景噪声得到清晰的目标图像。

2 成像原理

两个分立的波长 λ_1 和 λ_2 分别对物体成像得到

基金项目: 国家 973 计划(2007CB310408)资助课题。

作者简介: 张亮亮(1979—), 女, 讲师, 主要从事太赫兹成像方面的研究。E-mail: zhlliang@126.com

导师简介: 张存林(1961—), 男, 教授, 主要从事太赫兹及红外波谱与成像等方面的研究。

E-mail: cunlin_zhang@mail.cnu.edu.cn (通信联系人)

两幅相位图 φ_1 和 φ_2 ，当光程是波长的整数倍时，单个波长的相位图将会出现 2π 断点。对于单个波长 λ_1 (或 λ_2) 成像，由相位推导出来的表面轮廓图 $z_m(x) = \lambda_m \varphi_m / 2\pi (m=1, 2)$ 也会在高度等于波长的倍数的地方出现断点。将两幅相位图相减 $\varphi'_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$ 并在 $\varphi'_{12} < 0$ 处补 2π 会产生一幅新的相位图 $\varphi_{12}(x)$ ，它会在很大范围内不存在断点。相位图 $\varphi_{12}(x)$ 等效于利用较长的差拍波长 $\Delta_{12} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2|$ 成像，相对应的表面轮廓图为 $z_{12}(x) = \Delta_{12} \varphi_{12}(x) / 2\pi$ 。如果两个成像波长选择合适，可以产生一个很长的差拍波长来满足成像物体的尺寸。

3 系统介绍

实验系统如图 1 所示，激光放大器的重复频率为 1 kHz，脉冲宽度为 75 fs，中心波长为 795 nm，平均输出功率为 650 mW。用于辐射太赫兹波的 ZnTe 晶体厚度为 2.5 mm，产生的 THz 光束扩展为 25 mm。系统采用 4F 结构的反射式成像模式，THz 光束在样品表面的入射角度为 15° 。焦距为 150 mm 的聚乙烯透镜将物体成像在大尺寸的 ZnTe 探测晶体 (40 mm × 40 mm × 2 mm) 上。探测光束也被扩束为直径 25 mm，与 THz 光束共线通过探测晶体。捕获图像使用的是普林斯顿 CCD 相机，曝光时间为 32 ms。为了降低长周期的光背景噪声，系统采用了动态相减技术。飞秒激光器产生大小等于激光脉冲重复频率的 1 kHz 信号，被分频器分为频率为 1/32 Hz 和 1/64 Hz 的两个同步信号，分别用来触发光学斩波器和 CCD 相机。这样，CCD 相机捕获两帧连续的图像，其中一帧是 THz 信号，而另一帧 THz 信号被斩波器挡住了。由于图像是

在毫秒量级的时间内交替捕获的，因此如果将两帧图像相减，即将信号图像和背景图像相减，长周期的背景漂移就会大大降低。系统的信噪比大于 200，图像的空间分辨率为 2 mm。

4 实验结果及讨论

首先选用的被测样品是结构比较简单的厚度 $h=1.5$ mm 的金属垫圈。对于反射式成像，物体的厚度 $h(x, y)$ 为^[14]

$$h(x, y) = \lambda \varphi / (4\pi). \quad (1)$$

图 2 为金属垫圈的反射式焦平面实时成像的测量结果，分别给出了单波长相位成像和双波长相位成像的图像处理结果。

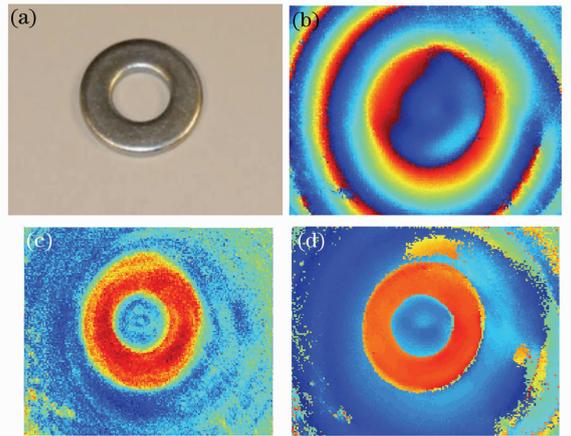


图 2 (a)金属垫圈的光学照片;(b)THz 单波长图像;(c)unwrap 算法处理的单波长图像;(d)双波长图像

Fig.2 (a) Optical picture of metal washer; (b) terahertz single-wavelength image; (c) the single-wavelength of unwrap algorithm; (d) the image of double-wavelength

图 2(a)是金属垫圈的光学照片。图 2(b)是对应波长 $\lambda_1=0.33$ mm 的单波长相位图像，可以看出图像具有很多斜坡，这是由于垫圈表面不平，高度差是波长的整数倍而产生 2π 断点造成的。图 2(c)是利用 unwrap 算法对图 2(b)进行处理的结果，unwrap 算法需要在垫圈边缘进行主观判断，仅适用于结构比较简单的物体图像。可以看出，此方法得到的单波长相位图像非常毛糙，噪声约为 1mm。因此，单波长相位图像一般不能用来精确重构物体轮廓。图 2(d)显示了双波长相位成像有效的去噪声效果。选择的两个频率为 $\gamma_1=0.9$ THz 和 $\gamma_2=1.1$ THz，分别对应波长为 $\lambda_1=0.33$ mm 和 $\lambda_2=0.27$ mm。差拍波长 $\Delta_{12} = \lambda_1 \lambda_2 / |\lambda_1 - \lambda_2| = 1.83$ mm，大于垫圈的厚度，因此用此波长重构出来的样品轮廓没有伪断点。

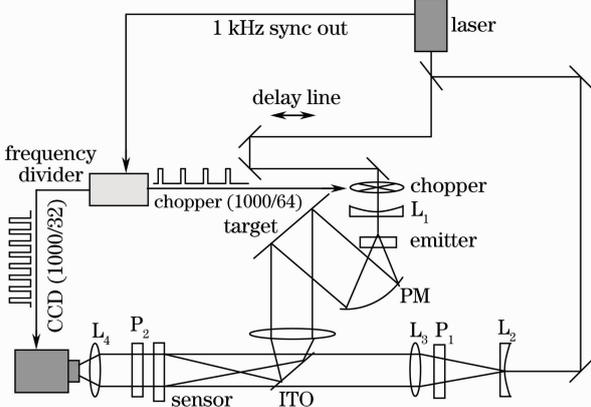


图 1 太赫兹焦平面成像系统示意图

Fig.1 Diagram of terahertz focal-plane imaging system

为了更清楚地比较单波长图像和双波长图像的噪声水平,图 3 给出了样品图像的横截面曲线,其中双波长成像选用的波长与图 2 相同。

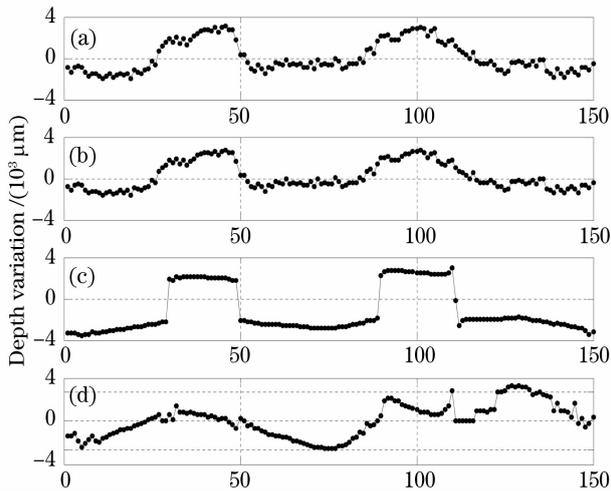


图 3 金属垫圈单波长和双波长重构图像的横截面曲线

Fig. 3 Horizontal section curve of single-wavelength and double-wavelength imaging metal washer

图 3(a)和图 3(b)分别对应波长 $\lambda_1=0.33$ mm 和 $\lambda_2=0.27$ mm 的单波长相位图像的横截面曲线。曲线有很多振荡,噪声甚至在 1 mm 的量级。然而,双波长图像的横截面曲线就光滑许多,噪声被有效地降低,如图 3(c)。图 3(d)给出了双波长重构图像与理想的垫圈表面的差值,用来表征双波长图像的噪声水平,图中显示噪声约为 $100 \mu\text{m}$ 。可以看出,单波长图像的噪声量级是双波长图像的 10 倍。

对尼康相机镜头盖的反射式成像更能显示双波长图像处理的优势,测量结果如图 4 所示。

被测样品的光学照片如图 4(a)所示,是一个尼康相机的镜头盖,仅对红色矩形框内的区域成像。凸起的“Nikon”标志的厚度为 $300 \mu\text{m}$,这个厚度接近于飞行时间成像的深度分辨率(depth resolution)。深度分辨率定义为太赫兹辐射相干长度的 $1/2$,而相干长度为

$$L_c = c/\Delta\omega, \quad (2)$$

式中 $\Delta\omega$ 是 THz 辐射的光谱宽度, c 是介质中的光速。深度分辨率中的 $1/2$ 因子是由于反射式成像中后表面反射太赫兹波两次通过介质的缘故。

在此试验所用的系统中,相干长度约为 $200 \mu\text{m}$,这是系统飞行时间成像可以分辨两个不同表面间的最小距离。然而由于背景噪声的存在,如果高度差与深度分辨率比较接近时,飞行时间成像并不能用来精确地重构物体。这一点可以用图 4 中镜头盖的 THz 图像来证明。图 4(b)给出了镜头盖的 THz 飞

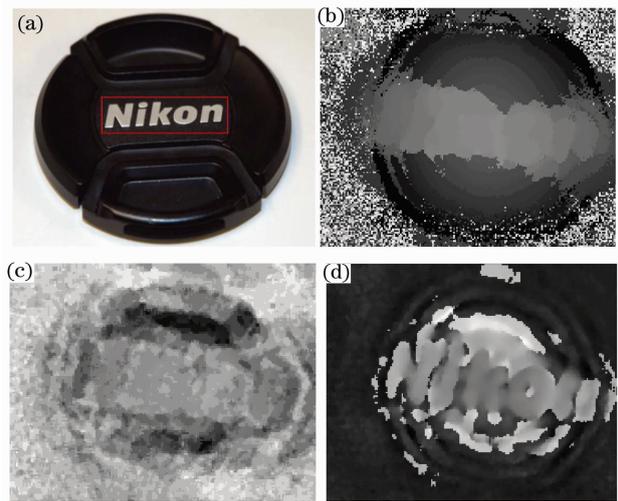


图 4 尼康相机镜头盖的光学照片(a);THz 飞行时间成像(b);单波长成像(c)和双波长成像(d)

Fig. 4 Optical picture of Nikon camera's lens cap (a), terahertz time-of-flight imaging (b); single-wavelength imaging (c) and double-wavelength imaging (d)

行时间成像图,从图中根本无法分辨标志的任何结构。对应于波长 $\lambda=0.25$ mm 的单波长相位图如图 4(c)所示,可以看出图像也是不能分辨表面的结构。但是,图 4(d)所示的双波长相位图可以分辨出标志结构,充分显示了双波长相位成像的去噪声效果。图 4(d)中选择两个波长为分别对应于 $\gamma_1=1.2$ THz 和 $\gamma_2=1.4$ THz 的 $\lambda_1=0.25$ mm 和 $\lambda_2=0.21$ mm。这个测量结果清楚地表明双波长相位成像可以增强重构图像的精确性。

5 结 论

理论和实验证明太赫兹多波长相位成像是一种有效的图像去噪声数据处理方法,将大大提高太赫兹成像系统的实际应用能力。

参 考 文 献

- 1 H. Zhong, A. R. Sanchez, X.-C. Zhang. Identification and classification of chemicals using terahertz reflective spectroscopic focal plane imaging system[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 9130~9141
- 2 Y. Watanabe, K. Kawase, T. Ikari *et al.*. Component spatial pattern analysis of chemicals using terahertz spectroscopic imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**: 800~802
- 3 D. M. Mittleman, S. Hunsche, L. Boivin *et al.*. T-ray tomography[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**: 904~906
- 4 N. Li, J. Shen, L. Liang *et al.*. Study on the THz spectrum of methamphetamine[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 6750~6755
- 5 D. M. Mittleman, M. Gupta, R. Neelamani *et al.*. Recent advances in terahertz imaging[J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **68**: 1085~1094

- 6 D. Zimdars, J. Valdmans, J. White *et al.*. Time domain terahertz detection of flaws within space shuttle sprayed on foam insulation[C]. *CLEO*, 2004, CThN4
- 7 D. M. Mittleman, R. H. Jacobsen, R. Neelamani *et al.*. Gas sensing using terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B*, 1998, **67**: 379~390
- 8 L. Guo, Y. Hu, Y. Zhang *et al.*. Vibrational spectrum of γ -HNIW investigated using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 3654~3659
- 9 K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe *et al.*. Non-destructive terahertz imaging of illicit drugs using spectral fingerprints[J]. *Opt. Express*, 2003, **11**: 2549~2554
- 10 H. B. Liu, Y. Chen, G. J. Bastiaans *et al.*. Detection and identification of explosive RDX by THz diffuse reflection spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**: 415~423
- 11 H. Zhong, C. Zhang, L. Zhang *et al.*. A phase feature extraction technique for terahertz reflection spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**: 221106~221108
- 12 Q. Wu, T. D. Hewitt, X.-C. Zhang. Two-dimensional electro-optic imaging of THz beams[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**: 1026~1028
- 13 M. V. Exter, C. Fattinger, D. Grischkowsky. Terahertz time-domain spectroscopy of water vapor[J]. *Opt. Lett.*, 1989, **14**: 1128~1130
- 14 E. Cuche, F. Bevilacqua, C. Depeursinge. Digital holography for quantitative phase-contrast imaging[J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**: 291~293