

文章编号:1004-4213(2011)06-0916-5

# THz 干涉测量用于障碍物后振动传感的研究

刘乔<sup>1</sup>, 李泽仁<sup>1</sup>, 孟坤<sup>1</sup>, 权润爱<sup>2</sup>

(1 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

(2 深圳大学 电子科学与技术学院, 广东 深圳 518060)

**摘 要:**为探索 THz 干涉技术用于障碍物后振动传感的可行性,采用工作波长 214.58  $\mu\text{m}$  (对应频率约 1.4 THz)的  $\text{CO}_2$  激光器泵浦气体太赫兹源搭建了一套基于迈克尔逊干涉仪结构的 THz 干涉测量装置,实验研究了薄纸板遮挡后敲击目标镜产生的微小振动,利用相位分析法和频谱分析法对振动干涉信号进行处理,得到了振动位移随时间的变化以及不同时段振动频率的分布情况,测得的峰峰值振幅最小为 7.98  $\mu\text{m}$ ,最大为 17.54  $\mu\text{m}$ ,振动峰值速度为 2.7 mm/s,振动频率最小 21 Hz,最大 58 Hz. 研究表明 THz 干涉测量技术能有效克服传统振动传感技术无法穿透障碍物的缺点,是一种简便有效的障碍物后振动传感的新型手段,预示了 THz 技术在振动检测相关领域的广阔应用前景.

**关键词:**太赫兹; 振动传感; 干涉测量

**中图分类号:** O439

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3788/gzxb20114006.0916

## 0 引言

振动检测对于工业设备的正常运行和维护、建筑桥梁的结构设计等具有重要意义. 在振动检测中,常常需要对塑料、纸板等光学不透明物遮挡下的目标如马达、扬声器、汽车轴承和风扇等运行时产生的振动进行测量,为设备运行状态的诊断提供数据,此时若采用传统的接触传感方式或非接触的干涉传感方式都无法进行有效检测. 太赫兹辐射由于其结合了电磁波的波动性和对非极性材料的良好透射性,为障碍物后振动传感提供了一种全新的解决思路.

太赫兹辐射是指频率在 0.1~10 THz(相应的波长为 30  $\mu\text{m}$ ~3 mm)范围内的电磁波,由于其在长波段与毫米波相重合,在短波段与远红外光相重合,因而兼具了微波和光波的特点,形成了其独特的性质,使得太赫兹技术在诸如材料特性检测、生物医学、安全检查与反恐、无损检测、宽带通讯等等领域获得了世界范围的广泛关注<sup>[1-5]</sup>. 利用 THz 辐射的波动性开展诸如振动检测应用方面的研究则非常少,目前国内还未见报道,国外也只有麻省理工的 Jerry C. Chen<sup>[6]</sup>等于 2007 年利用基于工作波长 488  $\mu\text{m}$  返波管源的太赫兹传感器对纸板、塑料、木材和棉布等遮挡下的扬声器振动信号进行了干涉测

量的原理性实验,获得了几个固定频率下振动的最大位移和速度等参量,实验结果与商业测振仪相比具有较好的一致性. Jerry C. Chen 等搭建的太赫兹传感器虽然获得了障碍物后目标的振动信息,但其实验是在事先已知的固定振动频率下进行的,与实际测试中可能面临的复杂频率情况有一定区别;另外在数据处理方面,他们采用的是基于快速傅里叶变换的商业频谱分析仪,只能给出整个时间段内的信号频谱整体分布情况,无法描述不同时刻的信号频谱,也无法得到振动位移随时间的变化(即振动时程),而后者是描述振动特性的主要参量;最后,其测量用的太赫兹波长为 488  $\mu\text{m}$ ,这虽然保证了对障碍物的透射性能,但由于波长较长,其位移测量准确度必然要受到影响.

为进一步探索太赫兹干涉测量技术用于障碍物后目标振动检测的可行性,本文利用工作波长 214.58  $\mu\text{m}$  的  $\text{CO}_2$  激光器泵浦气体太赫兹源搭建了一套基于迈克尔逊干涉仪结构的 THz 干涉测量装置,对薄纸板遮挡后敲击目标镜产生的微小振动进行了实验研究. 由于干涉仪波长采用的是 214.58  $\mu\text{m}$ ,这样就在保证 THz 辐射对障碍物透射性能的前提下提高了测量准确度;另外,实验中没有采用固定频率的振动作为测试对象,而是将激振方式改为敲击目标镜来产生振动,从而使得实验状态

第一作者:刘乔(1973-),男,助理研究员,硕士,主要研究方向为激光干涉测量及太赫兹光谱成像. Email:crystal\_palace@163.com

收稿日期:2010-11-23;修回日期:2011-01-25

更加接近真实情况;最后,在数据处理方面,采用相位分析和频谱分析相结合的方法对干涉信号进行处理,获得了振动时程及不同时段振动频率的分布情况,从而丰富了振动检测的测量信息。

## 1 实验布局及测量原理

利用太赫兹干涉技术进行障碍物后目标振动检测的实验布局如图 1。整个实验系统置于一个隔振光学平台上。考虑到迈克尔逊干涉仪结构简单、易于调试等特点,在干涉装置构型方面选用了迈克尔逊干涉仪作为系统基本结构。太赫兹源采用相干公司生产的 Sifir-50 FPL 激光器,该激光器是较为先进的 CO<sub>2</sub> 激光器泵浦气体太赫兹源,具有线宽窄、方向性好、线偏振输出及功率高等优点,在 214.58 μm 处稳定输出功率可达 40 mW,满足干涉测量对于光源时间和空间相干性的要求。探测器采用 LH1778 型红外热释电传感器,它虽然灵敏度低于辐射热计,但结构简单,易于操作,并可在常温下工作,其 -3 dB 带宽与高莱管相当,约 40~60 Hz,对于普通振动测量可满足要求。示波器采用泰克公司的 TDS 3034C 型示波器,其单通道最大采样率为 2.5 GS/s,带宽为 300 MHz,满足对干涉信号的采集要求。整个实验系统工作原理为:首先用一个由焦距 150 mm 的高密度聚乙烯凸透镜和一个焦距 50 mm 的 90°离轴镀保护金抛物面镜组成的共焦系统对 Sifir-50 FPL 激光器输出的太赫兹光束进行缩束和准直,准直后的太赫兹波由一个高阻硅分束镜分为参考光和信号光,参考光由镀金平面反射镜 2 反射后透过分束镜入射到探测器接收窗口,信号光经目标镜即镀保护金平面反射镜 1 反射并 2 次透过由一片 1 mm 厚薄纸板形成的障碍物后,携带着目标镜振动信息由分束镜反射后也入射到探测器接收窗口,与参考光混频产生干涉信号,探测器输出的与干涉光强信号成比例的电压信号由示波器记录并显示。镀金平面反射镜安装在 2 维调节架上,以便进行角度调节,下面装有一个 1 维平移台,以便进行光程的微调。为减少杂散光影响,在探测器前加装了一个聚乙烯窗口。另外,为避免多个干涉条纹同时进入探测器造成干涉信号对比度下降,在探测器前加了一个小孔光阑。实验时先粗略调节参考光和信号光的位置,使其分别对准探测器前的小孔光阑,再仔细调节干涉图,使其呈现类似于“牛眼”状的干涉条纹并将其中心对准光阑中心即可。由于人眼无法直接感应 THz 波,调试中采用了热感应纸来对 THz 光斑进行辅助定位。

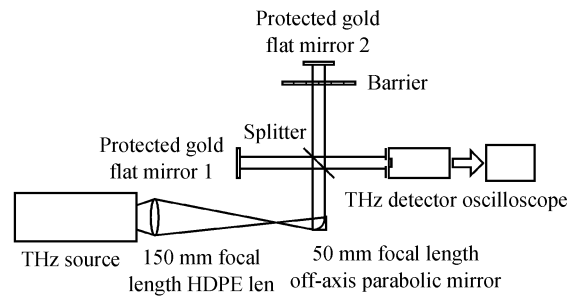


图 1 利用 THz 干涉技术进行障碍物后振动测量实验布局  
Fig. 1 Diagram of experimental setup of vibration measurements behind barriers by THz interferometry

根据双光束干涉光强公式,示波器上记录的振动干涉信号可表示为

$$V(t) = V_r + V_s + 2\sqrt{V_r V_s} \cos \left[ \varphi_0 + \frac{4\pi}{\lambda} y(t) \right] \quad (1)$$

式中  $V_r$  和  $V_s$  分别代表参考光和信号光光强对应的电压大小,  $\varphi_0$  为信号初位相,由干涉仪两臂的初始光程差决定,  $\lambda$  为干涉测量用的太赫兹波长,  $y(t)$  代表振动位移随时间的变化。在干涉测量中,为使干涉信号具有良好的线性度和灵敏度,通常需要调节干涉仪使  $\varphi_0$  满足  $\varphi_0 = 2n\pi \pm \pi/2$ ,  $n$  为整数,此时式(1)可表示成正弦函数的形式

$$V(t) = V_r + V_s \pm 2\sqrt{V_r V_s} \sin \left[ \frac{4\pi}{\lambda} y(t) \right] \quad (2)$$

式中的正号对应  $\varphi_0 = 2n\pi - \pi/2$ ,负号对应  $\varphi_0 = 2n\pi + \pi/2$ 。只要在振动测试前事先测出  $V_r$  和  $V_s$  的大小,则式(2)总能归一化为

$$V(t)_{\text{nor}} = \pm \sin \left[ \frac{4\pi}{\lambda} y(t) \right] \quad (3)$$

式中  $V(t)_{\text{nor}}$  代表归一化后的干涉信号。振动传感的目的是通过对获得的原始信号进行处理,得到如振动时程(即振动位移随时间的变化)、振动速度及振动频率等参量,为目标振动特性的深入分析提供基础数据。式(3)的数据处理方法通常有两种:一是通过频谱分析法<sup>[7]</sup>直接求出振动速度,再积分求出振动时程;二是通过相位分析法<sup>[8]</sup>直接求出振动时程,再微分求振动速度。用频谱分析法直接求解速度虽然是速度测量的主要方法,但在本文研究的微小振动情况下,振幅的峰峰值远小于  $\lambda/2$ ,用频谱分析法只能得到振动本身的频率分布情况,无法得到与振动速度相关的多谱勒频率,因而无法测得振动速度。相位分析法是位移求解准确度最高的方法,它通过解反三角函数求出信号相位随时间的变化,再利用相位和位移的关系得到位移随时间的变化,由于通常情况下信号的相位变化范围较宽,而反三角函数的值域范围有限,直接得到的相位值无法随时间连

续增加,常常需要通过人工判别来进行修正,这使得数据处理较为复杂,特别对于振动测量,由于还存在相位反转问题,处理起来更为麻烦,但对于本文研究的微小振动而言,干涉信号的相位变化小于  $\pi/2$ ,不存在人工判别问题,直接求解反三角函数即可得到相位的真实变化情况,因此非常适合于用相位分析法进行数据处理.由式(3)容易看出

$$y(t) = \frac{\lambda}{4\pi} \arcsin [V(t)_{\text{nor}}] \quad (4)$$

得到振动位移后原则上可通过微分求得振动速度随时间的变化,但微分受信号波形斜率影响较大,振动位移曲线稍有不光滑,就会造成速度发生较大变化,致使测量准确度难以保证.不过尽管如此,给出一个峰值速度作为参考对于振动检测来说还是有意义的.对于测量中主要关心的振动峰值速度(对应于振动位移为零处),可通过一个简单方法来进行估算.对式(3)两边微分有

$$V'(t)_{\text{nor}} = \pm \frac{4\pi}{\lambda} y'(t) \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} y(t) \right] \quad (5)$$

式中  $V'(t)$  与  $y'(t)$  分别代表干涉信号和振动位移的一阶导数,在速度取极值的点处振动位移为零,即  $y(t)=0$ ,于是由式(5)有

$$|u(t)_{\text{max}}| = |y'(t)_{\text{max}}| = \frac{\lambda}{4\pi} |V'(t)_{\text{normax}}| \quad (6)$$

式中  $|u(t)_{\text{max}}|$  为振动峰值速度大小,  $|V'(t)_{\text{normax}}|$  为干涉信号斜率大小的最大值.

由于本文所用的敲击激振方式类似于振动检测中常用的力锤,其振动频率并非固定的,而是随时间在不断变化中.鉴于测试对象以上特点,仅仅用传统的傅里叶变换方法对干涉信号进行频谱分析是不够的,必须结合时频分析的方法进行信号处理,才能把握不同时段振动频率的组成和变化.本文拟用时频分析法中常用的短时傅里叶变换对干涉信号进行分析.

短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT)的基本思想是通过将原始信号加一个随时间滑动的窗口函数的方法来对信号进行分段,再对每一段进行傅里叶变换,从而实现信号的时频局域分析.对于给定的非平稳信号  $s(t) \in L^2(\mathbb{R})$ ,其中  $L^2(\mathbb{R})$  表示平方可积的实数空间,信号  $s(t)$  的短时傅里叶变换定义为

$$\text{STFT}_s(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(\tau) h(\tau - t) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (7)$$

式中  $h(t)$  为窗函数.借助数值计算软件 Matlab 时频分析工具箱中的离散信号短时傅里叶变换函数 `tfrstft.m`,可以方便地实现对信号的处理.该函数具

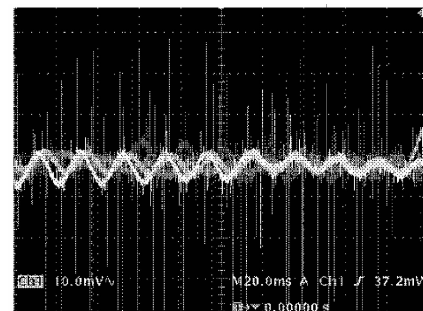
体调用格式<sup>[9-10]</sup>为

$$[\text{tfr}, t, f] = \text{tfrstft}(x, t, N, h, \text{trace}) \quad (8)$$

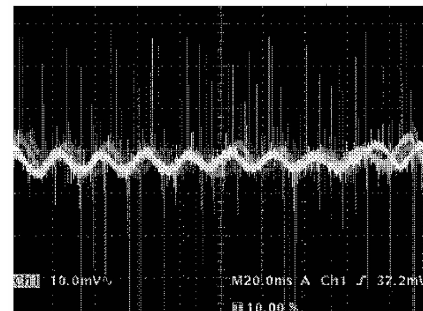
在输入参量中,  $N$  表示做变换的频率点数,  $h$  表示窗口函数,若  $\text{trace} \neq 0$ ,则跟踪算法过程.输出参量中,  $\text{tfr}$  返回信号的时频值(复数);  $t$  返回时间坐标 ( $1 : \text{length}(x)$ ),  $f$  返回归一化频率坐标 ( $-0.5 \sim 0.5$ ),当没有输出参量时,函数 `tfrstft` 自动调用 `tfrqview`,显示短时傅里叶变换模的平方.

## 2 实验结果及分析

利用图 1 所示实验装置对敲击目标镜产生的振动进行了测量,实验时环境温度为  $26.5^\circ\text{C}$ ,相对湿度为  $48\%$ ,获得的部分干涉信号如图 2.从图中可看出,本文搭建的 THz 干涉测量系统在  $1\text{ mm}$  厚纸板遮挡下仍可获得清晰的干涉信号,说明  $214.58\ \mu\text{m}$  波长的太赫兹波对纸制障碍物具有良好的透射性.为比较不同波长对测试的影响,还采用 Sifir-50 FPL 激光器发射的功率相同但波长为  $118.83\ \mu\text{m}$  的太赫兹波进行了相同测试,结果发现当用纸板遮挡时干涉信号几乎完全消失,这证实了我们已知的随着波长变短太赫兹波对障碍物的透射能力下降的结论.



(a) Without barriers



(b) With barriers

图 2 THz 干涉测振信号示波图

Fig. 2 Oscillogram of vibration measurement signal by THz interferometer

选取障碍物遮挡下的测试信号(即图 2(b))进行处理.首先对原始信号进行滤波以消除高频噪声的影响,滤波后的信号如图 3.

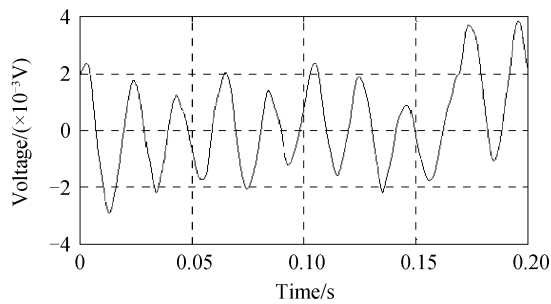


图3 滤波后的信号

Fig. 3 Signal after filtering

再利用实验中测得的参考光和信号光光强对应的示波图电压( $V_r$  和  $V_s$  分别为 4 mV 和 2 mV),将原始信号归一化为式(3)的形式,然后利用式(4)求得振动时程,结果如图 4.

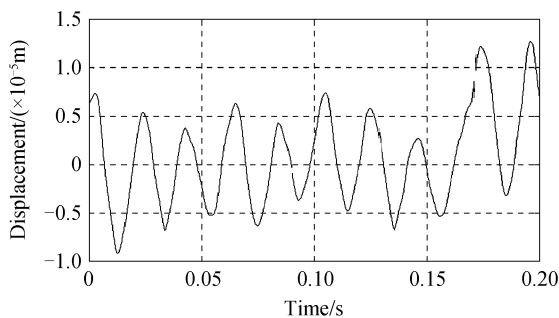


图4 测得的振动时程

Fig. 4 Measured vibration time-histories

比较图 4 和图 3 可看出二者波形非常相似,这说明在测量微小振动时干涉信号波形就直接反映了振动时程本身的波形.从图 4 中可得到振动的峰峰值振幅最小为  $7.98 \mu\text{m}$ ,最大为  $17.54 \mu\text{m}$ .利用式(6)可得到振动峰值速度约为  $2.7 \text{ mm/s}$ .

利用短时傅里叶变换对振动频率随时间的分布情况进行了分析,为获得更高的频率坐标分辨率,在变换前先用较低采样率对信号进行了重新采样,得到的振动时频分布如图 5.

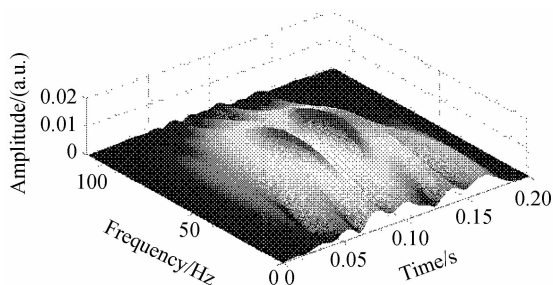


图5 振动时频分布

Fig. 5 Time-frequency distribution of vibration

从图中可清楚看出每一时刻振动频率的组成及其随时间的变化.对时频图进行简单分析可知,测得的振动信号频率是随时间不断变化的,而且在每一时刻振动频率的成份是单一的.对图 5 求每一时刻的峰值频率,即可得到振动频率随时间的变化,结果

如图 6.

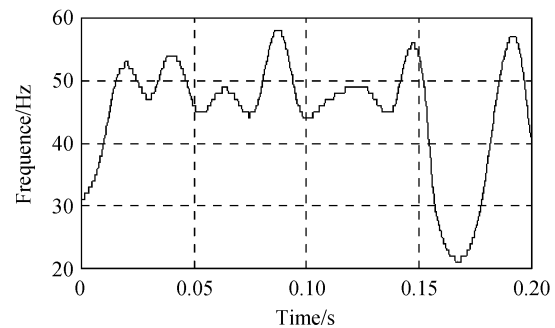


图6 振动频率随时间的变化

Fig. 6 Vibration frequency versus time

从图 6 中可看出在测量开始后 150 ms 以前振动频率一直在 50 Hz 附近变化,最大频率为 58 Hz;在 167 ms 处振动频率有一个明显下降,最小频率为 21 Hz,随后又逐渐升高.

以上实验结果证实了太赫兹技术用于障碍物后振动传感的可行性,但也应该看到,要使太赫兹干涉测量技术真正走向实用,还需要在诸如减小仪器体积、降低成本、提高工作便利性等等方面进行大量研究,这些相关工作将在今后研究中逐步开展.

### 3 结论

利用工作波长  $214.58 \mu\text{m}$  的太赫兹源搭建了一套基于迈克尔逊干涉仪结构的 THz 干涉测量系统,采用相位分析和频谱分析相结合的数据处理方法,成功实现了对薄纸板遮挡后目标微小振动的检测,测得的峰峰值振幅最小为  $7.98 \mu\text{m}$ ,最大为  $17.54 \mu\text{m}$ ,振动峰值速度为  $2.7 \text{ mm/s}$ ,振动频率最小 21 Hz,最大 58 Hz.研究结果表明 THz 干涉测量技术是一种简便有效的障碍物后振动传感的新手段,预示了 THz 技术在振动检测相关领域具有广阔的应用前景.

#### 参考文献

- [1] MITTLEMAN D M, CUNNINGHAM J, NUSS M C, *et al.* Noncontact semiconductor wafer characterization with the terahertz Hall effect[J]. *Appl Phys Lett*, 1997, **71**(1): 16-18.
  - [2] YAMAMOTO K, TOMINAGA K, SASAKAWA H, *et al.* Terahertz time-domain spectroscopy of amino acids and polypeptides[J]. *Biophys J*, 2005, **89**(1): L22-L24.
  - [3] JOHN F F, BRIAN S, HUANG F, *et al.* THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons and drugs[J]. *Semicond. Sci Technol*, 2005, **20**(9): S266-S280.
  - [4] KARPOWICZ N, ZHONG H, XU J, *et al.* Comparison between pulsed terahertz time-domain imaging and continuous wave terahertz imaging. *Semicond Sci Technol*, 2005, **20**(10): S293-S299.
  - [5] YAO Jian-quan, CHI Nan, YANG Peng-fei, *et al.* Study and outlook of terahertz communication technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, **36**(9): 2213-2233.
- 姚建全,迟楠,杨鹏飞,等.太赫兹通信技术的研究与展望

- [J]. 中国激光, 2009, **36**(9): 2213-2233.
- [6] JERRY C C, SUMANTH K. Terahertz interferometer that senses vibrations behind barriers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2007, **19**(7): 486-488.
- [7] WANG Li-min, ZHAO Xin, LIU Hong-tao, *et al.* Method of test data processing on microwave interferometer [J]. *Gun Launch & Control Journal*, 2004, **30**(4): 63-66.  
王黎民, 赵昕, 刘洪涛, 等. 微波干涉仪测试数据处理方法 [J]. 火炮发射与控制学报, 2004, **30**(4): 63-66.
- [8] XIAO Jian, LIU Bin, GUO Ya-long, *et al.* Signal processing of microwave interferometer based on Hilbert transform [J]. *J Detection & Control*, 2010, **32**(1): 80-83.  
肖剑, 柳斌, 郭亚龙, 等. 基于希尔伯特变换的干涉仪信号处理 [J]. 探测与控制学报, 2010, **32**(1): 80-83.
- [9] 葛哲学, 陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006: 57.
- [10] DUANE H, BRUCE L. Mastering matlab 7 [M]. ZHU Ren-feng. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 278.  
亨塞尔曼, 利特菲尔德. 精通 Matlab 7 [M]. 朱仁峰, 译. 北京: 清华大学出版社, 2006: 278.

## Study of Vibration Sensing Behind Barriers by Terahertz Interferometry

LIU Qiao, LI Ze-ren, MENG kun, QUAN Run-ai

(1 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

(2 College of Electronic Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

**Abstract:** In order to explore the feasibility of vibration sensing behind barriers by terahertz interferometry, a terahertz interferometer was built based on a Michelson interferometer and using 214.58  $\mu\text{m}$  CO<sub>2</sub> laser pumping gas THz source. Small vibrations behind a thin cardboard caused by knocking a target mirror was measured by the terahertz interferometer. With some data processing techniques such as phase analysis and spectrum analysis, vibration time-histories and time-frequency distribution were resolved. The maximum of measured peak-peak amplitude is 17.54  $\mu\text{m}$  and the minimum is 7.98  $\mu\text{m}$ . The calculated peak velocity is about 2.7 mm/s. The maximum and minimum of vibration frequency are 58 Hz and 21 Hz, respectively. The results show that terahertz interferometry is a convenient novel technique that senses vibrations behind barriers, and can effectively overcome disadvantages of conventional vibration sensors.

**Key words:** Terahertz; Vibration sensing; Interferometry