

基于频域滤波的 THz 图像条纹噪声处理

邹园园¹, 葛庆平¹, 韩煜¹, 沈兰溪¹, 张存林²

ZOU Yuan-yuan¹, GE Qing-ping¹, HAN Yu¹, SHEN Lan-xi¹, ZHANG Cun-lin²

1. 首都师范大学 信息工程学院, 北京 100037

2. 首都师范大学 物理系, 北京 100037

1. Department of Information Engineering College, Capital Normal University, Beijing 100037, China

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

E-mail: zouyy1983@163.com

ZOU Yuan-yuan, GE Qing-ping, HAN Yu et al. Stripe noise of THz image processing based on frequency filtering. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(17): 241-243.

Abstract: There is a tremendous prospect of THz imaging in the safety testing, medical research and nondestructive testing etc. In the research using CW THz imaging technology to debond in space shuttle insulating foam, the noise severely affects the future image processing. By analyzing the characteristics of the stripe noise of terahertz image, an algorithm based on that image projection of the spectrum automatically determines the frequency of noise is presented, which uses ButterWorth band stop filter to deal with the stripe noise. The result shows that stripe noise is removed and the image details are reserved.

Key words: THz; stripe noise; band stop filter; de-noising

摘要: 太赫兹在安全检查、医疗诊断、特别是在无损检测领域等方面都有广阔的应用前景, 在利用 0.2 THz 连续 CW 系统检测航天所用的燃料箱泡沫板隔离层的粘合效果研究中, 条纹噪声严重影响了图像的效果。针对这个问题, 分析了条纹噪声的特征, 提出了一种基于图像幅度谱的投影图自动确定噪声频率的算法, 利用 ButterWorth 带阻滤波器对 THz 图像中条纹噪声进行处理, 在滤除噪声的同时较好地保留了图像的细节信息。

关键词: 太赫兹; 条纹噪声; 频率选择; 带阻滤波器; 去噪

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.17.073 **文章编号:** 1002-8331(2009)17-0241-03 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

太赫兹波(简称THz波)是指频率在 $(0.1 \sim 10) \times 10^{12}$ Hz, 波长为 $30 \mu\text{m} \sim 3 \text{ mm}$ 的电磁波, 其波段在微波和红外光之间。由于 THz 波的独特性, 如在 THz 频率范围内, 很多相对可见光和红外光不透明的材料是近似透明的^[1], THz 波对活性组织的无损伤害性等, 使得 THz 波成像技术成为一种更安全、更有潜力的无损检测技术。连续 THz 波成像技术已发展了几十年, 在很多安全检测领域有广泛的应用。

自 2003 年哥伦比亚号的悲剧发生以来, 燃料箱泡沫隔离层的缺陷检测成为确保发射安全的关键, 由于泡沫隔离层质地疏松且绝热性较好, 利用常规的无损检测方法难以进行检测。而 THz 波对绝热泡沫材料有较好的穿透性, 所以可以利用 THz 波成像技术对绝热泡沫材料进行检测。但是在 THz 成像系统中存在大量的噪声, 这些噪声包括激光发射器产生的噪声^[2], 探测器产生的 Johnson 噪声, shot 噪声^[3]以及条纹噪声等。这些噪声的存在严重影响了在太赫兹图像上进行的后续研究工作, 因

此较好地抑制其中的噪声是太赫兹数据推广使用的前提之一。

目前主要从两方面降低 THz 信号中的噪声: (1) 通过改进 THz 成像装置和测量技术减少噪声, 诸如将样品置入低温恒温系统以降低温度带来的噪声, 优化 THz 成像光路中的各个细节来压低噪声, JAY A. SMALL 采用干涉测量法^[4]降低 THz 信号的噪声等。(2) 通过去噪算法处理采集到的带噪信号。这里主要讨论目前较为广泛的频域滤波在 THz 图像去噪中的应用。

1 条纹噪声的特征分析

1.1 条纹噪声的空域特征及其形成原因

以 THz 扫描成像的图片为例(图 1(c)), 此图是利用 0.2 THz 连续 THz 波成像系统检测的预先埋置缺陷的铝制泡沫板(图 1(a))^[5]。样品由燃料箱泡沫隔离层材料制成, 即通过发泡工艺在铝制底板上喷上约 20 mm 厚的泡沫材料, 设 4 个利用贴膜制备的人工预埋缺陷(图 1(b)), 即将金属箔粘贴在铝板表面, 使

基金项目: 北京市教委项目(No. KM200710028018)。

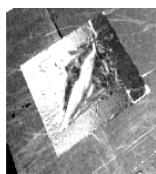
作者简介: 邹园园, 女, 硕士研究生, 主要方向为数字图像处理; 葛庆平, 男, 副教授, 主要从事计算机图形学、数字图像处理和计算机视觉方面的教学和研究; 韩煜, 女, 硕士研究生, 主要研究方向为多媒体技术、数字图像处理; 沈兰溪, 女, 本科, 主要研究方向为数字图像处理; 张存林, 男,

© 1994-2008 首都师范大学物理系教授、博士生导师 Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

收稿日期: 2008-05-14 修回日期: 2008-07-28



(a)样品照片



(b)人工缺陷试样



(c)系统无损检测的图像

图1 泡沫板人工缺陷检测

得泡沫材料与铝板有明显的脱粘。

通过对图1的观察分析,可以发现条纹噪声在空域中具有以下特征:

(1)条纹具有一定的方向性,在某个方向有较强烈的灰度变化。

(2)条纹噪声分布具有准周期性,明暗交替出现。这是由于样品只粘住了金属箔的四周,中间部分有空气,使金属箔发生了褶皱凸起。边缘部分和褶皱处发生散射导致反射回探测器中的能量相对较低(黑色区域)。

背景中的条纹为干涉条纹,主要是由入射到样品的光束和从铝制底板反射回的光束干涉而成,由于底板不是完全平整和光束难以完全正入射,条纹很难通过调整系统装置消除。

1.2 条纹噪声的频域分析

根据以上对 THz 图像空域特征的分析,可以得到这样的结论:THz 图像的条纹噪声成准周期水平方向的纹理分布。周期性的条纹噪声在频域中表现为具有对称性的一些峰值。图像中的水平条纹在傅立叶频域能量谱的竖轴上成峰值状态。同样,图像中的竖直条纹集中于傅立叶频域能量谱的水平轴上^[6]。

利用 MATLAB 对 THz 图像进行二维傅里叶变换得到其傅立叶频谱,如图2所示。在图2中可以清晰地看到,THz 图像中呈水平方向的纹理分布表现在频谱垂直方向的强度偏置明显,且垂直亮线上出现周期性的明亮突起,见图2中箭头所示。通过上面的分析也可以说太赫兹图像中的条纹噪声在频域中对应图像频谱中的明亮突起,因此去噪的关键就在于怎样准确地定位条纹噪声对应的频率点,然后采取合适的频域手段去除。

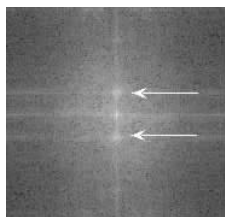


图2 THz 图像的频域空间

2 基于频谱分析的条纹噪声去除

为了达到理想的去噪效果,同时将去噪带来的图像信息损失降到最小,在频域中只需要将代表噪声的频域分量去除,其他部分保持不变。因此决定采用带阻滤波器对条纹噪声的频率点进行局部的频域带阻滤波。

常用的频域滤波器有理想带阻滤波器^[7], ButterWorth 带阻滤波器等。但是理想的带阻滤波器在实际的电子器件中是不可能实现的,而且使用这种非物理的理想滤波器,输出的图

像会产生明显的振铃效应,所以这里选用 ButterWorth 带阻滤波器。

通常,一个阶为 n , 截断频率为 D_0 , 带宽为 W 的 ButterWorth 带阻滤波器定义为:

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + \left(\frac{WD(u, v)}{D(u, v)^2 - D_0^2} \right)^{2n}} \quad (1)$$

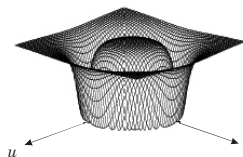


图3 ButterWorth 带阻滤波器透视图

ButterWorth 带阻滤波器在高低频间的过渡比较光滑,使用 ButterWorth 带阻滤波器得到的图像振铃效应不明显。

2.1 利用 ButterWorth 带阻滤波器对条纹噪声进行处理

把一幅图像变换到傅里叶频域空间后,其每个区域都代表着空间域中的某一特定成分。由于条纹噪声呈准周期性分布,根据前面的分析决定用 ButterWorth 带阻滤波器对它消除,即在傅里叶频域空间消除这种特定的噪声成分。

基于傅里叶变换的频域条纹噪声处理可以描述为如下3个步骤:

(1)将含有条纹噪声的原始图像进行二维快速傅里叶变换,得到频域能量分布;

(2)使用 ButterWorth 带阻滤波器同上一部得到的频域能量分布相乘,滤除频域空间中的条纹成分;

(3)对滤波后的频谱进行傅里叶逆变换,得到条纹去除后的空域图像。

2.2 频率的选择

在去噪过程中比较困难的问题是在 THz 图像的频谱图上准确地找到对应于条纹噪声的频率点,与 ButterWorth 带阻滤波器相对应的即为滤波器带阻频率范围的选择,这对滤波的效果起决定作用。基于条纹噪声频域分析的基础上,提出根据图像幅度谱的投影图来定位条纹噪声的频率点。

对于一幅大小为 $U \times V$ 的频域图像 $F(u, v)$, 设其行列数分别是 U 和 V , 可以定义其在列方向上的累积分布函数为:

$$s_D(v) = \sum_{u=1}^U F(u, v) \quad (2)$$

同样对于行方向上的累积分布函数为:

$$s_D(u) = \sum_{v=1}^V F(u, v) \quad (3)$$

图4是根据公式(2)、(3)对 THz 图像的频谱图计算出来的列方向和行方向上的累计分布函数图,他们的横轴分别对应的是行数和列数,纵轴分别对应的是列方向和行方向的灰度累加值。

因为周期性的条纹噪声,它们在频域中都表现为具有对称性,所以在图4(a)中找到箭头所示的峰值点 a , 它的横轴记为

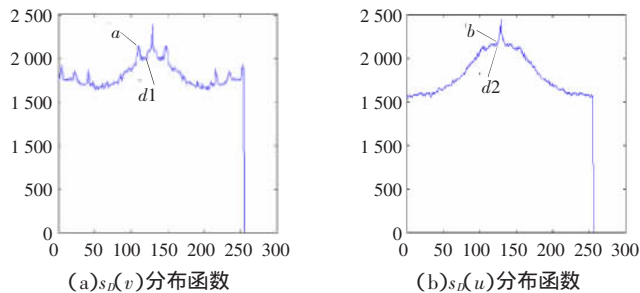


图4 分布函数

v 峰值点 a 离中心峰值左侧第一个谷底 $d1$ 的距离记为 $w1$, 同样在图 4(b) 中的峰值点 b 横轴记为 u , 峰值点 b 离中心峰值左侧第一个谷底 $d2$ 的距离记为 $w2$ 。

通过上面的算法,可以描述图 2 中所示的上面亮点的位置为 (u, v) , 取 $w1, w2$ 中最大的值作为构造的带阻滤波器的带宽, 带阻滤波器的截止频率 $D_0 = \sqrt{u^2 + v^2}$, 这就构造出所需要的带阻滤波器, 通过实验证实这种方法是可行的。

2.3 实验结果分析

通过上述算法对实际的 THz 图像进行频率、带宽选择, 确定 ButterWorth 带阻滤波器的各个参数。图 5 是通过 ButterWorth 带阻滤波器处理后的图像。

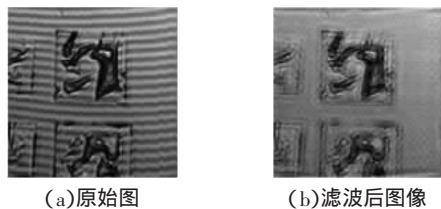


图5 滤波前后图像对比

从视觉效果上来看, 运用 ButterWorth 带阻滤波器对条纹噪声进行去除效果明显并且基本保持了原图像的特征。

为了客观上比较在条纹去除前后图像的质量, 选择了图像的列剖面线图形。选取图像中竖直方向上只存在条纹部分(本文选择 $x=60$ 处)。水平轴代表列的位置, 垂直轴代表像素的灰度值。图 6 以剖面线的形式比较了图像在条纹去除前后的变化。虚线代表原始图像, 实线代表滤波后的图像。

从图 6 中可以看出原始图像由于条纹的存在剖面线抖动非常严重, 滤波后的图像剖面图比较连贯, 而且保持了原有图像信号的结构。

取多幅不同的太赫兹图片作为实验对象, 分别进行噪声去

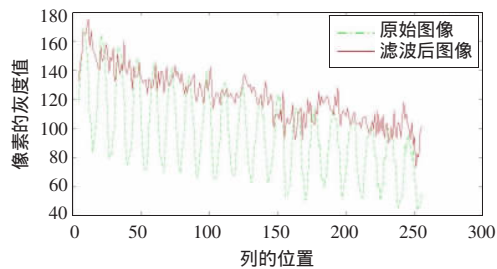


图6 滤波前后的列剖面线

除, 从实验结果当中可以看到, 在频率大小不同的条纹噪声下, 都可以得到比较理想的去噪效果, 条纹噪声基本上都被滤除了, 而且去噪图像和原图相比都比较清晰。

3 结束语

带阻滤波器是一种广泛应用于去除周期噪声的方法, 合适的截止频率对于图像的去噪结果起至关重要的作用。针对太赫兹图像条纹噪声的特点, 提出了一种基于图像幅度谱的投影图自动确定噪声频率的算法, 利用 ButterWorth 带阻滤波器对 THz 图像中的条纹噪声进行去除。从实验结果中可以看到, 该方法能较好地去除太赫兹图像中存在的不同频率的条纹噪声, 同时有效地保持图像的细节信息。

参考文献:

- [1] Zhao G, Mors M, Wenckebach T et al. Terahertz dielectric properties of polystyrene foam[J]. JOSA, 2002, B(19): 1476-1479.
- [2] Poppe A, Xu L, Krausz F et al. Noise characterization of sub-10-fs Ti:sapphire oscillators[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1998, 4: 179-184.
- [3] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J et al. Influence of noise on the characterization of materials by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of America B: Optical Physics, 2000, 17: 452-461.
- [4] Small J A. Noise reduction in THz-TDS dielectric characterization of thin films with THz interferometry[D]. 2004: 20-24.
- [5] 周燕, 牧凯军, 张艳东等. 燃料箱泡沫板的连续太赫兹波无损检测[J]. 无损检测, 2007, 29(5): 266-267.
- [6] Huang P S, Su S C, Tu T M. A destriping and enhancing technique for EROS remote sensing imagery[J]. Journal of C C I T, 2004, 32(2): 1-14.
- [7] 冈萨雷斯. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 译. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2003: 194-195.
- [9] Lalor G C, Zhang C. Multivariate outlier detection and remediation in geochemical databases[J]. The Science of the Total Environment, 2001, 28(1): 99-109.
- [10] The Professional Hockey Server[EB/OL]. <http://moo.hawaii.edu/~u:1749/hockey/hockey.html>.
- [11] 陆声链, 林士敏. 基于距离的孤立点检测及其应用[J]. 计算机与数字工程, 2004, 32(5): 94-97.

(上接 141 页)

- [7] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2007: 177.
- [8] Jackson D A, Yong C. Robust principal component analysis and outlier detection with ecological data[J]. Environmetrics, 2004, 15(2): 129-139.