

引用格式: 丁一鸣, 毕东杰, 涂明武, 等. 面向无损检测的近场 30~40 GHz 毫米波相位成像方法 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(3): 362-368.
DING Y M, BI D J, TU M W, et al. Near-field 30 to 40 GHz millimeter-wave phase imaging method for non-destructive testing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(3): 362-368.

面向无损检测的近场 30~40 GHz 毫米波相位 成像方法



丁一鸣¹, 毕东杰^{1*}, 涂明武², 李西峰¹, 彭礼彪¹, 唐宇¹, 谢永乐¹

(1. 电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731; 2. 空军工程大学 航空机务士官学校, 信阳 464000)

摘要: 毫米波因在近场具有较强的物体穿透能力和优异的空间分辨率, 在航空航天高强度低密度隔热抗腐蚀吸波的复合材料无损检测领域引发了广泛关注。主动反射式毫米波成像主要利用近场毫米波与物体的反散射效应来反演被测物体的特征。目前已有的近场毫米波成像方法主要利用毫米波能量衰减效应重构被测物体的图像, 而该文将相位成像与近场毫米波成像相结合, 利用毫米波与物体的相位效应进一步扩展面向无损检测的近场高精度成像方法。提出的近场毫米波相位成像方法首先利用基于球面波分解的近场二维合成孔径算法来反演被测物体反射率的相位主值数据, 然后通过近场相位展开算法重构被测物体的高精度绝对相位图像。为了验证该方法的可行性, 对金属遮蔽、材料夹层、聚四氟乙烯、石英陶瓷和氮化硅试块进行了实测, 测试结果表明 30~40 GHz 毫米波近场相位成像方法可以有效检测半径为 2 mm 的缺陷。

关键词: 无损检测; 合成孔径雷达; 近场毫米波成像; 相位成像; 相位展开

中图分类号: TP751 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2023237

Near-field 30 to 40 GHz millimeter-wave phase imaging method for non-destructive testing

DING Yiming¹, BI Dongjie^{1*}, TU Mingwu², LI Xifeng¹, PENG Libiao¹, TANG Yu¹, and XIE Yongle¹

(1. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China;

2. Air Force Engineering University Aviation Maintenance, NCO Academy, Xinyang 464000, China)

Abstract: Millimeter-wave imaging technology has garnered significant attention in the aerospace industry for non-destructive testing of composite materials that are high-strength, low-density, heat-insulating, corrosion-resistant, and wave-absorbing. This is due to millimeter-wave exceptional object penetration capability and high spatial resolution in the near field. The imaging technique known as active reflective millimeter-wave imaging primarily utilizes the backscattering effect of near-field millimeter waves and objects to generate a high-precision image of the object under test. The imaging technique demonstrates its characterization capability primarily in two aspects: the inversion amplitude reflects the energy attenuation effect of the interaction between millimeter waves and objects, while the inversion phase characterizes the phase effect of the interaction between millimeter waves and objects. Current methods for near-field millimeter-wave imaging primarily rely on the attenuation effect of millimeter-wave energy to reconstruct the image of the object under test. This paper proposes combining phase imaging with near-field millimeter-wave imaging to enhance the precision of near-field imaging for non-destructive testing by utilizing the millimeter-wave object phase effect. The method proposed for near-field millimeter-wave phase imaging involves using a near-field two-dimensional synthetic aperture algorithm based on spherical wave decomposition to invert the phase principal value data of the reflectivity of the object under test. This is followed by reconstructing the high-precision absolute phase image of the object under test using a near-field phase expansion algorithm. Real tests were conducted on various specimens, including a metal mask, material sandwich, PTFE, quartz ceramic, and silicon nitride, to assess the feasibility of this method. The results indicate that the millimeter-wave near-field phase imaging method operating at 30 GHz to 40 GHz can effectively detect defects

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 国家自然科学基金 (62027803, 61601096, 61971111, 61801089, 61701095)

作者简介: 丁一鸣, 主要从事近场毫米波成像方面的研究。

*通信作者 E-mail: bidongjie@uestc.edu.cn

with a radius of 2 mm.

Key words: non-destructive testing; synthetic aperture radar; near-field millimeter wave imaging; phase imaging; phase unwrapping

随着复合材料在航空航天等领域应用越广泛, 针对复合材料的无损检测技术蓬勃发展。毫米波在近场具有较强的物体穿透能力^[1]和优异的空间分辨率, 因此近场毫米波成像技术在无损检测领域引起了广泛关注^[2-7]。

当前的近场毫米波无损检测技术主要是基于主动反射式的毫米波天线发送一定频段和能量的电磁波到被测物体, 同时通过天线接收到物体的反散射数据, 并在此基础上根据毫米波能量衰减效应来反演被测物体的高精度图像。目前, 近场毫米波无损检测领域的研究主要集中在加快成像速度和提高分辨率方面。文献 [6-7] 提出了基于压缩感知的近场毫米波的成像方法, 有效地提高了二维近场合孔径毫米波的成像速度。文献 [8] 提出了超分辨率成像方法, 通过超分辨算法将低分辨率的图像重建为高分辨率的图像。由于复合材料类型和应用场景复杂多样, 因此需要更多的近场毫米波成像方法从不同维度反演被测物体的图像。

相位成像技术广泛应用于远场干涉合成孔径雷达和核磁共振等领域。在远场干涉合成孔径雷达中, 通过利用两个相干雷达测试地表相位数据, 由于其差分与地表高度密切, 因此可以基于干涉条纹重建地表高度图像^[9]。在核磁共振领域, 通过利用水脂质子同相位数据和反相位数据, 来反演二者的分离图像^[10]。而在近场情况下, 相位成像方法缺乏相关研究。

在近场情况下, 毫米波和物体相互作用的表征主要体现在两个方面: 反演幅值表现的是毫米波与物体相互作用时的能量衰减效应, 而反演相位则体现毫米波与物体相互作用的时间延迟效应。

针对近场毫米波成像技术的发展需求, 本文提出将相位成像技术和近场毫米波成像技术相结合, 进一步扩展近场毫米波成像方法。相较于目前的近场毫米波成像技术, 本文提出的 30~40 GHz 近场毫米波相位成像通过反演毫米波与物体作用的相位来反演被测物体的高精度图像。

1 近场毫米波二维合成孔径模型

二维近场合孔径成像模型如图 1 所示, 天线探头发射电磁波信号, 并接收被测物体反散射的电磁波信号。天线接收的反散射数据 $s(u_0, v_0)$ 是波与

物体相互作用的反射率以及毫米波在 z 方向往返相位变化乘积的叠加:

$$s(u_0, v_0) = \iint f(u, v, z_0) \times \exp[-j2k \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2 + z_0^2}] dudv \quad (1)$$

式中, $f(u, v, z_0)$ 为表征反散射率的复函数; $k = \omega/c$ 为波数; 式 (1) 中指数部分表示的是从 (u_0, v_0, z_0) 发出的球面波, 其可以分解为一系列平面波的叠加^[6]:

$$e^{-j2k \sqrt{(u-u_0)^2 + (v-v_0)^2 + z_0^2}} = \iint e^{jk'_u(u-u_0) + jk'_v(v-v_0) + jk'_z z_0} dk'_u dk'_v \quad (2)$$

将式 (2) 带入式 (1) 中可得:

$$s(u_0, v_0) = \iint \left[\iint \int f(u, v, z_0) e^{-j(k'_u u + k'_v v)} dudv \right] \times e^{j(k'_u u_0 + k'_v v_0 + k'_z z_0)} dk'_u dk'_v \quad (3)$$

式 (3) 去掉下标, 带入二维离散傅里叶变换公式, 则有:

$$s(u, v) = \iint \left[\mathcal{F}_{2D}\{f(u, v, z_0)\} e^{jk_z z_0} \right] \times e^{j(k_u u + k_v v)} dk_u dk_v \quad (4)$$

根据二维傅里叶逆变换公式, 有:

$$f(u, v, z_0) = \mathcal{F}_{2D}^{-1}\{\mathcal{F}_{2D}\{s(u, v)\} e^{-jk_z z_0}\} \quad (5)$$

由电磁波的反散射关系^[11]如下:

$$4k^2 = k_u^2 + k_v^2 + k_z^2 \quad (6)$$

可得近场 2DSAR 成像模型:

$$f(u, v, z_0) = \mathcal{F}_{2D}^{-1}\left(\mathcal{F}_{2D}(s(u_0, v_0)) e^{j\sqrt{4k^2 - k_u^2 - k_v^2} z_0}\right) \quad (7)$$

式中, \mathcal{F}_{2D} 和 \mathcal{F}_{2D}^{-1} 为空间二维傅里叶变换和逆变换。

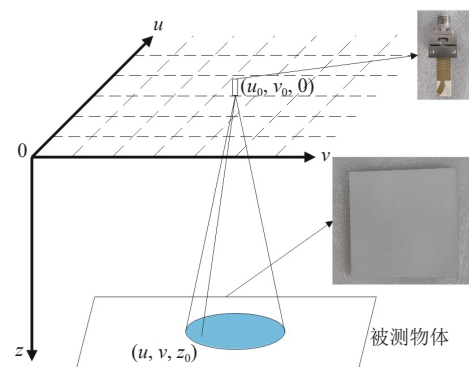


图 1 近场毫米波二维合成孔径模型

2 近场毫米波相位成像算法

基于近场毫米波二维合成孔径模型获取的反射率为复数数据, 其可以转化为幅值相位形式, 如式 (8) 所示。反射率的幅值表现的是波的能量衰减效应, 而波与物体的相互作用同时也表现为相位效应。由于波与物体的相位效应在不同材料、不同结构表现不同, 因此, 可以通过对该相位效应的反演对样本进行无损检测。

$$f(u, v, z_0) = |f(u, v, z_0)| \exp(j\psi(u, v, z_0)) \quad (8)$$

通过对反射率数据运算可以获取相位数据。然而, 通过对复数数据计算获取的相位数据 ψ 被包裹在 $(-\pi, \pi]$ 范围内, 称为相位主值, 是非线性数据。其与绝对相位 ϕ 的关系为:

$$\psi = \phi \pm 2k\pi \quad \psi \in (-\pi, \pi], k \in N \quad (9)$$

重构图像需要将其展开为绝对相位数据。图 2 展示了一维情况下的绝对相位和相位主值的关系。而相位展开的目标是从相位主值数据中获取绝对相位数据, 这个过程被称为相位展开^[12-13]。

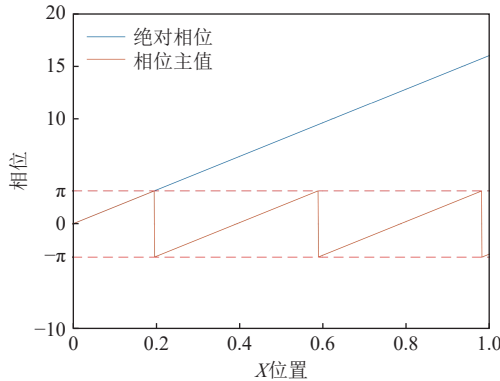


图 2 相位主值和绝对相位关系图

在实际情况下, 相位噪声的存在不仅会干扰相位展开过程, 还会影响成像结果的质量。因此, 在进行相位展开之前, 需要对相位主值数据进行滤波处理。

2.1 近场毫米波相位展开

相位展开的方法主要分为两大类: 基于范数的方法^[13]和基于路径展开的方法^[14]。路径展开的方法首先通过一些算法平衡残差, 使得展开结果唯一, 之后基于 Itoh 算法^[15]避开分支切割进行相位展开。而范数的方法, 则基于最小化相位主值梯度和绝对相位梯度差的 ℓ_p 范数的方式, 使得残差对结果影响最小。在近场情况下, 考虑到毫米波波长较长以及近场二维合成孔径聚焦的效果, 基于连续性假设的最小化范数的方法往往会获得比路径展开的方

法更好的结果。

对于一个长 M 、宽 N 的二维数据, 考虑一个广义误差范数, 最小化绝对相位梯度和相位主值梯度差的 ℓ_2 范数如下式:

$$J = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} |\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^x|^2 + \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} |\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \Delta_{i,j}^y|^2 \quad (10)$$

式中, $\Delta_{i,j}^x$ 和 $\Delta_{i,j}^y$ 为相位主值水平和垂直差分, 在相位展开过程中为已知数据; ϕ 为绝对相位。

考虑其平稳条件, 取式 (10) 差分为零:

$$\delta J = p(a_1 + a_2) = 0 \quad (11)$$

式中, a_1 和 a_2 为:

$$a_1 = \sum_{i=0}^{M-2} \sum_{j=0}^{N-1} (\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \delta_{i,j}^x)(\delta\phi_{i+1,j} - \delta\phi_{i,j})$$

$$a_2 = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-2} (\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \delta_{i,j}^y)(\delta\phi_{i,j+1} - \delta\phi_{i,j}) \quad (12)$$

假设边界条件下系数为零, 对 $\delta\phi_{i+1,j}$ 和 $\delta\phi_{i,j+1}$ 进行系数平移处理, 使二者出现公共项:

$$a_1 = - \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} ((\phi_{i+1,j} - \phi_{i,j} - \delta_{i,j}^x) - (\phi_{i,j} - \phi_{i-1,j} - \delta_{i-1,j}^x)) \delta\phi_{i,j}$$

$$a_2 = - \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} ((\phi_{i,j+1} - \phi_{i,j} - \delta_{i,j}^y) - (\phi_{i,j} - \phi_{i,j-1} - \delta_{i,j-1}^y)) \delta\phi_{i,j} \quad (13)$$

联合式 (11) 和式 (13), 得:

$$\phi_{i+1,j} + \phi_{i-1,j} + \phi_{i,j+1} + \phi_{i,j-1} - 4\phi_{i,j} = \rho_{i,j} \quad (14)$$

式中, $\rho_{i,j}$ 为已知量:

$$\rho_{i,j} = (\Delta_{i,j}^x - \Delta_{i-1,j}^x) + (\Delta_{i,j}^y - \Delta_{i,j-1}^y) \quad (15)$$

将 $\phi_{i,j}$ 和 $\rho_{i,j}$ 转化为一维列向量, 则有:

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{A}\boldsymbol{\phi} \quad (16)$$

式中, \mathbf{A} 为稀疏常数方阵; $\boldsymbol{\rho}$ 为已知列向量。

对式 (16) 使用高斯塞得迭代 (Gauss-Seidel relaxation)^[9] 可以取得绝对相位 ϕ 的估计。

2.2 近场毫米波相位主值滤波

由于相位主值数据是非线性的, 直接对相位数据进行存在很多问题, 如 π 和 $-\pi$ 两个数据的均值应当为 π 和 $-\pi$ 而不是 0。因此, 应对复数数据进

行滤波而不能直接对相位主值数据滤波,以保证数据的连续性。直接对相位主值数据进行滤波会出现更多的间断点,这对相位展开是致命的^[16]。

如1个 $k \times k$ 窗口大小的均值滤波器,对于像素点 (M,N) ,滤波结果为以 (M,N) 为中心的 $k \times k$ 像素点的均值,直接对相位数据进行滤波,形式为:

$$\psi'_{m,n} = \text{mean}(\psi_{i,j}) \quad (17)$$

考虑到相位主值数据的特殊性,其复数均值滤波器形式^[9]为:

$$\psi'_{i,j} = \arctan\left(\frac{\sum \sin(\psi_{i,j})}{\sum \cos(\psi_{i,j})}\right) \quad (18)$$

取一组聚四氟乙烯材料实测的相位数据,如图3所示。对其直接相位均值滤波和对复数均值滤波处理,结果如图4所示,具体为图4a相位均值滤波和图4b复数均值滤波所示。

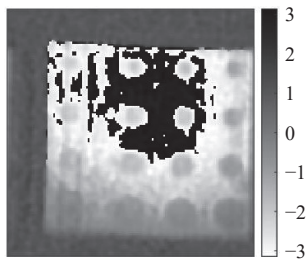


图3 30 GHz圆孔聚四氟乙烯试块相位主值数据

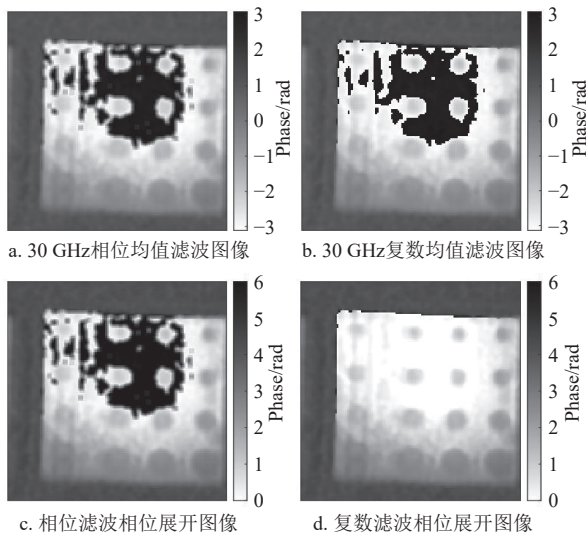


图4 30 GHz聚四氟乙烯试块均值滤波和绝对相位图像

由图可见,对相位直接处理的均值滤波器消除噪声效果较差,并且会导致被测物体边缘模糊,在边界区域产生了更多不连续。对复数处理的均值滤波器滤波结果则较好地保留了边界,并对高斯噪声有一定的消除效果。因此对于相位数据滤波,需要对复数数据而不是相位数据进行处理以免产生更多

间断点。

图4c为对相位均值滤波后的数据进行相位展开算法的结果,可见使用对相位直接处理的滤波器会对相位展开造成严重影响,图4d对复数数据处理的滤波器则没有该缺陷。

3 实验测试

3.1 实验测试环境

本文搭建的近场毫米波成像系统工作在30~40 GHz,频率扫频点数1 001,在X方向和Y方向以1 mm步进对物体进行扫描,平面扫描范围为 128×128 mm,通过采集反散射数据获取1 001组大小为 128×128 的二维复数数据。

3.2 金属遮蔽测试实验

为验证本文提出的近场毫米波相位成像方法在有遮蔽情况下的可行性,以金属试件和纸板为实例验证相位成像方法。天线位于被测物体上方22 mm处。

被测物体如图5所示的不锈钢材料,在金属片上下各放置一个纸板模拟遮蔽情况,以验证毫米波相位成像方法在有遮蔽情况下的重构效果。

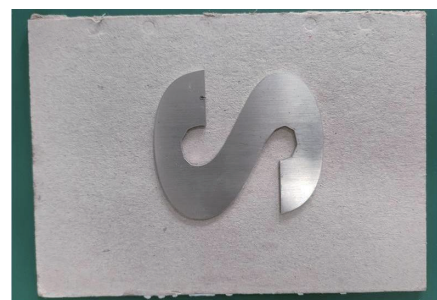


图5 金属遮蔽测试件

图6为利用单频30 GHz的数据进行相位成像方法重建的遮蔽图像,可见相位成像方法成功的重建出了金属材料图像,并且被测物体边缘清晰明显。因此,验证了所提出的毫米波相位成像方法可以穿透纸质材料测试其内部效果,在有遮蔽情况下仍有良好的反演能力。



图6 30 GHz金属遮蔽单频相位重建图像

3.3 夹层测试实验

夹层测试板如图 7 所示, 在纸板中心位置内部预置了 $20 \times 20 \times 0.5$ mm 聚四氟乙烯薄膜。相比于金属样本, 聚四氟乙烯样本的反射率较弱, 通过该实验测试相位成像方法对纸板的非金属聚四氟乙烯材料夹层检测效果。天线位于被测物体上方 13 mm 处。

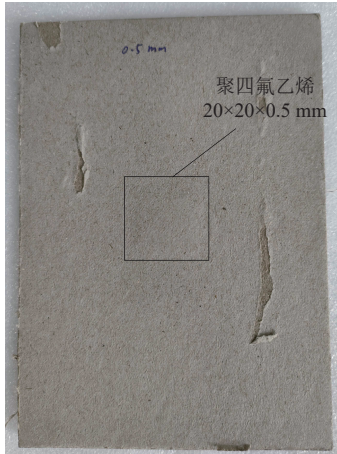


图 7 夹层测试版

经过相位算法重构的图像如图 8 所示, 可见所提出的相位成像方法清晰地识别了内置缺陷。聚四氟乙烯内置缺陷的边缘清晰明了, 并且其大小和位置与预置缺陷一致。由图可见, 相位数据有一个从左到右的下降趋势, 这是由被测试件放置倾斜导致的。

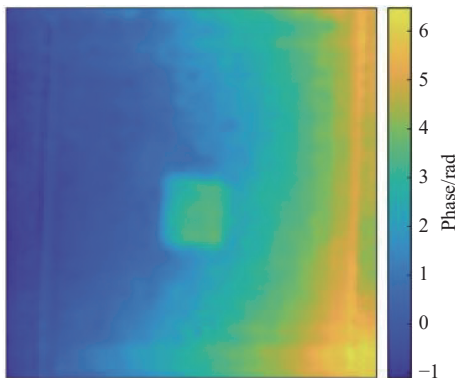


图 8 30~40 GHz 夹层多频均值相位重建图像

3.4 聚四氟乙烯试件实验

聚四氟乙烯材料作为一种性能优良的工程塑料, 具有抗强酸、强碱、油脂、纯氧化剂和有机溶剂等腐蚀的特点^[17], 被广泛应用于各个行业。以聚四氟乙烯材料为实例, 验证相位成像方法对聚四氟乙烯材料无损检测的可行性。

被测实物如图 9 所示, 参考测试块研制方法^[18]制作夹层被测试块, 其大小为 $100 \times 100 \times 4$ mm 的聚

四氟乙烯板, 将其缺陷背面与 $100 \times 100 \times 1$ mm 的聚四氟乙烯板黏合。测试天线位于物体上方 22 mm。

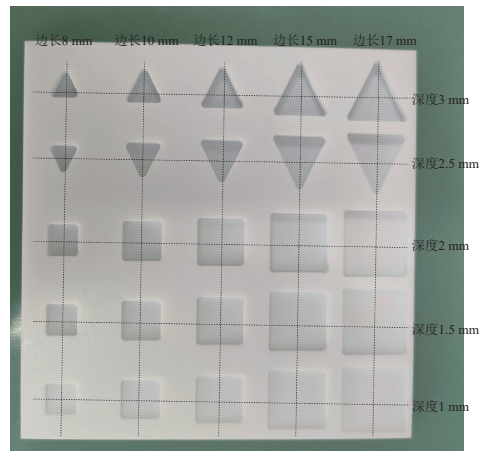


图 9 聚四氟乙烯试块

对单频 30 GHz 的数据进行处理, 如图 10 所示。利用基于幅值的近场毫米波成像技术重建图像如图 10a 所示, 可见其重建出了被测材料内部的 16 个缺陷孔, 但是在单频情况下, 其噪声影响非常严重。

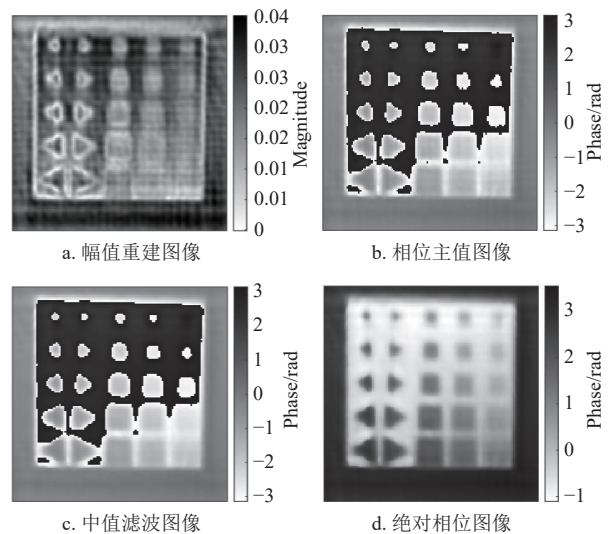


图 10 30 GHz 聚四氟乙烯单频图像重建

其相位主值数据图像如图 10b 所示, 在物体内部黑白交界位置就是相位在 $-\pi$ 和 π 交界处, 其两侧被包裹的周期数不同导致其形成间断。需要进行相位展开处理获取最后的结果。

采用一个窗口大小为 3×3 的中值滤波器进行降噪处理, 其结果如图 10c 所示, 观测其圆孔外侧和背景位置, 该滤波方法对噪声有优化作用。通过对降噪的数据最小化 l_2 范数的方法相位展开, 其结果如图 10d 所示。

以上为30 GHz频率进行处理的结果,对于多频段通过综合处理,可以获取一个效果更好的图像。通过对采集的30~40 GHz频率范围的1 001组数据进行处理,多频均值成像结果如图11所示。

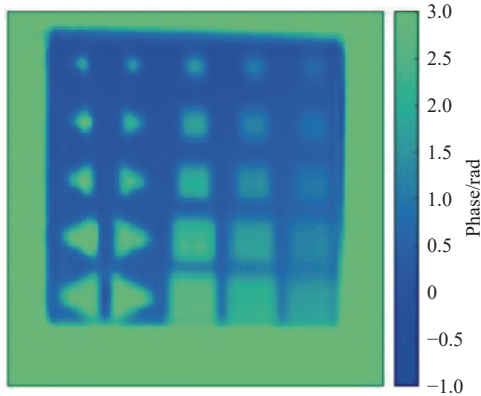


图11 30~40 GHz聚四氟乙烯多频均值相位重建图像

相位重建的图像有非常清晰的边缘轮廓,很好地重建了聚四氟乙烯图像,并且可以穿透被测材料,测试出16个圆孔缺陷。同时,相位对噪声相对不敏感,单频的相位重建图像也有较好效果。对于不同深度缺陷,其表示出的特征不同。同时,反演的被测物体表面平滑,可见相位成像方法对聚四氟乙烯类材料表现良好,不同深度的缺陷体现出不同的相位,通过预先测算的关系,可以对缺陷进行有效地估计。

3.5 石英陶瓷和氮化硅试件实验

氮化硅陶瓷和石英陶瓷具有热稳定性好等优点,因此二者在航空领域皆有广泛应用。以石英陶瓷和氮化硅材料为例,验证本文提出的相位成像算法对该材料的无损检测效果。

被测实物如图12所示,80×80 mm石英陶瓷材料和氮化硅材料,其制作参考试块研制方法^[18]制作挖底孔缺陷,模拟真实情况下的分层脱粘类的空气腔效果,其内部预置相比聚四氟乙烯试块更小的缺陷。最右侧缺陷直径为2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 mm。

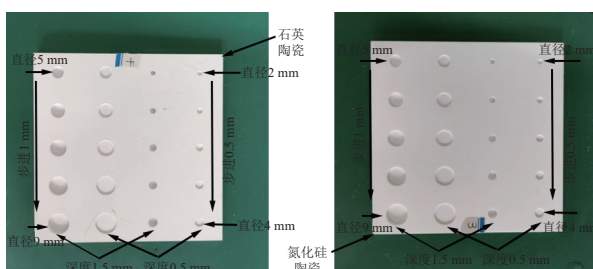


图12 石英和氮化硅陶瓷试块

石英试块反演图像如图13a所示,氮化硅试块反演图像如图13b所示。可见,对于氮化硅和石英陶瓷,相位成像有效地识别了被测物体轮廓,并识别出了最小为2 mm的内部缺陷。

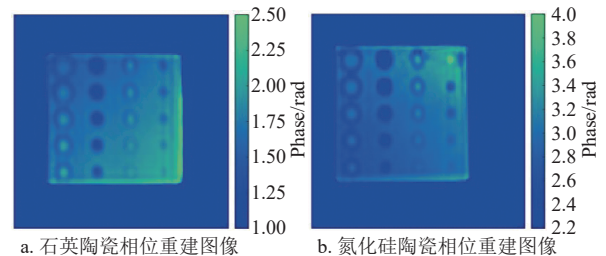


图13 30~40 GHz石英和氮化硅陶瓷多频均值相位重建图像

从重构图像可以看出,深度为0.5 mm的圆孔缺陷表现为实心圆,而深度为1.5 mm的缺陷表现为空心圆,这是由近场合成孔径的聚焦距离导致的。

上述实测实验结果表明,本文提出的30~40 GHz近场毫米波相位成像方法,在扫频点为1 001,步进精度为1 mm,天线高度为20 mm和扫描范围128×128 mm的实测环境下,可对遮蔽模拟、夹层模拟、聚四氟乙烯材料、石英陶瓷和氮化硅陶瓷材料进行高精度反演成像,能够有效检测直径为2 mm及以上的缺陷。

4 结束语

针对无损检测领域对近场毫米波成像方法的需求,本文将相位成像方法与近场毫米波成像相结合,扩展了近场毫米波相位成像的方法。该方法利用近场毫米波相位成像技术获取相位主值数据,并通过滤波和相位展开来去除噪声并获取准确的绝对相位图像。通过在遮蔽模拟、夹层模拟、聚四氟乙烯以及氮化硅和石英陶瓷材料上进行测试,验证了所提出的近场毫米波相位成像技术在实测环境下对样本成像的有效性以及其在无损检测中的应用潜力。本方法对无损检测具有参考意义。

参考文献

- [1] 李良超,杨建宇,郑鑫,等.无源毫米波超分辨算法及实时性研究[J].电子科技大学学报,2009,38(6):952-956.
LI L C, YANG J Y, ZHENG X, et al. Research on passive millimeter wave image super-resolution algorithm and real-time implementation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009, 38(6): 952-956.
- [2] ULLMANN I, ADAMETZ J, VOSSIEK M. SAR based non-destructive evaluation of irregularly shaped objects

- with simultaneous estimation of geometry and permittivity[C]//2019 16th European Radar Conference (EuRAD). Paris: [s.n.], 2019: 213-216.
- [3] OSTADRAHIMI M, ZAKARIA A, LOVETRI J, et al. A near-field dual polarized (TE-TM) microwave imaging system[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2013, 61(3): 1376-1384.
- [4] ULLMANN I, EGERER P, SCHÜR J, et al. Automated defect detection for non-destructive evaluation by radar imaging and machine learning[C]//2020 German Microwave Conference (GeMiC). Cottbus: [s.n.], 2020: 25-28.
- [5] FELBECKER R, KEUSGEN W, KORTKE A, et al. Estimation of effective permittivity and effective thickness of inhomogeneous materials at 52-70 GHz[C]//3rd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). [S. l.]: IEEE, 2009: 3883-3885.
- [6] 毕东杰. 近场合孔径雷达 (SAR) 成像系统中压缩感知应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- BI D J. Application research of compressive sensing in near-field synthetic aperture radar (SAR) imaging system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015.
- [7] 高乐, 毕东杰, 彭礼彪, 等. 基于 GAMP 的近场毫米波成像快速算法[J]. *电子科技大学学报*, 2019, 48(2): 168-173.
- GAO L, BI D J, PENG L B, et al. Fast near-field millimeter-wave imaging algorithm via generalized approximate message passing[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2019, 48(2): 168-173.
- [8] LYU J, BI D J, LI X F, et al. Super-resolution image reconstruction of compressive 2D near-field millimetre-wave[J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(19): 978-980.
- [9] GHIGLIA D C, PRITT M D. Two-dimensional phase unwrapping: Theory, algorithms, and software[M]. New York: Wiley, 1998.
- [10] SZUMOWSKI J, COSHOW W R, LI F, et al. Phase unwrapping in the three-point Dixon method for fat suppression MR imaging[J]. *Radiology*, 1994, 192(2): 555-561.
- [11] SOUMEKH M. Synthetic aperture radar signal processing with Matlab algorithms[J]. *Frequenz*, 2001, 55(3/4): 96-101.
- [12] MARTINEZ-ESPLA J J, MARTINEZ-MARIN T, LOPEZ-SANCHEZ J M. Using a grid-based filter to solve InSAR phase unwrapping[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(2): 147-151.
- [13] STRAND J, TAXT T, JAIN A K. Two-dimensional phase unwrapping using a block least-squares method[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1999, 8(3): 375-386.
- [14] ABDUL-RAHMAN H S, GDEISAT M A, BURTON D R, et al. Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(26): 6623-6635.
- [15] ITOH K. Analysis of the phase unwrapping algorithm[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(14): 2470.
- [16] MENG D, SETHU V, AMBIKAI RAJAH E, et al. A novel technique for noise reduction in InSAR images[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2007, 4(2): 226-230.
- [17] 左程, 肖伟. 聚四氟乙烯改性现状及研究进展[J]. *合成树脂及塑料*, 2022, 39(4): 70-76.
- ZUO C, XIAO W. Modification status and research progress of PTFE[J]. *China Synthetic Resin and Plastics*, 2022, 39(4): 70-76.
- [18] 詹绍正, 王丹, 宁宁. 航空复合材料结构无损检测对比试块的研制[J]. *无损检测*, 2021, DOI:10.11973/wsjs202111012.
- ZHAN S Z, WANG D, NING N. Development of comparative test blocks for non-destructive testing of aerospace composite structures[J]. *Non-Destructive Testing*, 2021, DOI:10.11973/wsjs202111012.

编辑 叶芳