

基于车载毫米波雷达的物体缺陷 成像方法*

王俊林^{1,2},李平^{1,2},王鑫^{1,2}

(1. 内蒙古大学电子信息工程学院,呼和浩特 010070; 2. 内蒙古自治区智慧通信感知与信号处理
重点实验室,呼和浩特 010070)

摘要:现代工业对物体无损检测的精度与成本提出更高要求,然而传统检测方式均存在一定的局限性。微波成像中的近场合成孔径雷达(Synthetic aperture radar, SAR)成像技术,因其具有无接触和高分辨率等优点成为无损检测的研究热点。得益于自动驾驶的兴起,车载毫米波雷达凭借较低成本逐渐应用于近场SAR成像无损检测,但现有方法大多侧重于二维成像,对于目标三维重构研究略显不足。针对这一问题,基于近似小斜视距离-多普勒算法(Range-doppler algorithm, RDA)间接三维成像方法,通过推导平面扫描阵列下的斜距近似模型,利用距离向解耦特性执行逐距离门二维聚焦,最后堆叠二维结果获取目标的三维散射强度分布。为验证该方法对物体形状及缺陷的表征能力,分别对塑料柄金属剪刀及顶部带有 $42\text{ mm}\times 4.5\text{ mm}$ 孔洞的金属支架进行测试实验。结果显示,三维重构能较好地还原剪刀及支架的整体几何轮廓。进一步对支架三维散射强度分布进行切面分析,测得支架孔洞尺寸约为 $41\text{ mm}\times 4\text{ mm}$,长度与宽度误差分别为 1 mm 和 0.5 mm 。实验证明了该方法能够反映缺陷的空间位置与尺寸特征,在低成本工业无损检测中具有一定的应用可行性。

关键词:车载毫米波雷达; SAR成像技术; 距离-多普勒算法(RDA)

中图分类号: TN957.52 **文献标志码:** A

随着现代工业的快速发展,物体在加工、运输及使用过程中容易产生细微甚至难以用肉眼识别的缺陷^[1],若未能及时检测可能导致安全隐患。微波因具备良好的材料穿透性、无需耦合介质等优势,成为无损检测领域的热门研究方向^[2-3]。近场条件下, SAR利用平台运动形成虚拟孔径,实现高分辨率成像^[4],是微波成像无损检测中的重要分支^[5]。早期研究主要集中于低频微波, Franchois等^[6]采用SAR探测混凝土内部钢筋,验证了其在强散射介质中的可用性。Takahashi等^[7]进一步将频段拓展至 $1\sim 6\text{ GHz}$ 并实现混凝土墙内部损伤无损检测。上述工作受限于带宽与波长,难以满足对物体检测的分辨率需求。

为提高分辨率,研究逐渐向毫米波频段延伸。Becquaert等^[8]基于矢量网络分析仪搭建了工作频段为 $45\sim 75\text{ GHz}$ 近场毫米波SAR成像系统,并结合压缩感知(Compressed sensing, CS)与多重加权侧信息方法,实现了三维打印缺陷样件的SAR图像重建。Schwäbig等^[9]设计了 90 GHz 三维毫米波SAR系统,进一步提高了分辨率。雒明世等^[10]在Ka频段($26.5\sim 40.0\text{ GHz}$)下将距离迁移算法

* 收稿日期:2025-12-22; 修回日期:2026-02-13

基金项目:国家自然科学基金项目(52365068)

作者简介:王俊林(1982—),男,内蒙古乌兰察布人,副教授,博士。主要从事电磁超表面与器件和微波成像技术研究。E-mail: wangjunlin@imu.edu.cn

通信作者:王鑫(1982—),女,内蒙古锡林郭勒人,教授,博士。主要从事电磁超表面与器件和微波成像技术研究。E-mail: wangxin219@imu.edu.cn

(Range migration algorithm, RMA)、主成分分析法用于非金属管道缺陷识别。这些工作显著提升了成像质量与成像分辨率,但通常依赖矢量网络分析仪或高成本射频模块,在实际应用中具有一定限制。

车载毫米波雷达在自动驾驶中的广泛应用为近场毫米波 SAR 成像低成本无损检测提供了新方案^[11-13]。基于 77~81 GHz 车载毫米波雷达,Pham 等^[14]使用 RMA 和 CS 成像方法,实现了混凝土钢筋成像。李子琦^[15]通过后向投影算法和边缘检测,完成复合材料的形变检测。Bui 等^[16]结合 RMA、双树复小波变换和过程感知平滑稀疏分解算法,实现毫米级缺陷检测及自动化缺陷识别。这些研究展示了车载毫米波雷达在近场 SAR 无损检测中的应用潜力,但现有研究主要聚焦于二维成像,在目标三维重构方面研究存在不足。

RDA 结构简洁,计算复杂度低。Wen 等^[17]基于毫米波 SAR 成像实验定量分析了雷达位置误差对成像质量的影响,其成像结果表明在近场实验条件下 RDA 可获得聚焦图像。针对传统 RDA 应用于近场毫米波 SAR 成像时聚焦一致性不足的问题,胡影等^[18]提出逐距离门构造方位向匹配滤波器,并结合二维互相关校正方法,将二维 RDA 拓展至三维成像。本文立足于物体缺陷成像场景,依托 77~81 GHz 车载毫米波雷达搭建近场 SAR 系统,采用基于近似小斜视 RDA 间接三维成像方法,获取三维散射强度分布,并通过二维切面呈现缺陷细节。具体而言:

① 在平面扫描阵列下推导近似小斜视距离模型,并对展开误差进行定量分析。

② 基于距离解耦特性,逐距离门执行二维 RDA 聚焦,并沿距离向堆叠各距离门成像结果,构建目标三维散射强度分布。

③ 基于 77~81 GHz 车载毫米波雷达进行实验,验证该方法对物体结构及缺陷的三维初步重构可行性。

1 方法

1.1 信号模型

调频连续波(Frequency modulated continuous wave, FMCW)信号能够在较低发射功率条件下获得足够高的信噪比,可通过增大调频带宽提高距离分辨率^[11]。选择 FMCW 信号作为雷达的发射信号,其基本形式为 $S_T(t) = \exp\{j2\pi(f_0 t + Kt^2/2)\}$, $0 \leq t \leq T_p$, 其中, $S_T(t)$ 表示发射信号, f_0 表示 FMCW 信号的载频, K 表示信号的调频斜率, T_p 表示信号的持续时间, j 表示虚数单位。

假设空间存在一点目标距离,其与雷达之间的距离为 R ,回波(延迟 $2R/c$)为 $S_R(t) = \sigma \exp\{j2\pi(f_0(t - 2R/c) + 1/2 K(t - 2R/c)^2)\}$, 其中, $S_R(t)$ 为目标回波信号, c 为光速, σ 为信号的幅度,其大小受目标反射率、电磁波在空间的衰减以及天线增益等因素影响。由于本文采用的成像方法主要依赖回波的相位信息, σ 对成像聚焦影响较小,可将其忽略。

回波信号在雷达接收端和发射信号的样本经过混频,从而降低对采样的要求,这种处理方法也被称作去调频处理,处理后的信号为中频信号 $S_{IF}(t)$,其公式为

$$S_{IF}(t) = \exp\left\{-j2\pi\left(f_0 \frac{2R}{c} + Kt \frac{2R}{c} - \frac{1}{2} K \left(\frac{2R}{c}\right)^2\right)\right\} \quad (1)$$

观察式(1)中的相位,第一项为载频相关的常规相位,第二项反映频率和距离的关系,包含成像关键信息,最后一项为视频残余相位(Residual video phase, RVP)。在近场条件下, RVP 对成像质量影响较小,可以忽略。

以上为本文使用的信号模型,下一节将介绍本文使用的方法。需要指出的是,本文旨在验证所使用的方法在车载毫米波雷达上对物体缺陷成像的可行性,并非提出在成像精度或计算性能上优于传统算法的新方法。

1.2 近似小斜视 RDA 间接三维成像

图1为平面扫描阵列, D_x 、 D_y 为二维平面扫描阵列的尺寸。雷达通过运动形成合成孔径, 由于雷达运动速度远小于电磁波传播速度, 可将扫描过程看作“停-走-停”模式。

当雷达横向、纵向位移相对于目标初始距离较小且视线方向与平台运动方向之间夹角较小时(即满足近似小斜视条件), 目标斜距可通过泰勒展开近似。已有研究在毫米波 SAR 近场成像实验中采用该近似处理方式并获得了聚焦成像结果, 表明近似小斜视在工程条件下可用^[17]。平面扫描阵列的瞬时斜距表示为

$$R(\eta_x, \eta_y) = \sqrt{R_0^2 + (V_x \eta_x)^2 + (V_y \eta_y)^2} \quad (2)$$

其中, R_0 为平台与场景中心的初始距离, V_x 、 V_y 为平台在 X 、 Y 方向上的等效扫描速度, η_x 、 η_y 为 X 、 Y 方向的等效慢时间变量。将式(2)进行近似小斜视下的泰勒展开(误差分析详见 2.3 节):

$$R(\eta_x, \eta_y) \approx R_0 + \frac{V_x^2 \eta_x^2}{2R_0} + \frac{V_y^2 \eta_y^2}{2R_0} \quad (3)$$

将式(3)代入 FMCW 中频信号模型(1), 并忽略 RVP 和幅度 σ , 得到近似小斜视条件下的 FMCW 中频信号模型为

$$S_{IF}(t, \eta_x, \eta_y) \approx \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp(-j\pi K_{ax} \eta_x^2) \exp(-j\pi K_{ay} \eta_y^2) \exp\left(-j4\pi K t \frac{R(\eta_x, \eta_y)}{c}\right),$$

其中, K_{ax} 、 K_{ay} 分别表示等效的 X 、 Y 方向的慢时间调频率, 表示为 $K_{ax} = 2V_x^2/\lambda R_0$, $K_{ay} = 2V_y^2/\lambda R_0$ 。

算法的第一步是距离向压缩与距离分层。对于采用 FMCW 体制的雷达, 只需将混频后的信号沿快时间 t 进行傅里叶变换即可完成距离压缩, 即

$$S_r(f_r, \eta_x, \eta_y) \approx \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp(-j\pi K_{ax} \eta_x^2) \exp(-j\pi K_{ay} \eta_y^2) \delta\left(f_r + \frac{2K}{c} R(\eta_x, \eta_y)\right),$$

其中, f_r 为距离频率, $\delta(\cdot)$ 表示冲激函数, 前三项均与距离频率无关, 最后一项表示距离频率与慢时间存在耦合。根据 FMCW 测距原理中距离频率与距离轴的映射关系, 对于第 i 个距离频点 $f_{r,i}$, 其对应的距离门 R_i 可表示为 $R_i = c f_{r,i} / 2K$ 。

在距离分层之前, 考虑由平台运动引起的几何距离徙动, 由式(3)可推出:

$$\Delta R(\eta_x, \eta_y) = R(\eta_x, \eta_y) - R_0 \approx \frac{V_x^2 \eta_x^2}{2R_0} + \frac{V_y^2 \eta_y^2}{2R_0} \quad (4)$$

式(4)可通过距离向插值进行校正。校正后, 不同距离频点可视为相互解耦, 可提取距离频点 $f_{r,i}$ 对应的距离频域信号 $S_r(f_{r,i}, \eta_x, \eta_y)$ 作为当前距离门的二维方位向(慢时间向)切面。该切面在方位向的相位变化仅由方位向多普勒调频项决定:

$$S_{az}(\eta_x, \eta_y) \approx \exp\left(-j4\pi f_0 \frac{R_0}{c}\right) \exp(-j\pi K_{ax} \eta_x^2) \exp(-j\pi K_{ay} \eta_y^2)。$$

算法第二步是方位向压缩。对于选定的距离层 R_i , 计算等效 X 方向调频率为 $K_{ax,i} = 2V_x^2/\lambda R_i$, 据此构造 X 方向参考信号:

$$S_{ref,x}(\eta_x) = \exp(j\pi K_{ax,i} \eta_x^2) \quad (5)$$

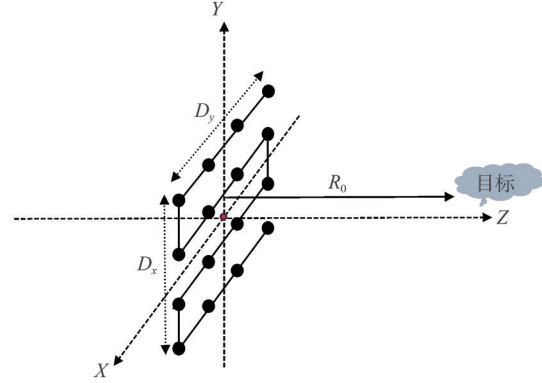


图1 平面扫描阵列

Fig. 1 Planar scanning array

将式(5)依次执行时间翻转、 η_x 方向傅里叶变换,以构造 X 方向频域匹配滤波器 $H(f_{\eta_x})$ 。再对距离频域信号 $S_r(f_{r,i}, \eta_x, \eta_y)$ 沿相同方向进行傅里叶变换,将变换结果与滤波器相乘。最后进行逆傅里叶变换,完成 X 方向压缩,即 $S_x(R_i, x, \eta_y) = F_{f_{\eta_x}}^{-1} \{ F_{\eta_x} \{ S_r(f_{r,i}, \eta_x, \eta_y) \} \cdot H(f_{\eta_x}) \}$ 。其中, $F_{f_{\eta_x}}^{-1}$ 、 F_{η_x} 分别为沿 η_x 方向进行逆傅里叶变换和傅里叶变换。

同理,构造 Y 方向频域匹配滤波器 $H(f_{\eta_y})$,将 $S_x(R_i, x, \eta_y)$ 沿 η_y 方向进行傅里叶变换后与匹配滤波器相乘,再进行逆傅里叶变换完成 Y 方向压缩,即 $S_{xy}(R_i, x, y) = F_{f_{\eta_y}}^{-1} \{ F_{\eta_y} \{ S_x(R_i, x, \eta_y) \} \cdot H(f_{\eta_y}) \}$,其中, $F_{f_{\eta_y}}^{-1}$ 、 F_{η_y} 分别为沿 η_y 方向进行逆傅里叶变换和傅里叶变换。

最终,将所有距离层对应的二维聚焦结果,沿距离门进行堆叠,即可得到目标场景的三维散射强度分布。完整算法流程如图2所示。

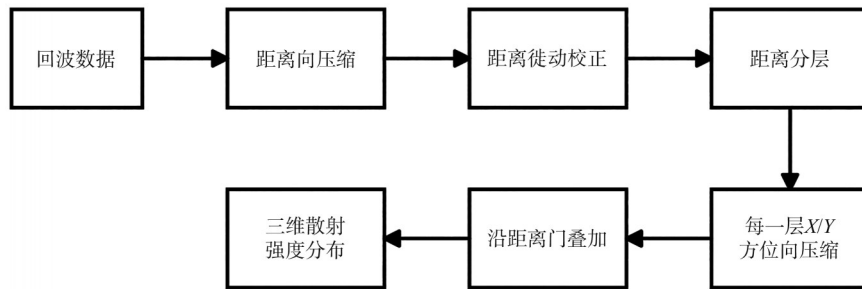


图2 算法流程图

Fig. 2 Flowchart of the algorithm

2 结果与讨论

2.1 实验环境

为验证1.2节算法的效果,搭建了如图3所示的SAR实验设备。该系统结构可划分为雷达射频系统和二维运动导轨两部分。

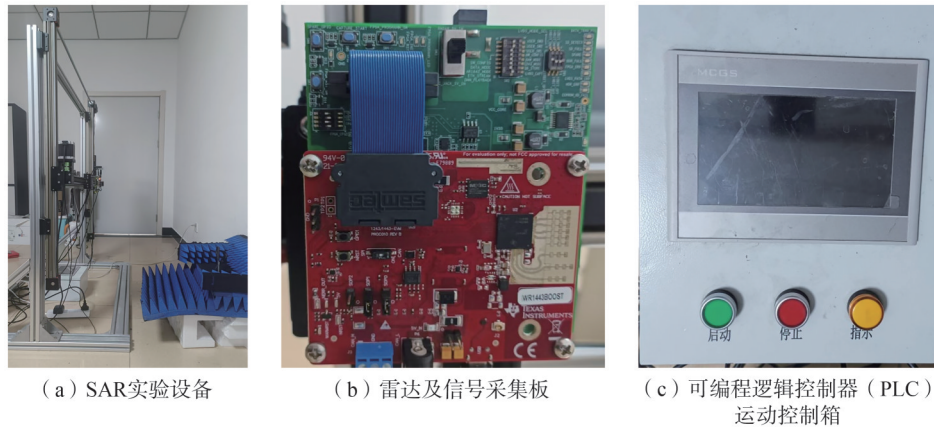


图3 SAR实验设备及其组成部分

Fig. 3 SAR experimental equipment and its components

雷达射频系统采用TI毫米波雷达板IWR1443BOOST作为信号发射源,雷达采用1发4收模式采集数据。信号回波由DCA1000EVM信号采集板高速采集,并通过千兆网口传输至计算机中存储。

二维运动导轨由两个相互垂直安装的1000 mm×1000 mm导轨构成(实验中仅使用400 mm×

400 mm有效行程),采用步进电机驱动。通过PLC运动控制箱进行控制,使雷达按图1所示的指定扫描格式完成扫描。实验采集的数据在Matlab 2024b中进行处理。

2.2 成像目标和参数设置

为了验证本文方法对物体形状的代表能力,选择塑料柄金属剪刀进行成像实验,其实物图像如图4(a)所示,由于剪刀为非规则目标,且放置姿态与参考坐标系难以精确标定,因此不对其进行尺寸定量标注,重点对其轮廓、结构细节及空间位置的成像表现进行分析。此外,为验证算法对于缺陷的成像能力,选用了顶部带有42 mm×4.5 mm孔洞的金属支架作为待测目标,如图4(b)所示,红色虚线指向的图片为待测目标的放大图。

目标统一放置于成像设备前600 mm,由吸波海绵包裹,实验相关参数详见表1。

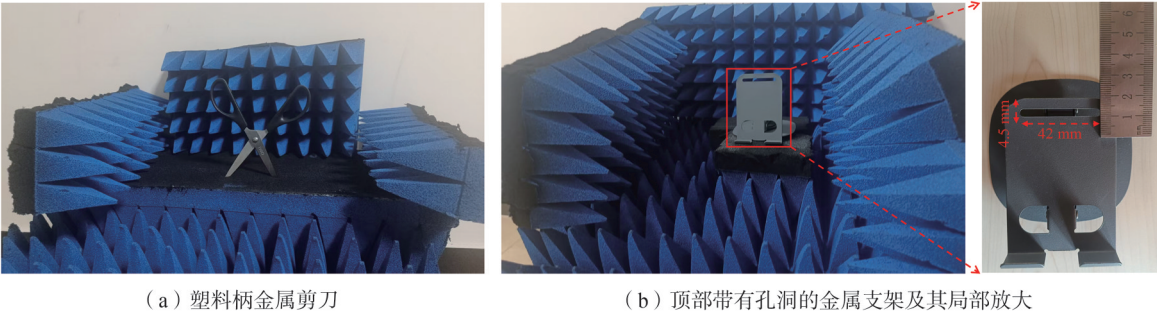


图4 实验选取目标的实物图

Fig. 4 Physical images of the selected experimental targets

表1 实验参数设置

Table 1 Experimental parameters

参数	数值	参数	数值
载频 f_0/GHz	77	平台水平运动速度 $V_x/(\text{mm/s})$	20
带宽 B/MHz	3988.54	平台垂直运动速度 $V_y/(\text{mm/s})$	40
调频斜率 $K/(\text{MHz}/\mu\text{s})$	70.295	水平采样间隔 d_x/mm	1
采样率 f_s/ksps	5000	垂直采样间隔 d_y/mm	2
距离采样点数 N_r	256	水平阵列大小 D_x/mm	400
水平采样点数 N_x	400	垂直阵列大小 D_y/mm	400
垂直采样点数 N_y	200	目标放置距离 R_0/mm	600

2.3 实验结果与分析

在1.2节算法的推导中,对瞬时斜距进行了近似小斜视处理。现对展开误差进行分析,误差可表示为

$$\epsilon = R_0 + \frac{V_x^2 \eta_x^2}{2R_0} + \frac{V_y^2 \eta_y^2}{2R_0} - \sqrt{R_0^2 + (V_x \eta_x)^2 + (V_y \eta_y)^2}。$$

实验中设置扫描阵列中心为零点,最大方位向时间 $\eta_{x\max} = 10\text{ s}$, $\eta_{y\max} = 5\text{ s}$,代入表1中的参数,最大的误差 $\epsilon_{\max}$ 为3.34 mm。而实验系统的距离分辨率可以表示为 $\rho_r = c/2B$,其中, B 为信号带宽,代入表1参数,得出距离分辨率 ρ_r 为37.6 mm,其值远大于近似展开误差,因此可以忽略近似展开误差。

为便于观察细节,首先给出从三维散射强度分布中提取的二维切面图,再展示对应的三维重构结果。图5(a)为剪刀经处理后的X/Y二维切面结果(二维切面显示阈值范围统一设置为 $[-45,0]\text{ dB}$),

目标主要分布在 $X \in [-150, 50]$ mm、 $Y \in [-150, 50]$ mm区域。从图5(a)中可以看出本文方法基本还原了待测目标整体轮廓,但在剪刀柄处出现细节缺失,造成该现象的原因主要是剪刀柄由塑料构成,对电磁波的反射率较低,从而在接收时表现为低散射强度区域。

图5(b)为剪刀的三维重构结果,目标出现在 Z 方向约600 mm处,与目标放置的距离基本一致, X/Y 方向分布区域与图5(a)相符,表明本文方法能够较好地呈现目标形状的结构特征。

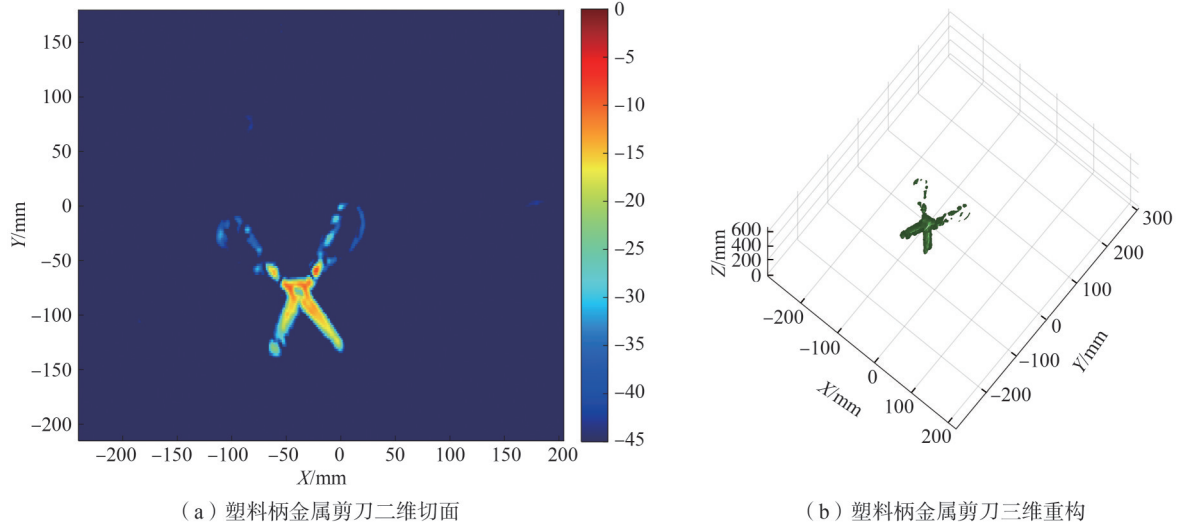


图5 塑料柄金属剪刀二维切面和三维重构结果

Fig. 5 Two-dimensional cross-section and three-dimensional reconstruction results of plastic-handled metal scissors

在此基础上,进一步开展缺陷成像实验。图6(a)为金属支架经处理后的 X/Y 二维切面结果,目标主要分布在 $X \in [0, 100]$ mm、 $Y \in [-100, 0]$ mm区域,顶部孔洞清晰可见。受待测目标倾斜放置以及待测物体与扫描阵列在 Y 方向存在夹角(大小约为 8°)的影响,支架底部两个角及两个较大孔洞在成像结果中出现一定缺失与失真。图6(b)为顶部孔洞放大图,白色边框对应顶部的孔洞区域,经测量,孔洞沿 X 方向的长度约为41 mm,沿 Y 方向的宽度约为4 mm。与实物尺寸42 mm $\times$ 4.5 mm相比,长度和宽度误差分别约为1 mm和0.5 mm,整体与实物基本保持一致,该偏差可能与系统空间分辨率限制以及显示阈值对边界判定的敏感性有关。

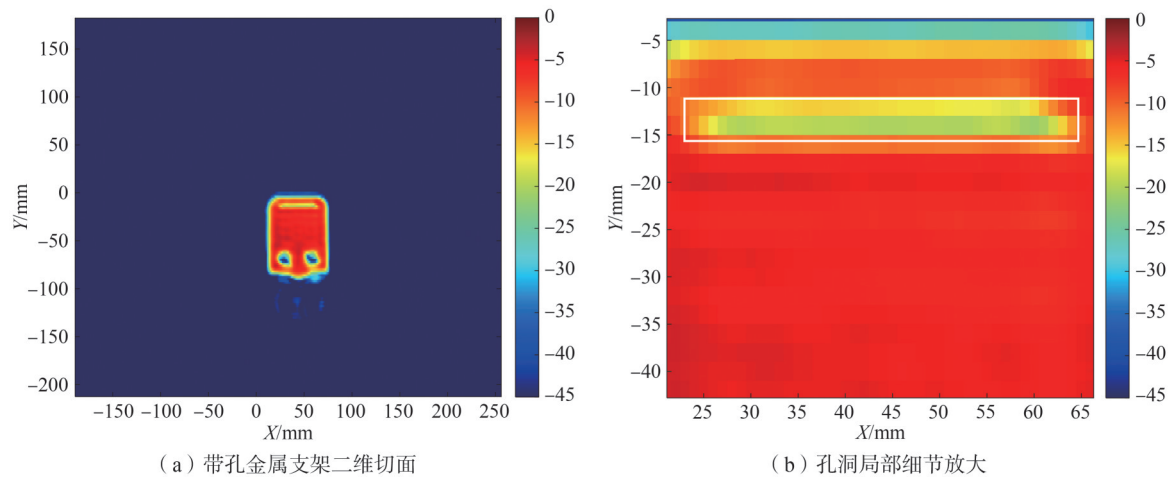
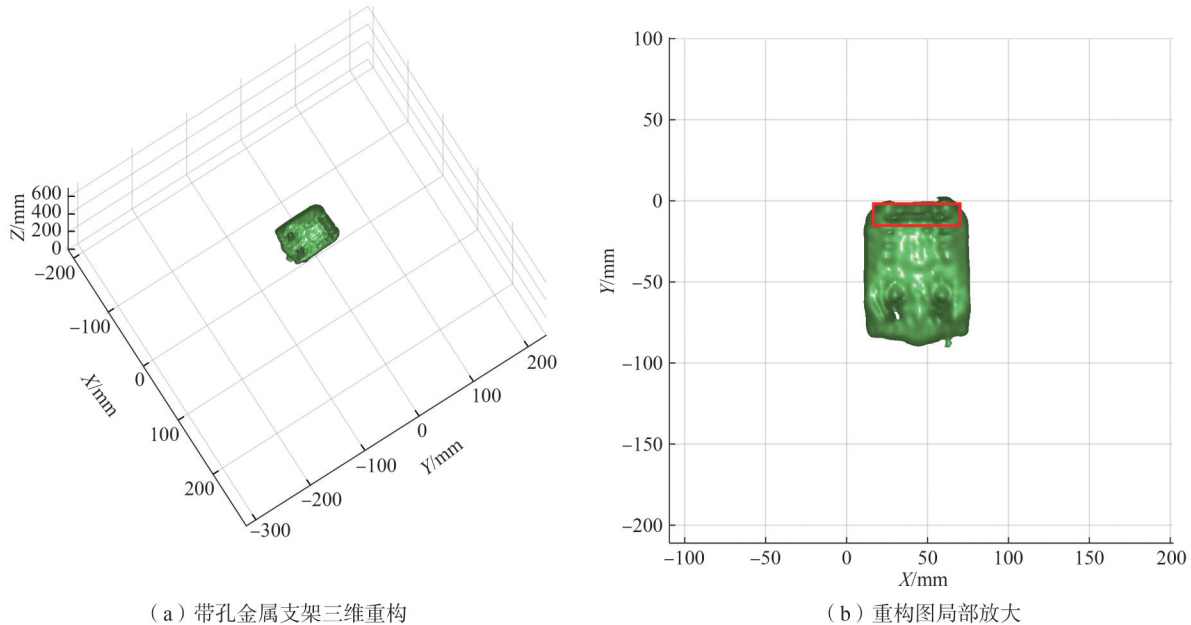


图6 带孔金属支架二维切面和局部放大结果

Fig. 6 Two-dimensional cross-sectional and local magnified results of the perforated metal scaffold

图 7(a)为目标的三维重构图,目标出现在 Z 方向约 600 mm 处, X/Y 方向与图 6(a)分布区域一致。图 7(b)为三维重构在 X/Y 视角下的局部放大图,红色边框部分存在条状凹陷,这表明本文方法在三维重构中能够初步重构物体缺陷。



(a) 带孔金属支架三维重构

(b) 重构图局部放大

图 7 带孔金属支架三维重构和局部放大结果

Fig. 7 Three-dimensional reconstruction and local magnification results of the perforated metal scaffold

3 结论

基于 77~81 GHz 车载毫米波雷达搭建近场 SAR 成像系统,实现了基于近似小斜视 RDA 间接三维成像流程。实验结果表明,该方法能够获得目标的三维散射强度分布。对于塑料柄金属剪刀与带孔金属支架,两者的整体几何轮廓在二维切面与三维重构结果中均能较清晰呈现。

针对支架顶部孔洞缺陷(实物尺寸 42 mm×4.5 mm),通过对三维散射强度分布提取二维切面进行测量,得到孔洞尺寸约为 41 mm×4 mm,长度与宽度误差分别为 1 mm 和 0.5 mm。同时在三维重构中,孔洞对应区域呈现出较为明显的凹陷特征,说明该方案具备一定的缺陷表征能力。综合来看,本文方法在低成本工业无损检测应用中具有一定工程实现可行性。

受篇幅与实验条件限制,本文仅以剪刀与单一尺寸孔洞支架为例进行了验证,尚未覆盖更多材料和更多缺陷类型,也未对最小可检测缺陷尺寸及成像精度上限进行分析与测试。后续工作将针对这些问题进行展开:其一,扩展不同类型与尺寸的缺陷目标并建立更丰富的实验数据;其二,结合理论分辨率与实验分析,给出最小可检测缺陷尺寸、尺寸测量误差与成像精度上限等关键指标,以进一步验证方法的工程适用边界;其三,针对全孔径密集采样带来的扫描时间与数据量开销问题,后续将结合压缩感知思想开展稀疏采样与欠采样重构,降低采样量与数据规模^[19],从而进一步提升成像效率。

参考文献:

- [1] 张蒙蒙. 基于微波成像的非金属管道无损检测方法研究[D]. 西安:西安石油大学,2023.
- [2] 张宏,吴瑞坤,张荣刚. 扫频微波波导无损检测传感与成像[J]. 福建技术师范学院学报,2017(5):32-41.

- [3] Amineh R K, Ravan M, Sharma R. Nondestructive testing of nonmetallic pipes using wideband microwave measurements[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(5): 1763-1772.
- [4] 彭作勇. 通用SAR分布式仿真与成像技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [5] 潘竹炉, 王强. 一种基于OMP算法的微波无损检测成像方法[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(2): 74-77.
- [6] Franchois A, Lewyllie P, Taerwe L. 2-D near-field SAR non-destructive testing of rebars in a concrete wall[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2004, 19(1/2/3/4): 333-338.
- [7] Takahashi K, Okamura S, Sato M. A fundamental study of polarimetric GB-SAR for nondestructive inspection of internal damage in concrete walls[J]. Electronics and Communications in Japan, 2015, 98(11): 41-49.
- [8] Becquaert M, Cristofani E, Van Luong H, et al. Compressed sensing mm-wave SAR for non-destructive testing applications using multiple weighted side information[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1761.
- [9] Schwäbig C, Wang S Y, Gütgemann S. Development of a millimetre wave based SAR real-time imaging system for three-dimensional non-destructive testing[J]. tm-Technisches Messen, 2021, 88(7/8): 488-497.
- [10] 雒明世, 张蒙蒙, 方阳. PE管道的近场微波成像及缺陷定量表征[J]. 通信学报, 2023, 44(9): 139-148.
- [11] 王旺. 基于车载毫米波雷达的近场SAR成像系统设计及算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [12] 袁孟北, 晋良念. 车载毫米波FMCW SAR扩展目标聚焦成像方法[J]. 雷达科学与技术, 2023, 21(6): 689-696.
- [13] Murakami H, Fukuda T G, Otera H, et al. Development of a high-sensitivity millimeter-wave radar imaging system for non-destructive testing[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2024, 24(15): 4781.
- [14] Pham T H, Kim K H, Hong I P. A study on millimeter wave SAR imaging for non-destructive testing of rebar in reinforced concrete[J]. Sensors, 2022, 22(20): 8030.
- [15] 李子琦. 基于微波成像的形变检测研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2024.
- [16] Bui Q C, Lin W, Huang Q, et al. Automated internal defect identification and localization based on a near-field SAR millimeter-wave imaging system[J]. IEEE Access, 2025, 13: 24698-24716.
- [17] Wen Q, Cao S Y. Quantitative investigation of imaging quality vs. radar position errors in millimeter-wave SAR [C]//2023 IEEE Radar Conference. San Antonio, TX, USA: IEEE, 2023: 1-6.
- [18] 胡影, 张彦敏, 王运华, 等. 基于RDA的毫米波雷达近场成像优化算法研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2025, 55(10): 90-100.
- [19] 王海安, 郭改枝, 张鹏举. 基于ATmega 128的连续信号压缩感知实现方法[J]. 内蒙古大学学报(自然科学版), 2023, 54(2): 206-212.

(责任编辑 孙 锴)

Object Defect Imaging Method Based on Automotive Millimeter-Wave Radars

WANG Junlin^{1,2}, LI Ping^{1,2}, WANG Xin^{1,2}

(1. *School of Electronic Information Engineering, Inner Mongolia University, Hohhot 010070, China;*

2. *Inner Mongolia Key Laboratory of Intelligent Communication Sensing and Signal Processing, Hohhot 010070, China*)

Abstract: Modern industry has set higher requirements for the accuracy and cost of non-destructive testing of objects. However, traditional detection methods all have certain limitations. The near-field synthetic aperture radar (SAR) imaging technology in microwave imaging, due to its advantages such as non-contact and high resolution, has become a research hotspot in non-destructive testing. Thanks to the rise of autonomous driving, vehicle-mounted millimeter-wave radars, with their lower costs, have gradually been applied to near-field SAR imaging for non-destructive testing. However, most existing methods focus on two-dimensional imaging and are somewhat insufficient for the three-dimensional reconstruction of targets. To address the issue, an indirect three-dimensional imaging method based on the approximate small-squint range-doppler algorithm (RDA) is used. By deriving the approximate range model under the planar scanning array, the distance-decoupling characteristic is utilized to perform two-dimensional focusing along each distance, and finally, the two-dimensional results are stacked to obtain the three-dimensional scattering intensity distribution of the target. To verify the ability of this method to characterize the shape and defects of objects, experiments are conducted on plastic-handled, metal scissors and a metal bracket with a 42 mm×4.5 mm top hole. The results show that the three-dimensional reconstruction can well restore the overall geometric contour of the scissors and the bracket. Further, the three-dimensional scattering intensity distribution of the bracket is analyzed in cross-sections, and the hole size of the bracket is measured to be approximately 41 mm×4 mm, with length and width errors of 1 mm and 0.5 mm respectively. The experiments prove that the method can reflect the spatial position and size characteristics of defects, and has certain application feasibility in low-cost industrial non-destructive testing.

Key words: automotive millimeter-wave radar; SAR imaging; range-doppler algorithm (RDA)