

文章编号: 2095-4980(2022)12-1231-07

## 近场毫米波三维成像算法

宋少秋, 邢世其\*, 刘燊文, 李永祯, 汪俊澎, 安孟昀

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 介绍了一种近场毫米波三维成像算法。首先对目标进行二维成像, 然后提出一种基于局部信息联合 BM3D 自适应滤波滑动窗算法, 有效保留了图像信息并抑制杂波, 实现三维成像重构。分别从系统平台、信号回波模型、后向投影与全息成像算法及成像结果、图像滤波、三维成像重构展开介绍, 所得结果验证了实验的可行性和准确性, 在诸多场景中具有广阔的应用价值。

**关键词:** 毫米波; 成像算法; 图像滤波; 三维重构

**中图分类号:** TN911.73

**文献标志码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA2021361

## A near-field millimeter wave 3D imaging algorithm

SONG Shaoqiu, XING Shiqi\*, LIU Shengwen, LI Yongzhen, WANG Junpeng, AN Mengyun

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

**Abstract:** A near-field mmwave 3D imaging algorithm is presented. Firstly, the target is imaged in 2D, and then a joint BM3D adaptive filtering sliding window algorithm based on local information is proposed, which can effectively preserve image information and suppress clutter to achieve 3D imaging reconstruction. The system platform, signal echo model, backward projection and holographic imaging algorithm and imaging results, image filtering, and 3D imaging reconstruction are introduced respectively. The obtained results validate the feasibility and accuracy of the experiments, and the proposed method is of broad application in many scenarios.

**Keywords:** mmwave; imaging algorithms; image filtering; 3D reconstruction

毫米波成像因具有全天时、全天候、强穿透性、高分辨力等优势, 广泛用于军事探测、机场安防、工业探伤、生物医疗、自动驾驶、检测隐藏危险物体等领域<sup>[1-2]</sup>, 具有广阔的研究背景和商业价值。诸多高校与科研技术企业也纷纷展开对毫米波三维成像技术的深入研究, 国外: 美国海军研究实验室的 K Nae 等首先提出了三维合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)成像概念; 美国德克萨斯大学达拉斯分校穆罕默德·埃明·亚尼克等研究开发的 MIMO-SAR 毫米波成像测试平台能有效对人体隐藏的危险及违禁物品进行成像检测<sup>[3]</sup>; 德国罗德与施瓦茨公司(R&S 公司)也利用雷达成像技术研发了人员快速安检扫描系统; 国内: 中国航天科工集团率先完成了“毫米波三维人体目标成像重构”的样机研发; 国防科技大学王宏强团队对亚毫米波及太赫兹频段下目标成像特性及细微结构成像开展仿真研究<sup>[4]</sup>; 华域汽车、海康威视、华为科技等企业也对车载毫米波成像展开系统性研究。

毫米波三维成像一般可分为直接三维成像和间接三维成像, 本文采用间接三维成像, 也叫“2D+1D”三维成像方法。首先对原始回波信号进行 2D 成像, 随后将二维图像进行图像滤波、1D 相干叠加实现三维成像重构。在三维成像过程中, 与之紧密相关的是成像算法、图像增强、杂波抑制等热门研究问题, 如何解决这类相干问题, 更加精准地实现三维成像重构是本文研究的核心。

围绕毫米波近场三维成像开展研究, 本文提出一种基于毫米波雷达传感器与 SAR 处理技术相结合的三维成像系统。采用三轴电动轨道, 可在垂直和水平方向上形成大的虚拟阵列孔径; 于三轴轨道上搭载 CMOS 工艺、低成本商业化的 77G 线性调频连续波(Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW)毫米波雷达传感器, 讨论方

收稿日期: 2021-10-09; 修回日期: 2021-11-17

基金项目: 自然科学基金青年科学基金资助项目(61901499); 国家自然科学基金资助项目(61625108)

\*通信作者: 邢世其 13786152485@163.com

位向分辨力和空间采样间隔等关键性系统参数；分析了 2 种与实验平台可匹配的 SAR 成像技术，实现了近场毫米波二维 SAR 成像；介绍了 Lee 滤波和 BM3D 滤波的图像滤波算法，并提出了一种基于局部信息联合 BM3D 自适应滤波滑窗算法，能有效保留图像细节信息并抑制杂波，并进行三维成像重构。

## 1 毫米波 SAR 成像实验系统

### 1.1 系统平台

本成像实验系统由 3 部分组成<sup>[4]</sup>：毫米波雷达传感器 IWR1843 及数据采集模块 DCA1000、平面三轴电动高精度轨道扫描模块、PC 电脑模块。实物场景图如图 1 所示，其中 DCA1000 用于后期 FPGA 处理捕获原始 ADC 数据。毫米波雷达传感器 IWR1843 的射频范围为 77~81 GHz，其距离分辨力最高可达 3.75 cm。图 2 为近场雷达成像示意图，雷达传感器按蛇形轨迹逐点扫描并采集成像场景中待测目标散射的回波信息并成像。



Fig.1 Experimental system platform  
图 1 实验系统平台

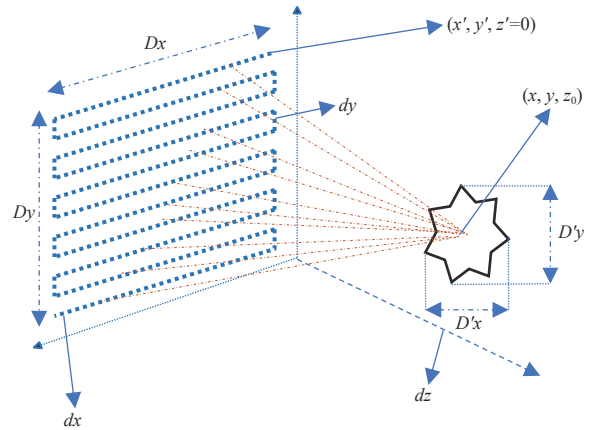


Fig.2 Imaging diagram  
图 2 成像示意图

### 1.2 SAR 成像阵列扫描间隔及分辨力分析

由图 2 可知，在本文成像系统中，待测物体反射回的电磁波信号在阵列孔径平面上进行离散采样。为确保不发生混叠，水平与垂直的合成孔径空间间隔  $dx, dy$  应满足奈奎斯特准则<sup>[5]</sup>，一般在工业上，空间采样间隔大多选择在半波长与四分之一波长之间。保持成像质量的一个重要参数为空间分辨力，二维近场成像的分辨力由电磁波波波长、合成孔径阵列尺寸和待测物体与雷达传感器之间的水平距离决定。本文采样间隔为半波长，合成孔径阵列区域为 22 cm×22 cm。 $x$  轴和  $y$  轴的采样间隔和空间分辨力应满足以下要求<sup>[6]</sup>：

$$\begin{cases} dx \leq \frac{\lambda \sqrt{[(Dx + D'x)/4]^2 + z_0^2/4}}{Dx + D'x} \\ dy \leq \frac{\lambda \sqrt{[(Dy + D'y)/4]^2 + z_0^2/4}}{Dy + D'y} \end{cases} \quad (1)$$

$$\delta_x \approx \frac{\lambda z_0}{2Dx}, \quad \delta_y \approx \frac{\lambda z_0}{2Dy} \quad (2)$$

式中： $Dx, Dy$  分别为合成阵列孔径的水平与垂直长度； $D'x, D'y$  为待测目标的水平与垂直的尺寸； $z_0$  为待测目标距雷达的水平距离； $\lambda$  为波长； $\delta_x, \delta_y$  为水平与垂直方向上的分辨力。

## 2 回波信号模型

毫米波雷达传感器发射线性调频信号<sup>[7]</sup>，雷达发射信号为：

$$s_i(t_r, t_a) = \text{rect}\left[\frac{t_r}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c t_r + \frac{1}{2} K_r t_r^2\right)\right] \quad (3)$$

式中： $t_r$ 为快时间； $t_a$ 为慢时间； $f_c$ 为发射信号中心频率； $T_p$ 为信号脉宽； $K_r$ 为距离向调频斜率， $K_r = B_r/T_p$ ， $B_r$ 为信号带宽。当电磁波照射成像场景中的待测物体时，雷达传感器接收到单一散射点的回波信号可表示为：

$$s_r(t_r, t_a) = \text{rect}\left[\frac{t_r - \tau}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c(t_r - \tau) + \frac{1}{2}K_r(t_r - \tau)^2\right)\right] \quad (4)$$

式中： $\tau = \frac{2R}{c}$ 为回波时延， $R$ 为成像场景中待测目标与雷达传感器之间的距离。

采用去斜体制对回波信号进行处理<sup>[8]</sup>，其参考信号可表示为：

$$s_{\text{ref}} = \text{rect}\left[\frac{t_r - \tau_{\text{ref}}}{T_p}\right] \exp\left[j2\pi\left(f_c(t_r - \tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}K_r(t_r - \tau_{\text{ref}})^2\right)\right] \quad (5)$$

式中： $\tau_{\text{ref}} = \frac{2R_{\text{ref}}}{c}$ ， $R_{\text{ref}}$ 为参考距离。

将待测物体的单一散射点的回波信号与参考信号进行混频可得中频信号：

$$\begin{aligned} s(t_r, t_a) &= s_r(t_r, t_a) \cdot s_{\text{ref}}^* = \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau}{T_p}\right) \exp\left[j2\pi\left(f_c(\tau - \tau_{\text{ref}}) + \frac{1}{2}K_r(2\tau t_r - \tau^2 - 2\tau_{\text{ref}}t_r + \tau_{\text{ref}}^2)\right)\right] = \\ &= \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau}{T_p}\right) \exp\left[j\frac{4\pi f_c R_r}{c}\right] \cdot \exp\left[jK_r \frac{4\pi R_r}{c}\left(t_r - \frac{2R_{\text{ref}}}{c}\right)\right] \cdot \exp\left[-jK_r \frac{4\pi R_r^2}{c^2}\right] \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $R_r = R - R_{\text{ref}}$ 表示实际距离与参考距离之差，通常将 $R_{\text{ref}}$ 取零，式(6)可表示为：

$$s(t_r, t_a) = \text{rect}\left(\frac{t_r - \tau}{T_p}\right) \exp[j2\pi f_c \tau] \cdot \exp[j2\pi f_b t_r] \cdot \exp[-jK_r \pi \tau^2] \quad (7)$$

式中： $f_b = K_r \tau$ 为相干差频，可表示目标相对于参考点的距离<sup>[9]</sup>。式中第一项为多普勒相位，回波产生多普勒使相位变化；第二项为距离项相位；第三项为残余视频相位，会对多普勒产生少许变化。对式(7)进行距离维傅里叶变换即可完成距离向脉冲压缩，差频回波在频域上表示 $\text{sinc}$ 状窄脉冲：

$$S(f_r, t_a) = A \text{sinc}\left[T_p\left(f_r - K_r \frac{2R_r}{c}\right)\right] \exp\left[j\left(\frac{4\pi f_c R_r}{c} + \frac{4\pi R_r}{c} f_r - K_r \frac{4\pi R_r^2}{c^2}\right)\right] \quad (8)$$

式中： $f_r = K_r \frac{2R_r}{c}$ 。在近场中 $f_r$ 较 $f_c$ 很小，后两项可以直接忽略，最终的回波可表示为：

$$S(f_r, t_a) = A \text{sinc}\left[T_p\left(f_r - K_r \frac{2R_r}{c}\right)\right] \exp\left[j\left(\frac{4\pi f_c R_r}{c}\right)\right] \quad (9)$$

### 3 三维成像

#### 3.1 后向投影与全息二维成像

由式(9)可知，将回波进行解线频调处理及距离向FFT后即可在距离向上聚焦。此时只要进行方位向的聚焦即可成像。后向投影(Back-Projection, BP)算法，是一种基于时域成像的算法，其近场成像处理过程如下：

- 1) 通过测量待测物体与雷达之间的距离，获得待测物体所在距离切片；
- 2) 在该距离切片下划分成像区域，计算成像网格点与雷达各个方位向的点距离，得到双程时延；
- 3) 对回波数据进行插值，并根据得到的双程时延进行距离索引和相位补偿；
- 4) 将回波进行逐点相干叠加，直至遍历完所有成像网格点，进行成像。

用公式表示为：

$$\begin{cases} I = \sum_{i=1}^n S(i, P_m) \exp\left[-j\left(\frac{4\pi f_c R(i, P_m)}{c}\right)\right] \\ R(i, P_m) = \sqrt{(x_i - x_m)^2 + (y_i - y_m)^2 + z_0^2} \end{cases} \quad (10)$$

式中： $I$ 为成像网格的成像结果； $S(i, P_m)$ 表示第 $i$ 个网格点与阵列平面之间的回波，其中阵列平面 $P_m = (x_m, y_m, 0)$ ，成像网格点 $P_i = (x_i, y_i, z_0)$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ 。

全息成像算法又被称为距离徙动算法(Range Migration Algorithm, RMA)<sup>[10-14]</sup>, 利用电磁波传播波动方程, 将球面波等效分解成一系列平面波的叠加, 实现待测物体的散射点模型几乎无形变的成像聚焦。全息成像算法可说是 SAR 成像的最优解, 在位于笛卡尔坐标系的近场成像系统中, 天线所在阵列平面为  $P'=(x',y',0)$ , 被测物体位置为  $(x,y,z_0)$ , 假设被测物体的反射系数为  $f(x,y)$ , 为反射电磁波与入射电磁波的比值, 目标散射的回波为:

$$S(x',y') = \iint f(x,y) \exp\left[-2jk\sqrt{(x-x')^2+(y-y')^2+z_0^2}\right] dx dy \quad (11)$$

式中  $k = \frac{2\pi f}{c}$  为波数。在此模型下, 待测物体与天线所在阵列平面平行。假设物体的成像建立在被测物体散射点的单个反射, 且不考虑极化、色散、多径效应等情况的影响, 式(11)的球面波模型可简化为一系列平面波的叠加:

$$S(x',y') = \iint f(x,y) \left\{ \iint \exp[jk_x(x'-x)+jk_y(y'-y)+jk_z z_0] dk_x dk_y \right\} dx dy \quad (12)$$

式中  $k_x$  和  $k_y$  分别为  $x$  和  $y$  方向的波数。

改变积分顺序可得:

$$S(x',y') = \iint \left[ \iint f(x,y) \exp[-(jk_x x + jk_y y)] dx dy \right] \exp(jk_x x' + jk_y y' + jk_z z_0) dk_x dk_y \quad (13)$$

由 2D 连续傅里叶变换对可知:

$$H(k_x, k_y) = \iint h(x, y) \exp[-j(k_x x + k_y y)] dx dy = F_{2D}\{h(x)\} \quad (14)$$

$$h(x, y) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint H(k_x, k_y) \exp[j(k_x x + k_y y)] dk_x dk_y = F_{2D}^{-1}\{H(k_x, k_y)\} \quad (15)$$

去掉撇号的标记, 可得:

$$\begin{cases} S(x, y) = \iint F_{2D}\{f(x, y)\} \exp(jk_z z_0) \exp(jk_x x' + jk_y y') dk_x dk_y = F_{2D}^{-1}\{F_{2D}[f(x, y)] \exp(jk_z z_0)\} \\ f(x, y) = F_{2D}^{-1}\{F_{2D}[S(x, y)] \exp(-jk_z z_0)\} \end{cases} \quad (16)$$

由电磁波波数散射投影的关系可知:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2 \quad (17)$$

则待测物体的回波反射系数可表示为:

$$f(x, y) = F_{2D}^{-1}\left\{F_{2D}[s(x, y)] \exp(-jz_0 \sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2})\right\} \quad (18)$$

使用剪刀与金属手枪模型作为实验对象, 图 3(a)为实验模型光学图像, 图 3(b)为基于 BP 算法下的 SAR 图像, 图 3(c)为基于全息成像算法下的 SAR 图像。两种成像算法均能对被测物体进行高分辨力二维图像重构。BP 算法是将脉冲压缩后的回波信号进行距离索引, 并逐点进行相干积累获得方位向聚焦成像; 全息成像算法将脉冲压缩后的回波信号模型进行球面波分解, 在二维傅里叶变换与匹配滤波结合的手段下实现聚焦成像。在时间复杂度上, 由于 BP 算法要在各个成像网格点上相干叠加, 而全息成像算法只用点对点进行匹配聚焦, 故前者的时间复杂度比后者大一个数量级,

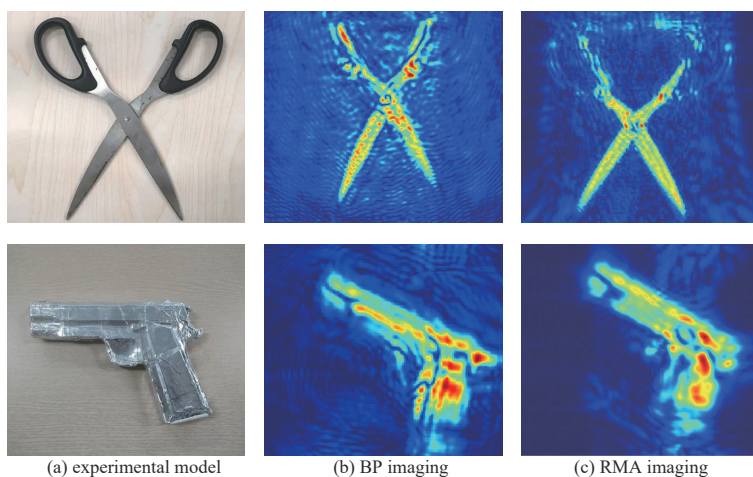


Fig.3 Experimental model and two imaging algorithms  
图3 实验模型及两种成像算法



具体则取决于合成孔径阵列个数与成像网格精确度。

图 3(b)与图 3(c)对比可见，BP 算法下的剪刀非金属部分完全淹没在杂波背景下。相较于全息成像的效果，剪刀的细节丢失严重，且边缘出现较为严重的衍射现象，无目标区域背景杂波较大。原因是实际近场成像中，每个方位点通过距离索引得到的幅度信息其实是该距离下的所有散射点幅度之和，若周围电磁环境较为复杂，则会使弱散射体被淹没，从而导致图像细节不清晰。全息成像的图像还原度高，图像清晰，杂波较少，细节恢复更好。

### 3.2 二维图像滤波

在实际的三维成像过程中，为得到清晰的图像，一般要在后期图像域进行滤波处理，降低杂波对图像质量的影响，并提高图像的清晰度<sup>[15-18]</sup>。对图 3 两种算法下的二维 SAR 图像，分别采用 Lee 滤波、基于局部信息联合 BM3D 自适应滑窗滤波进行对比分析。

Lee 滤波是 Jone-Sen Lee 于 1980 年提出的一种基于局部统计特性模型的滤波算法，其原理是将杂波噪声泰勒展开为线性模型，把图像的局部均值与方差作为先验知识，采用最小均方差估计此线性模型，从而滑窗滤波，能有效抑制相干噪声，并较好地保留图像细节。目前 Lee 滤波算法在 SAR 图像后期处理检测中应用广泛。

BM3D 滤波是一种融合空域与频域且图像稀疏增强表示的滤波去噪算法，早期用于光学图像处理。该算法主要分为两大步：初始估计和最终估计。其中每一大步基本流程相似，分为 3 小步：a) 相似图匹配；b) 相似块图联合滤波；c) 聚类。该算法能充分利用图像本身结构的自相关性和冗余度，在保证图像特征的同时对杂波有明显的衰减且增强图像。

在基于传统的 BM3D 滤波基础上，本文提出了基于局部信息的自适应平滑滤波算法：

$$\begin{cases} C(i,j) = \begin{cases} NaN, & C_{loc} < \beta C_{all} \\ I, & C_{loc} \geq \beta C_{all} \end{cases} \\ C_{loc} = \frac{\sum_i \sum_j C(i,j)}{mn} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $C_{loc}$  为局部均值； $C_{all}$  为全局均值； $\beta$  为图像方差。阈值的选择极为重要，阈值较小，则噪声滤除不净；阈值较大，则会影响图像细节信息。

$$\begin{cases} I = \begin{cases} u \times (C_{loc} - I), & I < \tau \\ I, & I \geq \tau \end{cases} \\ \tau = a \sqrt{\frac{\sum_i \sum_j (C(i,j) - C_{all})^2}{MN}} \end{cases} \quad (20)$$

式中： $u$  为滤波系数(本文设置为 0.1)； $\tau$  为阈值； $a$  为比例系数(一般在 1.5~2.2 之间，本文设置为 1.7)。

为有效抑制杂波对图像质量的影响，对 BP 算法与 RMA 算法滤波预处理。如图 4~图 5 所示，图 4(a)与图 5(a)为 BP 成像和 RMA 成像下的原始图像；图 4(b)与图 5(b)为 Lee 滤波处理的结果；图 4(c)与图 5(c)为 BM3D 滤波处理的结果；图 4(d)与图 5(d)为基于局部信息联合 BM3D 下的自适应平滑滤波处理的结果。将 Lee 与 BM3D 的滤波图对比分析：Lee 算法仅抑制了部分背景杂波，BM3D 算法对图像质量有局部提升，且有效保留了图像边缘细节。这两种传统算法下的滤波并不能区分高低噪声区域，背景杂波并没有被有效抑制。本文提出的基于局部信息联合 BM3D 的自适应平滑滤波算法能在有效抑制背景杂波的

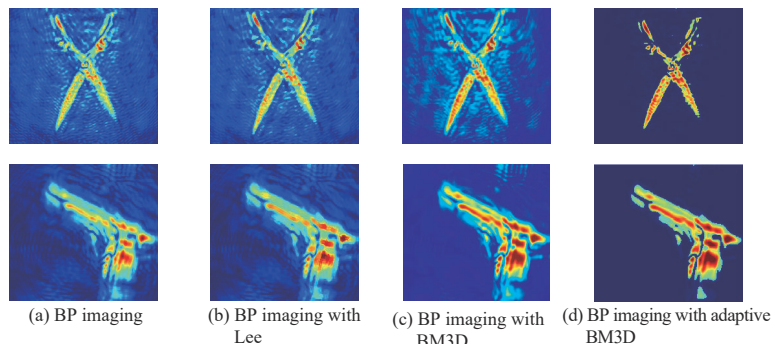


Fig.4 Comparison of two types of filtering under BP imaging  
图4 基于BP成像下的两种滤波对比

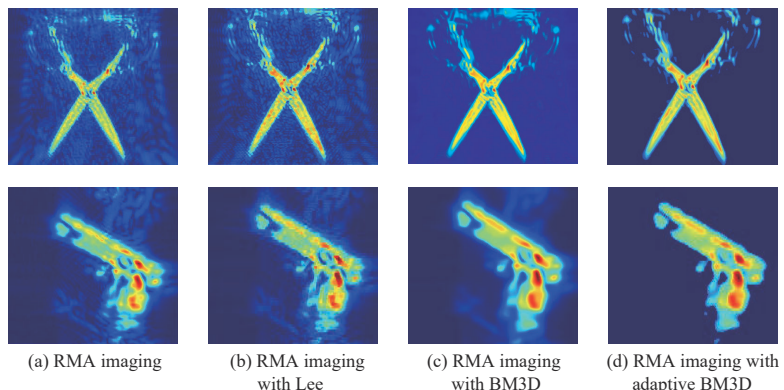


Fig.5 Comparison of two types of filtering under RMA imaging  
图5 基于RMA成像下的两种滤波对比

同时保留图像细节并使图像质量增强, 实现了最佳的滤波效果。

### 3.3 三维成像重构

对上述滤波后的图像数据进行三维重建<sup>[19]</sup>。SAR 图像的二维数据采用不同距离下切片合并的手段进行三维图像重构, 如图 6 所示。图 6(a)为待测物体的光学图像; 图 6(b)为 3D-BP 成像结果; 图 6(c)为 3D-RMA 成像结果。由两种三维成像结果分析可得: 回波数据经 RMA 算法聚焦后能较好地恢复模型非金属部分, 较为准确地恢复图像原貌。BP 算法由于成像过程中回波的相干累加, 其他区域的杂波会叠加到图像上, 这会使成像物体上出现明显的强散斑点。将 BP 算法下剪刀的 SAR 图像较光学底图进行对比, 发现剪刀金属存在部分短缺, 在三维图像重构中无法恢复, 影响成像质量。

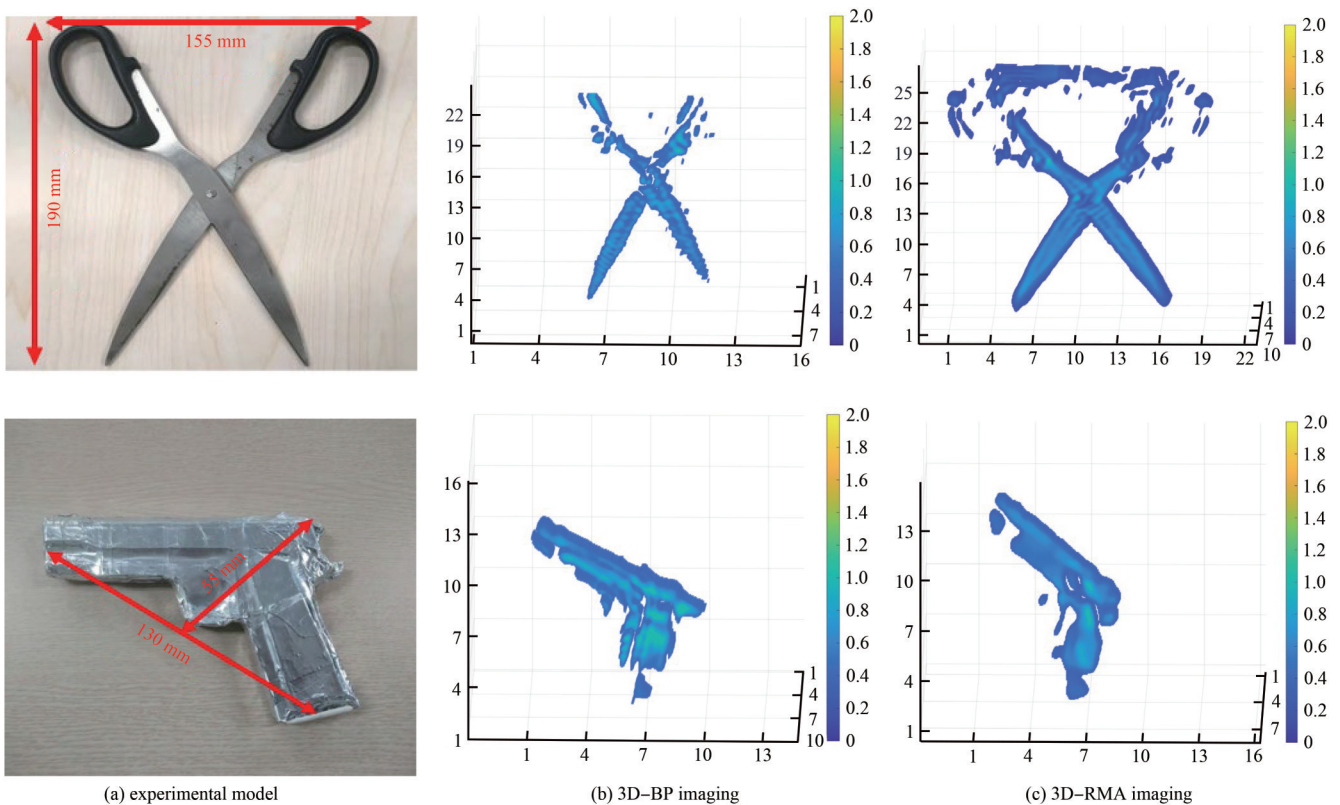


Fig.6 3D imaging

图6 三维成像

## 4 结论

本文首先介绍了近场条件下基于毫米波雷达传感器搭建的 SAR 成像系统及参数。又接着分析了在该系统下距离和二维方位向的理论分辨力及空间间隔。随后采用后向投影算法以及全息算法分别对剪刀和手枪模型进行二维成像、图像滤波分析与三维图像重构。在图像滤波这一步提出了一种基于局部信息联合 BM3D 的自适应滤波滑窗算法, 可完整地保留图像信息并有效抑制杂波。文中的实验场景适用于复杂电磁环境下单一物体的三维图像重建。但不足之处是在复杂的电磁环境下, BP 算法对模型非金属部分还原度较差, SAR 图像模型尺寸的恢复上存在偏差。因考虑到现实背景, 下一步的实验可对隐藏的危险物体和同一场景下的多个目标进行成像分析。并进一步优化 BP 算法, 提高成像过程中的鲁棒性, 使之最大程度地还原图像信息细节。

### 参考文献:

- [1] YANK M E, TORLAK M. Millimeter-wave near-field imaging with two-dimensional SAR data-presentation[C]// Proc. SRC Techcon. Austin, TX, USA: [s.n.], 2018.
- [2] WANG D, YOO S, CHO S H. Experimental comparison of IR-UWB radar and FMCW radar for vital signals[J]. Sensors, 2020, 20(22):6695.
- [3] YANIK M E, WANG D, TORLAK M. Development and demonstration of MIMO-SAR mm wave imaging testbeds[J]. IEEE

- Access, 2020(8):126019–126038.
- [4] 张野,邓彬,秦玉亮,等. 近程目标太赫兹全息成像算法及仿真[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):513–519. (ZHANG Ye,DENG Bin,QIN Yuliang,et al. Terahertz holographic imaging algorithm and simulation for short-distance target[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):513–519.)
- [5] WANG Z,QIAO L,WANG Y,et al. A wide-band three-dimensional submillimeter-wave imaging system based on vector network analyzer[C]// 2016 41st International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves(IRMMW–THz). Copenhagen, Denmark:IEEE, 2016.
- [6] YANIK M E,TORLAK M. Near-field MIMO–SAR millimeter-wave imaging with sparsely sampled aperture data[J]. IEEE Access, 2019(7):31801–31819.
- [7] 邢世其. 人造目标极化雷达三维成像理论与方法研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2012. (XING Shiqi. Research on the theory and method of 3D imaging of artificial target polarization radar[D]. Changsha,Hunan,China:National University of Defense Technology, 2012.)
- [8] 保铮,邢孟道,王彤. 雷达成像技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2005. (BAO Zheng,XING Mengdao,WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2005.)
- [9] YANIK M E,WANG D,TORLAK M. 3D MIMO–SAR imaging using multi-chip cascaded millimeter-wave sensors[C]// 2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing(GlobalSIP). Ottawa,ON,Canada:IEEE, 2019:1–5.
- [10] 乔灵博,游燕,柳兴,等. 毫米波多发多收阵列成像的分级重建方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2021,19(2):250–255. (QIAO Lingbo,YOU Yan,LIU Xing,et al. Hierarchical reconstruction method for millimeter-wave holographic imaging based on multiple-input-multiple-output array[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2021,19(2):250–255.)
- [11] SHEEN D M,MCKAMIN D L,COLLINS H D,et al. Near-field millimeter-wave imaging for weapons detection[C]// Presented at the Intelligent Robots and Visual Communications. Boston,Massachusetts:IEEE, 1992.
- [12] 王冠文,祁峰,李玉峰. 太赫兹近场合成孔径成像与焦平面成像对比[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2020,18(6):962–966. (WANG Guanwen,QI Feng,LI Yufeng. Comparison of terahertz near-field SAR imaging and focal plane imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2020,18(6):962–966.)
- [13] 郑岱阳,解金豹,张磊,等. 面向人体安检的毫米波转台成像实验[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(1):90–95. (ZHENG Daiyang,XIE Jinbao,ZHANG Lei,et al. Millimeter wave imaging experiments for personnel surveillance[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(1):90–95.)
- [14] 张铁男. 毫米波三维全息成像图像重构算法研究[D]. 南京:南京理工大学, 2016. (ZHANG Tienan. Research on millimeter-wave 3D holographic imaging image reconstruction algorithm[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Technology, 2016.)
- [15] 陆璐. 基于非局部均值和Lee滤波器的SAR图像去斑[D]. 西安:西安电子科技大学, 2013. (LU Lu. Research on millimeter-wave 3D holographic imaging image reconstruction algorithm[D]. Xi'an,China:Xidian University, 2013.)
- [16] 尚晋. Lee滤波器对档案图像的增强性能分析[J]. 重庆航天职业技术学院学报, 2010(5):45–49. (SHANG Jin. Analysis on the document image enhancement based on Lee filter[J]. Journal of Chongqing Aerospace Polytechnic, 2010(5):45–49.)
- [17] 郎丰铠,杨杰,李德仁. 极化SAR图像自适应增强Lee滤波算法[J]. 测绘学报, 2014,43(7):690–697. (LANG Fengkai,YANG Jie,LI Deren. An adaptive enhanced Lee speckle filter for polarimetric SAR image[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014,43(7):690–697.)
- [18] 张强. 基于BM3D的彩色图像混合噪声滤波算法研究[D]. 长春:吉林大学, 2019. (ZHANG Qiang. Research on mixed noise filtering algorithm for color images based on BM3D[D]. Changchun,China:Jilin University, 2019.)
- [19] 师君,阙钰佳,周泽南,等. 近场毫米波三维成像与异物检测方法[J]. 雷达学报, 2019,8(5):578–588. (SHI Jun,QUE Yujia,ZHOU Zenan,et al. Near-field millimeter wave 3D imaging and object detection method[J]. Journal of Radars, 2019,8(5):578–588.)

#### 作者简介:

宋少秋(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理、三维雷达成像. email: 1142291205@qq.com.

邢世其(1984–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为极化雷达成像、雷达信号处理、SAR对抗.

刘燊文(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为合成孔径雷达图像处理.

李永祯(1977–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为极化雷达成像、电子对抗.

汪俊澎(1998–), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理、电子对抗.

安孟昀(1997–), 女, 在读博士研究生, 主要研究方向为雷达信号处理、图像处理.