arXiv:2305.02030v1 [eess.SP] 3 May 2023

近场MIMO-ISAR毫米波成像

*IEEE*雷达会议论文集（已录用）

Josiah W. Smith
电气与计算机工程系
达拉斯德克萨斯大学
理查森，德克萨斯州75080
josiah.smith@utdallas.edu

Muhammet Emin Yanik
雷达与分析
德州仪器
达拉斯，德克萨斯州75243
m-yanik@ti.com

Murat Torlak达拉斯德克萨斯大学电气与计算机工程系，德克萨斯州理查森市75080
torlak@utdallas.edu

摘要

用于合成孔径雷达（SAR）和逆合成孔径雷达（ISAR）的多输入多输出（MIMO）毫米波传感器，解决了近场成像固有的成本效益和可扩展性方面的根本挑战。本文探讨并开发了近场 MIMO-ISAR毫米波成像系统。本文研究的旋转逆合成孔径雷达（R-ISAR）工作模式要求目标在距收发器固定的径向距离处旋转，同时收发器沿垂直轨迹扫描。使用77 GHz毫米波雷达，并考虑球形近场波前，可从这类二维扫描中重建高分辨率三维（3-D）图像。虽然现有文献中的研究主要采用单输入单输出圆形合成孔径雷达（SISO-CSAR）算法，或计算速度较慢的MIMO-CSAR图像重建算法，但本文提出了一种高效的MIMO三维全息成像新算法，并详细介绍了MIMO R-ISAR成像系统的设计。所提出的算法将多基地到单基地相位补偿应用于R-ISAR工作模式，从而能够使用高效的单基地算法。我们在原型MIMO R-ISAR平台上，通过真实成像场景展示了该算法的性能。我们的全集成系统由机械扫描仪和高效成像算法组成，能够兼具MIMO工作模式的扫描效率与单像素图像重建算法的计算效率。

关键词 毫米波（mmWave）· 多输入多输出（MIMO）· 逆合成孔径雷达（ISAR）·三维（3-D）成像

1 引言

过去几十年来，片上系统互补金属氧化物半导体（CMOS）射频集成电路（RFIC）的发展，使调频连续波（FMCW）毫米波（mmWave）雷达成为一种适用于成像应用且经济高效的解决方案。三维全息成像模式已在直线（平面）模式 [1, 2] 和圆柱模式 [3]下得到研究。此外，针对单输入单输出单基地阵列合成孔径雷达（SAR）[4] 和多输入多输出多基地阵列SAR [5]，高效算法也取得了进展。具体而言，中国国防科技大学（NUDT）的Gao已展示了用于二维圆周SAR（CSAR）成像 [6] 和三维MIMO-CSAR成像 [7]的算法。尽管Sheen [8],、Laviada [9], 、Gao等人提出的单输入单输出圆周合成孔径雷达算法能够高效生成高分辨率三维全息图像，但它们忽略了

©2020年 IEEE。允许将本材料用于个人用途。对于任何其他用途，均须事先获得 IEEE 的许可，无论是在现有还是未来的任何媒体中使用，包括为广告或促销目的重印或再版本材料、创作新的合集作品、转售或重新分发至服务器或列表，或在其他作品中重复使用本作品中受版权保护的任何部分。doi:10.1109/RadarConf2043947.2020.9266412

MIMO 阵列产生的多基地效应，导致相对于理想单输入单输出情形出现混叠和相位失配。尽管已有MIMO-CSAR算法试图解决这些问题，但与相应的单输入单输出算法相比，这些算法计算开销大、效率低。本文通过结合MIMO-CSAR的优势——天线单元更少、成本效益更高——以及单输入单输出圆周合成孔径雷达算法精简高效的计算特点，提出一种解决这一难题的方法，从而实现一种高效的高分辨率三维成像算法。在多输入多输出旋转逆合成孔径雷达（R-ISAR）模式下，我们制作了一套稳健的成像系统原型，以验证所提算法并展示其性能。

本文其余部分安排如下。第 2 节讨论所提出的 MIMO R-ISAR 场景中的回波信号及多基地到单基地转换。第 3 节推导 SISO R-ISAR 工作模式下的三维图像重建算法，并介绍关键的多基地到单基地相位校正。第 4 节概述采样准则和空间分辨率等问题。第 5 节通过仿真验证所提出的算法。第 6 节介绍成像原型系统。第 7 节报告真实三维成像结果，包括 R-ISAR 与 SAR 的比较，最后给出结论。

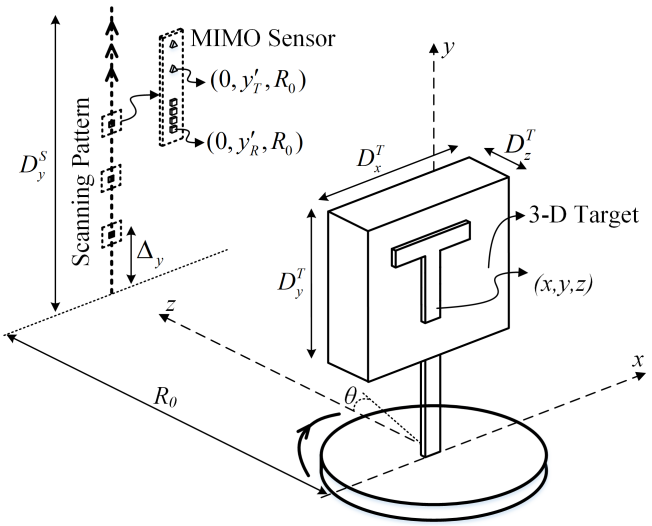


图 1：MIMO R-ISAR 成像配置的几何结构，其中通过机械移动线性 MIMO 阵列并旋转目标来合成圆柱孔径。

2 MIMO R-ISAR 信号模型

2.1 MIMO旋转ISAR（R-ISAR）回波信号

如图1所示，MIMO R-ISAR场景由一个旋转扫描器和一个沿y轴（垂直方向）扫描的MIMO阵列组成，其中旋转扫描器的中心位于原点，MIMO阵列与旋转器中心之间的距离保持恒定，为 R_0 。位于垂直位置 y'_T的发射机和位于垂直位置 y'_R的接收机到目标域中各点（x, y, z）的距离取决于旋转角 θ和距离 R_0。

$$\begin{aligned} R_T &= \sqrt{(x - R_0\cos\theta)^2 + (z - R_0\sin\theta)^2 + (y - y'_T)^2}, \\ R_R &= \sqrt{(x - R_0\cos\theta)^2 + (z - R_0\sin\theta)^2 + (y - y'_R)^2}. \end{aligned} \tag{1}$$

R-ISAR场景下的MIMO回波信号可建模为:

$$\mathrm{s}(\theta, k, y'_T, y'_R) = \iiint \frac{\mathrm{p}(x, y, z)}{R_T R_R} e^{jk(R_T + R_R)} dx dy dz, \tag{2}$$

其中， θ 为角度 o 旋转，且 k 表示波数。对于我们的研究， θ 允许采用宽角范围，最大可达 360° .

2.2 多基地到单基地转换

来自多基地MIMO阵列的接收回波数据经过简单变换，以近似虚拟SISO阵列各阵元对应的回波信号。为了将这一四维（4-D）MIMO信号转换为三维（3-D）虚拟SISO信号，需要执行以下相位补偿 [10, 11],

$$\hat{\mathrm{s}}(\theta, k, y') = \mathrm{s}(\theta, k, y'_T, y'_R) e^{-jk\frac{Sy^2}{4R_0}}, \tag{3}$$

其中，y' 为垂直方向的 包含所有 y'_T 和 y'_R 位置的扫描维度，且 d_y 是成对位置之间的距离。 f
发射和接收\ .....阵元。这种多基地到单基地转换仅在 d_y取值较小时成立。
这种补偿是算法中的关键步骤。通过补偿多基地MIMO信号的相位，获得一个近似信号，该信号对应于位于每对MIMO发射机/接收机中点处的虚拟阵元所接收的回波。随后，可将这些虚拟SISO数据输入第3节推导的高效三维成像算法。

3 单输入单输出三维图像重建算法的推导

本节给出的推导与Sheen在 [8], 中推导的CSAR算法类似，但包含若干关键差异，这些差异对于在圆周扫描场景中成功进行三维全息图像重建至关重要。
采用图1所示的R-ISAR场景，忽略幅度项时，单基地单输入单输出收发器的回波信号可建模为

$$\hat{\mathrm{s}}(\theta, k, y') = \iiint \mathrm{p}(x, y, z) e^{j2kR} dx dy dz, \tag{4}$$

其中

$$R = \sqrt{(x - R_0\cos\theta)^2 + (z - R_0\sin\theta)^2 + (y - y')^2}, \tag{5}$$

且 $\mathrm{p}(x, y, z)$ 是目标场景的复反射率函数。使用驻相法（MSP），式（4）中的指数项可分解为

$$\begin{aligned} &e^{j2k\sqrt{(R_0\cos\theta - x)^2 + (R_0\sin\theta - z)^2 + (y - y')^2}} = \\ &\iint e^{jk_r\cos\phi(R_0\cos\theta - x) + jk_r\sin\phi(R_0\sin\theta - z) + jk_{y'}(y - y'))} d\phi dk_{y'}. \end{aligned} \tag{6}$$

请注意，通过在空间谱域中分解点源的自由空间格林函数，也可以得到相同的结果 [12]。每个平面波分量在 x-z 平面中的角度为 ϕ， $k_{y'}$ 是波数的 y 分量。利用色散关系

$$4k^2 = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2, \tag{7}$$

我们将 k_r 定义为 x-z 平面内的波数分量，表示为

$$k_r = \sqrt{k_x^2 + k_z^2} = \sqrt{4k^2 - k_y^2}. \tag{8}$$

结合上述关系可得

$$\begin{aligned} &\hat{\mathrm{s}}(\theta, k, y') = \\ &\iint \left[\iiint \mathrm{p}(x, y, z) e^{-j(k_r\cos\phi)x - j(k_r\sin\phi)z - jk_{y'}y} dx dy dz \right] \\ &\times e^{jk_r R_0\cos(\theta - \phi) + jk_{y'}y'} d\phi dk_{y'}, \end{aligned} \tag{9}$$

[•] 括号内的项是反射率函数的三维傅里叶变换。使用以下极坐标下的傅里叶变换对:

$$\mathrm{p}(x,y,z) \iff \mathrm{P}(k_r\cos\phi, k_y, k_r\sin\phi), \tag{10}$$

(9) 得到

$$\begin{aligned}\hat{\mathrm{s}}(\theta,k,y') = \iint & e^{jk_rR_0\cos(\theta-\phi)} \\ & \times \mathrm{P}(k_r\cos\phi,k_y,k_r\sin\phi)e^{jk_{y'}y'}d\phi dk_{y'}.\end{aligned} \tag{11}$$

对两边关于 y' 进行傅里叶变换，并由于两个域重合而不再区分 y' 和 y：

$$\hat{\mathrm{S}}(\theta,k,k_y) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} e^{jk_rR_0\cos(\theta-\phi)}\mathrm{P}(k_r\cos\phi,k_y,k_r\sin\phi)d\phi. \tag{12}$$

定义：

$$\hat{\mathrm{P}}(\phi,k_r,k_y) \triangleq \mathrm{P}(k_r\cos\phi,k_y,k_r\sin\phi) \tag{13}$$

$$\mathrm{g}(\theta,k_r) \triangleq e^{jk_rR_0\cos\theta}. \tag{14}$$

Now:

$$\hat{\mathrm{S}}(\theta,k,k_y) = \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \mathrm{g}(\theta-\phi,k_r)\hat{\mathrm{P}}(\phi,k_r,k_y)d\phi, \tag{15}$$

这表示在 θ 域中的卷积：

$$\hat{\mathrm{S}}(\theta,k,k_y) = \mathrm{g}(\theta,k_r) \circledast_\theta \hat{\mathrm{P}}(\theta,k_r,k_y), \tag{16}$$

其中， $\circledast_\theta$ 是沿 θ 域的卷积算子。
对两侧沿 θ 域进行傅里叶变换，得到：

$$\hat{\mathrm{S}}(\Theta,k,k_y) = \mathrm{G}(\Theta,k_r)\tilde{\mathrm{P}}(\Theta,k_r,k_y), \tag{17}$$

其中

$$\mathrm{G}(\Theta,k_r) = \mathrm{FT}_{1D}^{(\theta)}[\mathrm{g}(\theta,k_r)], \tag{18}$$

$$\tilde{\mathrm{P}}(\Theta,k_r,k_y) = \mathrm{FT}_{1D}^{(\theta)}[\hat{\mathrm{P}}(\theta,k_r,k_y)] \tag{19}$$

通过求解 P，即应用逆滤波器 $G^*(\Theta,\ k_r)$，然后对等式两边沿 Θ 域 $\hat{}$ 进行逆傅里叶变换，得到 $P(\theta,\ k_r,\ k_y)$：

$$\tilde{\mathrm{P}}(\Theta,k_r,k_y) = \hat{\mathrm{S}}(\Theta,k,k_y)\mathrm{G}^*(\Theta,k_r), \tag{20}$$

$$\hat{\mathrm{P}}(\theta,k_r,k_y) = \mathrm{IFT}_{1D}^{(\Theta)}\left[\hat{\mathrm{S}}(\Theta,k,k_y)\mathrm{G}^*(\Theta,k_r)\right] \tag{21}$$

由式（13）
得：

$$\mathrm{P}(k_r\cos\theta,k_r\sin\theta,k_y) = \mathrm{IFT}_{1D}^{(\Theta)}\left[\hat{\mathrm{S}}(\Theta,k,k_y)\mathrm{G}^*(\Theta,k_r)\right], \tag{22}$$

其中 $k_x = k_r\cos\theta$ 和 $k_z = k_r\sin\theta$。这些水平波数分量的定义对于重建算法的推导至关重要，而在过去基于 MSP 的算法中却被错误地定义了 [8]。

$\hat{}P(\theta,\ k_r,\ k_y)$ 将是关于 θ 和 k_r 的均匀采样函数，需要根据公式 (8) 及以下关系，通过 Stolt 插值将其插值到均匀的 $(k_x,\ k_z,\ k_y)$ 网格上：

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{k_z}{k_x}\right), \tag{23}$$

$$k = \frac{1}{2}\sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}. \tag{24}$$

Stolt 插值过程将用 $\mathcal{S}[\bullet]$ 算子表示，即：

$$\mathrm{P}(k_x, k_y, k_z) = \mathcal{S}[\mathrm{P}(k_r\cos\theta, k_r\sin\theta, k_y)]. \tag{25}$$

最后，算法可用式 (26) 和式 (27) 概括。

$$\mathrm{p}(x,y,z) = \mathrm{IFT}_{3D}^{(k_x,k_y,k_z)}\left[\mathrm{P}(k_x,k_y,k_z)\right], \tag{26}$$

$$\mathrm{P}(k_x,k_y,k_z) = \mathcal{S}\left[\mathrm{IFT}_{1D}^{(\Theta)}\left[\mathrm{FT}_{2D}^{(\theta,y)}\left[\hat{\mathrm{s}}(\theta,k,y)\right]\mathrm{G}^*(\Theta,k_r)\right]\right]. \tag{27}$$

根据以上结果，完整的三维图像重建算法概述如下。据我们所知，先前文献中尚未出现将多基地到单基地转换与单像素重建算法相结合这一关键方法。该创新方法利用 MIMO 阵列拓扑，无需增加计算复杂度，即可实现高效成像系统。这样，无需采用效率低下的 MIMO 重建算法，也能发挥 MIMO 虚拟阵列的优势。相反，采用所提出的算法，可以轻松构建一个高效系统，快速扫描目标并立即生成高分辨率三维全息图像，如第 7 节所述。

高效 MIMO R-ISAR 三维全息成像算法

1. 收集原始 4-D MIMO 回波数据 $\mathrm{s}(\theta,k,y_T,y_R)$。2. 执行式 (3) 中描述的相位补偿，得到 $\hat{}\mathrm{s}(\theta,k,y)$，即 3-D 单基地等效数据。3. 沿相位校正数据的 θ 和 y 维执行二维快速傅里叶变换，得到 $\hat{}S(\Theta,k,k_y)$。4. 生成方位滤波器 $\mathrm{g}(\theta,k_r) \triangleq e^{jk_rR_0\cos\theta}$，并沿 θ 维执行 FFT，以计算方位频谱滤波器 $\mathrm{G}(\Theta,k_r)$ $\hat{}$5. 将 $\mathrm{S}(\Theta,k,k_y)$ 与逆滤波器 $\mathrm{G}^*(\Theta,k,k_y)$ 相乘，并沿 Θ 域执行逆快速傅里叶变换，得到 $\mathrm{P}(k_r\cos\theta, k_r\sin\theta, k_y)$。6. 根据式 (8)、(23) 和 (24) 进行 Stolt 插值，将极坐标空间频谱 $\mathrm{P}(k_r\cos\theta, k_r\sin\theta, k_y)$ 转换为笛卡尔坐标 $\mathrm{P}(k_x,k_y,k_z)$。7. 最后，沿 k_x、k_y和 k_z 执行 3-D 逆快速傅里叶变换，以恢复复反射率函数 $\mathrm{p}(x,y,z)$。

4 关键成像问题讨论

4.1 采样准则

与所有采样应用类似，R-ISAR 工作模式下的空间采样必须满足空间奈奎斯特定理。因此，为实现无混叠三维全息图像重建，必须满足以下采样准则，具体讨论见 [7,8,13]。

$$\Delta_k < \frac{\pi}{2R_T}, \tag{28}$$

$$\Delta_y < \frac{\lambda\sqrt{(D_y^S + D_y^T)^2/4 + R_0^2}}{2(D_y^S + D_y^T)}, \tag{29}$$

$$\Delta_\theta < \frac{\pi\sqrt{R_0^2 + R_T^2}}{2k_{max}R_0R_T}. \tag{30}$$

R_T 是目标场景的最大半径，k_{max} 是最大波数，D_y^T和 D_y^S分别是目标高度和扫描高度。

4.2 空间分辨率

SAR 成像系统另一个值得重点讨论的问题是空间分辨率。垂直分辨率独立于水平方向的旋转，可采用有效孔径法进行计算，如 [13] 所示。

$$\delta_y \approx \frac{\lambda_c R_0}{2D_y^S} \tag{31}$$

λ_c 是中心频率的波长。为推导径向分辨率，我们将问题限制在二维水平面内，从而去除扫描的垂直维度。沿该水平面，点扩散函数（PSF）可解析地计算为 [14]:

$$\mathrm{PSF}(r,\theta) = k_{max}\frac{\mathrm{J}_1(2k_{max}r)}{\pi r} - k_{min}\frac{\mathrm{J}_1(2k_{min}r)}{\pi r} \tag{32}$$

由式（32）可推导出水平分辨率，其中 $\mathrm{J}_1(\bullet)$ 表示一阶贝塞尔函数， k_{min} 是最小波数。

$$\delta_R = \frac{2.4}{k_{max}+k_{min}} \tag{33}$$

为简化起见，垂直和水平分辨率均采用理想点反射体进行分析。然而，在涉及真实目标场景的实际应用中，这种理想的空间分辨能力很少能够实现 [7]。因此，这些表达式构成了经验空间分辨率的下限。

5 R-ISAR 仿真

为了模拟回波信号，使用公式 (2) 将目标建模为点反射体。所有仿真均采用表 1 中所示的 MIMO 参数，其中 θ_{max} 为最大旋转角， N_y 为垂直采集次数， Δ_y 为 MIMO 采集之间的垂直间距。

5.1 点扩散函数（PSF）

使用式（2），在 MATLAB 中模拟回波信号：在 x-z 平面上位于 $(-0.15,\ 0)$ 的位置放置一个单点反射体，并采用表 1 中的参数。随后，使用第 3 节所述的所提算法重建图像。图 2 展示了三维点扩散函数的二维切片。

5.2 三维点

此外，为了在仿真中验证该算法，生成了一组三维点并仿真其回波信号。该算法再次有效地重建了图像，生成的图像几乎完美地复现了输入反射率函数，如图 3 所示。

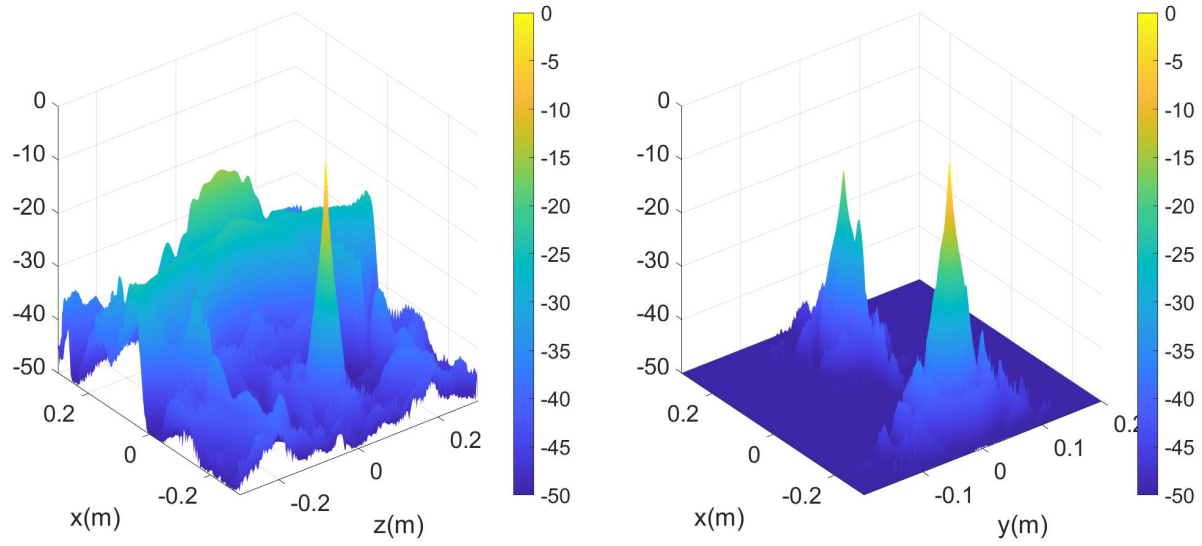
在仿真中成功验证 算法后，我们搭建了一台定制原型 R-ISAR 扫描仪，用于实验 y
采集数据并测试 该算法在真实回波数据上的图像质量。

6 实验设置

如图 1 所示，通过机械方式沿垂直轨迹连续移动线性 MIMO 阵列，并旋转目标，可合成圆柱孔径。系统由德州仪器（TI）的 IWR1443-Boost、mmWave-Devpack 和 TSW1400 组成，并安装在如图 4a 所示的二维垂直和水平扫描仪上。对于此应用，仅使用垂直运动。被扫描物体安装在旋转器上。所有机械运动均由步进驱动器和嵌入式微控制器控制。整个装置由定制的 MATLAB 图形用户界面（GUI）控制，如图 4b 所示。

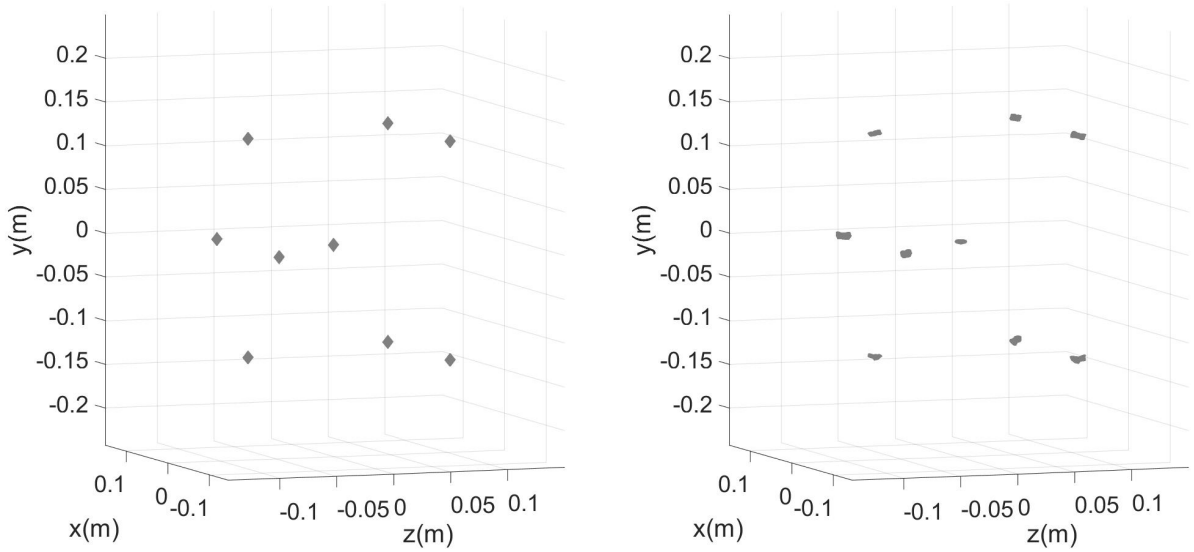
7 成像结果

原型扫描仪执行二维垂直扫描和旋转扫描。图 4a 所示的大型刀具以一定角度安装在旋转器上，并进行扫描。请注意刀具上的缺口和锯齿状边缘。



(a) (b)

图 2： 点扩散函数（dB）： $R_0 = 0.25$ m 和 $D_y^S = 484.8$ mm (a) 二维 x-z PSF，(b) 二维 x-y PS F



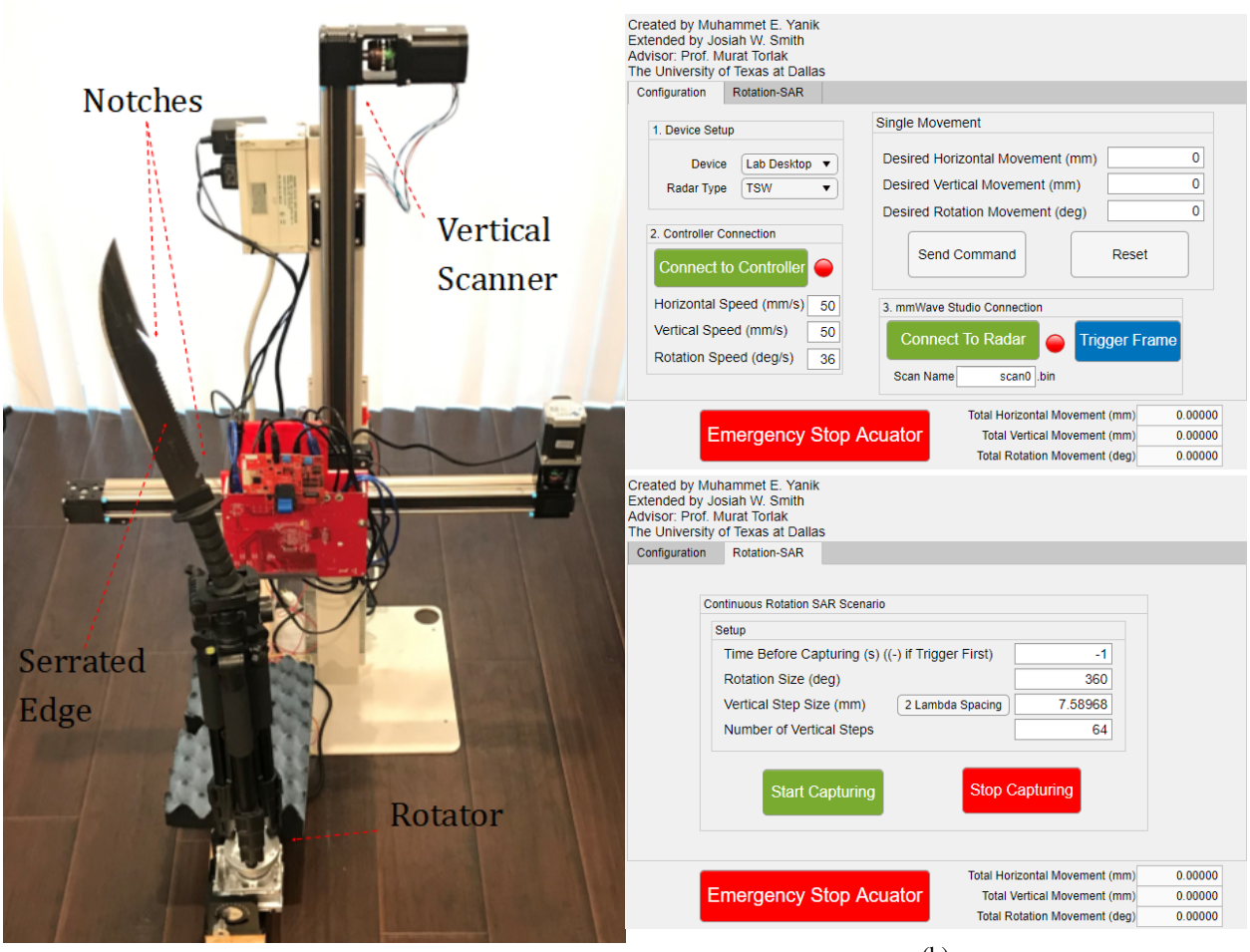
(a) (b)

图 3：(a) 点反射率函数的三维输入网格，以及 (b) 三维重建图像 .

7.1 单输入单输出成像结果

在第一个实验中，使用一对收发器来模拟全双工单输入单输出收发器，并使用完整的 4 GHz 带宽。由于 MIMO 虚拟阵列由 8 个等间距虚拟阵元组成，覆盖范围为 2λ，单输入单输出扫描的垂直间距将为 $\lambda/4$，并且需要进行 512 次垂直采集才能复现 MIMO 扫描，从而大幅增加扫描时间。如表 1 所示，其余所有参数保持不变。

忽略多基地到单基地转换，将所提出的算法应用于单输入单输出回波数据，以生成全息图像，如图5a所示。虽然高分辨率图像清晰地呈现了刀的细节，但整个扫描耗时近两个半小时。接下来，我们利用 MIMO 虚拟阵列来



(a) (b)

图 4：(a) 定制旋转式 ISAR 扫描仪，以及 (b) MATLAB 图形用户界面。

表 1：R-ISAR 雷达参数

	R_0	Δ_θ	θ_{max}	N_y	D_y^S	Δ_y
MIMO	0.25 m	0.036°	360°	64	484.8 mm	2λ
SISO	0.25 米	0.036°	360°	512	484.8 毫米	$\lambda/4$

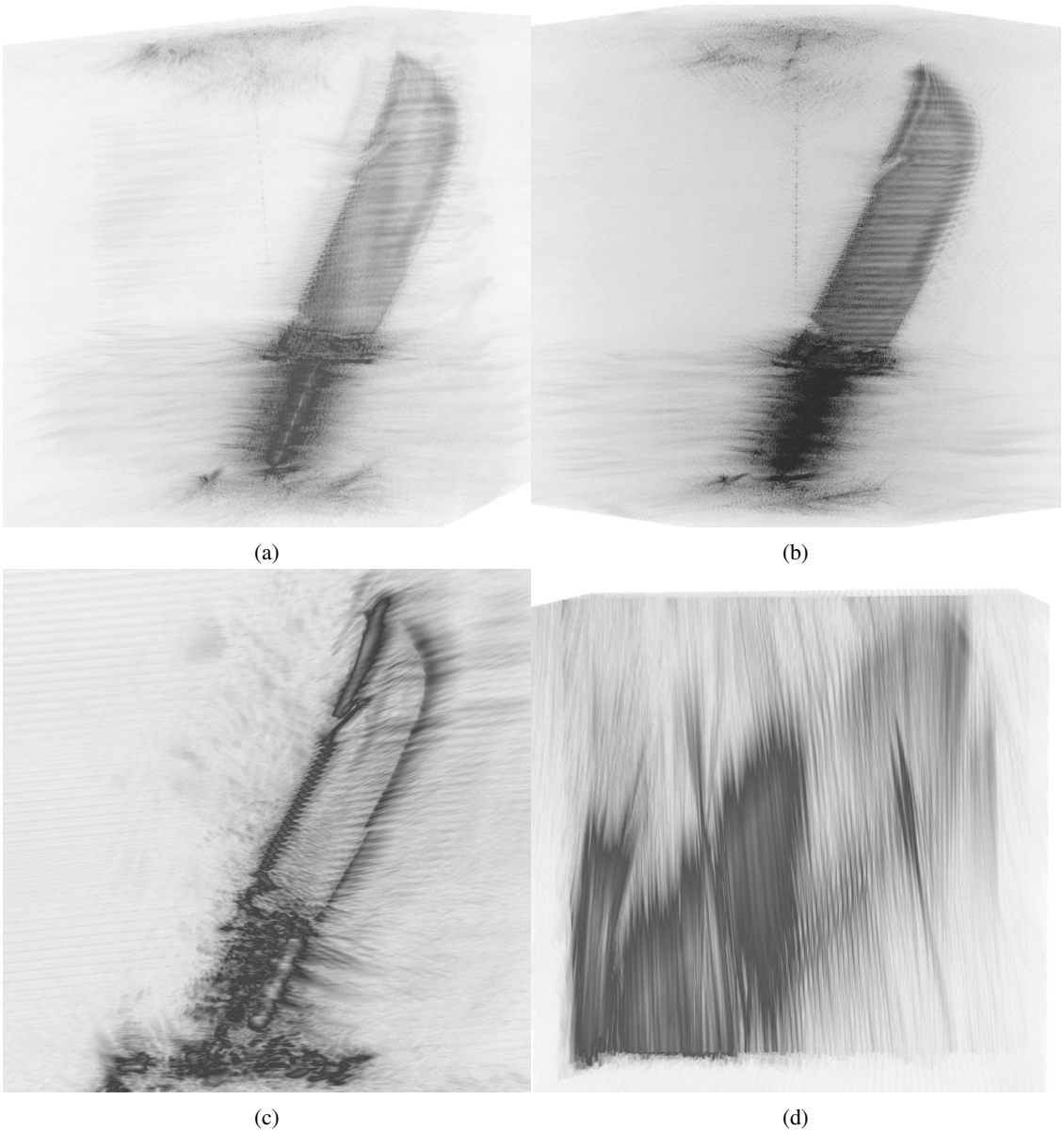
大幅缩短扫描时间。所提出算法的关键创新之处在于，利用 MIMO 拓扑提高扫描效率，同时不增加计算复杂度。

7.2 MIMO成像结果

现在，再次对这把刀进行扫描，这次使用 TI IWR1443-Boost 上的 2 个发射机和 4 个接收机天线，带宽仍为 4 GHz。经过校准以消除仪器延迟后，使用所提出的 R-ISAR MIMO 三维全息成像算法处理回波数据，并生成图像。下方图 5b 中同样给出了三维渲染图。MIMO 扫描耗时不到二十分钟，完成速度显著快于单输入单输出扫描，同时图像质量未受影响。

7.3 直线型 MIMO合成孔径雷达对比

与直线（平面）SAR 模式相比，R-ISAR 工作模式更适合近场目标扫描，因为雷达可以从各个方向扫描目标。为展示 R-ISAR 相较于 SAR 的优势，



(a) (b)

(c) (d)

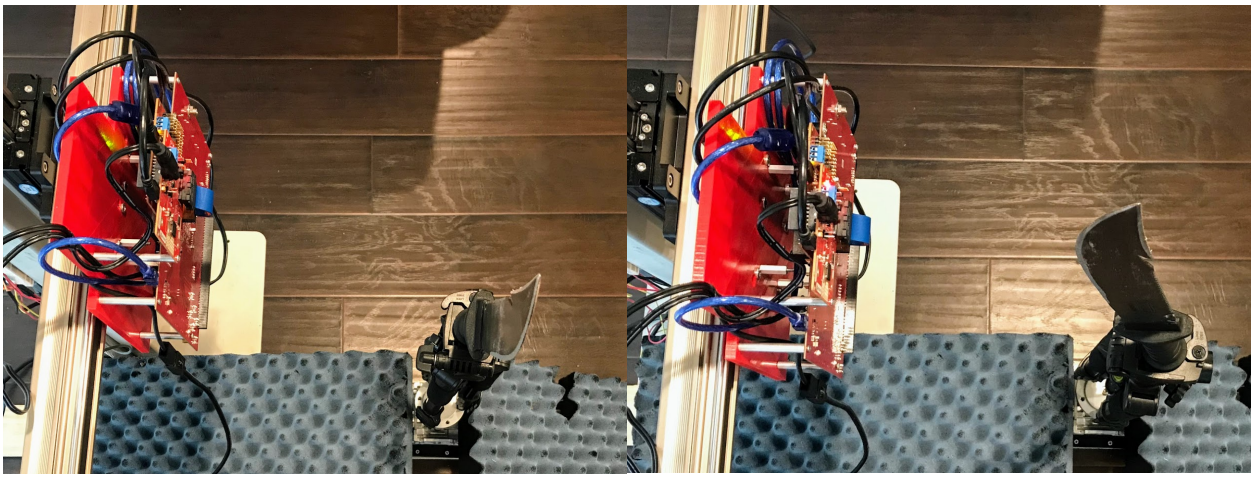
图 5：重建图像对比：（a）单输入单输出 R-ISAR 三维最大强度投影，（b）多输入多输出 R-ISAR 三维最大强度投影，（c）刀片平行于扫描平面的多输入多输出 R-SAR，（d）刀片垂直于扫描平面的多输入多输出 R-SAR

使用表2中的参数，沿机械扫描仪的 x 轴和 y 轴进行直线二维扫描，不旋转刀具，其中 D_S^x 为水平扫描的尺寸。提出了两种情形：首先，使刀刃平行于扫描平面进行扫描；然后，再使刀刃垂直于扫描平面进行扫描。两种配置如图6所示。当刀具平行于扫描平面时，得到的图像重建质量很高，呈现出与刀刃相似的形状（图5c）。但当刀具垂直于扫描平面时，刀刃的成像效果很差（图5d）。

表2：MIMO SAR 雷达参数

D_x^S	Δ_x	N_y	D_y^S	Δ_y
450 毫米	0.5 毫米	64	484.8 毫米	2λ

对图5中的四幅图像进行定性考察后发现，MIMO R-ISAR 图像（图5b）的图像质量似乎与单输入单输出 R-ISAR 扫描（图5a）相同，甚至更好。对于 MIMO合成孔径雷达（平面）扫描，虽然



(a) 刀片平行 (b) 刀片垂直

图 6：直线 SAR 扫描中与扫描平面平行（a）和垂直（b）的刀片 s.

垂直扫描时刀的图像质量（图5c）与 MIMO R-ISAR 图像相当，但目标并非总是与扫描平面理想平行。当刀垂直于扫描平面进行扫描时（图5d），刀刃的重建图像质量会显著下降，因为 SAR 模式的横向分辨率远低于 R-ISAR 模式。对于 R-ISAR 工作模式，由于目标旋转了整整 360°，图像质量不受物体相对于旋转轴的朝向影响。因此，在整个旋转过程中，R-ISAR 工作模式会在不同时间捕获与扫描平面平行和垂直的目标。最后，根据表 3 所示的各扫描模式所需时间，R-ISAR 模式可实现最快的扫描速度和最佳的图像表现。通过使用本文提出的算法，我们得以大幅缩短扫描时间，同时保持单基地算法的计算效率。

表 3：扫描时间

SISO R-ISAR	多输入多输出R-ISAR	MIMO SAR
1032 秒	8202 秒	1740 秒

8 结论

本文开发了一种高效的MIMO旋转ISAR三维全息成像系统，该系统基于单像素极坐标格式化算法和多基地到单基地转换。该算法成功结合了MIMO系统的扫描效率与单基地重建算法的计算效率。此外，我们开发了一套完整、稳健的三维成像系统，由垂直扫描的MIMO雷达和用于旋转目标物体的旋转器组成。我们的系统全面集成了扫描场景设置、数据采集与校准、算法实现和图像检查，构成了一个完整、高效的三维全息成像平台。利用这一原型系统，我们采集了高分辨率图像，以展示该系统在三维场景重建方面的有效性，并验证MIMO R-ISAR算法相较于单输入单输出R-ISAR和MIMO合成孔径雷达的性能。此外，结果表明，MIMO R-ISAR工作模式的性能优于MIMO-SAR模式，具有更高的距离分辨率和横向分辨率，因此R-ISAR更适用于近场成像应用。该算法和系统展示了利用MIMO旋转逆合成孔径雷达实现高性能近场成像的能力。

致谢

本研究通过达拉斯德克萨斯大学德克萨斯州模拟技术卓越中心（TxACE）获得半导体研究公司（SRC）项目 2712.029 的资助。

参考文献

[1] M. E. Yanik 和 M. Torlak，“利用二维合成孔径雷达数据进行毫米波近场成像”，载于*SRC*技术大会论文集，编号 P093929，美国德克萨斯州奥斯汀，2018年9月。[2] L. Qiao、Y. Wang、Z. Shen、Z. Zhao 和 Z. Chen，“用于直接毫米波全息成像的压缩感知”，《应用光学》，第54卷，第11期，第3280–3289页，2015年4月。[3] D. Sheen、D. McMakin 和 T. Hall，“近场三维雷达成像技术及应用”，《应用光学》，第49卷，第19期，第E83–E93页，2010年6月。[4] D. M. Sheen、D. L. McMakin 和 T. E. Hall，“用于隐藏武器探测的三维毫米波成像”，《*IEEE*微波理论与技术汇刊》，第49卷，第9期，第1581–1592页，2001年9月。[5] X. Zhuge 和 A. G. Yarovoy，“利用距离迁移技术进行三维近场MIMO阵列成像”，《*IEEE*图像处理汇刊》，第21卷，第6期，第3026–3033页，2012年2月。[6] J. Gao、B. Deng、Y. Qin、H. Wang 和 X. Li，“考虑球面波前的高效太赫兹宽角度NUFFT逆合成孔径成像”，《传感器》，第16卷，第12期，第2120页，2016年12月。[7] J. Gao、B. Deng、Y. Qin、H. Wang 和 X. Li，“一种高效的MIMO圆柱扫描毫米波全息三维成像算法”，《*IEEE*微波理论与技术汇刊》，第66卷，第11期，第5065–5074页，2018年8月。[8] D. M. Sheen、D. L. McMakin、T. E. Hall 和 R. H. Severtsen，“实时宽带圆柱全息监视系统”，1999年1月，美国专利5,859,609。[9] J. Laviada、A. Arboleya-Arboleya、Y. Álvarez、B. González-Valdés 和 F. Las-Heras，“利用毫米波便携式相机进行多视角三维重建”，《科学报告》，第7卷，第1期，第6479–6479页，2017年7月。[10] M. E. Yanik、D. Wang 和 M. Torlak，“利用多芯片级联毫米波传感器进行三维MIMO合成孔径雷达成像”，载于*IEEE*全球信号与信息处理大会论文集（*GlobalSIP*），加拿大安大略省渥太华，2019年11月，第1–5页。[11] M. E. Yanik 和 M. Torlak，“利用稀疏采样孔径数据进行近场MIMO合成孔径雷达毫米波成像”，《*IEEE*开放获取》，第7卷，第31 801–31819页，2019年3月。[12] J. Detlefsen、A. Dallinger、S. Huber、S. Schelkshorn 和 F. H. F. und Schaltungen，“人体毫米波成像的有效重建方法”，载于第二十八届*URSI*大会暨科学研讨会论文集（*URSI GASS*），印度新德里，2005年10月，第23–29页。[13] X. Zhuge 和 A. G. Yarovoy，“一种用于隐藏武器探测的基于稀疏孔径MIMO合成孔径雷达的超宽带成像系统”，《*IEEE*地球科学与遥感汇刊》，第49卷，第1期，第509–518页，2010年7月。[14] J. K. Gao、Y. L. Qin、B. Deng、H. Q. Wang、J. Li 和 X. Li，“基于逆合成孔径技术的太赫兹宽角度成像及平面波判据分析”，《红外、毫米波与太赫兹波杂志》，第37卷，第4期，第373–393页，2016年1月。