

近场毫米波雷达高分辨率稀疏成像算法研究

徐雷钧 王浩宇 白 雪 陈建锋

(江苏大学电气信息工程学院 镇江 212013)

摘要: 近场毫米波雷达的高分辨率成像通常依赖大量数据采集,现有的时域和频域成像算法都是在满足奈奎斯特采样率条件下处理信号,这在数据采集和硬件成本上带来负担。本文基于测量目标回波信号的稀疏性,提出了一种结合压缩感知理论的毫米波雷达稀疏成像算法,有效降低了数据需求量。算法重点围绕欠采样数据在波数域展现的稀疏性构建稀疏模型,进行优化求解得到重构信号。在方位方向上应用匹配滤波算法实现目标二维成像。实验结果表明,在数据欠采样条件下,本文算法能够实现测量目标的高分辨率成像,显著降低了数据需求,且图像质量在各项指标均优于其他压缩感知优化算法。在目标物体被遮挡情况下依然能够有效恢复被遮挡部分的图像信息,具有较强的抗干扰能力和鲁棒性。

关键词: 毫米波;合成孔径雷达;压缩感知;稀疏恢复

中图分类号: TN95 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Research on high-resolution sparse imaging algorithms for near-field millimeter-wave radar

Xu Leijun Wang Haoyu Bai Xue Chen Jianfeng

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: High-resolution imaging with near-field millimeter-wave radar typically relies on extensive data acquisition. Existing time-domain and frequency-domain imaging algorithms process signals under the condition of satisfying the Nyquist sampling rate, which imposes significant burdens on data collection and hardware costs. This paper proposes a millimeter-wave radar sparse imaging algorithm based on compressive sensing theory, leveraging the sparsity of the measured target echo signals to effectively reduce data requirements. The algorithm constructs a sparse model based on the sparsity exhibited by undersampled data in the wavenumber domain, and optimizes it to reconstruct the signal. A matched filtering algorithm is applied in the azimuth direction to achieve two-dimensional imaging of the target. Experimental results demonstrate that under conditions of data undersampling, the proposed algorithm can achieve high-resolution imaging of the target, significantly reducing data requirements. Moreover, the image quality outperforms other compressed sensing optimization algorithms in all metrics. Even under conditions where the target object is partially occluded, the algorithm can effectively restore the occluded portions of the image, demonstrating strong interference resistance and robustness.

Keywords: millimeter-wave; synthetic aperture radar; compressive sensing; sparse recovery

0 引言

随着微波器件制造工艺的迅速进步和雷达系统技术的飞跃发展,毫米波雷达成像技术正迅速拓展其应用前景,尤其是在电子安检和无损检测等领域^[1-2]。然而,在这些应用中,如何进一步提升成像精度^[3]与处理效率^[4]依旧是困扰毫米波成像系统的核心难题。传统的基于奈奎斯特采样定理的近场毫米波成像算法^[5]虽然理论上保证了重构精度,

但是对数据需求量很大。现有的毫米波成像平台,一个4接收通道的雷达传感器最终回波数据维度为 $256 \times 407 \times 200 \times 4$,导致计算复杂度陡增,并对硬件资源提出了极高的要求^[6]。此外,实际雷达回波数据中常包含大量冗余信息,观测目标通常仅占据图像的局部区域,这种现象不仅增加了数据处理负担,也严重限制了成像效率。尤其是在非理想采样条件下,传统算法易受主瓣能量泄露和频谱混叠的影响,从而产生重影和成像失真问题^[7]。

幅相补偿算法^[8-9]是针对上述问题提出的一种实现空间稀疏采样的方法,这是一种基于相邻采样点幅度和相位补偿的重构方法,通过中频欠采样的方式,在距离压缩过程中利用回波信号的相关性进行补偿,恢复完整数据。该方法在抑制重影和提升成像质量方面表现良好,但由于恢复过程需遍历所有稀疏采样数据,计算复杂度较高。

此外还有学者将矩阵补全(matrix completion, MC)算法逐渐引入毫米波雷达成像领域^[10]。该算法通过利用回波数据的低秩特性,在稀疏采样条件下通过核范数最小化实现高效的成像重构。不过 MC 算法的鲁棒性较差,若存在噪声或杂波时成像效果会大打折扣^[11]。

在此背景下,压缩感知(compressed sensing, CS)理论^[12]的发展为毫米波雷达成像带来了新的突破口。Donoho^[12]在 2006 年提出的压缩感知理论表明,当信号具备稀疏性时,在远低于奈奎斯特采样率的条件下,仍可通过优化算法进行准确重构。这一理论为毫米波雷达成像提供了突破数据冗余瓶颈的可能^[13]。且相较于矩阵补全算法,压缩感知在信号具有稀疏性的情况下更具有优势。文献[14]提出了一种具有保相性的距离压缩方法,对一维距离向采用压缩感知算法,有效降低雷达成像系统的数据率,但是运算速度较慢,缺乏实时性。另外有学者针对压缩感知优化算法不断进行改进。文献[15]对于 L0 范数最小化引入一种新的平滑函数(SL0)以提高其逼近程度,这类算法估计能力较强,重构精度高,但计算复杂度较高。贪婪追踪算法也逐渐广泛应用于压缩感知问题求解中,如正交匹配追踪(OMP)^[16]、正则化匹配追踪(ROMP)^[17]等。这类算法计算量较小,运算速度快,但信号回复精度较差。对于雷达信号中噪音干扰问题也有新的解决方法提出^[18],通过分析干扰信号残差能量随 OMP 算法分解迭代变化特征可对回波信号中的噪音干扰进行抑制,有效消除外界噪音影响。

本文提出了一种基于压缩感知理论与近场毫米波雷达成像相结合的新方法。考虑到近场条件下目标回波为球面波,因此在重构过程中引入球面波模型以补偿波前曲率。以回波信号在波数域上展现的稀疏性为依据,把波数域相位函数作为观测矩阵,对采集数据构建稀疏模型,后通过 L0 范数优化求解^[19],得到重构信号,通过匹配滤波算法以实现高效的二维成像。实验结果表明,本文方法在欠采样条件下能够实现接近传统全采样算法的高分辨率成像,同时在目标遮挡条件下依然能恢复图像,有效降低了数据采集过程的时间成本和硬件负担。

1 近场毫米波成像模型及算法

1.1 近场 SAR 模型

本文设计的近场毫米波雷达成像系统采用线性阵列天线,以机械扫描的方式沿方位向和高度向逐点扫描,形成二维合成孔径雷达(SAR),通过匹配滤波算法重构目标图像^[20]。具体结构如图 1 所示。在天线扫描的平面上建立

笛卡尔坐标系, x 轴、 y 轴和 z 轴分别代表水平向、垂直向和距离向。天线在 x 轴、 y 轴的步进距离为 dx 和 dy , 扫描范围表示为 Dx 和 Dy 。天线所在初始位置为 $(x, y, z = 0)$, 测量目标与扫描平面之间的垂直距离为 z_0 , 坐标为 (x', y', z_0) , 目标反射系数 $f(x, y)$ 。接收到的回波信号表示为:

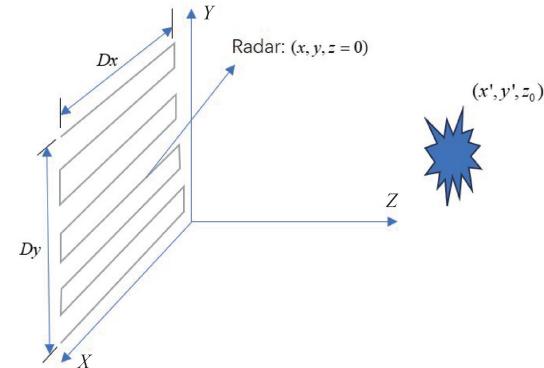


图 1 二维毫米波雷达近场扫描结构

Fig. 1 Schematic of the near-field scanning structure of 2D millimeter-wave radar

$$s(x', y') = \iint f(x, y) \exp(-j2kR) dx dy \quad (1)$$

式中: $R = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z_0^2}$ 即测量目标与天线间直线距离, $k = w/c$ 表示波数, w 是角频率。由于近场条件下回波信号不能简单地视为平面波,而是球面波。在三维坐标中,球面波可以近似展开为多个平面波的叠加:

$$\exp(-j2kR) = \iint \exp[-jk_x(x' - x) - jk_y(y' - y) + jk_z z_0] dk_x dk_y \quad (2)$$

式中: k_x 、 k_y 和 k_z 表示波数 k 在三维空间中的 3 个分量,满足电磁波色散关系:

$$k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 = (2k)^2 \quad (3)$$

将式(2)带入式(1)中可得到:

$$s(x', y') = \iint \left(\iint f(x, y) \exp(-jk_x x - jk_y y) dx dy \times \exp[jk_x x' + jk_y y' + jk_z z_0] \right) dk_x dk_y \quad (4)$$

对回波数据进行二维傅里叶变换:

$$s(x', y') = \iint \text{FFT}_{2D}[f(x, y)] \times \exp[jk_x x' + jk_y y' + jk_z z_0] dk_x dk_y = \iint \text{FFT}_{2D}[f(x, y)] \times \exp(jk_z z_0) \times \exp(jk_x x' + jk_y y') dk_x dk_y \quad (5)$$

式(5)可以简化为:

$$s(x', y') = \text{FFT}_{2D}^{-1}[\text{FFT}_{2D}[f(x, y)] \times \exp(jk_z z_0)] \quad (6)$$

对式(6)进行傅里叶反变换可得最终反射系数:

$$f(x, y) = \text{FFT}_{2D}^{-1}[\text{FFT}_{2D}[s(x, y, z)] \times \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_x^2 - k_y^2} z_0)] \quad (7)$$

最终得到的反射系数即目标成像函数。近场毫米波成

像系统的工作流程可以总结为:天线沿轨迹扫描目标得到回波数据,对其进行二维 FFT 得到方位向压缩数据。设计相应的匹配滤波器进行相位补偿,对最终结果进行二维 IFFT 变换得到目标图像。

1.2 改进的压缩感知重构算法

压缩感知理论通过在欠采样条件下利用优化算法,实现对信号的精准重构,达到与全采样数据相似的成像效果,从而显著降低数据采集需求并优化成像效率。然而压缩感知算法需要信号具有稀疏性,在实际应用中信号的稀疏特性并不容易获取。因此需要寻找一个适合信号的变换域保证其稀疏性,重建质量也会受到稀疏基性能限制。针对上述问题提出一种近场毫米波雷达数据采集处理流程。将天线的扫描平面在水平方向和垂直方向上根据步进距离分别划分为 m, n 个点的网格,每个点接收到的回波数据表示为 $s(m, n)$,同样将成像平面划分为 $p \times q$ 个网格,对应每个点反射系数为 $f(p, q)$,任意两点间距离表示为 $R(m, n, p, q)$,对式(6)进行离散化得到:

$$s(m, n) = \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q f(p, q) \exp[-j2kR(m, n, p, q)] \quad (8)$$

将回波数据堆叠为一维向量:

$$\begin{bmatrix} s(1, 1) \\ \vdots \\ s(M, 1) \\ \vdots \\ s(1, N) \\ \vdots \\ s(M, N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(1, 1)^T \\ \vdots \\ a(M, 1)^T \\ \vdots \\ a(1, N)^T \\ \vdots \\ a(M, N)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f(1, 1) \\ \vdots \\ f(P, 1) \\ \vdots \\ f(1, Q) \\ \vdots \\ f(P, Q) \end{bmatrix} \quad (9)$$

简化为:

$$s = Af \quad (10)$$

式中: $a(m, n)$ 表示对应网格点的相位函数,即:

$$a(m, n) = [\exp(-j2kR(m, n, 1, 1)), \dots, \exp(-j2kR(m, n, P, Q))]^T \quad (11)$$

式中: $s \in \mathbb{C}^{MN \times 1}, A \in \mathbb{C}^{MN \times PQ}, f \in \mathbb{C}^{PQ \times 1}$ 。雷达成像过程中,目标的回波信号中仅有小部分包含特征信息,其反射系数较大。其余大部分都是冗余噪音,该部分的反射系数很小可以近似为 0。在波数域中,信号的相位信息与目标的空间位置、形状和反射特性密切相关。其相位变化通常只集中在目标本身及周围局部区域,其他位置相位变化较小,此时目标的回波信号在波数域相位函数上近似看作具有稀疏性。因此可以基于波数域相位函数构建信号稀疏基,然后采用压缩感知算法对稀疏目标进行重构。有效降低数据采集量,减少了信号处理复杂度,同时对于在波数域表现为较小反射系数的冗余噪音可以有效的抑制,提高了鲁棒性。通过一个测量矩阵 M 来控制采样率。欠采样数据可表示为:

$$y = Ms = MAf \quad (12)$$

为了在压缩感知过程中有效控制采样率,可以从原始数据矩阵中选取行 K 行作为采样点,式中: $M \in \mathbb{C}^{K \times MN}$ 。为保证采样的随机性和不相干性,采用随机高斯矩阵作为测量矩阵,该矩阵不仅具有良好的不相干性,还满足压缩感知中的 RIP(限制等距性)条件,从而保证重构的稳定性和准确性。在此基础上,最终的稀疏模型可以表示为:

$$y = \Phi f \quad (13)$$

式中: y 表示欠采样数据, Φ 为传感矩阵。因此可以将稀疏信号重构转化为优化求解问题。即将式(13)转化为:

$$\begin{aligned} \min \quad & \|f\|_0 \\ \text{s.t.} \quad & y = \Phi f \end{aligned} \quad (14)$$

通过最小化 L_0 范数以求解稀疏表示问题在数学上属于 NP 难题,因其需要遍历所有可能的稀疏解,计算复杂度极高且难以在实际应用中实现。为此,本文采用 L_0 范数的最优凸近似 L_1 范数,通过将原问题转换为更易求解的优化问题来获得近似解。 L_1 范数最小化能够在保证稀疏性的前提下实现欠采样数据的重构,将测量数据恢复为完整的信号,从而实现对目标的稀疏重建成像。这种方法确保在有限采样率下获得高质量的图像重构,进一步提升成像系统的效率和精度。图 2 为完整算法流程图。

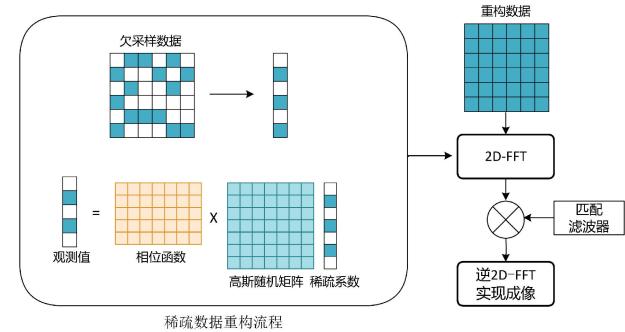


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flowchart

2 实验结果与分析

2.1 实验系统搭建

本文基于合成孔径雷达原理搭建了一个近场毫米波雷达成像系统,系统分为机械结构和上位机软件两部分。雷达采用 TI 公司生产的 IWR1843BOOST,可以发射 77 GHz 的 FMCW(线性调频连续波)信号^[21]。雷达在一定路径上移动,在每个采样点都要进行回波采集,工作模式下处于“走-停-走”的状态进行扫描。雷达模块搭载于二维扫描导轨之上,导轨分为水平方向和垂直方向,由步进电机进行驱动。步进电机由 Arduino UNO 型号单片机控制,该部分与 PC 端相连,用来接收由上位机发送的各项指令。系统的软件部分由客户端和算法处理构成,用户通过客户端 UI 与系统进行交互,包括串口配置、扫描参数的设置。采集数据通过 Matlab 进行算法处理实现成像。图 3 是整体系统运

行原理图。

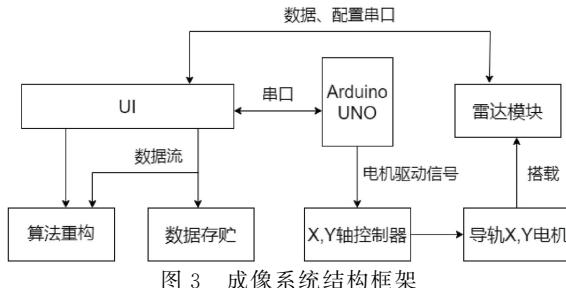


图 3 成像系统结构框架

Fig. 3 Structural framework of the imaging system

实验 PC 端采用 Intel i5-12400F 处理器, 内存为 16 GB, 系统具体参数如下: 初始频率 f_0 为 77 GHz; 带宽 4 GHz; 频带斜率为 6.314×10^{13} Hz/s; 水平和垂直向的扫描范围是一个 20 cm \times 20 cm 的平面; 设置雷达在水平向和垂直向上的采样间隔分别为 0.912 mm 和 2 mm; 雷达与测量物体间距为 290 mm。整体成像系统实物如图 4 所示。



图 4 近场毫米波雷达成像系统实物

Fig. 4 Physical diagram of the near-field millimeter-wave radar imaging system

2.2 全采样模式成像

测量目标采用金属箔片制作成小刀形状和“工”字形代替常见金属制品, 首先在全采样情况下测试其二维平面成像结果。结果如图 5 所示, 本文采用算法可以很清晰的重构出目标二维图像, 目标轮廓分明, 细节丰富, 且无明显的杂波干扰。在此基础上进行欠采样条件下重构算法验证。

2.3 随机稀疏采样条件下重构成像

在本文第 2 节中提到采用随机高斯矩阵作为观测矩阵对回波数据进行随机降采样, 模拟在实际工作环境下系统可能在数据采集过程中产生的丢失。设置采样率分别为全采样数据的 20%、40%、60% 和 80%, 在低采样率条件下首先进行稀疏数据恢复后再重构图像。图 6 和图 7 分别展示了在不同采样率条件下两个测量物体的成像结果。

观察成像结果可以直观看出采样率在 20%、40% 时, 目标物体的整体轮廓可以恢复出来, 与实际物体形状相似, 但是物体内部结构细节有较多缺失, 其边缘轮廓也有一定

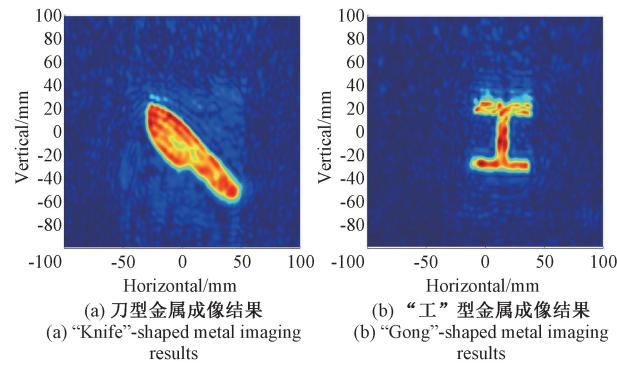


图 5 全采样数据成像图像

Fig. 5 Imaging of fully sampled data

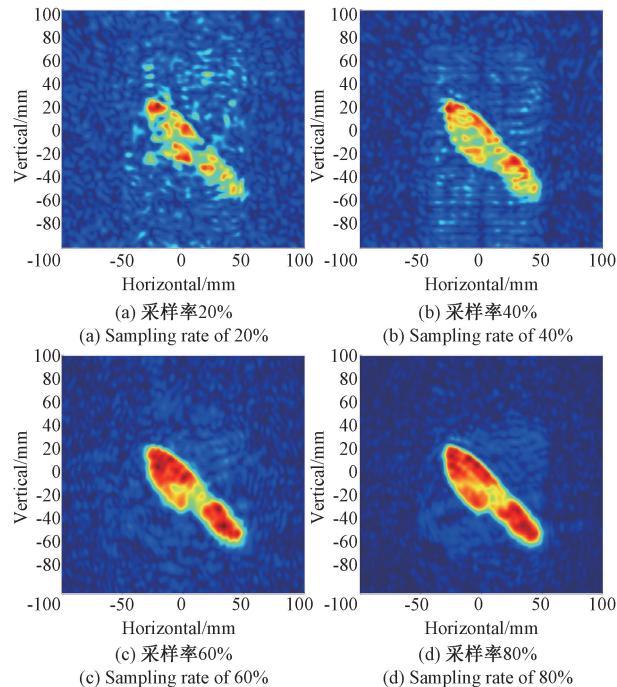


图 6 不同采样条件下小刀重构成像

Fig. 6 Knife reconstruction imaging under different sampling conditions

程度失真。此时可以大致判断出物体种类, 但是成像分辨率较低。当采样率增加到 60%、80% 时, 成像质量显著改善, 图像细节得到充分恢复, 物体边缘更加清晰, 同时周围噪声明显减少。此时重构图像与全采样成像没有明显差别。

2.4 遮挡条件下稀疏采样重构

为了进一步验证算法在实际应用中的适用性, 另外设计了两组目标物体被遮挡的实验场景以检验成像系统对外界干扰的抵抗性。首先将目标物体放置于纸盒中模拟物体被部分障碍物遮挡的情况。遮挡物体在光学环境下如图 8 所示。

图 9 展示了在纸盒包装下目标的稀疏恢复成像效果。采样率在 20、40% 情况下测量目标整体轮廓可以大致恢复, 但内部失真严重, 边缘细节模糊, 由于障碍物纸盒的存

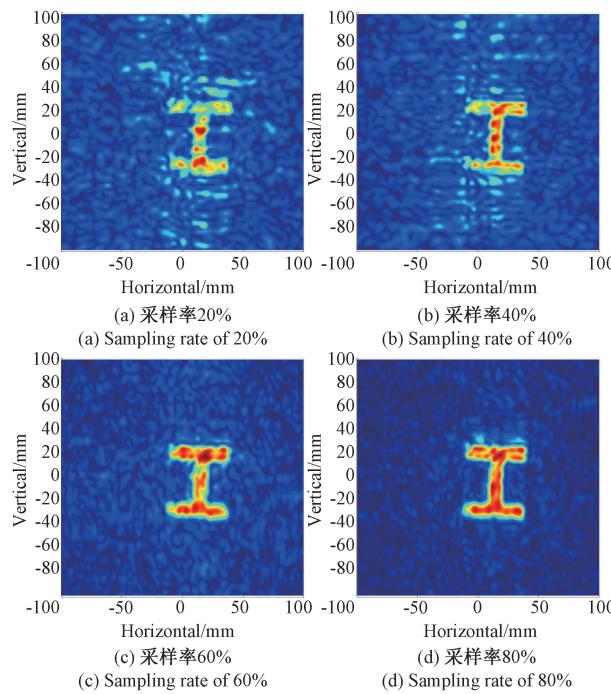


图 7 不同采样条件下“工”形金属重构成像

Fig. 7 "Gong" shape metal reconstruction imaging under different sampling conditions

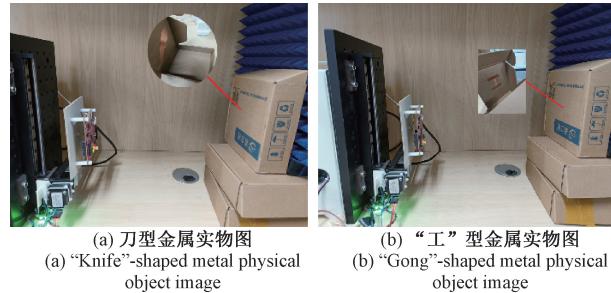


图 8 遮挡物体实物

Fig. 8 Physical diagram of the obstructed object

在导致目标周围有大量背景噪声影响成像效果,此时可以粗略估计物体种类。当采样率达到 60% 时可以准确呈现目标的整体形状,纸盒轮廓也逐渐清晰,可以精确地推断出遮挡区域的细节。随着采样率继续增加,成像效果已经接近全采样。

第 2 组实验将多层毛巾放置于一把剪刀上进行成像。其光学环境实物图及全采样成像结果如图 10 所示。

从图 11 中可以看出剪刀的金属部分相对于塑料部分更加清晰,这是由于金属有着更高的反射系数。整体成像结果可以明显看出物体轮廓形状,但是周围有较多角度噪声,随着采样率不断提高,噪声被优化算法逐渐抑制,成像结果更加清晰。该实验表明在实际复杂环境中,尤其是目标物体在遮挡情况下本文算法依旧能够提供高分辨率成像结果,且对外界干扰具有较强抵抗力。

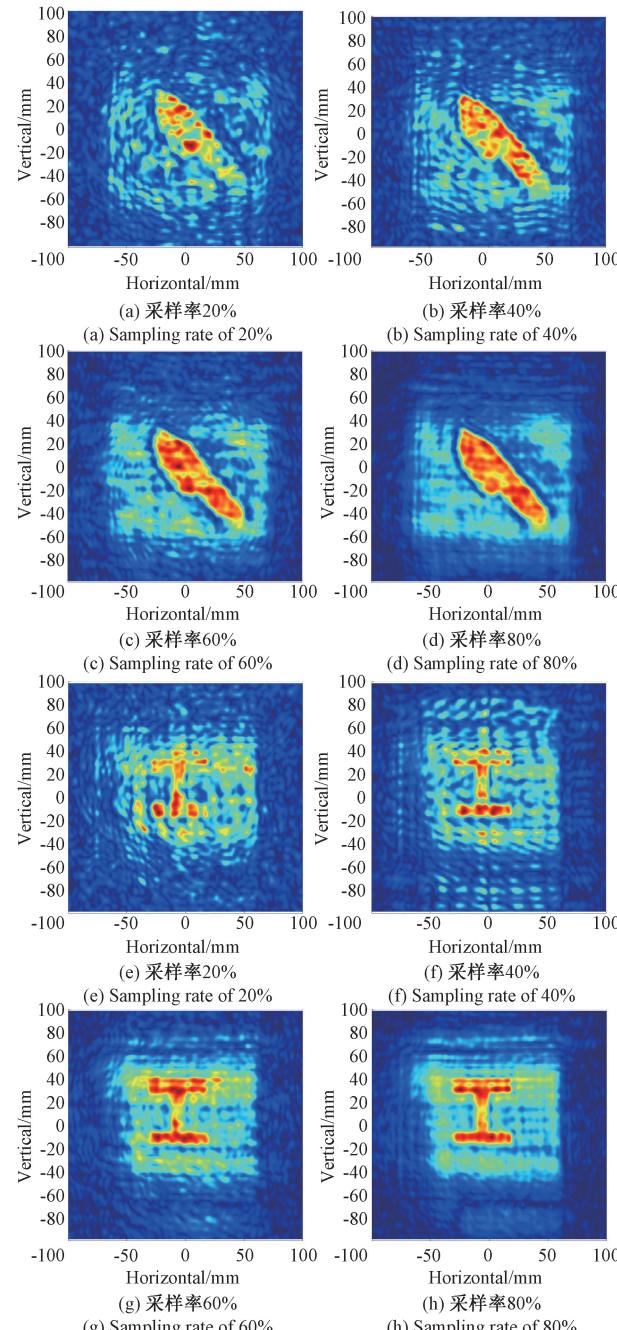


图 9 被遮挡物体不同采样率恢复成像效果对比

Fig. 9 Comparison of restoration imaging effects of the obstructed object under different sampling rates

为了更加客观地评估和量化各采样率下的成像质量,本文从归一化均方误差(NMSE)、峰值信噪比(PSNR)和结构相似性(SSIM)3 个维度对成像结果进行了分析,这些指标分别用于衡量重构图像与全采样图像的误差、信噪比以及结构保真度。将采用幅相补偿重构算法、常见压缩感知 SL0 算法以及 OMP 算法的成像结果作为参照对象,通过对比各采样率条件下的成像结果,进一步验证本文所提出算法在低采样率下的稀疏恢复能力和成像质量。

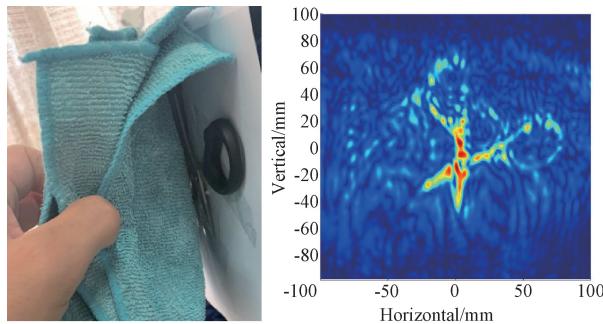


图 10 被遮挡剪刀实物图与全采样成像结果

Fig. 10 Physical diagram of the obstructed scissors and fully sampled imaging results

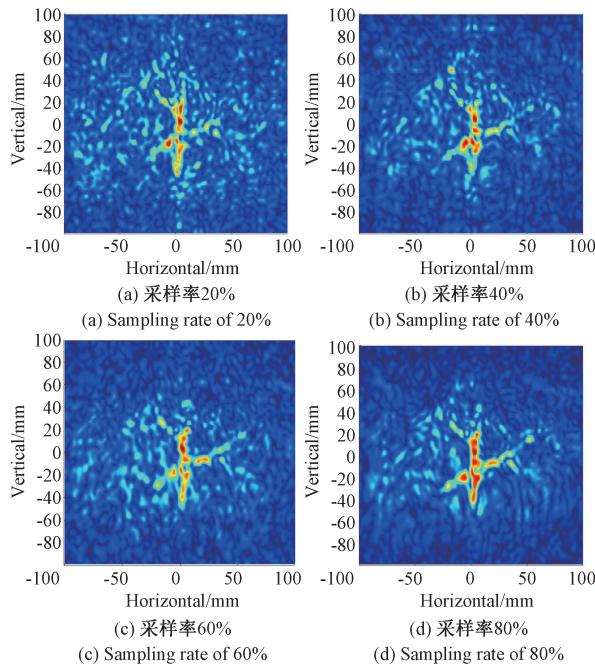


图 11 被遮挡剪刀不同采样率恢复成像效果对比

Fig. 11 Comparison of restoration imaging effects of the obstructed scissors under different sampling rates

对比结果如表 1 所示,与全采样成像相比,欠采样条件下会导致图像的精度降低且噪音增加。不过在相同采样率下,本文采用方法重构图像质量在 3 个指标均优于幅相补偿算法和 OMP 优化算法,显示出明显的成像质量优势。与 SL0 算法成像质量接近,SL0 算法通过引入加权策略能够更好的减少误差,在 NMSE 和 PSNR 指标上更优,本文算法通过选择更精确的稀疏基,可以更好地恢复图像结构信息,SSIM 指标更好。当采样率控制在 60% 以上时,重构图像的质量几乎可以接近全采样的成像效果。

表 2 给出了本文算法与 MC 算法相对于不同采样率的估计误差。可以发现样本数量越多,估计值的误差会越来越小,两种方案都可以很好的实现稀疏恢复效果。当采样率低于 20% 时误差会明显增加影响成像效果;采样率高于 40% 时,本文算法的估计误差优于矩阵补全算法。相比之

表 1 不同条件下重构图像的 NMSE,SSIM,PSNR

Table 1 NMSE, SSIM, and PSNR of reconstructed images under different conditions

算法	采样率	80%	60%	40%	20%
幅相补偿算法	NMSE	0.48%	1.42%	3.87%	10.10%
	SSIM	93.07%	76.51%	57.99%	42.63%
	PSNR	32.41	29.36	25.73	21.38
SL0	NMSE	0.17%	0.59%	1.09%	3.61%
	SSIM	96.91%	90.21%	83.57%	70.23%
	PSNR	38.13	33.92	28.82	22.25
OMP	NMSE	0.52%	1.41%	3.65%	8.61%
	SSIM	94.84%	85.49%	72.17%	57.31%
	PSNR	32.68	28.37	25.26	20.03
本文算法	NMSE	0.19%	0.65%	0.97%	3.72%
	SSIM	97.77%	91.06%	85.62%	76.51%
	PSNR	37.98	34.21	29.42	22.99

表 2 不同采样率重构图像的估计误差

Table 2 Estimation error of reconstructed images under different sampling rates

采样率	80%	60%	40%	20%
CS-误差率	4.6	4.9	6.0	12.1
MC-误差率	5.1	5.6	6.2	11.3

下 MC 误差略高是由于当图像具有复杂纹理、非平滑区域等情况下,数据矩阵不一定能保证其低秩特性从而影响重建结果。

最后将本文算法与基础匹配滤波成像算法和其他两种压缩感知优化算法在成像时间上进行比较。对于调频连续波(FMCW)而言,带宽越大可以提高距离分辨率,更多的扫描点数能够提升空间分辨率。然而,带宽增大和扫描点数增多会导致数据量增加,从而可能延长数据处理和成像时间。本文采用压缩感知重构算法可以有效减少数据量采集,大大缩短数据采集时间。当然这会导致算法重构时计算量增大,运行时间长于 OMP 算法,不过综合来看在处理大规模图像数据时,成像时间要远低于传统算法。同时本文算法依靠回波信号在波数域展示的相位函数直接构建压缩感知模型,节省了筛选信号不同稀疏特性的过程,运行时间优于 SL0 算法,实验结果如表 3 所示。综合各项结果表明,本文方法在低采样率条件下能够有效重构目标图像,不仅提升了成像质量,还减少了采样数据量,为实际应用提供了更高效的数据采集和处理方案。

表 3 雷达系统成像时间对比

Table 3 Comparison of radar system imaging times s

时间	本文算法	匹配滤波	SL0	OMP
数据采集时间	189	332	189	189
数据处理时间	26.3	1.1	31.5	1.0
总计	215.3	333.1	220.5	190.0

3 结 论

本文提出了一种基于压缩感知的近场毫米波雷达成像稀疏信号重构方法。鉴于测量目标在波数域中表现出的稀疏性,以波数域相位函数为稀疏基构建压缩感知模型,并通过优化L0范数实现对稀疏信号的重构。重构后的信号在距离方向上进行分层处理,并在方向维度上应用匹配滤波算法,以生成被测物体的清晰二维图像。基于IWR1843平台搭建的毫米波雷达系统用于数据采集和验证,实验结果表明,该算法在低采样率条件下能够实现高质量的信号成像,具有较强的抗干扰能力且在成像质量指标上优于传统的幅相补偿算法、矩阵补全算法以及压缩感知的OMP优化算法。此外,本文方法在成像效果和数据利用率方面均表现出良好的性能,展现出其在实际应用中的潜力。未来工作将致力于进一步优化稀疏信号重构算法,或引入神经网络技术以降低算法的计算复杂度,同时提高成像精度和处理效率,从而提升该方法在更多复杂应用场景中的适应性和鲁棒性。

参考文献

- [1] 杨文慧,杨宜苦,杨帆,等.基于先验距离约束的3D卷积毫米波雷达目标检测方法[J].电子测量技术,2023,46(23):85-96.
YANG W H, YANG Y P, YANG F, et al. 3D convolutional millimeter-wave radar target detection method based on prior distance constraints [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23): 85-96.
- [2] 翟盛杰,姚金杰,杨志良.基于FLICM的浅层目标毫米波全息检测研究[J].电子测量技术,2021,44(12):139-143.
ZHAI SH J, YAO J J, YANG ZH L. Research on millimeter-wave holographic detection of shallow targets based on FLICM[J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(12): 139-143.
- [3] 陈秀琴,李跃华,孔令雄.毫米波近场成像及图像增强算法研究[J].微波学报,2023,39(S1):324-327.
CHEN X Q, LI Y H, KONG L X. Research on millimeter-wave near-field imaging and image enhancement algorithms [J]. Microwave Journal, 2023, 39(S1): 324-327.
- [4] SEKIGAWA Y, KIDERA S. Doppler velocity decomposed radar imaging method for 79 GHz band millimeter wave radar [C]. 2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). IEEE, 2022: 3-4.
- [5] YANIK M E, TORLAK M. Near-field 2-D SAR imaging by millimeter-wave radar for concealed item detection [C]. 2019 IEEE Radio and Wireless Symposium(RWS). IEEE, 2019: 1-4.
- [6] WEI SH J, ZHOU Z CH, WANG M, et al. 3DRIED: A high-resolution 3D millimeter-wave radar dataset dedicated to imaging and evaluation [J]. Remote Sensing, 2021, 13(17): 3366.
- [7] DURR A, SCHWARZ D, WALDSCHMIDT C. A system analysis of noise influences on the imaging performance of millimeter wave MIMO radars [C]. 2020 IEEE/MTT-S International Microwave Symposium(IMS). IEEE, 2020: 1019-1022.
- [8] ZHAO C, XU L, BAI X, et al. Near-field high-resolution SAR imaging with sparse sampling interval[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5548.
- [9] 蔡俊,杨翠翠,卓智海.基于距离补偿的毫米波近场成像算法[J].微波学报,2021,37(1): 55-59.
CAI J, YANG C C, ZHUO ZH H. Millimeter-wave near-field imaging algorithm based on distance compensation[J]. Microwave Journal, 2021, 37(1): 55-59.
- [10] YANG D, LIAO G, ZHU S, et al. SAR imaging with undersampled data via matrix completion [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11(9): 1539-1543.
- [11] CANDES E J, TAO T. The power of convex relaxation: near-optimal matrix completion [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2010, 56(5): 2053-2080.
- [12] DONOHO D L. Compressed sensing [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(4): 1289-1306.
- [13] 汪天真.毫米波安检成像中压缩感知算法的应用研究[D].重庆:重庆邮电大学,2018.
WANG T ZH. Application of compressed sensing algorithm in millimeter-wave security imaging [D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [14] 谢晓春,张云华.基于压缩感知的二维雷达成像算法[J].电子与信息学报,2010,32(5):1234-1238.
XIE X CH, ZHANG Y H. Two-dimensional radar imaging algorithm based on compressed sensing [J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2010, 32(5): 1234-1238.
- [15] 李家强,杨广乐,徐必勇,等.基于分式平滑L0范数的穿墙雷达稀疏成像算法[J].中国电子科学研究院学报,2022,17(12):1147-1153.
LI J Q, YANG G L, XU B Y, et al. Wall-penetrating radar sparse imaging algorithm based on fractional

- smooth l0 norm[J]. Journal of the China Academy of Electronics and Information Technology, 2022, 17(12): 1147-1153.
- [16] 晋良念,钱玉彬,申文婷,等.基于改进OMP的超宽带穿墙雷达稀疏成像方法[J].电子技术应用,2015,41(11): 135-139.
- JIN L N, QIAN Y B, SHEN W T, et al. Sparse imaging method for ultra-wideband wall-penetrating radar based on improved OMP [J]. Application of Electronic Technology, 2015, 41(11): 135-139.
- [17] NEEDELL D, VERSHYNIN R. Signal recovery from incomplete and inaccurate measurements via regularized orthogonal matching pursuit [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2010, 4(2): 310-316.
- [18] 孔舒亚,王亮.压缩感知合成孔径雷达自适应射频干扰抑制方法[J].电子测量技术,2019,42(13):107-111.
- KONG SH Y, WANG L. Compressed sensing synthetic aperture radar adaptive RF interference suppression method [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(13): 107-111.
- [19] 单泽彪,薛泓垚,刘小松,等.基于双曲复合函数近似10范数的DOA估计[J].电子测量技术,2023,46(22):49-55.
- SHAN Z B, XUE H Y, LIU X S, et al. DOA estimation based on hyperbolic composite function approximation L0 norm [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(22): 49-55.
- [20] YANIK M E, WANG D, TORLAK M. Development and demonstration of MIMO-SAR mm Wave imaging testbeds[J]. IEEE Access, 2020, 8: 126019-126038.
- [21] WANG Y, SU J, FUKUDA T, et al. Precise 2D and 3D fluoroscopic imaging by using an FMCW millimeter-wave radar[J]. IEEE Access, 2023, 11: 84027-84034.

作者简介

徐雷钧(通信作者),博士,教授,主要研究方向为射频、微波毫米波与太赫兹集成电路设计、成像技术研究等。

E-mail: xlking@ujs.edu.cn

王浩宇,硕士研究生,主要研究方向为毫米波雷达信号处理技术。

E-mail:cumtwhy123@163.com

白雪,博士,硕士生导师,主要研究方向为射频电磁波集成电路设计技术。

E-mail: baixue@ujs.edu.cn

陈建锋,博士,硕士生导师,主要研究方向为微波传感及检测技术。

E-mail: jianfengchen@ujs.edu.cn