

一维稀疏拓扑阵列雷达三维成像算法研究

潘 丰 高 伟 罗 俊 刘文冬 张 慧

(珠海微度芯创科技有限责任公司 珠海 519000)

摘 要: 后向投影算法在合成孔径雷达成像算法中属于时域算法,多用于混合域或频域算法的对比算法。本研究通过相位补偿等效为一维密集线阵,设计了一维稀疏拓扑线阵,推导了匹配滤波算法和波数域-后向投影算法。数值仿真结果表明,仿真多点目标点扩展函数,水平向和竖直向约为 3.5 mm,距离向约为 12.6 mm,验证匹配滤波算法和波数域-后向投影算法的正确性;通过搭建实物系统,匹配滤波算法、波数域-后向投影算法及后向投影算法,分别对线对分辨率板成像,水平向、竖直向均为 4、5 mm,仿真结果与理论分辨率基本符合;最后对实测目标仿真成像,匹配滤波算法耗时 4.461 s、波数域-后向投影算法耗时 54.477 s、后向投影算法耗时 684.985 s,与 3 种算法理论复杂度吻合度较高,3 种算法图像中值滤波梯度相似度值约为 0.9、图像对比度值约为 6.6,验证了匹配滤波算法和波数域-后向投影算法的有效性。

关键词: 合成孔径雷达;匹配滤波算法;波数域后向投影算法;点扩展函数;等效相位中心

中图分类号: TN95;TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.70

Research on three dimensional imaging algorithm of one dimensional sparse topology array radar

Pan Feng Gao Wei Luo Jun Liu Wendong Zhang Hui

(Zhuhai Microcreative Technology Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: The backward projection algorithm belongs to the time-domain algorithm in synthetic aperture radar imaging algorithms and is often used as a comparative algorithm for mixed domain or frequency-domain algorithms. This article designs a one-dimensional sparse topological linear array equivalent to a one-dimensional dense linear array through phase compensation, and derives the matched filtering algorithm and wavenumber-domain backward projection algorithm. The numerical simulation results show that the simulated multi-point target point spread function has a horizontal and vertical direction of about 3.5 mm and a distance direction of about 12.6 mm, verifying the correctness of the matched filtering algorithm and the wavenumber-domain backward projection algorithm. By building a physical system, matching filtering algorithm, wavenumber-domain backward projection algorithm, and backward projection algorithm were used to image the line pair resolution plate, with horizontal and vertical resolutions of 4 and 5 mm, respectively. The simulation results were in good agreement with the theoretical resolution. Finally, for the simulated imaging of the actual target, the matched filtering algorithm took 4.461 s, the wavenumber-domain backward projection algorithm took 54.477 s, and the backward projection algorithm took 684.985 s, which is consistent with the theoretical complexity of the three algorithms. The median filtering gradient similarity value in the images of the three algorithms is about 0.9, and the image contrast value is about 6.6, verifying the effectiveness of the matched filtering algorithm and the wavenumber-domain backward projection algorithm.

Keywords: synthetic aperture radar; matching filtering algorithm; wavenumber-domain (w-k) and backward projection algorithm; point spread function; equivalent phase center

0 引 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种

主动式毫米波雷达成像技术,具有全天候、高分辨率成像特点。近年来,被广泛应用于无接触、隐私性高的人体安检领域,快速扫描、缺陷成像的无损检测领域。目前常用的雷达

成像算法有,后向投影算法(back projection algorithm, BPA)、极坐标格式算法(polar format algorithm, PFA)、距离徙动算法(range migration algorithm, RMA)、混合域成像算法,比如距离徙动后向投影算法(range migration and back projection algorithm, RMBPA)等。后向投影算法^[1-3],引入互相关方法,在运算速度和伪影抑制方面进行了优化,任何阵型均适用,常用于其他算法的对比算法。极坐标格式算法^[4-5],提出了曲线聚束合成孔径雷达成像的再聚焦和变焦极坐标格式算法,利用快速高斯网格非均匀快速傅里叶变换对方位向的非均匀采样进行聚焦,该算法可以产生任意感兴趣区域的再聚焦图像。

距离徙动算法^[6-8],是一种频率算法,采用插值过程相位补偿,但由于阵元采样需满足等间隔要求,在频率算法的研究中,国内外学者进行一些优化改进,比如多余弦距离偏移算法^[9](multi-coset range migration algorithm, MC-RMA),通过跨块组合形成多个子阵的方法,在较小维度上 FFT,更容易部署计算。本文推导的匹配滤波算法(matched filtering algorithm, MFA),为一种频域算法,未经任何近似,采用卷积方法实现匹配滤波,精度较高。

非均匀快速傅里叶变换算法^[10-12](nonuniform fast Fourier transform, NUFFT),解决了空间和波数域的非均匀采样问题,在保证成像精度与 BPA 类似的同时,在计算复杂度上有一定的优势。非均匀 NUFFT 距离偏移方法^[13-14](nonuniform fast Fourier transform range migration algorithm, NUFFT-RMA),满足成像精度的同时,缩减计算复杂度;Omega-K 算法^[15-16],提出等效线阵近场图像重建算法,提高方位向分辨率。混合域成像算法^[17-19],指一个维度用频域算法、另一个维度用时域算法,比如波数域时域算法,算法灵活性更高一些,一定程度上提高了计算效率,成像精度也符合要求。本文推导的匹配滤波算法(wavenumber-domain and backward projection algorithm, WKBPA),为一种混合域算法,一维采用频域处理,一维采用时域处理,频域维度用 NUFFT 处理,替代插值运算及距离维脉压处理,精度更高。

首先采用了等效相位中心的方法,对一维稀疏拓扑阵列相位校正,等效为一维密集阵列构型。其次公式推导了 MFA, WKBPA, 进一步,采用 MFA, WKBPA, BPA 算法对多点目标对比成像,分析 3 个方向的点扩展函数(point spread function, PSF),验证频域 MFA、混合域 WKBPA 的正确性。再次搭建了实物系统,采用 MFA、WKBPA、BPA 分别对线对分辨率进行成像,并与线对分辨率理论值进行对比,最后采用 3 种算法对实测目标进行成像,分析算法复杂度并进行图像质量评价,验证频域 MFA、混合域 WKBPA 有效性。

1 理论推导

一维稀疏拓扑阵列成像系统,采用竖直维为稀疏收发

阵列,水平维为机械运动等间隔采样方式,此系统工作方式为一维稀疏拓扑线阵固定,传送带机械运动作为水平向,信号体制为步进频连续波信号(steped-frequency continuous wave, SFCW)。频率源产生 SFCW 信号,变到相应频率后送到天线阵列,天线采用 1 发 8 收的工作模式,依次发射射频信号,经目标反射后接收天线接收到回波信号,并经混频器处理后得到中频信号,供后续成像算法处理。平面扫描毫米波系统工作原理模型如图 1 所示。

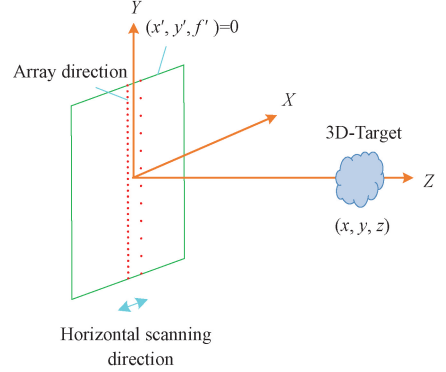


图 1 平面扫描毫米波系统工作原理模型

Fig. 1 Working principle model of planar scanning millimeter wave system

1.1 近场成像虚拟阵元

一维稀疏拓扑阵列,发射阵元和接收阵元分布,如图 2(a)所示,右侧绿色圆圈为发射阵元,左侧蓝色星型为接收阵元,红色带箭头线条为 1 发 8 收,黑色点阵为等间隔布局的虚拟阵元。发射阵元数量为 $N_T = 20$,接收阵元 $N_R = 84$,发射阵元物理位置等间距分布 $\Delta d_T = 24$ mm,接收阵元物理位置等间距分布 $\Delta d_R = 6$ mm,发射阵元和接收阵元物理上垂直距离 30 mm。发射阵元由下向上依次切换,接收阵元位置为其发射阵元邻近的 8 个接收阵元同时接收,发射阵元轮询一遍,接收单一水平位置回波信号,水平向机械运动等间隔采样,组成 3 个维度方向的回波信号。

近场成像中,虚拟阵元的等效近似方法如图 2(b)所示,发射阵元坐标为 $(x'_g, y'_g, 0)$,接收阵元坐标为 $(x'_h, y'_h, 0)$,目标坐标为 (x, y, z) ,发射阵元到目标距离 R_g 与目标到接收阵元距离 R_h 之和的总距离 R_l 为:

$$R_l = R_g + R_h = \sqrt{(x'_g - x)^2 + (y'_g - y)^2 + z^2} + \sqrt{(x'_h - x)^2 + (y'_h - y)^2 + z^2} \quad (1)$$

虚拟阵元坐标为 $(x', y', 0)$, 得到:

$$\begin{cases} x'_g = x' + d_i^x/2, & y'_g = y' + d_i^y/2 \\ x'_h = x' - d_i^x/2, & y'_h = y' - d_i^y/2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, d_i^x 为发射和接收阵元在 X 轴方向距离, d_i^y 为发射和接收阵元在 Y 轴方向距离,应用泰勒级数展开保留 3 阶项,近似为:

$$R_l \approx 2R + ((d_i^x)^2 + (d_i^y)^2)/4R - ((x - x')d_i^x + (y - y')d_i^y)^2/4R^3 \quad (3)$$

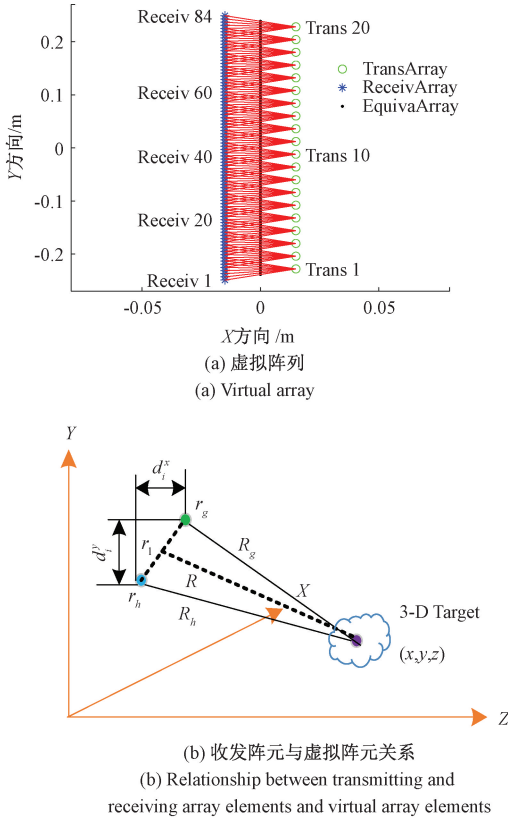


图 2 虚拟阵列阵元等效原理

Fig. 2 Equivalent principle of virtual array elements

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2} \quad (4)$$

其中, R 为虚拟阵元到目标的距离, 考虑到 $(x - x')$, $(y - y') \ll z$, 3 项可省略, 实际应用中 R_l 可近似为:

$$R_l \approx 2R + ((d_x^2) + (d_y^2))/4R \quad (5)$$

1.2 信号模型及算法推导

信号体制采用步进频连续波信号, 采集到回波信号, 由于阵列是一维稀疏拓扑布阵方式, 通过等效相位中心的方法, 等效为一维密集虚拟阵列, 为后续成像算法做前期处理, 频域算法 MFA 详细推导如下, 虚拟阵元坐标为 $(x', y', 0)$, 目标分布坐标为 (x, y, z) , 目标回波信号可表示为:

$$s(x', y', k) = \iiint_{x, y, z} O(x, y, z) \cdot \exp(-j2k \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2}) dx dy dz \quad (6)$$

其中, $O(x, y, z)$ 为目标反射率函数, $k = 2\pi f/c$ 为频率波数, f 为射频频率, $c = 299\,792\,458$ m/s 为光速。式(6)可改写为:

$$O(x, y, z) = \int_{D(k)} \left[\iint_{D(x', y')} s(x', y', k) e^{j2kR} dx' dy' \right] dk \quad (7)$$

由二维卷积定理可知,

$$h(x', y') = s_1(x', y') * s_2(x', y') = \iint s_1(x, y) s_2(x' - x, y' - y) dx dy \quad (8)$$

其中, $*$ 表示卷积, 得到:

$$\iint_{D(x', y')} s(x', y', k) e^{j2kR} dx' dy' = s(x', y', k) * e^{j2kR} \quad (9)$$

其中, $R = \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + z^2}$, x', y', z 为划分的感兴趣成像网格, x', y' 方向的网格位置与天线扫描位置相一致。

由二维卷积和二维傅里叶变换关系可知:

$$s(x', y', k) * e^{j2kR} = IFFT_{(k_x, k_y)} [FFT_{(x', y')} (s(x', y', k)) \cdot FFT_{(x', y')} (e^{j2kR})] \quad (10)$$

由式(10)带入式(7)变形为:

$$O(x, y, z) = \int_{D(k)} [IFFT_{2D} [S(k_x, k_y, k) \cdot U(k_x, k_y, k)]] dk \quad (11)$$

$$S(k_x, k_y, k) = FFT_{2D} [s(x, y, k)] \quad (12)$$

$$U(k_x, k_y, k) = FFT_{2D} [e^{j2k \sqrt{(x')^2 + (y')^2 + z^2}}] \quad (13)$$

其中, $FFT_{2D}(\cdot)$ 为二维快速傅里叶变换, $IFFT_{2D}(\cdot)$ 为二维快速傅里叶逆变换。

因此得到最终的成像公式为:

$$O(x, y, z) = \sum_{x=1}^{N_x} \sum_{k=1}^{N_k} IFFT_{2D} [S(k_x, k_y, k) \cdot U(k_x, k_y, k)] \Delta k \Delta z \quad (14)$$

MFA 采用卷积方法实现匹配滤波, 并采用 k 维度累加方法, 与距离徙动算法相比, 无需复杂插值过程近似, 精度更高, 是一种高精度三维频域算法。频域 MFA 流程如图 3 所示。

WKBPA 是一种混合域算法, 竖直阵列维度用频域算法进行聚焦与重建, 水平机械维度与距离维度用时域后向投影算法进行聚焦与重建, 详细推导为:

由式(6), 进一步对阵列维进行傅里叶变换, 得到:

$$s(x', k_y, k) = \iint O(x, k_y, z) \exp(-j\sqrt{4k^2 - k_y^2} R_{xz}) \exp(-jk_y y) dx dz \quad (15)$$

其中,

$$R_{xz} = \sqrt{(x - x')^2 + z^2} \quad (16)$$

采用 NUFFT 替代阵列维、距离维度插值过程及距离维度脉压的过程, 并进行阵列维 IFFT, 得到:

$$s(x', y, z) = IFFT_{k_y} [NUFFT [s(x', k_y, k)]] \quad (17)$$

进一步化简可得:

$$s(x', y, z) = O(y, z) \int O(x) \exp(-j2k_{\min} R_{xz}) dx \quad (18)$$

$k_{\min}$ 为波数最小值, 竖直维度阵列已解耦, 按照阵列阵元索引, 每层数据采用后向投影重建:

$$s(x', y_i, z) = O(y_i, z) \int O(x) \exp(-j2k_{\min} R_{xz}) dx \quad (19)$$

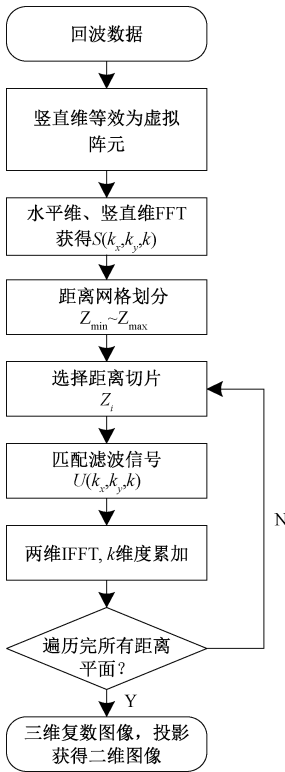


图 3 频域 MFA 流程

Fig. 3 Frequency domain MFA flowchart

最终三维重建可表示为:

$$O(x, y, z) = \sum \text{interp}_{z_i} [s(x', z)] \exp(j2k_{\min} R_{xz}) dx' \quad (20)$$

三维复数图像, 进行最大值投影或者标准差投影, 获得二维投影图像。

混合域 WKBP, 一维竖直阵列频域处理, 一维机械运动时域处理, 频域维度用 NUFFT 处理, 替代插值运算及距离维脉压处理, 精度更高, 时域维度对后续运动补偿优化更便捷, 与 BPA 相比, 计算复杂度更少、运算时间更短, 适用场景更多元。

2 仿真成像

2.1 多点目标点扩展函数

步进频连续波体制, 起始频率 32 GHz, 步进频率 62.5 MHz, 频点数 128, 一维稀疏拓扑阵列沿 Y 轴方向放置, 以 X 轴原点为中心, 发射阵元和接收阵元垂直距离相距 30 mm 放置, 阵列虚拟等效阵元数量 N_y 为 160, 虚拟阵元间距 3 mm, 水平维机械运动数量 N_x 为 160, 水平维采样间距 3 mm。仿真的多点目标设置如图 4 所示, 平行于 XOY 面布置 9 个点目标, 在其平行于 XOY 面基础上前后沿 Z 轴方向各布置 1 个点目标, 共 11 个点目标。

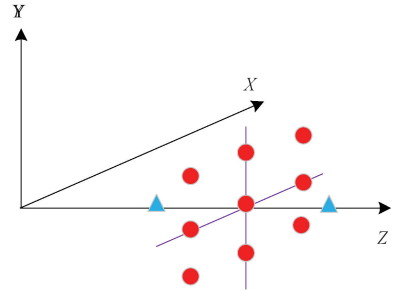
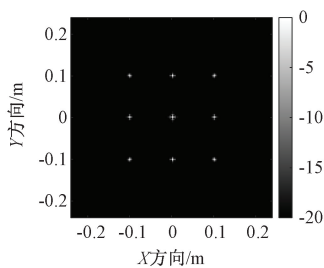
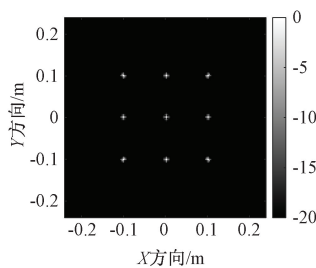
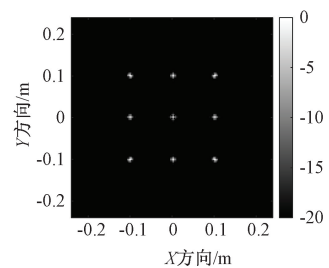
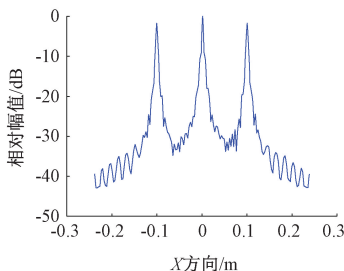
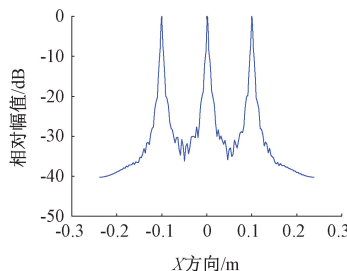
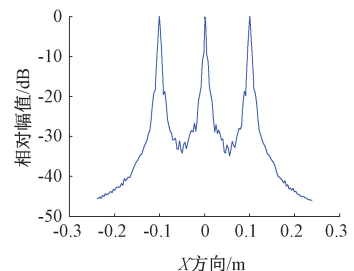


图 4 多点目标示意

Fig. 4 Multi point target schematic

如图 5、6 多点目标 MFA、WKBP、BPA 在 XOY 面投影、YOZ 面投影及 3 个方向的 PSF 曲线图可知, 多点目标,


 (a) MFA XOY面投影
(a) MFA XOY surface projection

 (b) WKBP XOY面投影
(b) WKBP XOY surface projection

 (c) BPA XOY面投影
(c) BPA XOY surface projection diagram

 (d) MFA X水平方向PSF
(d) MFA X horizontal PSF

 (e) WKBP X水平方向PSF
(e) WKBP X horizontal PSF

 (f) BPA X水平方向PSF
(f) BPA X horizontal PSF

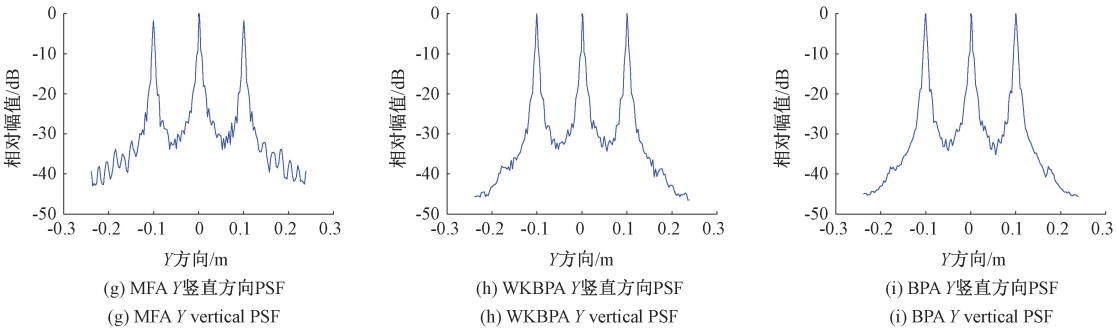


图 5 多点目标 MFA、WKBPA 和 BPA XOY 面投影
Fig. 5 Multi point target MFA, WKBPA, and BPA XOY projection maps

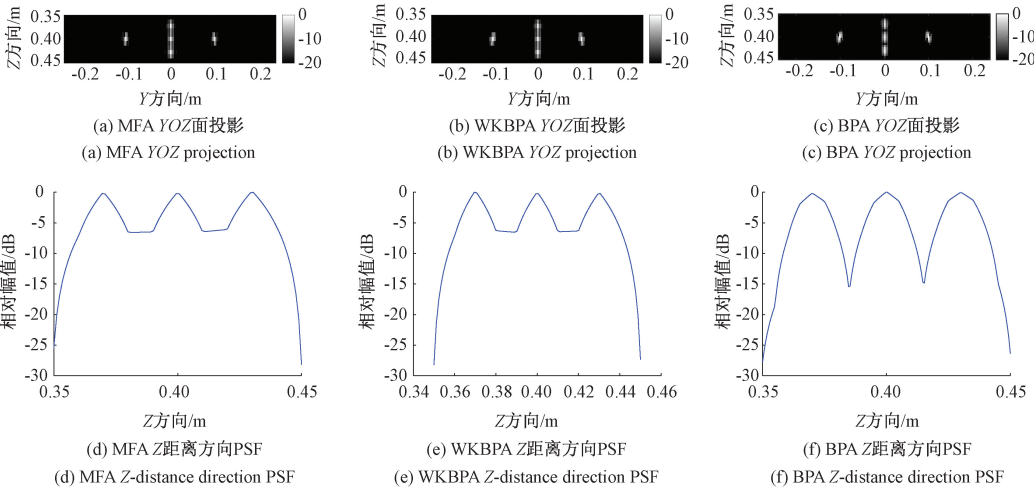


图 6 多点目标 MFA、WKBPA 和 BPA YOZ 面投影
Fig. 6 Multi-point target MFA, WKBPA and BPA YOZ plane projection diagrams

采用 3 种算法分别在 XOY 面投影、YOZ 面投影的点目标成像基本一致,3 种算法在 X 水平方向 PSF 图、Y 竖直方向 PSF 图、Z 距离方向 PSF 图的曲线图基本相同,其多点目标的 3 dB 数值,如表 1 所示,MFA、WKBPA 与 BPA 对比多点目标,在 3 个方向的 PSF 的值基本相同,验证了 MFA 和 WKBPA 正确性。

2.2 分辨力板成像

该文采用的毫米波信号体制为步进频连续波,搭建实际系统,参数配置如表 2 所示,仿真环境,64 bit Microsoft Windows 10 操作系统,CPU 处理器 12th Gen Inter(R)

表 2 系统参数配置

Table 2 System parameter configuration

参数	参数值
频率范围/GHz	32~40
带宽/GHz	8
频点数	128
发射阵元数	20
接收阵元数	84
等效阵元数	160
阵元等效间距/mm	3
水平扫描采样间距/mm	3
水平扫描长度/mm	768
水平扫描点数	256
成像区域大小/(m×m×m)	0.768×0.48×0.15
空间分辨率/mm	≤5
距离向分辨率/mm	≤20
接收通道噪声系数/dB	≤20

表 1 MFA、WKBPA 和 BPA 多点目标点扩展函数

Table 1 MFA, WKBPA and BPA multi-point target point extension functions

算法	MFA	WKBPA	BPA
X 方向 PSF	3.7	3.7	3.7
	3.2	3.2	3.0
	3.7	3.5	3.7
Y 方向 PSF	3.5	3.7	3.7
	3.0	3.2	3.0
	3.7	3.5	3.7
Z 方向 PSF	12.6	12.6	13.8
	12.6	12.6	13.8
	13.8	13.8	14.4

Core(TM) i7-12700 2.1 GHz, MATLAB R2021b 运行环境 parallel pool works 12。

搭建一维稀疏拓扑阵列系统及线对分辨力板如图 7 所示。

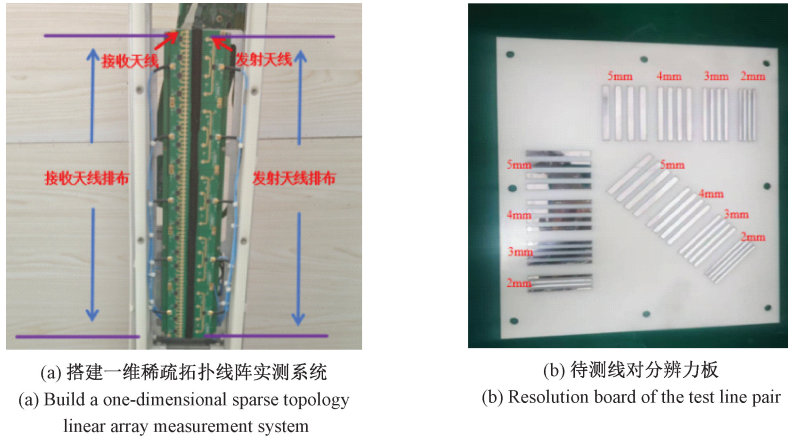


图 7 一维稀疏拓扑线阵实测图及线对分辨力

Fig. 7 Measurement and line pair resolution diagram of one-dimensional sparse topology linear array

采用 MFA、WKBPA、BPA, 分别对线对分辨力成像, 实测仿真结果如下:

一维稀疏拓扑毫米波阵列空间分辨力, 理论公式为:

$$\rho_x = (\lambda_c / 2L_x) \cdot \sqrt{R_0^2 + L_x^2 / 4} = 3.3 \text{ mm} \quad (21)$$

$$\rho_y = (\lambda_c / 2L_y) \cdot \sqrt{R_0^2 + L_y^2 / 4} = 4.4 \text{ mm} \quad (22)$$

其中, ρ_x 、 ρ_y 分别为水平和竖直向的分辨力, $\lambda_c = 8.3 \text{ mm}$, 水平向合成阵列长度 $L_x = 768 \text{ mm}$, 竖直向合成

阵列长度 $L_y = 480 \text{ mm}$, 待测位置 $R_0 = 450 \text{ mm}$ 。

由实测分辨力板, 图 8 仿真结果可知, MFA、WKBPA、BPA 的水平向线对分辨力均为 4 mm, 竖直向的线对分辨力均为 5 mm, 理论计算实测系统水平向分辨力 3.3 mm, 竖直向分辨力 4.4 mm, 理论计算与实测仿真结果一致, 符合系统设计分辨力指标, 进一步说明, MFA、WKBPA 与 BPA 相比, MFA、WKBPA 算法正确性。

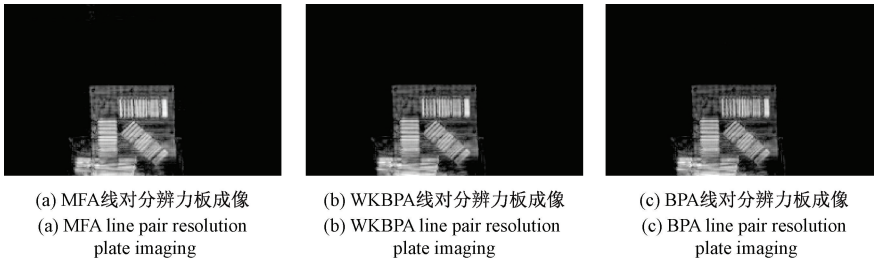


图 8 MFA、WKBPA、BPA 线对分辨力板成像

Fig. 8 MFA, WKBPA, BPA line pair resolution plate imaging

2.3 实测目标成像及计算量分析

搭建的系统参数与表 2 相一致, 待测目标, 包含螺丝刀和剪刀, 如图 9 所示, 采用 MFA、WKBPA、BPA 3 种算法, 对待测目标, 包含螺丝刀和剪刀进行仿真成像。

待测目标, 采用 MFA、WKBPA、BPA 成像, 仿真结果如图 10 所示, 目标成像结果基本相同。3 种算法在 MATLAB 并行计算时间如表 3 所示, MFA 仿真时间为 4.461 s, WKBPA 仿真时间为 54.477 s, BPA 仿真时间为 684.985 s, 频域 MFA 比时域 BPA 计算时间约低 2 个量级, 混合域 WKBPA 比 BPA 计算时间约低 1 个量级。图像质量评价采用中值滤波梯度相似度 (MFGS) 和图像对比度评价, MFGS 取值范围 $[0, 1]$, 值越大图像质量越好, 图像对比度评价, 值越大, 图像质量越好。3 种算法采用

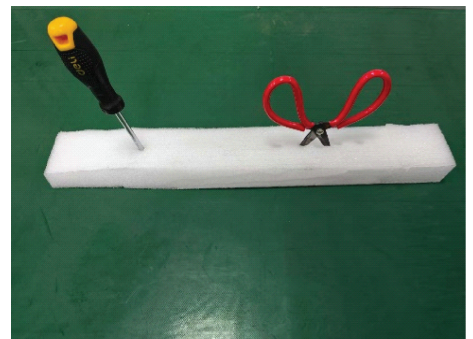


图 9 待测目标

Fig. 9 Target under test

MFGS 和图像对比度进行评价, MFA、WKBPA 与 BPA 相

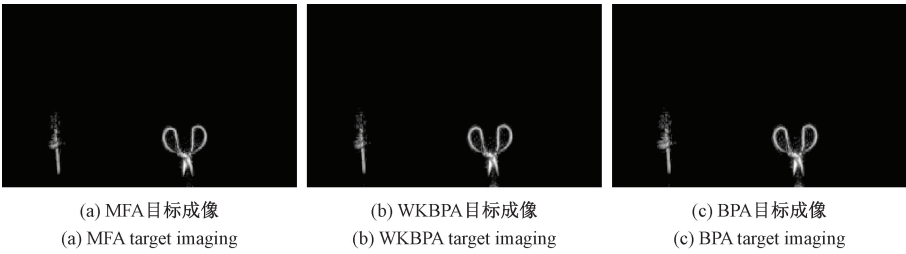


图 10 MFA、WKBPA、BPA 目标成像
Fig. 10 MFA, WKBPA, BPA target imaging

表 3 不同算法 MATLAB 计算时间及图像评价指标
Table 3 MATLAB calculation time and image evaluation metrics for different algorithms

算法	MATLAB 计算时间/s	MFGS	图像对比度
MFA	4.461	0.899 1	7.072 4
WKBPA	54.477	0.903 0	6.654 6
BPA	684.985	0.879 4	6.289 6

比,MFGS 和图像对比度,值均较大,且基本相同,图像质量较好,验证了 MFA 和 WKBPA 有效性。

一维稀疏拓扑阵列,表 4 中水平机械扫描为 N_x , 竖直虚拟阵元数为 N_y , 频点数为 N_f , 三维网格点数分别为 Q_x 、 Q_y 、 Q_z , 其中 MFA 计算复杂度 $O(N^3 \log N)$, WKBPA 计算复杂度 $O(N^4)$ 、BPA 计算复杂度 $O(N^5)$, 理论计算复杂度,频域 MFA、混合域 WKBPA、时域 BPA 的量级依次递增,与通过 MATLAB 仿真软件实测计算时间相吻合,验证计算时间的有效性,三维重建算法 MFA、WKBPA 大幅度提升计算效率。

表 4 不同算法 FLOPs 和计算复杂度
Table 4 Different algorithms FLOPs and computational complexity

算法	FLOPs	计算复杂度
MFA	$5N_x N_y N_f \log_2(N_x N_y) + 5N_x N_y Q_z \log_2(N_x N_y)$	$O(N^3 \log N)$
WKBPA	$5N_x N_y N_f \log_2(N_x) + 5N_x N_y N_f \log_2(N_f) + 6N_y Q_x Q_y Q_z$	$O(N^4)$
BPA	$5N_x N_y N_f \log_2(N_f) + 6N_x N_y Q_x Q_y Q_z$	$O(N^5)$

3 结 论

本研究首先基于一维稀疏拓扑阵列,通过等效相位中心的方法,收发阵列分置的双站阵元,等效为一维密集的单站阵列,利用二维卷积和二维傅里叶变换的关系,用卷积方法推导了频域算法 MFA,并采用 k 维度累加方法,无需复杂插值过程近似,精度更高;利用竖直维 NUFFT 方法无需插值,水平机械扫描时域算法,推导了混合域算法

WKBPA。其次,采用 MFA、WKBPA、BPA 分别对多点目标, XOY 面和 YOZ 面投影,并分析 3 个维度 PSF 函数,验证了 MFA、WKBPA 正确性。再次,搭建一维稀疏毫米波阵列实测系统,MFA、WKBPA、BPA 分别对分辨力板进行成像,实测分辨力与理论计算分辨力对比,结果基本相同,进一步验证算法的准确性。最后,通过搭建实测系统,采用 3 种算法,对含有螺丝刀和剪刀的实测目标成像,并利用 MFGS 和图像对比度评价,成像结果基本一致,进一步分析了 3 种算法实测计算时间与理论算法复杂度对比,理论和实际结果相吻合,采用 MFA、WKBPA 提高了成像的计算效率,验证了 MFA、WKBPA 有效性。后续研究 GPU 加速的方法实现 MFA、WKBPA,可以大幅度缩减计算时间,可以实现实时成像,对实际应用具有重要意义。

参考文献

[1] HU X, XIE H, ZHANG L, et al. Fast factorized backprojection algorithm in orthogonal elliptical coordinate system for ocean scenes imaging using geosynchronous spaceborne-airborne VHF UWB bistatic SAR[J]. Remote Sensing, 2023, 15(8):2215.

[2] 潘丰,高伟,罗俊,等. 基于 NVIDIA GPU 后向投影 FFBP 算法的加速研究[J]. 电子测量技术, 2023, 46(22):148-152.

PAN F, GAO W, LUO J, et al. Research on acceleration thebackward projection FFBP algorithm based on NVIDIA GPU[J]. Electronic Measurement Technology, 2023,46(22):148-152.

[3] 吴文彬,曾丹,李晋,等. 利用惯导信息的太赫兹 SAR 成像运动补偿方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2025,39(4):42-49.

WU W B, ZENG D, LI J, et al. Research on terahertz SAR imaging motion compensation method using inertial navigation information [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2025, 39(4): 42-49.

[4] HU R ZH, LI X L, YEO T S, et al. Refocusing and zoom-in polar format algorithm for curvilinear spotlight SAR imaging on arbitrary region of interest[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,

- 2019, 57(10): 7995-8010.
- [5] FAN B, QIN Y L, YOU P, et al. An improved PFA with aperture accommodation for widefield spotlight SAR imaging [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2015, 12(1): 3-7.
- [6] 笪敏, 孟祥新, 李霆, 等. 基于 CPU+GPU 混合架构的改进型距离徙动算法设计与实现[J]. 电子测量技术, 2020, 43(3): 153-157.
- DA M, MENG X X, LI T, et al. Design and implementation of improved distance migration algorithm based on CPU+GPU hybrid architecture[J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(3): 153-157.
- [7] ZHU R Q, ZHOU J X, JIANG G, et al. Range migration algorithm for near-field MIMO-SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(12): 2280-2284.
- [8] REIGBER A, ALIVIZATOS E, Potsis A, et al. Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation[J]. IEEE Proceedings Radar Sonar & Navigation, 2006, 153(3): 301-310.
- [9] GIGIE A, KANTH R K, KUMAR A A, et al. MC-RMA: Multi-coset range migration algorithm for near-field mimo-sar imaging[C]. 2023 IEEE SENSORS. IEEE, 2023: 10325224.
- [10] FAN B, GAO J K, LI H J, et al. Near-field 3D SAR imaging using a scanning Linear MIMO array with arbitrary topologies [J]. IEEE Access, 2019, 8: 6782-6791.
- [11] YANIK M E, TORLAK M. Near-field MIMO-SAR millimeter-wave imaging with sparsely sampled aperture data[J]. IEEE Access, 2019, 7: 31801-31819.
- [12] CHEN X, WANG H Q, YANG Q, et al. An efficient MMW 3-D imaging algorithm for near-field MIMO-SAR with nonuniform transmitting array[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2022, 21(10): 2035-2039.
- [13] WANG J P, AUBRY P, YAROVY A. 3-D short-range imaging with irregular MIMO arrays using NUFFT-based range migration algorithm[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(7): 4730-4742.
- [14] WANG Y H, WANG J, CHEN P H, et al. A fast near-field 3-D SAR imaging technique with nonuniform MIMO linear array [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2025, 61(6): 17201-17212.
- [15] WU SH Y, WANG H, LI CH, et al. A modified Omega-K algorithm for near-field single-frequency MIMO-arc-array-based azimuth imaging [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4909-4922.
- [16] 潘冬, 李奕天, 马晓路, 等. 粉尘干扰下工业物料表面单视角三维热成像方法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(10): 143-153.
- PAN D, LI Y T, MA X L, et al. Single-view 3D thermography method for industrial material surfaces under dust interference [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(10): 143-153.
- [17] XING G N, LI SH Y, HOORFAR A, et al. Near-field millimeter-wave imaging via multi-plane MIMO arrays[J]. IEEE Access, 2023, 11: 37347-37359.
- [18] AN D, ZHANG H K, ZHU L, et al. Applicable near-field millimeter wave imaging technology for human body security based on scanning 1D non-uniform sparse arrays [J]. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2025, 46(1): 6.
- [19] SMITH J W, TORLAK M. Efficient 3-D near-field MIMO-SAR imaging for irregular scanning geometries[J]. IEEE Access, 2022, 10: 10283-10294.

作者简介

潘丰(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为合成孔径雷达成像算法、GPU 高性能计算等。

E-mail: PanfengXD_1992@163.com

高伟, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为信号处理、雷达成像算法、雷达系统设计等。

E-mail: gaowei@microcreative.org

罗俊, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为芯片设计、射频、雷达算法、雷达系统设计等。

E-mail: luojun@microcreative.org

刘文冬, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为微波器件、天线设计等。

E-mail: lwd@microcreative.org

张慧, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为数字芯片设计研发、系统设计等。

E-mail: zhanghui@microcreative.org