

# 基于空间三维非均匀SISO阵列雷达的介质目标快速成像算法

邓桂林<sup>1,2</sup>, 邓彬<sup>1\*</sup>, 陈旭<sup>1</sup>, 曾旻<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学电子科学学院智能感知系, 湖南长沙410073; 2. 中国人民解放军第78156部队, 重庆400000)

**摘要:** 近年来,随着高精度定位系统的迅猛发展,基于手持式毫米波雷达的阵列成像技术在无损检测和医疗成像等涉及介质内部结构成像的领域中引起了广泛关注. 与常见的二维(Two-Dimensional, 2D)平面单发单收(Single-Input-Single-Output, SISO)阵列不同的是,基于手持式毫米波雷达的阵列,其阵元通常非均匀分布于三维(Three-Dimensional, 3D)空间中,导致现有的基于平面SISO阵列的对介质目标内部结构进行快速成像重构的算法无法适用. 为此,本文提出了一种适用于空间3D非均匀SISO阵列雷达的半空间介质目标快速成像算法. 该算法将空间3D非均匀SISO阵列的每一个阵元扩展为一个的虚拟阵列,然后将所有虚拟阵列的回波数据变换至波数域后进行相干累加,最后通过3D逆傅里叶变换(Inverse Fourier Transform, IFT)实现快速成像. 数值仿真和实验测量表明,与同样适用于该场景的改进后向投影(Improved Backward Projection, IBP)算法相比,在本文给定的成像参数条件下,所提算法可以在保证成像质量的同时,将成像时间缩短94%以上.

**关键词:** 3D非均匀SISO阵列;半空间介质目标;波数域;快速成像算法;虚拟阵列

**基金项目:** 国家自然科学基金(No.61921001, No.61971427, No.62201591, No.62035014)

**中图分类号:** TN957

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112(2024)01-0274-14

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.12263/DZXB.20221331

## Fast Imaging Algorithm for Dielectric Target Based on Spatial Three Dimensional Non-Uniform SISO Array Radar

DENG Gui-lin<sup>1,2</sup>, DENG Bin<sup>1\*</sup>, CHEN Xu<sup>1</sup>, ZENG Yang<sup>1</sup>

(1. College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China;

2. Unit 78156 of the PLA, Chongqing 400000, China)

**Abstract:** In recent years, with the rapid development of high-precision orientation system, the imaging array based on handheld millimeter wave radar has attracted extensive attention in the fields involving internal structure imaging such as nondestructive testing and medical imaging. Different from the common two-dimensional (2D) planar single-input-single-output (SISO) array, the elements of the handheld millimeter wave radar imaging array are usually unevenly distributed in three-dimensional (3D) space, which means that the existing fast imaging algorithms for dielectric targets are inapplicable. In this paper, a fast imaging algorithm for 3D non-uniform SISO array is proposed. The proposed algorithm expands each element of the 3D spatial random array into a virtual uniform array, and then transforms the data of all virtual arrays into wavenumber domain and coherently accumulates them, and finally performs fast imaging through 3D inverse fast Fourier transform (IFFT). Under the imaging parameters given in this paper, numerical simulation and experimental measurements show that the proposed algorithm can achieve the same imaging quality with reducing the imaging time by more than 94% compared with the improved backward projection (IBP) algorithm.

**Key words:** 3D non-uniform SISO array; half space medium target; wavenumber domain; fast imaging algorithm; virtual uniform array

Foundation Item(s): National Natural Science Foundation of China (No.61921001, No.61971427, No.62201591, No.62035014)

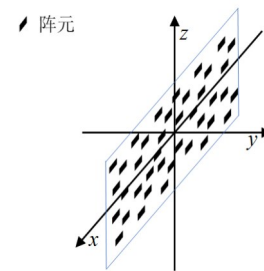
## 1 引言

毫米波阵列雷达三维(Three-Dimension, 3D)成像技术因具备高分辨、高帧率和易于集成等优势<sup>[1]</sup>,而在人体安检<sup>[2]</sup>、地理检测<sup>[3]</sup>、穿墙探测<sup>[4]</sup>及介质无损检测<sup>[5]</sup>等领域中得到广泛应用.毫米波单发单收(Single-Input-Single-Output, SISO)阵列因结构简单而首先被研究人员所关注,通常这样的阵列雷达可通过大量实体阵元排列于二维(Two-Dimension, 2D)平面内直接构成或通过单个阵元随机械扫描架在空间中作 2D 平面扫描后等效构成.其中,均匀 SISO 平面阵列结构最为简单、技术相对成熟,并率先被运用于介质无损检测等涉及介电结构成像的应用场景<sup>[3-5]</sup>.

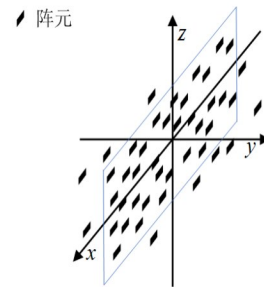
受奈奎斯特采样定理约束,均匀 SISO 平面阵列的阵元间距须小于雷达载波的半波长.然而毫米波雷达的工作波长通常为毫米量级,因而构成均匀阵列需要大量的实体阵元或密集的扫描,这必然导致效率和成本之间的矛盾.相比之下,非均匀采样不仅可以在一定程度上缓解这一矛盾,且经特殊设计的非均匀 SISO 阵列在一些方面还具有显著的性能优势<sup>[6,7]</sup>,因此非均匀阵列逐渐受到研究人员的关注.图 1(a)给出了非均匀 SISO 平面阵列的示意图,本文将之称为 2D 非均匀 SISO 阵列.2012 年,Case 等人<sup>[7]</sup>对 2D 非均匀 SISO 阵列最优空间采样进行了研究,并提出了基于非均匀快速傅里叶变换(Non-Uniform Fast Fourier Transform, NUFFT)的快速成像算法,可实现对空气中的金属目标进行成像检测.这一研究给出了非均匀 SISO 阵列构型优化方法并解决了快速成像问题.研究人员还对一些特殊构型 2D 非均匀 SISO 阵列的成像问题进行了探索,如 Wu 等人<sup>[8]</sup>和 Li 等人<sup>[9]</sup>分别讨论了基于伪随机螺旋 SISO 阵列和径向圆周扫描 SISO 阵列的成像算法.

随着雷达技术和高精度定位系统的迅猛发展,手持式雷达逐渐走向实用,基于手持式雷达的空间扫描阵列成为毫米波阵列的新发展方向.2021 年,Álvarez-Narciandi 等人<sup>[10,11]</sup>对基于手持式雷达的阵列成像问题进行了研究,他们利用运动捕捉系统实现了基于徒手扫描的成像阵列雷达,并运用后向投影(Back Projected, BP)算法<sup>[12]</sup>实现了对目标的高分辨成像<sup>[10]</sup>.由于手持式雷达扫描过程中,无法保证阵列的所有阵元均严格处于同一 2D 平面内,阵列的阵元实际上是非均匀分布于 3D 空间中的,图 1(b)给出了 3D 非均匀 SISO 阵列的示意图.相比 2D 非均匀 SISO 阵列,虽然 3D 非均匀 SISO 阵列的结构更加复杂,导致现有的基于 2D 非均

匀 SISO 阵列的快速成像算法难以直接适用,但手持式毫米波雷达具备携带方便、结构简单等突出优势,因此仍有巨大的应用潜力,如利用手持式雷达实现介质目标无损检测、墙体安全检测等,这些应用场景实际上均可以抽象为对半空间介质目标进行成像.为此,本文开展了基于 3D 非均匀 SISO 阵列的半空间介质目标快速成像算法研究.



(a) 2D 非均匀 SISO 阵列



(b) 3D 非均匀 SISO 阵列

图 1 非均匀 SISO 阵列示意图

与典型的阵列雷达成像方法<sup>[9,13-15]</sup>相比,本文研究的成像场景中引入了介电结构,将破坏电磁波空间波场的连续性<sup>[16]</sup>,导致这些成像方法<sup>[9,13-15]</sup>不再适用.为解决这一问题,研究人员对涉及介电结构的成像场景进行了专门研究.早在 1994 年, Johansson 等人<sup>[17]</sup>就提出了一种适用于半空间介质目标成像的改进后向投影(Improved Back Projected, IBP)算法.与适用于自由空间目标成像的经典 BP 算法<sup>[12]</sup>相比,IBP 算法考虑了介质对电磁波空间波场的影响,因此可以更好地对介质目标进行成像.在实现时,IBP 算法首先根据 Snell 定律计算电磁波穿透不同介质时在介质分界面上的折射点<sup>[17]</sup>,从而得到准确的投影距离,然后再按照 BP 算法的成像流程进行成像处理得到最终的成像结果.由于 IBP 算法需要逐一对每个阵元的数据进行投影计算得到子图像后,将子图像相干叠加得到最终的成像结果,因此该算法几乎适用于所有类型的阵列结构和成像场景,且 IBP 算法成像

过程中不存在近似,可以获得良好的成像效果. 鉴于这些优势,IBP算法通常被当作参考算法,目前仍被广泛应用. 2018年Ullmann等人<sup>[18]</sup>运用IBP算法实现了对任意形状介质目标的成像. 但IBP算法存在严重的效率问题:一方面,后向投影计算本身的计算量就十分巨大;另一方面,精确计算电磁波在介质分界面上的折射点需要大量求解二次方程组,其运算量巨大且难以估计,从而导致更严重的计算困难. 研究人员也试图解决这一问题. 文献[19]给出了一种用于折射点计算的线性近似方法,可以将折射点的求解线性化,极大降低折射点求解复杂度. 文献[20]利用NUFFT来代替距离向的投影计算,以进一步提高IBP算法的成像效率. 但这些算法都没有从根本上改变IBP算法效率低的问题.

随着地理探测技术、穿墙成像技术的发展,半空间介质目标的成像效率问题得到了较好的解决. 研究人员先后提出了大量适用于半空间介质目标成像的快速成像算法,如衍射层析成像(Diffraction Tomography, DT)算法<sup>[21]</sup>、相移偏移(Phase-Shift Migration, PSM)算法<sup>[22]</sup>、分层距离偏移(Layered Range Migration, LRM)算法<sup>[16]</sup>、频域匹配滤波(Frequency-Domain Matched Filter, FDMF)算法<sup>[23]</sup>等. 这些算法利用半空间介质格林函数、基于驻定相位原理(Phase of Stationary Principle, PSP)的球面波分解方法、爆炸反射模型等理论推导出,能有效克服电磁波空间波场不连续给快速成像带来的困难,实现半空间介质目标的快速高分辨成像. 总的来说,这些算法<sup>[16,21-23]</sup>在实现过程中,首先通过阵列孔径维度的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)将雷达回波数据从空域变换至波数域,并在经幅度及相位补偿后,作3D逆傅里叶变换(Inverse Fourier Transform, IFT)即可得到最终的成像结果. 以上算法的差异主要体现在3D IFT变换的实现方式上,例如PSM算法<sup>[21]</sup>的3D IFT主要通过2D逆FFT(Inverse FFT, IFFT)和一维积分的方式实现,LRM算法<sup>[22]</sup>的3D IFT主要通过一维Stolt插值后的3D IFFT实现. 由于FFT和IFFT的大量运用,这些方法具备成像效率高、速度快等优势,但应用场景也受到了限制,即只适用于均匀2D阵列. 借助于NUFFT运算,这些算法可以从2D均匀SISO阵列直接拓展应用于2D非均匀SISO阵列,马昭阳等人<sup>[24]</sup>利用NUFFT提出了适用于2D非均匀SISO阵列的半空间介质目标快速3D成像算法. 当阵列为3D非均匀SISO阵列时,雷达的空域回波数据无法直接通过FFT或NUFFT变换为波数域数据,将导致上述算法无法再直接拓展使用.

为此,针对3D非均匀SISO阵列雷达对半空间介质目标的快速成像问题,本文提出了一种基于虚拟阵列

的快速成像算法. 该算法利用半空间介质格林函数建立雷达目标回波模型,为了解决波数域数据无法直接通过FFT计算的问题,本文提出以阵列的每个阵元为中心分别构建虚拟均匀2D阵列,并利用PSP将每一个虚拟阵列的球面波分解为平面波,从而得到每个虚拟阵列的波数域数据,再将所有虚拟阵列的波数域数据相干叠加后即可得到完整的3D非均匀SISO阵列的波数域回波数据,最后将波数域回波数据作3D IFT即可得到介质目标的高分辨3D成像结果. 与同样适用于该应用场景的IBP算法相似之处在于,2种算法均采用了逐阵元数据处理的方式进行成像;不同之处在于,IBP算法在成像时会得到基于每个阵元数据的子图像,但所提算法仅在计算每个虚拟阵列波数域数据的基础上得到阵列的频域数据总和,而后进行单次成像处理得到最终成像结果. 这使所提算法不仅可以避免电磁波折射点计算,还可以减少成像次数,从而大大提高成像效率.

本文剩余部分的主要安排如下:第2节给出了算法的推导过程;第3节给出了算法的实施步骤,并对比了所提算法和IBP算法的计算复杂度;第4节和第5节通过数值仿真和实验测量的方式对所提算法的性能进行了验证;第6节对全文进行总结.

## 2 重构算法

考虑图2所示的成像场景,采用空间3D非均匀SISO阵列对半空间介质目标进行探测,其中 $y=0$ 平面为空气和半空间介质的分界面, $y>0$ 的部分为空气半空间, $y<0$ 的部分为介质半空间,介质的相对介电常数为 $\epsilon_M$ ,且假设介质是均匀无耗的.

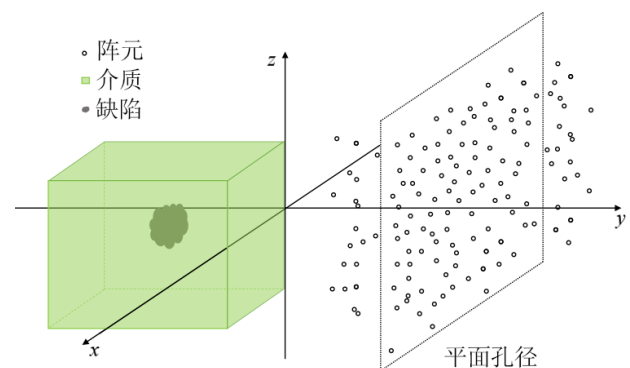


图2 3D非均匀SISO阵列对半空间介质目标成像场景示意图

均匀介质内的缺陷结构通常会引起电磁波的散射和折射. 其中,散射电磁波将携带目标的散射率信息. 因此,可通过毫米波雷达向介质目标发射电磁波并接收介质目标散射的回波信号来反演介质目标的内部结构,实现对介质目标内部结构完整性探测.

令函数 $o(\mathbf{r}_i)$ 表示介质目标内 $\mathbf{r}_i=(x_i, y_i, z_i)$ 处对电

电磁波的散射率,  $\mathbf{r}_R = (x_R, y_R, z_R)$  表示雷达收发天线的空间坐标, 那么雷达接收到的回波信号可表示为<sup>[25]</sup>

$$E(\mathbf{r}_R, k) = \int_V o(\mathbf{r}_t) G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) d\mathbf{r}_t \quad (1)$$

其中,  $k = 2\pi f/c$  为电磁波在自由空间中的波数,  $f$  为电磁波的频率,  $c$  为真空中的光速,  $V$  为雷达的探测区域,  $G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  为双向半空间介质格林函数, 该函数可由两个单向半空间介质格林函数计算得到

$$G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) = G_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) G_R(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_R, k) \quad (2)$$

其中,  $G_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  为雷达到目标点的单向半空间介质格林函数;  $G_R(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_R, k)$  为目标点到雷达的单向半空间介质格林函数.

根据格林函数的对称性可得

$$G_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) = G_R(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_R, k) \quad (3)$$

用  $G(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  统一表示  $G_T(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  和  $G_R(\mathbf{r}_t, \mathbf{r}_R, k)$ , 并将式(3)代入式(2)可得

$$G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) = G^2(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) \quad (4)$$

其中, 双向半空间介质格林函数  $G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  为单向半空间介质格林函数  $G(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  的二次函数. 由于非线性函数关系不利于快速计算, 因此, 利用爆炸反射模型<sup>[12]</sup>对  $G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k)$  进行线性化可得

$$G_{\text{TR}}(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) = G(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, 2k) \quad (5)$$

通常, 在近场条件下, 电磁波的传播损耗对成像几乎没有影响, 且电磁波在介质分界面上发生反射及折射时可能存在的固定相位差对成像也没有影响. 因此, 忽略电磁波的传播损耗和电磁波在介质分界面上发生反射和折射时产生的固定相位差, 单向格林函数可简化为

$$G(\mathbf{r}_R, \mathbf{r}_t, k) = e^{-j\varphi} \quad (6)$$

其中,  $\varphi$  表示电磁波从雷达  $\mathbf{r}_R$  到目标点  $\mathbf{r}_t$  的相位历程, 可表示如下:

$$\varphi = k_A R_A + k_M R_M \quad (7)$$

其中,  $k_A$  和  $k_M$  分别表示电磁波在空气和在介质中的波数,  $R_A$  和  $R_M$  分别表示电磁波在空气和介质中的单向传播距离, 可分别按照下式计算:

$$\begin{cases} k_A = k \\ k_M = 2\pi f \sqrt{\varepsilon_M} / c = \sqrt{\varepsilon_M} k \\ R_A = \sqrt{(x_R - x_p)^2 + (y_R)^2 + (z_R - z_p)^2} \\ R_M = \sqrt{(x_p - x_t)^2 + (y_t)^2 + (z_p - z_t)^2} \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $(x_p, 0, z_p)$  表示电磁波传播时在空气和介质分界面上的折射点, 该折射点的坐标可通过 Snell 定律计算得到.

将式(5)~(7)代入式(1), 雷达接收回波信号可表示为

$$E(\mathbf{r}_R, k) = \int_V o(\mathbf{r}_t) e^{-2jk_A R_A + jk_M R_M} d\mathbf{r}_t \quad (9)$$

在式(9)中,  $e^{-2jk_A R_A}$  实际上为 3D 笛卡尔坐标系下自由空间中的球面波模型,  $e^{-jk_M R_M}$  实际上为 3D 笛卡尔坐标系下介质中的球面波模型. 为了实现快速计算, 现运用 PSP 分别对 2 个球面波模型作平面波分解<sup>[1]</sup>, 可得

$$e^{-2jk_A R_A} \approx \iint e^{jk_{Ax}(x_R - x_p) + jk_{Az}(z_R - z_p) - jk_{Ay} y_R} dk_{Ax} dk_{Az} \quad (10)$$

$$e^{-jk_M R_M} \approx \iint e^{jk_{Mx}(x_p - x_t) + jk_{Mz}(z_p - z_t) + jk_{My} y_t} dk_{Mx} dk_{Mz} \quad (11)$$

其中,  $k_{Ax}$ ,  $k_{Az}$  和  $k_{Ay}$  分别为电磁波在自由空间中的空间波数沿 3 个坐标方向的分量;  $k_{Mx}$ ,  $k_{Mz}$  和  $k_{My}$  分别为电磁波在介质中的空间波数沿 3 个坐标方向的分量. 波数分量需分别满足以下约束关系:

$$k_{Ay} = \sqrt{4k_A^2 - k_{Ax}^2 - k_{Az}^2} \quad (12)$$

$$k_{My} = \sqrt{4k_M^2 - k_{Mx}^2 - k_{Mz}^2} \quad (13)$$

由电磁学原理可知, 当电磁波在不同介质之间传播时, 电磁波沿介质分界面切向的分量将保持连续, 即

$$k_{Ax} = k_{Mx} \quad (14)$$

$$k_{Az} = k_{Mz} \quad (15)$$

用  $k_x$  统一表示  $k_{Ax}$  和  $k_{Mx}$ ,  $k_z$  统一表示  $k_{Az}$  和  $k_{Mz}$ , 并将式(10)和式(11)代入式(9), 利用指数函数积分的性质化简后, 可以得到

$$E(\mathbf{r}_R, k) = \int_V o(\mathbf{r}_t) \iint e^{jk_x(x_R - x_t) + jk_z(z_R - z_t)} \times e^{jk_{My} y_t - jk_{Ay} y_R} dk_x dk_z d\mathbf{r}_t \quad (16)$$

观察式(16)可以发现, 若 SISO 阵列为垂直于  $y$  轴的均匀面阵, 则可以对  $E(\mathbf{r}_R, k)$  作关于  $x_R$  和  $z_R$  的 FFT 以得到阵列雷达的波数域回波数据, 然后可利用 DT 算法实现快速成像. 但由于所采用的阵列为 3D 非均匀 SISO 阵列, 完整的波数域回波数据无法直接通过 FFT 运算得到. 因此, 本文考虑以阵列雷达的每一个阵元为中心, 构造尺寸相同且垂直于  $y$  轴的均匀 SISO 阵列, 即按照虚拟阵列的尺寸建立一个全零矩阵, 并将虚拟阵列中心阵元的回波数据置于全零阵列的中心, 即可得到虚拟阵列的回波数据. 然后将所有虚拟阵列的回波数据变换至波数域再相干叠加, 并对波数域数据进行处理以实现快速成像, 具体实现步骤如下.

以空间 3D 非均匀 SISO 阵列中第  $i$  个阵元的位置  $\mathbf{r}_{Ri} = (x_{Ri}, y_{Ri}, z_{Ri})$  为中心构建虚拟阵列, 以点  $\mathbf{r}_{oi} = (x_{Ri}, 0, z_{Ri})$  为原点建立新的坐标系, 则该虚拟阵列的回波  $E_i'(\mathbf{r}'_{Ri}, k)$  可改写为

$$E_i'(\mathbf{r}'_{Ri}, k) = \int_V o_i(\mathbf{r}'_t) \iint e^{jk'_x(x'_{Ri} - x'_t) + jk'_z(z'_{Ri} - z'_t)} \times e^{jk'_{My} y'_t - jk'_{Ay} y'_{Ri}} dk'_x dk'_z d\mathbf{r}'_t \quad (17)$$

其中,  $\mathbf{r}'_{Ri} = (x'_{Ri}, y_{Ri}, z'_{Ri})$  表示虚拟阵列中阵元在新坐标系

下的坐标,虚拟阵列的中心阵元在新坐标系下的坐标为 $(0, y_{Ri}, 0)$ ;  $o_i(\mathbf{r}'_i)$ 为目标在新坐标系下的散射率函数,那么有 $o_i(\mathbf{r}'_i) = o(\mathbf{r}'_i + \mathbf{r}_{oi})$ .  $\mathbf{r}'_i = (x'_i, y_i, z'_i)$ 为 $\mathbf{r}_i$ 在新坐标系下的坐标,满足 $x'_i = x_i - x_{Ri}$ 、 $z'_i = z_i - z_{Ri}$ .

根据式(17)对 $E'_i(\mathbf{r}'_{Ri}, k)$ 作关于 $x'_{Ri}$ 和 $z'_{Ri}$ 的傅里叶变换(Fourie Transform, FT),可得

$$\begin{aligned} E'_i(k_x, k_z, k) &= \int_V \int \int o_i(\mathbf{r}'_i) e^{-jk_x x'_i - jk_z z'_i} \\ &\quad \times e^{-jk_{My} |y_i| - jk_{Ay} y_{Ri}} dk_x dk_z d\mathbf{r}'_i \quad (18) \\ &= O_i(k_x, k_z, k_{My}) e^{-jk_{Ay} y_{Ri}} \end{aligned}$$

其中,  $O_i(k_x, k_z, k_{My})$ 为 $o_i(\mathbf{r}'_i)$ 作关于 $x'_{Ri}$ 和 $z'_{Ri}$ 的FT运算后得到的波数域数据,移动相位项的位置可得

$$O_i(k_x, k_z, k_{My}) = E'_i(k_x, k_z, k) e^{jk_{Ay} y_{Ri}} \quad (19)$$

由于 $o_i(\mathbf{r}'_i)$ 和 $o(\mathbf{r}_i)$ 在表示上存在平移关系,根据FT的性质可得到

$$\tilde{O}_i(k_x, k_z, k_{My}) = O_i(k_x, k_z, k_{My}) e^{-jk_x x_{Ri} - jk_z z_{Ri}} \quad (20)$$

其中,  $\tilde{O}_i(k_x, k_z, k_{My})$ 表示将 $o_i(\mathbf{r}'_i)$ 在原坐标系下的波数域数据.

从式(19)和式(20)可以看出,每个虚拟阵列的波数域数据经相位补偿后,即可得到该虚拟阵列在原坐标系下目标象函数的波数域数据,即 $\tilde{O}_i(k_x, k_z, k_{My})$ . 将不同虚拟阵列所对应的象函数的波数域数据 $\tilde{O}_i(k_x, k_z, k_{My})$ 叠加,即可得到目标象函数的波数域数据之和,即

$$\begin{aligned} O(k_x, k_z, k_{My}) &= \sum_i \tilde{O}_i(k_x, k_z, k_{My}) \\ &= \sum_i [E'_i(k_x, k_z, k) e^{-jk_x x_{Ri} - jk_z z_{Ri} + jk_{Ay} y_{Ri}}] \quad (21) \end{aligned}$$

其中,  $O(k_x, k_z, k_{My})$ 表示目标象函数在原坐标空间中的波数域数据.

令

$$E_S(k_x, k_z, k) = \sum_i [E'_i(k_x, k_z, k) e^{-jk_x x_{Ri} - jk_z z_{Ri} + jk_{Ay} y_{Ri}}] \quad (22)$$

对式(21)作IFT变换即可计算出目标的散射率函数,也就是目标重构图像:

$$\begin{aligned} \hat{o}(x, y, z) &= \text{IFT}_{k_x, k_z, k_{My}} [O(k_x, k_z, k_{My})] \\ &= \text{IFT}_{k_x, k_z, k_{My}} \left\{ \text{Stolt}_{k_{My}} [E_S(k_x, k_z, k)] \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

其中,  $\hat{o}(x, y, z)$ 为散射率函数 $o(\mathbf{r}_i)$ 的像,  $\text{IFT}_{k_x, k_z, k_{My}}(\cdot)$ 表示作关于 $k_x, k_z$ 和 $k_{My}$ 的IFT变换,  $\text{Stolt}_{k_{My}}(\cdot)$ 表示沿 $k_{My}$ 作Stolt插值.

通常,雷达的波数域数据沿 $k_x$ 和 $k_z$ 维度是均匀分布,因此关于 $k_x$ 和 $k_z$ 的IFT变换可以通过IFFT快速实现.但 $k_{My}$ 是由式(13)计算得到,导致雷达的波数域数据沿 $k_{My}$ 维度是非均匀分布的,关于 $k_{My}$ 的IFT变换无法直接通过IFFT直接得到.此时,可以通过Stolt插值将

$k_{My}$ 维度的雷达波数域数据插值为均匀分布的数据,再通过IFFT实现IFT,即式(23)可以通过一维Stolt插值和3D IFFT实现,从而得到重构图像.

### 3 算法实现及运算负载分析

本节主要对算法的实现流程及运算负载进行分析.

#### 3.1 算法实现

算法的实现流程如图3所示.

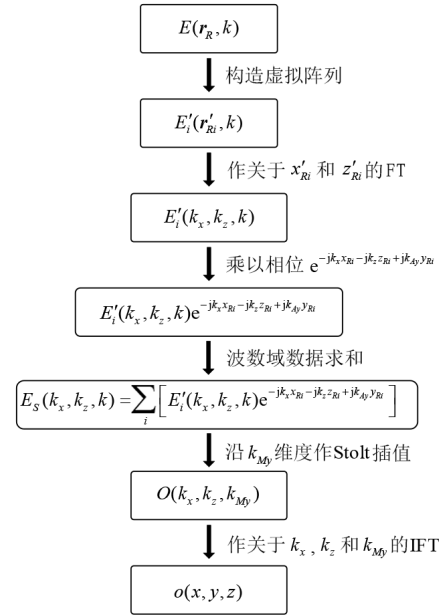


图3 所提算法流程图

#### 3.2 运算量分析

现简要分析所提算法的运算量.对于3D非均匀SISO阵列雷达录取的回波数据,可按照图3所示的算法执行步骤进行处理,下面我们采用浮点运算(Floating Point Operation, FLOP)对所提算法的理论计算量逐步分析.

步骤1:构造虚拟阵列,即以3D非均匀SISO阵列的每个阵元为中心,构造虚拟的均匀SISO阵列,实质上就是将该阵元的回波数据放入与虚拟阵列等尺寸的零矩阵中心,该步骤几乎不需要运算量.

步骤2:执行关于 $x'_{Ri}$ 和 $z'_{Ri}$ 的FT,即对每个虚拟阵列的回波数据沿 $x$ 轴和 $z$ 轴作FT,该步骤可以通过FFT实现,假设虚拟阵列 $x$ 轴方向的阵元数量为 $N_x$ , $z$ 轴方向的阵元数量为 $N_z$ ,且每个阵元雷达回波数据采样点数为 $N_f$ ,3D随机SISO阵列雷达阵元数量为 $N$ ,则参考文献[2]中的运算量计算方法,该步骤的计算量为

$$C_1 \approx 5NN_f N_x N_z \log(N_x N_z) \quad (24)$$

步骤3:相位补偿,即对每个虚拟阵列的波数域数

据乘以相位  $e^{jk_x x_{Ri} + jk_z z_{Ri} + jk_{M_y} y_{Ri}}$ , 该步骤的计算量为

$$C_2 \approx 6NN_f N_x N_z \quad (25)$$

步骤 4: 波数域数据求和, 即对所有经相位补偿后的虚拟阵列波数域数据进行求和, 以得到 3D 非均匀 SISO 阵列雷达波数域数据的总和, 该步骤的计算量为

$$C_3 \approx (N-1)N_f N_x N_z \quad (26)$$

步骤 5: 作关于  $k_x, k_z$  和  $k_{M_y}$  的 IFT, 即对 3D 波数域数据  $E_s(k_x, k_z, k)$  作关于  $k_x, k_z$  和  $k_{M_y}$  的 IFT, 以得到目标的像函数  $\hat{o}(x, y, z)$ . 该步骤分为一维 Stolt 插值和 3D IFFT 2 个子步骤. 第 1 个子步骤为沿  $k_{M_y}$  维度的 Stolt 插值, 该步骤的运算量为

$$C_{41} \approx 6N_x N_z N_y \quad (27)$$

其中,  $N_y$  为  $k_{M_y}$  维度的插值数量. 第 2 个子步骤为沿  $k_x, k_z$  和  $k_{M_y}$  的 IFFT, 该步骤的运算量为

$$C_{42} \approx 5N_x N_y N_z \log(N_x N_y N_z) \quad (28)$$

所提算法的总运算量为

$$\begin{aligned} C_T &= C_1 + C_2 + C_3 + C_{41} + C_{42} \\ &= N_x N_z \left[ 5NN_f \log(N_x N_z) + 6NN_f \right] \\ &\quad + N_x N_z \left[ (N-1)N_f + 6N_y \right] \\ &\quad + 5N_x N_z^2 \log(N_x N_y N_z) \end{aligned} \quad (29)$$

现简要分析 IBP 算法<sup>[17]</sup>的运算量. IBP 算法的运算量主要来源于后向投影运算, 而对介质内部目标进行成像时, 还需要考虑折射点计算带来的额外运算量. 计算折射点的目的是得到电磁波从雷达到像素点之间的传播距离, 从而实现准确投影, 获取高质量的 3D 目标重构图像.

步骤 1: 折射点计算, 即利用 Snell 定律计算电磁波从雷达天线到成像区域每个像素点的传播过程中, 电磁波在介质分界面上的折射点, 假设求解一个折射点所需的运算量为  $N_r$ , 则求解所有折射点的运算量为

$$C_{BP1} \approx NN_x N_z N_y N_r \quad (30)$$

值得一提的是, 在求解折射点时, 需要求解二次方程组, 其运算量往往较大且难以估计, 因此  $N_r$  的大小往往无法准确确定.

步骤 2: 后向投影, 在相同条件下, 后向投影的运算量为

$$C_{BP2} \approx 8NN_x N_z N_y N_f \quad (31)$$

综上, IBP 算法的总运算量为:

$$\begin{aligned} C_{BP} &= C_{BP1} + C_{BP2} \\ &= NN_x N_z N_y (N_r + 8N_f) \end{aligned} \quad (32)$$

通过对比式 (28) 和式 (29) 可以看出, 与 IBP 算法相比, 所提算法能显著降低计算复杂度, 尤其是 IBP 算法步骤 1 中  $N_r$  通常比较大且难以估计, 导致其成像耗时更加巨大. 为直观比较 2 种成像算法的成像效率, 后文将分别给出相同成像参数条件下, 2 种算法在仿真分析及实验验证中图像重构的时间, 并进行对比

分析.

## 4 仿真分析

本节首先将以数值仿真的方式验证所提算法的成像性能, 通过将所提算法的成像结果与 IBP 算法的成像结果进行比较, 以评估所提算法的有效性. 在仿真场景中, 半空间介质的相对介电常数设置为 2.08, 其他仿真参数如表 1 所示. 3D 非均匀 SISO 阵列雷达位于自由空间中, 所有的雷达阵元以  $y$  轴为中心分布于  $y=0.3$  m 平面附近 10 cm 范围内, 沿  $x$  轴方向和  $z$  轴方向的阵列孔径长度约为 0.3 m.

表 1 仿真及实验参数

参数	参数值
中心频率	37.5 GHz
带宽	12 GHz
频率间隔	300 MHz
频率点数	51
信号类型	步进频信号
天线类型	全向天线
雷达阵列 $x$ 轴方向孔径长度	约 0.3 m
雷达阵列 $z$ 轴方向孔径长度	约 0.3 m
雷达阵列 $y$ 轴方向随机分布长度	约 0.1 m
阵列雷达阵元数量	101×101

### 4.1 仿真 A: 多理想点目标成像仿真

设介质目标内部存在 6 个理想散射点, 可看作分布于不同位置的 6 个微小缺陷. 如图 4(a) 所示, 6 个理想散射点的位置坐标分别为 (0.05 m, -0.02 m, 0 m), (-0.05 m, -0.04 m, 0 m), (-0.05 m, -0.06 m, 0 m), (-0.05 m, -0.02 m, 0.05 m), (0.05 m, -0.04 m, -0.05 m), (0 m, -0.06 m, -0.05 m).

图 4(b) 和图 4(c) 分别为 IBP 算法和所提算法的 3D 成像结果. 与图 4(a) 对比可以发现, 在 2 种算法的 3D 成像结果中, 理想散射点的位置均正确, 且都聚焦良好. 除此之外, 我们还可以直观地发现所提算法旁瓣性能可达到 IBP 算法类似的性能.

### 4.2 仿真 B: 点扩散函数仿真

为定量比较 IBP 算法与所提算法的成像性能, 本节开展了点扩散函数 (Point Spread Function, PSF) 仿真, 并以冲激响应宽度 (Impulse Response Width, IRW)、峰值旁瓣比 (Peak Side Lobe Ratio, PSLR)、成像计算时间作为性能指标对两种算法的成像性能进行评价. 仿真场景如图 5 所示, 假设在介质空间中 (0 m, -0.04 m, 0 m) 处存在一个理想散射点.

为更好地验证算法的有效性, 我们在仿真的雷达回波数据  $E(\mathbf{r}_R, k)$  中加入了随机噪声信号, 测试 IBP 算

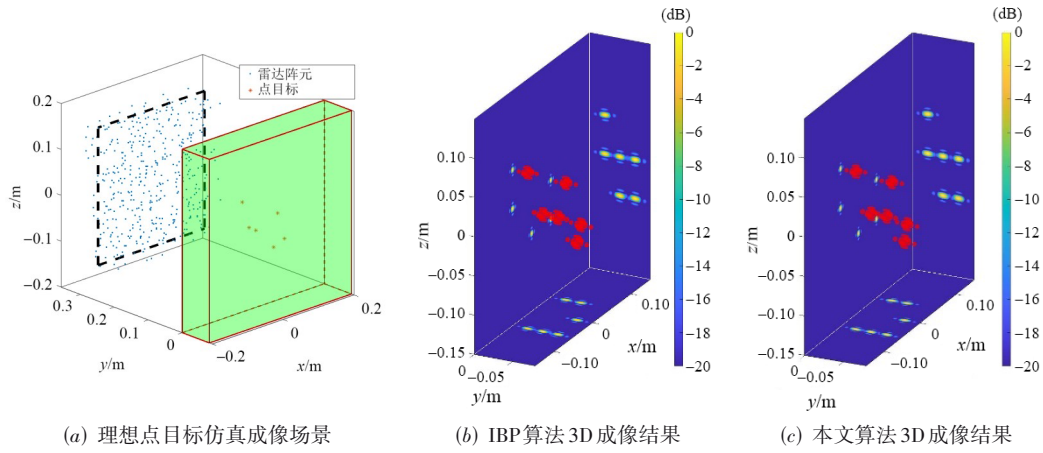


图4 理想点目标成像仿真

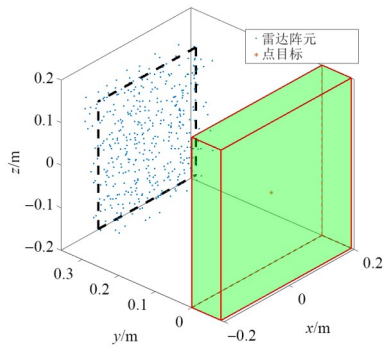


图5 点扩散函数仿真场景

法与所提算法对噪声的鲁棒性. 回波数据加入随机噪声信号模型<sup>[26]</sup>为

$$E(\mathbf{r}_R, k)_{\text{noise}} = E(\mathbf{r}_R, k) + \text{Rand}_{\text{noise}} \quad (33)$$

其中,  $E(\mathbf{r}_R, k)_{\text{noise}}$  为加入随机噪声的雷达回波数据;  $\text{Rand}_{\text{noise}}$  为随机噪声信号, 可表示为

$$\text{Rand}_{\text{noise}} = \text{sqrt} \left[ 2 \times \text{rand}([E(\mathbf{r}_R, k)]) \times \frac{\text{sum}(|E(\mathbf{r}_R, k)|^2)}{N_E \times 10^{\text{SNR}/10}} \right] e^{2\pi j \times \text{rand}([E(\mathbf{r}_R, k)])} \quad (34)$$

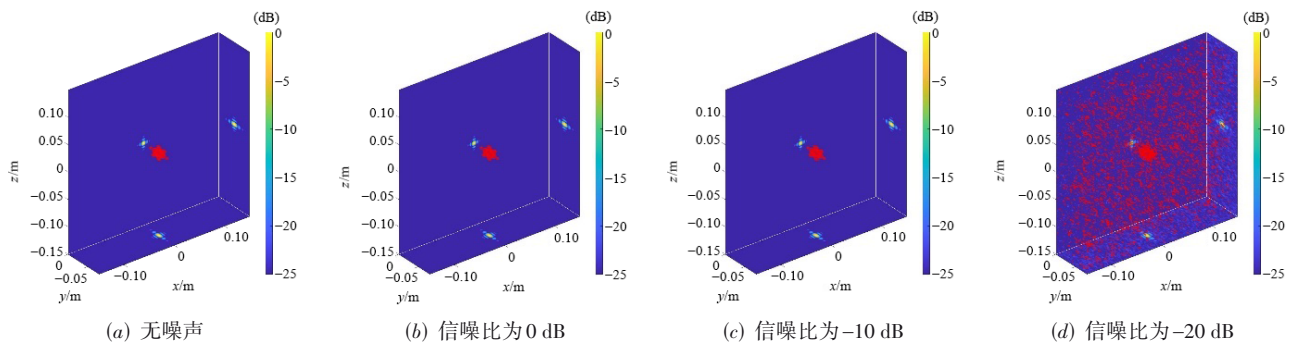


图6 所提算法在不同噪声水平下仿真得到的点扩散函数三维成像

其中,  $\text{sqrt}(\cdot)$  表示开方运算,  $\text{rand}([E(\mathbf{r}_R, k)])$  表示由 0 至 1 之间的随机数构成的与  $E(\mathbf{r}_R, k)$  尺寸相同的随机矩阵,  $|E(\mathbf{r}_R, k)|$  表示对  $E(\mathbf{r}_R, k)$  中的元素取模,  $|E(\mathbf{r}_R, k)|^2$  表示逐元素对阵列的元素求平方,  $\text{sum}(\cdot)$  表示求和运算,  $N_E$  表示阵列  $E(\mathbf{r}_R, k)$  的元素个数, SNR 表示信噪比 (单位为 dB),  $j$  为虚数单位.

式 (34) 中,  $\text{sum}(|E(\mathbf{r}_R, k)|^2)/N_E$  表示信号功率,  $10^{\text{SNR}/10}$  为信噪比的倍数表示, 则这两项的比值即可表示噪声的平均功率;  $2 \times \text{rand}([E(\mathbf{r}_R, k)])$  表示一个均值为 1 的矩阵, 该项可确保在每次采样中噪声的功率为随机数但噪声的平均功率为常数. 对这 3 项的乘积开方即可得到每次采样中噪声的幅值. 式中的相位项  $e^{2\pi j \times \text{rand}([E(\mathbf{r}_R, k)])}$  则可确保噪声信号的相位随机. 将噪声的幅值和相位相乘, 从而得到幅度和相位均随机的复噪声信号.

在点扩散函数的仿真中, 我们分别对无噪声雷达数据和 SNR 为 0 dB, -10 dB, -20 dB 的含噪声雷达数据进行了成像仿真, 成像结果分别图 6 所示. 为了便于观察不同信噪比下成像结果的差异, 成像结果的动态范围被设置为 -25 dB 至 0 dB. 从图 6 中可以发现, 在该显示动态范围下, 仅 SNR 为 -20 dB 时, 成像结果中可观察到相对较强的噪声, 但观察图 6(d) 中的投影可以发现,

理想散射点的像聚焦效果仍然良好,这表明所提算法对噪声具有较好的鲁棒性.

为了更细致地比较不同噪声水平下所提算法点扩散函数的差异,现分别沿  $x$  轴、 $y$  轴、 $z$  轴作图 6(a)~(d) 中 3D 成像结果的剖面图,并在图 7 中给出了对比结果. 观察图

7 可以发现,随着信噪比的下降,点扩散函数剖面图的旁瓣逐渐增强,但总体来说点扩散函数的旁瓣强度均保持在  $-20$  dB 以下,且不同信噪比条件下理想点目标的成像结果均聚焦良好,在  $-20$  dB 至  $0$  dB 范围内的形状均几乎完全重合,这进一步说明了所提算法对噪声的鲁棒性.

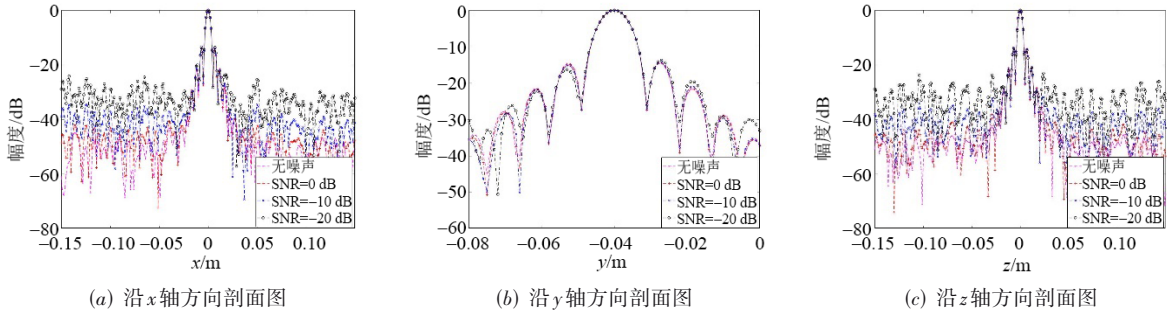


图 7 点扩散函数沿三个轴方向的剖面图

为更好地说明所提算法对噪声的鲁棒性,现将所提算法对不同 SNR 的雷达数据的成像结果与 IBP 算法的成像结果进行对比分析,IBP 算法对不同信噪比雷达数据的 3D 成像结果分别在图 8 给出. 对比图 6(a)~(c) 与图 8(a)~(c) 几乎难以看出差异,仅图 6(d) 中的成像

结果略差于图 8(d) 中的成像结果. 为了便于作更清晰的比较,图 9 给出了图 6(d) 和图 8(d) 中成像结果沿 3 个坐标轴方向的剖面对比图. 从剖面对比图可以看出,所提算法成像结果的点扩散函数旁瓣略高于 IBP 算法成像结果的点扩散函数旁瓣,但两者的差异并不显著.

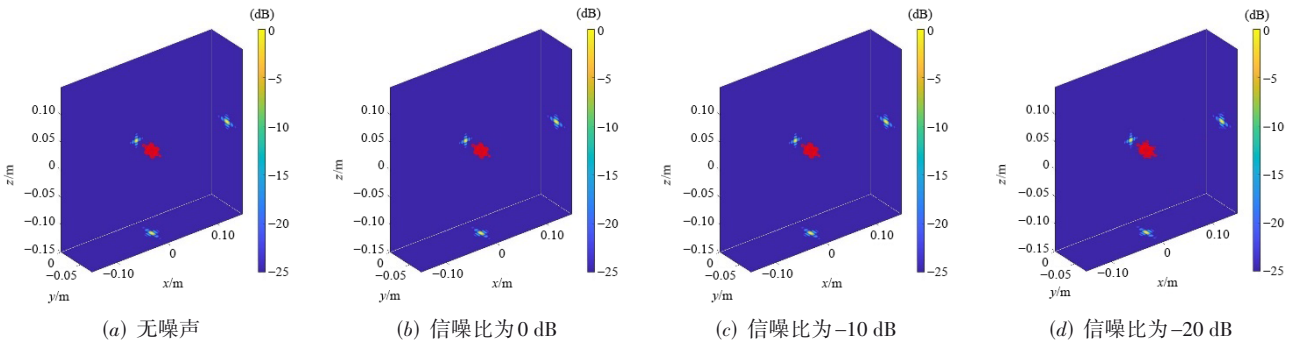


图 8 IBP 算法在不同噪声水平下仿真得到的点扩散函数三维成像

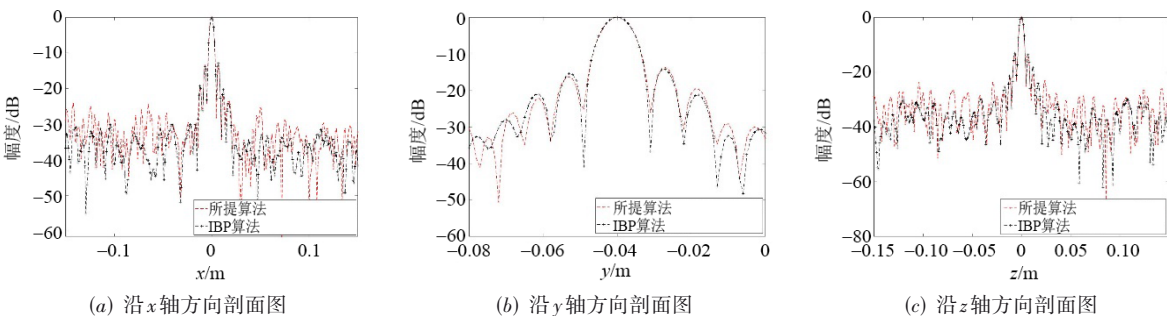


图 9 信噪比 SNR=-20dB 时 2 种算法的 3D 成像结果沿坐标轴的剖面图对比

图 10 给出了无噪声条件下所提算法和 IBP 算法 3D 成像结果沿坐标轴的剖面图,从图中可以看出,剖面图的主瓣部分几乎完全重合,仅旁瓣部分略有差异,所提

算法的旁瓣略高于 IBP 算法的旁瓣. 总体来说,图 6 至图 10 中的成像结果及剖面图均定性说明了所提算法与 IBP 算法成像质量十分相似.

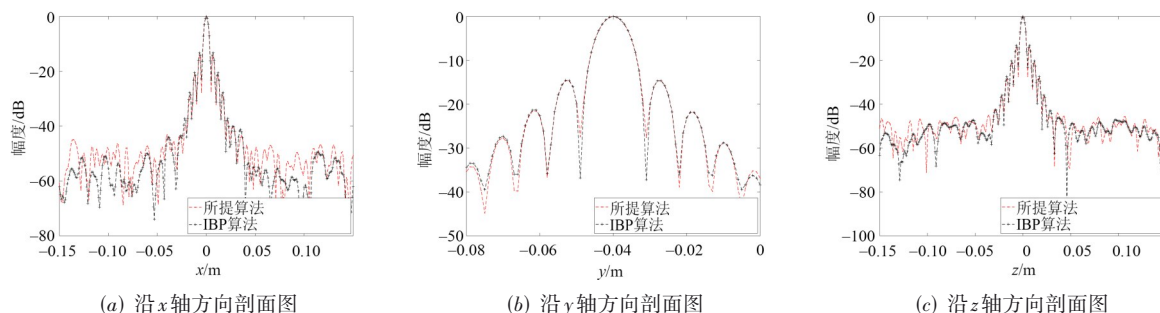


图10 无噪声时2种算法的3D成像结果剖面图对比

为定量比较2种算法的成像质量,现对两种算法的IRW和PSLR值进行比较.表2给出了2种算法对无噪声数据PSF仿真结果的IRW,PSLR数值,从具体的数值来看,2种算法的定量成像指标仍然相似.

表2 无噪声数据仿真PSF的IRW和PSLR数值

参数	IBP算法	所提算法
IRW(x轴)/m	0.004 05	0.004 13
PSLR(x轴)/dB	-13.02	-14.23
IRW(y轴)/m	0.007 6	0.007 7
PSLR(y轴)/dB	-14.38	-14.68
IRW(z轴)/m	0.004 05	0.004 12
PSLR(z轴)/dB	-12.95	-14.13

总体来说,经过定性和定量对比可以发现,虽然在信噪比非常低的情况下,所提算法的旁瓣性能略差于IBP算法,但这些差异并不显著,对后续的目标识别和图像解译影响甚微.

事实上,所提算法之所以可以获得与IBP算法相似的成像性能,其本质原因在于所提算法与IBP算法类似,在对3D非均匀阵列逐个阵元的数据进行处理时未引入近似条件.但区别在于,IBP算法在投影时对每个阵元的数据均进行一次完成的成像计算,而所提算法仅在得到阵列的波数域数据总和后进行一次成像,因此具备更高的成像效率.

为了直观地比较IBP算法和所提算法的成像效率,表3给出了2种算法的成像重构时间,其中仿真B的时间为该仿真中4个仿真成像时间的平均值.成像算法的运算平台均为配置Intel(R) Xeon(R) Gold 6161 CPU @2.20 GHz、16 GB RAM的网络主机.统计的成像时间仅为算法处理回波进行图像重构的时间,即获得完整的仿真回波数据或者实验测量数据后,实现图像重构的时间.在此基础上给出了所提算法图像重构时间相对于IBP算法的图像重构时间缩短百分比,并定义为时间缩短比.仿真分析及实验验证中的其他成像参数如下第4.1和第4.2节的数值仿真中, $x$ 轴, $y$ 轴和 $z$ 轴方向的成像点数分别设置为 $N_x=301$ , $N_y=81$ 和 $N_z=301$ ,第5.1

节的实验验证中, $x$ 轴, $y$ 轴和 $z$ 轴方向的成像点数分别设置为 $N_x=301$ , $N_y=121$ 和 $N_z=301$ ;第5.2节的实验验证中, $x$ 轴, $y$ 轴和 $z$ 轴方向的成像点数分别设置为 $N_x=301$ , $N_y=134$ 和 $N_z=301$ .为缩短成像时间,在计算电磁波的折射点位置时,采用了近似计算方法<sup>[17]</sup>.与IBP算法相比,所提算法的图像重构时间可以减少94%以上.值得一提的是,若不采用近似方法计算折射点位置,在本文的参数设置条件下,折射点的计算耗时将达到亿秒量级,通过IBP算法进行介质目标图像重构将难以通过一般配置的计算平台实现.

表3 图像重构时间统计

参数	IBP算法/s	所提算法/s	时间缩短比/%
仿真A	6 536.38	355.35	94.56
仿真B	6 429.66	347.32	94.60
实验A	7 908.55	361.25	95.43
实验B	9 942.06	359.05	96.39

## 5 实验验证

由于实验条件限制,所采用的二维高精度机械扫描设备仅能提供平面扫描功能,无法实现3D非均匀扫描.因此,本节仅测量了均匀SISO平面阵列的回波数据来验证所提方法的有效性.实验的成像目标为内嵌杂质和内含空腔的聚四氟乙烯(PolyTetraFluoroEthylene, PTFE)块.实验场景如图11所示.实验主要通过KEYSIGHT N5224A矢量网络分析仪(Vector Network Analyzer, VNA)和二维高精度机械扫描架来录取回波数据.具体方法是利用VNA和天线搭建一个双端口的测量网络,目标位于天线的正前方约20 cm处,测量VNA的S11参数以获取目标散射的回波数据.收发天线安装在机械扫描架上,随扫描架沿 $x$ 轴和 $z$ 轴作均匀扫描的同时发射并接收回波信号,沿着两个方向的扫描长度均为0.3 m,扫描间隔0.003 m.阵列雷达的其他参数与表1中的参数设置保持一致.

### 5.1 实验A:内嵌杂质介质目标成像

内嵌杂质的介质目标为一个内嵌锡箔条的PTFE块,如图12(a)所示.

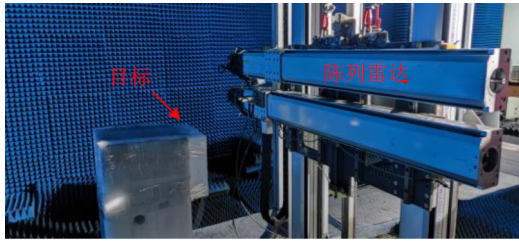
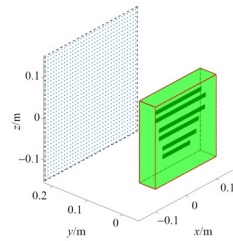


图 11 实验场景



(a) 内嵌锡箔条的 PTFE 块实物照片



(b) 成像场景示意图

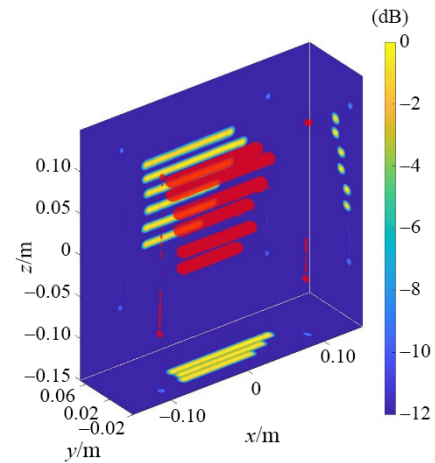
图 12 内嵌锡箔条的 PTFE 块及内部结构示意图

该 PTFE 块的长宽厚尺寸分别为 20 cm, 20 cm 和 4.5 cm. 锡箔条在 PTFE 块中的位置分布如图 12(b) 所示, 锡箔条共计 6 条, 宽均约 1 cm, 长度为 8~14 cm, 按照每组 2 条的方式将锡箔条划分为 3 组嵌于 PTFE 块内, 3 组锡箔条分别位于  $y=-2$  cm,  $y=-3$  cm,  $y=-4$  cm 三个不同的平面上. 实验目标与阵列雷达之间的距离约为 22 cm.

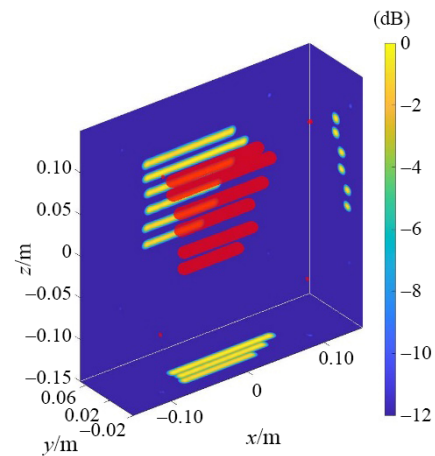
IBP 算法和所提算法对目标的 3D 成像结果分别如图 13(a) 和图 13(b) 所示. 为方便观察 PTFE 块内嵌锡箔条的成像效果, 成像结果的显示动态范围设置为  $-12\sim 0$  dB. 对比图 12(b) 所示的目标结构示意图, 可以看出 2 种算法都可以正确重构出 PTFE 块内嵌锡箔条的位置及形状, 区别仅在于 IBP 算法的成像结果中可以隐约观察到 PTFE 块的后表面部分边线轮廓, 这也验证了所提算法良好的聚焦能力.

为更方便比较 2 种算法的成像结果, 现分别沿  $y=-0.02$  m 平面 (第一组锡箔条所在的平面) 和  $y=-0.045$  m 平面 (PTFE 块后表面所在的平面) 作 3D 成像结果的切面图, 分别如图 14(a) 与图 14(b) 和图 15(a) 与图 15(b) 所示, 并在切面的二维平面内沿  $x=-0.03$  m (切面图中红色虚线标注的位置) 作切面图的剖面, 分别如图 14(c) 和图 15(c) 所示. 为观察更多成像细节, 将切面图显示的动态范围均设置为  $-20\sim 0$  dB.

分别对比切面图 14(a) 与图 14(b)、图 15(a) 与图 15(b) 可以发现, 2 种算法对介质目标内部结构的成像结果十分相似, 且从图 14(c) 和图 15(c) 的剖面图来看,



(a) IBP 算法成像结果



(b) 本文算法成像结果

图 13 内嵌锡箔条的 PTFE 块 3D 成像结果

在  $-35\sim 0$  dB 范围内, 2 种算法成像结果的剖面曲线图基本重合, 这进一步表明所提算法的成像质量与 IBP 算法的成像质量相似.

## 5.2 实验 B: 内含空腔介质目标成像

内含空腔的介质目标为一块内嵌 4 个大小不同空腔的 PTFE 块, 如图 16(a) 所示.

该 PTFE 块的长宽厚尺寸分别为 20 cm, 20 cm 和 8 cm, 4 个空腔的位置分布如图 16(b) 所示. 其中空腔 1 是一个长宽厚分别为 2 cm, 2 cm, 1 cm 的长方体, 与 PTFE 块的前表面 (PTFE 块靠近雷达的一面定义为前表面) 距离为 5 cm; 空腔 2 是一个长宽厚分别为 3 cm, 2 cm, 2 cm 的长方体, 与 PTFE 块的前表面距离为 4 cm; 空腔 3 是一个长宽厚分别为 3 cm, 2 cm, 3 cm 的长方体, 与 PTFE 块的前表面距离为 3 cm; 空腔 4 是一个半径为 2 cm、厚为 4 cm 的圆柱体, 与 PTFE 块的前表面距离为 2 cm. 实验目标与阵列雷达之间的距离约为 23 cm. IBP 算法和所提算法对目标的 3D 成像结果分别如图 17(a) 和图 17(b) 所示.

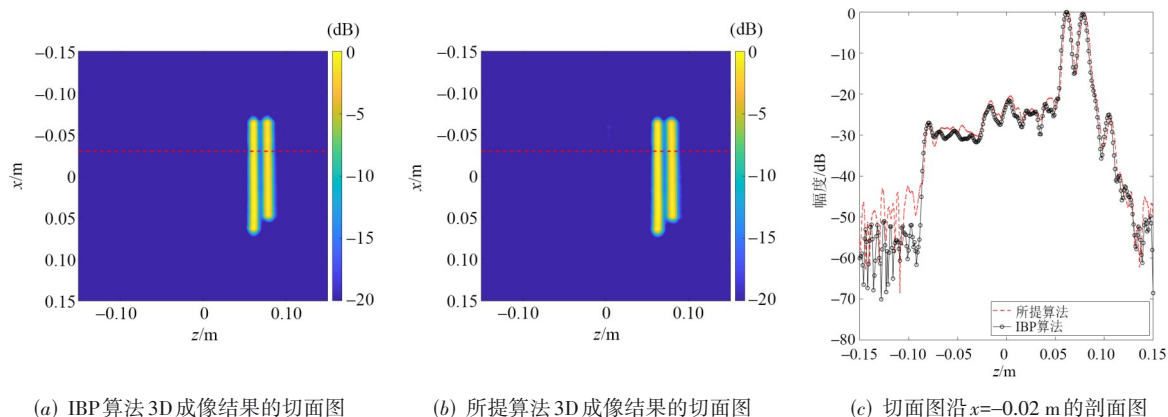


图 14 2 种算法对内嵌锡箔条 PTFE 块的 3D 成像结果沿  $y=-0.02$  m 平面的切面图及切面图的一个剖面

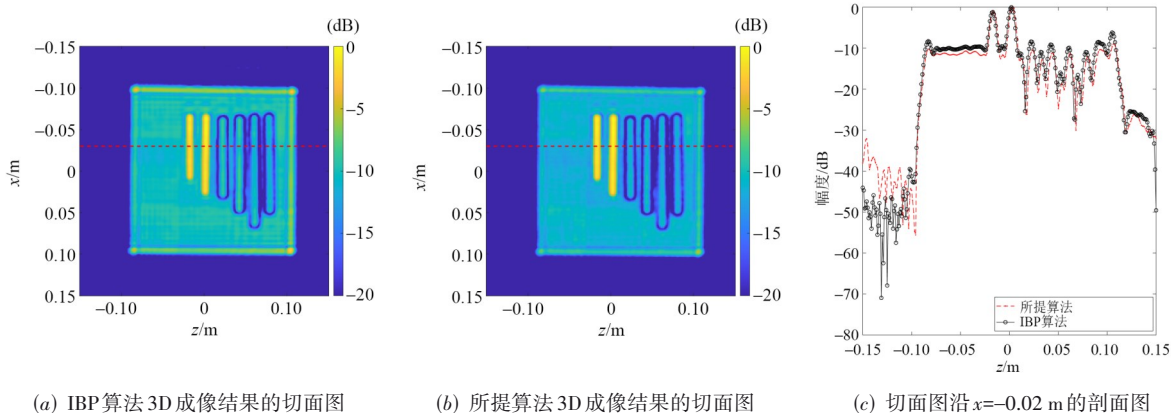
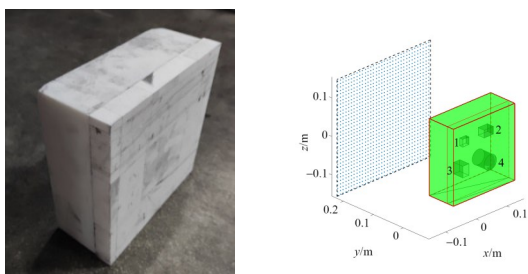


图 15 2 种算法对内嵌锡箔条 PTFE 块的 3D 成像结果沿  $y=-0.045$  m 平面的切面图及切面图的一个剖面



(a) 内含空腔的 PTFE 块实物照片 (b) 成像场景示意图

图 16 内嵌锡箔条的 PTFE 块及内部结构示意图

为便于观察 PTFE 块内部的空腔及前后表面的成像结果,3D 成像结果的动态范围被设置为  $-14\sim 0$  dB,其中红色部分为 PTFE 块前表面的成像结果,绿色部分为 PTFE 块内部空腔的成像结果,蓝色部分为 PTFE 块后表面的成像结果.将 PTFE 块的 3D 成像结果与图 16(b)所示的结构示意图进行对比可以发现,PTFE 块前后表面及其内部空腔均能正确成像,且可以在 PTFE 块后表面的成像结果中观察到空腔在其上的投影.出现这一现象的主要原因在于,电磁波在空腔的前后表

面发生多次散射,导致传播至后表面相应区域的电磁波及其散射的电磁波弱于后表面上其他区域散射的电磁波,使 PTFE 块后表面成像结果中空腔对应区域上的反演结果幅度较弱,进而呈现出空腔投影的形状.对比 2 种算法的 3D 成像结果可以发现,与 IBP 算法相比,在相同的动态范围内所提算法的成像结果更加均匀,空腔在后表面上的投影轮廓更加清晰.

为进一步比较两种算法的成像质量,现分别沿  $y=0$  m 平面(PTFE 块前表面所在的平面)、 $y=-0.02$  m 平面(空腔 4 前表面所在的平面)、 $y=-0.08$  m 平面(PTFE 块后表面所在的平面)作 3D 成像结果的切面图,结果分别如图 18(a)(b)、图 19(a)(b)和图 20(a)(b)所示,为便于观察,切面图的显示动态范围被设置为  $-20\sim 0$  dB.在此基础上,分别按照图中红色虚线标注的位置作切面图的剖面,分别如图 18(c)、图 19(c)和图 20(c)所示.

分别对比切面图 18(a)(b)、图 19(a)(b)和图 20(a)(b)可以发现,2 种算法对内含空腔的 PTFE 块 3D 成像结果的切面图仍然高度相似;图 18(c)和图 20(c)中,

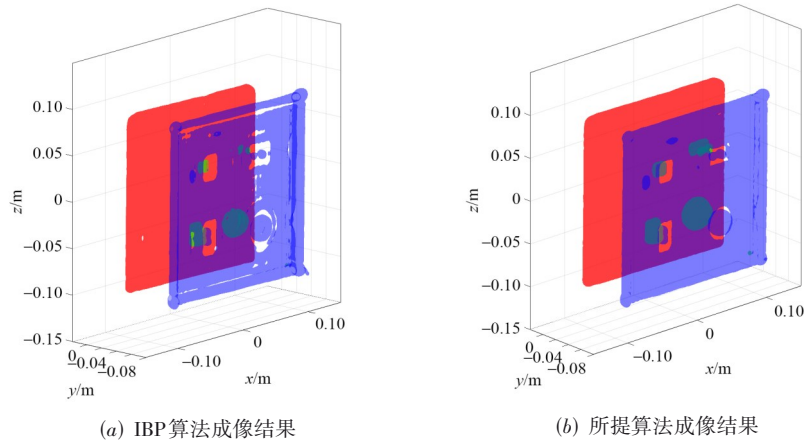


图 17 内含空腔的 PTFE 块 3D 成像结果

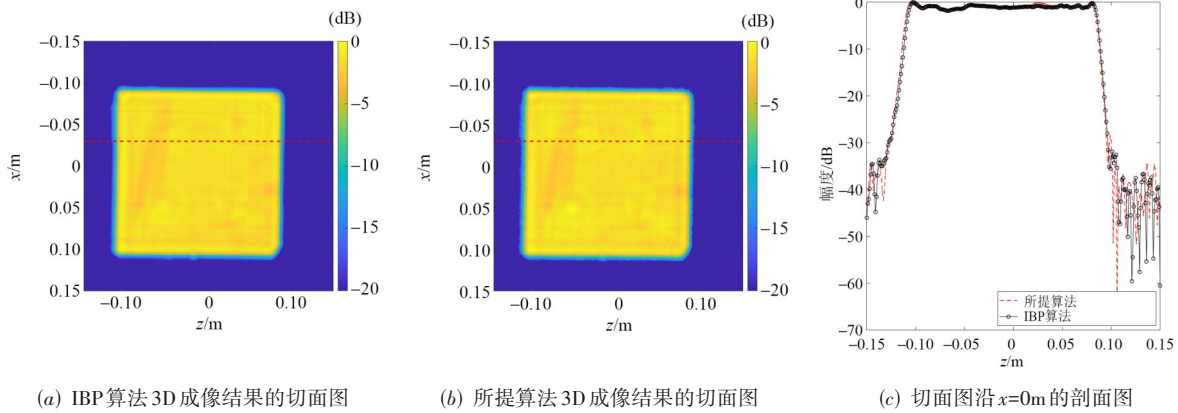


图 18 2 种算法对内含空腔 PTFE 块的 3D 成像结果沿  $y=0\text{m}$  平面的切面图及切面图的一个剖面

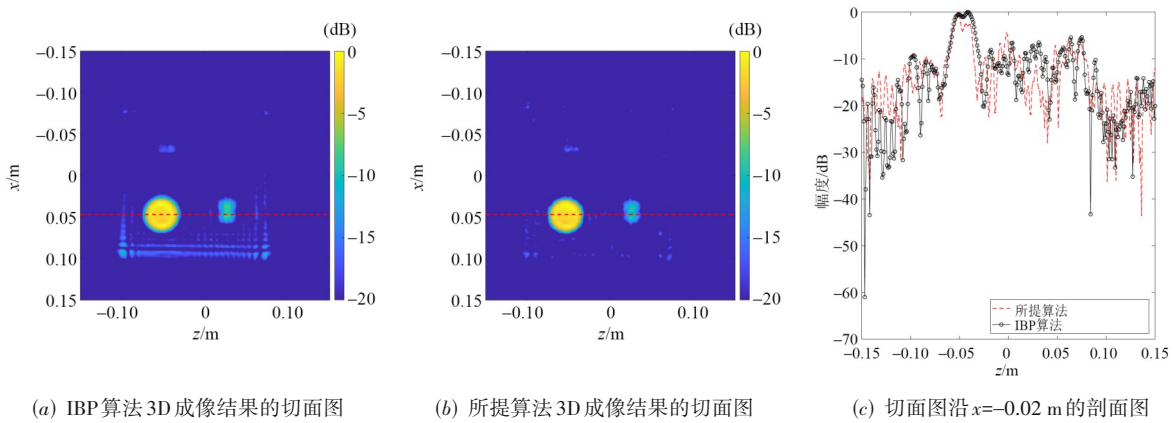


图 19 2 种算法对内含空腔 PTFE 块的 3D 成像结果沿  $y=-0.02\text{ m}$  平面的切面图及切面图的一个剖面

在  $-20\sim 0\text{ dB}$  范围内,2 种算法成像结果的剖面曲线图基本重合. 这说明在该实验中,所提算法仍达到了与 IBP 算法相同的成像效果. 现对图 19(c) 进行重点分析,虽然在该图中两条曲线的相似度仍然较高,但其成像动态范围都较小,其主要原因是 PTFE 块前表面

散射电磁波较强,而空腔 4 前表面散射电磁波与之相比较弱,且空腔 4 前表面与 PTFE 块前表面距离较近,导致 PTFE 块前表面的像的旁瓣对平面  $y=-0.02\text{ m}$  上的切面图仍有影响. 但从图中可以看出,这种影响并不显著,对最终的图像重构质量影响甚微.

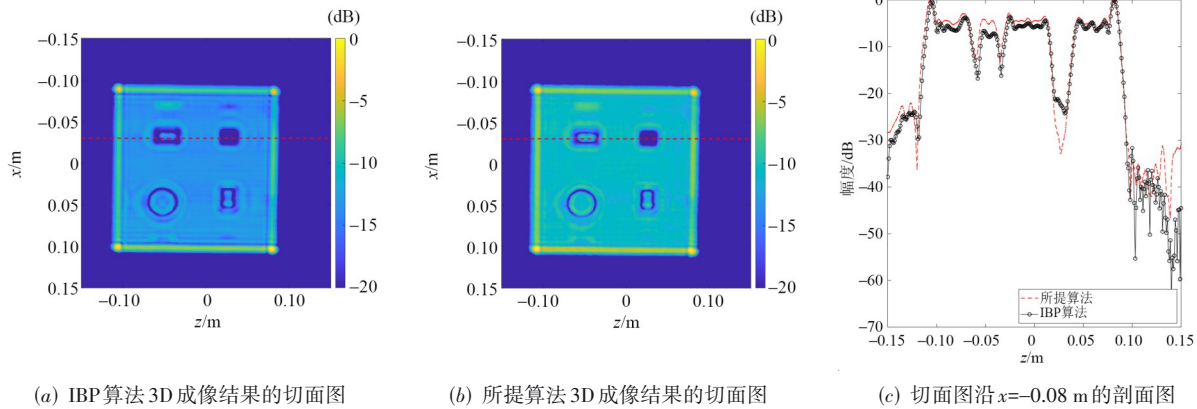


图20 2种算法对内含空腔PTFE块的3D成像结果沿 $y=-0.08$  m平面的切面图及切面图的一个剖面

## 6 总结

本文提出了一种适用于3D非均匀SISO阵列对半空间介质目标进行快速成像的算法。在算法执行过程中,首先以3D非均匀SISO阵列的每个阵元为中心,构建虚拟阵列,将虚拟阵列的空域回波变换至波数域后,在波数域对回波数据作相位补偿,而后将所有虚拟阵列的波数域数据叠加求和,得到完整阵列的波数域回波数据,最后对该回波数据作3D IFT实现目标图像的3D重构。仿真和实验结果表明,所提算法可以在获得与IBP算法相似的成像效果时,大幅缩减成像计算时间,有效提高成像效率。在实际场景中,所提算法可以应用于探地雷达成像、穿墙成像、介质目标无损检测成像等涉及介电结构成像的相关领域,可以为基于手持探测设备的快速成像应用提供理论支撑。

### 参考文献

- [1] GAO J K, QIN Y L, DENG B, et al. Novel efficient 3D short-range imaging algorithms for a scanning 1D-MIMO array[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2018, 27(7): 3631-3642.
- [2] 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.
- [3] ZHANG W J, HOORFAR A. MIMO ground penetrating radar imaging through multilayered subsurface using total variation minimization[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(4): 2107-2115.
- [4] SALEHI-BARZEGAR A, CHELDAVI A, NAYYERI V, et al. A fast diffraction tomography algorithm for 3-D through-the-wall radar imaging using nonuniform fast Fourier transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022, 19: 1-5.
- [5] ZHANG X X, LIANG J, WANG N, et al. Broadband millimeter-wave imaging radar-based 3-D holographic reconstruction for nondestructive testing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(3): 1074-1085.
- [6] CASE J T, GHASR M T, ZOUGHI R. Optimum two-dimensional uniform spatial sampling for microwave SAR-based NDE imaging systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(12): 3806-3815.
- [7] CASE J T, GHASR M T, ZOUGHI R. Optimum 2-D non-uniform spatial sampling for microwave SAR-based NDE imaging systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(11): 3072-3083.
- [8] WU S X, DING L, LI P, et al. Millimeter-wave SAR sparse imaging with 2-D spatially pseudorandom spiral-sampling pattern[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2020, 68(11): 4672-4683.
- [9] LI Z, WANG J, WU J J, et al. A fast radial scanned near-field 3-D SAR imaging system and the reconstruction method[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(3): 1355-1363.
- [10] ÁLVAREZ-NARCIANDI G, LAVIADA J, LAS-HERAS F. Freehand mm-wave imaging with a compact MIMO radar[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(2): 1224-1229.
- [11] ÁLVAREZ-NARCIANDI G, LAVIADA J, ÁLVAREZ-LÓPEZ Y, et al. Freehand system for antenna diagnosis based on amplitude-only data[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(8): 4988-4998.
- [12] SOUMEKH M. Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms[M]. New York: Wiley, 1999.
- [13] FORTUNY-GUASCH J, LOPEZ-SANCHEZ J M. Extension of the 3-D range migration algorithm to cylindrical and spherical scanning geometries[J]. IEEE Transactions

- on Antennas and Propagation, 2001, 49(10): 1434-1444.
- [14] 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.
- [15] CHEN X, WANG H Q, YANG Q, et al. An efficient mmW frequency-domain imaging algorithm for near-field scanning 1-D SIMO/MIMO array[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.
- [16] ZHOU L, SU Y. GPR imaging with RM algorithm in layered mediums[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2011, 8(5): 934-938.
- [17] JOHANSSON E M, MAST J E. Three-dimensional ground-penetrating radar imaging using synthetic aperture time-domain focusing[C]//1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. San Diego: SPIE, 1994. DOI: 10.1117/12.186717.
- [18] ULLMANN I, ADAMETZ J, OPPELT D, et al. Non-destructive testing of arbitrarily shaped refractive objects with millimetre-wave synthetic aperture radar imaging[J]. Journal of Sensors and Sensor Systems, 2018, 7(1): 309-317.
- [19] ZHOU L, HUANG C L, SU Y. A fast back-projection algorithm based on cross correlation for GPR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2012, 9(2): 228-232.
- [20] QU L L, YIN Y Q, SUN Y P, et al. Efficient back projection imaging approach for airborne GPR using NUFFT technique[C]//2016 16th International Conference of Ground Penetrating Radar (GPR). Hong Kong: IEEE, 2016: 1-4.
- [21] CUI T J, CHEW W C. Diffraction tomographic algorithm for the detection of three-dimensional objects buried in a lossy half-space[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2002, 50(1): 42-49.
- [22] GONZÁLEZ-DÍAZ M, GARCÍA-FERNÁNDEZ M, ÁLVAREZ-LÓPEZ Y, et al. Improvement of GPR SAR-based techniques for accurate detection and imaging of buried objects[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3126-3138.
- [23] 邓桂林, 马昭阳, 曾旻, 等. 阵列雷达的分层介质目标频域匹配滤波成像算法[J]. 信号处理, 2022, 38(11): 2400-2411. DENG G L, MA Z Y, ZENG Y, et al. Frequency-domain matched filter imaging algorithm for layered medium targets with array radar system[J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(11): 2400-2411. (in Chinese)
- [24] 马昭阳, 邓桂林, 曾旻, 等. 毫米波非均匀平面阵列无损检测三维成像算法[J]. 国防科技大学学报, 2022, 44(1):

8-13.

- MA Z Y, DENG G L, ZENG Y, et al. Millimeter wave three-dimensional imaging algorithm of nonuniform planar array for nondestructive testing[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2022, 44(1): 8-13. (in Chinese)
- [25] FALLAHPOUR M, CASE J T, GHASR M T, et al. Piecewise and Wiener filter-based SAR techniques for monostatic microwave imaging of layered structures[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(1): 282-294.
- [26] 孟祥新, 柳桃荣, 笮敏, 等. 一种高精度的毫米波稀疏平面阵列频域类成像算法[J]. 电子学报, 2020, 48(8): 1479-1485. MENG X X, LIU T R, DA M, et al. A high-precision frequency-domain imaging algorithm of millimeter-wave sparse planar array[J]. Acta Electronica Sinica, 2020, 48(8): 1479-1485. (in Chinese)

#### 作者简介



**邓桂林** 男, 1993年生, 四川达州人. 国防科技大学电子科学学院硕士研究生. 中国人民解放军78156部队助理工程师. 主要研究方向为雷达信号处理、阵列雷达成像等. 中国电子学会会员编号: E190084666M.  
E-mail: dgl528719@163.com



**邓彬** 男, 1980年生, 山东邹城人. 博士. 国防科技大学电子科学学院副研究员. 主要研究方向为合成孔径雷达、地面动目标指示和太赫兹雷达等. 中国电子学会会员编号: E190070834M.  
E-mail: dengbin@nudt.edu.cn



**陈旭** 男, 1995年生, 吉林省人. 2020年获得中国沈阳东北大学硕士学位. 现为国防科技大学博士研究生. 研究方向为毫米波雷达成像、雷达波形设计和信号处理.  
E-mail: xuchen95909@126.com



**曾旻** 男, 1989年生, 湖南长沙人. 博士. 国防科技大学电子科学学院副教授. 主要研究方向为太赫兹时域光谱测量、太赫兹雷达传感等. 中国电子学会会员编号: E190086916M.  
E-mail: zengyang@nudt.edu.cn