

doi: 10.7690/bgzdh.2024.08.008

## 多视角观测的 ISAR 融合成像技术综述

焦丽婷<sup>1</sup>, 胡文华<sup>1</sup>, 刘利民<sup>1</sup>, 郭宝锋<sup>1</sup>, 朱晓秀<sup>2</sup>

(1. 陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系, 石家庄 050003; 2. 中国人民解放军 32398 部队, 北京 100192)

**摘要:** 针对基于稀疏表示的多雷达信号互相干处理和相关领域的研究现状, 利用多部逆合成孔径雷达 (inverse synthetic aperture radar, ISAR) 对目标进行探测以提高成像效率的方法。阐明多雷达成像存在的线性误差和夹角估计误差, 提出基于信号稀疏表示的多雷达信号互相干处理方法; 利用幅度和相位补偿参数的稀疏特性, 通过信号稀疏重构方法来估计补偿参数, 并对下一步研究方向进行展望。结果表明, 该方法能够提高稀疏条件下 ISAR 多雷达的实用能力。

**关键词:** 逆合成孔径雷达; 融合成像; 多雷达; 互相干处理

**中图分类号:** TN95 **文献标志码:** A

## Review of ISAR Fusion Imaging Technology Based on Multi-view Observation

Jiao Liting<sup>1</sup>, Hu Wenhua<sup>1</sup>, Liu Limin<sup>1</sup>, Guo Baofeng<sup>1</sup>, Zhu Xiaoxiu<sup>2</sup>

(1. Department of Electronic and Optical Engineering, Shijiazhuang Campus, Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China; 2. No. 32398 Unit of PLA, Beijing 100192, China)

**Abstract:** According to the research status of multi-radar signal processing based on sparse representation and related fields, the method of using multi-ISAR to detect the target to improve the imaging efficiency is proposed. The linear error and angle estimation error in multi-radar imaging are clarified, and a multi-radar signal interference processing method based on signal sparse representation is proposed. By using the sparse characteristics of amplitude and phase compensation parameters, the compensation parameters are estimated by signal sparse reconstruction method, and the future research directions are prospected. The results show that it can improve the practical ability of ISAR multi-radar under sparse conditions.

**Keywords:** ISAR; fusion imaging; multi-radar; mutual interference processing

### 0 引言

逆合成孔径雷达 (ISAR)<sup>[1-2]</sup>作为一种通过利用成像技术对观测得到的运动目标回波数据进行处理, 得到目标的高分辨率图像的主动探测设备, 具有全天候、全天时、作用距离远和分辨率高等特点, 在军用和民用领域均应用广泛<sup>[3-9]</sup>。传统的 ISAR 单站雷达观测目标, 在对目标进行目标特性增强处理时, 会因为模型误差使得分辨率提高的幅度有限, 同时也造成信息资源的浪费。随着信息处理技术和雷达系统的发展, 多雷达数据融合成像技术已经成为提高 ISAR 成像分辨率的一种重要手段。通过放置在不同位置的多部雷达对目标进行观测, 利用信号处理技术实现多雷达数据融合, 可等效增大发射信号带宽和观测累积转角, 进而提高成像的 2 维分辨率<sup>[10-14]</sup>。但利用多部雷达的观测信号对目标特性进行增强处理时, 各雷达观测条件差异会造成信号之间的不相关性; 因此, 需要通过互相干处理进行

幅度和相位的补偿, 以得到相干和匹配一致的信号<sup>[15]</sup>。信号相干和匹配的程度以及最终的成像质量是由互相干处理的精度直接决定的; 因此, 互相干处理是 ISAR 融合成像中的关键技术。

多雷达信号之间的不相关性分为依赖距离和依赖角度 2 方面。距离不相关性主要由测距误差、参考点不一致导致; 角度不相关性主要由夹角估计误差和转角估计误差导致。

在高频段, ISAR 目标散射可等效为由多个散射中心的散射合成; 因此, 散射中心坐标和散射强度是十分重要的雷达目标特征信息特性参数, 由于相干积累角度和信号带宽的限制, 传统 RD 成像方法难以分辨邻近的多散射中心, 所获图像清晰度低。ISAR 多雷达数据融合成像技术通过多频带融合来增大发射信号带宽, 通过多视角融合来增大观测累积转角, 从而在不增加雷达系统复杂度和观测时间的情况下, 获得超出任意雷达方位分辨率的高分辨

收稿日期: 2024-04-16; 修回日期: 2024-05-25

基金项目: 河北省自然科学基金面上项目 (F2019506031)、(F2020506036); 陆军工程大学基础前沿科技创新项目 (KYSZJQZL2020)

第一作者: 焦丽婷 (1995—), 女, 山东人, 硕士。

图像。

此外,由于对目标进行多视角观测、外界复杂的电磁环境干扰以及雷达系统自身的原因,也可能导致回波数据缺失的现象<sup>[16]</sup>。在短 CPI 或稀疏孔径情况下,传统的成像算法中成像分辨率受“瑞利限”的约束,难以获得高精度聚焦的图像;所以,利用少量的有效数据进行成像以提高稀疏孔径条件下的成像质量问题已成为研究热点。

## 1 多雷达信号互相干处理方法研究现状

多部雷达观测目标时,由于放置在不同的空间位置,雷达与目标之间的距离差不同,而且由于硬件差异,工作在不同频带的雷达之间可能存在系统时间同步误差和系统初相差,这些因素导致多雷达回波数据之间的幅度和相位都可能存在差异<sup>[17]</sup>。由于多雷达数据融合成像是基于相参处理的融合方式,故在进行融合成像前必须进行多雷达信号互相干处理,以保证各雷达数据的相干性。多雷达信号之间的幅度差异通常由系统增益差异引起的常数乘积因子决定,可利用归一化等方式处理,且幅度差异对最终成像质量的影响较小。相比于幅度差异,多雷达信号之间的相位差异是影响后续融合成像质量的主要因素;因此,多雷达信号互相干处理的关键在于研究非相干相位的估计与补偿方法。

多雷达回波信号间的非相干相位通常可看作由一个线性相位项和一个固定相位项组成,现有的多雷达信号互相干处理方法大致可分为 3 类:

1) 基于重叠频带的互相干处理方法<sup>[18-20]</sup>,利用多雷达信号间的重叠频带部分,通过最小均方误差准则<sup>[21]</sup>或距离像相关<sup>[17]</sup>等方法估计非相干相位。该类方法虽然原理简单,易于实现,但实际情况下,多雷达信号的频带并不重叠或重叠部分数据量很少,需要先利用频谱外推等方法将各雷达信号进行外推后得到重叠频带数据,而频谱外推效果易受噪声和外推长度的影响,当子频带之间缺失频段较大或回波中噪声较大时,频谱外推的精度不高,导致非相干相位估计误差较大,限制了算法的应用范围。

2) 基于全极点模型的互相干处理方法<sup>[22-24]</sup>,将各雷达信号表示为全极点模型,然后利用谱估计方法或矩阵束方法估计模型参数,进而得到非相干相位估计值。该类方法没有重叠频带数据的限制,建立模型简单,应用较为广泛,但需要对各雷达信号分别进行建模,对模型的依赖性较大,容易引入模型误差,且对模型阶数和极点的估计精度要求较高,

估计结果易受噪声水平的影响。

3) 基于稀疏表示的互相干处理方法<sup>[22-23]</sup>,利用多雷达信号间非相干相位的唯一性,将多雷达信号互相干处理问题进行信号表示,采用稀疏重构方法实现求解,得到非相干相位的估计值。与基于全极点模型的方法相比,基于稀疏表示的方法不需要估计模型阶数,且在重构精度和抗噪性能方面具有优势。在估计非相干相位时,文献[22]和文献[23]分别利用 BP 算法或 SBL 算法实现稀疏重构,重构精度高且稳定性好,但算法的运算量较大。此外,在构造相干处理字典进行稀疏表示时,网格划分可能引起网格失配问题,导致非相干线性相位的真实值与估计值有偏差;因此,利用稀疏表示理论实现多雷达信号互相干处理时,需要在提高算法运算效率的同时减轻网格失配影响。

美国 Lincoln 实验室的 Cuomo 等<sup>[25]</sup>认为不同子频带回波之间相差一个非相干线性相位项和一个非相干固定相位项,为估计非相干相位,首先通过子频带频谱外推得到重叠频带,然后构造与非相干相位有关的代价函数,利用最小均方误差准则求解非线性优化问题,进而得到线性相位项和固定相位项的估计值。该方法不仅在频谱外推过程中容易引入误差,而且在求解优化问题时容易陷入局部最小值,使得非相干相位的估计精度受到影响。Vann 等<sup>[26]</sup>在 Cuomo 的研究基础上,进一步详细分析了多种成像场景下存在非相干相位的原因及补偿方法,并将研究成果写入了科技报告中。借鉴空间谱估计技术,王成<sup>[27]</sup>建立了多雷达信号幅相误差估计的数学模型,提出了基于快速求根多重信号分类(root multiple signal classification, root-MUSIC)算法和基于最小二乘旋转不变估计信号参数(estimation of signal parameter via rotational invariance techniques-least square, ESPRIT-LS)算法的幅相误差补偿参数估计方法,能够较好地完成相干补偿。这 2 种算法仍利用了多雷达信号之间的重叠频带数据,若多雷达信号之间的工作频带不重叠,则需提前进行频谱外推得到重叠频带,容易引入外推误差,限制了算法的应用范围<sup>[28-30]</sup>。为避免重叠频带的条件限制,减少数据外推带来的误差,又提出了基于最小熵准则的相干补偿方法,利用 2 维优化搜索来求解非相干相位。为消除对各雷达观测数据分别建模过程中引入的建模误差,同时避免重叠频带的条件限制,文献[31]提出了一种基于数据相关的相干配准算法,先

利用 1 维距离像相关法求解非相干线性相位项，再通过定义相干函数进行全局搜索求解非相干固定相位项，提高了非相干相位的估计精度。为降低算法对噪声的敏感度，文献[32]利用信号的相参积累效应，在 1 维距离像相关法中结合最小熵准则估计非相干线性相位项，利用非线性最小二乘拟合算法求解相干函数估计非相干固定相位项，进一步提高了非相干相位估计的精度和鲁棒性。

与基于重叠频带和 1 维距离像相关的非相干相位估计方法不同，传统的多雷达信号互相干处理方法大多基于全极点模型，利用各子频带的极点信息差异估计非相干相位。文献[17]将子频带回波建立为全极点模型，通过利用改进的 root-MUSIC 算法和最小二乘方法分别估计模型极点和散射中心幅度，非相干线性相位项和固定相位项可分别由各子频带极点和散射中心幅度之间的相位差异求得。在 SNR 为 20 dB 时，图 1 分别给出了相干处理前后各频带信号的 1 维距离像，从结果中可以看出，在准确估计极点的基础上利用该方法能够较好地实现非相干相位的估计与补偿。然而，在低 SNR 条件下，利用改进的 root-MUSIC 算法对极点的估计精度容易受噪声的影响，甚至导致各子频带的极点无法一一对一匹配，进而影响非相干相位的估计精度。

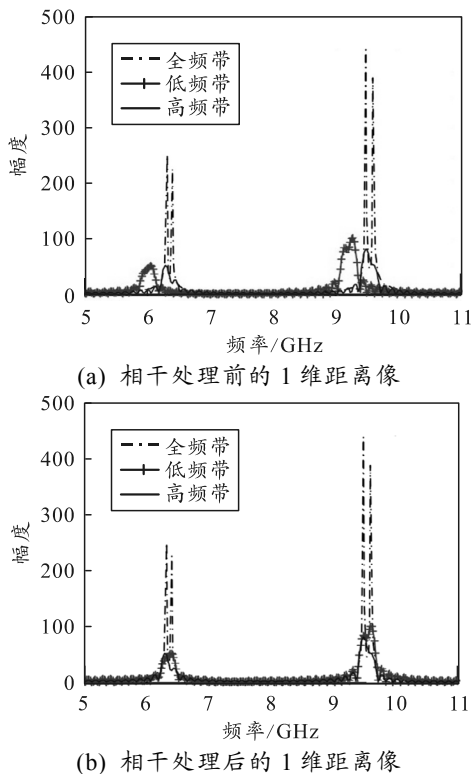


图 1 相干处理前后的 1 维距离像<sup>[17]</sup>

在低 SNR 条件下，由于矩阵束算法比 root-

MUSIC 算法具有更好的抗噪性能，文献[23]采用矩阵束算法估计全极点模型中的参数，提高了估计精度的稳健性。文献[33]提出了一种基于有效特显极点和同一旋转中心的互相干处理方法，采用酉 ESPRIT 算法估计各子频带信号的极点，在提高参数估计精度的同时具有更好的抗噪性能，为减小噪声的影响，从估计出的极点中提取有效特显点估计非相干线性相位并补偿，再对各子频带信号基于同一旋转中心进行相位自聚焦处理，实现非相干固定相位的补偿，得到相干信号。图 2 给出了采用该方法实现非相干线性相位估计的均方根误差 (root mean square error, RMSE) 随 SNR 变化曲线。可以看出：与 1 维距离像相关法和利用所有极点信息的传统全极点模型方法相比，采用酉 ESPRIT 算法估计极点并提取有效特显极点信息估计非相干线性相位的方法具有更强的鲁棒性。

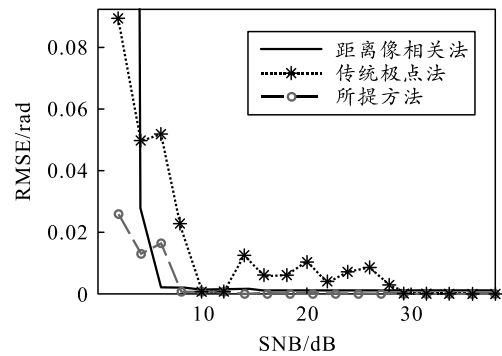


图 2 线性相位估计的 RMSE 随 SNR 变化曲线

基于全极点模型的互相干处理方法关键在于准确估计模型极点，而且各子频带的模型极点需要与目标散射中心一对一匹配。然而，当复杂目标的散射中心个数较多时或在低 SNR 条件下，准确估计散射中心个数十分困难；此时，若仍采用基于全极点模型的多雷达信号互相干处理方法则可能存在较大误差。由于多雷达信号互相干处理时的幅相补偿参数是唯一的，满足稀疏性要求，故可利用稀疏表示理论实现非相干相位的估计与补偿。基于稀疏表示的互相干处理方法无需频带外推得到重叠频带信号，也不需要估计散射中心个数，就能够得到更高精度的参数估计，且在低 SNR 条件下算法性能更加稳健。文献[22]通过建立互相干处理字典，将多频带信号互相干处理问题进行稀疏表示，利用基追踪 (basic pursuit, BP) 算法实现稀疏重构，得到非相干相位估计值，可通过细化字典的离散化程度来进一步提高相位估计精度。为减小网格失配带来的影响，文献[23]提出了一种基于局部网格细分

的稀疏贝叶斯学习 (local grid subdivision sparse Bayesian learning, LGS\_SBL) 算法, 用于求解非相干相位。图 3 分别给出了利用文献[25]所提经典互相干处理算法、文献[34]所提矩阵束算法和文献[35]所提 LGS\_SBL 算法进行相位校正后的子频带信号和原始子频带信号的 1 维距离像结果。从图 3 中可以看出, 3 种算法都能基本实现非相干相位补偿, 但利用 LGS\_SBL 算法对非相干相位的估计更准确, 进行相位校正后的子频带 2 的 1 维距离像与子频带 1 基本完全吻合, 且散射点的幅度均与设定值保持一致, 体现了利用稀疏表示方法实现多雷达信号互相干处理的优越性。

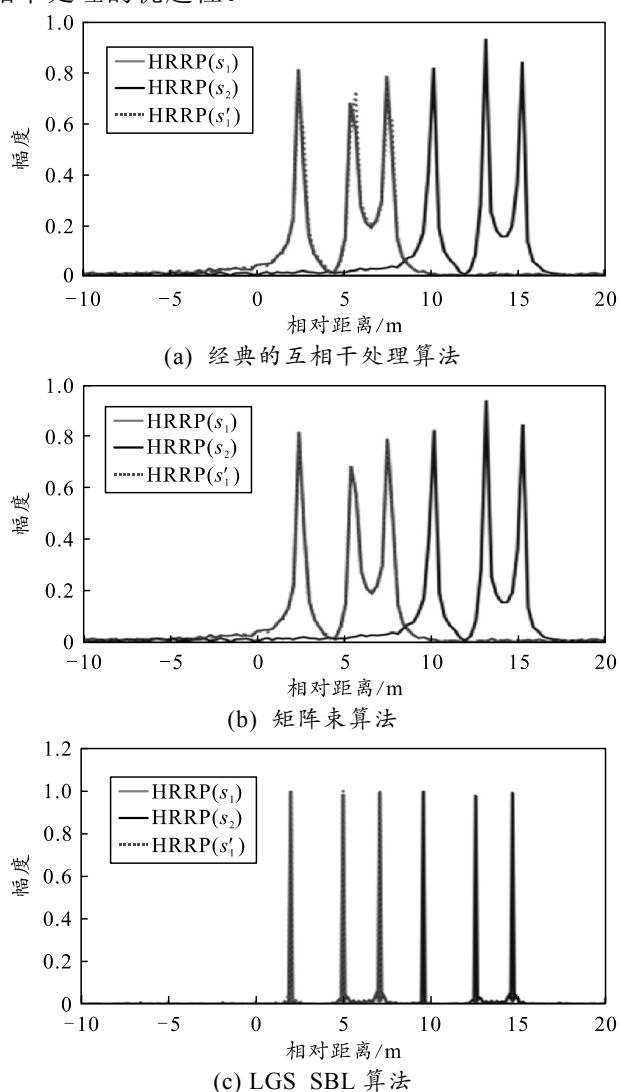


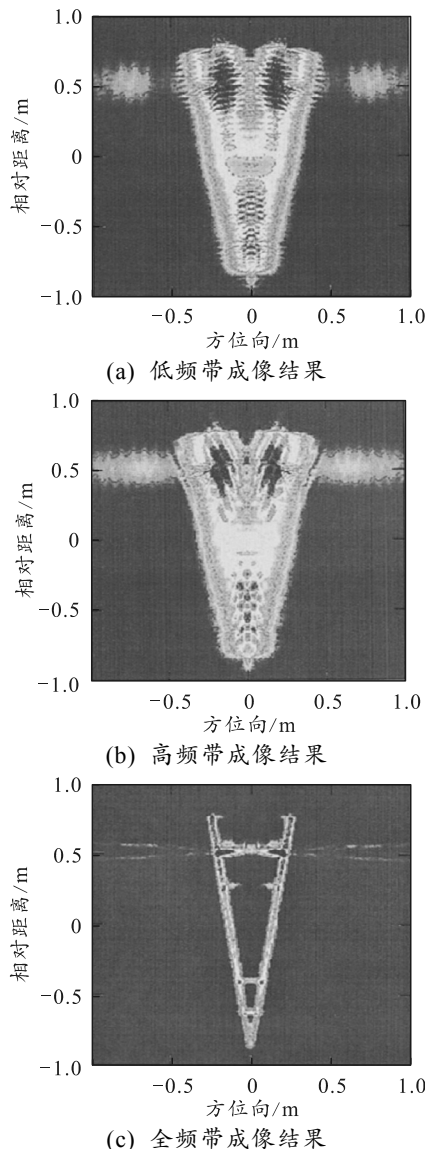
图 3 相位校正后的子频带信号、原始子频带信号的 1 维距离像<sup>[35]</sup>

## 2 同视角多频带 ISAR 融合成像方法研究现状

提高 ISAR 成像距离分辨率最直接的方法是雷达发射大带宽信号, 但这不仅需要投入高昂的制造

成本, 而且对雷达系统的硬件设计复杂度和硬件制造工艺都提出了很高要求。同视角多频带 ISAR 融合成像技术利用邻近配置的多部工作在不同频带的雷达对目标同时观测, 忽略雷达回波视角间的差异, 通过信号处理方法将各雷达接收的观测回波数据融合成一个带宽的回波信号, 有效避免了研制超大带宽雷达系统面临的高昂成本和设计难题, 成为了提高雷达距离分辨率的一种有效途径。

美国的 Lincoln 实验室最早开始研究多频带融合成像技术, 文献[24]提出利用多个稀疏子带观测回波进行融合成像的方法。图 4 给出了利用带宽均为 1 GHz 的 2 个子频带回波融合得到带宽为 6 GHz 的数据成像结果, 体现了利用多频带融合成像方法提高成像分辨率的可行性。文献[36]介绍了多频带融合成像技术在弹道导弹防御系统中进行真假弹头辨识的应用。



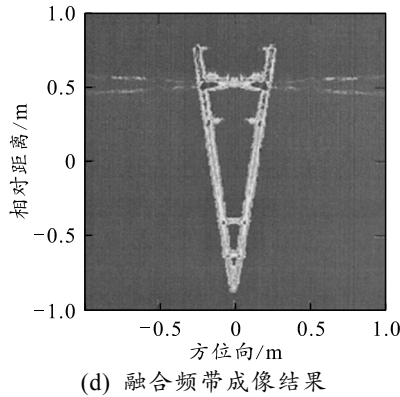


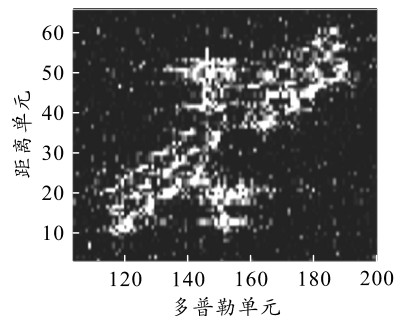
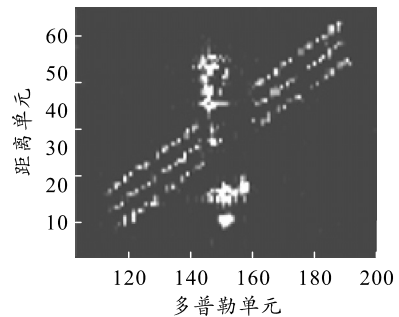
图 4 Lincoln 实验室多频带融合成像暗室实验结果<sup>[24]</sup>

除了 Lincoln 实验室，国外雷达成像领域的其他学者也对同视角多频带雷达数据融合成像技术展开了研究。同视角多频带雷达数据融合成像可视为利用少量的子频带观测数据重构得到全频带数据，从而提高距离分辨率。Högbom 等<sup>[37]</sup>利用 CLEAN 算法成功恢复出全带宽信号中的缺失频带数据，但该算法的估计精度不够高。Dorp 等<sup>[38]</sup>在实现同视角多频带 ISAR 融合成像时，选择利用自回归 (autoregressive, AR) 模型对观测频带数据进行内插和外推，得到全频带数据，通过先方位压缩再距离压缩的成像流程，减小了频带融合误差对成像质量的影响。由于参数化谱估计算法中重构精度对模型误差较为敏感，一些非参数化谱估计算法也用于全频带信号重构中。Larsson 等<sup>[21]</sup>利用缺失数据幅度相位估计 (gapped-data amplitude and phase estimation, GAPES) 算法，通过内插得到了一定条件限制下的缺失数据。Stoica 等<sup>[39]</sup>提出了一种基于加权最小二乘的迭代自适应 (iterative adaptive approach, IAA) 方法，可在均匀或非均匀采样条件下实现缺失数据重构。

与国外同视角多频带 ISAR 融合成像技术研究相比，国内的相关研究起步较晚。王成等<sup>[27]</sup>利用非平稳时间序列方法进行回波数据建模，通过外推得到频带展宽的信号，但当频带间隔相差较大时，数据外推引入的误差较大，将会影响成像质量。为避免带宽外推，马俊涛等<sup>[40]</sup>利用块稀疏迭代协方差估计方法实现了稀疏频带融合成像。田彪等<sup>[41]</sup>在进行子频带相干补偿后，利用 GAPES 算法对缺失频带数据进行填补，得到了全频带数据。Bai 等<sup>[42]</sup>利用 GAPES 算法实现了空间高速目标稀疏频带融合成像。为充分挖掘复数观测数据信息，熊娣等<sup>[43]</sup>提出利用观测数据及其共轭数据的酉 ESPRIT 方法实现多频带 ISAR 融合成像。然而，利用谱估计类方法

补全缺失频谱数据实现融合成像时，对参数估计精度的要求较高，且估计精度易受噪声水平和数据缺失比的影响，限制了算法的应用。

随着稀疏信号处理技术的发展，稀疏表示理论和压缩感知 (compressive Sensing, CS) 理论也被应用到同视角多频带 ISAR 融合成像中。杜小勇等<sup>[44]</sup>将回波建立为稀疏表示模型，利用稀疏成分分析方法实现了 1 维距离像多频段融合成像。叶钊等<sup>[34]</sup>将稀疏贝叶斯学习 (sparse Bayesian learning, SBL) 方法用于多频带信号融合，避免了估计模型阶数，但稀疏重构算法的计算量较大。Zhang 等<sup>[45]</sup>基于信号稀疏表示模型，通过构造多级动态字典作为稀疏基矩阵，利用快速 SBL 算法实现了多频带数据融合成像，进一步提高了重构精度和运算效率。Hu 等<sup>[28]</sup>首先利用 AR 模型对稀疏频带观测数据进行内插，提高观测数据量，然后利用平滑 L0 范数 (smoothed L0, SL0) 算法求解多频带融合成像的稀疏表示问题。邹永强<sup>[29]</sup>利用 LGS\_SBL 算法实现多频带信号融合成像，参数估计精度明显优于 SL0 算法，获得了较好的融合成像效果。为提高先验模型灵活性，zhou 等<sup>[30]</sup>利用分层 Gamma-Gaussian 先验构建概率模型，通过贝叶斯推理实现稀疏频带融合成像，对复杂目标和低 SNR 条件下融合成像都有较好的稳健性。图 5 给出了在 0 条件下复杂目标电磁仿真数据的子频带 RD 成像结果以及稀疏频带融合成像结果，从融合成像结果中可得到更精细的目标结构信息，体现了融合成像算法的有效性。



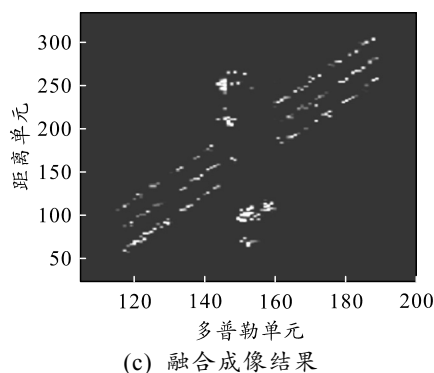


图 5 复杂目标稀疏频带融合成像结果

### 3 多视角 ISAR 融合成像方法研究现状

对于传统的单基地 ISAR 成像系统而言, 通过提高发射信号带宽和增大观测时间可分别提高成像的距离分辨率和方位分辨率, 但同时会带来雷达系统硬件复杂度高、制造成本大、运动补偿困难等问题, 导致成像分辨率的提升量有限。多视角 ISAR 融合成像技术利用多部雷达从不同角度观测目标, 通过对观测回波进行融合处理, 等效得到一个更大带宽和更大视角的回波。该方法打破了单基地雷达成像分辨率的约束, 可同时提高 ISAR 成像的 2 维分辨率。

文献[27]提出了一种 2 维联合超分辨成像算法, 利用 2 维 ESPRIT 算法估计目标散射中心参数, 实现多视角 ISAR 数据融合成像, 同时改善 2 维分辨率。然而, 利用谱估计类方法估计目标散射中心参数时, 容易出现散射点个数估计不准确问题以及散射中心参数失配问题。文献[32]建立了基于全极点模型的多雷达 2 维融合成像模型, 利用扩展矩阵增强矩阵束算法估计模型极点, 无需设置人工阈值, 提高了极点配对精度和参数估计稳健性, 但该方法仍属于谱估计类方法, 需要准确估计散射点个数, 在实际情况下较难实现。

文献[46]将多视角 ISAR 数据融合成像问题转化为一个信号稀疏表示问题, 利用 BP 算法实现稀疏重构, 该算法参数估计精度优于谱估计算法, 且无需预估散射点个数, 但有时会因产生结构误差导致结果无法收敛到真实的稀疏解。在宽带小角度下可以观测到, 散射点的散射系数是随频率变化而变化的。为更准确地反映目标的散射特性, 文献[18]利用几何绕射理论 (geometrical theory of diffraction, GTD) 模型建立雷达回波信号模型并进行信号表示, 采用正则化方法估计目标散射中心的参数, 但正则化的参数设置对重构精度影响较大,

有时需人工调整参数。文献[19]提出了基于 SBL 算法的多视角多频带 ISAR 融合成像方法, 与 BP 算法和正则化算法相比, SBL 算法不存在结构误差且不需要人工调整参数, 能更真实地反映目标散射特性。为提高低 SNR 条件下的稀疏信号重构效果, Xu 等<sup>[12]</sup>提出了一种基于方差成分扩张压缩 (expansion-compression variance component, ExCoV) 算法的多视角多频带 ISAR 数据融合高分辨成像方法, 在建模时将信号分为重要信号集合和次要信号集合, 并通过不同的方差参数体现信号的重要程度, 重构时不需要事先估计噪声水平, 提高了抗噪性能。针对在轨运动空间目标的多站 ISAR 融合成像问题, 马俊涛等<sup>[47]</sup>在进行优化布站和融合成像时利用了空间目标的轨道信息, 进一步增强了实际应用性。

信号稀疏表示理论关心的是如何从观测信号中获得信号最稀疏的表示, 作为信号稀疏表示理论的延伸, 压缩感知 (compressed sensing, CS) 理论更关注于如何设计观测矩阵才能从较少的观测数据中准确重构出真实信号。在信号获取中, 为满足 Nyquist 采样定律, 信号采样频率至少大于信号带宽的 2 倍来避免信息丢失, 而 CS 突破了 Nyquist 采样定理的瓶颈, 使得高分辨率信号的采集成为了可能。该理论表明, 只要信号是可压缩的或在某个变换域是稀疏的, 就可以用较低的频率采样该信号, 用少量的采样信号选择合适的信号重构方法高精度重构出原信号, 不但能有效地减少数据处理量, 降低采样率, 而且提高了分辨率。由于 ISAR 回波信号的稀疏性, 故可以将 CS 理论应用到 ISAR 成像当中。在稀疏孔径条件下, 研究基于 CS 理论的多视角观测 ISAR 高分辨成像方法, 可以提高成像质量。

### 4 多雷达多视角 ISAR 成像技术的展望

基于稀疏表示的多雷达信号互相干处理方法, 通过分析多雷达回波信号间的非相干相位, 构造相干处理字典, 建立多雷达信号互相干处理的信号表示模型, 考虑到基于稀疏表示方法中容易出现网格失配现象, 可通过细化网格划分尺寸改进相干处理字典, 以减轻网格失配影响, 进一步提高非相干相位估计精度。采用简单快速的 OMP 及其改进算法进行稀疏重构, 得到非相干相位的估计值并进行补偿, 提高互相干处理方法的运算效率。与现有的互相干处理方法相比, 所提方法拥有更优的非相干相位估计精度和抗噪性能, 能够有效完成多雷达信号间的相干匹配, 为后续进行多雷达数据融合

成像创造了条件。

欲将多雷达融合技术应用在提升非合作目标成像质量上, 仍存在以下问题:

1) 现有回波数据不能真实反映多雷达之间的回波特性。多雷达对目标观测时, 不同雷达脉冲的发射时间、初始相位等存在差异, 使得多雷达 ISAR 融合成像的回波模拟过程不同于单/双基地 ISAR, 目前公开的仿真数据大多通过对单部雷达的完整回波分段截取后得到, 未体现出多雷达之间的观测时间、初始相位等差异信息, 也难以全面验证所采用成像算法的实际成像效果。

2) 多雷达信号相干化处理不精确, 对低信噪比回波环境的适应性差。实现多雷达数据融合的前提是进行多雷达信号相干配准, 由于单雷达信息处理的非一致性, 使得各个雷达信号之间是非相干的, 非相干会带来后续方位脉冲压缩时相参积累性能减弱。传统的方法是将目标回波频率响应信号建模为全极点模型, 利用现代谱估计算法估计模型中的极点, 然后再利用最小二乘法估计参数得到各极点对应的复幅度值, 进而得到线性相位误差和固定相位误差估计值, 但该类方法对模型阶数的估计精度要求较高, 且在低信噪比条件下性能不佳。

3) 多雷达融合成像算法未考虑空间目标成像平面变化, 算法应用范畴受限。利用放置在不同位置的雷达站观测目标时存在一定的视角差异, 充分利用该视角差可提高成像分辨率, 但多雷达对空间目标观测过程中, 成像平面是实时变化的, 该变化导致成像融合时不但考虑多雷达观测的视角差, 还需要考虑成像平面的差异。现有的融合成像方法主要分为基于谱估计方法和基于稀疏表示方法 2 大类。基于谱估计的融合成像方法在高信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 条件下虽能较好地实现多雷达数据融合, 但需要准确估计目标散射中心的个数, 且估计精度易受噪声水平的影响; 基于稀疏表示的融合成像方法无需估计目标散射中心个数, 具有较好的抗噪性和稳健性, 但目前常用的 SBL 稀疏类算法容易破坏复数信号中实部与虚部之间相同的支撑集和相关性, 影响重构精度, 在成像平面空变时, 其构建的稀疏基也不再适用。

## 5 结束语

近年来, 逆合成孔径雷达在军事民用领域发挥着越来越重要的作用, 但对于稀疏孔径信号、回波的缺失导致脉冲之间的相干性遭到破坏, 使运动补

偿和成像算法面临新的挑战。笔者在简要介绍多雷达融合成像发展现状的基础上提出基于稀疏表示的多雷达互相干处理方法, 并以 CS 理论恢复稀疏数据, 利用 OMP 及其改进算法提高重构精度, 提高稀疏条件下 ISAR 多雷达的实用能力。可以预见, 基于多视角观测的 ISAR 融合成像技术是提高 2 维分辨率的重要方法。

## 参考文献:

- [1] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 230-231.
- [2] 李少东, 杨军, 陈文峰, 等. 基于压缩感知理论的雷达成像技术与应用进展研究[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(2): 495-504.
- [3] SHAO S, ZHANG L, LIU H W. High-resolution ISAR imaging and motion compensation with 2-D joint sparse reconstruction[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(10): 6791-6811.
- [4] ZHANG S H, LIU Y X, LI X, et al. Bayesian high resolution range profile reconstruction of high-speed moving target from under-sampled data[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 5110-5120.
- [5] JI B, ZHAO B, WANG Y, et al. Novel sparse apertures ISAR imaging algorithm via the TLS-ESPRIT technique[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2020, 14(6): 852-859.
- [6] SHAO S, ZHANG L, LIU H W, et al. Joint sparse aperture ISAR autofocusing and scaling via modified newton method-based variational Bayesian inference[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(7): 4857-4869.
- [7] ZHANG S H, LIU Y X, LI X. Fast sparse aperture ISAR autofocusing and imaging via ADMM based sparse Bayesian learning[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2020, 29: 3213-3226.
- [8] WEI S P, ZHANG L, MA H, et al. Sparse frequency waveform optimization for high-resolution ISAR imaging[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(1): 546-566.
- [9] 田彪, 刘洋, 呼鹏江, 等. 宽带逆合成孔径雷达高分辨成像技术综述[J]. 雷达学报, 2020, 9(5): 765-802.
- [10] YI L, DING D Z, CHEN R S, et al. Multi-radar fusion technique for high-resolution ISAR imaging in sea-cluttered environment[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(20): 6898-6901.
- [11] LIU C, TAO S F, DING D Z, et al. Multi-radar target parameter estimation and fusion based on attribute scattering centremodel[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(20): 6894-6897.
- [12] XU J, SONG D W, DING D Z, et al. High resolution 2d-imaging based on data fusion technique[C]//IEEE International Conference on Computational Electromagnetics. Chengdu, China, 2018: 1-3.



- [13] 黄琛, 宁超, 肖志河. 一种新的多波段雷达相参处理方法[J]. 微波学报, 2012(s3): 64-67.
- [14] XU X, LI J. Ultrawide-band Radar Imagery from Multiple Incoherent Frequency Subband Measurements[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(3): 398-404.
- [15] 叶钊. 基于信号稀疏表示的 ISAR 目标特性增强技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [16] 邢孟道, 保铮, 李真芳, 等. 雷达成像算法进展[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [17] 田彪, 刘洋, 徐世友, 等. 基于几何绕射理论模型高精度参数估计的多频带合成成像[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1532-1539.
- [18] 叶钊, 何峰, 张永胜, 等. 基于 GTD 模型的多雷达信号二维融合[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(1): 55-59.
- [19] 何邦显. 基于快速稀疏贝叶斯学习算法的雷达数据融合技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [20] 叶钊, 何峰, 朱炬波, 等. 基于稀疏表示的多雷达信号二维融合处理[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 515-521.
- [21] LARSSON E, LI J. Spectral analysis of periodically gapped data[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 1089-1097.
- [22] 叶钊. 基于信号稀疏表示的 ISAR 目标特性增强技术[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
- [23] 邹永强. 空间目标多波段 ISAR 融合成像关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [24] CUOMO K M, PION J E, MAYHAN J T. Ultrawide-band coherent processing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(6): 1094-1107.
- [25] CUOMO K M, PION J E, MAYHAN J T. Ultrawide-band coherent processing[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1999, 47(6): 1094-1107.
- [26] VANN L D, CUOMO K M, PIOUS J E, et al. Multisensor fusion processing for enhanced radar imaging[R]. Lincoln Laboratory, Massachusetts Institution Technology, Lexington, MA, Technical report 1056, 2000.
- [27] 王成. 雷达信号层融合成像技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
- [28] HU P J, XU S Y, WU W Z, et al. Sparse subband ISAR imaging based on autoregressive model and smooth l0 algorithm[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(22): 9315-9323.
- [29] 邹永强. 空间目标多波段 ISAR 融合成像关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
- [30] ZHOU F, BAI X R. High-resolution sparse subband imaging based on Bayesian learning with hierarchical priors[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(8): 4568-4580.
- [31] LIU C L, HE F, GAO X Z. A novel coherent compensation method for multiple radar signal fusion imaging[C]//Asian-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar. Xi'an, China, 2009: 286-289.
- [32] 叶钊, 何峰, 梁向农. 基于 EMEMP 的雷达二维信号融合成像新方法[J]. 电子学报, 2009, 37(12): 2609-2613.
- [33] XIONG D, WANG J L, ZHAO L Z, et al. Sub-band mutual-coherence compensation in multiband fusion ISAR imaging[J]. IET Radar, Sonar and Navigation, 2019, 13(7): 1056-1062.
- [34] 邹永强, 高勋章, 黎湘. 基于矩阵束的多波段雷达信号高精度融合成像算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(5): 1017-1024.
- [35] 叶钊, 何峰, 梁向农, 等. 基于稀疏贝叶斯学习的多频带雷达信号融合[J]. 电波科学学报, 2010, 25(5): 990-994.
- [36] CUOMO K M, PIOUS J E, MAYHAN J T. Ultra-wideband sensor fusion for BMD discrimination[C]// IEEE Radar Conference, Alexandria, USA, 2000: 31-34.
- [37] HÖGBOM J A. Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines[J]. Astronomy and Astrophysics Supplements, 1974, 15: 417-426.
- [38] DORP P V, EBELING R, HUIZING A G. High resolution radar imaging using coherent multiband processing techniques[C]//IEEE Radar Conference. Alexandria, USA: IEEE 2010: 981-986.
- [39] STOICA P, LI J, LING J. Missing Data Recovery Via a Nonparametric Iterative Adaptive Approach[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2009, 16(4): 241-244.
- [40] 马俊涛, 高梅国, 董健. 基于稀疏迭代协方差估计的缺失数据谱分析及时域重建方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(6): 1431-1437.
- [41] 田彪, 刘洋, 徐世友, 等. 基于几何绕射理论模型高精度参数估计的多频带合成成像[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(7): 1532-1539.
- [42] BAI X R, ZHOU F, WANG Q, et al. Sparse subband imaging of space targets in high-speed motion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(7): 4144-4154.
- [43] 熊娣, 王俊岭, 赵莉芝, 等. 基于酉 ESPRIT 的多频带融合 ISAR 成像[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(2): 285-292.
- [44] 杜小勇, 胡卫东, 郁文贤. 基于稀疏成分分析的逆合成孔径雷达成像技术[J]. 电子学报, 2006, 34(3): 491-495.
- [45] ZHANG H H, CHEN R S. Coherent processing and superresolution technique of multi-band radar data based on fast sparse Bayesian learning algorithm[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2014, 62(12): 6217-6227.
- [46] 叶钊, 何峰, 朱炬波, 等. 基于稀疏表示的多雷达信号二维融合处理[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 515-521.
- [47] 马俊涛, 高梅国, 胡文华, 等. 空间目标多站 ISAR 优化布站与融合成像方法[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(12): 2834-2843.