

基于稀疏字典分解的窄带雷达自旋目标干涉三维成像

梁婷¹, 罗迎^{1,2}, 王聃¹, 武勇³

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077; 2. 信息感知技术协同创新中心, 西安, 710077;

3. 陕西省计量科学研究院, 西安, 710065)

摘要 空间微动目标干涉三维成像技术研究中,最关键的是对各散射点进行保相分离。当脉冲重复频率(PRF)不满足奈奎斯特采样定律时,基于图像处理的成像方法无法有效分离目标各散射点。提出了一种基于稀疏字典分解的窄带雷达自旋目标干涉三维成像方法,该方法能够直接从回波数据中分离出各散射点。首先,根据自旋目标回波信号特性构建稀疏字典,利用稀疏分解算法分解回波,得到各散射点子回波,其次通过时频分析并利用其保相性,获得各散射点的微动曲线,并提取出它们在时频平面上经过位置的干涉相位差,最后根据干涉相位差与坐标之间的关系重构散射点坐标,对空间自旋目标进行三维成像。仿真结果表明,在PRF不小于0.25倍奈奎斯特频率时,所提方法均能有效实现自旋目标三维成像。

关键词 窄带雷达;自旋目标;稀疏分解;干涉三维成像

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2019.02.005

中图分类号 TN957 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2019)02-0028-07

Three-Dimensional Interferometric Imaging of Spinning Space Target Based on Sparse Dictionary Decomposition in Low-Resolution Radar

LIANG Ting¹, LUO Ying^{1,2}, WANG Dan¹, WU Yong³

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Collaborative Innovation Center of Information Sensing and Understanding, Xi'an 710077, China;

3. Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an 710065, China)

Abstract: What is the most important is to separate the scatterers and keep their own phases simultaneously in the research of three-dimensional (3D) interferometric imaging for space micro motion target, however, when the pulse repetition frequency (PRF) does not satisfy the needs of the Nyquist Sampling Theorem, the image processing based method can't effectively separate the scatterers. Therefore, a 3D interferometric imaging method based on sparse dictionary decomposition is proposed. The method can be used to separate each of the scatterers from echo data directly. First of all, according to the characteristics of target echo signal, an over-complete sparse dictionary is constructed, and then the echo is decomposed by using sparse decomposition algorithm to get the sub-echoes of each scatterer. Secondly, by means of time-frequency analysis and its performance of phase preservation, the micro motion curves of each scatterer

收稿日期: 2018-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(61571457,61701530);陕西省自然科学基金(2018JM6072);空军工程大学校长基金(XZJY2018041)

作者简介: 梁婷(1996—),女,湖南涟源人,硕士生,主要从事雷达信号处理研究。E-mail: tingliang1124@163.com

引用格式: 梁婷, 罗迎, 王聃, 等. 基于稀疏字典分解的窄带雷达自旋目标干涉三维成像[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2019, 20(2): 28-34. LIANG Ting, LUO Ying, WANG Dan, et al. Three-Dimensional Interferometric Imaging of Spinning Space Target Based on Sparse Dictionary Decomposition in Low-Resolution Radar[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2019, 20(2): 28-34.

rer are obtained, and the interferometric phase differences in the time-frequency plane are extracted. Finally, according to the relationship between interference phase differences and coordinates, the 3D imaging of space spinning target is constructed. The simulation results show that when PRF is greater than 0.25 times of Nyquist frequency, the proposed method can effectively achieve the 3D imaging of space spinning target.

Key words: low-resolution radar; spinning target; sparse dictionary decomposition; 3D interferometric imaging

由于微动特征是目标所具有的独特的运动特征^[1-3],所以通过分析微多普勒效应(micro-Doppler, m-D)对空间目标进行三维重构,对实现空间目标的探测与识别具有重要意义^[4-5]。近年来,学者将干涉式逆合成孔径雷达(InSAR)^[6-8]中 L 型三天线干涉处理技术与 m-D 理论相结合,提出了窄带雷达条件下的空间微动目标干涉三维成像^[9]和宽带雷达空间微动目标干涉三维成像方法^[10-11]。其中,最关键的步骤是对各散射点进行保相分离。由于目标的微动特征通常表现为正弦曲线形式,所以现有方法主要是基于图像处理的方法对散射点进行分离,如文献[9]中的 Hough 变换^[12]、文献[11]中的点迹搜索等,对于完整的、连续的正弦曲线,以上方法都能有效分离各散射点的 m-D 曲线,但当雷达脉冲重复频率(PRF)不足时,Hough 变换提取不出各散射点对应的发生卷绕的正弦曲线,点迹搜索也由于时频平面上微多普勒曲线的不连续而存在散射点分离错误等问题,因此需要寻求新的方法。

由于空间散射点稀疏且具有独特性,满足信号稀疏分解^[13-14]思想,而信号稀疏分解理论能突破 Nyquist 采样定律的限制,这为研究 PRF 不足情况下分离散射点问题提供了新思路。因此,本文引入稀疏分解的思想,依据空间自旋目标回波信号为正弦调频信号^[15]这一特性构建稀疏字典,利用回波在字典上的稀疏性分解回波,获取各散射点子回波,经过时频变换,得到各散射点的 m-D 曲线,再在干涉处理后的时频平面上提取曲线所对应的干涉相位差,实现散射点的保相分离,最后根据干涉相位差与散射点坐标之间的关系,获得目标真实的三维散射分布信息。

1 干涉三维成像模型

空间自旋目标 L 型三天线干涉成像系统具体模型建立可参考文献[9],本文给出其中重要公式。

假设天线 A 发射的信号是载频为 f_c 的单频连续波,则天线 A、B 接收到的散射点 P 的基带回波信号分别为:

$$s_{AP}(t_m) = \sigma_A \exp(j2\pi \frac{2R_{AP}(t_m)}{\lambda_c}) = \sigma_A \exp(j\Phi_{AP}(t_m)) \quad (1)$$

$$s_{BP}(t_m) = \sigma_B \exp(j2\pi \frac{R_{AP}(t_m) + R_{BP}(t_m)}{\lambda_c}) = \sigma_B \exp(j\Phi_{BP}(t_m)) \quad (2)$$

式中: t_m 表示时间; σ_A 、 σ_B 分别为天线 A、B 接收回波中 P 点的散射系数; $R_{AP}(t_m)$ 、 $R_{BP}(t_m)$ 分别为任一 t_m 时刻 P 点到天线 A、B 的距离; $\lambda_c = \frac{c}{f_c}$ 为波长, c 为光速; $\Phi_{AP}(t_m)$ 、 $\Phi_{BP}(t_m)$ 分别为天线 A、B 基带回波信号的相位。

假设平动分量已补偿,对每个时刻回波信号分别进行干涉处理,得到干涉相位差为:

$$\Delta\varphi_{AB}(t_m) = \Phi_{AP}(t_m) * \Phi_{BP}(t_m) = 2\pi \frac{R_{AP}(t_m) - R_{BP}(t_m)}{\lambda_c} = \frac{2\pi}{\lambda_c} R_{\Delta AB}(t_m) \quad (3)$$

式中:“*”代表共轭。

为使相位不模糊, $|\Delta\varphi_{AB}(t_m)|$ 不得超过 π 。在远场条件下,根据 $R_{\Delta AB}(t_m)$ 与散射点 P 的 X 轴坐标之间的几何关系,即可计算出任一 t_m 时刻散射点 P 的 X 轴坐标为:

$$x(t_m) = \frac{\lambda_c R_{MP} \Delta\varphi_{AB}(t_m)}{2\pi L} + \frac{L}{2} \quad (5)$$

式中: R_{MP} 为散射点到天线 A、B 中点 M 的距离。

同理,可得到散射点 P 的 Z 轴坐标由于目标非常接近 Y 轴,所以散射点 P 的 Y 轴坐标,与其到天线 A 的距离近似相等。至此,散射点 P 的 3 个维度的坐标值均已获得,即可实现其三维成像。

2 基于稀疏字典分解的空间自旋目标干涉三维成像

2.1 稀疏字典分解算法

由文献[16]可得,散射点 P 在空间做自旋运动,某 t_m 时刻其与天线 A 之间的距离可表示为:

$$R_{AP}(t_m) = K + l + r \cos(\Omega t_m + \theta) \quad (6)$$

式中: K 为参考点到天线 A 的距离,可由回波时延计算得到; l 为散射点旋转中心到参考点的距离在

雷达视线方向(LOS)上的投影; r 为散射点在LOS上的旋转半径; Ω 为旋转角速度; θ 为初相。

将式(6)代入式(1)中,得基带信号 $s_{AP}(t_m)$ 可表示为:

$$S_{AP}(t_m) = \sigma_A \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} (K + l + r \cos(\Omega t_m + \theta))) \quad (7)$$

可以看出,回波信号为一正弦调频信号,由于空间中散射点是稀疏的,每个散射点都有其独特的微动特征,满足稀疏分解思想,所以构造稀疏字典 D ,字典中第 i 个原子 d_i 的表达式为:

$$d_i = \exp(j \frac{4\pi}{\lambda_c} (K + l_i + r_i \cos(\Omega t_m + \theta_i))) \quad (8)$$

本文采用的稀疏分解算法^[17-18]是简单有效的正交匹配追踪算法(Orthogonal Matching Pursuit, OMP)^[19]。当PRF不满足奈奎斯特采样定律时,影响的只是回波中样本数的多少,该算法仍能分解得到各散射点m-D信号分量;但是,若需在图像上分离出各散射点,由于发生了卷绕,图像上各散射点对应的m-D曲线不再是一条完整的、连续的正弦曲线,Hough变换或点迹搜索方法将不再适用。

2.2 干涉三维成像算法

由于天线回波得到的是目标在LOS上的微动特征,3个天线观测目标的视角近似相同^[10],受限于稀疏分解字典的相位表示精度,所以从3个天线分别提取出的散射点微动参数几乎相同,直接对各散射点子回波做干涉处理,其干涉相位差为0。而时频分析具有保相性^[9],可将干涉处理转换到时频平面上进行。首先,将三天线接收到的回波分别进行时频分析,并做干涉处理,得到2个干涉相位差矩阵;然后将天线A接收到的回波稀疏分解得到的各散射点子回波,通过时频变换得到各散射点的m-D曲线,进行骨架提取后,再在干涉相位差矩阵中提取出各散射点m-D曲线经过的干涉相位差。根据干涉相位差与坐标之间的公式就可计算出各散射点的X、Z维坐标。将分解结果代入式(6),即可得到散射点Y轴坐标,最后,根据散射点的三维坐标重构其三维图像。

因为构建的字典与真实回波之间存在一定的精度误差以及所用稀疏分解算法的精确性问题,所以,经过稀疏分解后,得到的分解结果重构的散射点信息可能出现以下情况:①得到的是虚假散射点信息;②多个分解结果对应同一个散射点。由于各散射点的X、Z维坐标随时间变化为正弦曲线,且曲线周期为目标自旋周期,所以可以借助曲线拟合工具箱来分析,用正弦曲线分

别拟合分解结果重构的散射点X(或Z)维坐标,根据拟合结果的评价参数对分解结果进行判断。评价参数包括:①拟合曲线的角速度应与散射点的自旋角速度一致;②确定系数(R-square),越接近1拟合越好,一般情况大于0.9说明拟合较好;③均方根误差RMSE越小越精确。对于情况①,若拟合曲线的角速度与散射点的自旋角速度不一致,则可直接判为虚假散射点;若周期相等,R-square小于0.9,则认为是虚假散射点,需剔除对应的分解结果。对于情况②,若拟合后的2条曲线RMSE不超过0.1,则认为2条曲线对应的是同1个散射点,对分解结果取平均得到最终散射点信息。

需要注意的是,在各散射点m-D曲线的交叉处,由于多个散射点相位信息的重叠会造成坐标重构结果错误,对骨架提取后的各散射点m-D曲线做点乘,去掉值不为0的时间单元列,即剔除了散射点m-D曲线的交叉位置^[9]。

综上,利用稀疏字典分解对窄带条件下空间自旋目标三维干涉成像具体步骤如下:

步骤1 构建字典,对天线A接收的回波进行稀疏分解,得到各散射点对应的微动参数;

步骤2 将分解结果即微动参数重构,得到各散射点子回波,进行时频分析、骨架提取,得到各散射点的m-D曲线;

步骤3 将三天线接收到的回波分别进行时频分析,再做干涉处理,得到2个干涉相位差矩阵;

步骤4 剔除散射点的交叉位置;

步骤5 在干涉相位差矩阵中提取各散射点m-D曲线经过的干涉相位差,计算得到各散射点X、Z维坐标;

步骤6 合并或剔除散射点,得到最终的散射点信息;

步骤7 计算得到各散射点的Y维坐标;

步骤8 重构散射点的三维图像。

3 仿真分析

3.1 算法有效性验证

仿真参数设置见表1,计算可得微多普勒带宽 f_{md} 约为1508 Hz。可见脉冲重复频率低于奈奎斯特采样率。

采用OMP算法对天线A基带回波进行稀疏分解,设最大迭代次数为5,得到结果见表2。将表中的分解结果进行组合,组成5个散射点子回波,并对其后续处理,仿真结果见图1。

表 1 仿真参数

参数	值
基线长度 L/m	100
雷达发射载频 f_c/Hz	6
雷达照射时间/s	0.5
脉冲重复频率 PRF/Hz	1 600
参考点距雷达初始距离/km	500
目标旋转角速度 $\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$0, 3\sqrt{2}\pi, 3\sqrt{2}\pi$
散射点个数	2
散射点初始坐标/m	$(2.785, -3.650, 4.350)$ $(-1.871, 5.500, 2.500)$

表 2 天线 A 接收回波的稀疏分解结果

次数	\hat{l}/m	\hat{r}/m	$\hat{\Omega}/2\pi/Hz$	$\hat{\theta}/rad$	系数 φ
1	4.1	2.0	3.0	5.546 9	0.246 0
2	3.9	2.0	3.0	4.516 0	0.228 9
3	3.6	2.0	3.0	3.337 9	0.146 0
4	4.0	2.0	3.0	5.497 8	0.124 0
5	3.8	2.0	3.0	0.785 4	0.120 3

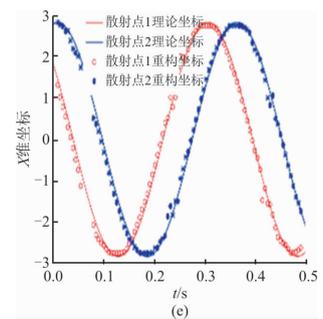
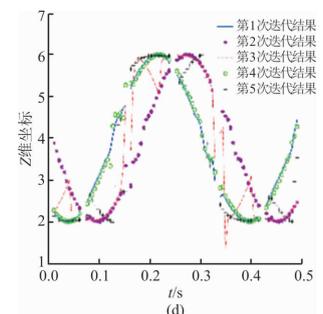
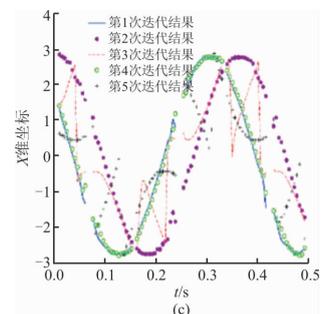
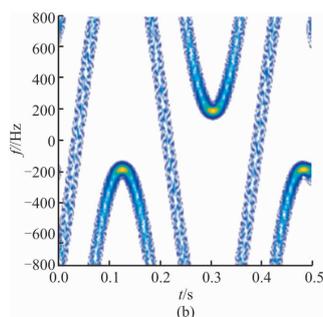
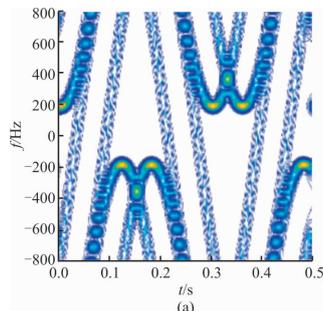
图 1(a)给出了天线 A 目标回波的时频图像,可以发现,因为 PRF 不足,曲线出现了明显的卷绕。图 1(b)为用第 1 次分解结果组合成的散射点子回波经时频分析得到的 m-D 曲线,可以发现其也出现了卷绕,且卷绕情况与图 1(a)中的曲线相同。图 1(c)、(d)为 5 次分解结果重构的 X、Z 维坐标,从图像上看出,第 1、2、4 次得到的坐标随时间变换为正弦曲线,用曲线拟合工具箱对 5 条 X 维坐标曲线进行分析,其评价参数结果见表 3。

表 3 曲线拟合评价参数结果

曲线	角速度	R-square	RMSE
1	18.78	0.998 9	0.066 1
2	18.72	0.999 0	0.061 6
3	18.55	0.760 1	0.716 0
4	18.81	0.999 4	0.049 3
5	15.69	0.573 2	1.167 6

从数据中可以看出,第 5 次迭代结果得出的 X 维坐标曲线角速度与散射点自旋角速度不符,第 3 次迭代结果确定系数小于 0.9 且 RMSE 大于 0.5,说明用正弦曲线拟合较差且误差大,所以均认为是虚假散射点,予以剔除,而计算第 1 条拟合曲线与第 4 条拟合曲线的 RMSE 为 0.039 7,小于 0.1,认为 2 条曲线对应的是同 1 个散射点信息,将第 1、4 次迭代结果取平均组合成一个散射点子回波,最终得到的散射点坐标见图 1(e)、(f)所示,其结果与理论坐标变化情况基本一致,图中重构坐标曲线的断裂处对应的是散射点 m-D 曲线交叉处。图 1(g)给出了

用分解结果计算得出了 2 个散射点的 Y 维坐标与理论 Y 维坐标图,可以看出,重构坐标与理论坐标一致。最后,根据各个时刻的三维坐标,重构出了时变的目标三维图像。从图 1(h)可以发现重构散射点的三维图像与理论三维图像十分吻合,这验证了所提算法的有效性。



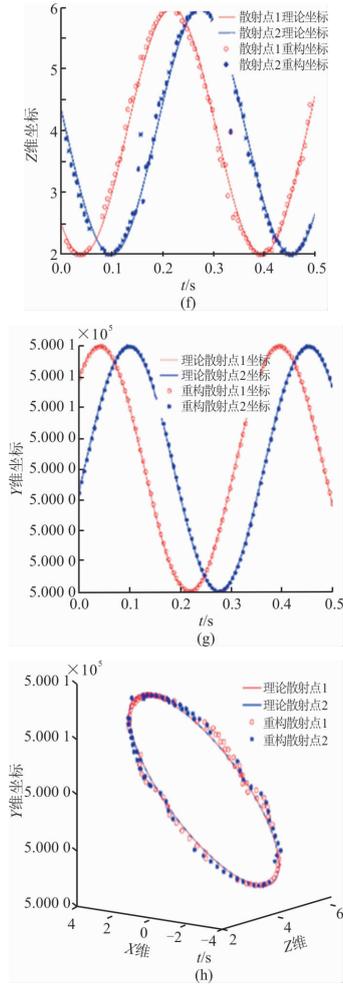


图1 稀疏分解算法得到的仿真结果图

为进一步说明该算法的性能,用分解结果重构的散射点 X 维坐标拟合曲线与理论 X 维坐标曲线的 RMSE 来刻画成像效果,分析不同 PRF 下的成像效果, RMSE 越小,成像效果越好,由于干涉三维成像方法重构坐标精度较高,所以, RMSE 的数量级一般在 0.1 以下。以 $PRF = 2f_{md}$ Hz, 即奈奎斯特采样率为单位,图 2 给出了 0.2~1.2 倍单位下,2 条分析曲线 RMSE 随 PRF 变化的曲线图。

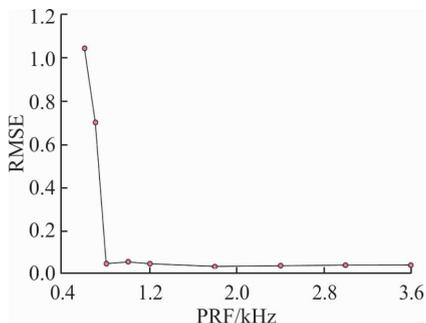


图2 不同 PRF 下成像效果图

可以看出,当 PRF 大于 0.25 倍奈奎斯特采样率时,利用本文算法得到的分解结果重构的散射点 X 维坐标与理论 X 维坐标的 RMSE 值都在理论范

围内,说明成像结果较好。这是由于当 PRF 小于 0.25 倍奈奎斯特采样率时,回波数据过少,导致分解结果不准确,且此时时频曲线的交叉位置过多,相位信息都被剔除,导致坐标重构失败。

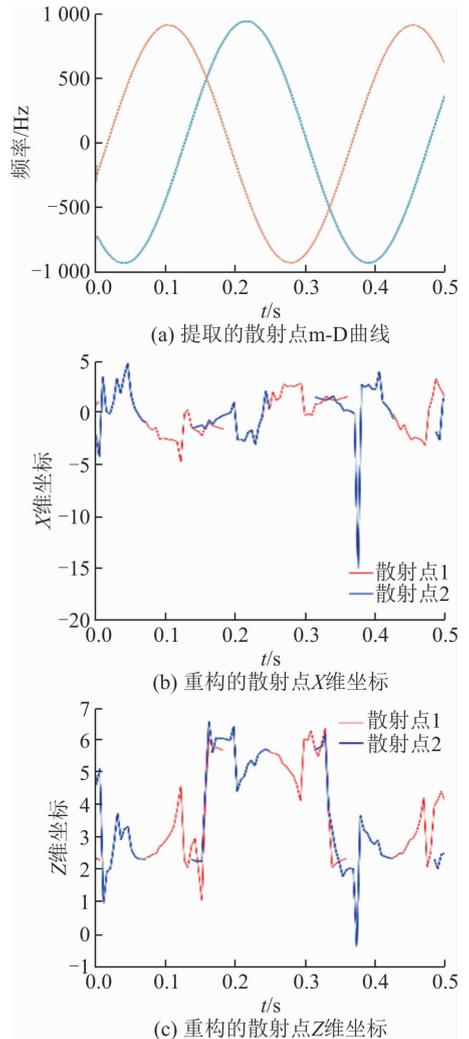


图3 Hough 变换法得到的仿真结果图

图 3 为用 Hough 变换法得到的仿真结果图。可以发现,由于出现明显的卷绕,用 Hough 变换提取不出正确的正弦曲线,得到的正弦曲线并不是两散射点的微多普勒曲线,从而获得的干涉相位信息和散射点的 X 、 Z 维坐标不准确。

3.2 噪声条件下性能分析

为分析该成像算法的鲁棒性,在回波中加入高斯白噪声进行性能测试。图 4 给出了在不同信噪比情况下,经曲线拟合后的散射点 X 维坐标与理论坐标值间的均方误差(MSE),可以看出,窄带条件下,噪声对回波相位影响很大,导致得到的坐标值与理论值相差很远。

由于空间自旋目标运动具有周期性,所以目标回波的干涉相位以及时变散射点坐标也具有周期性,本文采用对若干个周期回波数据取平均的方法,

来抑制噪声。在之前的仿真参数基础上,取 200 个周期回波做平均处理,得到结果见图 5。结果显示,所用方法能降低噪声对干涉相位的影响。但是在低信噪比下,相位信息遭到严重破坏,还需进一步研究低信噪比下的成像问题。

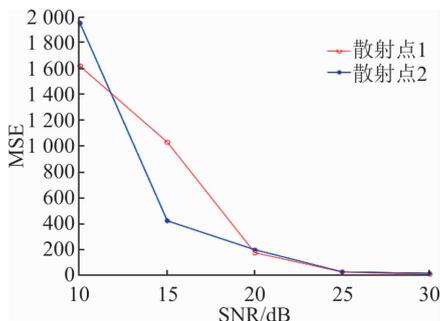


图 4 噪声条件下坐标误差变化曲线

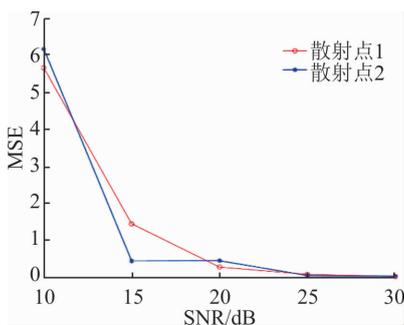


图 5 降噪后坐标误差变化曲线

4 结语

本文研究了基于稀疏字典分解的窄带雷达空间自旋目标干涉三维成像方法,与基于时频图像处理的方法分离散射点相比,该方法在 PRF 不足的情况下仍适用于对各散射点进行有效分离,仿真结果验证了所提方法的有效性。其中,稀疏分解算法除了本文提到的 OMP 算法,目前还有很多改进型的 OMP 方法,均可用来对目标回波进行分解。但是,在窄带雷达空间目标干涉三维成像中,噪声直接破坏了用于坐标重构的干涉相位信息,如何解决在低信噪比的条件下成像问题,还需要在以后的工作中予以研究。

参考文献 (References):

[1] 赵园青,池龙,马赛,等. 基于 EMD 算法的空间自旋目标平动补偿与微动特征提取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(5):40-43.
ZHAO Y Q, CHI L, MA S, et al. Translational Motion Compensation and Micro-Doppler Characteristic Extraction for Space Spinning Target Based on EMD

Algorithm[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2013, 14(5):40-43. (in Chinese)

[2] 罗迎,龚逸帅,陈怡君,等. 基于跟踪脉冲的 MIMO 雷达多目标微动特征提取[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 575-584.
LUO Y, GONG Y S, CHEN Y J, et al. Multi-Target Micro-Motion Feature Extraction Based on Tracking Pulses in MIMO Radar[J]. Journal of Radars, 2018, 7(5): 575-574. (in Chinese)

[3] 许丹,田波,冯存前,等. 窄带雷达网弹道目标微动特征提取[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6):47-51.
XU D, TIAN B, FENG C Q, et al. Micro-Motion Feature Extraction of Ballistic Targets Based on Narrowband Radar Network [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 47-51. (in Chinese)

[4] BAI X R, XING M D, ZHOU F, et al. High-resolution Three-Dimensional Imaging of Spinning Space Debris [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47(4): 2352-2362.

[5] 陈蓉,冯存前,李靖卿,等. 基于宽窄带多普勒融合的锥体目标三维重构[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(2):60-66.
CHEN R, FENG C Q, LI J Q, et al. A Three-Dimensional Reconstruction Method of Cone Targets Based on Micro-Doppler Fusion of Wideband and Narrowband Netted Radars[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2017, 18(2): 60-66. (in Chinese)

[6] CHEN Q, XU G, ZHANG L, et al. Three-Dimensional Interferometric Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with Limited Pulses by Exploiting Joint Sparsity[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2015, 9(6): 692-701.

[7] ZHAO L Z, GAO M G, MARTORELLA M, et al. Bistatic Three-Dimensional Interferometric ISAR Image Reconstruction [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(2): 951-961.

[8] NASIRIAN M, Bastani M H. A Novel Model for Three-Dimensional Imaging Using Interferometric ISAR in Any Curved Target Flight Path[J]. IEEE Trans Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3236-3245.

[9] 陈永安,罗迎,王恺,等. 多天线干涉处理的窄带雷达空间旋转目标三维成像[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2016, 17(4): 46-51.

- CHEN Y A, LUO Y, WANG K, et al. Three Dimensional Imaging for Spinning Space Target Based on Multi-antenna Interferometric Processing[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016, 17(4): 46-51. (in Chinese)
- [10] 胡健, 罗迎, 张群, 等. 弹道目标宽带雷达干涉式三维成像与微动特征提取[J]. 电子与信息学报, 2017, 39(8): 1865-1871.
- HU J, LUO Y, ZHANG Q, et al. Three-Dimensional Interferometric Imaging and Micro-Motion Feature Extraction of Ballistic Targets in Wideband Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2017, 39(8): 1865-1871. (in Chinese)
- [11] 张群, 孙玉雪, 罗迎, 等. 一种基于线性调频步进信号的自旋目标时变三维成像方法[J]. 系统工程与电子技术, 2018, 40(1): 23-31.
- ZHANG Q, SUN Y X, LUO Y, et al. Targets with Stepped-Frequency Chirp Signal[J]. Systems Engineering and Electronics, 2018, 40(1): 23-31. (in Chinese)
- [12] ZHANG Q, YEO T S, TAN H S, et al. Imaging of a Moving Target with Rotating Parts Based on the Hough Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 291-299.
- [13] 东润泽, 郭英, 于欣永, 等. 基于稀疏重构的跳频信号检测方法[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(3): 77-82.
- DONG R Z, GUO Y, YU X Y, et al. A Frequency Hopping Signal Detection Method Based on Sparse Reconstruction[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2018, 19(3): 77-82. (in Chinese)
- [14] CHEN Y, LI G, ZHANG Q, et al. Refocusing of Moving Targets in SAR Images via Parametric Sparse Representation[J]. Remote Sensing, 2017, 9(8): 795.
- [15] 张群, 罗迎. 雷达目标微多普勒效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 3-24.
- ZHANG Q, LUO Y. Micro-Doppler Effect of Radar Targets [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2013: 3-24. (in Chinese)
- [16] 陈春晖, 张群, 罗迎, 等. 一种空间微动目标宽带雷达干涉三维成像方法[J]. 电子与信息学报, 2016, 38(12): 3144-3151.
- CHEN C H, ZHANG Q, LUO Y, et al. Interferometric Three Dimensional Imaging Method for Space Micro-Motion Target Based on Wideband Radar[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2016, 38(12): 3144-3151. (in Chinese)
- [17] MALLAT S G, ZHANG Z. Matching Pursuits with Time-Frequency Dictionaries[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397 - 3415.
- [18] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal Matching Pursuit: Recursive Function Approximation with Applications to Wavelet Decomposition[C]//Proceedings of 27th Annual Asiomar Conference of Signals, Systems and Computers. Pacific Grove, CA: IEEE 1993: 40-44.
- [19] ELSHEIKH A H, WHEELER M F, HOTEIT I. Sparse Calibration of Subsurface Flow Models Using Nonlinear Orthogonal Matching Pursuit and an Iterative Stochastic Ensemble Method[J]. Advances in Water Resources, 2013, 56(2): 14-26.

(编辑: 徐敏)