

基于旋翼无人机雷达的船只目标成像与类型识别研究进展综述

张 晰, 张 杰, 孟俊敏

(自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

摘要: 载有成像雷达的旋翼无人机具有成本低廉、对起降条件要求低、飞行姿态灵活多样等优点, 可以在热点区域进行普查、详查或长时间悬停凝视等多模式成像监测, 现已成为海上船只目标监测识别的重要手段。本文分别从旋翼无人机雷达硬件系统、无人机载雷达动目标成像、船只目标类型识别和目标三维结构特征提取等四方面开展国内外研究进展综述。总结分析发现当前利用旋翼无人机雷达进行船只目标成像和类型识别, 尚存在运动船只成像散焦、三维结构重建难度大、类型识别精度低等问题, 迫切需要推动相关技术的发展。

关键词: 旋翼无人机; 无人机雷达; 船只目标; 三维成像; 类型识别

中图分类号: P237 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2020)06-0141-07

DOI: 10.11759/hyxx20191127001

我国是一个海洋的大国, 海域辽阔、海岛众多、资源丰富, 海洋已成为我国经济可持续发展的战略空间和国家安全的重要屏障。随着海洋开发力度的不断加大, 用海供需矛盾日益升级, 领海争议和海洋侵权问题时有发生。当前我国的海洋维权形势非常严峻, 部分国家船只经常非法进入我国管辖海域获取水文、地质资料等重要信息, 布设水下监视监听设备; 在我国专属经济区内进行石油、天然气开采, 海底矿藏挖掘, 渔业捕捞等活动, 大肆掠夺我国海洋资源, 极大的侵害了我国的海洋权益。因此, 为维护我国海洋权益, 亟需探索海上船只目标监测识别技术, 提升海上目标预警管控能力, 维护国家领海主权和海洋权益。

与光电传感器、高频超视距地波雷达、导航雷达等船只目标遥感探测手段相比, 合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)或逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)等微波成像雷达具有二维成像、高分辨率(米级甚至亚米级)、不受光照云雾影响、全天时全天候工作的优势, 长期以来都是船只目标监视监测的主要手段。岸/岛基是 ISAR 的主要工作平台, 其通常受场地限制, 架设高度有限, 只能监测近岸固定区域, 无法胜任大范围监测的需求。卫星、飞机是 SAR 的最主要工作平台。星载 SAR 虽然分辨率高、观测范围大, 但也存在图像获取周期长、过境时间固定、无法长时间连续观测等缺点。与卫星平台相比, 无人机特别是旋翼无人

机作为一种新型遥感监测手段, 具有成本低廉、对起降条件要求低、飞行姿态灵活多样等优点。近几年在电子技术的推动下, 搭载有体积小、重量轻、成本低的微型成像雷达(兼具 SAR 和 ISAR 模式)的轻型旋翼无人机日益普及, 已成为国内外竞相研究的重要装备。实践发现, 搭载有成像雷达的旋翼无人机可以在热点区域进行普查、详查或长时间悬停凝视等多模式成像监测, 已成为海上船只目标监测识别的重要手段, 逐渐在军事、民事应用中发挥重要作用。

本文将对旋翼无人机雷达在船只目标的成像识别领域中的文献进行综述, 总结分析目前尚存在的问题, 并对未来的发展方向进行探讨。

1 旋翼无人机雷达硬件系统研究进展

进入新世纪后无人机技术发展迅速, 逐渐在环境监测、情报侦察和边境监视等方面发挥重要作用, 推动了小型化成像雷达的研制。现阶段基于小型无人机的 SAR/ISAR 装备研发进入高速发展阶段, 国内外多个研究机构已成功研制出多款无人机载小型/微型成像雷达系统。

收稿日期: 2019-11-27; 修回日期: 2020-03-09

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1405201); 国家自然科学基金(61971455)

[Foundation: The National Key Research and Development Program of China, No. 2017YFC1405201; the National Natural Science Foundation of China, No. 61971455]

作者简介: 张晰(1981-), 男, 山东潍坊人, 副研究员, 博士, 主要从事海洋雷达探测技术研究, E-mail: xi.zhang@fio.org.cn.

典型的微型 SAR 系统主要有德国防御通信公司的 Ka 波段“MiSAR”系统、德国 Fraunhofer FHR 的 W 波段 SAR 系统、美国的 C 波段 SAR 系统、以及荷兰 Delft 理工大学研制的 X 波段 SAR 系统。这些微型 SAR 系统不仅重量低于 4 kg, 而且分辨率可达 0.5 m 以上。除了 SAR 系统外, 加拿大国防研究与发展部的无人机电载 XWEAR 雷达系统、美国海军 MQ-4C Triton 无人侦察机和 MQ-8B 无人直升机配备的 MFAS 雷达系统都设计有圆扫 ISAR 工作模式, 目标分辨率优于 1 m。

国内中科院电子所、航天 23 所、北京遥测技术研究所(航天 704 所)、中电 38 所、西安电子科技大学、北京航空航天大学、北京理工大学、国防科技大学、哈尔滨工业大学等单位已成功研制出重量轻、体积小、功耗低、成像分辨率高的无人机电载 SAR 系统。由自然资源部第一海洋研究所和北京遥测技术研究所海洋公益性行业科研项目“海上非法舰船 SAR 和地波雷达立体监视监测应用技术系统”和“海上船只目标星-机-岛立体监视监测技术系统”连续两个项目的支持下, 研制了适配小型旋翼无人机和中型无人机的多款机载搜索与成像一体化雷达, 该雷达具备广域搜索、SAR 和 ISAR 三种工作模式, 并结合中国海警的业务工作, 已开展了多次海上船只目标探测示范应用。

总的来看, 国内外在无人机电载成像雷达硬件系统研制方面已发展的较为成熟, 能够为无人机电载雷达动目标成像、船只目标类型识别和目标三维结构特征提取等技术研究奠定较好的硬件基础。

2 海面动目标成像研究进展

SAR 和 ISAR 成像技术是通过脉冲压缩来获得距离向的高分辨, 通过沿方位向的回波相干积累来实现方位向高分辨。由于相干积累要求回波信号间必须是相干的, 因而雷达回波在方位向上对相位的变化非常敏感, 雷达与目标间非常微小的非合作运动都会引起方位相位的较大变化, 从而造成相位误差。引入相位误差的原因主要有两种情况: ①雷达的真实运动轨迹与建立的信号几何模型失配; ②观测目标的非合作运动。要实现精确成像必须对上述相位误差进行补偿。

2.1 对雷达平台的运动补偿

该补偿方法常用于 SAR 成像技术。理想的 SAR

信号几何模型要求平台做匀速直线运动, 然而无人机机体小、飞行高度低, 载机受气流影响较大, 运动平稳性很难达到 SAR 成像的要求。针对这一情况, 国外的无人机 SAR 成像可以利用高精度的惯导和 GPS 来补偿平台非理想运动所带来的误差。然而由于技术封锁和载重限制, 国内的小型无人机无法使用高精度的惯导。为克服上述问题, 实际工作中国产无人机 SAR 系统通常采用“Two-Step”的运动补偿处理流程: 先用中等/低精度的惯导系统对回波数据进行粗补偿, 然后再基于回波数据的自适应运动补偿技术进行相位误差精补偿^[1-3]。因此研究稳健的高精度相位补偿是无人机系统雷达成像的关键环节。

自聚焦算法是典型的高精度相位补偿技术。根据成像场景中是否含有孤立散射点, 可以将自聚焦算法分为两类: ①图像偏移^[4-5]、单特显点处理^[6]、相位梯度自聚焦^[7]等适合有孤立散射点场景的算法; ②基于相位调整的对比度增强^[8]、最小熵自聚焦^[9]、相干图像偏移^[10]等比较适合对无强点目标、均匀场景的算法。上述相位误差补偿方法均假设相位误差是随慢时间变化的函数, 并没有考虑相位误差的方位空变性, 即不同方位位置有不同的相位误差函数。对于低分辨的雷达, 相位误差的空变分量对于图像的聚焦影响不大。当雷达的分辨率较高、波束较宽时, 相位误差的方位空变性对聚焦精度的影响是必须要考虑的。针对相位误差的空变性问题, 基于天线相位中心误差估计的自聚焦算法^[11]、后向投影自聚焦算法^[12]和适用于后向投影成像的改进相位梯度自聚焦算法^[13]相继提出, 能够比较好的解决方位空变特性引起的目标散焦问题。

除载机运动姿态产生的相位误差之外, 无人机旋翼的高速转动会造成雷达作用距离出现周期性波动, 从而引入高频周期性相位误差, 若不能得到很好的补偿, 则会出现方位重影现象, 严重影响图像的质量。针对这一问题张红波等提出利用相位梯度自聚集算法提取高频相位进行补偿^[14]; 李亚超等通过短孔径数据的频域去斜成像, 以消除高频抖动影响^[15]。Zhang 等提出了一种直升机旋翼震动频点的估计方法^[16], 该方法在震动幅度恒定或震动频点单一的情况下, 能够得到较好的聚焦图像。Gao 等^[17]和景国彬等^[18]进一步改进了针对直升机平台的 SAR 方位重影抑制方法, 即便直升机存在多个震动频点时, 所提出的方法也能够有效消除震动误差相位。

2.2 对非合作船只目标的运动补偿

非合作船只目标的平动、横滚、俯仰和偏航等运动状态未知。在 SAR 成像时,目标的运动会产生散射点跨越分辨单元的问题,导致图像距离向展宽和方位向散焦。在 ISAR 成像时,雷达更多的是依赖目标三轴转动进行成像,而目标的平动必须被补偿掉。所以对非合作运动目标精确成像,需要进行特殊的聚焦处理。

当前 SAR 动目标成像算法主要分为五种:①特显点跟踪法,其通过目标的多个特显点来计算多个自由度的目标旋转参数^[19];②时频分析法,其通过时频分析技术计算目标的方位调频率,用以补偿动目标的方位散焦^[20];③最优参数搜索法,其通过对动目标不断成像,以目标图像对比度(有时也为梯度)最大或熵值最小为最优参数,以得到最高质量的成像结果^[21];④Keystone 变换法,先利用 Keystone 变换进行距离向补偿和方位向聚焦,再利用方法②或③去除方位剩余的二次及以上相位,从而提升动目标聚焦效果^[22];⑤SAR 与 ISAR 联合处理法,其先用 SAR 方法进行粗成像,然后从 SAR 图像中提取出船只目标子图像,最后对各目标子图像进行 ISAR 处理,从而得到清晰的目标图像^[23]。

与 SAR 不同,ISAR 是利用动目标相对雷达视线方向的转动角度积累来获取方位向高分辨率,所以实现高质量 ISAR 成像要对动目标进行平动和转动两种补偿,其中平动补偿又包括包络对齐和相位校正两个步骤。包络对齐的常用算法有相邻相关法^[24]、整体最优法^[25]和最小熵法^[26]等;相位校正的常用算法包含特显点法、多普勒中心跟踪法、相位梯度自聚焦法^[27]和最小熵自聚焦法^[28]等。转动补偿常用算法有极坐标法^[29]和 Keystone 变换法^[30]等。然而,船只随海浪的摆动在回波信号中表现出明显的非平稳特征,使得传统的 ISAR 成像算法失效^[31]。针对这类问题常采用短时傅里叶变换、连续小波变换、EMD、Wigner-Ville 变换和分数阶傅里叶变换^[32]等时频分析工具替代传统方法,呈现良好的成像效果。

最近,微动目标成像算法的研究发展为 ISAR 成像领域又一技术热点,美国的“辐射亡命徒”先期技术演示计划(radiant outlaw ATD)^[33]和国内外的学者初步证明了利用船只目标的微动信息能够对动目标进行成像和识别^[34-35]。

总体来讲,我国在动目标 SAR 和 ISAR 成像理论的研究方面处于国际领先地位,但针对旋翼无人

机的海上动目标雷达成像研究还处于起步阶段,虽然已发展了较多的方法,但由于惯导精度低、飞行环境复杂以及旋翼高速震动等多种不利因素共同作用,增加了运动补偿难度,成像能力还有待进一步提高。

3 船只目标类型识别研究进展

随着成像技术的快速发展,雷达分辨率从十米级提高到米级甚至亚米级,船只在雷达图像中由点目标变为面目标,类型识别成为可能。利用高分辨率成像雷达识别船只类型,关键在于①挖掘能够凸显同类船只相似性和异类船只相异性的有效特征;②构建稳定可靠的分类器。

有效特征选择是船只类型识别的核心问题。最常用的是船只目标几何特征,代表性工作有:美国海军实验室在 1996 年利用船只目标的船头和船尾、轮廓宽度、桅杆高度等特征进行类型识别^[36];董江曼等采用的是船只面积、周长、积分光学密度和主轴方向角等特征量^[37];杜琳琳等利用船只目标的中心线特征进行识别^[38],Lang 等利用非严格计算的朴素几何特征进行船只类型识别^[39]。除了船只几何特征,船只上层建筑会引起雷达散射分布的变化,张晰等利用船只目标的散射强度分布实现了货船、油轮和集装箱船三种船只类型的识别^[40]。Jiang 等^[41]和 Wang 等^[42]将散射强度分布与船只几何、纹理特征相结合进行船只类型识别,取得了较好的实验结果。

分类器的选择和设计是影响船只分类准确率的另一关键问题。研究者广泛采用结合船只类型先验知识的监督分类器进行类型识别,主要有:模糊逻辑^[43]、最近邻分类器^[44]和树状分层分类器^[45]等。但这些分类器的船只类型识别精度依赖于训练样本和选用的船只特征。相同的特征输入到不同分类器中,所得的分类效果并不相同,需要找到每个分类器所对应的最适特征才能得到较好的船只类型识别结果。最近提出的深度学习技术能够实现自学习,具备自己发现特征提取规则的能力,部分学者开展了基于卷积神经网络的船只类型识别实验^[46-47]。不过由于深度学习方法需要大量的训练样本支持,在当前可用船只样本较少的情况下,其识别能力还有待进一步挖掘和提高。Lang 等针对分类器的选择难以与船只类型特征有效匹配的问题,发展了多特征与分类器集合学习选择的船只类型识别方法,找到了不同分类器所需的最适船只类型特征,有效提高了船只类型识别精度^[48],为解决成像雷达船只类型识别

问题提供了新思路。

总的来说,目前利用成像雷达进行船只类型识别主要使用的是几何、纹理、散射分布等二维图像特征。但二维图像特征存在鲁棒性差、缺乏稳定性的问题,受环境因素和成像参数影响大。不同类型的船只可能具有相同的几何特征和散射特性;而且同一艘船只在不同视角、运动状态下,其几何特征和散射特性变化较大^[49]。这一方面会降低不同类型船只间的可分性,另一方面还会引发分类器在训练上的问题。导致所采集的训练样本需要应对类别特征各种可能的变化,降低了实际可操作性。因此需要挖掘新的鲁棒性、稳定性强的特征进行船只类型识别。

4 船只目标三维特征提取技术研究进展

雷达图像实质上是三维目标在二维平面上压缩后的投影图像,如 SAR 获取的是目标俯视图;而 ISAR 是依靠目标转动进行成像,获得的是目标侧视图。如果能够从二维雷达图像中重构出船只目标的三维结构,这将会成为适合于船只目标类似识别的新的鲁棒性、稳定性强的特征。目前 SAR 和 ISAR 船只目标三维重构方法主要有基于多方位或时间序列的三维重构和基于干涉技术的三维重构两大类。

基于多方位或时间序列的船只目标三维重构方法,这类方法是根据刚体目标的几何不变性约束,从不同方位/角度、不同时间的目标二维 SAR/ISAR 图像中提取出能代表目标的特征点构建矩阵,利用解投影变换或因式分解的方法进行目标结构三维重构。目前这些方法多应用于飞机、卫星等空中目标的三维结构探测^[35, 50-52],海上船只目标的三维探测可查的文献很少。主要有 McFadden 利用 ISAR 时间序列数据,对船只目标进行了三维模型重建^[53];汤立波等在 McFadden 的基础上,引入因子分解方法,实现了单天线 ISAR 运动船只目标的三维形状重构^[54]。

基于干涉技术的船只目标三维重构方法,是通过设置具有严格位置关系的多收发天线,对目标进行同时观测,利用干涉处理重构出目标的三维图像。这类方法对天线配置要求较高,实现复杂且还需要解决图像标定、相位解缠绕等难点,目前哈工大的王勇教授利用仿真数据,初步证明了干涉 ISAR 进行船只目标三维成像的有效性^[55-56],但其性能还需用真实数据进行检验。

总之,当前利用 SAR 和 ISAR 等成像雷达进行目标三维重构已在飞机、卫星等空中目标的探测中得到了应用,但大多依靠的是对硬件系统和基线设计有较高要求的干涉技术。文献未见利用旋翼无人机 SAR 或 ISAR 进行船只目标三维重构的应用,亟待加强该项技术的研究探索。

5 总结与展望

旋翼无人机作为新兴的遥感技术手段,具有成本低廉、对起降条件要求低、飞行姿态灵活多样等优点,已成为目标监测识别的重要手段,逐渐在军事、民事应用中发挥重要作用。本文对旋翼无人机雷达在船只目标的成像识别领域中的文献进行综述。由文献综述可知,当前国内外在无人机载成像雷达硬件系统研制方面已发展的较为成熟,能够为数据获取和实验开展打下较好的硬件基础。但在船只目标成像和类型识别方面,仍有较大的问题,主要表现在:

①在雷达成像方面,除了船只目标复杂运动,导致的散焦、拖影和虚影之外;由于无人机受重量、成本及功耗的限制,难以安装高精度的惯导/GPS 设备,且飞行高度低、受气流影响较大、飞行轨迹复杂,大大影响了雷达成像质量。另外,无人机旋翼的高速转动引入的周期性高频相位误差,进一步增加了成像难度。②在船只类型识别方面,由于船只目标在雷达图像中的表现取决于目标姿态以及雷达观测方位和角度,导致不同构造的船只在雷达图像上可能表现非常相似,或同一船只目标由于目标姿态及观测角度的变化使其在雷达图像上表现迥异。因此仅通过单一维度的雷达信息很难对船只类型进行有效识别。③在船只目标三维结构重构方面,由于无人机惯导精度较低、基线保持困难且船只目标一直处于运动状态,难以通过干涉技术提取目标的三维高程。上述原因限制了旋翼无人机载船只目标探测应用,迫切需要针对旋翼无人机这种新型平台发展船只目标雷达成像、三维重构与类型识别技术,实现海上船只目标的高精度监视监测。

参考文献:

- [1] Jiang R, Zhu D, Shen M, et al. Synthetic aperture radar autofocus based on projection approximation subspace tracking[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2012, 6(6): 465-471.

- [2] Schulz J. Optimal sharpness function for SAR autofocus[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2007, 14(1): 27-30.
- [3] Zhang L, Qiao Z, Xing M, et al. A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(8): 3202-3218.
- [4] Bezvesilniy O, Gorovyi M, Vavriv M. Estimation of phase errors in SAR data by Local-Quadratic map-drift autofocus[C]// IRS 2012, 19th International Radar Symposium, May 23-25, Warsaw, Poland. IEEE, 2012: 376-381.
- [5] 侯育星, 邢孟道, 陈士超, 等. 稳健多子孔径图像偏移的 SAR 自聚焦算法[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(9): 1731-1736.
Hou Yuxing, Xing Mengdao, Chen Shichao, et al. Robust autofocus algorithm of multiple subaperture map-drift in SAR[J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(9): 1731-1736.
- [6] Carrara G, Goodman S, Majewski M. Spotlight synthetic aperture radar: signal processing algorithm[M]. Boston, MA: Artech House, 1995.
- [7] Ye W, Yeo S, Bao Z. Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2487-2494.
- [8] Kolman J PACE: An autofocus algorithm for SAR[C]// IEEE International Radar Conference, 2005, 9-12 May, Arlington, VA, USA. IEEE, 2005: 310-314.
- [9] Xiong T, Xing M, Wang Y, et al. Minimum-entropy based autofocus algorithm for SAR data using chebyshev approximation and method of series reversion, and its implementation in a data processor[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(3): 1719-1728.
- [10] Samczynski P. Super-convergent velocity estimator for an autofocus coherent map-drift technique[J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2012, 9(2): 204-208.
- [11] Hu K, Zhang X, Shi J, et al. A novel antenna phase center estimation method for Synthetic Aperture Radar[C]// IEEE National Radar Conference - Proceedings, 10-15 May, 2015, Arlington, VA, USA. IEEE, 2015: 1340-1344.
- [12] Zhang L, Li H, Qiao Z, et al. Integrating autofocus techniques with fast factorized back-projection for high-resolution spotlight SAR imaging[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1394-1398.
- [13] 王昕, 蒋锐, 朱岱寅, 等. 一种改进的 SAR 反投影图像相位梯度自聚焦方法[J]. 现代雷达, 2016, 38(1): 17-21.
Wang Xin, Jiang Rui, Zhu Daiyin, et al. A modified phase gradient autofocus processing method for SAR imagery reconstruction via backprojection algorithm[J]. Modern Radar, 2016, 38(1): 17-21.
- [14] 张红波, 何涛, 陈德民. 一种去除回波频谱调制的直升机 SAR 成像方法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(5): 581-585.
Zhang Hongbo, He Tao, Chen Demin. Removal of spectral modulation from echoes for helicopter-borne SAR imaging[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2012, 27(5): 581-585.
- [15] 李亚超, 周峰, 邢孟道, 等. 一种直升机的舰船 Dechirp 实测数据 SAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(8): 1794-1798.
Li Yachao, Zhou Feng, Xing Mengdao, et al. An effective method for Ship Dechirp data imaging in helicopter SAR system[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(8): 1794-1798.
- [16] Zhang Y, Sun J, Lei P, et al. SAR-based paired echo focusing and suppression of vibrating targets[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(12): 7593-7605.
- [17] Gao Y, Zhang Z, Xing M, et al. Paired echo suppression algorithm in helicopter-borne SAR imaging[J]. IET Radar, Sonar & Navigation, 2017, 11(11): 1605-1612.
- [18] 景国彬, 王辉, 郑世超, 等. 基于直升机平台 SAR 的方位重影抑制方法[J]. 上海航天, 2018, 35(6): 92-97.
Jing Guobin, Wang Hui, Deng Shichao, et al. Azimuth ghost reduction method for Helicopter-borne synthetic aperture radar systems[J]. Aerospace Shanghai, 2018, 35(6): 92-97.
- [19] Perry P, Dipietro C, Fante L. SAR imaging of moving targets[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1999, 35(1): 188-200.
- [20] Yu W, Su W, Gu H. Ground maneuvering target detection based on discrete polynomial-phase transform and Lv's distribution[J]. Signal Processing, 2018, 144: 364-372.
- [21] Cristallini D, Pastina D, Colone F, et al. Efficient detection and imaging of moving targets in SAR images based on Chirp Sealing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(4): 2403-2416.
- [22] Yang J, Zhang Y. An airborne SAR moving target imaging and motion parameters estimation algorithm with azimuth-dechirping and the second-order keystone transform applied[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2015, 8(8): 3967-3976.
- [23] Zhang Y, Sun J, Lei P, et al. High-resolution SAR-based ground moving target imaging with defocused ROI data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, 54(2): 1062-1073.
- [24] Chen C, Andrews C. Target-motion-induced radar imaging[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic

- Systems, 2007, 16(1): 2-14.
- [25] 王勇, 姜义成. 一种估计 ISAR 成像转角的新方法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(3): 521-523.
Wang Yong, Jiang Yicheng. A new method for estimating the rotation angle of ISAR image[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(3): 521-523.
- [26] 王根原, 保铮. 逆合成孔径雷达运动补偿中包络对齐的新方法[J]. 电子学报, 1998, 26(6): 5-8.
Wang Genyuan, Bao Zheng. A new algorithm of range alignment in ISAR motion compensation[J]. Acta Electronica Sinica, 1998, 26(6): 5-8.
- [27] Huang D, Feng C, Tong N, et al. 2D spatial-variant phase errors compensation for ISAR imagery based on contrast maximisation[J]. Electronics Letters, 2016, 52(17): 1480-1482.
- [28] Zeng T, Wang R, Li F. SAR image autofocus utilizing minimum-entropy criterion[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1552-1556.
- [29] Liu Y, Xu S, Chen Z, et al. MTRC compensation in high-resolution ISAR imaging via improved polar format algorithm based on ICPF[C]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2014, 2014(1): 179.
- [30] Zhao J, Zhang M, Wang X. ISAR imaging algorithm of multiple targets with complex motions based on the fractional tap length keystone transform[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2018, 54(1): 64-76.
- [31] 赵佳. 复杂运动多目标 ISAR 成像研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
Zhao Jia. Study on ISAR Imaging of Multiple Maneuvering Targets[D]. Xi'an: Xidian University, 2017.
- [32] Wang B, Xu S, Wu W, et al. Adaptive ISAR imaging of maneuvering targets based on a modified fourier transform[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1370.
- [33] Shen N, Waeber B, Girata L. Project radiant outlaw[C]//Proceedings of SPIE on Airborne Reconnaissance XVIII. San Diego, America, 1994, p63-74.
- [34] 张群, 胡健, 罗迎, 等. 微动目标雷达特征提取、成像与识别研究进展[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 531-547.
Zhang Qun, Hu Jian, Luo Ying, et al. Research progresses in radar feature extraction, imaging, and recognition of target with micro-motions[J]. Journal of Radars. 2018, 7(5): 531-547.
- [35] 惠叶, 白雪茹. 基于 RID 序列的微动目标高分辨三维成像方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(5): 548-556.
Hui Ye, Bai Xueru. RID image series-based high-resolution three-dimensional imaging of micromotion targets[J]. Journal of Radars, 2018, 7(5): 548-556.
- [36] Musman S, Kerr D, Bachman C. Automatic recognition of ISAR ship images[J]. IEEE Transactions of Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(4): 1392-1404.
- [37] 董江曼, 李应岐, 邓飏. SAR 图像舰船目标的特征识别[J]. 陕西师范大学学报, 2004, (s1): 203-205.
Dong Jiangman, Li Yingqi, Deng Biao. Ship targets recognition by ship's feature in SAR image[J]. Journal of Shaanxi Normal University, 2004, (s1): 203-205.
- [38] 杜琳琳, 安成锦, 陈曾平. 一种舰船 ISAR 图像中心线特征提取新方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(5): 1023-1027.
Du Linlin, An Chengjin, Chen Zengping. A new algorithm for ship center line extraction in ISAR image[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(5): 1023-1027.
- [39] Lang H, Wu S. Ship Classification in moderate-resolution SAR image by naive geometric features-combined multiple kernel learning[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2017, 14(10): 1765-1769.
- [40] 张晰, 张杰, 纪永刚, 等. 基于结构特征的 SAR 船只类型识别能力分析[J]. 海洋学报(中文版), 2010, 32(1): 146-152.
Zhang Xi, Zhang Jie, Ji Yonggang, et al. The capability analysis of ship classification by structure feature using SAR images[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 32(1): 146-152.
- [41] Jiang M, Yang X, Dong Z, et al. Ship classification based on superstructure scattering features in SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(5): 616-620.
- [42] Wang C, Zhang H, Wu F, et al. A novel hierarchical ship classifier for COSMO-SkyMed SAR data[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2014, 11: 484-488.
- [43] Margarit G, Tabasco A. Ship classification in single-pol SAR images based on fuzzy logic[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 99: 1-10.
- [44] Jiang S, Wang C, Zhang H, et al. Civilian ship classification based on structure features in high resolution SAR images[C]//Proceedings of SPIE—Remote Sensing of the Marine Environment II, 2012, 8525: 852505.
- [45] Zhang H, Tian X, Wang C, et al. Merchant vessel classification based on scattering component analysis for COSMO-SkyMed SAR images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2013, 10(6): 1275-1279.
- [46] Wang C, Zhang H, Wu F, et al. Ship classification with deep learning using COSMO-SkyMed SAR data[C]//2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IEEE, 2017: 558-561.
- [47] Bentes C, Velotto D, Tings B. Ship classification in TerraSAR-X images with convolutional neural networks[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2018, 43(1): 258-266.
- [48] Lang H, Zhang J, Zhang X, et al. Ship classification in SAR image by joint feature and classifier selection[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(2): 212-216.

- [49] Liu P, Jin Y Q. A study of ship rotation effects on SAR image[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(6): 3132-3144.
- [50] 王昕, 郭宝锋, 尚朝轩. 基于二维 ISAR 图像序列的雷达目标三维重建方法[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(10): 2475-2480.
Wang Xin, Guo Baofeng, Shang Chaoxuan. 3D reconstruction of target geometry based on 2D data of inverse synthetic aperture radar images[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(10): 2475-2480.
- [51] 张颖康, 肖扬, 胡绍海. 非合作雷达目标散射中心关联和三维重建算法[J]. 电子与信息学报, 2011, 33(9): 2076-2082.
Zhang Ying kang, Xiao Yang, Hu Shaohai. Method of scattering centers association and 3D reconstruction for non-cooperative radar target[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2011, 33(9): 2076-2082.
- [52] 毕严先, 魏少明, 王俊, 等. 基于多假设跟踪的散射点关联和三维重建方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(6): 1219-1227.
Bi Yanxian, Wei Shaoming, Wang Jun, et al. New method of scatterers association and 3D reconstruction based on multi-hypothesis tracking[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(6): 1219-1227.
- [53] McFadden E. Three-dimensional reconstruction from ISAR sequences[C]//Radar Sensor Technology and Data Visualization. International Society for Optics and Photonics, 2002, 4744: 58-67.
- [54] 汤立波, 李道京, 吴一戎. 单天线 SAR 运动舰船目标三维形状重构[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 468-472.
Tang Libo, Li Daojing, Wu Yirong. Moving ship target 3D reconstruction with the single antenna SAR[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 55(6): 3132-3144.
- [55] 王勇, 陈雪飞. 基于稀疏孔径干涉 ISAR 技术的复杂运动舰船目标三维坐标恢复方法[J]. 雷达学报, 2018, 7(3): 320-334.
Wang Yong, Chen Xuefei. Three-dimensional geometry reconstruction of ship targets with complex motion for interferometric ISAR with sparse aperture [J]. Journal of Radars, 2018, 7(3): 320-334.
- [56] Wang Y, Chen X. 3-D interferometric inverse synthetic aperture radar imaging of ship target with complex motion[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(7): 3693-3708.

Review of ship target imaging and type recognition by unmanned rotorcraft-borne radar

ZHANG Xi, ZHANG Jie, MENG Jun-min

(First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China)

Received: Nov. 27, 2019

Key words: unmanned rotorcraft; UAV radar; ship target; three-dimensional imaging; type recognition

Abstract: Unmanned rotorcraft-borne imaging radar has the advantages of low cost, low requirements regarding takeoff and landing conditions, and a flexible flight attitude. This radar can be used for general surveys, detailed investigations, or long-term hovering gaze monitoring in hot spot areas. Unmanned rotorcraft-borne imaging radar is becoming increasingly important in marine reconnaissance and surveillance. In this paper, we review research progress on the rotor UAV radar hardware system, moving target imaging by UAV radar, ship-target type recognition, and the extraction of target 3D structure features. Our findings indicate that problem areas with this radar include defocusing when imaging moving ships, difficulty in the reconstruction of 3D structures, and low accuracy with respect to type recognition, all of which must be addressed to promote the development of related technologies.

(本文编辑: 赵卫红)