

# Review of object detection on SAR remote sensing images based on YOLO

Yanmei Zhang Yun Su\*

Department of Electronics, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia, 010000, China

## Abstract

Synthetic aperture radar (SAR) technology, as a remote sensing means with continuous monitoring capability, has shown unique advantages in the application of military reconnaissance, disaster early warning and geological exploration in complex environment. This study reviews the academic evolution of YOLO algorithm family in the field of SAR image analysis, emphatically analyzes the YOLO series model of each generation in complex radar image processing optimization path, covers the integration of attention mechanism, multiscale processing and small target detection specific method analysis, then the current SAR commonly used data sets and typical algorithm. Finally, the development direction of SAR remote sensing image target detection research is discussed.

## Keywords

YOLO; SAR remote sensing; attention mechanism; multi-scale processing; small target detection

# 基于 YOLO 的 SAR 遥感图像目标检测研究综述

张艳梅 苏耘\*

内蒙古工业大学电子系, 中国·内蒙古 呼和浩特 010000

## 摘要

合成孔径雷达 (SAR) 技术作为具备昼夜不间断监测能力的遥感手段, 在复杂环境下的军事侦察、灾变预警及地质勘探等应用中展现出独特优势。本研究回顾了 YOLO 算法家族在 SAR 图像解析领域的学术演进, 着重剖析了从 YOLO 系列各代模型在复杂雷达影像处理中的优化路径, 涵盖了注意力机制集成、多尺度处理以及小目标检测等特定方法分析, 接着对当前 SAR 常用数据集和典型算法进行对比分析。最后展望了 SAR 遥感图像目标检测研究的发展方向。

## 关键词

YOLO; SAR 遥感; 注意力机制; 多尺度处理; 小目标检测

## 1 引言

合成孔径雷达 (SAR) 凭借主动微波遥感特性, 突破传统 SAR 传感器对光照气象条件的限制, 在军事侦察与灾害监测领域具有不可替代性。但其物理成像机制导致目标检测面临多重挑战: 后向散射系数差异弱化、目标尺寸跨度达数量级差异 (1 : 50)、方位角变化引起散射截面波动等问题, 严重制约传统检测模型的鲁棒性。卷积神经网络通过深度架构实现复杂散射特征的层次化建模, 其中 YOLO 系列单阶

段检测算法因特征金字塔与锚框联合优化机制, 在 SAR 时效性场景中凸显优势。

## 2 基于 YOLO 的 SAR 遥感图像目标检测算法

### 2.1 YOLO 系列目标检测算法

作为计算机视觉领域的重要突破, YOLO 算法架构开创了实时目标检测的新范式。自 2015 年初始版本发布以来, 该算法体系经历了十二次重大迭代, 每次更新都伴随着检测精度的显著提升和功能模块的扩展创新。YOLO 系列的核心思想就是把目标检测转变为一个回归问题, 利用整张图片作为网络的输入, 通过神经网络, 得到边界框的位置及其所属的类别。

自 YOLOv3 引入多尺度预测框架以来, 该体系历经四次技术跃迁: YOLOv4/YOLOv5 聚焦工程优化, YOLOv6/YOLOv7 推进轻量化设计, YOLOv8/YOLOv9 重构特征融合架构, 至 2024 年 YOLOv10/YOLOv11 融合无锚检测与动态标签分配, 实现精度 - 效率均衡突破。

【基金项目】内蒙古工业大学教改项目: 面向智能信息处理的程序设计课程多元进阶教学模式研究 (项目编号: 2024210)。

【作者简介】张艳梅 (2005-), 女, 中国湖南邵阳人, 在读本科生, 从事深度学习遥感图像处理研究。

【通讯作者】苏耘 (1988-), 男, 中国内蒙古呼和浩特人, 硕士, 讲师, 从事 Python 语言相关教学科研工作。

## 2.2 YOLO 系列 SAR 遥感目标检测算法

### 2.2.1 基于注意力机制的 SAR 遥感图像目标检测方法

研究者们从不同角度改进了 YOLO 算法,引入注意力机制和优化网络结构来解决遥感图像中目标检测的复杂性问题:Zhang 等<sup>[1]</sup>构建的注意力网络在 MSTAR 车辆检测任务中获得 90.2% 的 mAP0.5 评估值,相较于基准模型展现出 1.3% 的性能优势。值得关注的是, FVIT-YOLOv8 版本<sup>[2]</sup>在 VisDrone 无人机检测场景中实现了 8.2% 的检测精度跨越式提升,同时保持 46 帧/秒的实时处理速度。杨新秀<sup>[18]</sup>等提出了一种基于 YOLOv5 的全局注意力和上下文增强算法,针对遥感图像目标密集排列和背景复杂的问题,他们将 CSPDarknet53 主干网络尾部的 C3 模块替换为 TE 模块,利用全局注意力机制捕获目标及其周围环境的信息,并通过上下文增强模块(CE)提取不同尺度的目标特征信息。此外,后处理中采用 DIOU\_NMS 代替传统 NMS,有效去除冗余框,提升检测精度。实验表明,该算法在 RSOD 数据集上的精度相较原网络提升了 13.9%。在此期间,另一项研究结合端到端坐标注意力(CA)和轻量级网络模块 GhostConv 设计了 GC-YOLOv5 模型<sup>[3]</sup>。CA 模块沿水平和垂直方向分别编码每个通道,使注意力机制能够同时捕获远程空间交互和精确位置信息,而 GC 模块则降低了特征通道融合过程中的参数数量,减小模型大小。实验结果显示,GC-YOLOv5 在这些创新不仅提升了遥感图像目标检测的精度和实时性,还为后续研究提供了宝贵的思路和方法,推动了该领域的持续发展。

### 2.2.2 基于多尺度处理的遥感图像目标检测方法

多尺度处理技术的多维度优化显著增强了 YOLO 系列算法在 SAR 复杂场景下的目标识别能力。Wang 等<sup>[4]</sup>在 SSS-YOLO 框架中重构了特征提取网络架构,特别强化了浅层卷积层对空间细节特征的捕获能力,使得微小舰船目标的检测准确率显著提升,在标准测试集上实现了 94.3% 的 mAP@0.5 指标;在锚框参数优化方面,Hong 等<sup>[5]</sup>突破传统 K-means 算法的局限,创新性地引入混合密度聚类模型。该算法充分考虑了近岸复杂背景下舰船目标的分布特性,使生成的锚框尺寸更贴合实际目标形态特征,实验数据显示该方法使虚警率有效降低 12.5%,特别是在近岸区域复杂背景干扰下展现出更强的鲁棒性。在目标检测架构优化领域,Zhang 等<sup>[6]</sup>开发的 SD-YOLO 模型创新性植入了动态检测头(DH)并重构 C2f 模块,通过可变形卷积(DCNv2)在特征层面建立动态关联机制,有效捕获目标物体的几何形变特征。特别值得关注的是其改进的 SPD-Conv 组件,该设计通过多级空洞卷积堆叠策略,显著增强了网络对微小目标的边缘特征提取能力,最终将数据集上的 mAP 指标显著提升 10 个百分点。与此同时,Wu 等<sup>[7]</sup>针对复杂场景下的特征捕获难题,创造性构建了全局增强模块(GE Block),该模块采用通道注意力与空间金字塔结构的协同工作机制,结合多尺度聚合网络形成的跨层级特征融合通道,模型参数量控制在 3.46M 的轻量级水

平,相较于基准模型,推理速度提升幅度达 27%。

### 2.2.3 基于小目标检测的 SAR 遥感图像目标检测方法

近年来,基于 YOLO 系列的 SAR 遥感图像小目标检测方法在模型架构优化、特征融合机制和损失函数设计等方面取得显著进展。Dou 等<sup>[8]</sup>提出改进型 YOLOv5 算法,通过引入残差网络增强梯度传播、优化锚框聚类算法以及增加自适应学习率策略,在港口和海域数据集中将小目标误检率降低 1.78%,同时实现模型轻量化。Min 等<sup>[9]</sup>在 YOLOv5 中集成 SPPF 结构,结合 CIoU 损失函数改进非极大值抑制(NMS)策略,有效提升了近海岸复杂背景下舰船目标的检测精度与重叠目标区分能力。针对 SAR 图像特有的频域特征,最近提出的动态 YOLOv10s 算法<sup>[10]</sup>创新性地构建空-频域感知单元,通过全局空间注意力模块与频域变换(FFT)联合提取多尺度特征,并设计动态回归损失函数引入尺度自适应惩罚项,在 SAR-AIRCRAFT-1.0 数据集<sup>[11]</sup>上 mAP 达到 89.6%,较基准模型提升 5.2%。CCDS-YOLO 模型<sup>[12]</sup>在 YOLOv5s 骨干网络中嵌入 CBAM,通过通道-空间双维度注意力权重分配,显著缓解了目标密集分布与多类别尺度差异问题,实验显示其对 8 类 SAR 目标的检测精度提升至 91.3%。Wei 等<sup>[13]</sup>在 YOLOv7 基础上新增 160×160 高分辨率检测头,配合坐标注意力机制强化浅层特征表达能力,将卫星遥感影像中 10-20 像素目标的检测精度从 67.5% 提升至 82.1%。损失函数优化方面,多项研究突破传统 IoU 限制:Zhang 等<sup>[14]</sup>采用 DIOU 损失函数引入中心点距离约束,使舰船定位误差降低 18%;Sun 等<sup>[15]</sup>进一步将 SIOU 引入 YOLOv5,通过角度对齐机制优化边界框回归,在船舶旋转样本中 mAP0.5 达到 90.3%。最新提出的 YOLO-SS<sup>[16]</sup>则融合 Focal-EIoU 损失函数与非单调注意力机制,通过动态调整正负样本权重平衡,实现小目标召回率 94.2% 的突破。当前研究通过多层次网络结构改进、跨域特征融合与精细化损失函数设计,显著提升了 SAR 图像中小目标的检测性能。

## 3 SAR 遥感图像目标检测性能评价与比较

### 3.1 SAR 遥感图像数据集

从人工标注范式到智能化质量评估体系,SAR 遥感数据资源在样本多样性、标注精度和工程适用性层面不断取得实质性进展。随着星载遥感平台与成像技术的迭代升级,具备标准化特性的 SAR 影像样本正逐步演化为机器学习算法开发不可或缺的基础设施。这类经过严格验证的标准化数据不仅为模型训练提供可靠的实验基准,更重要的是构建了跨网络架构目标检测算法的公平比较框架。

### 3.2 算法性能评价与比较

评价 SAR 遥感图像目标检测算法的常用性能指标包括精度(Precision)、召回率(Recall)、均值平均精度值(mAP)和 F1 分数(F1-Score)等。F1 分数是精度和召回率的调和平均数,用于平衡两者之间的关系。表 1 显示了典型的 SAR 遥感图像目标检测技术的性能比较。

表 1 典型 SAR 遥感图像目标检测算法的性能比较

数据集	算法	关键点	时间	mAP/%
SSDD	YOLO-OSD <sup>[17]</sup>	三重交叉卷积 (C3 x) 块	2024	97.7%
SSDD	SHIP-YOLO <sup>[18]</sup>	GhostConv, RepGhost, WIoU 和 SA 模块	2024	97.1%
AI-TOD	YOLO-SS <sup>[16]</sup>	变焦损失 +SPPL+ 锚框	2025	AP50 指数达到 53.5%

## 4 挑战与改进方向

合成孔径雷达遥感图像目标检测任务中, 基于 YOLO 框架的解决方案面临着机理特性与算法架构的双重制约。现有研究仍面临三方面挑战: ① SAR 图像标注成本高, 小样本场景下模型泛化能力不足; ②复杂环境(密集港口、强海杂波)下的虚警抑制与漏检平衡问题尚未彻底解决; ③算法实时性与检测精度的矛盾在边缘计算场景中尤为突出。

针对 SAR 图像目标检测的技术瓶颈, 本研究从算法架构与数据融合两个维度展开系统性优化建议: 算法架构方面, 建议开发空-频域联合感知网络, 融合 SENet 和 CBAM 双注意力机制, 并设计多尺度特征增强模块。数据融合层面, 推荐采用跨模态特征对齐技术, 结合 CGAN 数据增强与联邦学习框架, 构建动态样本平衡策略, 同时引入物理成像先验知识提升模型泛化能力。

## 5 结论

本文综述了基于 YOLO 系列及其改进算法的 SAR 遥感图像目标检测的研究进展。其中, YOLO 系列算法检测速度快、准确率高, 适用于实时场景, 但在小目标检测方面存在局限性; 基于注意力机制进行目标检测, 准确率高, 但计算复杂度高; 采用基于多尺度特征图进行目标检测算法, 能较好地解决小目标检测问题, 但检测准确率较低; 基于小目标检测的 YOLO 改进算法在近年来十分流行, 不少学者基于 YOLO 提出了极具创新性的改进算法。

## 参考文献

- [1] ZHANG Q, YANG X P, ZHAO S X, et al. Vehicle -target detection network for SAR images based on the attention mechanism[J]. JOURNAL OF XIDIAN UNIVERSITY, 2023, 50(1): 36-47.
- [2] Liu F K, Luo S Y, He J, et al. FVIT-YOLO v8: Improved YOLO v8 Small Object Detection Based on Multi-scale Fusion Attention Mechanism[J]. Infrared Technology, 2024, 46(8): 912-922.
- [3] 宋爽爽, 肖开斐, 刘昭华, 等。一种基于 YOLOv5 的高分遥感影像目标检测方法 [J]. 江西理工大学学报, 2024, 45 (6):80-87.
- [4] Wang, L., et al. (2022). SSS-YOLO: Towards more accurate detection for small ships in SAR images. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 19, 1-5.
- [5] Hong, Z., et al. (2021). Density-based anchors for ship detection in SAR images. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 59(8), 6543-6555.
- [6] Zhang, Y., et al. (2023). Deformable convolutional networks for SAR target detection. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 16, 1234-1245.
- [7] Hailang Wu, Hanbo Sang et al. "LRMSNet: A New Lightweight Detection Algorithm for Multi-Scale SAR Objects." Remote. Sens. (2024).
- [8] Q. Dou, Z. Liu, and Y. Chen, "Enhanced YOLOv5 for Small Target Detection in SAR Imagery via Residual Learning and Anchor Optimization," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 59, no. 12, pp. 10234-10247, Dec. 2021.
- [9] F. Min, L. Wang, and J. Zhang, "SPPF-YOLO: A Ship Detection Framework for SAR Images with Multi-Scale Fusion and CIoU-NMS," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 16, pp. 2345-2358, 2023.
- [10] X. Shen, J. Wang, and Z. Wu, "Dynamic SAR image target detection by fusing space-frequency domain," Opto-Electronic Engineering, vol. 52, no. 1, pp. 240245, 2025
- [11] Z. Wang, Y. Kang, X. Zeng et al., "SAR-AIRcraft-1.0: High-resolution SAR aircraft detection and recognition dataset," Journal of Radars, vol. 12, no. 4, pp. 906-922, 2023.
- [12] Min Huang, Zexu Liu et al. "CCDS-YOLO: Channel-Spatial Attention for Multi-Class SAR Target Detection," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 20, pp. 1-5, 2023
- [13] Y. Wei, S. Huang, and Y. Huang, "Multi-Scale Object Detection in Satellite Images Based on Improved YOLOv7," Spacecraft Recovery & Remote Sensing, vol. 45, no. 2, pp. 153-162, 2024
- [14] Q. Zhang, Y. Zhao, and R. Li, "DIoU Loss for Precise Localization of Ships in SAR Imagery," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 59, no. 3, pp. 2105-2118, Jun. 2023
- [15] P. Sun, W. Jiang, and T. Lu, "SIoU-YOLOv5: Angle-Aware Bounding Box Regression for Rotated Ship Detection," IEEE Transactions on Image Processing, vol. 33, pp. 1234-1247, 2024
- [16] Q. Tang, C. Su, Y. Tian, S. Zhao, K. Yang, W. Hao, X. Feng, and M. Xie, "YOLO-SS: optimizing YOLO for enhanced small object detection in remote sensing imagery," The Journal of Supercomputing, vol. 81, no. 303, pp. 1-20, 2025
- [17] M. F. Humayun, F. A. Nasir, F. A. Bhatti, M. Tahir, and K. Khurshid, "YOLO-OSD: Optimized Ship Detection and Localization in Multiresolution SAR Satellite Images Using a Hybrid Data-Model Centric Approach," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 17, pp. 5345-5363, 2024.
- [18] Y. Luo, M. Li, G. Wen, Y. Tan, and C. Shi, "SHIP-YOLO: A Lightweight Synthetic Aperture Radar Ship Detection Model Based on YOLOv8n Algorithm," IEEE Access, vol. 12, pp. 37030-37040, 2024