

文章编号: 2095-4980(2023)04-0572-06

基于成像特性与回归网络的卫星目标姿态估计

范磊, 王宏强*, 杨琪*, 曾旸, 邓彬

(国防科技大学 电子科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 基于逆合成孔径雷达(ISAR)图像序列的卫星目标姿态估计是一项具有重大意义且富有挑战性的任务。现有的估计方法通常是基于图像中关键角点或线性部件的提取, 较难满足实时需求, 且都未能充分利用目标成像特性先验。本文提出一种基于成像特性与回归网络的卫星目标姿态估计方法: 提前确定各种姿态下的卫星目标成像特性, 并作为后续数据集标注的理论基础; 区别于传统的分类问题, 建立一种适用于姿态估计的回归网络与估计框架。采用毫米波频段的电测仿真计算数据对所提方法进行验证, 结果表明, 单张图像中估计的平均姿态误差可以控制在 3.5° 以内。

关键词: 逆合成孔径雷达; 成像特性; 回归网络; 姿态估计; 实时预估

中图分类号: TN957.52

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2023040

Attitude estimation of satellite targets based on imaging characteristics and regression network

FAN Lei, WANG Hongqiang*, YANG Qi*, ZENG Yang, DENG Bin

(College of Electronic Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: Attitude estimation of satellite targets with the Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR) image sequences is a significant but challenging task. Existing estimation methods are normally focused on the extraction of critical corners or linear components from the image, which are hard to meet the real-time requirement and insufficient to exploit the prior of imaging characteristics. This paper presents a method for estimating the attitude of satellite targets based on imaging characteristics and regression networks. The imaging characteristics of satellite targets under various attitudes are firstly determined in advance and serve as the theoretical basis for subsequent dataset annotation. Thus, different from the traditional classification problem, a regression network and an estimation framework suited for attitude estimation are established. Finally, electro-magnetic simulation in millimeter frequency is carried out to validate that the proposed method can control the average attitude estimation error within 3.5° .

Keywords: Inverse Synthetic Aperture Radar(ISAR); imaging characteristics; regression network; attitude estimation; real-time prediction

瞬时姿态估计对监测在轨卫星目标飞行状态, 反演卫星目标意图等方面具有重要意义。通常正常运行的卫星目标, 其瞬时姿态由控制系统保持相对稳定。但一旦卫星目标失去控制, 其瞬时姿态将因旋转, 加速度等因素发生改变, 导致存在卫星碰撞危险^[1-3]。因此, 准确估计卫星目标运动状态, 尤其是瞬时姿态将显得尤为重要。

现有的姿态估计方法大多采用光学传感器或逆合成孔径雷达(ISAR)^[4-10]。相比于光学相机, ISAR可在几乎任何时间、任何天气中得到高分辨图像。基于ISAR图像序列方法进行姿态估计的关键在于提取图像中关键角点或线性成分。文献[4]提出一种基于关键点的提取网络提取卫星目标姿态的方法, 但这种方法对于某些特殊姿态不具有普适性; 而基于线性成分提取的方法, 需要对图像序列进行Hough变换或逆Radon变换^[5,7], 并与真值进行

收稿日期: 2023-02-18; 修回日期: 2023-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61921001; 61971427; 62035014; 62201591); 国家重点研发计划(2022YFB3902400; 2018YFB2202500)

*通信作者: 王宏强 email:oliverwhq@163.net; 杨琪 email:yangqi_nudt@163.com

透视变换,才能得到目标姿态,使得其难以满足实时估计瞬时姿态需求。此外,文献[9]提出基于ISAR与光学相机联合估计的方法,但这种方法依赖于正确的特征匹配。因此,如何快速准确地估计卫星目标瞬时姿态显得格外重要。

针对上述文献方法对卫星成像先验特性利用不充分,同时受文献[11]的启发,本文提出一种基于成像特性与回归网络的卫星目标姿态估计方法,以ALOS卫星目标为对象,通过毫米波频段的电磁仿真数据验证了所提方法的准确性与时效性,并对其进行特征可视化分析。

1 成像特性分析

图1为所提方法的整体处理框架,其主要由2部分组成:一部分为成像特性分析,另一部分为回归网络的构建。对于卫星目标的成像特性先验,首先通过卫星目标(ALOS卫星,如图2所示)公开数据进行几何构建,然后根据成像几何确定卫星目标的姿态先验,最后利用电磁计算数据得到相应回波,并依据ISAR成像算法^[12]得到先验姿态下的成像结果。

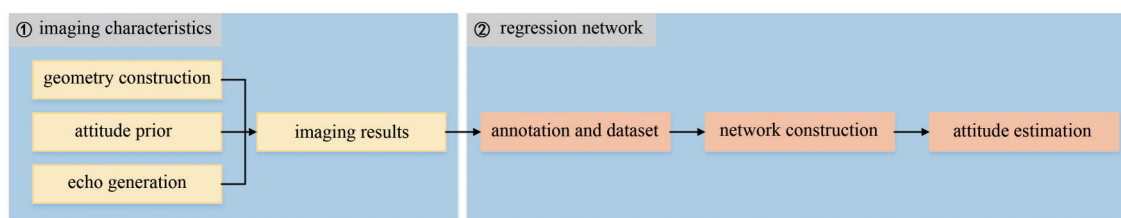


Fig.1 Overall framework of the proposed method

图1 所提方法的整体处理框架

对于卫星目标的瞬时姿态,可通过设置目标的欧拉角来实现,即偏航角、俯仰角和翻滚角,这3个角度由目标本体坐标系和目标轨道坐标系夹角决定。目标本体坐标系与目标轨道坐标系重合时,偏航角、俯仰角和翻滚角等于 0° 。为合理减少数据计算量,卫星的翻滚角在电磁计算中都设置为 0° ,同时,将偏航角和俯仰角的变化范围分别设置为 $0\sim 90^\circ$ 和 $0\sim 360^\circ$,间隔都为 5° ,从而得到1387张图像。仿真的频段为毫米波频段,成像分辨力约为 0.05 m 。

为便于直观地分析ALOS卫星目标的成像特性,图3为部分姿态角度(偏航角 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 和俯仰角 $20^\circ, 80^\circ, 140^\circ, 200^\circ, 240^\circ, 300^\circ$)下得到的成像结果。以第3行为例,当偏航角都为 60° 时,随着目标俯仰角改变,ALOS卫星目标的太阳能帆板能得到较好的四边形,但同时存在一定的图像扭曲,反映了目标在该姿态下与雷达视线的投影关系。反之,利用这些图像差异可以回归得到目标姿态角度。

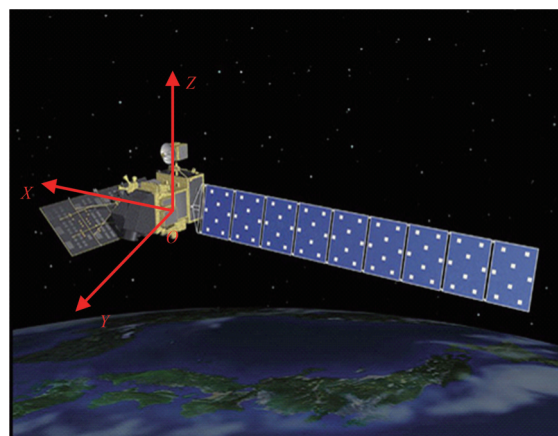


Fig.2 Schematic of ALOS satellite

图2 ALOS卫星示意图

2 回归网络构建

依据成像特性分析,可以得到带有标签的数据集(图像 X , 偏航角 Y_1 , 俯仰角 Y_2)。同时,与传统的分类问题不同,对卫星目标姿态估计属于回归问题,要求的特征提取难度相对更大。由于目前尚未有任何公开的姿态估计回归网络,本文提出一种简单但有效的回归网络,如图4所示。其主要有5个卷积模块(卷积层、批归一化层、ReLU激活层和最大池化层)和2个分支的全连接层(分别用于回归偏航角与俯仰角)。对于卷积模块,其卷积核长度依次为5,3,3,3和1,通道数依次为8,16,32,64和64。需要说明的是,卷积核长度为5是为了扩大视野,为1是为了减少数据量。对于全连接,其输出维度都为1。所提方法的损失函数由2部分组成:

$$L = L_{\text{yaw}} + \lambda L_{\text{pitch}} \quad (1)$$

式中: λ 为损失函数的平衡系数,本文依据实验经验将其定义为0.1,因为俯仰误差产生的损失大于偏航误差产生的损失; L_{yaw} 和 L_{pitch} 分别表示偏航和俯仰的损失,依据平均均方误差,其定义为:

$$L_{\text{yaw}} = \frac{1}{N} \sum_n (\hat{Y}_{1_n} - Y_{1_n})^2 \quad (2)$$

$$L_{\text{pitch}} = \frac{1}{N} \sum_n (\hat{Y}_{2_n} - Y_{2_n})^2 \quad (3)$$

式中： $\hat{Y}_{1_n}$ 和 $\hat{Y}_{2_n}$ 分别为回归网络对第 n 个样本偏航和俯仰的预测值； N 为样本总数。

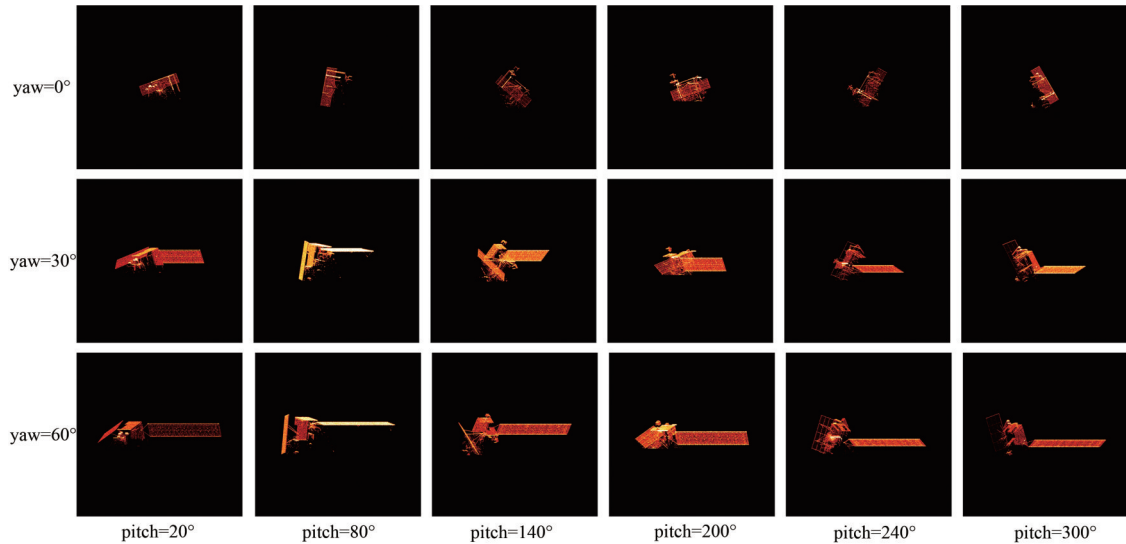


Fig.3 Imaging results of ALOS satellite under different attitudes
图3 ALOS卫星在不同姿态角下的成像结果

输入数据的维度为 $512 \times 512 \times 3$ 。输出数据的维度为 2×1 。训练集、验证集、测试集按照7:1:2的比例进行划分，并运用如对比度增强、加噪声等方法进行数据扩增。初始学习率为0.004，每隔20个训练周期下降0.0005。总的训练周期设置为200。优化器选用随机梯度下降法，权重衰减和动量分别设置为0.0001和0.9。

3 实验结果与分析

为综合地量化网络对偏航角和俯仰角的预测准确性，定义了偏航误差、俯仰误差和平均姿态误差，如表1所示。实验结果表明，偏航角的误差为 1.28° ，而俯仰角的误差高达 10° 左右。对此进一步分析其原因，将俯仰范围分段，即以 30° 为一个范围，因此总共12个区间。各个区间的估计误差结果如图5所示。不难发现，偏航角的最大估计误差范围出现在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 与 $330^\circ \sim 360^\circ$ ，但最大误差值仍然只有 1.6° 左右；俯仰角的最大估计误差范围与偏航相同，但这2个区间的最大差值高达 30° 左右。对此推测是，对于该姿态下的成像结果，所提网络提取的特征程度不充分，同时这些特殊姿态下的成像结果比较类似，特征提取较难，导致出现较大的估计误差。需要说明的是，目前这些估计都是从单张毫米波频段ISAR图像中直接预测的，如果拓展到太赫兹频段，因分辨力提升(0.01 m)，短波长造成的粗糙特性等可以增强成像，从而能更准确

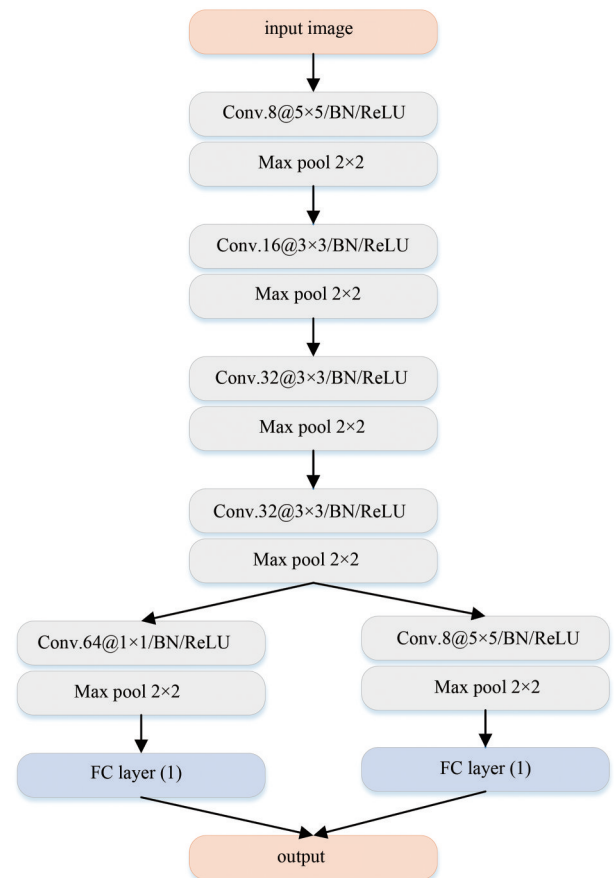


Fig.4 Overall network architecture
图4 整体的网络结构

地估计卫星目标的瞬时刻度。图 6 为随机挑选的 3 个样本及其估计误差结果，可以发现与上述分析基本一致。同时，一旦网络训练完成，每帧图像的预测时间为 0.08 s(实验设备为基于 Pytorch 框架的英伟达 RTX 2080Ti GPU 卡)。

表 1 关于偏航和俯仰的平均估计误差
Table1 Average estimation error regarding yaw and pitch

	yaw	pitch	pitch except two ranges	average error
average estimation error/(°)	1.28	10.03	5.51	3.39

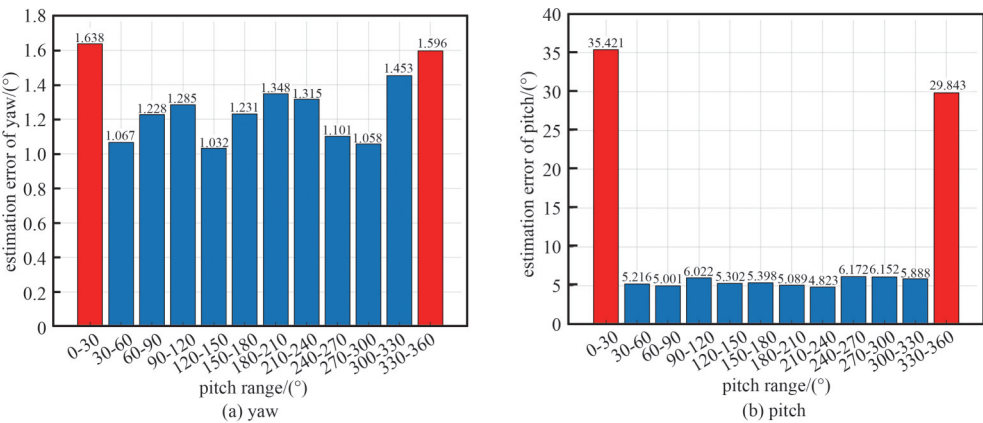


Fig.5 Estimation error of yaw and pitch under different pitch ranges
图 5 不同俯仰角度范围下偏航和俯仰角度估计误差

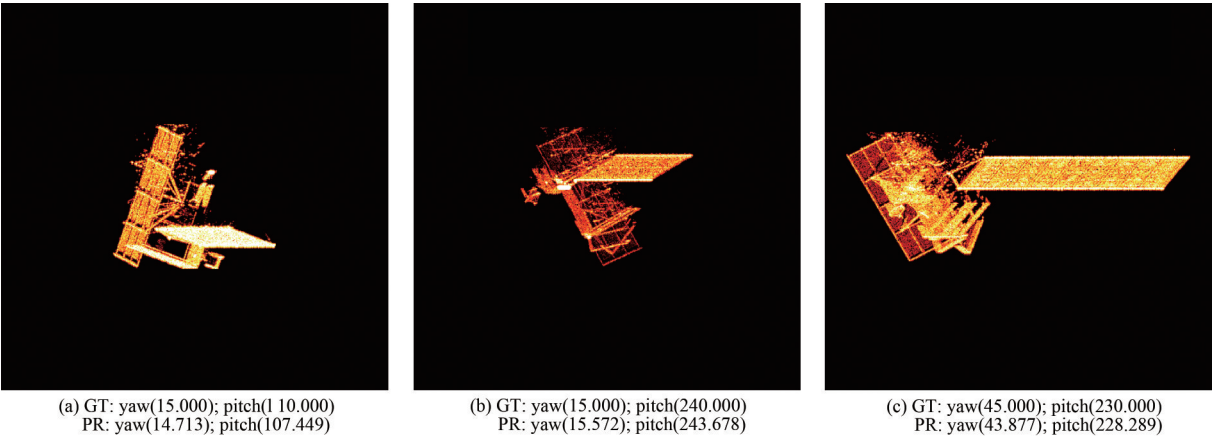


Fig.6 Prediction of three samples selected randomly
图 6 随机挑选的 3 个样本估计样例

最后，基于 Grad-CAM 技术^[13]，对偏航和俯仰角的预测值进行反向激活，得到各个卷积层关于提取区域特征的热力图，作为所提网络的部分可解释性。图 7 为 2 个随机挑选样本(偏航 15°，俯仰 355°；偏航 45°，俯仰 185°)的热力图，从左到右依次对应所提网络从上到下的 5 个卷积层。可以推断出：a) 浅层特征可以提取到一些关键点或线结构的特征；高维更趋于局部结果或整体结果；b) 偏航分支特征能较好地包裹完整目标，使其信息没有丢失；而俯仰分支在第 5 层特征中相比于第 4 层特征，出现特征丢失，这也是其估计误差较大的原因。推测其主要源于本数据集下俯仰需要估计的范围更大，其特征提取需求更为准确。

4 结论

本文提出一种基于成像特性与回归网络的卫星目标姿态估计方法，能实时地从单张毫米波频段 ISAR 图像中预测卫星目标瞬时刻度，平均姿态误差可控制在 3.5°左右，耗时约为 0.08 s。基于姿态先验对应的成像结果，卫星目标各个姿态下的成像特性得到确定，进而获得带标签的数据集。通过设计相应的回归网络，得到卫星目标的瞬时刻度角。未来的工作中，考虑将 ISAR 图像从毫米波频段拓展至太赫兹频段，利用太赫兹频段分辨率更高，短波长引起的粗糙特性等，可以得到更优的图像质量，将有望实现预估的平均姿态估计误差控制在 1°以内。

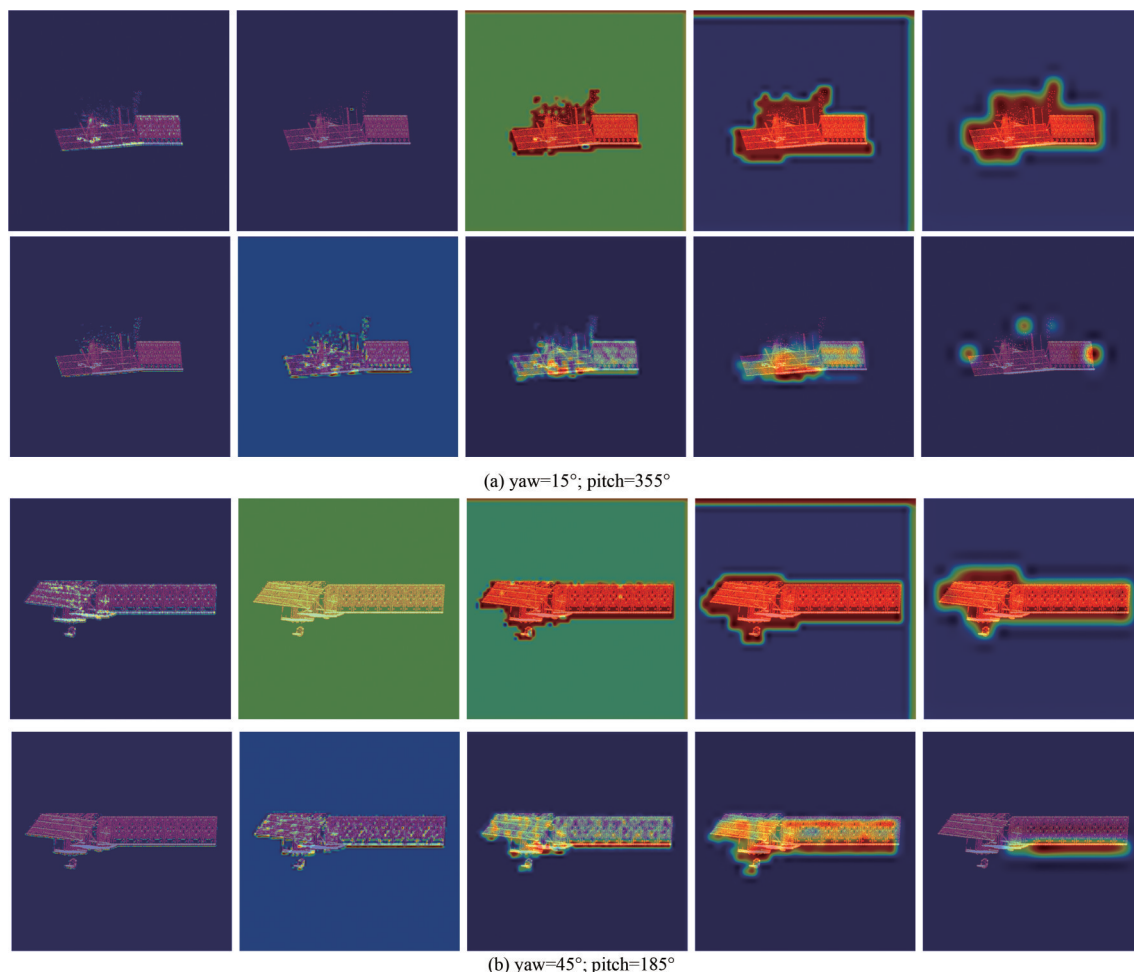


Fig.7 Feature visualization of two samples regarding yaw and pitch
图7 两个样本关于偏航和俯仰的特征可视化

致 谢：感谢东南大学信息科学与工程学院陈琿副教授提供计算数据。

参考文献：

- [1] 王宏强,邓彬,秦玉亮. 太赫兹雷达技术[J]. 雷达学报, 2018,1(7):1-21. (WANG Hongqiang,DENG Bin,QIN Yuliang. Review of terahertz radar technology[J]. Journal of Radars, 2018,7(1):1-21.)
- [2] 吴福伟,刘振华,李大圣,等. 220 GHz 太赫兹合成孔径雷达[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017,15(3):368-371. (WU Fuwei, LIU Zhenhua,LI Dasheng,et al. A 220 GHz terahertz Synthetic Aperture Radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(3):368-371.)
- [3] 刘盛纲,钟任斌. 太赫兹科学技术及其应用的新发展[J]. 电子科技大学学报, 2009,38(5):481-486. (LIU Shenggang,ZHONG Renbin. Recent development of terahertz science and technology and it's applications[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2009,38(5):481-486.)
- [4] XIE Pengfei,ZHANG Lei,DU Chuan,et al. Space target attitude estimation from ISAR image sequences with key point extraction network[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2021(28):1041-1045.
- [5] 霍凯,寇鹏,刘永祥,等. 序列 ISAR 像复杂结构航天器在轨姿态估计[J/OL]. 系统工程与电子技术, 2022-04-06. (HUO Kai, KOU Peng, LIU Yongxiang, et al. Attitude estimation method of spacecraft in orbit with complex structure using sequential ISAR images[J/OL]. Systems Engineering and Electronics, 2022-04-06.)
- [6] SHARMA S,DAMICO S. Neural network-based pose estimation for noncooperative spacecraft rendezvous[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2020,56(6):4638-4658.
- [7] ZHOU Yejian,ZHANG Lei,CAO Yunhe,et al. Attitude estimation and geometry reconstruction of satellite targets based on ISAR image sequence interpretation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019,55(4):1698-1711.

- [8] ZHOU Yejian, LI Weifeng, MA Yan, et al. Attitude estimation of on-orbit spacecraft based on the u-linked network[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2022(19):1–5.
- [9] DU Rongzhen, LIU Lei, BAI Xueru, et al. Instantaneous attitude estimation of spacecraft utilizing joint optical-and-ISAR observation[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60):1–14.
- [10] LIU L, ZHOU Z, ZHOU F, et al. A new 3D geometry reconstruction method of space target utilizing the scatterer energy accumulation of ISAR image sequence[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 12(58):8345–8357.
- [11] FAN Lei, WANG Hongqiang, YANG Qi, et al. Fast detection and reconstruction of tank barrels based on component prior and deep neural network in the terahertz regime[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2022(60):1–17.
- [12] 保铮, 邢孟道, 王彤. 雷达成像技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004. (BAO Zheng, XING Mengdao, WANG Tong. Radar imaging technology[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2004.)
- [13] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-cam: visual explanations from deep networks via gradient-based localization[J]. International Journal of Computer Vision, 2019, 2(128):336–359.

作者简介:

范磊(1997–), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为太赫兹雷达成像与深度学习. email: fanlei2point@163.com.

王宏强(1970–), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为雷达目标探测与成像、太赫兹技术.

杨琪(1989–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹频段目标特性、太赫兹雷达技术及应用、空间目标成像与识别研究.

曾旻(1989–), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为太赫兹频段目标特性.

邓彬(1981–), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为太赫兹雷达成像.