

文章编号: 1671-7449(2024)01-0041-07

基于连续波SAR成像模型的输电线路悬垂绝缘子风偏角识别方法

李萍

(黑龙江工程学院 电气与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为了在恶劣环境中保证输电线路悬垂绝缘子风偏角识别结果可信, 提出基于连续波合成孔径雷达(SAR)成像模型的输电线路悬垂绝缘子风偏角识别方法。基于连续波SAR成像模型, 持续发射脉冲信号, 通过基于位置标定的绝缘子风偏角识别方法, 定位绝缘子目标区域中绝缘子串2个端点的像素坐标, 生成绝缘子SAR图像。采用基于改进频率变标算法的连续波SAR成像处理方法, 缓解绝缘子SAR图像失焦现象, 进行SAR图像分割, 获取生成绝缘子SAR图像中绝缘子目标区域, 并结合“两点确定一条直线”标准识别绝缘子串的风偏角。实验验证: 所提方法在恶劣环境中像素拟合效果较佳, 对绝缘子风偏角识别结果和实际风偏角的风偏度信息高度匹配。

关键词: 连续波; SAR成像模型; 输电线路; 悬垂绝缘子; 图像分割; 风偏角识别

中图分类号: TM85

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7449.2024.01.006

引用格式: 李萍. 基于连续波SAR成像模型的输电线路悬垂绝缘子风偏角识别方法[J]. 测试技术学报, 2024, 38(1): 41-47.

LI Ping. Identification method of wind deflection angle of transmission line suspension insulators based on continuous wave SAR imaging model[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2024, 38(1): 41-47.

Identification Method of Wind Deflection Angle of Transmission Line Suspension Insulators Based on Continuous Wave SAR Imaging Model

LI Ping

(College of Electrical and Information Engineering, Heilongjiang Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to ensure the reliability of the wind deflection angle identification results of suspension insulators on transmission lines in harsh environments, a wind deflection angle identification method of suspension insulators on transmission lines based on continuous wave SAR imaging model is proposed. Based on the continuous wave SAR imaging model, the pulse signal is continuously transmitted, and the pixel coordinates of the two ends of the insulator string in the insulator target area are located through the identification method of the wind deflection angle of the insulator based on the position calibration, and the insulator SAR image is generated. The continuous wave SAR imaging processing method based on the improved frequency scaling algorithm is used to alleviate the defocus phenomenon of the insulator SAR image, and the SAR image is segmented. Acquire the insulator target area in the generated insulator SAR

收稿日期: 2022-11-25

作者简介: 李萍(1973—), 女, 副教授, 主要从事电源技术, 逆变器变换控制技术和电能质量等研究。E-mail: chaoluzai512@163.com。

的方式提取绝缘子目标特征,完成悬垂绝缘子 SAR 图像分割^[7-8],获取悬垂绝缘子目标区域特征。图 2 为 U-net 网络结构示意图。

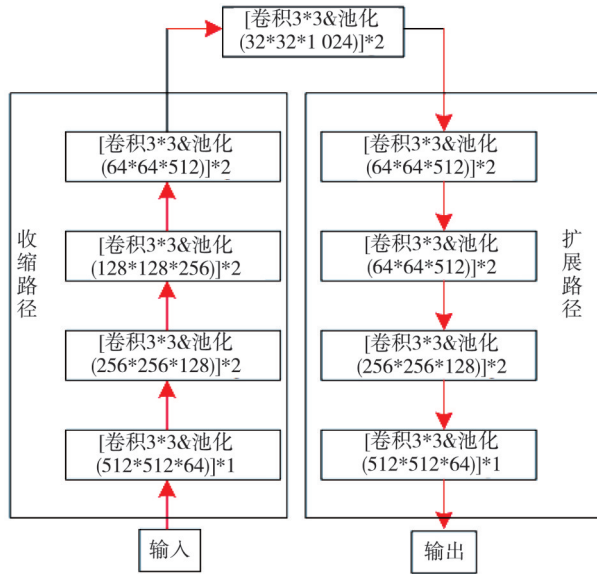


图 2 U-net 网络结构

Fig. 2 U-net network structure

为了保证 U-net 网络具备精准分割悬垂绝缘子的能力,本文设置 U-net 网络训练的损失函数

$$I(\lambda) = -\frac{1}{M} \left[\sum_{i=1}^h \bar{r}_i \{ \xi_j = i \} \ln \sum_{i=1}^h \lambda_j^T \xi_j \right], \quad (1)$$

式中: M 为悬垂绝缘子 SAR 图像 \bar{r}_i 像素的数量; h 为分割次数; λ 为分割偏移度; T 为分割维度; 针对 \bar{r}_i 而言, 其像素 j 和 j 所属类型(背景、绝缘子)的种类标记为 (ζ_j, ξ_j) 。

将已知分割结果的悬垂绝缘子 SAR 图像作为训练样本,输入至 U-net 网络执行图像分割,运算 U-net 网络对悬垂绝缘子 SAR 图像分割结构的损失函数,以此分析网络对悬垂绝缘子 SAR 图像分割的能力是否可满足高精度要求。

网络训练完毕后,卷积层会将 \bar{r}_i 执行卷积处理,在网络结构各个上采样环节中,以反卷积的方式多次提取 \bar{r}_i 的像素特征信息,最后在输出层使用 Softmax 分类器判断 \bar{r}_i 的各个像素特征所属类型,完成图像分割。分割结果为

$$q_h(\bar{r}_i) = \frac{\exp(z_h(\bar{r}_i))}{\sum_{i=1}^2 z_h(\bar{r}_i)}, \quad (2)$$

式中: $z_h(\bar{r}_i)$ 为 \bar{r}_i 各个像素点所属类型的分值; l 为 \bar{r}_i 的背景或绝缘子目标区域的最终类别信息。

1.2 基于位置标定的绝缘子风偏角识别方法

设置连续波 SAR 成像模型坐标系为 $Q_1(x_1, y_1, z_1)$, 绝缘子坐标系为 (x_2, y_2, z_2) , 连续波 SAR 成像坐标系 (x_1, y_1, z_1) 和 $q_h(\bar{r}_i)$ 的平面属于平行关系。连续波 SAR 标定关系如图 3 所示。

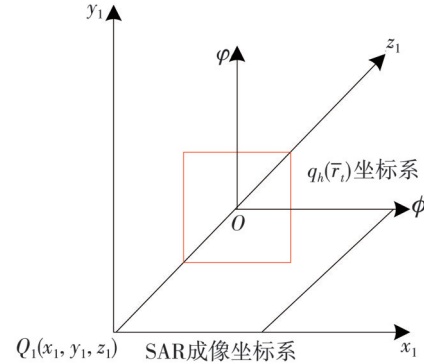


图 3 连续波 SAR 标定关系

Fig. 3 Calibration relationship of continuous wave SAR

图 3 中,设置平面原点为 O , 成像平面与 Z 轴的交点为 $O(\phi_o, \varphi_o)$, 此点能够体现 $q_h(\bar{r}_i)$ 和连续波 SAR 成像坐标系之间的透视投影关系。绝缘子构件的像素图像坐标系为 (ϕ, φ) , 在 (ϕ, φ) 中确定绝缘子串两个端点坐标,结合“两点确定一条直线”可知,斜率角即为绝缘子串的风偏角,设置风偏角为 α , 风偏度为 ϖ 。

$$\alpha = \arctan \frac{x' - x''}{y' - y''}, \quad (3)$$

式中: 绝缘子串两个端点的像素位置坐标为 (x', y') 、 (x'', y'') 。

$$\varpi = \vartheta \sin \alpha, \quad (4)$$

式中: ϑ 为已知的绝缘子串长度。

1.3 连续波 SAR 定位数据校正

因调频连续波 SAR 成像是在某脉冲重复间隔中多次连续的发射信号,在此过程中并不需要耗费较高的峰值功率。但在成像过程中,调频连续波 SAR 持续发射脉冲,在收发天线分离的状态下,扫频时间过多会导致雷达发射信号时,悬垂绝缘子目标和雷达平台之间距离存在动态变化问题,此问题属于距离徙动空变性问题,雷达的持续运动会导致距离向发生多普勒频移问题^[9-11],此时多普勒频移会导致目标的回波包络出现异常变化,使 SAR 成像的目标信息存在失焦状态,从而造成图像失真。

为此,上位机通过基于改进频率变标算法的连续波SAR成像处理方法,在校正多普勒频移与频率变标、残余时频相位之后,通过逆频率变标、距离压缩操作,保证成像结果不存在异常问题。

连续波SAR成像模型中,雷达发射信号设为

$$r_1(t_c) = B(t_c) \exp\left(2\pi\left(g_c t_c + \frac{h_c t_c^2}{2} + \alpha(t_c)\right)\right), \quad (5)$$

式中: $B(t_c)$, g_c 为雷达发射的脉冲信号包络、载频; h_c , t_c 为调频信号的调频率、距离维快时间; $\alpha(t_c)$ 为连续波SAR成像时,因多普勒频移问题而出现的非线性成像误差。雷达回波信号的延迟时间

$$\epsilon(t_c, t_n) = \frac{2}{d} \sqrt{S_0^2 + (ut_n + ut_c)^2}, \quad (6)$$

式中: u , d 分别为载机飞行速度和光速; t_n 为方位慢时间; S_0 为雷达波速中心线扫描悬垂绝缘子的最近斜距。连续发射信号时,避免 t_c , t_n 出现耦合效应,将 $\epsilon(t_c, t_n)$ 执行泰勒展开处理,然后执行方位傅里叶转换获取差频信号 $R_{\text{ig}}(t_c, g_e)$ 。

$$R_{\text{ig}}(t_c, g_e) = \exp\left(-\frac{4\pi S_0 \delta}{\delta}\right) \exp\left(-\frac{4\pi h_c S_0}{d\delta}\right) \cdot \text{src}(t_c, g_e, S_0) \otimes \exp(\pi h_c t_c^2) \exp(-2\pi(\alpha(t_c) - \delta\left(t_c - \frac{2S_0}{d\delta}\right) \exp\left(h_c\left(t_c - \frac{2S_0}{d\delta}\right)\right)), \quad (7)$$

式中: δ 为距离变化的尺度因子; $\text{src}(t_c, g_e, S_0)$ 为距离压缩项。

$$\text{src}(t_c, g_e, S_0) \approx \exp\left(-\frac{2\pi S_0 h_c^2 \delta^2 - 1}{d^2 \delta^3} t_c^2\right) \cdot \exp\left(-\frac{2\pi S_0 h_c^3 \delta^2 - 1}{d^3 \delta^5} t_c^2\right), \quad (8)$$

式中: $\left(-\frac{4\pi S_0 \delta}{\delta}\right)$ 为悬垂绝缘子SAR成像时的方位历程信息,主要体现绝缘子目标方位信息的聚焦性; $\left(-\frac{4\pi h_c S_0}{d\delta}\right)$ 为距离向调制信号,主要体现绝缘子距离向的聚焦性; $(\pi h_c t_c^2)$ 为残余相位误差项,此项对 $\left(-\frac{4\pi S_0 \delta}{\delta}\right)$ 存在干扰作用; $\alpha(t_c) - \delta\left(t_c - \frac{2S_0}{d\delta}\right)$ 为信号频率非线性误差项; $h_c\left(t_c - \frac{2S_0}{d\delta}\right)$ 为相位误差。此类误差会导致悬垂绝缘子

SAR成像时出现主瓣展宽,旁瓣电平变大,从而使成像效果受到影响^[12],为此,本文使用基于改进频率变标算法的连续波SAR成像处理方法,保证悬垂绝缘子SAR图像质量。

基于改进频率变标算法的连续波SAR成像处理方法步骤为:

1) 多普勒频移校正与频率变标

频率变标也称为校正悬垂绝缘子SAR成像时的距离徙动空变性,将悬垂绝缘子SAR成像时,雷达脉冲信号的距离时域、方位频域和相位函数 $K_{\text{FS}}(t_c, g_e)$ 相乘,便可去除连续波SAR成像时脉冲信号的多普勒频移项,完成频率变标^[13]。

$$K_{\text{FS}}(t_c, g_e) = \exp\left[-2\pi g_e \hat{t}_c + \pi \eta \hat{t}_c^2 (1 - \delta(g_e))\right], \quad (9)$$

式中: η 为距离向调频率; 式中首相与尾相依次为校正多普勒频移的相位项与频率变标相位项^[14]。

2) 校正残余时频相位

将步骤1)校正后的脉冲信号转换至距离频率域,和相位函数 $K_{\text{RVP}}(t_c, g_e)$ 相乘,校正SAR成像的脉冲信号残余时频相位。

$$K_{\text{RVP}}(t_c, g_e) = \exp\left[-\frac{\pi}{\eta(g_e)}\right]. \quad (10)$$

3) 逆频率变标

在距离时域、方位频域和参考函数 $K_{\text{IFS}}(t_c, g_b)$ 相乘,执行逆频率变标处理。

$$K_{\text{IFS}}(t_c, g_b) = \exp[\pi \eta t_c \delta(g_e)]. \quad (11)$$

4) 距离压缩

使用式(7)所示的参考函数 $K_{\text{SRC}}(t_c, g_b, S_0)$,执行悬垂绝缘子和雷达之间距离压缩。

$$K_{\text{SRC}}(t_c, g_b, S_0) = \text{src}\left(\delta t_c - \frac{2S_{\text{ref}}}{d}, g_e; R_0\right), \quad (12)$$

式中: S_{ref} 为悬垂绝缘子和雷达之间参考距离; src 为距离压缩项。

5) 校正距离徙动

设置距离徙动校正相位函数为

$$K_{\text{BV}}(t_c, g_b) = \exp\left[\frac{4\pi \eta}{d} S_{\text{ref}} \left(\frac{1}{\delta} - 1\right) \left(\delta t_c - \frac{2S_{\text{ref}}}{d}\right)\right]. \quad (13)$$

校正完毕的数据需转换至二维频率域,和相位保持函数 $K_{\text{RPC}}(t_c, g_b)$ 相乘。

$$K_{\text{RPC}}(t_c, g_b) = \exp\left[\frac{4\pi S_{\text{ref}} g_e}{d \delta}\right]. \quad (14)$$

此时, 信号在距离多普勒域的表达模式为

$$r'_1(t_c) = \exp\left[-\frac{4\pi S_{ref}}{\delta}\right] \cdot \sin d \left[\pi \frac{t_c}{\delta} \left(\frac{2\eta}{d} (S_0 - S_{ref}) \right) \right], \quad (15)$$

式中: 方向匹配函数为

$$K_{AZC}(g_b; S_0) = \exp\left[\frac{4\pi S_0 \delta}{d}\right]. \quad (16)$$

方位压缩需要将 $r'_1(t_c)$ 和 $K_{AZC}(g_b; S_0)$ 相乘, 再执行方位向的逆傅里叶转换^[15], 转换至方位时域, 便可获取聚焦的绝缘子 SAR 图像

$$\bar{r}_1 = \sin d \left[\pi \frac{t_c}{\delta} \left(\frac{2\eta}{d} (S_0 - S_{ref}) \right) \right] \cdot \sin d (\pi \Delta g_b t_n), \quad (17)$$

式中: Δg_b 为方位向多普勒带宽。

2 实验分析

为分析本文方法是否适用于输电线路悬垂绝缘子风偏角识别问题, 以某区域的输电线路巡检工作为实验内容。此输电线路巡检时主要将 SAR 设置在无人机底部, 实验中将此巡检工作中的雷达信号设为 450 MHz, 脉冲宽度设为 17 μ s, SAR 图像包括 0.5 m 地面距离分辨率和 0.5 m 方位角分辨率。实验中连续波 SAR 成像模型的具体信息如表 1 所示。本文方法在识别绝缘子风偏角信息时, 天气情况恶劣, 在此条件下测试本文方法具体应用效果。实验中绝缘子材料的弹性模量为 5 MPa, 泊松比为 0.4, 绝缘子详情如表 2 所示。

表 1 连续波 SAR 成像模型的具体信息

Tab. 1 Specific information of continuous wave SAR imaging model

信息类型	数值
载频/GHz	36
场景中心距离/m	978.6
脉冲宽度/ms	2.6
信号带宽/MHz	505
非线性度/%	0.07
采样率/Msps	15

表 2 实验中绝缘子详情

Tab. 2 Details of insulators in the test

参数类型	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1910
长度/cm	150
直径/mm	45

本文方法采用基于改进频率变标算法的连续波 SAR 成像模型, 采集输电线路悬垂绝缘子的 SAR 图像时, 绝缘子目标信息和成像信息如图 4 所示。

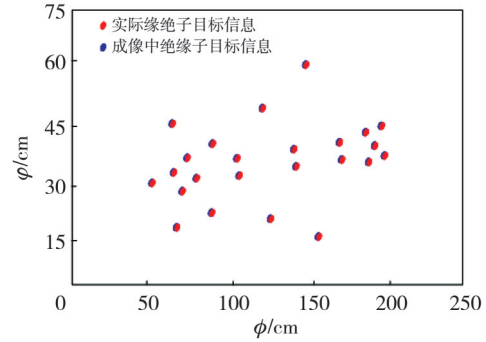
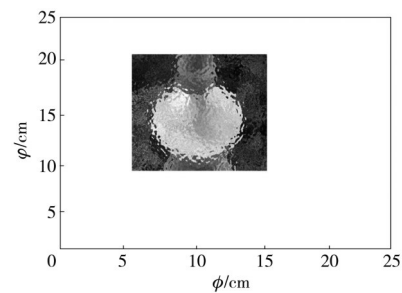


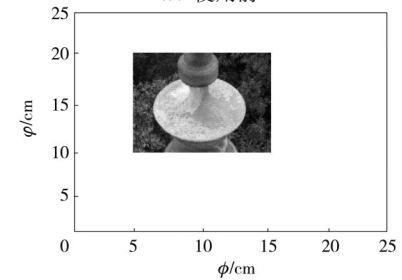
图 4 连续波 SAR 成像效果

Fig. 4 Continuous wave SAR imaging effect

以悬垂绝缘子一个端点为例, 使用改进频率变标算法前后的 SAR 图像详情如图 5 所示。



(a) 使用前



(b) 使用后

图 5 改进频率变标算法使用前后 SAR 图像详情

Fig. 5 SAR image details before and after the use of the improved frequency scaling algorithm

由图 4 可知, 实际绝缘子目标点信息和本文方法成像结果相符, 说明本文方法对输电线路悬垂绝缘子成像时, 对绝缘子目标信息的聚焦能力较好, 能够有效聚焦目标信息, 完成连续波 SAR 成像。且图 5 显示, 本文方法能够在成像过程中, 以频率变标的方式保证成像结果不存在多普勒频移问题。

本文方法在获取输电线路悬垂绝缘子的连续波 SAR 图像后, 使用基于 U-net 的悬垂绝缘子 SAR 图像分割算法, 分割输电线路悬垂绝缘子的连续波 SAR 图像, 提取绝缘子目标区域, 测试分割效果, 本文方法分割结果和实际绝缘子区域的像素拟合效果如图 6 所示。

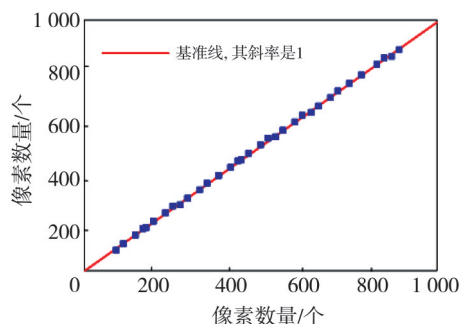


图6 分割结果和实际绝缘子区域的像素拟合效果

Fig. 6 Pixel fitting effect of segmentation result and actual insulator area

由图6可知,本文方法分割结果和实际绝缘子区域的像素拟合效果极好,分割的绝缘子区域像素处于基准线上。

输电线路悬垂绝缘子区域分割后,本文通过基于位置标定的绝缘子风偏角识别方法识别的风偏角信息如图7所示。

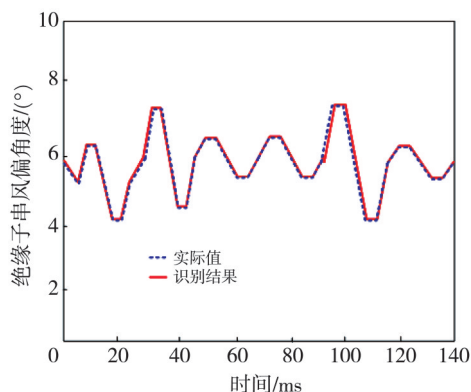


图7 输电线路悬垂绝缘子风偏角识别效果

Fig. 7 Identification effect of wind deflection angle of suspension insulator of transmission line

由图7可见,本文方法识别的输电线路悬垂绝缘子风偏角信息误差极小,和实际风偏角的风偏度信息高度匹配。

3 结论

为了识别输电线路悬垂绝缘子风偏角,研究了一种基于连续波SAR成像模型的输电线路悬垂绝缘子风偏角识别方法,此方法的创新之处在于:

1) 有效采集输电线路悬垂绝缘子的SAR图像,并在成像时使用基于改进频率变标算法的连续波SAR成像处理方法,保证输电线路悬垂绝缘子SAR图像的聚焦效果。

2) 使用U-net网络分割SAR图像,应用基于位置标定的绝缘子风偏角识别方法,结合绝缘

子目标区域中像素的坐标信息,提取绝缘子目标区域,快速识别输电线路悬垂绝缘子风偏角,以此减少后续风偏角识别的工作量。

参考文献:

- [1] 周湛, 张志坤, 赵振刚, 等. 基于光纤传感的输电线路悬垂绝缘子风偏角监测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 81-87.
ZHOU Zhan, ZHANG Zhikun, ZHAO Zhengang, et al. Monitoring of wind deflection angle of suspension insulator string for power lines based on optical fiber sensing [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 81-87. (in Chinese)
- [2] 程唯, 晏致涛, 游溢, 等. 绝缘子串非线性风偏可靠度研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(22): 123-129.
CHENG Wei, YAN Zhitao, YOU Yi, et al. Study on nonlinear windage yaw reliability of insulator string [J]. Building Structure, 2019, 49(22): 123-129. (in Chinese)
- [3] 向真, 李勋, 裴慧坤, 等. 绝缘子串动态风偏角的分布式监测[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 216-220.
XIANG Zhen, LI Xun, PEI Huikun, et al. The distributed monitoring of the dynamic windage yaw angle of insulator string [J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 216-220. (in Chinese)
- [4] 眭嘉里, 严波, 林翔, 等. 基于BP神经网络的悬垂绝缘子串风偏角预测模型[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(8): 114-124.
SUI Jiali, YAN Bo, LIN Xiang, et al. BP neural network model for dynamic swing angle of suspended insulator string [J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(8): 114-124. (in Chinese)
- [5] 胡鑫, 王璋奇, 田瑞. 坡型风攻角下绝缘子串动态风偏响应特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 289-297.
HU Xin, WANG Zhangqi, TIAN Rui. Dynamic wind-induced deflection response characteristics of insulator string under slope wind attack angle [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 289-297. (in Chinese)
- [6] 沈龙, 冯婷, 梁仕斌, 等. 输电线路绝缘子串偏角的光纤监测研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 75-81.
SHEN Long, FENG Ting, LIANG Shibing, et al. Research on the optical fiber monitoring for windage angle of transmission line insulator string [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 75-81. (in Chinese)
- [7] 国少卿, 何姿, 陈如山. 基于聚合型涡旋电磁波束的三维SAR成像[J]. 电波科学学报, 2022, 37(3):

- 457-464.
- GUO Shaoqing, HE Zi, CHEN Rushan. Three dimensional SAR imaging based on the focused electromagnetic vortex beam[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2022, 37(3): 457-464. (in Chinese)
- [8] 刘鑫月, 陈瑞, 王坤峰, 等. 基于平行图像与深度学习的绝缘子目标检测法[J]. 计算机仿真, 2021, 38(1): 61-66.
- LIU Xinyue, CHEN Rui, WANG Kunfeng, et al. Insulator object detection method based on parallel imaging and deep learning[J]. Computer Simulation, 2021, 38(1): 61-66. (in Chinese)
- [9] 闵林, 刘向前, 李宁. 基于积累孔径插值技术的星载间断调频连续波 SAR 成像方法[J]. 电子与信息学报, 2022, 44(7): 2461-2468.
- MIN Lin, LIU Xiangqian, LI Ning. Spaceborne interrupted frequency modulation continuous wave SAR imaging based on accumulated aperture interpolation technique [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2022, 44 (7) : 2461-2468. (in Chinese)
- [10] 王立, 张力川, 顾鹏程, 等. 基于 FPGA 的调频连续波合成孔径雷达实时成像处理方法[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(2): 86-91.
- WANG Li, ZHANG Lichuan, GU Pengcheng, et al. Real-time implementation of frequency-modulated continuous-wave synthetic aperture radar imaging based on FPGA [J]. Journal of Detection & Control, 2019, 41(2): 86-91. (in Chinese)
- [11] 沈笑云, 廖仙华, 孙卫天, 等. 可变先验贝叶斯学习稀疏 SAR 成像[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1781-1790.
- SHEN Xiaoyun, LIAO Xianhua, SUN Weitian, et al. Sparse SAR imaging based on varying prior Bayes learning [J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(7): 1781-1790. (in Chinese)
- [12] 陈熙, 刘禄波, 季袁冬, 等. 基于二维指数脉冲压缩变换的 SAR 成像算法[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2020, 57(3): 425-430.
- CHEN Xi, LIU Lubo, JI Yuandong, et al. A new SAR imaging algorithm based on two-dimensional exponential pulse compression transform [J]. Journal of Sichuan University(Natural Science Edition), 2020, 57(3): 425-430. (in Chinese)
- [13] 王保平, 马健钧, 张研, 等. 基于最小能量准则的参数估计圆周 SAR 三维成像方法[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(7): 280-286.
- WANG Baoping, MA Jianjun, ZHANG Yan, et al. Parameter estimation of circular SAR 3-D imaging method based on the minimum energy criterion [J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(7): 280-286. (in Chinese)
- [14] 王岩, 杨天笑, 丁泽刚, 等. 星载双基地 FMCW-SAR 高分辨时域成像算法[J]. 信号处理, 2022, 38(1): 35-42.
- WANG Yan, YANG Tianxiao, DING Zegang, et al. High resolution time domain imaging algorithm for spaceborne bistatic FMCW-SAR [J]. Journal of Signal Processing, 2022, 38(1): 35-42. (in Chinese)
- [15] 景国彬, 李宁, 孙光才, 等. 联合误差估计的机载超高分辨率 SAR 成像[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(3): 1-7.
- JING Guobin, LI Ning, SUN Guangcai, et al. Very high resolution SAR imaging method combined with motion estimation [J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(3): 1-7. (in Chinese)