

第3章

极化雷达旋转域特征提取

目标极化散射响应与目标的姿态、取向等密切相关^[1,2],即目标具有散射多样性。目标散射多样性效应主要包含两个层面^[1,2]。一是同一目标在不同视角下可能呈现极为不同的散射特性。二是不同目标在特定视角下可能呈现相似的散射特性。传统基于模型的极化目标分解方法,由于散射模型通常没有适配目标散射多样性^[3],其极化目标分解结果往往存在解译模糊性和解译多义性等不足。极化旋转域解译理论方法能充分挖掘和利用目标散射多样性,其核心思想是将特定几何条件下获得的极化矩阵拓展到绕雷达视线的极化旋转域,通过建立适当的极化旋转域解译工具,挖掘极化旋转域中蕴含的目标散射多样性信息,为诸多极化雷达应用研究提供新的理论工具和技术途径。本章介绍其中的一种解译方法,即统一的极化矩阵旋转处理^[1,2,4]及其实验分析。

3.1 背景介绍

极化雷达能够获取目标全极化信息,已成为微波遥感领域的主流传感器。有效开发和利用目标散射多样性,能够更好地解译目标散射机理^[3],并提升地物分类^[5]、目标检测^[6]、损毁评估^[7]等的应用性能。

在雷达极化信息处理历程中,为了减少对目标姿态、取向等的依赖,学者先后提出了多种方位向补偿处理(也称去取向处理)方法^[8-10],并被纳入多种基于模型的极化目标分解方法,得到了更好的解译性能。方位向补偿处理使用的旋转角可通过极化相干矩阵旋转处理并使交叉极化项最小时得到。值得思考的是,若采用其他旋转角对极化相干矩阵进行旋转处理,极化相干矩阵每个元素的变化规律是什么?如何表征和利用这种规律?这些思考促成了统一的极化矩阵旋转理论方法的提出和发展,其核心思想是将极化矩阵拓展至极化旋转域,得到极化旋转域的统一表达式,并提取得到一系列新极化特征集。自该思想提出以来,经过10余年发展积累,已形成了比较完整的极化旋转域解译理论框架^[1,2],主要包括统一的极化矩阵旋转理论方法^[4]、二维极化相干方向图解译工具^[11]、二维极化相关方向图解译工具^[12]和三维极化相关方向图解译工具^[13]等,并在地物分类^[14]、目标检测^[15]、结构辨识^[16]和灾害评估^[17]等领域获得成功应用。本章以极化相干矩阵为例,介绍统一的极化矩阵旋转理论方法及特征提取实验。

3.2 算法原理

3.2.1 极化矩阵旋转处理

在极化旋转域,极化散射矩阵为^[1,2]

$$\mathbf{S}(\theta) = \mathbf{R}_2(\theta) \mathbf{S} \mathbf{R}_2^T(\theta), \quad \theta \in [-\pi, \pi) \quad (3.1)$$

其中,旋转矩阵为 $\mathbf{R}_2(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 。

对水平和垂直极化基(H,V),极化散射矩阵 $\mathbf{S}(\theta)$ 的元素为

$$S_{HH}(\theta) = S_{HH} \cos^2 \theta + S_{HV} \cos \theta \sin \theta + S_{VH} \cos \theta \sin \theta + S_{VV} \sin^2 \theta \quad (3.2)$$

$$S_{HV}(\theta) = -S_{HH} \cos \theta \sin \theta + S_{HV} \cos^2 \theta - S_{VH} \sin^2 \theta + S_{VV} \cos \theta \sin \theta \quad (3.3)$$

$$S_{VH}(\theta) = -S_{HH} \cos \theta \sin \theta - S_{HV} \sin^2 \theta + S_{VH} \cos^2 \theta + S_{VV} \cos \theta \sin \theta \quad (3.4)$$

$$S_{VV}(\theta) = S_{HH} \sin^2 \theta - S_{HV} \cos \theta \sin \theta - S_{VH} \cos \theta \sin \theta + S_{VV} \cos^2 \theta \quad (3.5)$$

同理,在极化旋转域中,极化相干矩阵为

$$\mathbf{T}(\theta) = \mathbf{R}_3(\theta) \mathbf{T} \mathbf{R}_3^T(\theta), \quad \theta \in [-\pi, \pi] \quad (3.6)$$

其中,旋转矩阵为 $\mathbf{R}_3(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta \end{bmatrix}$ 。

极化相干矩阵 $\mathbf{T}(\theta)$ 的元素为

$$T_{11}(\theta) = T_{11} \quad (3.7)$$

$$T_{12}(\theta) = T_{12} \cos 2\theta + T_{13} \sin 2\theta \quad (3.8)$$

$$T_{13}(\theta) = -T_{12} \sin 2\theta + T_{13} \cos 2\theta \quad (3.9)$$

$$T_{23}(\theta) = \frac{1}{2}(T_{33} - T_{22}) \sin 4\theta + \operatorname{Re}[T_{23}] \cos 4\theta + \operatorname{jIm}[T_{23}] \quad (3.10)$$

$$T_{22}(\theta) = T_{22} \cos^2 2\theta + T_{33} \sin^2 2\theta + \operatorname{Re}[T_{23}] \sin 4\theta \quad (3.11)$$

$$T_{33}(\theta) = T_{22} \sin^2 2\theta + T_{33} \cos^2 2\theta - \operatorname{Re}[T_{23}] \sin 4\theta \quad (3.12)$$

极化相干矩阵 $\mathbf{T}(\theta)$ 的非对角元素的能量项为

$$|T_{12}(\theta)|^2 = |T_{12}|^2 \cos^2 2\theta + |T_{13}|^2 \sin^2 2\theta + \operatorname{Re}[T_{12} T_{13}^*] \sin 4\theta \quad (3.13)$$

$$|T_{13}(\theta)|^2 = |T_{12}|^2 \sin^2 2\theta + |T_{13}|^2 \cos^2 2\theta - \operatorname{Re}[T_{12} T_{13}^*] \sin 4\theta \quad (3.14)$$

$$|T_{23}(\theta)|^2 = \frac{1}{4}(T_{33} - T_{22})^2 \sin^2 4\theta + \operatorname{Re}^2[T_{23}] \cos^2 4\theta + \frac{1}{2}(T_{33} - T_{22}) \operatorname{Re}[T_{23}] \sin 8\theta + \operatorname{Im}^2[T_{23}] \quad (3.15)$$

其中, $\operatorname{Re}[T_{ij}]$ 和 $\operatorname{Im}[T_{ij}]$ 是 T_{ij} 的实部和虚部。

3.2.2 统一的极化矩阵旋转理论

极化相干矩阵 $\mathbf{T}(\theta)$ 的每个元素及非对角元素能量项经过相应的数学变换均可统一地由一个正弦函数进行表征^[4],即

$$f(\theta) = A \sin[\omega(\theta + \theta_0)] + B \quad (3.16)$$

其中, A 是极化振荡幅度, B 是极化振荡中心, ω 是角频率, θ_0 是初始角。这些特征可以构成一个新极化特征集 $\{A, B, \omega, \theta_0\}$, 称为振荡特征集。

基于振荡特征集, 还可导出一系列其他的极化角特征集, 包括极化零角特征、极化最大角特征、极化最小角特征以及极化不动角特征等。其中, 极化零角特征定义为在绕雷达视线所形成的极化旋转域中, 使极化相干矩阵 $\mathbf{T}(\theta)$ 中的某一元素项取值为零所对应的旋转角度, 即

$$f(\theta) = A \sin[\omega(\theta + \theta_0)] + B = 0 \Rightarrow B = 0; \theta_{\text{null}} = -\theta_0 \quad (3.17)$$

$\text{Re}[T_{12}]$ 和 $\text{Im}[T_{12}]$ 对应的极化零角特征为

$$\begin{aligned} \theta_{\text{null_Re}}[T_{12}] &= -\frac{1}{2} \text{Angle}\{\text{Re}[T_{13}] + j\text{Re}[T_{12}]\} \\ &= \frac{1}{2} \text{Angle}\left\{\text{Re}[\langle(S_{\text{HH}} + S_{\text{VV}})S_{\text{HV}}^*\rangle] + j\frac{1}{2}(\langle|S_{\text{VV}}|^2 - |S_{\text{HH}}|^2\rangle)\right\} \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \theta_{\text{null_Im}}[T_{12}] &= -\frac{1}{2} \text{Angle}\{\text{Im}[T_{13}] + j\text{Im}[T_{12}]\} \\ &= \frac{1}{2} \text{Angle}\{\text{Im}[\langle(S_{\text{HH}} + S_{\text{VV}})S_{\text{HV}}^*\rangle] + j\text{Im}[\langle S_{\text{HH}}S_{\text{VV}}^*\rangle]\} \end{aligned} \quad (3.19)$$

其中, $\theta_{\text{null_Re}}[T_{12}]$ 和 $\theta_{\text{null_Im}}[T_{12}]$ 的主值区间为 $[-\pi/2, \pi/2)$ 。

这两个极化零角特征对不同地物具有很强的区分性,非常适用于地物分类。为便于后续实验分析和对比,这里也介绍另外四种经典的极化特征,包括总后向散射功率 SPAN 特征和从基于特征值-特征向量分解^[18]中导出的极化熵特征 H 、平均角 $\bar{\alpha}$ 特征和各向异性特征 A_{ni} ,分别为

$$\text{SPAN} = T_{11} + T_{22} + T_{33} \quad (3.20)$$

$$H = -\sum_{n=1}^3 P_n \log_3 P_n \quad (3.21)$$

$$\bar{\alpha} = \sum_{n=1}^3 P_n \alpha_n \quad (3.22)$$

$$A_{ni} = \frac{\lambda_2 - \lambda_3}{\lambda_2 + \lambda_3} \quad (3.23)$$

其中, $P_n = \lambda_n / (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)$, λ_1 、 λ_2 和 λ_3 是极化相干矩阵 T 的特征值。

3.3 实验操作

3.3.1 代码介绍

1. 实验环境

极化雷达旋转域特征提取实验环境如表 3.1 所示。

表 3.1 实验环境

条 件	环 境
操作系统	Windows 10
开发环境	MATLAB R2020b
CPU	AMD 5900X
GPU	NVIDIA RTX 3090Ti

2. 扫描二维码下载主要实验代码

3. 主要数据及代码目录结构

Chapter 3-Polarimetric Feature

- T3_AIRSAR. mat
- T3_UAVSAR. mat
- PolarimetricFeature. m
 - fUniPolMatrixRotTheoryIniAngle
 - fFourRollInvariantFeature
 - fHAlphaADecom
 - fRGBImage

上述是下载的文件目录,工程名为 Chapter 3-Polarimetric Feature。其中,.mat 文件为数据集,PolarimetricFeature. m 文件为用于操作的 MATLAB 代码文件,并包含以下子函数:

- (1) fUniPolMatrixRotTheoryIniAngle 函数用于提取极化旋转域特征;
- (2) fFourRollInvariantFeature 函数用于提取式(3.20)~式(3.23)所示的四种极化旋转不变特征;
- (3) fHAlphaADecom 函数用于进行基于特征值-特征矢量分解;
- (4) fRGBImage 函数用于极化 SAR 图像可视化。

3.3.2 数据介绍

实验用到了两组公开的极化 SAR 数据。首先使用美国 AIRSAR 系统获取的常用于极化 SAR 地物分类研究的数据。该极化 SAR 数据为 L 波段,获取于荷兰的 Flevoland 地区,距离向与方位向的分辨率分别为 6.6m 和 12.1m。在预处理过程中,使用 SimiTest 方法^[19,20]进行相干斑滤波。滤波后数据的 Pauli RGB 图像如图 3.1(a)所示。其中,HH-VV、HV 和 HH+VV 分别用红色、绿色和蓝色表示。该区域内包含茎豆、豌豆、森林、苜蓿、小麦、甜菜、土豆、裸地、草地、油菜籽及水域等多种不同的地物,其真值图如图 3.1(b)所示。

此外,使用美国 UAVSAR 系统所获取的多时相极化 SAR 数据进行分析。本节使用 2012 年 6 月 17 日获取的数据。该组多时相极化 SAR 数据同样为 L 波段,获取于加拿大的 Manitoba 地区,距离向与方位向的分辨率分别均为 5m 和 7m。在预处理过程中,同样使用 SimiTest 方法^[19,20]进行相干斑滤波,滤波后数据的 Pauli RGB 图像如图 3.2(a)所示。该区域内包含阔叶林、草料、大豆、玉米、小麦、油菜籽及燕麦等多种不同的地物,其真值图如图 3.2(b)所示。

AIRSAR 数据可在网站 <https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=AIRSAR> 下载。单击“Filters”,然后在“Campaign Selector”栏下搜索“Flevoland, Netherlands”即可。UAVSAR 数据可在网站 <https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=UAVSAR> 下载。单击“Filters”,然后在“Campaign Selector”栏下搜索“Winnipeg, Canada”即可。



程序



彩图

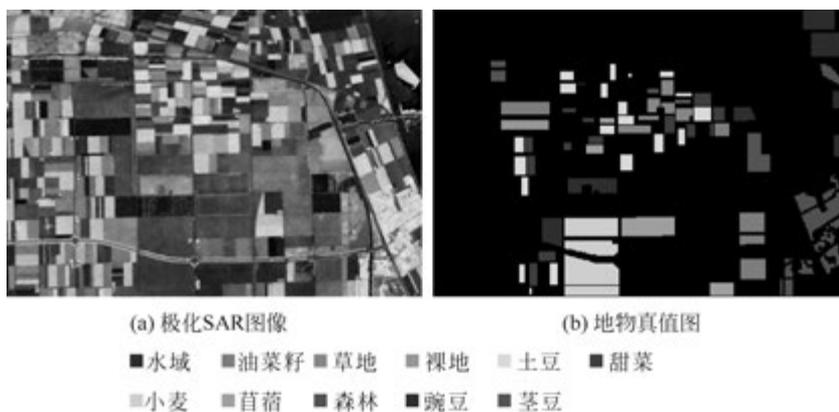


图 3.1 AIRSAR 数据及地物真值图



彩图

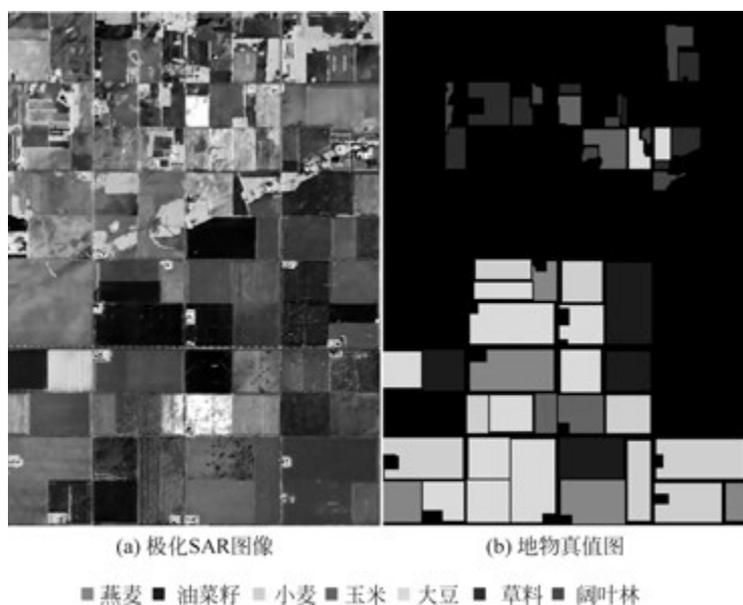


图 3.2 UAVSAR 数据及地物真值图

3.3.3 实验结果

首先下载代码并解压,运行 PolarimetricFeature. m 文件就能进行极化特征提取。对 AIRSAR 数据,提取得到的极化特征如图 3.3 所示。对 UAVSAR 数据,提取得到的极化特征如图 3.4 所示。从两种极化 SAR 数据处理结果可知,相比于四种传统极化特征,利用极化旋转域解译理论提取得到的极化零角特征更敏感于不同地物的散射机理,具有更好的地物区分性。

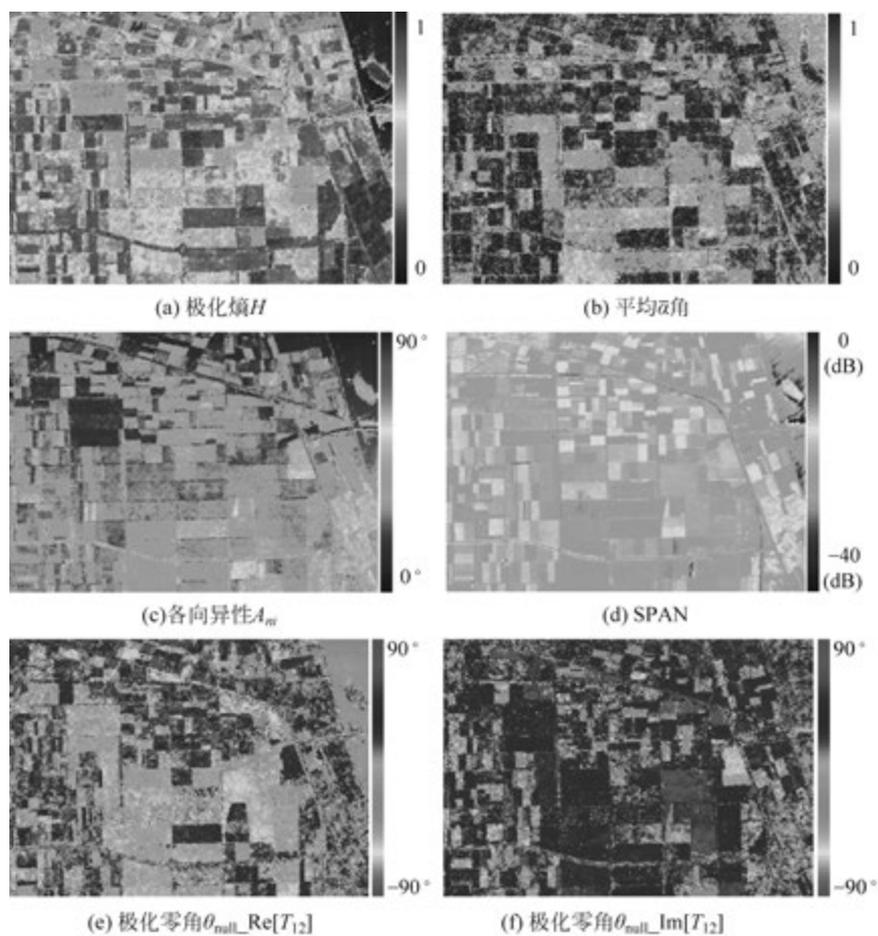


图 3.3 AIRSAR 数据极化特征对比

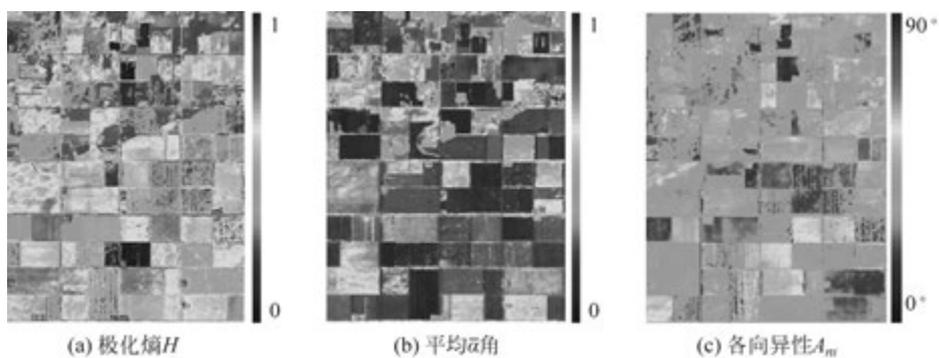


图 3.4 UAVSAR 数据极化特征对比



彩图



彩图

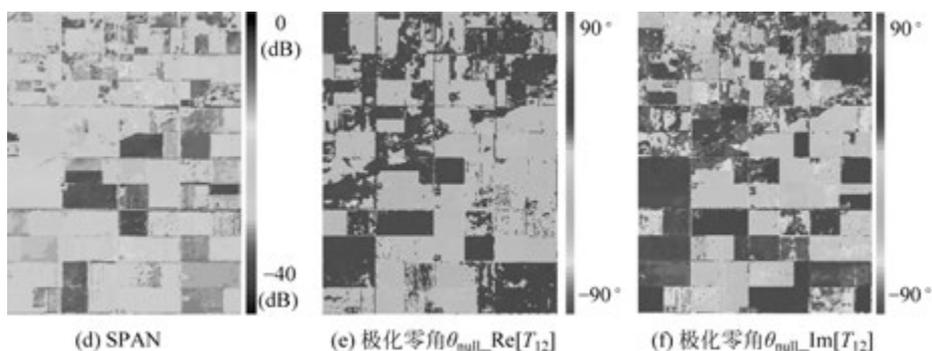


图 3.4 (续)

3.4 本章小结

本章介绍了成像雷达极化旋转域解译理论方法^[1,2]。其中,以统一的极化矩阵旋转处理方法^[4]为例,介绍了极化旋转域特征提取方法。利用 AIRSAR 和 UAVSAR 极化 SAR 数据,对比分析了两种极化零角特征的性能优势。下一章将介绍如何将这些物理意义明确的极化特征融入基于深度学习的分类框架中,从而提高极化 SAR 地物分类性能。

3.5 参考文献

- [1] Chen S W. Imaging Radar Polarimetric Rotation Domain Interpretation: Theory and Application [M]. Boca Raton, USA: CRC Press, 2024.
- [2] 陈思伟. 成像雷达极化旋转域解译: 理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [3] Chen S W, Li Y Z, Wang X S, et al. Modeling and interpretation of scattering mechanisms in polarimetric synthetic aperture radar: Advances and perspectives [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2014, 31(4): 79-89.
- [4] Chen S W, Wang X S, Sato M. Uniform polarimetric matrix rotation theory and its applications [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(8): 4756-4770.
- [5] Chen S W, Tao C S. PolSAR image classification using polarimetric-feature-driven deep convolutional neural network [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2018, 15(4): 627-631.
- [6] Li H L, Liu S W, Chen S W. PolSAR ship characterization and robust detection at different grazing angles with polarimetric roll-invariant features [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2024, 62: 5225818.
- [7] Chen S W, Wang X S. Urban damage level mapping based on co-polarization coherence pattern using multitemporal polarimetric SAR data [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2018, 11(8): 2657-2667.
- [8] Huynen J R. Phenomenological theory of radar target [D]. Delft: Technology University Delft, 1970.
- [9] Lee J S, Schuler D L, Ainsworth T L. Polarimetric SAR data compensation for terrain azimuth slope variation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(5): 2153-2163.

- [10] Xu F, Jin Y Q. Deorientation theory of polarimetric scattering targets and application to terrain surface classification [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(10): 2351-2364.
- [11] Chen S W. Polarimetric coherence pattern: A visualization and characterization tool for PolSAR data investigation [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2018, 56(1): 286-297.
- [12] Cui X C, Tao C S, Su Y, et al. PolSAR ship detection based on polarimetric correlation pattern [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2021, 18(3): 471-475.
- [13] Li M D, Xiao S P, Chen S W. Three-dimension polarimetric correlation pattern interpretation tool and its application [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2022, 60: 1-16.
- [14] 陶臣嵩, 陈思伟, 李永祯, 等. 结合旋转域极化特征的极化 SAR 地物分类 [J]. *雷达学报*, 2016, 6(5): 524-532.
- [15] Chen S W, Li M D, Cui X C, et al. Polarimetric roll-invariant features and applications for polarimetric synthetic aperture radar ship detection: A comprehensive summary and investigation [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2024, 12(1): 36-66.
- [16] Li H L, Li M D, Cui X C, et al. Man-made target structure recognition with polarimetric correlation pattern and roll-invariant feature coding [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, 19: 1-5.
- [17] Chen S W, Wang X S, Sato M. Urban damage level mapping based on scattering mechanism investigation using fully polarimetric SAR data for the 3. 11 East Japan earthquake [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2016, 54(12): 6919-6929.
- [18] Cloude S R, Pottier E. An entropy based classification scheme for land applications of polarimetric SAR [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(1): 68-78.
- [19] Chen S W. SAR image speckle filtering with context covariance matrix formulation and similarity test [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2020(29): 6641-6654.
- [20] Chen S W, Wang X S, Sato M. PolInSAR Complex Coherence Estimation Based on Covariance Matrix Similarity Test [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2012, 50(11): 4699-4710.