

文章编号: 2095-4980(2018)04-0603-06

## 高分辨力极化 SAR 图像城市区域车辆目标检测

高军山<sup>1,2</sup>, 陈 杭<sup>1</sup>, 林慧平<sup>1</sup>, 殷君君<sup>3</sup>, 杨 健<sup>\*1</sup>

(1.清华大学 电子工程系, 北京 100084; 2.中国人民解放军 63892 部队 第二研究室, 河南 洛阳 471003;  
3.北京科技大学 计算机与通信工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 研究基于高分辨力极化合成孔径雷达(SAR)图像的城市区域车辆目标自动检测方法。城市区域具有复杂的地物, 这给在城市区域进行车辆目标检测工作带来困难。首先采用 Freeman-Durden 分解、极化白化滤波器(PWF)和相似性参数 3 种方法来提取图像数据的极化信息; 在此基础上, 采用深度卷积神经网络来对车辆目标和其他地物进行二分类, 实现对城市区域车辆目标的检测。基于机载分米级分辨力极化 SAR 数据的实验结果验证了该方法的有效性, 在较低的虚警率下获得较高的检测率。将 3 种极化特征融合时, 能够在虚警率为 2.82% 时获得 95.65% 的检测率。

**关键词:** 高分辨力; 极化合成孔径雷达; 城市区域; 车辆检测; 深度卷积神经网络

中图分类号: TN951

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0603

## Vehicle detection over urban areas in high resolution polarimetric SAR images

GAO Junshan<sup>1,2</sup>, CHEN Hang<sup>1</sup>, LIN Huiping<sup>1</sup>, YIN Junjun<sup>3</sup>, YANG Jian<sup>\*1</sup>

(1.Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. The Second Laboratory, Troops 63892 of PLA, Luoyang Henan 471003, China;

3.School of Computer and Communication Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The automatic detection of vehicles over urban areas is studied based on airborne decimeter resolution polarimetric Synthetic Aperture Radar(SAR) data. Urban areas are characterized by complex ground objects, which makes the detection of vehicles particularly challenging. Firstly, several classes of polarization information are extracted, including those from Freeman-Durden decomposition, Polarization Whitening Filter(PWF) and similarity parameters. Then, deep convolutional neural network algorithm is adopted to classify vehicle targets and other objects to realize the detection of vehicle targets in urban areas. Using experiments based on airborne decimeter resolution polarimetric SAR data, high detection rate under low false alarm rate can be obtained, demonstrating the effectiveness of the proposed method. When the three polarization characteristics are combined, the detection rate of 95.65% can be reached when the false alarm rate is 2.82%.

**Keywords:** high resolution; polarimetric Synthetic Aperture Radar(SAR); urban areas; vehicle detection; deep convolutional neural network

近年来, 随着中国经济的飞速发展, 私家车的保有量急剧增加, 导致很多城市出现交通拥堵和空气污染问题(如雾霾等)。通过统计不同时段在城市各个区域的车辆数量及其变化, 可以为交通管控提供有效的数据支撑, 以此缓解拥堵和污染问题。在现代战争和反恐作战中, 城市区域都是非常重要的战场, 而车辆目标又是非常重要的军事目标。因此, 开展城市区域车辆目标的自动检测方法研究, 无论在民用还是军用上都具有非常重要的意义。合成孔径雷达(SAR)是一种主动式微波成像雷达, 具有全天时、全天候、高分辨力、大场景成像等显著优点。由于 SAR 不受光照及天气影响, 其在遥感领域得到了越来越广泛的应用。极化 SAR 系统能够获得目标的完全后向散射信息, 为充分分析目标的电磁散射特性提供了强大支持。

收稿日期: 2018-03-08; 修回日期: 2018-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771043; 61490693); 高分辨率对地观测系统重大专项资助项目(41-Y20A14-9001-15/16; 30-Y20A12-9004-15/16; 03-Y20A10-9001-15/16)

\*通信作者: 杨 健 email: yangjian\_ee@mail.tsinghua.edu.cn

人们对利用不同传感器或平台的数据进行车辆目标检测进行了大量研究,如利用光学卫星遥感图像<sup>[1]</sup>、无人航拍图像<sup>[2]</sup>等。刘达、姜博分别基于分层稀疏特征和案例匹配对 SAR 图像目标检测进行了研究<sup>[3-4]</sup>。樊庆聚等提出一种基于 L1 范数 B2DPCA 的 SAR 目标特征提取与识别方法<sup>[5]</sup>。在单极化 SAR 与紧缩极化 SAR 目标检测方面,很多学者对单极化 SAR 图像与紧缩极化 SAR 图像的舰船目标检测进行了研究<sup>[6-9]</sup>。而对于利用高分辨力全极化 SAR 图像进行车辆目标检测的研究较少。传统的基于恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)算法的 SAR 图像车辆目标检测方法<sup>[10]</sup>只适用于简单的地物场景。城市区域具有更加复杂的地物,因此很难对 SAR 数据进行准确的统计建模。同建筑物、树木及大型金属物体相比,车辆目标往往具有相对较弱的散射强度。随着 SAR 系统分辨力的提高, SAR 图像数据能够表达更加丰富的信息。在分米级分辨力下,车辆目标在图像中不仅仅表现为点目标,还是具有丰富结构特征的面目标。因此,可以通过提取特征的方法对其进行检测,如 Maksymiuk 等提出了一种基于结构特征提取的 SAR 图像车辆目标检测方法<sup>[11]</sup>。但在城市区域具有很多类型的车辆目标,它们在大小、形状、组成等结构特征上差别巨大。即使是同一类型的车辆目标,当它们处于不同的停车角度和停车场景下,仍然在 SAR 图像上表现出很大的不同。所以,仅仅依靠结构特征很难获得良好的检测结果。因此,研究一种强鲁棒性的特征提取方法以实现车辆目标检测很有必要。近些年来成为研究热点的深度学习方法,能够不依赖于人的经验而直接从原始数据中提取出高层次的抽象特征。其中的深度卷积神经网络(Deep Convolutional Neural Network, DCNN)在图像识别、语音分析、视频处理等领域得到普遍应用<sup>[12]</sup>,在 SAR 图像的目标检测、分类与识别领域也逐渐成为研究热点之一。但针对极化 SAR 图像,尤其是城市区域这类复杂地物背景下的目标检测研究较少,因此,可将该方法应用于城市区域的车辆目标检测。

本文对高分辨力极化 SAR 图像城市区域车辆目标检测进行了研究。为了更加充分利用极化信息,首先利用 Freeman-Durden 分解<sup>[13]</sup>、极化白化滤波器(PWF)<sup>[14]</sup>和相似性参数<sup>[15]</sup>3 种方法提取图像数据的极化信息,得到底层极化特征;然后在此基础上利用深度卷积神经网络方法对车辆目标和其他地物进行二分类,以此实现对城市区域车辆目标的检测。基于机载分米级分辨力(0.2 m×0.2 m)极化 SAR 数据的实验结果验证了该方法的有效性。

## 1 极化信息提取

极化信息能够反映目标的很多特征,尤其是几何结构和介电常数这 2 个重要特征。本文所用的极化 SAR 图像数据以极化散射矩阵  $S$  和极化相干矩阵  $T$  来表示。原始数据格式为单视复数据,4 个极化通道的数据量很大。为了充分利用极化信息,同时也为了得到实向量特征以便于卷积神经网络的输入,降低算法复杂度并减少运算时间,首先提取图像数据的极化信息。下文首先简单介绍  $S$  矩阵和  $T$  矩阵,然后给出为实现车辆目标检测所用的 3 种极化信息提取方法。

### 1.1 $S$ 矩阵和 $T$ 矩阵简介

根据极化雷达理论,目标的极化散射矩阵可以表示为:

$$S = \begin{bmatrix} S_{HH} & S_{HV} \\ S_{VH} & S_{VV} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $S_{ij}$  表示采用  $i$  极化方接收  $j$  极化方式发射时的复散射系数;  $H$  表示水平极化,  $V$  表示垂直极化。在单站后向散射机制下,满足互易定理时,有:

$$S_{HV} = S_{VH} \quad (2)$$

此时,极化散射矩阵也可以表示为一个三维散射矢量:

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} [S_{HH} + S_{VV} \quad S_{HH} - S_{VV} \quad 2S_{HV}]^T \quad (3)$$

极化相干矩阵  $T$  表示为:

$$T = \langle k k^H \rangle \quad (4)$$

式中:  $\langle \rangle$  表示求均值;上标  $H$  表示共轭转置。

### 1.2 Freeman-Durden 分解

Freeman-Durden 分解是一种以物理实际为基础,将三分量散射机制模型用于极化 SAR 观测的技术<sup>[13]</sup>,能够用来分析目标散射机制的成分。车辆目标常常具有较强的二次散射成分,因此可以用该方法很好地表征。

Freeman–Durden 三分量分解将目标的极化相干矩阵  $T$  分解为以下 3 个散射成分：表面散射、二次散射与体散射：

$$T = P_s T_{\text{surface}} + P_d T_{\text{double}} + P_v T_{\text{volume}} \quad (5)$$

式中： $T_{\text{surface}}$ 、 $T_{\text{double}}$  与  $T_{\text{volume}}$  分别表示表面散射、二次散射与体散射的散射模型； $P_s$ 、 $P_d$  与  $P_v$  分别表示对应的功率。分解得到的功率为非负实数， $P_s$ 、 $P_d$  与  $P_v$  的具体计算过程见文献[8]。

基于 Freeman–Durden 三分量分解的车辆目标图像见图 1(b)。

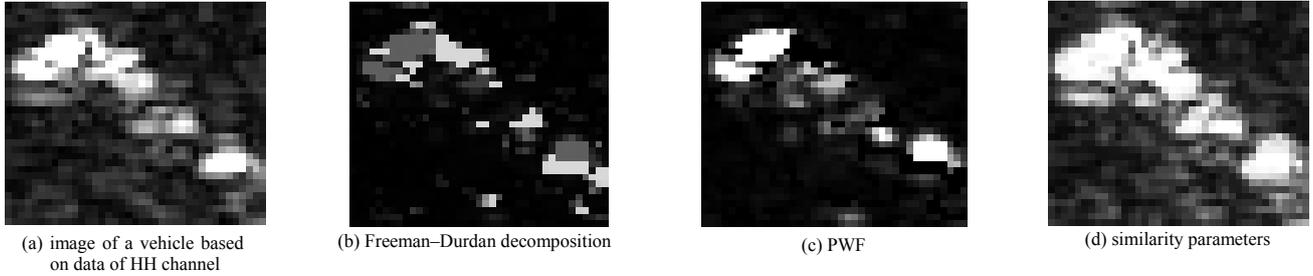


Fig.1 Examples of polarization information extraction  
图 1 车辆目标极化信息提取图像示例

### 1.3 极化白化滤波器

极化白化滤波器在极化 SAR 图像目标检测领域是一种重要的预处理方法。其能够有效降低图像的相干斑噪声水平，同时增强目标的散射强度。车辆目标通常由很多金属构件组成，因此能够被散射强度特征很好地表征。由文献[14]可知，极化白化滤波器的计算公式如下：

$$y = |S_{\text{HH}}|^2 + \frac{1}{\gamma} |S_{\text{VV}}|^2 + \frac{1 - |\rho|^2}{\varepsilon} |S_{\text{HV}}|^2 - \frac{2 \operatorname{Re}(\rho S_{\text{HH}}^* S_{\text{VV}})}{\sqrt{\gamma}} \quad (6)$$

式中：

$$\varepsilon = \frac{E[|S_{\text{HV}}|^2]}{E[|S_{\text{HH}}|^2]}, \gamma = \frac{E[|S_{\text{VV}}|^2]}{E[|S_{\text{HH}}|^2]}, \rho = \frac{E[S_{\text{HH}} S_{\text{VV}}^*]}{E[|S_{\text{HH}}|^2] E[|S_{\text{VV}}|^2]} \quad (7)$$

车辆目标经过极化白化滤波器后的图像见图 1(c)。

### 1.4 相似性参数

相似性参数能够描述 2 个目标极化散射特性间的相似性，并且与 2 个目标散射系数的绝对幅度、绝对相位及定向角没有关系。为了更加直接地分析车辆目标的物理散射机制，通过相似性参数来提取目标的散射特征。

由文献[15]可知，任意目标散射矩阵与平面目标的相似性参数为：

$$n = \frac{|S_{\text{HH}}^0 + S_{\text{VV}}^0|^2}{2(|S_{\text{HH}}^0|^2 + |S_{\text{VV}}^0|^2 + 2|S_{\text{HV}}^0|^2)} \quad (8)$$

式中  $S_{\text{HH}}^0$ 、 $S_{\text{HV}}^0$  与  $S_{\text{VV}}^0$  表示去定向后目标散射矩阵的元素。

任意目标散射矩阵与  $0^\circ$  二面角目标的相似性参数为：

$$n_2 = \frac{|S_{\text{HH}}^0 - S_{\text{VV}}^0|^2}{2(|S_{\text{HH}}^0|^2 + |S_{\text{VV}}^0|^2 + 2|S_{\text{HV}}^0|^2)} \quad (9)$$

任意目标散射矩阵与  $45^\circ$  二面角目标的相似性参数为：

$$n_3 = \frac{|2S_{\text{HV}}^0|^2}{2(|S_{\text{HH}}^0|^2 + |S_{\text{VV}}^0|^2 + 2|S_{\text{HV}}^0|^2)} \quad (10)$$

车辆目标相似性参数的图像见图 1(d)。

## 2 基于深度卷积神经网络的车辆目标检测

在提取的极化信息的基础上，利用深度卷积神经网络实现车辆目标检测。先分别将 3 种方法提取的极化信息单独输入网络，然后再将它们组合在一起输入网络。极化 SAR 图像的每个像素经过 Freeman–Durden 分解和

相似性参数处理后分别得到 3 个分量, 经过极化白化滤波器后得到 1 个分量。将它们线性组合在一起, 每个像素就对应 7 个分量。经过极化信息提取后的数据全部为实数, 这样就可以直接输入卷积神经网络。

为了对比极化信息提取效果, 同时利用原始数据输入卷积神经网络实验。由于极化 SAR 的各个通道数据均为复数, 不能直接输入神经网络, 将各个通道的数据实部与虚部分开, 这样图像的每个像素点对应 8 个分量。

利用  $30 \times 30$  像素大小的图像块截取车辆目标和背景, 构造训练集和测试集数据后, 以 60 个图像块为一批输入。以相似性参数数据为例, 网络结构如图 2 所示。网络共采用 4 个卷积层, 采用 ReLU 函数作为激活函数对每个卷积层的输出进行非线性变换。对高层卷积层的输出进行批标准化, 经过线性变换后输出为:

$$y = \log \left( \frac{p_{\text{vehicle}}}{1 - p_{\text{vehicle}}} \right) \quad (11)$$

式中  $p_{\text{vehicle}}$  为输入数据是车辆目标的概率。

采用交叉熵来构造代价函数, 用梯度下降法进行网络参数的更新, 迭代次数为 300 次。经过训练集训练出网络的参数后, 输入测试集进行实验, 并计算检测率和虚警率来评价算法的性能。

### 3 实验

#### 3.1 数据集

实验所用的数据来自中科院电子所研制的机载极化 SAR 系统。成像区域为中国喀什地区, 分辨力为  $0.2 \text{ m} \times 0.2 \text{ m}$ , 数据格式为单视复数据。在图像中选取 250 张包含车辆目标的图像块作为正样本, 如图 3(a)所示。其中, 随机选择 150 张图像作为训练集, 其余 100 张作为测试集。通常情况下, 车辆目标不一定在图像块的正中心, 因此通过向 4 个方向的平移、翻转和旋转来扩展数据集。最后得到 1 950 张训练集的正样本和 1 300 张测试集的正样本。然后在图像中选取 1 024 张不包含车辆目标的背景图像块, 如图 3(b)所示。经过简单的左右平移后得到 1 536 张训练集的负样本和 1 536 张测试集的负样本。



(a) positive samples



(b) negative samples

Fig.3 Dataset of the vehicle detection experiments

图 3 车辆检测实验数据集

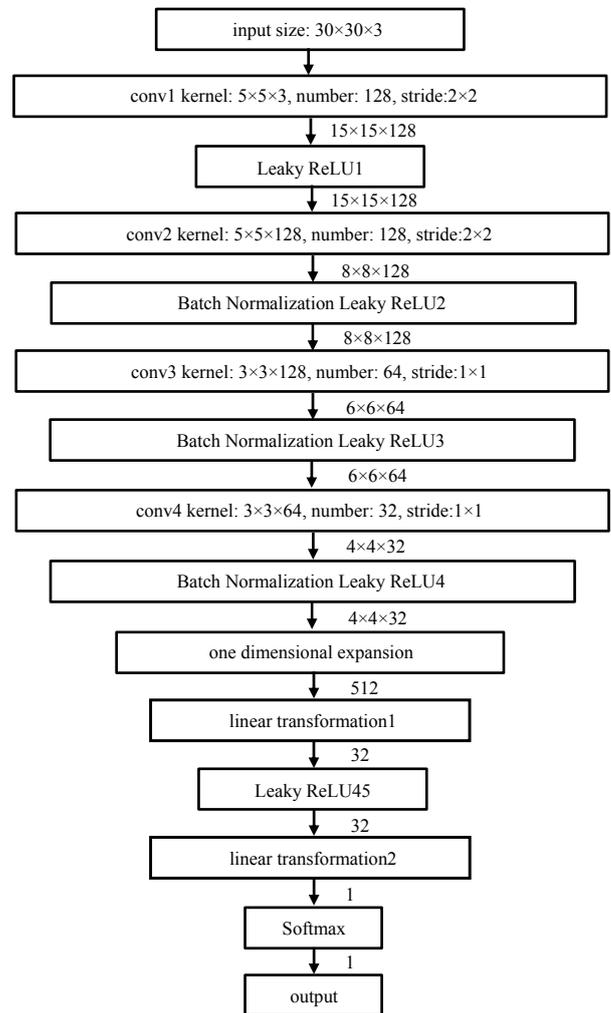


Fig.2 Network architecture

图 2 网络结构

### 3.2 实验结果

在 3.1 的数据集基础上进行实验，用检测率和虚警率评价算法的性能，对比 1.2~1.4 提到的 3 种极化信息提取方法及其组合在一起后的性能，并与原始数据进行对比。原始数据和 3 种极化信息提取方法基础上的检测率和虚警率结构见表 1。由表 1 可知，原始数据的实虚部直接输入能够得到最好的检测性能。3 种极化信息组合在一起后具有丰富的信息，能够获得非常接近原始数据的检测性能，能够在虚警率约为 3% 时获得接近 96% 的检测率。相似性参数在减少数据量的基础上，仍能获得与组合信息接近的检测性能，能够在虚警率约为 5% 时获得接近 92% 的检测率。Freeman–Durden 分解的检测性能相对较差，虚警率过高且检测率降低，这是由于城市区域人工目标很多，其数据的分布不一定符合 Freeman–Durden 分解的散射模型。而极化白化滤波器的虚警率高达 68%，无法进行有效的车辆目标检测。这是由于在极化白化滤波器滤波过程中损失了很多信息，且每个像素只有一个数据元素，无法满足深度卷积神经网络对丰富数据集的要求。但是，当与其他 2 个极化信息组合在一起时，仍能够为整体性能的提升做出贡献。在分米级分辨力下，即使是方圆几千米范围的区域，图像的数据量仍然非常大，与原始数据相比，通过极化信息的提取能够极大地缩减运算时间。

表 1 3 种极化信息提取方法基础上的检测率和虚警率

Table1 Detection rate and false alarm rate based on three kinds of polarization information extraction methods		
polarization information extraction methods	detection rate	false alarm rate
original data	0.958 32	0.022 48
joint polarization information	0.956 54	0.028 17
Freeman–Durden decomposition	0.845 15	0.135 63
similarity parameter	0.917 38	0.051 39
Polarization Whitening Filter	0.940 51	0.680 56

## 4 结论

本文对高分辨力极化 SAR 图像城市区域静态车辆目标的自动检测进行了研究。应用 3 种极化信息提取方法完成底层极化特征提取，将深度卷积神经网络作为检测器以实现车辆目标检测。最后，在机载高分辨力极化 SAR 数据集上进行了实验验证。实验结果表明，通过组合 3 种极化信息，该方法能够成功抑制城市区域的建筑物、树木及大型金属物体等地物的强干扰，在较低的虚警率下仍能获得较高的检测率，是一种有效的、鲁棒性很强的车辆目标自动检测方法。由于城市区域的地物极其复杂，车辆目标还往往被建筑物等大型地物遮挡或者半遮挡，由于微波的穿透性和 SAR 系统的成像特点，仍然有可能在这种情况下实现车辆目标检测。未来可以开展车辆目标在被遮挡或半遮挡情况下的检测方法研究。

### 参考文献：

- [1] LEITLOFF J, HINZ S, STILLA U. Vehicle detection in very high resolution satellite images of city areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(7): 2795–2806.
- [2] MORANDUZZO T, MELGANI F. Detecting cars in UAV images with a catalog-based approach[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(10): 6356–6367.
- [3] 刘达. 超高分辨率 SAR 图像车辆目标检测[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015. (LIU Da. Vehicle target detection in very high resolution SAR imagery[D]. Xi'an, Shaanxi, China: Xidian University, 2015.)
- [4] 姜博. 基于案例匹配的高分辨率 SAR 图像目标检测[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015. (JIANG Bo. A target detection method in high resolution SAR image based on CBM[D]. Harbin, Heilongjiang, China: Harbin Institute of Technology, 2015.)
- [5] 赵昊. 基于 L1 范数 B2DPCA 的 SAR 目标特征提取与识别[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(1): 105–109. (ZHAO Hao. SAR target feature extraction and recognition based on L1-norm B2DPCA[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(1): 105–109.)
- [6] 樊庆聚, 蔡正谊, 冷祥光, 等. 一种结合空间信息的星载 SAR 图像舰船目标检测算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6): 972–977. (FAN Qingju, CAI Zhengyi, LENG Xiangguang, et al. A ship detection method from spaceborne SAR imagery combined with spatial information[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017, 15(6): 972–977.)
- [7] 樊庆聚, 计科峰, 冷祥光, 等. 基于分块预判的 SAR 图像舰船检测方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016, 14(3): 378–384. (FAN Qingju, JI Kefeng, LENG Xiangguang, et al. A method for SAR ship detection based on block prescreening[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016, 14(3): 378–384.)

- [8] 王海波,赵妍琛,王涵宁,等. 基于加权 SVM 和  $m-\chi$  分解的简缩极化 SAR 图像舰船检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(4):554-561. (WANG Haibo,ZHAO Yanchen,WANG Hanning,et al. Ship detection in compact polarimetric SAR imagery based on weighted SVM and  $m-\chi$  decomposition[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(4):554-561.)
- [9] 王海波,蔡正谊,冷祥光,等. 星载简缩极化 SAR 海上舰船目标检测性能分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2017, 15(6):965-971. (WANG Haibo,CAI Zhengyi,LENG Xiangguang,et al. Performance analysis on maritime ship detection based on spaceborne compact polarimetric SAR[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2017,15(6):965-971.)
- [10] LIU Zhoufeng,PING Qingwei,HE Peikun. An improved algorithm for the detection of vehicle group targets in high-resolution SAR images[C]// 2002 3rd International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Beijing: IEEE, 2002:572-575.
- [11] MAKSYMUK O,SCHMITT M,BRENNER A R,et al. First investigations on detection of stationary vehicles in airborne decimeter resolution SAR data by supervised learning[C]// 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Munich,Germany:IEEE, 2012:3584-3587.
- [12] KRIZHEVSKY A,SUTSKEVER I,HINTON G E. ImageNet classification with deep convolution neural networks[J]. Communications of the ACM, 2017,60(6):84-90.
- [13] FREEMAN A,DURDAN S L. A three-component scattering model for polarimetric SAR data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998,36(3):963-973.
- [14] NOVAK L M,BURL M C. Optimal speckle reduction in polarimetric SAR imagery[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1990,26(2):293-305.
- [15] YANG Jian,PENG Yingning,LIN Shiming. Similarity between two scattering matrices[J]. Electronics Letters, 2001,37(3): 193-194.

#### 作者简介:



高军山(1986-), 男, 辽宁省锦州市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为极化 SAR 目标检测.email:gaojs15@mails.tsinghua.edu.cn.

殷君君(1983-), 女, 黑龙江省七台河市人, 博士, 副教授, 主要研究方向为雷达极化应用的基础理论、极化合成孔径雷达图像理解、图像分割、数据融合、海洋遥感及生态环境变化监测.

陈 杭(1990-), 男, 湖北省黄冈市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为极化 SAR 目标检测与分类识别.

林慧平(1993-), 男, 四川省巴中市人, 在读博士研究生, 主要研究方向为极化 SAR 目标检测与分类识别.

杨 健(1965-), 男, 湖北省襄阳市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为雷达极化、遥感、数学建模与模糊理论.