

结合不同极化数据的海冰漂移检测

张明¹, 王军凯^{1*}, 吕晓琪^{1,2}, 张晰³, 李菁¹, 刘根旺³, 张婷³

¹内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古自治区模式识别与智能图像处理重点实验室, 内蒙古 包头 014010;

²内蒙古工业大学, 内蒙古 呼和浩特 010051;

³自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061

摘要 基于 Sentinel-1 遥感数据,对合成孔径雷达(SAR)极化特征数据在海冰漂移检测中的应用进行了深入研究。研究了水平发射水平接收(HH)和水平发射垂直接收(HV)极化数据在海冰漂移检测中的差异,分析了两种极化数据的优劣,并发现由两种极化数据检测到的特征信息具有互补的特性。通过特征融合的方法,将由两种极化数据得到的特征信息有效地应用于海冰漂移检测中。实验结果表明,利用所提出的方法得到的海冰漂移矢量在空间分布和覆盖率方面均得到了提高。该方法能够有效地应用于海冰漂移检测。

关键词 图像处理; 激光雷达; 海冰漂移; 合成孔径雷达; 极化; 融合

中图分类号 TP751.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.101008

Detection of Sea-Ice Drift Based on Different Polarization Data

Zhang Ming¹, Wang Junkai^{1*}, Lü Xiaoqi^{1,2}, Zhang Xi³, Li Jing¹, Liu Genwang³, Zhang Ting³

¹Inner Mongolia Key Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent Image Processing, School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010, China;

²Inner Mongolia University of Technology, Hohhot, Inner Mongolia 010051, China;

³First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao, Shandong 266061, China

Abstract The remote sensing data obtained from the Sentinel-1 spacecraft allows the application of the synthetic aperture radar (SAR) polarization feature data to the detection of the sea-ice drift. The difference in the usage of the horizontal-horizontal (HH) and horizontal-vertical (HV) polarization data for the detection of the sea-ice drift is discussed in terms of their advantages and disadvantages. The information detected using these two kinds of polarization data is observed to be complementary. Using feature fusion, the feature information detected using these two kinds of polarization data can be used for monitoring the sea-ice drift. The experimental results indicate that the sea-ice drift vector obtained using the proposed method is improved in terms of the spatial distribution and coverage rate, suggesting that the proposed method can be effectively applied for monitoring the sea-ice drift.

Key words image processing; lidar; sea-ice drift; synthetic aperture radar; polarization; fusion

OCIS codes 100.2960; 280.6730; 100.2980

1 引言

卫星遥感技术是目前海冰漂移检测的重要手段。合成孔径雷达(SAR)具有全天时、全天候监测的优势,在海洋研究领域得到了广泛的应用。从 20 世纪中期开始,各国都相继开展了 SAR 的研究工

作。美国的喷气推进实验室(JPL)首次将极化技术应用到雷达探测上,以一部机载极化 SAR 拉开了极化成像的序幕。随着极化 SAR 技术的发展,SAR 图像的维度也不断增加,为海上目标纹理特征的获取提供了便利^[1]。特征跟踪方法也是海冰漂移检测的重要手段,因此把极化信息应用于特征跟踪算法

收稿日期: 2018-10-10; 修回日期: 2018-12-05; 录用日期: 2018-12-25

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFA0600102)、国家自然科学基金(61771266)、内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY18150)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(2014G31)

* E-mail: wjk_53@126.com

将更有助于实现海冰漂移的监测。

SAR 成像系统发射的波通常是水平极化波,其回波信号由于地面反射而产生不同角度的偏转,形成垂直和水平两个分量。雷达通过接收这两种回波信号进行成像,即是本文中的水平发射水平接收(HH)和水平发射垂直接收(HV)两种极化成像方式。回波信号的强度因不同的极化方式而不同,这会直接导致成像的差异,其中最明显的是灰度级(后向散射值)。通常情况下,使用 HH 极化方式检测海冰漂移,而在 HH 极化的基础之上加入 HV 极化方式可为海冰检测提供了更多的图像特征。Komarov 等^[2]在 2012 年用两景连续的 Radarsat-2 SAR 数据研究了 HH 和 HV Radarsat-2 ScanSAR 数据探测海冰漂移的能力,发现 HV 极化数据在跟踪海冰漂移方面比 HH 极化数据更可靠。Muckenhuber 等^[3]使用特征跟踪方法发现 HV 极化数据提供的海冰漂移矢量大约是 HH 极化数据的 4 倍。Korosov 等^[4]还发现 HH 极化数据使小尺度特征更为明显,而 HV 极化提供了与海冰形态相关的更稳定的大尺度特征。在高分辨率的图像中,不同的极化方式会导致图像中的细节特征有明显的差异,其中 HH 极化方式要比 HV 极化方式表现出更多的细节,能够得到更多的角点特征^[5]。此外,由于噪声的存在,HV 极化下的海冰后向散射系数一般低于 HH 极化的后向散射系数^[6],HV 的回波信号更易受到本底噪声的压制^[7],因此 HV 极化下的图像会形成平行的条带噪声,严重影响特征检测的精度。Komarov 等^[8]在 2014 年发现,在线性单元 HV 信号与条带噪声的差异超过 0.003 的条件下,HV 极化方式下得到的海冰跟踪效果要优于 HH 极化,反之亦然。由此可以得出,在不同情况下 HH 极化和 HV

极化在海冰漂移检测中的效果不同,各有优劣。为了提高海冰漂移检测能力的普适性,本文选用双极化 Sentinel-1 数据,利用特征融合的方法将两种极化数据得到的特征信息进行融合,并应用于海冰漂移检测中。该方法的检测精度较高,为海冰漂移检测提供了有力支持。

2 材料与方法

2.1 卫星数据及研究区域介绍

Sentinel-1 可提供全天时、全天候的成像监测,其 C 波段 SAR 有 4 种模式。采用的 Sentinel-1 产品为中等分辨率(40 m×40 m)超宽幅测绘模式的地距多视产品,雷达测量回波信号的中心频率为 5.405 GHz。所使用的数据具有双极化、高精度、重访周期相对较短等优势^[9]。

研究区域为加拿大西北部的波弗特海域。该海域由于气候寒冷,海面几乎被常年冰覆盖,这极大地降低了海冰融化对漂移检测的影响。图 1 为本文选择的 3 个研究区域,其中每个区域对应一组海冰漂移的检测结果,每个区域的成像时间和地理位置信息如表 1 所示。

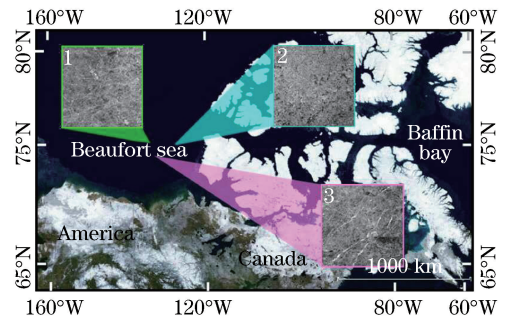


图 1 研究区域
Fig. 1 Study area

表 1 卫星数据信息

Table 1 Information of satellite data

Image set	Imaging time	Latitude and longitude	Polarization	Incidence angle / (°)
1	2017-04-05	76°52'N-78°15'N	HH+HV	19.26-46.33
	T19:45:51	140°49'W-157°6'W		
2	2017-10-06	80°31'N-82°51'N	HH+HV	19.04-46.38
	T19:22:50	140°56'W-160°37'W		
3	2017-10-10	79°01'N-81°45'N	HH+HV	19.14-46.38
	T17:11:42	119°42'W-134°25'W		

2.2 算法介绍

目前海冰漂移算法可分为两类:1) 直接利用图像像素值进行匹配;2) 利用图像的特征(如角点、纹

理等特征)进行匹配。前者的算法众多,其中归一化互相关(NCC)算法具有代表性。该算法基于图像的灰度信息来计算模板图像,基于待匹配图像的互

相关值来确定最佳匹配区域^[10]。但是,基于灰度信息的算法对于海冰的旋转和尺度等问题存在缺陷,而且该算法的计算量大,应用于海冰漂移检测的效率相对较低。基于图像特征的匹配算法可以通过计算少量有效特征,极大地减少计算量,有效提高了检测效率^[11]。因此本文选择尺度不变特征变换(SIFT)算法进行特征点的检测与匹配,该算法可描述图像中的局部性特征,在尺度空间中提取极值点并进行匹配,可有效解决海冰检测的尺度变换和旋转等问题。

SIFT 算法在 1999 年被提出^[12],2004 年得到了改进^[13]。SIFT 算法能够高效地提取图像的特征信息,而且对于图像的光照、尺度变化等不敏感。本文结合文献^[14]对 SIFT 算法的改进,采用 5×5 的自适应滤波对图像进行平滑处理,有效降低了噪声对特征跟踪算法的影响,并通过设置置信区间实现对误匹配点的有效剔除。这些措施为本文的极化分析提供了准确、有效的特征跟踪结果。

在同一时间,雷达可以接收两种偏振波,形成两幅具有不同特征信息的 SAR 图像。对于不同的海冰密度和噪声影响,没有一种极化方式是绝对优越的。得益于 SIFT 算法可通过寻找单幅 SAR 图像的极值点,实现快速提取特征点,本文通过分别对 HH 极化数据和 HV 极化数据进行特征搜寻,将各自得到的漂移矢量进行融合。该方法解决了单一极化数据海冰漂移检测结果存在空间分布不均匀的问题,并在一定程度上提高了检测精度。

3 实验

3.1 实验流程

针对连续时序的 SAR 图像,结合 SIFT 算法、滤波算法和误匹配剔除算法并通过特征融合方法得到均匀可靠的海冰漂移矢量,其具体流程如图 2 所示。

3.2 图像预处理

Sentinel-1 原始图像存在大量的热噪声和几何畸变,会在一定程度上降低算法的检测精度,因此,采用热噪声校正。针对雷达自身产生的相干斑噪声^[15],采用 5×5 的自适应滤波进行平滑处理,如图 3 所示。将滤波后图像灰度值的空间分布与原图像、中值滤波后的图像灰度值的空间分布进行比较,可以看出,本文所选用的自适应滤波既降低了噪声,又保留了图像的细节信息,为特征点的提取提供了保障。

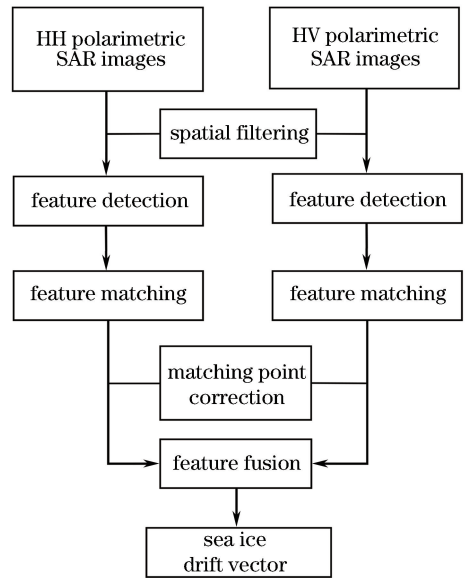


图 2 研究方法流程图

Fig. 2 Flow chart of research method

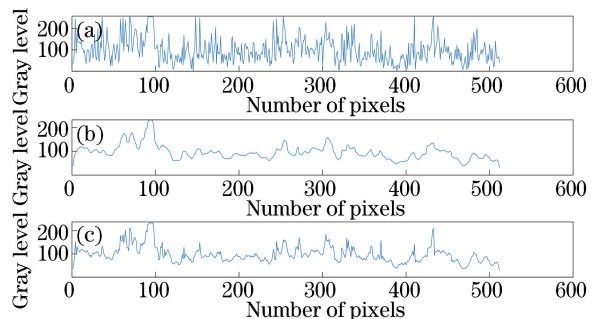


图 3 滤波结果对比图。(a)原始图;(b)中值滤波;
(c)自适应滤波

Fig. 3 Comparison of filtering results. (a) Original image;
(b) median filtering; (c) adaptive filtering

3.3 特征点匹配与校正

分别对 HH 极化和 HV 极化下的图像应用 SIFT 算法进行特征点检测,然后采用最近邻法确定特征点的对应关系。SIFT 算法需要对特征点构造 128 维的向量,而后向散射强度由于受到相干斑噪声的影响,容易造成图像的纹理特性不明显^[16],导致出现误匹配的现象。针对该问题,本文采用剔除算法,通过设置置信区间剔除漂移速度过大或方向不一致的特征点^[14]。通过整理分析剔除错配点后的特征点分布,发现两种极化下的特征呈现互补分布,因此可将两种特征相互融合以提高海冰漂移矢量的空间覆盖。

4 分析与讨论

采用客观和主观两种评价标准对海冰漂移测量

结果进行评价。客观评价采用 Voronoi 图和矢量距离的盒装图对结果进行评价,主观评价主要是利用目测法对结果进行评价。

以 2017 年 10 月 10 日的数据为例,对两种极化方式及本文的融合算法的结果进行比较。需要比较的主要因素为:1) 感兴趣区域中正确匹配的特征点的空间分布;2) 海冰漂移矢量的密集度。

为了更直观地表示特征点的空间分布,以 Voronoi 图为指标分别对 HH、HV 及 HH+HV 融合结果进行计算。Voronoi 图按照最邻近原则划分平面,每一个多边形区域都代表一个特征点所占空间,结果如图 4 所示, (x, y) 表示特征点在感兴趣区域的位置。从图 4 可以看出,HH 极化下关键点相

对较少而且空间分布不均匀。这主要是由于 HH 极化数据的后向散射变化率往往低于 HV 极化数据的后向散射变化率,而较大的后向散射变化率对于关键点的检测更有利。在图 4(b)的横轴 200~300 pixel 间存在明显间隙,可见 HV 极化受到条带噪声的影响。在 HH 极化中,这种噪声的影响是微小的,这是由于 HV 极化的后向散射系数(SAR 成像的主要参数)要比 HH 极化的低,HV 极化更容易受到底层噪声信号的压制。采用 HH+HV 融合算法可以有效结合两者的优势,利用更多的特征信息提高检测效率,其空间分布更加均匀,且多边形面积减小,如图 4(c)所示,表明了 HH+HV 融合算法能有效地提高空间覆盖率。

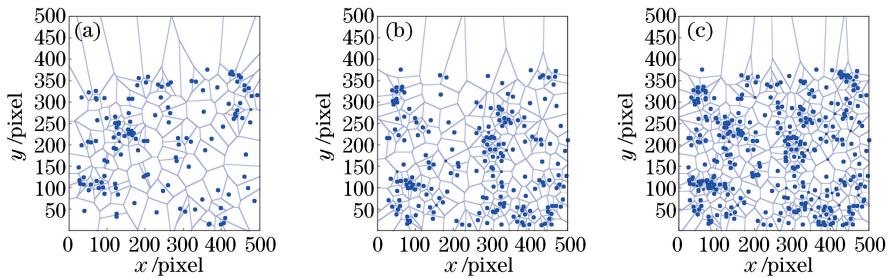


图 4 正确匹配点的空间密度图。(a) HH 极化;(b) HV 极化;(c) HH+HV 极化

Fig. 4 Spatial density of correctly matched points. (a) HH polarization; (b) HV polarization; (c) HH+HV polarization

本文旨在得到更加均匀的海冰漂移矢量图,漂移矢量的密集度可以对此进行有效评价。图 5 即为矢量距离的箱形图,箱形图可以直观显示海冰漂移矢量的数据位置和分散情况,主要分为上四分位数、中位数、下四分位数和异常值。从图 5 可以看出,采用本文算法得到的结果的平均距离明显小于另外两种极化,且点距超过 40 pixel 的概率很低,因此本文算法得到的漂移结果的空间分布更加均匀。

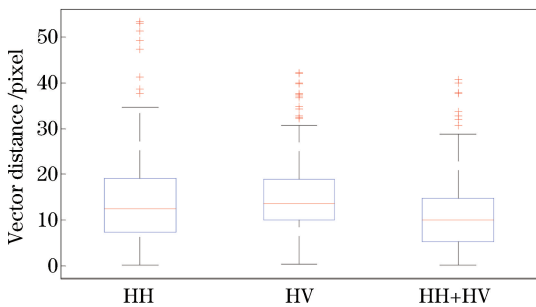


图 5 矢量距离箱形图

Fig. 5 Box plot of vector distance

对选取的 3 组数据进行海冰漂移跟踪,并分别绘制出单极化和极化融合后的矢量图,如图 6 所示。从图 6 可以看出,由于条带噪声的存在,HV 极化在

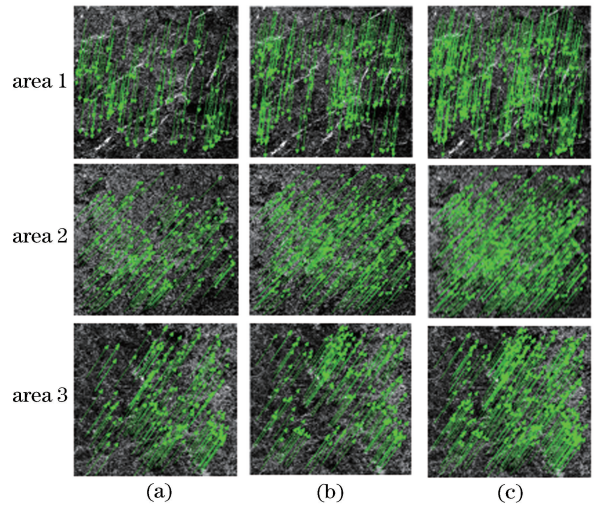


图 6 海冰漂移结果图。(a) HH 极化;
(b) HV 极化;(c) HH+HV 极化

Fig. 6 Results of sea-ice drift. (a) HH polarization;
(b) HV polarization; (c) HH+HV polarization

部分条形区域存在空缺,但是总体矢量为 HH 极化的 1~2 倍。Muckenhuber 等^[3]指出 HV 极化数据提供的海冰漂移矢量约为 HH 极化数据的 4 倍。本文算法的结果与文献[3]的结果存在差异,究其原因主要有:1) 本文算法选择的是高分辨率 SAR 图

像(40 m×40 m),HH极化数据对小尺度粗糙度较为敏感^[4],检测效率相对提高;2)本文算法采用了预处理,有效降低了热噪声以及相干斑噪声对图像的影响,在一定程度上降低了HH极化数据受噪声的干扰;3)为了验证所提算法的可靠性,选择的感兴趣区域存在条带噪声,而条带噪声只存在于HV极化数据,因此降低了HV极化数据的检测效率。

将本文实验结果与文献[14]进行对比。文献[14]基于Sentinel-1遥感数据,采用HH极化的方

表2 参数对比

Table 2 Parameter comparison

Image set	Average velocity of proposed method / (m · s ⁻¹)	Average velocity of Ref. [14] / (m · s ⁻¹)	Velocity of buoy / (m · s ⁻¹)	RMSE of proposed method	RMSE of Ref.[14]
1	0.089	0.088	0.101	0.012	0.013
2	0.084	0.080	0.089	0.006	0.014
3	0.083	0.081	0.088	0.005	0.010

5 结 论

本实验利用Sentinel-1遥感数据,结合基于图像特征提取的SIFT算法分析了HH极化和HV极化方式下海冰漂移检测的空间分布和覆盖率。结果表明,相同实验条件下,HV极化图像获取的特征点要显著多于HH极化,而且两种极化方式获取的特征信息具有明显互补特性。因此,对二者进行特征融合,可以有效解决HH极化和HV极化海冰漂移检测结果空间分布不均匀的问题,并能够在一定程度上提高检测精度。实验结果表明,结合HH极化和HV极化特征应用于海冰漂移检测的方案对噪声的稳健性更高,相比较于单一极化下的检测,多特征融合有利于降低检测误差,提高海冰漂移的检测精度,为海冰漂移的定量分析提供有力支持。但是,HV极化存在固有的条带噪声,导致特征信息也存在周期性的缺失。未来如果条带噪声的问题能够得到解决,海冰漂移检测精度将得到进一步提高。

参 考 文 献

- [1] Zhang J, Zhang X, Fan C Q, *et al.* Discussion on application of polarimetric synthetic aperture radar in marine surveillance[J]. *Journal of Radars*, 2016, 5(6): 596-606.
- 张杰, 张晰, 范陈清, 等. 极化SAR在海洋探测中的应用与探讨[J]. *雷达学报*, 2016, 5(6): 596-606.
- [2] Komarov A, Barber D. Detection of sea ice motion from co- and cross-polarization RADARSAT-2 images[C]//2012 IEEE International Geoscience and

Remote Sensing Symposium, July 22-27, 2012, Munich, Germany, 2012: 3277-3280.

[3] Muckenhuber S, Korosov A A, Sandven S. Open-source feature-tracking algorithm for sea ice drift retrieval from Sentinel-1 SAR imagery [J]. *The Cryosphere*, 2016, 10(2): 913-925.

[4] Korosov A A, Rampal P. A combination of feature tracking and pattern matching with optimal parametrization for sea ice drift retrieval from SAR data[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 258.

[5] Men P. Study on sea ice drift tracking based on SAR images of large difference in resolution[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

门鹏. 面向大分辨率差异SAR图像的海冰漂移跟踪研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.

[6] Xiao H Y, Tian C Z, Yue C R. Analysis on backscattering characteristics of the pinus yunnanensis based on full-polarization SAR data[J]. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 2015, 42(3): 85-87, 93.

肖虹雁, 田传召, 岳彩荣. 基于全极化SAR数据的云南松后向散射特征分析[J]. *福建林业科技*, 2015, 42(3): 85-87, 93.

[7] Liu H Y. Study on parameter retrieval and type recognition of sea ice using wide-swath and multi-polarization SAR data [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences), 2017.

刘惠颖. 宽幅多极化SAR海冰信息提取方法与类型识别研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院

- 遥感与数字地球研究所), 2017.
- [8] Komarov A S, Barber D G. Sea ice motion tracking from sequential dual-polarization RADARSAT-2 images [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1): 121-136.
- [9] Li C S, Wang W J, Wang P B, *et al.* Current situation and development trends of spaceborne SAR technology [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2016, 38(1): 229-240.
李春升, 王伟杰, 王鹏波, 等. 星载 SAR 技术的现状与发展趋势 [J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(1): 229-240.
- [10] Hollands T, Dierking W. Performance of a multiscale correlation algorithm for the estimation of sea-ice drift from SAR images: initial results [J]. *Annals of Glaciology*, 2011, 52(57): 311-317.
- [11] Wu Q. Sea ice drift tracking in the Bohai Sea based on GOCI [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2014.
吴青. 基于 GOCI 卫星的渤海海冰漂移监测 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2014.
- [12] Lowe D G. Object recognition from local scale-invariant features [C] // *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision*, September 20-27, 1999, Kerkyra, Greece, 1999: 1150-1157.
- [13] Lowe D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, 60(2): 91-110.
- [14] Zhang M, Lü X Q, Wang J K, *et al.* Research on sea ice drift detection technology based on Sentinel-1 data in Beaufort Sea area [J]. *Marine Environmental Science*, 2018, 37(2): 287-293.
张明, 吕晓琪, 王军凯, 等. 基于 Sentinel-1 数据波弗特海域海冰漂移检测技术研究 [J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(2): 287-293.
- [15] Lu Z L, Jia X, Zhu W G, *et al.* Study on SAR image despeckling algorithm [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2017, 38(6): 104-108.
鲁自立, 贾鑫, 朱卫纲, 等. SAR 图像相干斑抑制方法综述 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(6): 104-108.
- [16] Wang W B, Zhang X D, Fei P S, *et al.* The coherent speckle suppression method in SAR image based on Contourlet domain adaptive BivaShrink model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(10): 2726-2731.
王文波, 张晓东, 费浦生, 等. 基于 Contourlet 变换的自适应 SAR 图像相干斑噪声抑制算法 [J]. *光学学报*, 2009, 29(10): 2726-2731.