

中图法分类号: TP75 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2016)07-951-08

论文引用格式: Bing L, Xing Q G, Zou N N, Li Z B, Wu F. Azimuth ambiguities removal method for ship detection based on spaceborne SAR images [J]. Journal of Image and Graphics 2016 21(7): 951-958. [邢磊, 邢前国, 邹娜娜, 李圳波, 吴樊. 星载 SAR 影像上船舶方位向模糊去除算法[J]. 中国图象图形学报 2016 21(7): 951-958. ] [DOI: 10.11834/jig.20160713]

## 星载 SAR 影像上船舶方位向模糊去除算法

邢磊<sup>1,2,3</sup>, 邢前国<sup>1</sup>, 邹娜娜<sup>4</sup>, 李圳波<sup>3</sup>, 吴樊<sup>5</sup>

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 烟台 264003; 2. 中国科学院大学, 北京 100093

3. 烟台海事局, 烟台 264000; 4. 烟台五中, 烟台 264002; 5. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094

**摘要:** 目的 掌握海上船舶分布状态对于海上交通流分析和通航安全管理具有重要作用。遥感技术,特别是星载合成孔径雷达(SAR)技术的发展,为大范围海上船舶检测提供了有效的手段,但受 SAR 成像机制影响,海上船舶目标在星载 SAR 影像上通常存在着不同程度的方位向模糊噪声,这些噪声易被误判为船舶,导致船舶识别中虚警率提高。方法 本文简述了方位向模糊噪声的产生原因,提出了一种新的星载 SAR 影像上船舶方位向模糊去除算法,该算法的核心是构建目标方位向角度一致性、方位向位置偏移距离和方位向模糊能量衰减 3 个判别规则,对潜在 SAR 影像亮斑目标进行逐层筛选,实现船舶真实目标和方位向模糊目标的判别。结果 选取中国渤海海域和黄海海域的 30 m 分辨率的 Radarsat-2 数据进行案例分析,并与船舶自动识别系统(AIS)实测数据进行比对校验,结果表明,传统的双参数恒虚警率(CFAR)算法和基于 K 分布的 CFAR 等算法对于船舶难以剔除方位向模糊,容易造成虚警,而本文算法对实验影像的船舶方位向模糊去除准确率优于 95.8%,能够有效剔除船舶方位向模糊。结论 该算法为星载 SAR 影像上船舶方位向模糊去除提供了新的手段,有助于提高 SAR 影像上船舶目标检测的准确性。**关键词:** 船舶检测; 方位向模糊; 合成孔径雷达(SAR); 船舶自动识别系统(AIS); 遥感; Radarsat-2;

## Azimuth ambiguity removal method for ship detection based on spaceborne SAR images

Bing Lei<sup>1,2,3</sup>, Xing Qianguo<sup>1</sup>, Zou Nana<sup>4</sup>, Li Zhenbo<sup>3</sup>, Wu Fan<sup>5</sup>

1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Yantai Maritime Safety Administration, Yantai 264000, China; 4. Yantai No. 5 Middle School, Yantai 264001, China; 5. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

**Abstract:** **Objective** The distribution of ships at sea is a key factor for maritime traffic analysis and ship safety management. With the rapid development of earth observation technology, remote sensing is now considered a useful tool to detect ships at sea on a large scale. Particularly owing to the unique technical properties, such as being less vulnerable to cloud and mist and being unaffected by day and night, synthetic aperture radar (SAR) is widely used for ship detection in maritime security management. However, azimuth ambiguities caused by the mechanism of SAR imaging can be easily misclassified as ships on SAR images, leading to a high false alarm rate in ship detection, which has been a difficult problem in ship monitoring with SAR. **Method** Considering this issue, the mechanism of azimuth ambiguities on SAR images was ini-

收稿日期: 2015-09-15; 修回日期: 2016-03-03

基金项目: 中欧“龙计划”三期基金项目(10558)

第一作者简介: 邢磊(1984—),男,中国科学院烟台海岸带研究所环境科学专业博士研究生,主要研究方向为海洋遥感。

E-mail: binglei@ytmsa.gov.cn

Supported by: ESA-MOST Dragon 3 Cooperation Programme (10558)

tially analyzed in this study. Then, a new method for azimuth ambiguity removal was proposed based on this mechanism. The removal process of azimuth ambiguities includes three steps. First, the consistency of angles is estimated between the real target and its azimuth ambiguities. In this step, the determination method of azimuth angle between real target and its azimuth ambiguities was also discussed. Second, the uniformity of offset distance is determined, and determining the method of the azimuth distance between the real target and its azimuth ambiguities was also discussed. Third, energy decay is analyzed in the azimuth direction, considering that azimuth ambiguities of real ships on SAR images will follow the principles of energy decay. Using these three discriminant criteria, bright targets detected from SAR images can be classified as real ships and azimuth ambiguities. **Result** Radarsat-2 images covering the Bohai Sea or the North of the Yellow Sea were selected for a case study; the spatial resolution of these test images captured from March to June 2015 was 30 m. Using the method proposed in this research, azimuth ambiguities of ships were removed step by step and stored in a geodatabase. Real ship targets were further extracted and stored in a geodatabase. These results were compared with the Automatic Identification System data, which can be considered factual data for the case study. Experimental results indicate that all azimuth ambiguities in the study area were detected and removed from real ship targets. **Conclusion** After being tested with four Radarsat-2 images, the average accuracy of this azimuth ambiguity removal method based on spaceborne SAR images proposed in this research is more than 95.8%. The results showed that this method can be effectively used to distinguish real ships from its azimuth ambiguities for 30 m spatial resolution SAR images and can improve the accuracy of ship detection on SAR images.

**Key words:** ship detection; azimuth ambiguities; synthetic aperture radar (SAR); automatic identification system (AIS); remote sensing; Radarsat-2

## 0 引言

合成孔径雷达(SAR)是海洋及海岸带遥感的有效手段,在海洋环境监测、海岸带管理及船舶交通监视等方面展现出良好的应用<sup>[1-3]</sup>。雷达影像上识别船舶主要基于海面与船舶的不同后向散射特征,即船舶在雷达影像上表现为亮目标,而背景海面则呈暗色。星载SAR船舶目标检测算法研究较多,最具代表性的是恒虚警率(CFAR)算法<sup>[4-7]</sup>,这是一种基于统计特征的算法,该算法需要确定海洋背景杂波的概率密度函数,据此选择合适的检测阈值。一些学者<sup>[8-10]</sup>研究了利用多尺度小波变换、神经网络等图像处理技术进行船舶提取。随着多极化/全极化SAR卫星的不断丰富,充分利用极化SAR数据进行船舶检测也成为研究热点,学者<sup>[11-14]</sup>利用极化熵和多极化子孔径分解等方法研究了船舶检测及其改进算法,相比单极化检测能够提升检测性能。由于SAR特有的成像机制,短波长SAR影像(如C波段)通常存在着严重的方位向模糊噪声,即鬼影目标<sup>[15-16]</sup>。特别是对于表面为钢结构的大型舰船而言,其方位向模糊的后向散射强度较强,若直接对影像进行船舶识别,则方位向模糊噪声很容易被误判

为船舶,导致虚警率提高。本文简述了方位向模糊噪声的产生原因,提出一种星载SAR影像上船舶方位向模糊去除的新方法,以Radarsat-2影像为例进行实验分析,并与AIS实测数据进行比对校验,分析算法的准确率。

## 1 SAR影像上船舶方位向模糊

### 1.1 SAR影像船舶识别原理

雷达成像是一种主动式遥感,它通过接收自身发射的电磁波后向反射信号,组成亮度相干叠加的雷达记录,地物的后向散射系数决定了雷达收到的回波强度。由于船体与海面、船舶上层建筑与甲板之间易形成二面角反射,因此与背景海面相比,SAR影像上船舶目标会表现为明亮的像素,海洋表面和船舶的亮度差异是SAR影像识别船舶的基础。

### 1.2 方位向模糊

方位向模糊是星载SAR识别船舶过程中要解决的一个重要问题。方位向模糊噪声不仅会降低图像质量,严重时还会形成众多假目标,造成误判。星载SAR在方位向上是以脉冲重复频率(PRF)来采样的,由于多普勒效应,方位向压缩所采用的匹配滤波器通常在主瓣多普勒带宽内,当PRF较高时,旁瓣

处的信号相对于主瓣来说很弱, 因此不会出现明显的模糊现象; 当 PRF 较低时, 会导致回波信号的多普勒频谱欠采样, 使旁瓣处的线性调频信号进入滤波器带宽之内, 产生明显的方位向模糊<sup>[17-19]</sup>, 如图 1 所示。

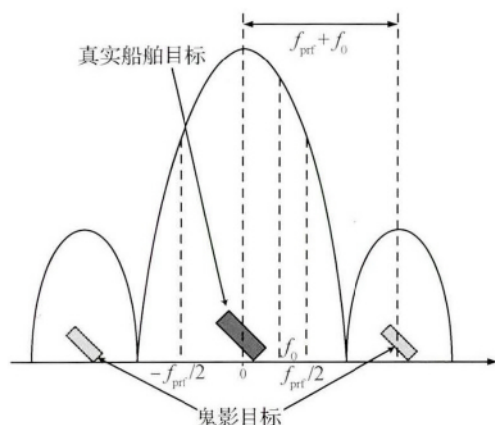


图 1 方位向模糊产生原理示意图

Fig. 1 Illustration of azimuth ambiguities in SAR images

通常, 雷达影像上模糊噪声与真实船舶目标在方位向上的位置偏移量<sup>[20]</sup>近似为

$$\Delta x_{AZ} = \frac{nf_{prf}V_a}{f_{DR}} \quad (1)$$

式中  $\Delta x_{AZ}$  为方位向位置偏移距离,  $n$  为鬼影目标序列数  $n$  是正整数  $n = 1, 2, 3, \dots$ ,  $f_{prf}$  为脉冲重复频率 PRF,  $V_a$  为星载雷达传感器与海面目标的相对运动速度,  $f_{DR}$  为多普勒调频率。受影像幅宽及能量衰减的影响, 通常真实船舶形成的鬼影目标序列数  $n \leq 3$ , 其鬼影目标有时呈单侧排列, 有时则呈现双侧排列, 双侧排列时, 距离真实船舶越远, 其方位向的模糊程度越高, 鬼影目标的总个数不大于  $2n$ 。

由于频率越高, 能量越大, 故而短波 SAR 影像往往会形成明显的方位向模糊噪声, 特别是当海面风速较低时, 海表面近似呈现镜面反射(在 SAR 影像上表现为深暗色), 造成船舶的方位向模糊噪声更加明显突出。方位向模糊在 SAR 影像船舶检测中常被误判为真实船舶目标, 为降低虚警率, 式(1)常被用于方位向模糊噪声的去除, 但这种剔除方法虽然考虑了方位向位置偏移距离, 但往往对以下 3 种误判因素考虑不足: 1) 方位向模糊噪声与真实目标在方位向角度上的一致性; 2) 方位向模糊的能量逐次衰减; 3) 船舶自身成像特征, 因而容易造成漏检或错检。

本文在综合分析方位向角度一致性、方位向位置偏移距离及方位向模糊能量衰减 3 种因素的基础上, 提出了中分辨率 SAR 影像上船舶自动检测方法, 以期能够降低虚警率, 提高船舶自动检测的准确率。

## 2 方位向模糊去除算法

从方位向模糊的形成机理分析, SAR 影像上的方位向模糊具有 3 方面特征: 1) 真实船舶目标与方位向模糊目标具有方位向角度的一致性; 2) 方位向位置偏移距离符合式(1)的距离标准; 3) 方位向模糊目标随着与真实目标距离的增加, SAR 成像上呈现能量衰减特征。据此, 提出基于上述 3 个规则的方位向模糊去除算法, 算法基本流程图如图 2 所示。

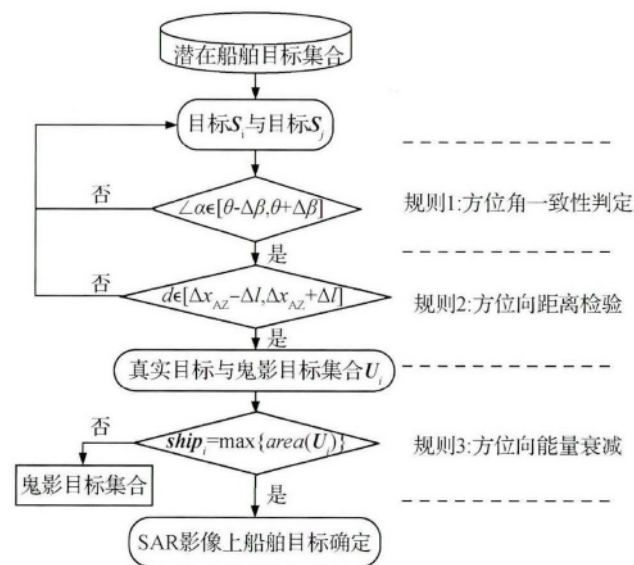


图 2 方位向模糊去除方法流程图

Fig. 2 Removal process of azimuth ambiguities

### 2.1 方位向角度一致性

规则 1: 方位向角度的一致性。若满足

$$\angle \alpha \in [\theta - \Delta\beta, \theta + \Delta\beta] \quad (2)$$

则认为亮斑目标  $S_i$  与亮斑目标  $S_j$  两点连线的方向与方位向一致, 否则认为不一致。 $S_i$  和  $S_j$  为经过 SAR 数据处理后提取的白色亮斑目标;  $\angle \alpha$  为  $S_i$  与  $S_j$  亮斑中心点连线的方位向角度, 以正北方向为零, 顺时针方向增加,  $\angle \alpha \in [0^\circ, 360^\circ)$ ;  $\theta$  为 SAR 卫星的方位角, 卫星方位角<sup>[21]</sup>指卫星到观测点形成的线段在观测点水平面上的投影与当地子午线的夹角, 以正北方向为零, 顺时针方向增加;  $\Delta\beta$  为方位向角度宽容度。 $\Delta\beta$  的确定方法如图 3 所示, 其中,

直线  $l_1$  表示过真实船舶目标亮斑  $A$  与其方位向模糊亮斑  $A'$  中心点的连线, 直线  $l_2$  表示与  $A$  和  $A'$  同时相切且方位向角度最大的切线, 方位向角度宽容度  $\Delta\beta$  即为直线  $l_1$  与直线  $l_2$  之间的夹角。

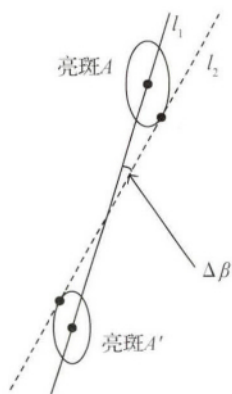


图3 方位向角度宽容度  $\Delta\beta$  的确定方法

Fig. 3 The determination of  $\Delta\beta$

## 2.2 方位向偏移距离

规则 2: 两点之间的方位向偏移距离符合方位向模糊的理论距离, 令  $d$  为  $S_i$  与  $S_j$  两点之间的距离, 若满足

$$d \in [\Delta x_{AZ} - \Delta l, \Delta x_{AZ} + \Delta l] \quad (3)$$

则认为  $S_i$  与  $S_j$  两点之间距离与方位向模糊理论距离一致, 否则认为不一致。  $\Delta x_{AZ}$  为 SAR 影像上亮斑目标  $S_i$  与  $S_j$  之间方位向模糊的理论距离;  $\Delta l$  为方位向距离宽容度  $\Delta l$  的确定方法如图 4 所示, 其中,  $L_a$  表示真实船舶目标亮斑  $A$  与其方位向模糊亮斑  $A'$  之间的端点最大距离,  $L_b$  表示  $A$  与  $A'$  的中心位置距离,  $\Delta l = L_a - L_b$ 。

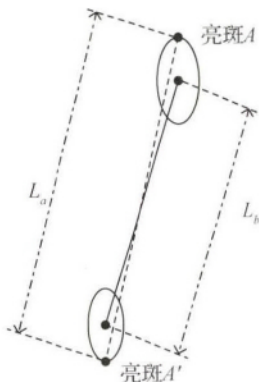


图4 方位向距离宽容度  $\Delta l$  的确定方法

Fig. 4 The determination of  $\Delta l$

## 2.3 方位向模糊能量衰减

规则 3: 由于方位向模糊能量随距离逐渐衰减,

因此在 SAR 影像上, 随着与真实船舶目标距离的增大, 方位向模糊噪声逐次而减弱, 在成像特征上表现为亮斑信号像元个数的逐渐变小, 且与其鬼影目标序列号呈负相关。基于此, 若确定了一组潜在船舶目标与方位向模糊目标的集合  $U_i$ , 则可以确定真实船舶目标  $ship_i$ , 即

$$ship_i = \max\{area(U_i)\} \quad (4)$$

而集合  $U_i$  中其余元素则为真实船舶目标  $ship_i$  的方位向模糊, 从而实现对方位向模糊目标的去除。

## 3 实验与讨论

### 3.1 实验数据

选取中分辨率 Radarsat-2 影像为例进行实验分析。在实验区域上, 渤海海峡位于山东半岛和辽东半岛之间, 是船舶进出渤海的要道, 有老铁山水道和长山水道两条主要航道, 交通流密集。青岛港位于山东半岛南岸, 是太平洋西海岸重要的国际贸易口岸和海上运输枢纽, 船舶流量大。基于上述考虑, 选取渤海海峡和青岛附近海域进行实验分析具有较好的代表性。卫星数据情况如表 1。

表 1 实验 Radarsat-2 数据列表

Table 1 List of Radarsat-2 data

影像号	成像时间(UTC)	成像模式	极化方式	研究区域
Image 1	2015-05-13 T21:58	Wide	VV	Region 1
Image 2	2015-04-02 T21:55	Wide	VV	Region 2-4

注: Region 1、2、3、4 各研究区域范围见图 5(a) 所示。

### 3.2 结果分析

对原始 Radarsat-2 影像首先进行几何校正, 海陆分离等数据预处理, 以校正畸变, 获得的单一海域 SAR 影像, 去除陆地目标的干扰。然后对预处理后进行增强和降噪, 去除斑点噪声, 提高影像对比度。基于后向散射强度对预处理后的 SAR 影像进行分割, 检测并提取亮斑信息, 其后进行方位向模糊剔除。

老铁山水道是进出渤海的一条重要航道, 船舶流量较大, 其成像特征较为典型。在研究区域 Region 1(图 5(b)) 中检测到 7 个亮斑目标, 其中  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  为真实船舶目标,  $S_1'_s$ 、 $S_1'_n$ 、 $S_2'_s$  和  $S_3'_s$  为对应的方位向模糊目标(s 代表 south, 表示方位向模糊位于真实目标南侧; n 代表 north, 表示方位向模糊位



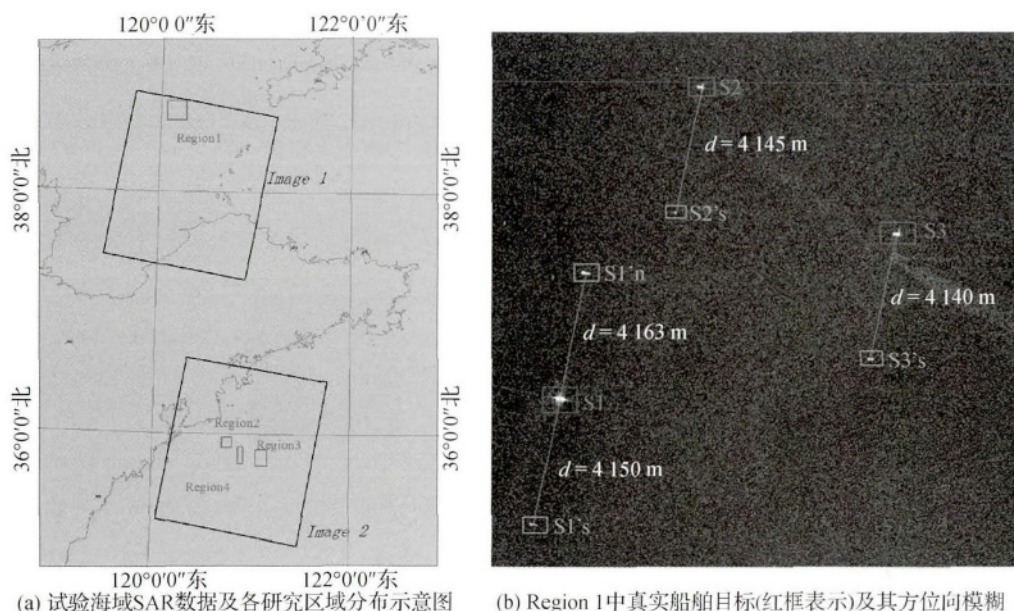


图5 实验数据

Fig. 5 Study area ( (a) overview of study area and SAR images; (b) real ship targets( red rectangle) and their azimuth ambiguities( green rectangle) of Region 1)

于真实目标北侧),其方位向角度均约  $192^\circ$ ,方位向偏移距离均约 4 150 m。船舶 S1 的方位向模糊明显,在方位向南北两侧均形成一个模糊目标,船舶 S2 和 S3 则各自形成了单侧模糊目标。

对于处于不同运动状态(航行和锚泊)的船舶,图 6 给出了实例。在研究区域 Region 2(图 6 左上)中检测到 2 个亮斑目标,其中 S4 为真实船舶目标,通过 SAR 影像上形成的船舶尾迹可以判断该船舶正处于航行状态,经 AIS 信息核对显示该船舶当时航速为 12 节。S4's 为该船对应的方位向模糊目标,位于真实目标南侧。研究区域 Region 3(图 6 左下)为青岛海域附近一处锚地,在该区域中共检测到 12 个亮斑目标,包括真实船舶目标 5 个,方位向模糊目标 7 个。其中, S6 未形成明显的方位向模糊, S5 形成了 1 个单侧方位向模糊, S7、S8 和 S9 各形成了 2 个双侧方位向模糊。经 AIS 信息核对显示雷达成像时间该海域实际船舶为 5 艘,都处于锚泊状态,算法检测结果与实际相符。对 SAR 影像进行方位向模糊去除,得到船舶检测结果如图 7 右上和图 7 右下所示,红框为真实船舶,绿框为方位向模糊目标。

方位向模糊能量随距离逐渐衰减,一般而言,船舶在 SAR 影像上形成的鬼影目标序列数  $n \leq 3$ , Region 4 海域中船舶 S10 所形成的二面角反射强度较高,在 SAR 影像上形成了多重方位向模糊,即在

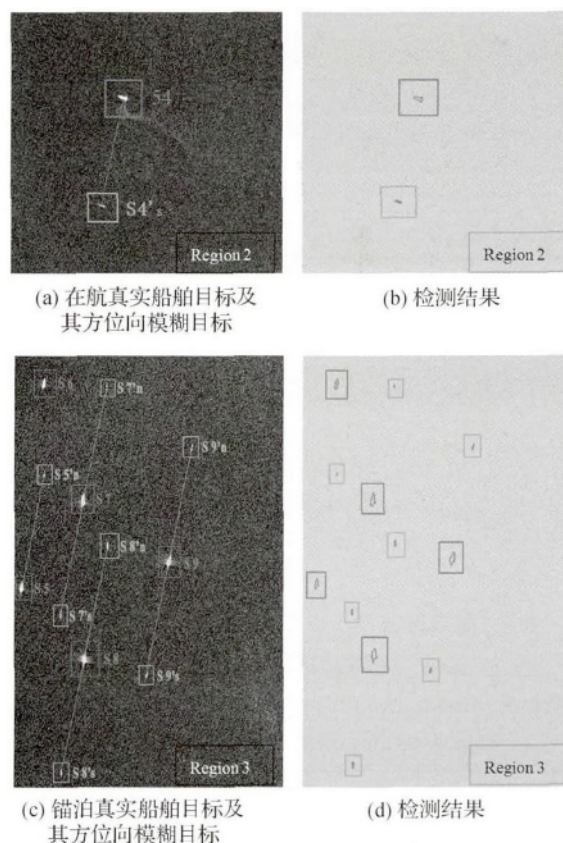


图6 不同运动状态的船舶所形成的方位向模糊

Fig. 6 Azimuth ambiguities of ships under different motion state ( (a) real ships under way and their azimuth ambiguities; (b) target detection; (c) real anchored ships and their azimuth ambiguities; (d) target detection

其南侧形成了两个鬼影目标  $S10's$  和  $S10''s$  ,此时  $n = 2$ (如图 7 和表 2 所示)。

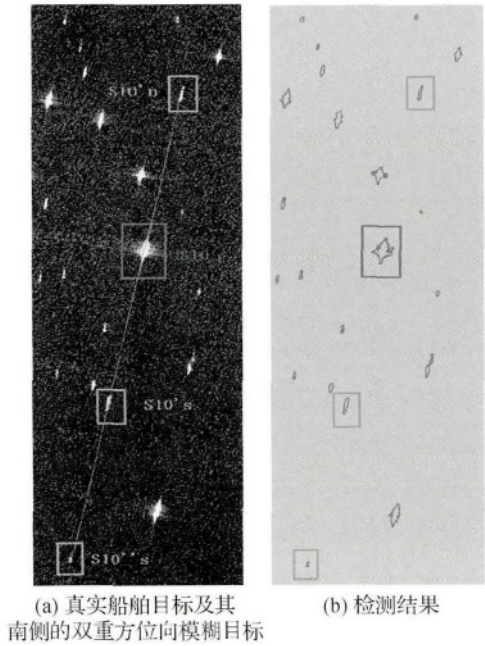


图 7 双重方位向模糊示例

Fig. 7 Examples of multiple azimuth ambiguities of ships on SAR image ( ( a ) real ship targets and their multiple azimuth ambiguities; ( b ) target detection)

表 2 SAR 影像上 S10 信息及 AIS 系统获取的船舶信息  
Table 2 Information of S10 extracted from SAR images and AIS

SAR 影像亮斑信息		AIS 船舶信息	
ID	亮斑切片	船名 船旗国 类型	船舶图片
S10		CSCL PUSAN 新加坡 集装箱船	

利用本文算法对实验数据进行船舶方位向模糊去除 检测结果如表 3 所示。经 AIS 校验分析 本算法能够对 4 个实验区的方位向模糊实现全部剔除 , 对于实验数据方位向模糊目标检测准确率达到 100% ,无漏检和虚警。

目前 ,在 SAR 影像船舶检测方面比较常用的算法包括双参数 CFAR 算法、基于 K 分布的 CFAR 算法等 ,利用相关算法对实验数据进行船舶提取。由于整景影像范围内船舶数量较多 ,选取部分区域进行统计分析 结果如表 4 所示。

表 3 算法检测精度统计

Table 3 Comparison of extraction results in four study area

研究海域	算法对 SAR 影像检测结果			AIS 校验比对分析			
	亮斑目标数	方位向模糊目标数	船舶数	正确数	虚警数	漏检数	去除准确率 /%
Region 1	7	4	3	4	0	0	100
Region 2	2	1	1	1	0	0	100
Region 3	12	7	5	7	0	0	100
Region 4	22	11	11	11	0	0	100

表 4 本文算法与几种常用 SAR 影像船舶检测方法实验结果比较

Table 4 Comparison of extraction results of different ship detection methods in SAR images

算法	实际船舶数	检测船舶数	漏检数	虚警数
双参数 CFAR	18	26	0	8
K 分布 CFAR	18	28	0	10
本文	18	18	0	0

对于实验区域 ,双参数 CFAR 算法和基于 K 分布的 CFAR 算法能够对亮目标进行较好的检测 ,但

是对于船舶的方位向模糊并未进行剔除 ,造成了虚警 本文算法考虑了船舶方位向模糊对于船舶检测的影响 ,能够有效剔除单双侧的方位向模糊 提高了真实船舶检测的有效性。为了能更客观地反映算法的适应性和检测效果 ,选择了 4 景成像于 2015 年 3 月—6 月的 Radarsat-2 数据进行实验 ,结果表明 ,对 30 m 分辨率的 Radarsat-2 实验影像 ,本文算法对船舶方位向模糊的去除准确率优于 95.8% ,能够有效地去除船舶方位向模糊造成的误判 ,提高船舶识别的准确率。



## 4 结 论

在分析 SAR 影像上的方位向模糊成像特征的基础上,提出了一种新的星载 SAR 影像上船舶方位向模糊去除算法,该算法的核心是构建目标方位向角度一致性、方位向位置偏移距离和方位向模糊能量衰减 3 个判别规则,对潜在 SAR 影像亮斑目标进行逐层筛选,实现船舶真实目标和方位向模糊目标的判别。选取中国渤海海域和黄海海域的 Radarsat-2 数据进行案例分析,并与 AIS 实测数据进行比对校验,实验结果表明该算法能够有效剔除船舶方位向模糊,实验区域中船舶方位向模糊目标的剔除率到达 100%,对多景 SAR 影像进行实验分析,算法对船舶方位向模糊的平均剔除率优于 95.8%,去除效果良好。该算法为星载 SAR 影像上船舶方位向模糊去除提供了新的手段,有助于提高 SAR 影像上船舶目标检测的准确性。本文只选取了单极化 SAR 数据,对于多极化和全极化数据可进一步研究。

## 志 谢

在本文成文过程中,美国国家海洋与大气管理局(GST, NOAA/NESDIS) 李晓峰研究员、中国科学院遥感与数字地球研究所的王超研究员、武汉大学杨杰教授等提供了有意义的观点和建议,并提供了有关专著和文献,作者在此表示衷心感谢。

## 参考文献(References)

- [1] Brusch S, Lehner S, Fritz T, et al. Ship surveillance with Terra-SAR-X[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(3): 1092-1103. [DOI: 10.1109/TGRS.2010.2071879]
- [2] Vachon P W, Thomas S J, Cranton J, et al. Validation of ship detection by the RADARSAT synthetic aperture radar and the ocean monitoring workstation[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(3): 200-212. [DOI: 10.1080/07038992.2000.10874770]
- [3] Liao M S, Wang C C, Wang Y, et al. Using SAR images to detect ships from sea clutter[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2008, 5(2): 194-198. [DOI: 10.1109/LGRS.2008.915593]
- [4] Friedman K S, Wackerman C, Funk F, et al. Validation of a CFAR vessel detection algorithm using known vessel locations[C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, NSW: IEEE, 2001, 4: 1804-1806. [DOI: 10.1109/IGARSS.2001.977077]
- [5] Ji Y G, Zhang J, Meng J M, et al. A new CFAR ship target detection method in SAR imagery[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(1): 12-16. [DOI: 10.1007/s13131-010-0002-6]
- [6] Jakeman E, Pusey P. A model for non-rayleigh sea echo[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1976, 24(6): 806-814. [DOI: 10.1109/TAP.1976.1141451]
- [7] Wang C, Zhang H, Wu F, et al. Ship Detection and Classification on High Resolution SAR Images[M]. Beijing: Science Press, 2013. [王超, 张红, 吴樊, 等. 高分辨率 SAR 图像船舶目标检测与分类[M]. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [8] Tello M, Lopez-Martinez C, Mallorqui J J. A novel algorithm for ship detection in SAR imagery based on the wavelet transform[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2005, 2(2): 201-205. [DOI: 10.1109/LGRS.2005.845033]
- [9] Jiang Q S, Aitnouri E, Wang S R, et al. Automatic detection for ship target in SAR imagery using PNN-model[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2000, 26(4): 297-305. [DOI: 10.1080/07038992.2000.10874780]
- [10] Greidanus H. Sub-aperture behavior of SAR signatures of ships[C]//IEEE International Conference on Geoscience and Remote Sensing Symposium. Denver, Colorado, USA: IEEE, 2006: 3579-3582. [DOI: 10.1109/IGARSS.2006.917]
- [11] Touzi R, Hurley J, Vachon P W. Optimization of the degree of polarization for enhanced ship detection using polarimetric RADARSAT-2[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(10): 5403-5424. [DOI: 10.1109/TGRS.2015.2422134]
- [12] Souyris J C, Henry C, Adragna F. On the use of complex sar image spectral analysis for target detection: assessment of polarimetry[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(12): 2725-2734. [DOI: 10.1109/TGRS.2003.817809]
- [13] Han Z Y, Zhong J S. Ship detection algorithm in polarimetric SAR images[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2006, 20(1): 65-70. [韩昭颖, 种劲松. 极化合成孔径雷达图像船舶目标检测算法[J]. 测试技术学报, 2006, 20(1): 65-70.] [DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2006.01.014]
- [14] Sun Y, Wang C, Zhang H, et al. Polarimetric SAR ship detection using improved notch filter[J]. Journal of Image and Graphics, 2013, 18(10): 1374-1382. [孙渊, 王超, 张红, 等. 改进 Notch 滤波的全极化 SAR 数据船舶检测方法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(10): 1374-1382.] [DOI: 10.11834/jig.20131020]
- [15] Bamler R, Runge H. PRF-ambiguity resolving by wavelength diversity[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing

- ing, 1991, 29(6): 997-1003. [DOI: 10.1109/36.101376]
- [16] Jiang G A, Song H J. Analysis and suppression on azimuth ambiguity of SAR [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(12): 45-47. [姜国安, 宋红军. SAR 方位向模糊分析与抑制[J]. 电子测量技术, 2007, 30(12): 45-47. ] [DOI: 10.3969/j.issn.1002-7300.2007.12.014]
- [17] Zhang Y J, Li C P. Analysis of synthetic aperture radar ambiguities [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2004, 26(9): 1455-1460. [张永军, 李彩萍. 合成孔径雷达模糊度分析[J]. 电子与信息学报, 2004, 26(9): 1455-1460. ]
- [18] Zheng J L, Ying Q H, Yang W L. Signals and Systems [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. ]
- [19] Wei J J, Li P X, Yang J, et al. A new automatic ship detection method using L-band polarimetric SAR imagery [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(4): 1383-1393. [DOI: 10.1109/JSTARS.2013.2269996]
- [20] Velotto D, Soccorsi M, Lehner S. Azimuth ambiguities removal for ship detection using full polarimetric X-band SAR data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(1): 76-88. [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2236337]
- [21] Zhang Y S, Feng Z K, Shi D. The influence of satellite observation direction on remote sensing image [J]. Journal of Remote Sensing, 2007, 11(4): 433-438. [张云松, 冯钟葵, 石丹. 卫星观测方位对遥感成像的影响[J]. 遥感学报, 2007, 11(4): 433-438. ] [DOI: 10.11834/jrs.20070460]