

# 基于 $G^0$ 分布的高海况 SAR 船只 目标检测方法\*

鲁统臻<sup>1, 2</sup>, 张杰<sup>2</sup>, 纪永刚<sup>2</sup>, 张晰<sup>1, 2</sup>, 孟俊敏<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学 信息科学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061)

**摘要:**高海况条件下船只目标检测一直是 SAR 船只检测的难点之一, 选用何种分布来精确描述强海杂波对目标检测效果有重要影响。文章将常用于陆地城区 SAR 图像建模的  $G^0$  分布应用于高海况条件下杂波建模, 分析了  $G^0$  分布对不同星载 SAR 数据的建模效果, 验证了其用于海面杂波拟合的适应性, 得出  $G^0$  分布对极不均匀区域海杂波建模能力要优于常用分布; 结合恒虚警目标检测算法, 提出了基于  $G^0$  分布的星载 SAR 船只目标检测算法; 利用海上同步实验, 验证了此方法的有效性。

**关键词:**SAR; 高海况; 海杂波; 船只检测;  $G^0$  分布

**中图分类号:**TN957.51

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-6647(2011)02-0186-10

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种高分辨率成像微波传感器, 具有全天时和全天候的观测能力, 是大范围海上船只目标探测的主要遥感手段。我国领海广阔, 海洋资源丰富, 开展 SAR 图像船只目标检测的研究具有重要意义, 在监视海运交通、维护海洋权益、提高海防预警能力等方面有着广阔的应用前景。

恒虚警率(Constant False Alarm Rate, CFAR)探测算法是 SAR 船只目标检测的重要方法之一。为了在不同海况环境条件下获得恒虚警效果, 必须对海杂波特性进行统计分析, 实现海杂波背景建模。为此, 人们提出了瑞利分布、对数正态分布、韦布尔分布、 $\alpha$  稳态分布和  $K$  分布<sup>[1-2]</sup> 等不同的杂波分布模型, 其中  $K$  分布是常用统计模型, 其不仅在很宽的条件范围内与杂波幅度分布很好地匹配, 而且还可正确地模拟杂波回波脉冲间的相关特性, 是描述海杂波的经典模型。海杂波的强弱对船只检测的影响较大, 其主要受海况的影响。海况主要是指风力作用下的海面外貌特征。根据视野内海面状况、波峰的形状及其破裂程度和浪花泡沫出现的多少等, 共分为 10 级; 当海况等级  $\geq 5$  级时, 认为此时海面状态为高海况<sup>[3]</sup>。低海况时, 海面背景比较均匀, 利用上述各分布模型进行船只目标检测均取得较好的效果, 但在高海况产生的强海杂波背景下, 海面杂波分布具有复杂的随机性与突变性, 上述分布不能较好的描述。 $G^0$  分布是一种用于图像建模的乘积模型, 由 Ferry 等<sup>[4]</sup> 提出, 并证明了  $G^0$  分布对森林以及城区等极不均匀区域建模能力较好。但目前  $G^0$  分布主要应用于 SAR 陆地背景杂波的模拟, 还未见其用于海区强杂波建模的研究报道。与城区人造性杂波(如各种建筑物散射产生的杂波)较多不同, 海杂波的产生是由风、浪、流等海面动力过程引起的, 并呈现一种在时间、强度、频率、空间和速度等方面较为复杂的关系, 因此海域杂波建模与陆地杂波建模又有较大的区别。一般认为, 以陆地城区为背景的杂波服从对数正态分布模型, 而以海洋为背景的杂波通常服从  $K$  分布和韦布尔分布模型。基于  $G^0$  分布进行目标检测虽已开展了一些研究<sup>[5]</sup>, 但均为陆地杂波背景,  $G^0$  分布对海区强杂波建模效果如何, 对不同的 SAR 数据源海杂波建模效果又有何不同, 均需进一步研究。

本研究首先基于 ENVISAT ASAR、RADARSAT-1 和 ERS-2 等不同数据源, 验证  $G^0$  分布对海杂波的

\* 收稿日期: 2009-10-15

资助项目: 国家自然科学基金重大项目——多维度微波成像基础理论与关键技术(60890075); 国家海洋局第一海洋研究所基本科研业务费专项资金项目——舰船目标地波雷达与 SAR 综合监视监测技术研究(2008T04)

作者简介: 鲁统臻(1985-), 男, 山东临沂人, 硕士, 主要从事海洋遥感方面研究。E-mail: lutongzhen@gmail.com

(杜素兰 编辑)

建模能力,然后对不同海况条件下  $G^0$  分布的建模效果进行对比分析。在此基础上,发展了高海况下基于  $G^0$  分布的 CFAR 船只目标检测算法,将检测结果与现场实验数据集进行比对,验证所发展的检测算法的有效性,并通过绘制 ROC 性能曲线对算法进行进一步评价。

## 1 高海况下基于 $G^0$ 分布的海杂波建模

### 1.1 $G^0$ 分布模型及参数估计介绍

$G^0$  分布是基于乘积模型发展而来的,乘积模型将雷达回波分为背景后向散射和杂斑噪声两部分,回波的分布取决于后向散射和杂斑噪声的分布,在散射机理上对杂波做了很好的物理解释。强度形式的  $G^0$  分布和幅度形式的  $G^0$  分布表达式分别为<sup>[4]</sup>:

$$\begin{cases} p_{x_I}(x) = \frac{n^n \Gamma(n-\alpha)}{\gamma^n \Gamma(n) \Gamma(-\alpha)} \cdot \frac{x^{n-1}}{(\gamma+nx)^{n-\alpha}}, -\alpha, \gamma, n, x > 0 \\ p_{x_A}(x) = \frac{2^n n \Gamma(n-\alpha)}{\gamma^n \Gamma(n) \Gamma(-\alpha)} \cdot \frac{x^{2n-1}}{(\gamma+nx^2)^{n-\alpha}}, -\alpha, \gamma, n, x > 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $n$  表示等效视数; $\alpha$  为形状参数,本质上反映了被测区域的均匀度; $\gamma$  为尺度参数,与被测区域的平均能量有关。通过强度或幅度形式的  $G^0$  分布获得参数估计值是完全相同的,本文选用强度形式的  $G^0$  分布进行计算。

$G^0$  分布的形式复杂,给参数估计带来困难,常用的估计方法有矩估计法(MOM)和最大似然估计法(ML)<sup>[4,6]</sup>。由于这两种方法的等效视数  $n$  均为先验知识获得,会造成  $G^0$  分布对杂波建模能力下降,因此本文选用最新发展的 SKS<sup>[7]</sup> 估计方法,其参数估计的表达式为:

$$\begin{cases} \ln(\hat{\gamma}/\hat{n}) + \Psi(\hat{n}) - \Psi(-\hat{\alpha}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i)] \\ \Psi(1, \hat{n}) + \Psi(1, -\hat{\alpha}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i) - \hat{c}_1]^2 \\ \Psi(2, \hat{n}) + \Psi(2, -\hat{\alpha}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i) - \hat{c}_1]^3 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\Psi(\cdot)$  为 digamma 函数; $\hat{c}_1 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [\ln(x_i)]$ ;  $x_i$  为样本值。

上述方程组借助于数值方法能够准确、迅速地迭代出所求解的参数的估计值。

### 1.2 基于 $G^0$ 分布的海杂波建模分析

在已经发展的统计模型中, $K$  分布是一个比较经典的统计模型。 $K$  分布对于杂波 RCS 分量起伏采用 Gamma 分布建模,这在雷达成像机理上给出很好的解释,使得该分布有较大的 SAR 图像建模能力;而且,很多经典的统计分布模型是该分布的特例,使得该分布可以在一个很宽的杂波均匀度范围内对图像数据进行精确建模<sup>[8]</sup>。因此,为更好的评价  $G^0$  分布的建模效果,本研究将其与经典  $K$  分布模型进行比对,来分析  $G^0$  分布对海杂波的建模能力。

下面分别用  $K$  分布和  $G^0$  分布对不同海况条件下的不同星载 SAR 数据进行建模,并分析二者的海杂波建模效果。本研究使用的星载 SAR 数据及其对应的海况情况如表 1 所示:

表 1 SAR 图像及其对应的海况参数

Table 1 SAR image and the corresponding sea state parameters

日期	时间(UTC)	数据类型	所在海域	海况参数
2005-06-23	05:32:35	ERS-2	南海南部海域	风力 4 级、浪高 1.2 m、3 级海况
2006-01-11	03:02:56	RADARSAT-1	渤海海域	风力 5 级、浪高 1.8 m、4 级海况
2007-07-20	02:06:47	ENVISAT ASAR	青岛附近海域	风力 4 级、浪高 1.5 m、3 级海况
2007-07-23	02:12:35	ENVISAT ASAR	青岛附近海域	风力 6 级、浪高 2.2 m、5 级海况
2007-12-07	02:06:47	ENVISAT ASAR	青岛附近海域	风力 6 级、浪高 2.5 m、5 级海况

注:海况数据来自于交通部发布的海洋气象历史资料

### 1.2.1 低海况下不同数据源杂波建模

选取低海况下 ENVISAT ASAR、RADARSAT-1 和 ERS-2 影像各一景,并在图像上截取  $400 \times 400$  像素的区域,利用选取的图像信息分别对两种分布进行参数估计,求出分布的概率密度公式,进行海杂波建模,所截图像及建模效果如图 1 所示:

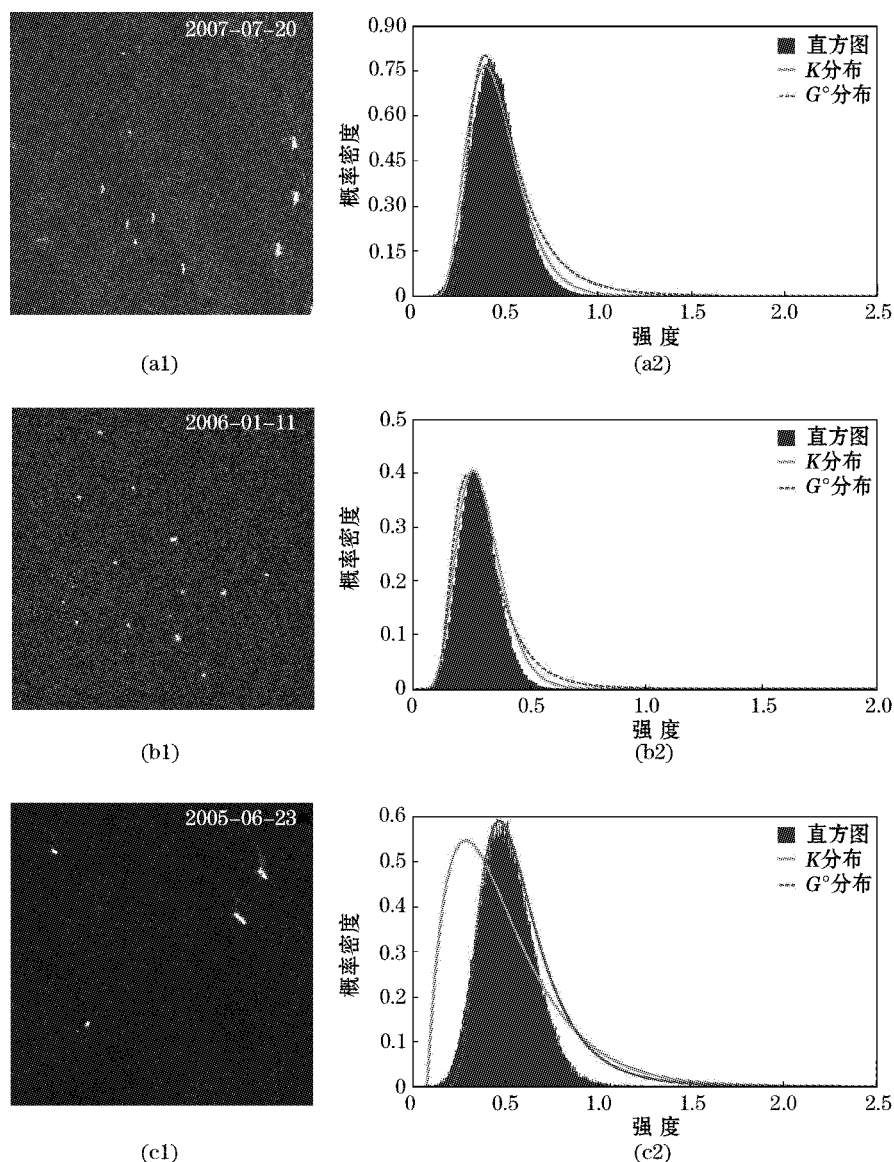


图 1 不同数据源截图及低海况条件下图像建模

Fig. 1 The image screenshots of different SAR data source and the modeling for images under moderate sea conditions

从上述结果来看,对于 ENVISAT ASAR(图 1a1)以及 RADARSAT-1 SAR(图 1b1)影像, $G^0$  分布与  $K$  分布的拟合结果接近(图 1a2、1b2),而从 ERS-2 SAR(图 1c1)影像的结果来看, $G^0$  分布对图像的直方图的拟合程度明显好于  $K$  分布(图 1c2)。需要说明的是, $K$  分布对 RADARSAT 影像建模效果稍优于  $G^0$  分布,这也和 Vachon<sup>[9]</sup> 等得出的结论是一致的。

### 1.2.2 高海况条件下同一数据源杂波建模

从实验同步获取的 ENVISAT 影像中选取一景海况复杂的图像,在图像上截取  $400 \times 400$  像素的区域进行杂波建模,并与低海况下图像建模结果进行对比,结果由图 2 给出:

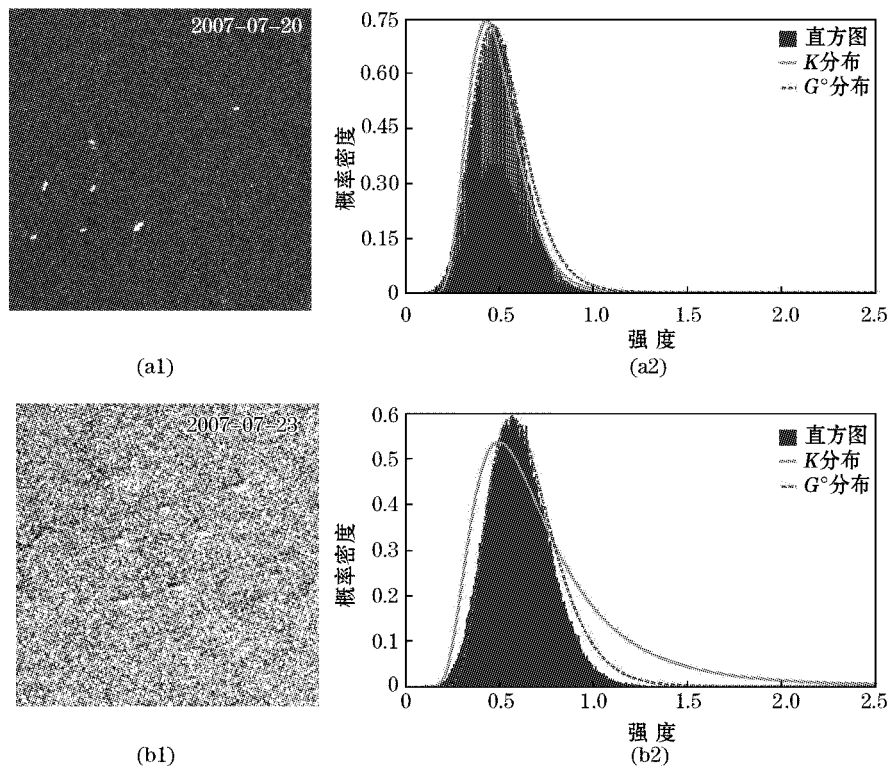


图 2 ENVISAT 影像截图及不同海况下的图像建模

Fig. 2 The ENVISAT SAR image screenshots and the modeling for SAR images under different sea conditions

图 2a1、图 2b1 分别为低海况和高海况条件下 ENVISAT ASAR 影像截图,图 2a2、2b2 分别为图像直方图及 2 种分布的拟合曲线,可以看出在低海况下 2 种分布拟合结果接近;高海况下, $G^0$  分布对强海杂波的建模较好,取得了较好的拟合效果, $K$  分布则与实际情况相差较大。

2 种情况的比较分析可以看出: $G^0$  分布可较好的适用于不同海况条件下的 ENVISAT ASAR、RADARSAT-1 和 ERS-2 SAR 等常规星载 SAR 数据源的海面背景建模,应用范围比较广泛,且拟合结果与  $K$  分布相当,特别是对于 ERS-2 和高海况条件下,拟合结果明显优于  $K$  分布结果。因此我们将  $G^0$  分布应用于 SAR 船只目标检测,可在一定程度上提高船只目标的检测率。

## 2 高海况下基于 $G^0$ 分布的 CFAR 船只目标检测算法

通常情况下,由于很强的角反射,船只目标在 SAR 图像中表现为一个很亮的斑点特征。但在高海况下,船只目标常常隐没于强大的背景杂波之中。恒虚警率 CFAR 技术是根据图像像素的统计特性来确定阈值,其基本原理是对应每个像素点  $x_i$ ,取其周围一定参考窗口,根据窗口中像素的统计特性确定一个阈值  $I_c$ ,通

过像素值与阈值的比对,实现目标检测。基于 CFAR 船只目标探测方法,其中海面背景统计模型选用  $G^0$  分布,我们提出了高海况下基于  $G^0$  分布的船只目标检测算法,流程如下:

- 1) 根据 SKS 方法(式 2)估计  $G^0$  分布的等效视数  $n$ 、形状参数  $\alpha$  和尺度参数  $\gamma$ 。
- 2) 将参数估计结果带入公式(1)中,得到概率密度函数的表达式,求解虚警概率方程:

$$1 - P_{fa} = \int_0^{I_c} p(x) dx \quad (3)$$

即可得到检测阈值  $I_c$ 。其中  $P_{fa}$  为虚警概率,通常选为  $10^{-5} \sim 10^{-8}$ 。因式 3 积分得不到解析表达式,故采用数值积分计算。记  $P(i) = \int_0^i p(x) dx$ ,  $x_{max}$  为目标像素的极大值,遍历图像可能出现的所有强度值,即  $0 \leq i \leq x_{max}$ ,将求取的  $P(i)$  值放在矩阵  $\mathbf{P}$  中,给定虚警概率  $P_{fa}$ ,若  $|P-1| \leq P_{fa}$ ,提取数值矩阵  $\mathbf{P}$  中满足该条件的值在矩阵中的位置 POS,  $POS_{min}$  即为检测阈值  $I_c$ 。

3) 根据上一步求得的检测阈值,判断像素  $x_i$  是否为目标像素。目标判决准则为  $x_i > I_c$  时,判定为目标;  $x_i \leq I_c$  时,判定为背景。

- 4) 运用区域生长法<sup>[10]</sup>和形态学滤波对步骤 3 产生的二值图像进行后处理,去除杂斑点,得到最终结果。

### 3 基于实测数据的算法验证与比较

我们选用的实测数据为 2007-07-20, 07-23 及 12-07 的 ENVISAT ASAR 影像和现场实测数据。卫星影像均为 Image 模式, VV 极化,分辨率为 25 m,其中 07-20 为低海况卫星影像,07-23 及 12-07 为高海况卫星影像。图 3 为选取的影像示例:

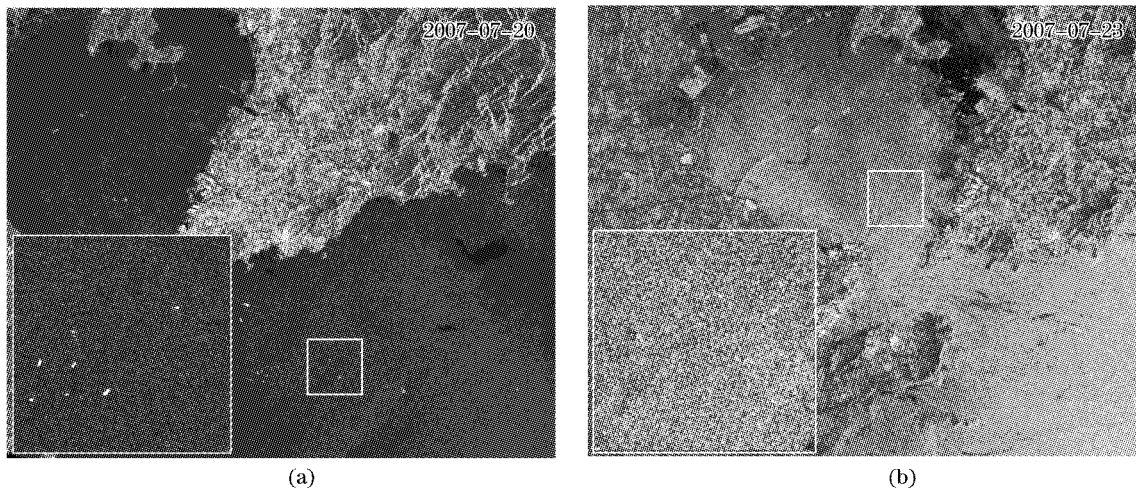


图 3 青岛附近海域 ENVISAT ASAR 影像及其截图

Fig. 3 The ENVISAT ASAR image and the screenshot for waters adjacent to Qingdao

现场实测数据为船只的 GPS 信息。实验区选在青岛港的锚地,由于锚地中的船舶在一段时间内是相对静止的,易于与 SAR 图像获取同步,且锚地船只数量较多,可短时间得到丰富的数据信息<sup>[11-12]</sup>。

#### 3.1 检测结果分析

基于本文发展的船只目标检测算法,得到不同海况条件下船只目标检测结果,并与常规  $K$  分布的 CFAR 算法<sup>[2]</sup>的探测结果进行比对。图 4、图 5 分别是两种探测算法的检测结果。

根据检测结果我们发现,在低海况产生的弱海杂波背景下,基于  $K$  分布和  $G^0$  分布的 CFAR 算法均取得了较好的效果,对照实测船只 GPS 数据可以看出,该海域所有船只目标均被检测出,无漏检情况。对于第二幅图像,两种检测方法均出现一个虚警信息,在原始 SAR 影像中该位置的确为一个很亮的点,而现场实验时

该区域为平静的海面,由于现场实验和卫星过境时间不可能严格同步,因此怀疑此处为卫星过境时的一艘海面移动船只。由于涉及到现场数据比对,对实测数据中没有记录信息的目标,这里将其归为虚警目标。

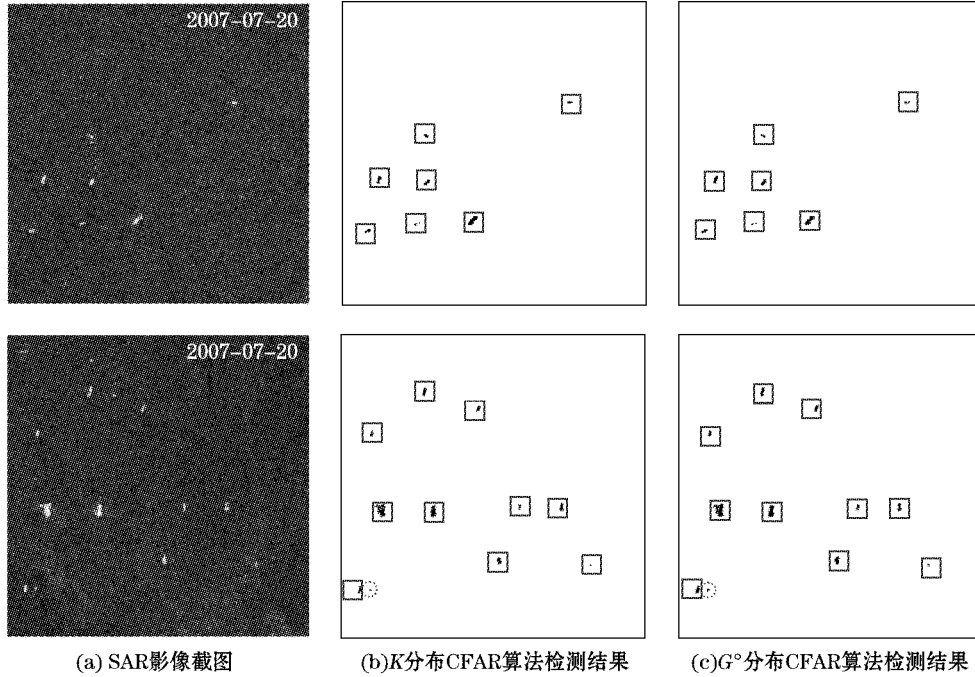


图 4 弱海杂波条件下的 SAR 图像及船只检测结果

(SAR 影像中的实线标注处为实测船只的 GPS 信息,检测结果中方框标注处为正确检测目标,圆圈标注处为虚警目标)

Fig. 4 SAR images and results from ship detection for weak sea clutter

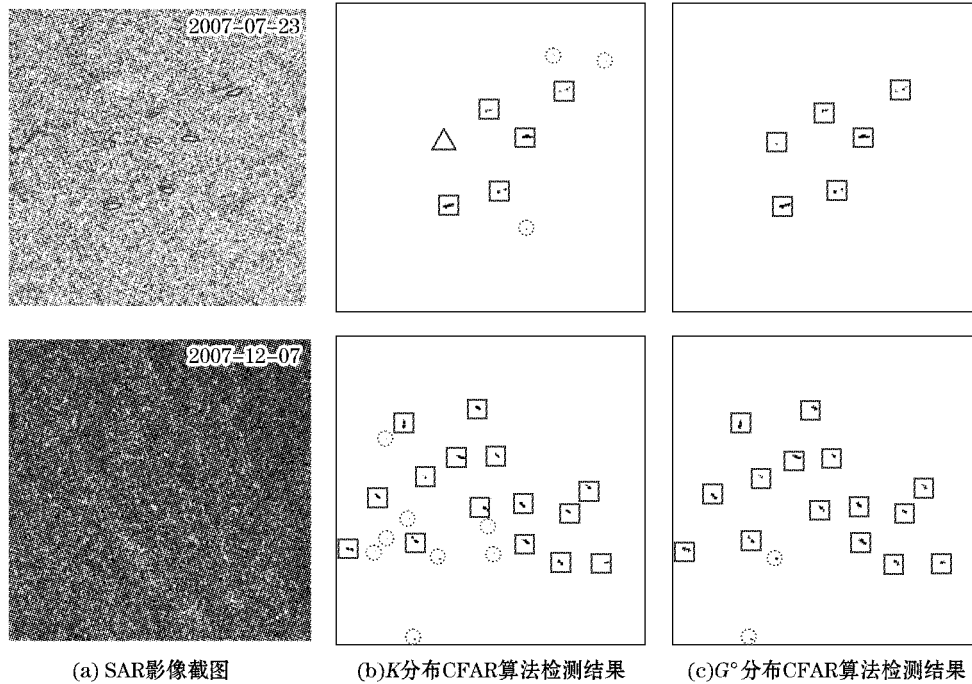


图 5 强海杂波条件下的 SAR 图像及船只检测结果

(SAR 影像中的实线标注处为实测船只的 GPS 信息,检测结果中方框标注处为正确检测目标,

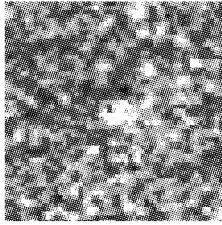

圆圈标注处为虚警目标,三角形标注处为漏检目标)

Fig. 5 SAR images and results from ship detection for strong sea clutter

在高海况产生的强海杂波背景下,基于  $K$  分布的 CFAR 船只检测方法产生了大量的虚警信息,且有一艘船只漏检,表 2 给出漏检船只信息,漏检原因是该船只信号过弱,淹没在周围大量的相干噪声中,而本文的方法检测效果则较好,不但提取了所有船只信息,还保持了较低的虚警,从而验证了强杂波情况下基于  $G^0$  分布的 CFAR 算法对弱目标具有较好的提取能力。

表 2 图 5 中未检测出的船只信息

Table 2 Undetected target information in Fig. 5

船只名称	船只中心位置		船只 SAR 图像	船只照片
Chryssak	120.419 96°E	35.965 69°N		

本研究所选的 ENVISAT ASAR 影像从视觉上看有的噪声小,有的噪声大。由于 SAR 遥感是基于地物的后向散射特性的。视觉噪声大小除了与 SAR 图像固有的相干斑噪声有关之外,还与不同状态下海面的后向散射特性相对应。后向散射系数与诸多因素有关,这些因素包括目标因素和雷达因素。目标因素包括表面粗糙度、复介电常数、是面散射还是体散射、几何形状、材料和尺寸等;雷达因素包括波长、极化方式、功率和入射角等。对于本文所选图像来说,目标因素主要是指海况;雷达因素主要包括波长、极化方式和入射角。由于算法验证实验中所选的图像均为 VV 极化 ENVISAT-ASAR 图像,波长和极化方式的雷达参数相同,因此主要分析海况和入射角对图像噪声的影响。表 3 为所选的 3 幅影像海况及入射角统计。

表 3 海况及入射角对 SAR 图像视觉噪声的影响

Table 3 Impacts sea of conditions and incident angle on the visual noise of SAR images

SAR 图像日期	海况等级	入射角范围/°
2007-07-20	3 级	25.743~30.713
2007-07-23	5 级	18.651~21.693
2007-12-07	5 级	25.736~31.251

注:入射角范围是指 SAR 图像第一行像素的入射角范围

当雷达入射角接近时,对照 07-20 和 12-07 的图像,可以得出高海况使海面粗糙程度增加,会引起较大的后向散射;当海况接近时,对照 07-23 和 12-07 的图像,可以得出雷达脉冲入射角对地物后向散射系数的影响是呈线性关系的,也就是说,后向散射系数随着入射角减小而升高<sup>[13]</sup>,故 07-23 的图像呈现较大的视觉噪声。

### 3.2 检测结果综合评价

为更好的衡量检测效果,引入品质因数 FOM 和 ROC 性能曲线对结果进行分析。品质因数 FOM 用来评估检测效率,其表达式如下:

$$FOM = \frac{N_{it}}{N_{fa} + N_{gr}} \quad (4)$$

式中,  $N_{it}$  是正确检测的目标数;  $N_{fa}$  是虚警目标数;  $N_{gr}$  是实际目标数。

ROC 性能曲线<sup>[14]</sup>用于评价不同方法的检测性能,多个模型进行比较时,哪个模型 ROC 曲线下面积大,则说明哪个模型判别效果好。经典的 ROC 曲线的绘制是在不同的目标信杂比下,通过选择不同的检测门限  $T$ ,得到对应的检测概率和虚警概率,从而构造 ROC 曲线来衡量检测性能。在这里我们采用 ROC 统计检验的方式来进行 ROC 曲线的绘制,即给定虚警概率后,通过检测算法对图像进行检测,统计正确检测的

目标个数  $N_u$ , 其值与总目标个数  $N_{gt}$  之比 ( $N_u/N_{gt}$ ) 即为该虚警率条件下的目标检测概率。

统计上述检测结果, 根据(4)式计算品质因数 FOM。表 4 和表 5 给出的结果进一步验证了本研究方法的有效性。

表 4 图 4 中 2 种算法的检测结果指标

Table 4 Detection result index respectively for the two algorithms shown in Fig. 4

方法	漏检目标数	正确检测目标数 $N_u$	虚警目标数 $N_{fa}$	FOM
K 分布 CFAR 算法	0	17	1	0.94
分布 CFAR 算法	0	17	1	0.94

表 5 图 5 中 2 种算法的检测结果指标

Table 5 Detection result index respectively for the two algorithms shown in Fig. 5

方法	漏检目标数	正确检测目标数 $N_u$	虚警目标数 $N_{fa}$	FOM
K 分布 CFAR 算法	1	20	11	0.63
分布 CFAR 算法	0	21	2	0.92

图 6、图 7 分别为两种算法在不同杂波背景下的 ROC 曲线, 给出目标检测率与虚警率的对应关系。由图 6 可以看出, 在均匀杂波背景下, 两种方法的检测能力相当; 图 7 显示了在强杂波背景下, 应用本文方法进行检测, 性能要优于 K 分布算法。

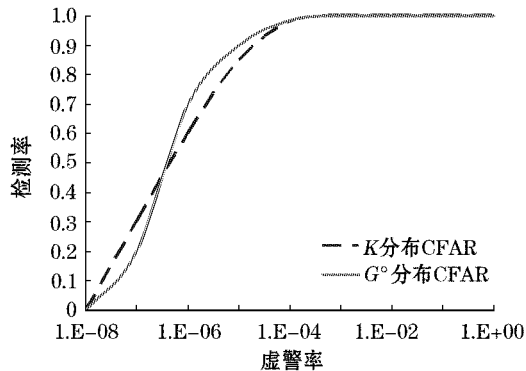


图 6 弱杂波背景下算法 ROC 性能曲线

Fig. 6 ROC curves respectively for the two algorithms for weak sea clutter

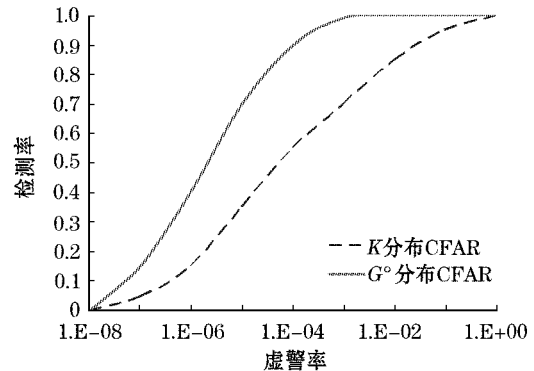


图 7 强杂波背景下算法 ROC 性能曲线

Fig. 7 ROC curves respectively for the two algorithms for strong sea clutter

## 4 结 语

本研究利用  $G^0$  分布对不同数据源进行海杂波建模表明, 用于陆地建模的  $G^0$  分布对海域强杂波具有很好的建模能力, 且  $G^0$  分布的普适性较好, 适用于目前几种主要的星载 SAR 数据; 并提出高海况下基于  $G^0$  分布的 SAR 船只目标检测算法, 对比实验证明, 均匀背景下该方法的检测效果与 K 分布 CFAR 算法效果相当, 在高海况下的船只目标检测中, 本研究方法优势突出, 可有效解决强海杂波背景下的弱目标检测问题。

由于  $G^0$  分布应用于不同数据源海面杂波建模的适应性研究还较少, 本研究的结果是基于有限数据进行的, 还需大量数据对本研究发展的算法进行进一步的验证。再者, 选择不同极化方式、不同分辨率的 SAR 图像对  $G^0$  分布海杂波建模有何种影响, 都是需要进一步探讨的问题。

## 参考文献(References);

- [1] SHAO M, NIKIAS C L. Signal processing with fractional lower-order moments; Stable processes and their applications[J]. Proc. IEEE, 1993, 81(7):986-1010.
- [2] JIANG Q, WANG S, ZIOU D, et al. Automatic detection for ship targets in RADARSAT SAR images from coastal regions[J]. Vision Interface99, Trois-Rivieres, 1999, 21(19):131-137.
- [3] HUANG S S. Analysis of the sea condition characteristics in the Nan ji Sea area[J]. Marine Science Bulltin, 1998, 17(3):90-96. 黄树生. 南鹿海域海况特征分析[J]. 海洋通报, 1998, 17(3):90-96.
- [4] FRERY A C, MULLER H J, YANASS C C F, et al. A model for extremely heterogeneous clutter[J]. IEEE Trans. On GRS, 1997, 35(3):648-659.
- [5] HE Z G, ZHOU X G, LU J, et al. A fast CFAR detection algorithm based on the  $G^0$  distribution for SAR images[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2009, 31(1):47-51. 贺志国, 周晓光, 陆军, 等. 一种基于  $G^0$  分布的 SAR 图像快速 CFAR 检测方法[J]. 国防科技大学学报, 2009, 31(1):47-51.
- [6] OSCAR H, LUCINI M M, FRERY A C. M-estimators of roughness and scale for GA0-modelled SAR imagery[J]. EURASIP Journal on Applied Signal Processing, 2002(1):105-114.
- [7] SHI G T, GAO G, ZHOU X G, et al. Estimation of the parameters of  $G^0$  distribution based on Mellin transform[J]. Progress in Natural Science, 2009, 19(6):677-690. 时公涛, 高贵, 周晓光, 等. 基于 Mellin 变换的  $G^0$  分布参数估计方法[J]. 自然科学进展, 2009, 19(6):677-690.
- [8] OLIVER C J. Understanding synthetic aperture radar images[M]. Boston/London: Artech House, 1998.
- [9] VACHON P W, CAMPBELL J W M, BJERKELUND C A, et al. Ship detection by the RADARSAT SAR: validation of detection model predictions[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 1997, 23(1): 48-59.
- [10] MAITRE H. Processing of synthetic aperture radar images[M]. SUN H, Translation. Beijing: Publishing House of Electronics Industry. MAITRE H. 合成孔径雷达图像处理[M]. 孙洪, 译. 北京: 电子工业出版社, 2005:67-107.
- [11] JI Y G, ZHANG J, MENG J M, et al. A new CFAR ship target detection method in SAR imagery[J]. Acta Oceanol., 2010, 29(1):12-16.
- [12] ZHANG X. Study on ships detection experiments with spaceborne SAR imagery[D]. Qingdao: the ocean university of China, 2007. 张晰. 星载 SAR 舰船目标探测实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [13] SU C Y. Research and application of speckle reduction algorithm for synthetic aperture radar images [D]. Xiamen: the xiamen university, 2008. 苏创业. SAR 图像斑点噪声抑制算法研究与应用[D]. 厦门: 厦门大学, 2008.
- [14] NOVAK L M, SECHEN M B, CARDULLO M J. Studies of target detection algorithms that use polarimetric data[J]. IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, 1989, 25(2):150-165.

## Ship Target Detection Algorithm Based on $G^0$ Distribution for SAR Images under Rough Sea Conditions

LU Tong-zhen<sup>1,2</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, JI Yong-gang<sup>2</sup>, ZHANG Xi<sup>1,2</sup>, MENG Jun-min<sup>2</sup>

(1. *Ocean University of China*, Qingdao 266100, China;

2. *First Institute of Oceanography, SOA*, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Ship target detection under rough sea conditions is a difficult one in SAR ship detections. The effectiveness of the ship target detections can be much influenced in accurately describing the sea clutter from the rough sea conditions by the selected distribution type. The  $G^0$  distribution commonly used in the modeling for the SAR images of urban area is here applied to modeling the sea clutter for rough sea conditions. The effectiveness of the  $G^0$  distribution in the modeling for various satellite-borne SAR images are analyzed to verify its suitability to the sea clutter from sea surface. It is learnt from the verification that the  $G^0$  distribution is better applicable to the sea clutter from the extremely inhomogeneous sea area than the commonly used distributions. In combination with the CFAR target detection, the ship target detection algorithms based on the  $G^0$  distribution for satellite-borne SAR images is proposed, and its effectiveness is verified in the in-situ synchronized experiment.

**Key words:** SAR; rough sea conditions; sea clutter; ship detection;  $G^0$  distribution

**Received:** October 15, 2009