

从卫星 SAR 海洋图像中检测船目标*

周红建 李相迎 彭雄宏 王正志 薄涛

(国防科技大学自动控制系统 长沙 410073)

摘要 船在卫星 SAR 海洋图像中一般是以亮点的形式出现。本文先简要地介绍了船目标在卫星 SAR 海洋图像中的成像原理,在此基础上介绍了三种检测船目标的方法——窗口滤波方法、自适应阈值法、概率密度函数法,并运用实际的卫星 SAR 海洋图像对这三种算法进行了测试。测试结果表明,后两种方法效果比较好。

关键词 SAR, 目标检测, 窗口滤波方法, 自适应阈值法, 概率密度函数法

分类号 TP391.4

Detect Ship Targets from Satellite SAR Imagery

Zhou Hongjian Li Xiangying Peng Xionghong Wang Zhenzhi Bo Tao

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

Abstract Ship targets are generally present in SAR ocean imagery as bright points. In this paper, we introduce the principle of imaging of ship targets first. Then we describe three methods of detecting ship targets from satellite SAR ocean imagery——running window filters method, adaptive limiting method and probability density function method. We have tested the methods by using the real SAR ocean imagery. The result of testing show that adaptive limiting method and probability density function method are good.

Key words Synthetic Aperture Radar, Target Detection, Running Windows Filters Method, Adaptive Limiting Method, Probability Density Function method

1978 年美国宇航局发射的 Seasat-1 卫星实际工作仅为 70 天,但在这 70 天内获得的遥感信息经处理后可广泛应用于船舶航行、避免恶劣的天气以及捕鱼等。Seasat-1 所携带的五种遥感器中,其中一种很重要的是 SAR。SAR 是一种高方位分辨率的成像雷达,它利用合成孔径技术获得良好的方位分辨率,利用脉冲压缩技术获得良好的距离分辨率。正是因为 SAR,科学工作者们得到了大量高分辨率的 SAR 海洋图像,船目标以及船的航迹在一些图像中清晰可见。从图像中检测出船目标和航迹特征,进一步可以提取大量的有用信息。这项工作有着很广泛的应用前景,例如对特定海域、海湾港口进行监测,对海洋水运交通、非法捕鱼、非法走私等进行监测和管理等。我们是在上述前提下开展船舶目标的检测工作的。

1 船在 SAR 图像中的成像原理

1.1 SAR 成像原理

SAR 是一种成像雷达,它利用合成孔径技术和脉冲压缩技术获得了高的方位分辨率和距离分辨率。成像雷达能够直接显示目标(或物体)的电磁波散射特性的几何分布。SAR 接收到的目标回波信号可表示成(1)式的形式。

$$S_{R_1}(t) = E_R e^{j[\omega_0 \left(t - \frac{2R(t)}{c}\right) + \phi_1]} \quad \frac{2R_n}{c} \quad t \quad \frac{2R_f}{c} + \tau \quad (1)$$

$S_{R_1}(t)$ 为回波信号, E_R 为信号幅度, ω_0 为雷达波束的频率, $R(t)$ 为目标的斜距, ϕ_1 为回波信号随时间变化的相位角函数, c 为光速, τ 为发射脉冲宽度, R_n 和 R_f 分别为近端斜距和远端斜距。雷达的成像处理就

* 1997 年 7 月 6 日收稿

第一作者: 周红建, 男, 1972 年生, 博士生

是对接收的回波信号进行一定的数学运算，寻找目标散射特性 (σ 或 σ^0) 与回波信号间的关系，还原目标散射特性，获得灰度与不同散射特性几何分布相对应的可视图像。当雷达波束照射地面时，由于地面阴影和不同单元的散射特性不同，使得图像的灰度发生变化，从而呈现出清晰的地面形象。事实上，目标的散射特性转化为清晰的图像有两个过程，如图1所示，不同地物目标的散射特性 $\gamma(x)$ 进入一个具有脉冲响应特性为 $W(R_0, x)$ 的前置滤波器，其输出就是 $S_r(R_0, x)$ ，即为 SAR 的接收信号。带有噪声的接收信号经过成像处理器的处理得到雷达图像 $g(R_0, x)$ 。合成孔径雷达成像处理器实质上是一个后置滤波器，它以一定的判据(准则) 设计滤波器的脉冲响应特性 $h(R_0, x)$ ，从回波信号里提取(还原) 地物目标散射特性 $\gamma(x)$ 。雷达图像的灰度 $g(R_0, x)$ 与地物目标散射特性 $\gamma(x)$ 不完全相同，而是带有一定噪声的。 $g(R_0, x)$ 表达式为

$$g(R_0, x) = h(R_0, x) * (S_r(R_0, x) + n(x))$$

$$= h(R_0, x) * (W(R_0, x) * \gamma(x) + n(x)) \tag{2}$$

1.2 船在 SAR 中成像

由上面的分析可知，当回波信号强时，在图像中目标比较亮；当回波信号弱时，目标则比较暗。卫星拍摄到的海洋 SAR 图像，背景为广阔的洋面。船在海面上航行，可以把船作为点目标来看。当海面比较平静（风速小于 2m/s）时，海面对雷达波束是镜面反射，回波信号比较弱，此时背景很暗；而海风比较强烈的情况下，海面 Bragg 共振散射，回波信号较强，背景偏亮。在上述两种情况下，船舶均

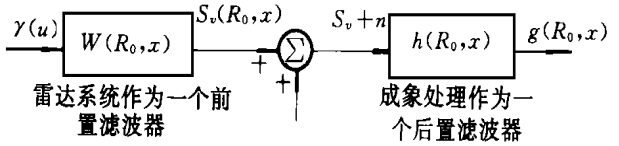


图1 SAR方位信道物理模型

Fig.1 Physical model of SAR azimuth channel

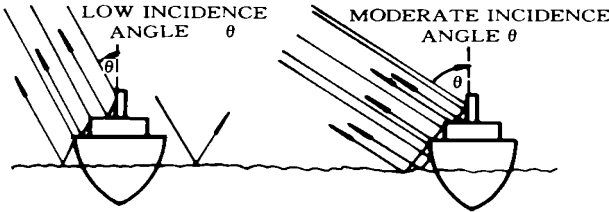


图2 (a) 平静海面上船的角反射
Fig. 2a Ships' corner Reflect on calm sea

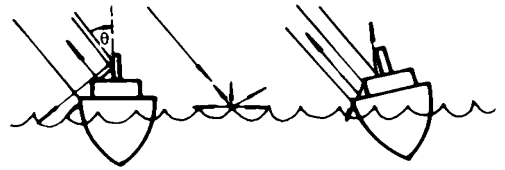


图2b 中等风速时海面的雷达回波
Fig. 2b Rough Sea's Radar return

有强的角反射 (Conner Reflect) 回波信号 (见图2)，所以船目标是以亮点的形式出现。从图2可以很容易看出，船的回波信号的强弱与SAR的入射角有着很大的关系，一般来说中等入射角时回波信号强。正是由于这一原因，加拿大的RADARSAT（天线波束为 Fine 时 SAR 的入射角范围为 $36.4^\circ \theta 47.8^\circ$ ）和日本的 Jers-1（SAR 入射角为 49° ）SAR 海洋图像中的船目标比欧航局的 ERS-1（SAR 入射角为 23° ）SAR 海洋图像中的船目标更明显。

2 船目标检测算法

2.1 窗口滤波法

挪威的 Eldhuset 提出用窗口滤波的方法来检测船目标。这一算法是结合航迹检测工作共同进行的，在检测工作开始之前先要标注出水域和陆地。现在我们假设我们用阴影标出陆地和海岛，并描绘了滤波算子的外观。如图3所示，窗口 A (10×10 个像素点， $a=10$) 包含在框架 B (20×20 个像素点 $b=20$) 中。框架 B 的均值 μ_B 由下式来估计：

$$\mu_B = \frac{1}{K} \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} X(i, j) \tag{2}$$

其中 K 为方框 B 内的像素点数， $X(i, j)$ 是像素点 (i, j) 的灰度值。由公式计算出一个新的临时图像：

$$T(i, j) = X(i, j) + X(i, j + 1) + X(i + 1, j) + X(i + 1, j + 1) - 4\mu_B \quad (i, j) \in A \quad (3)$$

窗口 A 和框架 B 移动的步长等于窗口 A 的宽度。对于 N 视 SAR 图像, 其对应于均值 μ_B 的标准方差 σ_B 的计算分两种情况, 在文献 [8] 给出了幅值图像的标准方差的计算方法:

$$\sigma_B = \mu_B \sqrt{\frac{4}{\pi} - 1} \quad (4)$$

文献 [9] 给出了灰度图像标准方差的计算方法:

$$\sigma_B = \frac{\mu_B}{N} \quad (5)$$

当我们知道均值而要用 (4) 或 (5) 估计标准方差时, 必须知道有效视数 N_{eff} 。对于给定的 SAR 图像处理器 N_{eff} 是常数, 例如 TSS 的 ERS-1 快速传递景像的 N_{eff} 估值为 2.5。

为了检测候选舰船的像素族, 将方程 (3) 中的 $T(i, j)$ 与 $q\sigma_B$ 定义的阈值进行比较 (其中 q 一般取为 5.0), 大于阈值的像素取为一组, 而每一组构成一个候选的舰船目标。

2.2 自适应阈值法

在一般情况下, 船目标要比背景亮。如果能够找到一个合适的阈值将目标和背景区分开, 这是很有意义的。也不排除有噪声点被保留下来。目前, 还没有完全在无人干预的情况下直接从 SAR 海洋图像中检测船目标的, 通常需要人进行交互决策或者结合航迹检测来完成船目标的检测工作。在这里只考虑目标检测。由于海面条件千变万化, 成像雷达处理参数有别, SAR 海洋图像明暗变化也是很复杂的, 可以根据 (6) 式自适应地确定区分背景和目标的定阈值:

$$\Delta = \mu + (M - \mu) \frac{\mu}{M} \quad (6)$$

其中 Δ 为我们需要的阈值, μ 为图像的均值, M 为图像学像素灰度的最大值。与 3.1 类似大于阈值的像素取为一组, 而每一组构成一个候选目标。

2.3 概率密度函数法

M. Rey 在文献 [5] 中提出用多视灰度 K 分布 (Multi-look Intensity K -distribution) 来描述 ARSAT、SAR 图像灰度的概率密度函数:

$$p(x) = \frac{2}{x \Gamma(v) \Gamma(L)} \left(\frac{Lvx}{\mu} \right)^{\frac{L+v}{2}} K_{v-L} \left[2 \sqrt{\frac{Lvx}{\mu}} \right] \quad (7)$$

其中 μ 为图像的均值, v 为形状参数, L 为统计独立的视数 (Number of Looks), Γ 为伽玛函数, K_{v-L} 为修正的 Bessel 函数。图像的均值和方差分别表示如下:

$$E(x) = \mu \quad (8)$$

$$\text{Var}(x) = \left[\left(1 + \frac{1}{v} \right) \left(1 + \frac{1}{L} \right) - 1 \right] \mu^2 \quad (9)$$

从 (7) 式不难看出, SAR 图像的密度函数可由图像的均值 μ 、独立的视数 L 以及形状参数 v 来刻画。现在的问题是要估计出这些参数。可以根据统计值估计出视数 L :

$$\hat{L} = \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 / \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \right)^2 \quad (10)$$

这样我们可由方程 (8)、(9) 和 (10) 估计出参数 μ 、 v 和 L 。接着可以由确定在一定置信度水平 η 下的灰度阈值:

$$\eta_c = \int_0^{\eta_c} p(x) dx$$

式中 η_c 为灰度阈值, $1 - \eta$ 为虚警率 (通常取为 0.05)。

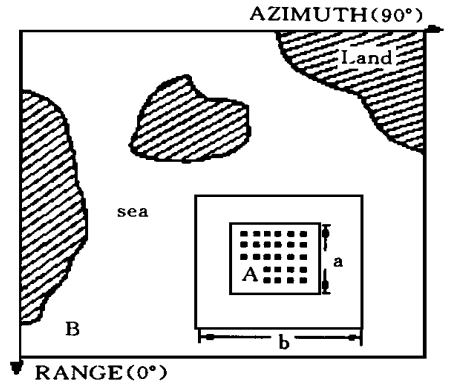


图3 窗口滤波原理图

Fig. 3 Schematic Diagram of Running Window Filters

3 试验结果与结论

上面所讲述的三种算法都是要寻找评判船目标的阈值, 算法 1 是根据统计值计算局部阈值, 算法 2 和 3 则是计算全局阈值。我们用实际的卫星 SAR 海洋图像对三种算法进行了测试和比较。测试工作是在 P586 MMX166 的微机上的。图 4a 是 RADARSAT 拍摄到的在挪威附近公海捕鱼的外国船队

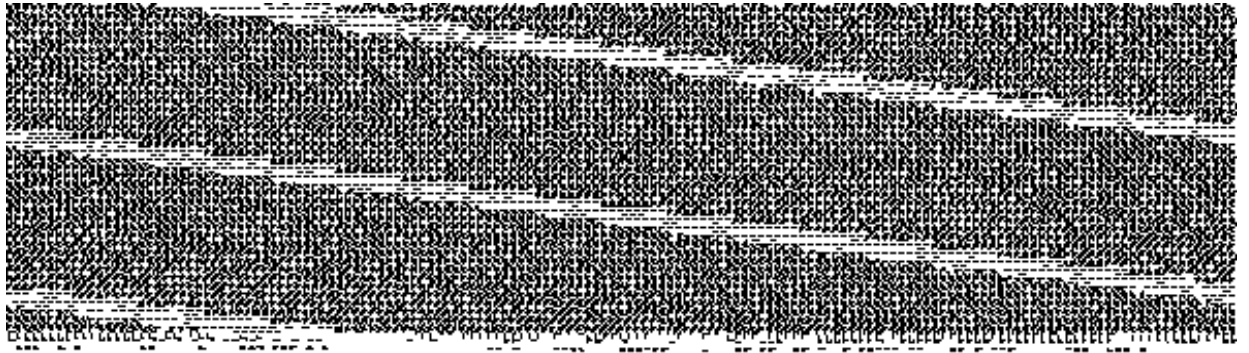


图 4a RADARSAT SAR 海洋图像
图中有捕鱼船队 (400×600, 256 色灰度)

Fig. 4a RADARSAT SAR image with fishing
fleet (400×600, 256gray scales)

图 4b 窗口滤波法检测船目标的结果

Fig. 4b The detecting result by using the first method

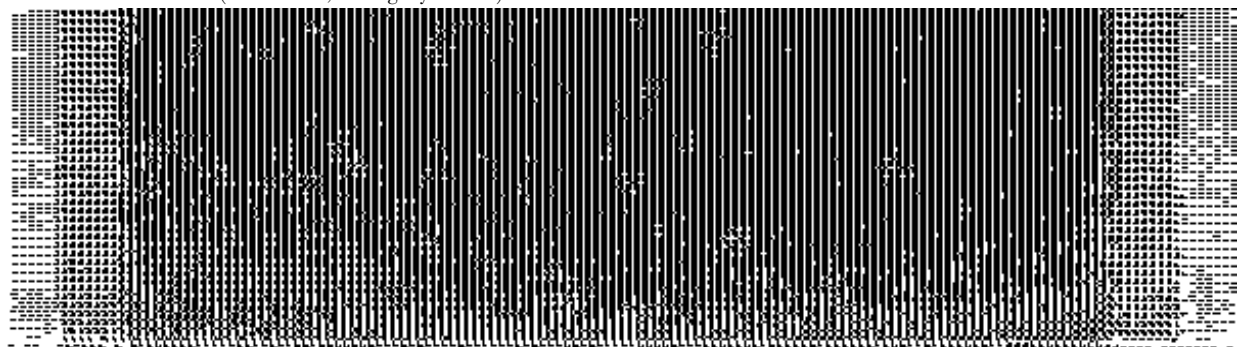


图 4c 自适应阈值法检测船目标的结果
Fig. 4c The detecting result by using
the second method

图 4d 概率密度函数法检测船目标的结果
Fig. 4d The detecting result by using
the third method

的 SAR 图像, 其大小为 400×600, 图 4b、图 4c 和图 4d 分别为窗口滤波、自适应阈值法和概率密度函数法三种算法检测的结果。这三种算法耗时分别为 63.9s、0.39s 和 2.8s, 从运算速度来看, 自适应阈值法速度最快, 概率密度函数法次之, 而窗口滤波耗时较多。通过人工判读, 我们发现 36 个目标, 第一种算法检测到 27 个目标和一个假目标, 后两种方法均检测到 34 个目标 (检测精度为 94.4%)。由于算法一带有四个可调参数, 通过适当调整可进一步提高检测精度。总体来说, 自适应阈值法和概率密度函数法的性能要好一些。

参考文献

1 陈述彭. 遥感大词典. 北京: 科学出版社, 1990

(四) 表示选择需统计的变量名。

statistics at : ①
scope = ② var = ③

	局部访问		远程访问		迭代次数
	存	取	存	取	
PE0					
PE1					
PE2					
PE3					

图6 统计信息

Fig. 6 The statistics information

参考文献

- 1 赵克佳, 沈志宇. 数据并行程序设计语言中分布数组的地址计算. 国防科技大学学报, 1995, (4)
- 2 瞿国平等. 指令模拟的应用和特点. 计算机工程与科学, 1996, (1)
- 3 Young A D. The X window system: Programming and Applications with Xt, OSF/Motif Edition. Prentice-Hall, 1990
- 4 Prentice-Hall. OSF/Motif Programmer's Guide, 1990
- 5 Prentice-Hall. OSF/Motif Programmer's Reference, 1990

(上接第70页)

- 2 谢寿生, 徐永进. 微波遥感技术与应用. 北京: 电子工业出版社, 1987
- 3 K. Eldhuset. An Automatic Ship and Ship Wake Detection System for Space-borne SAR Images in Coastal Region. IEEE Transaction on Geos. and Res. 1996, 34 (4)
- 4 Michael D. Henschel, Richard B. Olsen, Pat Hoyt and Paris W. Vachon. The Ocean Monitoring Workstation: Experience Gained With RADARSAT.
- 5 Rey M. T., T. Drosopoulos, and Petrovic D.. A search Procedure for Ships in RADARSAT Imagery. DREO Report No. 1305, 1996
- 6 Jiang, Q, S. Wang, D. Ziou, G. B. Benie, and A. El Zaart. Ship Detection in RADARSAT SAR Imagery. to appear in Proceedings of IEEE SMC 98 (San Diego)
- 7 Y. Delignon, R. Garelo and Hillion. Statistical Modeling of Ocean SAR Imagery, IEE Proc. Radar, Sonar Naving 1997, 144 (6)
- 8 H. Andas and K. Eldhuset. Estimation of Central Moments in SAR Images for Homogeneity Testing. Tech. Rep. FFI/NOTAT-88/9003 1988 (in Norwegian)
- 9 F. T. Ulaby, F. Kouyate, B. Brisco, T. H. L. and Williams. Textural Information in SAR Images. IEEE Transaction on Geos. and Res. 1986, Vol. GE-24: 235 ~ 245