

一种 SAR 图象舰船尾迹的 CFAR 检测方法

汤子跃^{1,2}, 朱敏慧¹, 王卫延¹

(1. 微波成像技术国家重点实验室, 北京 100080; 2. 空军雷达学院, 湖北武汉 430010)

摘要: 提出一种基于邻近像素求和的合成孔径雷达(SAR)海面图象舰船尾迹的恒虚警率(CFAR)检测方法(简称 APS 方法). 该方法的关键是用“邻近像素求和”方法实现子图象的 Radon 变换, 在变换域依概率模型进行统计假设检验, 并最终实现 CFAR 检测. 文中仿真和实际 SAR 图象试验的结果表明该算法是有效的.

关键词: 尾迹; SAR; Radon 变换; CFAR

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 09-1336-0

A CFAR Detection Method of Ship Wakes in SAR Images

TANG Zi-yue, ZHU Min-hui, WANG Wei-yan

(1. National Key Laboratory of Microwave Imaging Technology, Beijing 100080, China;

2. Air Force Radar Academy, Wuhan, Hubei 430010, China)

Abstract: This paper presents a Constant False Alarm Rate (CFAR) detection approach of ship wakes for Synthetic Aperture Radar (SAR) images based on the technique of “adjacent pixels summing (APS)”. The key of this method is using the APS strategy to perform Radon transform over the subimage approximately. The CFAR detection algorithm, which uses statistical hypothesis testing on probability model in transform space, is then developed. The effectiveness of this algorithm is demonstrated by the test results of simulating wake images and actual SAR images of ship wakes.

Key words: wake; SAR; radon transform; CFAR

1 引言

合成孔径雷达(SAR)是用于海洋监测(视)的重要手段, 基于 SAR 图象进行海面舰船目标及其尾迹的检测方法和技术的研究已引起了美国、加拿大、挪威、前苏联等许多国家的重视. 由于舰船尾迹区域面积较大、特征较为明显, 利用尾迹检测可以实现包括隐身舰船在内的船只目标的检测和对航向、航速及其真实位置的估计(SAR 对运动船只成像时, 由于成像算法的原因常会带来亮点位置与实际目标位置间的一定偏移).

SAR 图象尾迹的明显与否主要取决于尾迹区域与背景海面在散射系数上的差别(即反差度大小). 通常, 由于尾迹与背景海面之间的反差度较小, 并且受海况、船只航向、速度以及雷达观测条件等诸多因素的影响, 尾迹图象的人工判读困难较大. 因此, 有必要进行尾迹自动检测方法和技术的研究.

在各种类型的尾迹中, “V”型尾迹是水面舰船尾迹中最常见、也是理论上研究较多的一种^[2,3], 其实际结构与雷达图象的一般对比模型如图 1 所示. 其中, 两条比较突出的“胡须”组成了“V”型结构; 船尾水流卷动形成了涡流区, 涡流区与“胡须”区之间是平滑区. 这种尾迹的特点就是它的两根“胡须”具有一定的线性特征. 目前, 已有文献^[5-7]就 SAR 图象中

线性尾迹的检测问题进行了研究. 由于 Radon 变换在线性特征提取方面的独特能力, 这些研究大多以其为主要数学工具. 其中存在的主要问题是: 一是没有解决平面图象 Radon 变换计算量大的问题; 二是难于实现恒虚警率(CFAR)检测, 主要原因是对于平面图象上不同距离、斜率的直线, 实现 Radon 变换时的积分区间长度不同(像素数目不一样), 从而使变换域中的数据不满足同分布条件, 检测算法难于依统计概率模型进行.

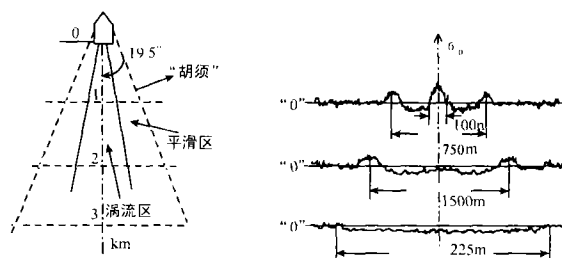


图 1 水面舰船尾迹结构与雷达图象对比模型

本文提出的基于邻近像素求和的 SAR 图象舰船尾迹恒虚警率(CFAR)检测方法(简称 APS 算法)也吸收了 Radon 变换技术, 其原理框图如图 2 所示. 核心是采用“邻近像素求和”

收稿日期: 2001-06-12; 修回日期: 2002-01-18

基金项目: 微波成像技术重点实验室基金(No. 51442020201ZS2001)

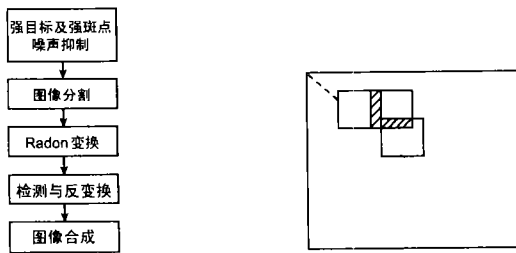


图 2 SAR 图象尾迹检测原理框图 图 3 图象分割示意图

方法来近似实现 Radon 变换,一方面简化了计算过程,同时还基本确保了变换域中各数据点的同分布特性,使统计检测工作得以在一定的概率模型下进行,并最终实现检测器具有 CFAR 特性;算法中的另一特点是巧妙地将检测与 Radon 反变换结合在一起进行,大大降低了计算复杂度.本文内容安排如下:第 2 节讨论 SAR 图象的预处理,第 3 节讨论 APS 检测算法,第 4 节给出算法性能实验结果,第 5 节是结束语.

2 SAR 图象预处理

SAR 图象尾迹检测的预处理工作主要包括强目标、强斑点噪声的抑制和图象分割两部分内容. SAR 图象中的强目标(如水面舰艇)和强斑点噪声会直接影响图象线性特征的提取效果.这样,在检测之前,首先需要在数据域对图象进行局部非线性滤波;将图象中每个象素 (x, y) 的灰度值与其周围 $m \times n$ 个(如取 $m = n = 3$ 或 5 等)象素的平均灰度值 $\bar{g}(x, y)$ 相比较,如果 $g(x, y)$ 值比平均灰度值 $\bar{g}(x, y)$ 大 a 倍(如 $a = 2$),则认为 (x, y) 是强象素点,并用其周围象素的平均灰度值来替代其原灰度值,即

$$\begin{aligned} \text{如果 } g(x, y) &\geq a \cdot \bar{g}(x, y), \\ \text{则 } g(x, y) &= \bar{g}(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

这样做的结果是使强目标和强斑点噪声的干扰得到基本抑制.

其次,需要进行图象分割工作.由于受背景和船只运动参数等因素的影响,舰船尾迹的线性部分通常在尺度上要比整幅 SAR 图象小(决定因素是 SAR).这样,从提高检测信噪比的角度出发,需要将图象分割成与一般线性尾迹尺度相当或者略小的子图,分割时各子图象间可以有一定的交叉和重叠,如图 3 所示.

3 基于子图象的 APS 检测算法

APS 检测算法是在 SAR 子图象级进行的.先对每个子图象进行 Radon 变换;然后,进行统计检测并同时结果反变换得到子图象域;最后,将各个处理后的子图象按分割时的反过程进行叠加合成.

3.1 Radon 变换原理

平面上二维 Radon 变换^[5,6]的定义为

$$g_r(\theta, \rho) = \mathcal{R}(g) = \iint_S g(x, y) \cdot \delta(\rho - x \cos \theta - y \sin \theta) dx dy \quad (2)$$

其中, S 表示整个 $x - y$ 图象平面, $g(x, y)$ 为象素 (x, y) 的灰

度值, $\delta(a)$ 为狄拉克函数.显然,由于 δ 函数的作用,使(2)式的积分沿着直线 $y = ax + b$ 进行($a = -1/\text{tg}\theta, b = \rho_0/\sin\theta$);由图 4 可见, ρ 是原点到直线 $y = ax + b$ 的距离,而 θ 则是横坐标到该直线的法线的夹角.这一变换将 $x - y$ 平面上的直线(含线段)映射为 $\rho - \theta$ 平面内的一个点.利用 Radon 变换的这一性质,可以实现图象线性特征的提取.

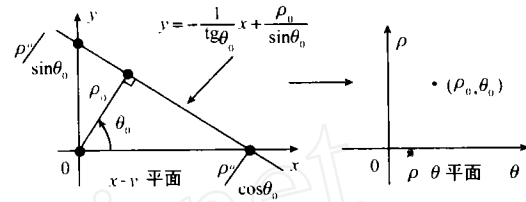


图 4 Radon 变换映射关系图

3.2 邻近象素求和法实现 Radon 变换

对图象进行 Radon 变换处理时,通常选取图象中心为坐标原点.由于 SAR 图象是由象素组成的,(2)式所表示的积分过程只能通过各个离散象素的灰度值求和来代替,但具体实现时又会遇到新的问题,如图 5 所示,直线 1 和直线 2 虽然都跨越了整个图象,但处在它们各自上的象素点数不尽相同.因此,不能简单地进行直线方向上的象素灰度值求和.理论上比较精确方法是可沿不同方向的直线按象素内插成相同的点数,然后再求和,但这样做的计算量非常大.一种简单的办法就是采用所谓的“邻近象素求和”(APS)方法:在被积分直线邻域内选取离其最近的 n 个象素相加,如图 5 中 1、2 虚线区所示.求和的效果是:灰度值高于周围象素的正反差线性尾迹(“亮线”)将形成一个峰值区域,而灰度值低于周围象素的负反差线性尾迹(“暗线”)则对应于一个谷值区域.

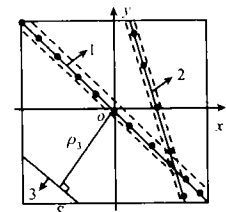


图 5 邻近象素求和法原理图

对于大小为 $M \times N$ 的图象, n 的最大取值按下式进行

$$n = k \cdot \min(M, N), K \geq 1 \quad (3)$$

式中系数 k 的数值与距离门限(通常选为 0.5 ~ 1 个象素间距)有关.为了减小 n 取值对处理结果的波动影响,可在进行邻近象素求和后求平均来近似实现 Radon 变换,其数学描述如下

$$g_r(\theta_i, \rho_j) \approx \frac{1}{n} \sum_n g(x, y), (x, y) \in \{D\} \quad (4)$$

式中,下标 i, j 分别代表 θ, ρ 的离散序号,通常 θ 取值为 $0 \sim 179^\circ$,步长为 1° , ρ 取值主要决定于子图象大小,步长为 1 个象素间隔; $\{D\}$ 表示邻近象素的集合.

需要指出的是,对于图 5 中 3 号“短”线,符合门限要求的邻近象素点可能不到 n 个.这种“短”线的特点是在变换域内的距离较远(即 ρ 值较大),较为简便的办法是在变换域内选取一个合适的门限 ρ_a ,放弃对距离超过门限($> \rho_a$)的“短”线进行变换处理.预处理中图象分割时选择较小的子图象大小和一定的交叉重叠,将减小这种放弃“短”线变换处理对最终处理结果的影响.

为了便于检测,对(4)式的处理结果进行高通滤波(即滤去平均值),得到一新的参量

$$\hat{g}_r(\theta, \rho) = g_r(\theta, \rho) - \bar{g}_r \quad (5)$$

式中, \bar{g}_r 为 $g_r(\theta, \rho)$ 的均值.

3.3 CFAR 检测算法

Radon 变换前图象灰度 $g(x, y)$ 一般符合指数分布(或者 X^2 分布),当 n 较大时,由中心极限定理可以知道经(4)式变换的结果 $g_r(\theta, \rho)$ 将符合高斯分布,其概率密度函数可以表示为

$$f(g_r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_r} \exp\left(-\frac{(g_r(\theta, \rho) - \bar{g}_r)^2}{2\sigma_r^2}\right) \quad (6)$$

其中, \bar{g}_r, σ_r^2 分别是 $g_r(\theta, \rho)$ 的均值和方差,且

$$\bar{g}_r = \bar{g} \quad (7)$$

$$\sigma_r^2 = \frac{\sigma^2}{n} \quad (8)$$

式中, \bar{g}, σ^2 分别为 $g(x, y)$ 的均值和方差.由(5)、(6)式可以知道, $\hat{g}_r(\theta, \rho)$ 是均值为 0, 方差为 σ_r^2 的高斯变量.实际处理时变量 $\hat{g}_r(\theta, \rho)$ 的方差 σ_r^2 只能由其估计值来代替

$$\hat{\sigma}_r^2 = \frac{1}{I \cdot J} \sum_{j=1}^I \sum_{i=1}^J \hat{g}_r(\theta_i, \rho_j)^2 \quad (9)$$

式中, I, J 表示变量 $\hat{g}_r(\theta, \rho)$ 的维数.用 $\hat{\sigma}_r$ 对 $\hat{g}_r(\theta, \rho)$ 进行归一化得到又一新参量

$$g_{r0}(\theta, \rho) = \frac{\hat{g}_r(\theta, \rho)}{\hat{\sigma}_r} \quad (10)$$

$g_{r0}(\theta, \rho)$ 的概率密度函数为

$$f(g_{r0}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{g_{r0}^2}{2}\right) \quad (11)$$

根据(11)式,进行如下假设和处理:

$$H_0: |g_{r0}(\theta, \rho)| \leq \Omega_T, \text{判无目标,并令 } g_{r0}(\theta, \rho) = 0 \quad (12a)$$

$$H_1: |g_{r0}(\theta, \rho)| > \Omega_T, \text{判有目标,并令 } g_{r0}(\theta, \rho) = 1 \quad (12b)$$

式中, Ω_T 是检测门限,它的大小与虚警概率 P_f 相对应

$$P_f = \int_{-\infty}^{-\Omega_T} f(g_{r0}) dg_{r0} + \int_{\Omega_T}^{\infty} f(g_{r0}) dg_{r0} = 2 \cdot (1 - \Phi(\Omega_T)) \quad (13)$$

其中, $\Phi(\Omega_T) = \sum_{-\infty}^{-\Omega_T} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ 是标准正态积分函数,其值可以查表得到,如 $\Omega_T = 2, 3$ 时, $\Phi(2) = 0.9773, \Phi(3) = 0.9987$,由(13)式可得所对应的虚警概率分别为 4.54% 和 0.27%.

从上面分析可以知道,门限 Ω_T 选定后,虚警概率 P_f 便就确定了,反之亦然.这样,APS 算法可以对尾迹实现 CFAR 检测.类似于其它雷达目标的检测,门限越高,虚警就越低,但同时也使检测概率降低.

3.4 检测与反变换处理

理论上,在按式(12)完成检测后(在给定的门限下),需要将其结果反变换到图象域.在 APS 算法中,检测与反变换处理同

时进行:边检测,边只对过检测门限(判为有目标的) $g_{r0}(\theta_i, \rho_j)$ 作反变换处理(未过门限的检测点没有必要处理).子图象反变换的具体实现方法如下:先预设一零灰度图象(大小与被处理的子图象相同),根据过门限点的坐标 (θ_i, ρ_j) 来确定直线在预设图象中的位置,按 3.2 节中同样的方法找出相应直线的 n 个邻近像素,将其灰度值置 1 即可.这样做的好处是大大提高了算法的效率.

最后,将各个经反变换处理后的子图象依分割前相应位置关系进行叠加合成,得到整幅图象的处理结果.

4 算法性能试验

4.1 仿真 SAR 图象试验

图 6(a) 是一幅大小为 (256×256) 的仿真 SAR 图象,其中叠加有强度与背景平均灰度相同的由正、负反差直线组成的尾迹,分割子图象大小为 (32×32) , 相互重叠 (15×15) , 分割成的子图象数目为 14×14 个.图 6(b)、(c) 分别是 APS 算法在子图象检测门限为 $\Omega_T = 2.3$ 和 $\Omega_T = 2.5$ 时的处理结果,其中“V”型尾迹明显;图中较短的“亮”线则是子图象检测时所产生的虚警,图 6(b) 中虚警明显高于图(c),但没有对整个图象产生大的干扰.

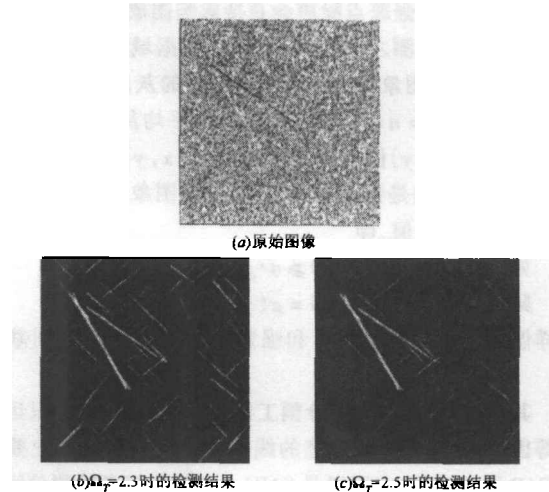


图 6 仿真 SAR 图象及处理结果

4.2 实际 SAR 图象试验

图 7(a) 和图 8(a) 是选自文献[6]的两幅 SAR 原始图象,这里运用 APS 算法对它们进行了处理.从图象效果上看,所得结果要略好于文献[6]给出的相应结果.其中,图 7(a) 是一幅典型的含有尾迹的海面 SAR 图象,图 7(b) 是 APS 算法的处理结果.处理时,没有作图象分割,门限选在 $\Omega_T = 3.0 \sim 4.5$ 范围时都得到了好的效果,主要原因是原始图象中尾迹比较明显(信噪比较高).

图 8(a) 是含有(车辆)痕迹的沙漠 SAR 图象,图 8(b) 和 (c) 是 APS 算法在两种检测门限下的处理结果.其中,分割子图象大小为 (16×16) , 相互交叉重叠 (5×5) , 分割成的子图象数目为 9×9 .图 8 的结果说明 APS 算法同样适用于局部线性特征的检测和处理.

图 9(a) 是一幅 (82×84) 的海面 SAR 图象(不确定是否含

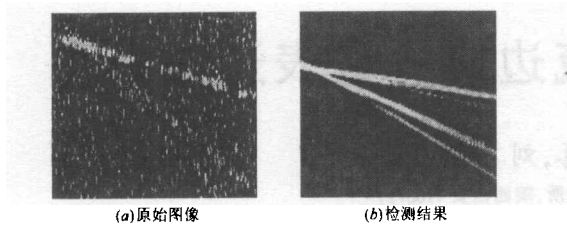


图 7 实际 SAR 图象及处理结果

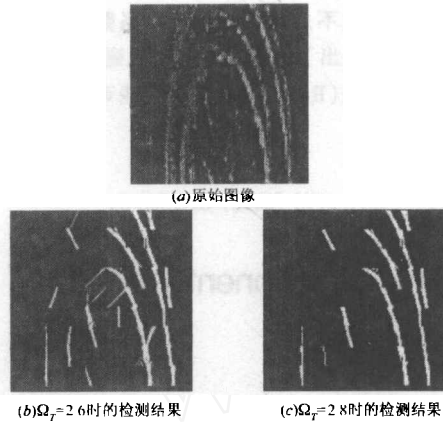


图 8 实际 SAR 图象及处理结果

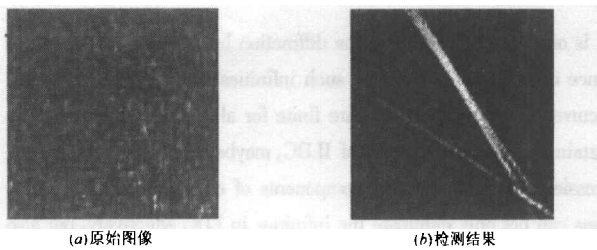


图 9 实际 SAR 图象及处理结果

有尾迹),象素间隔为 50m,图 9(b)所示的是 APS 算法处理的结果($\Omega_r = 2.2$,未作图象分割).从处理图象结果来看,含有尾迹的可能性很大.因为,如果是虚警,组成这种“V”型结构的概率很低.

上述仿真和实际 SAR 图象的试验结果,表明 APS 算法在(局部)线性特征尾迹检测方面是有效的.仿真过程中,尽管 APS 算法将 Radon 变换及反变换过程进行了大大简化,但由于 Radon 变换一般需要在 $0 \sim 180^\circ$ 范围内搜索,整个过程的计算量仍然较大.

5 结束语

SAR 是完成海洋监视任务的重要手段之一,利用海面 SAR 图象进行舰船目标及其尾迹检测工作的重要性是显而易见的.本文在这方面进行了尝试,提出了主要针对线性尾迹的 APS 检测算法,采用“邻近像素求和(平均)”方法实现 Radon 变换,一方面降低了计算复杂度,另一方面保证了变换域中数据点满足同分布条件,从而有可能在变换域依概率模型对数据进行统计检验并最终实现对 SAR 图像中尾迹的 CFAR 检

测.仿真和实际 SAR 图象的试验取得了比较满意的结果,验证了 APS 算法.不过,由于实际海洋问题的极端复杂性,加上尾迹图象特征对 SAR 传感器参数的敏感性,有关舰船尾迹检测方面的工作还有待更深入地进行.

感谢:本文工作得到了微波成像国家重点实验室博士生导师张守融研究员和中科院声学所唐劲松研究员的诸多帮助.

参考文献:

- [1] Y Delignon, R Garello, A Hillion. Statistical modelling of ocean SAR images [J]. IEE Proc - Radar, Sonar Navig, 1997, 144(6): 348 - 354.
- [2] K Oumansour, Y Wang, J Saillard. Multifrequency SAR observation of a ship wake [J]. IEE Proc-Radar, Sonar Navig, 1996, 143(4): 275 - 280.
- [3] J K Tunaley, E H Buller, K H Wu, M T Rey. The simulation of the SAR images of a ship Wake [J]. IEEE Tran ON GRS, 1991, 29(1): 149 - 155.
- [4] G Benelli, A Garzelli, A Mecocci. Complete processing system that uses fuzzy logic for ship detection in SAR images [J]. IEE Proc - Radar, Sonar Navig, 1994, 141(4): 181 - 186.
- [5] M T Rey, J K Tunaley, J T Folsinsbee, etc. Application of radon transform techniques to wake detection in seasat-a SAR images [J]. IEEE Tran ON GRS, 1990, 28(4): 553 - 560.
- [6] A C Copeland, G Ravichandran, M M Trivedi. Localized radon transform-Based detection of ship wakes in SAR images [J]. IEEE Tran ON GRS, 1995, 33(1): 35 - 45.
- [7] K Eldhuset. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions [J]. IEEE Tran ON GRS, 1996, 34(4): 1010 - 1019.

作者简介:



汤子跃 男,1966 年 10 月出生于浙江湖州,博士,副教授,1990 年于空军雷达学院获硕士学位,2000 年于海军工程大学获博士学位.现为微波成像技术重点实验室博士后(中科院电子所),主要从事雷达系统、雷达信号处理、SAR 成像及信息处理等领域的研究.



朱敏 女,1943 年 4 月生于上海,研究员,博士生导师.微波成像技术国家重点实验室主任,中科院电子所学术委员会主任,电子信息学报主编.主要从事 SAR 技术领域的研究.

王卫延 男,1947 年 10 月生于山西,研究员,中科院电子所博士生导师.主要从事电磁场及微波成像等领域的研究.