



JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2013
09
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



城市交通规划 P1197



第18卷第9期（总第209期）

2013年9月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司

（邮政信箱：北京399信箱 邮编：100048）

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

国内定价 50.00元

综述

高分辨率遥感影像空间结构特征建模方法综述

秦昆, 陈一祥, 甘顺子, 冯霞, 任文力

1055

简缩极化SAR数据信息提取与应用

张红, 谢镭, 王超, 张波, 吴樊, 汤益先

1065

图像处理和编码

融合CCCTI码和谱系聚类的仿射配准

张桂梅, 江少波, 刘丕玉, 张松

1074

面向虚拟视点绘制的深度图滤波及上采样方法

高凯, 陈贺新, 赵岩, 耿英楠, 王钢

1085

图像分析和识别

包空间多示例图像自动分类

王科平, 杨艺, 王新良

1093

表情和姿态的双模态情感识别

闫静杰, 郑文明, 辛明海, 邱伟

1101

等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪

程旭, 李拟珺, 张索非, 吴镇扬

1107

改进后的TLD视频目标跟踪方法

周鑫, 钱秋朦, 叶永强, 王从庆

1115

多特征稳健主成分分析的视频运动目标分割

甘超, 王莹, 王向阳

1124

融合全局最好和声搜索算法的模糊C均值聚类图像分割

崔兆华, 高立群, 欧阳海滨, 李文娜

1133

从运动中恢复目标结构的改进因子分解法

邱少华, 文贡坚, 回丙伟, 张鹏

1142

计算机图形学

并行扫描转换结构中的状态管理

殷诚信, 韩俊刚, 黄虎才

1149

医学图像处理

3维颅骨表面模型的复杂孔洞修补

包佳蕊, 梁荣华, 吴福理, 黄鲜萍, 蒋莉, 陈矛

1156

归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪

李乔亮, 李振宇, 张会生, 张小飞, 陈昕, 陈思平, 汪天富

1164

遥感图像处理

改进的多光谱双边滤波图像融合

吴川, 杨冬

1170

长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测

南杰, 张红, 王超, 吴樊, 张波

1176

地理信息技术

3D可视化输电线路中杆塔空间挂点计算

何国辉, 周聪

1184

地图符号服务与地图服务的耦合

焦东来, 张海涛, 闫国年, 姜杰

1190

不同表达粒度对城市路网结构健壮性评价的影响

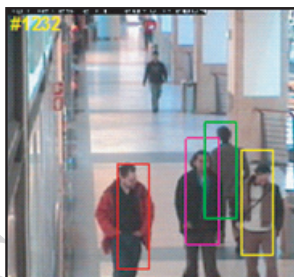
段滢滢, 陆锋

1197

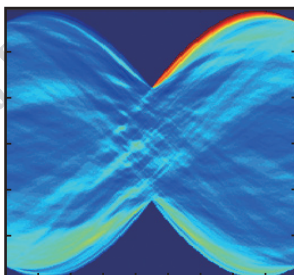
DEM保真精度量化描述模型

张锦明, 游雄

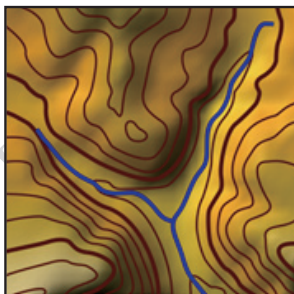
1206



等级关联的粒子群迭代多目标检测跟踪(第1107页)



归一化Radon变换和统计测度的超声图像肌束方向自动跟踪(第1164页)



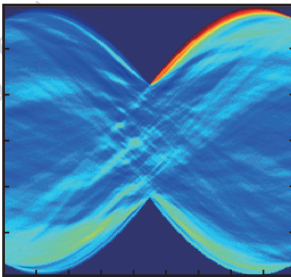
DEM保真精度量化描述模型(第1206页)

CONTENTS

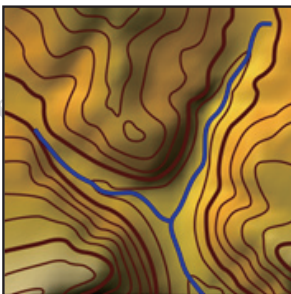
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization(P1107)



Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure (P1164)



Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy(P1206)

Review

Review on methods of spatial structural feature modeling of high resolution remote sensing images

Qin Kun, Chen Yixiang, Gan Shunzi, Feng Xia, Ren Wenli 1055

Information extraction and application of compact polarimetric SAR data

Zhang Hong, Xie Lei, Wang Chao, Zhang Bo, Wu Fan, Tang Yixian 1065

Image Processing and Coding

Affine registration based on CCCTI and hierarchical clustering

Zhang Guimei, Jiang Shaobo, Liu Piyu, Zhang Song 1074

Depth map filtering and upsampling method for virtual view rendering

Gao Kai, Chen Hexin, Zhao Yan, Geng Yingnan, Wang Gang 1085

Image Analysis and Recognition

Automatic classification of multiple-instance image based on the bag space

Wang Keping, Yang Yi, Wang Xinliang 1093

Bimodal emotion recognition based on body gesture and facial expression

Yan Jingjie, Zheng Wenming, Xin Minghai, Qiu Wei 1101

Hierarchical associative multi-target detection and tracking with particle swarm optimization

Cheng Xu, Li Nijun, Zhang Suofei, Wu Zhenyang 1107

Improved TLD visual target tracking algorithm

Zhou Xin, Qian Qiumeng, Ye Yongqiang, Wang Congqing 1115

Multi-feature robust principal component analysis for video moving object segmentation

Gan Chao, Wang Ying, Wang Xiangyang 1124

Improved fuzzy C-means clustering combined with the global best harmony search algorithm for image segmentation

Cui Zhaozhu, Gao Liqun, Ouyang Haibin, Li Wenna 1133

Improved factorization method for structure from motion

Qiu Shaohua, Wen Gongjian, Hui Bingwei, Zhang Peng 1142

Computer Graphics

Efficient state management for parallel rasterization

Yin Chengxin, Han Jungang, Huang Hucai 1149

Medical Image Processing

Various hole repairing algorithm for 3D mesh surface models of human skull

Bao Jiarui, Liang Ronghua, Wu Fuli, Huang Xianping, Jiang Li, Chen Mao 1156

Automatic tracking of muscle fascicle orientation in ultrasound images: a approach based on a normalized Radon transform and statistical measure

Li Qiaoliang, Li Zhenyu, Zhang Huisheng, Zhang Xiaofei, Chen Xin, Chen Siping, Wang Tianfu 1164

Remote Sensing Image Processing

Improved multispectral bilateral filter video fusion algorithm

Wu Chuan, Yang Dong 1170

Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scanning

Nan Jie, Zhang Hong, Wang Chao, Wu Fan, Zhang Bo 1176

Geoinformatics

Tower hanging point calculation for transmission line on three-dimensional visualization

He Guohui, Zhou Cong 1184

Coupling of map symbol web service and web map service

Jiao Donglai, Zhang Haitao, Lv Guonian, Jiang Jie 1190

The impact of different granularity representations on robustness evaluation of city road network

Duan Yingying, Lu Feng 1197

Quantitative descriptive model of DEM fidelity accuracy

Zhang Jinming, You Xiong 1206

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)08-1176-08

论文引用格式: 南杰, 张红, 王超, 吴樊, 张波. 长度归一化扫描的合成孔径雷达图像船舶尾迹恒虚警率检测[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(8): 1176-1183. [DOI:10.11834/jig.20130916]

长度归一化扫描的合成孔径雷达图像 船舶尾迹恒虚警率检测

南杰^{1,2}, 张红¹, 王超¹, 吴樊¹, 张波¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 提出一种基于长度归一化扫描的合成孔径雷达(SAR)图像船舶尾迹检测算法。存在距离向运动分量的船舶在 SAR 图像上会发生方位向偏移,那么尾迹的起点必在方位向上这一偏移量范围内。根据这一物理事实,将尾迹检测的搜索范围限定在可能为尾迹的线段上,从而提高了检测效率。算法通过利用线性积分和长度归一化这两个方法将矩形滑动窗口下的线性特征检测转化为了点特征检测,并通过经典的虚警率(CFAR)检测理论实现检测结果的输出。利用 COSMO-SkyMed 数据对该算法进行了实验验证,实验结果表明,该算法在尾迹检测上具有检测能力强、速度快的优点,船舶速度反演具有较高精度。

关键词: 合成孔径雷达;船舶尾迹检测;长度归一化扫描;恒虚警率

Ship wake constant false alarm rate detection algorithm in synthetic aperture radar images based on length normalized scanning

Nan Jie^{1,2}, Zhang Hong¹, Wang Chao¹, Wu Fan¹, Zhang Bo¹

1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of sciences, Beijing 100094, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: This paper presents a new ship-wake detection algorithm in synthetic aperture radar (SAR) images based on the length normalized scan method. The range component of a ship's movement leads to azimuth shift in SAR images. Therefore, the start point of wake must be located in the azimuth direction. According to this physical facts, length normalized scan is performed on-line on image parts which may be wakes. By means of linear integral and length normalization technology, linear feature detection is transformed to point detection. Then the probability model in the scan domain is constructed to realize constant false alarm rate (CFAR) detection. COSMO-SkyMed data is used to validate this method. The experimental results show that this algorithm is effective for ship wake detection and can extract ship's velocity with high accuracy.

Key words: synthetic aperture radar; ship wake detection; length normalized scan; constant false alarm rate

收稿日期:2012-11-12;修回日期:2013-01-17

基金项目:国家自然科学基金项目(40871191);国家高技术研究发展计划(863)基金项目(2009AA12Z139)

第一作者简介:南杰(1988—),男,现为中国科学院大学电子与通信工程专业在读硕士研究生,主要研究方向为 SAR 图像处理与目标检测。E-mail: nannanjie2006@163.com

通讯作者简介:张波, E-mail: bozhang@ceode.ac.cn

0 引言

近年来,利用合成孔径雷达(SAR)图像进行船舶尾迹检测的研究在海洋遥感领域受到高度重视,成为 SAR 数据最重要的海洋应用之一。船舶尾迹检测具有以下 3 个方面的作用^[1-2]:1)尾迹比船舶更大、更容易检测,可以对船舶检测起辅助作用;2)尾迹能更好地估计船舶的实际位置;3)尾迹可以估计运动船舶的航速和航向。

各国科学家利用 SAR 图像进行船舶尾迹检测开展了大量的研究工作,并取得了许多研究成果。传统的 SAR 图像船舶尾迹检测方法主要有四大类:1)基于扫描的船舶尾迹检测;2)基于 Radon 变换的船舶尾迹检测;3)基于 Hough 变换的船舶尾迹检测;4)其他算法。

基于扫描的船舶尾迹算法在检测到的船舶目标附近计算 180° 之内每个方向上的亮度均值,从而得到一个扫描曲线,在扫描曲线上寻找谷值峰值以确定尾迹方向,根据此曲线判断可能的尾迹方向。Eldhuset^[3-4]使用此方法对 ERS(european remote sensing)图像进行了尾迹检测;Cusano 等人^[5]也使用此方法对 ERS 快视图像进行尾迹检测。扫描算法简单效率高,可以直接得到尾迹端点与方位向偏移量。但是扫描算法的假设前提是船舶一定存在尾迹,然后检测尾迹。当 SAR 图像船舶不存在尾迹时,此算法仍然会检测出“尾迹”。

Radon 变换通过计算图像沿各个方向的投影来检测直线,是经典的直线检测算法。Rey 等人^[6]将 Radon 变换用于 Seasat 图像尾迹检测,使用高通滤波、常规的 Radon 变换和 Wiener 滤波器进行船舶尾迹检测;Copeland 等人^[7]描述了尾迹检测的局部 Radon 变换,开发了称为特征空间线性检测器(FSLD)的算法,方法关键是对短的线段而不是整个图像使用 Radon 变换。Xing 等人^[8]提出了一种基于归一化 Radon 变换的船舶尾迹检测算法,将直线长度空间引入 Radon 变换实现了归一化 Radon 变换,解决了直线积分长度不同对检测结果的干扰。发展至今,现在基于 Radon 变换检测算法的基本模式为首先在图像域采取滤波^[7]、小波变换^[9]等方法提高图像的对比度,然后进行全局 Radon 变换或局部 Radon 变换,在变换域实行自适应分割^[10]、计算熵值^[10]、形态学处理^[11]等得到对应于目标尾迹的目标点,最终反演出尾迹。基于 Radon 变换的尾迹检测算法是经典的尾迹检测算法,但是其

检测结果是图像而非具有端点坐标的尾迹特征。

标准 Hough 变换在二值图像直线检测方面具有广泛的应用。由于 SAR 图像上船舶尾迹可能比海洋背景亮也可能比海洋背景暗,无法使用自适应阈值分割方法将 SAR 图像二值化,所以无法使用标准 Hough 变换在 SAR 图像上检测船舶尾迹。种劲松等人^[12]提出在标准 Hough 变换的基础上进行修改成为灰度 Hough 变换,另外引进了直线长度统计空间实现了归一化。艾加秋等人^[13]在种劲松等人工作的基础上提出了一种基于图像分割和归一化灰度 Hough 变换的船舶尾迹恒虚警率(CFAR)检测算法,该方法以船舶重心为中心把图像分为 4 个子图像,在各个子图像上进行归一化灰度 Hough 变换。在各子图像变换域进行统计建模实现了 CFAR 检测,最后将 4 个子图的检测结果进行融合得到最终的检测结果。基于归一化灰度 Hough 变换的算法解决了无法确定尾迹端点的问题。基于图像分割和归一化灰度 Hough 变换的船舶尾迹 CFAR 检测算法则在前者的基础上提高了检测能力并实现了 CFAR 检测。但是,基于 Hough 变换的算法和基于 Radon 变换的算法一样,都是对图像全局进行搜索,计算量大。

此外还有一些其他的尾迹检测算法。陶荣华等人^[14]提出了船舶衰落尾迹的小波多尺度广义分形特征分析算法。李红康等人^[15]提出了一种基于方向小波的弱尾迹检测算法。这两种算法都是基于小波变换进行弱尾迹检测的算法。于晓华^[16]提出了基于像素色散弱估计的 SAR 图像船舶尾迹跟踪算法,其也是一种弱尾迹检测算法。

依据“存在距离向运动的船舶在 SAR 图像上会发生方位向偏移”这一物理事实,在传统的扫描算法基础上进行改进,提出基于长度归一化扫描的尾迹 CFAR 检测算法。算法首先在船舶的方位向一定距离内逐点进行 360° 长度归一化扫描得到扫描空间,然后在扫描空间内根据概率模型进行统计建模实现了 CFAR 检测,为滤出虚警对检测结果进行形态学处理,最后对扫描空间进行 K-均值聚类以提取尾迹中心线,反演得到带端点的目标尾迹及方位偏移量,自动反演出船舶的航速。

1 长度归一化扫描的线段检测算法

1.1 长度归一化扫描方法

设待检测的图像大小为 $N \times N$,则以横向为 X

轴,纵向为 Y 轴建立坐标系。在 Y 轴上取区间 $[-L, L]$ (L 可指定, $0 < L < N/2$), 在区间内由大至小逐点进行 360° 扫描。由于图像上位于不同位置的扫描线的像素点数各不相同(如图 1 所示扫描线 1 与扫描线 2 长度不同),使得图像空间的不同扫描线对于扫描

空间的贡献不均匀(即累加数目不同),使检测结果不准确。为此,在扫描时引入扫描线长度统计空间,用于将扫描空间归一化,从而成为长度归一化扫描。

起点坐标为 $(0, d)$, 扫描角为 a 时的扫描线的长度归一化扫描值为

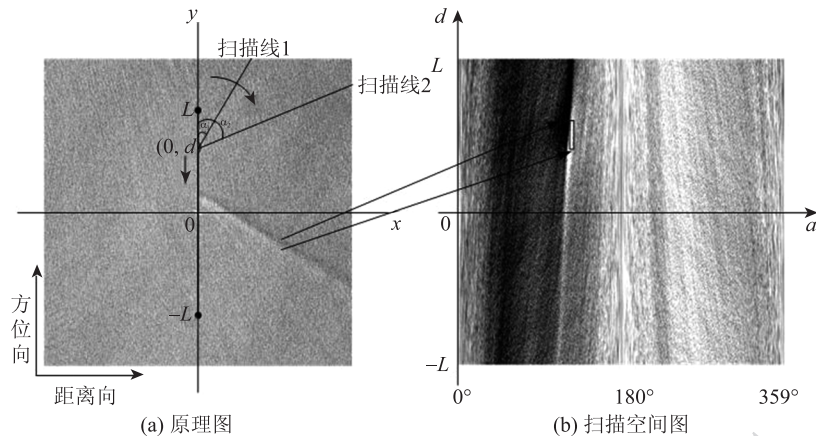


图 1 长度归一化扫描原理图及长度归一化扫描空间图

Fig. 1 Normalized scan schematic diagram and scan domain

$$S(a, d) = \begin{cases} \frac{1}{N(a, d)} \int_{-N/2}^{N/2} \int_{-N/2}^{N/2} f(x, y) \delta(x \cos a - (y - d) \sin a) dx dy & a \leq 180^\circ \\ \frac{1}{N(a, d)} \int_{-N/2}^{N/2} \int_{-N/2}^0 f(x, y) \delta(x \cos a - (y - d) \sin a) dx dy & a > 180^\circ \end{cases} \quad (1)$$

式中, a 为扫描线与 Y 轴方向夹角, 顺时针方向旋转, 最小值 0° , 最大值 359° , d 为扫描线起点的图像空间 Y 坐标值, 最大值 L , 最小值 $-L$, $f(x, y)$ 为图像空间点 (x, y) 的灰度值, $N(a, d)$ 为起点为 $(0, d)$, 扫描角为 a 时的扫描线的长度即扫描线上点的数目, $\delta(k)$ 为狄拉克函数, $\delta(k) = \begin{cases} 1 & k = 0 \\ 0 & k \neq 0 \end{cases}$ 。

式(1)与 Radon 变换、Hough 变换公式形似, 这是因为都是采用直线积分思想。但是长度归一化扫描根据 SAR 图像上运动船舶的尾迹存在方位向偏移的特性只对可能为尾迹的线段进行扫描。所以对积分区域与范围进行了限制。另外考虑到积分长度不同对检测结果的影响引进了长度归一化。长度归一化扫描的本质是将一条以点 $(0, d)$ 为起点, 以 a 为扫描角的扫描射线映射成扫描空间的一个点 $S(a, d)$ 。长度归一化扫描后, 扫描空间的 $S(a, d)$ 呈现极大或极小的峰值点对应于 (x, y) 平面上较明或较暗的扫描射线。图像域的尾迹检测问题转换为在扫描空间检测峰值点或谷值点的问题。

1.2 扫描空间 CFAR 检测

当 $N(a, d)$ 很大时, 由中心极限定理可以知道扫描空间 $S(a, d)$ 符合高斯分布^[13], 其概率密度函数可以表示为

$$f(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{(S(a, d) - \bar{S})^2}{2\sigma_s^2}\right) \quad (2)$$

式中, $\bar{S}, \sigma_s$ 分别为 $S(a, d)$ 的均值和标准差。其分布函数为

$$F(S) = \int_{-\infty}^S f(t) dt = \int_{-\infty}^S \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_s} \exp\left(-\frac{(t - \bar{S})^2}{2\sigma_s^2}\right) dt \quad (3)$$

进一步可以将扫描空间 $S(a, d)$ 进行变换得到正态分布, 即

$$S_0(a, d) = \frac{S(a, d) - \bar{S}}{\sigma_s} \quad (4)$$

$$F(S) = \int_{-\infty}^{\frac{S - \bar{S}}{\sigma_s}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) dz = \Phi\left(\frac{S - \bar{S}}{\sigma_s}\right) \quad (5)$$

根据式(4)(5)在扫描空间提取峰值和谷值点:

$S_0(a, d) > \lambda_T$ 或 $S_0(a, d) < -\lambda_T$, 判定为目标点。 λ_T 为检测门限, 它与虚警概率对应的关系为

$$P_{fa} = \int_{-\infty}^{-\lambda_T} f(S_0(a, d)) dS_0 + \int_{\lambda_T}^{\infty} f(S_0(a, d)) dS_0 = 2(1 - \Phi(\lambda_T)) \quad (6)$$

由式(6)可知, 可以根据给定的虚警概率 P_{fa} 来求得检测门限 λ_T , 提取出扫描空间的目标点。

2 基于长度归一化扫描的尾迹 CFAR 检测算法流程

本文检测算法处理的数据是以船舶重心为中心的切片数据, 检测流程如图2所示。首先在图像域进行长度归一化扫描得到扫描空间, 继而在扫描空间进行 CFAR 检测提取代表亮尾迹的峰值点及代表暗尾迹的谷值点。分割后的扫描空间可能存在一些零散的1值点虚警, 这些点对应于图像域船舶附近的波浪或其他线性干扰, 通过形态学处理可滤除。由于船舶尾迹具有一定宽度, 所以每条尾迹对应于扫描空间一个紧密相邻的点集。对扫描空间进行 K-均值聚类, 聚类得到的类心对应于尾迹中心线, 反演得到目标尾迹及方位偏移量, 进而可以得到船舶的航速。

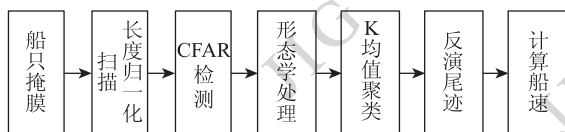


图2 长度归一化扫描尾迹检测算法原理框图

Fig. 2 Flow diagram of ship wake detection algorithm based on length normalized scan

2.1 预处理

以船舶目标为中心截取待检测尾迹的 SAR 图像, 其大小可根据分辨率确定, 实验中发现边长采用 $6000/R$ 为较好的选择 (R 为图像分辨率)。切片过小船舶尾迹检测会受到海浪等因素的干扰, 切片太大则会增加计算量。为避免船舶目标的强度影响到尾迹检测, 以图像均值代替船舶目标的像素值。

2.2 长度归一化扫描

以 SAR 图像切片的中心为原点, 距离向为 X 轴, 方位向为 Y 轴建立坐标系进行长度归一化扫描。在 Y 轴上的扫描线起点的区间为 $[-L, L]$,

由于所有尾迹船舶的尾迹偏移量都不会超过 $1.3 \text{ km}^{[17]}$, 所以取 L 为 $1300/R$ 。扫描结束后得到 $(2L+1) \times 360$ 的长度归一化扫描空间, 扫描空间横轴表示扫描角度, 纵轴表示扫描线起点的位置。

2.3 CFAR 检测

由1.2节可知长度归一化扫描空间符合高斯分布, 可进行 CFAR 检测。长度归一化扫描空间小于 $-\lambda_T$ 的点为暗尾迹对应的扫描线, 大于 λ_T 的点为亮尾迹对应的扫描线。把扫描空间强度在区间 $[-\lambda_T, \lambda_T]$ 内的点设为0, 区间之外的点设为1, 就得到了二值化的扫描空间。

2.4 基于形态学的虚警滤除

长度归一化扫描将图像空间的线段映射为扫描空间的点。船舶尾迹具有一定的宽度, 所以对应于扫描空间里紧密相邻的点集。分割后的扫描空间可能存在一些零散的1值点, 这些点对应于图像域船舶附近的波浪或其他线性干扰。为滤除虚警, 可以对 CFAR 分割后的扫描空间进行4邻域腐蚀。然后进行4邻域膨胀以便在下一步 K-均值聚类时得到更准确的类心。

2.5 基于 K-均值聚类的尾迹中心线提取

由于船舶尾迹具有一定宽度, 所以每条尾迹对应于扫描空间一个紧密相邻的点集。尾迹越宽, 对应的点集中点的数量越多。为了准确反演船舶速度, 必须得到尾迹的中心线。尾迹的中心线对应于扫描空间相应点集的中心点。通过对各种尾迹图像的实验和分析发现, 当一艘船舶有多条尾迹时, 在长度归一化扫描空间有多个点集, 每个点集对应于原图的一条尾迹, 点集内部的各点分布比较收敛。由于扫描线起始点和扫描角度的不同, 不同点集间的分布比较离散。通过 K-均值聚类, 可以将长度归一化扫描空间的 CFAR 检测后的点进行分类, 进而将原图中目标船舶的尾迹中心线检测出来。由于一艘船舶最多有3条尾迹线(两个尾迹臂, 一条湍流尾迹), 故可以把初始聚类数设为3, 并随机选择3个类心。聚类步骤如下:

- 1) 设定初始聚类数为3, 并随机选择3个类心;
- 2) 对扫描空间非零值进行归类;
- 3) 根据归类结果, 重新计算类心;
- 4) 判断新的类心是否与上一次的类心一致, 若一致, 则停止迭代, 否则重复执行步骤2)3), 直到新的类心与上一轮类心一致为止;

5)对最后稳定的3个类心进行判定,如果任两个类心之间的 X 坐标即类心相应扫描线的扫描角小于 4° (两条尾迹之间夹角最小的情况为窄V型尾迹之间的夹角,即 4°),则这两个类合为一个类,重新计算类中心,重复进行步骤2)—4)直到得到稳定的类中心,最后所得类心即为图像中尾迹的所在的扫描线的参数。

由于进行过CFAR检测与形态学处理后,扫描空间中目标点较少且分布集中,K均值聚类只需要2~4次迭代就可聚类得到类心。需要指出的是,由于本文算法采用的是以目标船舶为中心,在其方位向一定距离内进行 360° 扫描,故所检测的尾迹为目标船舶的尾迹。对于该图像内的其他船舶的尾迹则不予检测,只有当其他船舶的尾迹在中心船舶的附近时才有可能被误认为中心船舶的尾迹被检测出来。

2.6 反演船舶航速

根据运动目标SAR成像特点,运动船舶在图像上与真实位置有方位向的偏移。船舶运动时,其尾迹提供了船舶的实际位置,即尾迹的尖端。运动船舶的航速 V_{ship} 可以通过船舶方位向的位移 d 来计算^[1],即

$$V_{\text{ship}} = \left| \frac{dV_{\text{sat}} \sin \alpha}{H \tan \theta \cos \varphi} \right| \quad (7)$$

式中, φ 为船舶运动矢量与距离向之间的夹角, H 为SAR平台的高度, θ 为入射角, V_{sat} 为卫星速度, d 为船舶方位向位移即聚类后类心的 Y 坐标, α 为扫描角即聚类后类心的 X 坐标,船舶运动方向为扫描线方向的反方向。当船舶有一条尾迹时可直接将 d 代入式(7)计算船舶航速。当船舶有两条或3条尾迹时,则求各尾迹方位偏移量的均值和扫描角的均值,代入式(7)计算船舶航速。

3 实验结果与分析

选用COSMO-SkyMed卫星Stripmap模式3 m分辨率数据进行实验。实验区位于中国东海,图3为Google Earth上的实验区的位置。数据获取于2010年7月16日,卫星成像时为降轨,入射角 $24.94^{\circ} \sim 28.32^{\circ}$ 。SAR图像的具体参数见表1。在获取图像的同时,同时还获取了该图像成像时间一致的船舶自动识别系统(AIS)数据,用于验证反演得到的船舶航速。

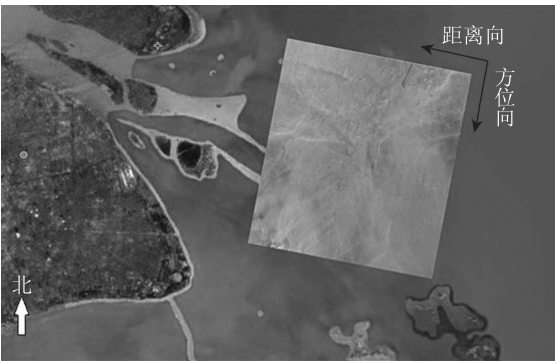


图3 实验区

Fig. 3 Experimental area

表1 COSMO-SkyMed 数据参数

Table 1 The parameters of COSMO-SkyMed data

数据区域	中国东海
获取时间	2010-7-16
极化方式	HH
波段	X
入射角	$24.94^{\circ} \sim 28.32^{\circ}$
分辨率	3 m
轨道模式	降轨

首先进行CFAR船舶检测,然后以检测得到的具有AIS信息的船舶为中心进行切图,得到大小为 $2\,000 \times 2\,000$ 的尾迹切片。本文算法实验以船舶为中心的切片作为输入数据。

3.1 尾迹检测结果分析

图4为部分实验结果图。图4(b)—(e)实验结果表明4种检测方法都可以成功检测,但基于Radon变换的检测结果为直线,无法确定尾迹端点。图4(f)为正在改变航向的STAR JUVENTAS号及V型尾迹的原图,图4(g)—(j)实验结果表明基于Radon变换检测算法、基于归一化Hough变换检测算法都把波浪干扰错误地检测出来了。基于图像分割和归一化Hough变换的检测算法检测到一条尾迹臂。只有基于长度归一化扫描的检测算法可以成功检测两条尾迹臂。

STAR JUVENTAS号的尾迹检测实验充分说明了本文算法的优点,即利用存在距离向运动分量的船舶在SAR图像上会发生方位向偏移的先验知识将尾迹检测的范围限制在尾迹可能分布的区域,而不是对图像全局所有直线进行扫描。这样就提高了尾迹检测率,计算效率也得到大幅提升。实验结果

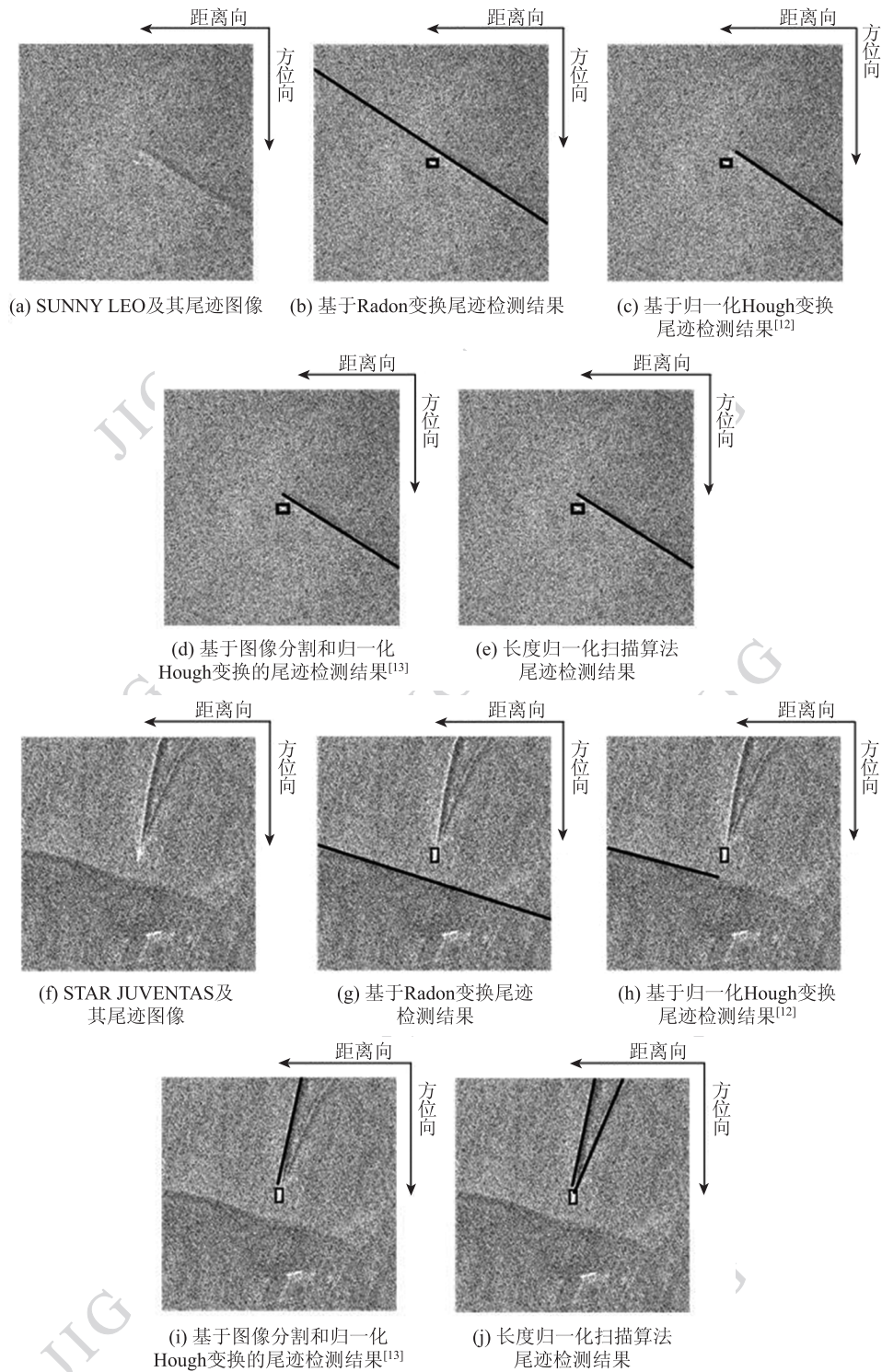


图 4 尾迹检测实验结果

Fig. 4 Experimental results of wake detection

表明,基于 Radon 变换的检测方法无法确定尾迹端点且检测能力有限,基于归一化灰度 Hough 变换及基于图像分割和归一化 Hough 变换的方法虽然可以确定尾迹端点,但是检测能力不如基于长

度归一化扫描的检测方法。基于长度归一化扫描的检测算法不但具有可以确定尾迹端点、检测能力强的特点,而且还可以实现 CFAR 检测、自动确定尾迹数目。

3.2 反演的船舶速度精度分析

由检测到的尾迹的扫描角可以得到船舶航向与距离向的夹角。将卫星 SAR 系统成像时的高度、卫星速度、入射角、船舶运动方向与距离向的夹角、检测得到的船舶方位偏移量及扫描角代入式(7),可以反演船舶成像时的航速。船舶航速的验证数据为 SAR 成像时获得的船舶 AIS 数据。表 2 为反演航速的结果。实验中 8 艘船的船舶航速误差均值为 0.66 m/s,误差标准差约为 1.61 m/s。误差最小的为 MEI SHAN GANG 9,仅为 0.17 m/s。其中误差较大的船舶为 DE QIN 15 与 GANG TONG 2,误差分别达到了 2.8 m/s 与 3 m/s。其原因为当船舶航行方向接近于方位向时扫描角较小接近于 0°或者较大接近于 360°。总体来讲,基于长度归一化扫描的尾迹检测算法反演船舶航速具有相当高的精度。

表 2 船舶航速估算结果
Table 2 Ship velocity results

船舶	AIS 速度	估算速度	/(m/s)
			误差
SUNNY LEO	7.92	8.99	-1.07
MEI SHAN GANG 9	3.45	3.28	0.17
STAR JUVENTAS	6.12	4.88	1.24
RESOURCEFUL2	9.69	10.93	-1.24
KANGHAIYUYANG	6.07	6.34	-0.27
HONG TAI 158	5.97	5.32	0.65
DE QIN 15	5.91	3.11	2.8
GANG TONG 2	6.17	3.17	3.0
误差均值			0.66
误差标准差			1.61

3.3 算法复杂度分析

对于 $N \times N$ 大小的图像,4 种算法的时间复杂度、空间复杂度如表 3 所示。其中, M 为极坐标参数 θ 量化的个数, K 为极坐标参数 ρ 的量化个数。

表 3 算法复杂度分析
Table 3 Algorithm complexity analysis

算法	时间复杂度	算法复杂度
Radon 变换	$O(KMN^2)$	$O(N^2)$
归一化灰度 Hough 变换	$O(KMN^2 + MK)$	$O(2N^2)$
图像分割和归一化灰度	$O(2KMN^2 + 2MK)$	$O(N^2)$
长度归一化扫描	$O(K_1M_1N^2)$	$O(N^2)$

M_1 为长度归一化扫描参数 α 的量化个数, K_1 为长度归一化扫描参数 d 的量化个数。因为 Radon 变换极坐标参数 θ 范围为 $[0, \pi)$, 而长度归一化扫描的参数 α 的范围为 $[0, 2\pi)$ 。所以当角度步长相同时有 $M_1 = 2M$ 。Radon 变换极坐标参数 ρ 范围为 $[0, \sqrt{2}N/2]$ 即 $K = \sqrt{2}N/2$, 而长度归一化扫描的参数 d 的范围为 $[-L, L]$, 而 l 则是根据 1.3 km 的最大偏移距离及方位分辨率确定即 $K_1 = 2(1300/R)$ 。所以, 长度归一化扫描的算法时间复杂度和标准 Radon 变换为一个量级, 为 $O(KMN^2)$ 。

实验机器配置如下:主频 2.93 GHz 的双核处理器,内存为 4 G。对于大小为 2000×2000 的切片数据,使用基于长度归一化扫描的检测方法进行尾迹检测时,当虚警率取 0.01,在扫描空间进行一次 4 邻域腐蚀 1 次 4 邻域膨胀, K 均值聚类只需 2~4 次,从输入图像到得到船舶速度需要的运行时间为 8 s。同一运行环境下,同一幅图像基于 Radon 变换的检测算法需要 15 s;基于归一化 Hough 的检测算法需要 18 s;基于图像分割和归一化 Hough 的检测算法需要 23 s。所以本文提出的基于长度归一化扫描的尾迹检测算法具有非常快的计算速度,可以满足近实时的处理需要。

4 结 论

基于长度归一化扫描的 SAR 图像尾迹 CFAR 检测算法,根据尾迹在 SAR 图像上分布的特性,只对可能为尾迹的线段进行扫描。通过利用线性积分和长度归一化这两个方法将矩形移动窗口下的线性特征检测问题转化为了点特征检测问题,并实现了 CFAR 检测及船舶速度提取。算法具有复杂度低、效率高等优点,可以快速自动检测出尾迹目标,提取的船舶速度具有较高精度。在对 COSMO-SkyMed 卫星的 SAR 图像进行的实验中,无论是尾迹检测还是船舶速度的提取都取得了较好的实验效果,且计算速度较快,可满足实际应用需求。

参考文献 (References)

[1] Tunaley J K E. The estimation of ship velocity from SAR imagery [C]// Proceedings of IGARSS 03. Ottawa, Canada: IGARSS, 2003: 191-193. [DOI: 10.1109/IGARSS.2003.1293720]
[2] Copeland A C. Localized radon transform-based detection of ship

- wakes in SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 35-45. [DOI: 10.1109/36.368224]
- [3] Eldhuset K. Automatic ship and ship wake detection in spaceborne SAR images from coastal regions [C]// Proceedings of IGARSS88. Edinburgh, Scotland; IGARSS, 1988: 1529-1533. [DOI:10.1109/IGARSS.1988.569511]
- [4] Eldhuset K. An automatic ship and ship wake detection system for spaceborne SAR images in coastal regions [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, 34(4): 1010-1019. [DOI: 10.1109/36.508418]
- [5] Cusano M. A real time operational scheme for ship traffic monitoring using quick look ERS SAR images [C]// Proceedings of IGARSS'2000. Rome, Italy; Univ. of Rome La Sapienza, 2000: 2918-2920. [DOI:10.1109/IGARSS.2000.860289]
- [6] Rey M T, Tunaley J K, Folinsbec J T, et al. Application of radon transform techniques to wake detection in Seasat-A SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(4): 553-560. [DOI: 10.1109/TGRS.1990.572948]
- [7] Copeland A C. Localized radon transform-based detection of ship wakes in SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(1): 35-45. [DOI: 10.1109/36.368224]
- [8] Xing X W, Ji H X, Zou H X. An enhancing normalized Radon transform method for ship wake detection in SAR imagery [C]// Proceedings of EUSAR2012. Nuremberg, Germany; EUSAR, 2012:559-562.
- [9] Jin M K. The application of wavelets correlator for ship wake detection in SAR images [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1506-1511. [DOI: 10.1109/TGRS.2003.811998]
- [10] Mata-Moya D. Application of mean-shift filtering to ship wakes detection in SAR images [C]// Proceedings of IEEE EU-SAR2010. Aachen, German; IEEE 2010, 2010: 1-4.
- [11] Wang S Q, Jin Y Q. Ship wake detection in SAR images based on Radon transformation and morphologic image processing[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(4):289-294. [王世庆, 金亚秋. SAR 图像船舶尾迹检测的 Radon 变换和形态学图像处理技术[J]. 遥感学报, 2001, 5(4):289-294.]
- [12] Chong J S, Zhu M H. Ship wake detection algorithm in SAR image based on normalized grey level Hough transform[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(2):146-150. [种劲松, 朱敏慧. 基于归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像船舶尾迹检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(2):146-150.]
- [13] Ai J Q, Qi X Y, Yu W D, et al. A new ship wake CFAR detection algorithm in SAR images based on image segmentation and normalized Hough transform[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2010, 32(11):2668-2673. [艾加秋, 齐向阳, 禹卫东, 等. 一种基于图像分割和归一化灰度 Hough 变换的 SAR 图像船舶尾迹 CFAR 检测算法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(11):2668-2673.]
- [14] Tao R H, Liu C H, Chen B, et al. Generalized fractal multi-scale Wavelet characteristics of fading ship wake [J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2009, 26(3):184-186. [陶荣华, 刘翠花, 陈标, 等. 船舶衰落尾迹的小波多尺度广义分形特征分析[J]. 测绘科学技术学报, 2009, 26(3):184-186.]
- [15] Li H K, Wang J G. Weak wake detection based on directional Wavelet transform [J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(6): 63-65. [李红康, 王建国. 基于方向小波的弱尾迹检测[J]. 测绘科学技术学报, 2008, 48(6):63-65.]
- [16] Yu X H. Research and simulation of ship wake track based on image [J]. Computer Simulation, 2012, 29(6): 286-289. [于晓华. 基于图像的船舶尾迹跟踪方法研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2012, 29(6): 286-289.]
- [17] Lyden J D. Analysis of synthetic aperture radar imagery of surface ship wakes [C]// Proceedings of IGARSS 86. Zurich, Switzerland; IGARSS, 1986:801-805.