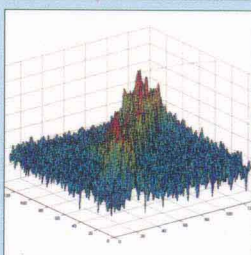
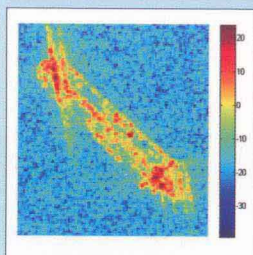
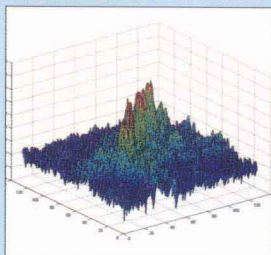
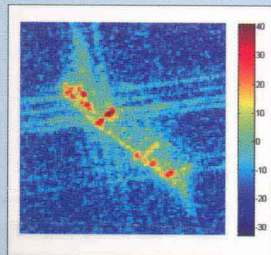
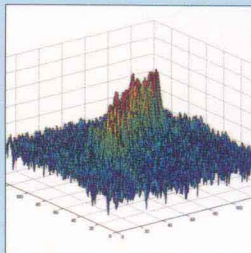
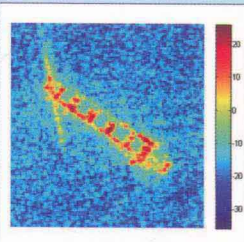


# 高分辨率SAR图像 船舶目标检测与分类

王超 张红 等◎著  
吴樊 张波



科学出版社

# 高分辨率 SAR 图像 船舶目标检测与分类

王 超 张 红 等 著  
吴 樊 张 波

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书基于高分辨率、全极化等多种新型 SAR 数据源,对海洋表面目标船舶、尾迹等进行了以“检测与识别”为主的方法及算法应用研究论述。除较全面地论述当前常用的目标检测方法外,本书创新性地将模式识别技术引入海洋目标的识别问题中,解决了商船、油船等常见船舶的分类问题,并利用 AIS 数据对本书所论述的技术方法进行验证。

本书供从事模式识别、遥感、测绘、海洋、海事、交通等学科领域的科研和工程技术人员参考。

### 图书在版编目 CIP 数据

高分辨率 SAR 图像船舶目标检测与分类 / 王超,张红等著. —北京:科学出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-03-038934-3

I. ①高… II. ①王… ②张… III. ①高分辨率-遥感图像-图像处理-应用-船舶-目标检测-研究 IV. ①U661.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 249179 号

责任编辑:彭胜潮 等 / 责任校对:宣 慧

责任印制:赵德静 / 封面设计:铭轩堂

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013 年 11 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2013 年 11 月第一次印刷 印张: 11 3/4 插页: 4

字数: 264 000

定价: 59.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 序

1978 年第一颗合成孔径雷达(SAR)卫星升空,标志着卫星雷达遥感时代的开始。这颗由美国宇航局(NASA)研制的卫星即以海洋卫星(Seasat)命名。20 世纪 90 年代,欧洲空间局(ESA)发射的欧洲遥感卫星(ERS-1)、加拿大航天局(CSA)发射的雷达卫星(Radarsat-1)都是以海洋为主要应用领域的 C 波段 SAR 卫星。SAR 主动发射微波信号并接收回波获取地物信息,具有全天候、全天时工作的特点。由于微波对海洋表面结构、物理状态和化学成分的敏感,SAR 已经成功地应用于海面风场、波高、流场、盐度、海冰、锋面、内波等海洋现象及水下地形等方面的监测。由于海上目标与海杂波之间具有很高的信杂比,SAR 在船舶监测、溢油探测、浒苔监测等方面也展示了其独特的优势。可以预测,随着未来 SAR 卫星的发展,SAR 在海洋环境监测、海上安全保障以及全球变化研究中将发挥越来越重要的作用。

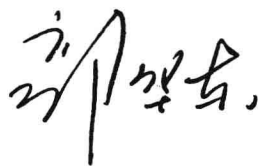
在 SAR 船舶监测应用方面,已有的研究工作多集中在检测算法上。有研究者利用计算机模拟开展船舶分类的研究,但由于分辨率的限制,有关 SAR 图像船舶分类的研究并不多见。2007 年德国 TerraSAR-X、意大利 Cosmo-SkyMed 和加拿大 Radarsat-2 等高分辨率 SAR 卫星的升空,卫星 SAR 图像不仅可以用来探测船只,其反映的船舶特征和细节,更为船舶的识别和分类提供了可能。

王超研究员于 1989 年南京大学博士毕业后来到中国科学院遥感应用研究所,在我们的雷达遥感课题组开始了他的雷达遥感研究工作。20 世纪 90 年代后期,他率先在国内开展了干涉合成孔径雷达(InSAR)方向的研究工作,并发表了一系列论文和专著。近年,他开始关注雷达图像的理解,尝试将计算机视觉理论和雷达图像处理相结合,实现雷达图像上目标识别与信息提取。在国家 863 计划和国家自然科学基金委的支持下,他带领的项目组开展了高分辨率 SAR 船舶识别与分类的研究。在研究工作中,王超和他的同事于 2009 年 9 月和 2010 年 7 月两次搭船出海,克服海上作业困难,在东海海域开展卫星同步观测实验,获取了

宝贵的实时观测数据,并结合船舶自动识别系统(AIS)数据,开展船舶分类研究,取得了卓有成效的成果。本书是他的研究团队在 SAR 船舶识别分类研究方面的成果总结,相信对相关领域的学者具有重要参考价值。

思考未来 SAR 卫星的发展趋势,在系统方面将有更多的新技术得到发展以满足应用的需求;在雷达成像方面,将具有更加灵活的成像模式,在实现图像宽覆盖的同时提高分辨率,满足看得远、看得广且看得清的要求;在卫星平台方面,许多 SAR 卫星平台上将同时装备 AIS 数据获取系统,实现多源信息融合对船舶的监测,同时,将出现低成本 SAR 小卫星、卫星星座,降低进入雷达卫星“俱乐部”的门槛;在地面处理和应用系统方面,将进一步提升数据全链路实时性,保证海洋、灾害等应用领域的实时性要求;在数据政策方面,数据和算法的共享将更加开放。过去 20 余年已有 20 多颗雷达卫星被送入地球轨道,可以预测,未来将会有更多的雷达卫星被送入太空乃至深空。与此同时,我国 SAR 卫星及其应用也将进入一个迅速发展的新时期。

此书我有幸先睹为快。在祝愿王超和他的研究组不断取得更多成果的同时,也期待读者们拨冗一阅,相信大家会从中享受获取知识的快乐。



中国科学院院士

中国科学院遥感与数字地球研究所所长

2013 年 11 月

# 前言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)具有全天时、全天候、大范围、多参数等特点,能够对水面人造目标、溢油污染及海洋环境进行宏观、长期、连续、动态观测,是海洋船舶监测的最有效手段之一。利用 SAR 图像对海洋船舶进行监测,对海洋环境保护、渔业资源管理、海上交通与应急处置、国防安全等方面具有非常重要的意义。

20 世纪五六十年代,合成孔径雷达经历了概念提出、实验设计、样机完善等阶段,成为成像雷达发展最快、应用最广的重要分支。1978 年,第一颗 SAR 遥感卫星“海洋卫星 1 号”(seasat)成功发射,引发了人们对海洋遥感图像成像原理及应用研究的热潮。海面船舶由于其与海表之间的二面角及船舶本身上层结构的角反射结构,在 SAR 成像中相对于海面成像具有更高的回波强度,这也成为 SAR 图像海面船舶探测与识别的基础。

高分辨率 SAR 出现以前,船舶探测是研究热点。由于分辨率较低,船舶分类识别的研究相对滞后,一般采用较高分辨率的逆合成孔径雷达(inverse synthetic aperture radar, ISAR)、模拟数据或机载 SAR 数据开展研究,并对中等分辨率 SAR 图像船舶分类可行性进行评估。2007 年后, TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、Radarsat-2 等新一代高分辨率、多极化 SAR 传感器发射运行,我国也即将发射高分辨率 SAR 卫星。迫切的需求和传感器技术的快速发展为海洋及陆地目标的准确识别提供了新的契机,也给 SAR 图像在船舶分类识别等应用带来了广阔前景,相关研究工作也开始起步。

在高分辨率 SAR 图像中,船舶等人工目标表现出与中低分辨率图像中截然不同的特征,图像单个像素所包含的散射中心减少,地物由原来的点状目标变为能够显示出其表面结构的面状目标。如何从高分辨率 SAR 图像中对船舶进行有效探测并进行类型识别是现有技术所面临的挑战,也是关注的热点问题。针对这一问题,作者所在的研究团队在相关项目的支持下,利用最新的 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed、Radarsat-2 等高分辨率数据,结合计算机视觉等领域前沿开展了高分辨率 SAR 图像船舶检测与分类识别研究。本书是近年来作者在该领域最新研究成果的阶段性总结。

本书第 1 章主要介绍了当前高分辨率星载 SAR 的发展,并对 SAR 图像船舶检测与分类识别技术以及国外相关项目和系统现状与发展进行综述。第 2 章针对船舶检测识别应用,从海陆分割、目标图像增强、目标定位等方面介绍了相关预处理方法。第 3 章首先对 SAR 图像中影响船舶检测性能的各种因素进行了分析,介绍了基于不同分布模型的恒虚警率(constant false alarm rate, CFAR)船舶检测理论基础及方法,分析比较了几种经典检测技术;并针对高分辨率 SAR 图像特点介绍了几种不同的船舶检测算法;最后介绍了船舶尾迹以及航向提取方法。第 4 章以船舶不同特点为基础,结合模拟仿真,利用特征提取技术,对高分辨率 SAR 图像中船舶的特征进行分析。第 5 章根据不同类型船舶在高分辨率 SAR 图像中所表现出的不同特点,从散射、几何外形、结构特征等方面介绍了几种船舶分类识别方法。

本书相关研究工作得到了国家“863 计划”(2009AA12Z139)、国家自然科学基金

(40701108、40871191)、交通运输部(中国海事局)等项目的支持。参加研究与撰写工作的人员还有:温晓阳博士、田巳睿博士、李洪忠博士、张立平博士、单子力博士、吴艳钊、郭经、高丛珊、田小娟、吴冰洁、殷雄、蒋少峰、孙渊、南杰、陈明等硕士。研究工作中,高分辨率 TerraSAR-X 数据由德国宇航局(DLR)科学项目(Project number: LAN0035)提供;高分辨率 COSMO-SkyMed 数据由意大利航空局(ASI)科学项目(Project number: 2247)提供;Radarsat-2 数据由中国科学院对地观测与数字地球科学中心提供。船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据由上海海事局提供。海上实时卫星同步试验得到了农业部东海区渔政局的支持,中国渔政东海总队协助组织实施。交通运输部宋溱、何铁华处长,东海航海保障中心上海航标处陈国伟主任,农业部东海区渔政局钟小金副局长,中国渔政东海总队顾道良副总队长,东海渔政 206 号渔政船王进中船长、曹胜昌指导员及孙慧健等全体船员,大连海事大学航海学院付玉慧教授、马会教授,农业部水产科学研究院李继林研究员,德国汉堡大学 W. Alpers 教授等领导和专家对研究工作提出了具体指导意见和帮助。在此一并表示衷心感谢。

高分辨率 SAR 发展方兴未艾,在船舶等人工目标的探测、分类与识别方面显示出巨大潜力,希望本书能够起到抛砖引玉的作用,以推动我国海洋目标检测与分类识别技术的深入研究,促进我国 SAR 卫星海洋和交通领域的应用。

限于作者水平和时间仓促,本书难免存在一些不妥之处,敬请读者批评指正。

# 目 录

## 序

## 前言

|                             |      |
|-----------------------------|------|
| 第 1 章 绪论                    | (1)  |
| 1.1 高分辨率星载 SAR 系统           | (1)  |
| 1.2 星载 SAR 图像船舶检测           | (6)  |
| 1.3 星载 SAR 图像船舶分类与识别        | (12) |
| 1.4 星载 SAR 船舶监测项目及系统        | (18) |
| 1.4.1 国外星载 SAR 船舶监测项目       | (18) |
| 1.4.2 星载 SAR 船舶监测系统         | (22) |
| 参考文献                        | (24) |
| 第 2 章 面向船舶检测识别的 SAR 图像预处理   | (30) |
| 2.1 海陆分割方法                  | (30) |
| 2.1.1 GIS 辅助的海陆分割           | (31) |
| 2.1.2 基于 Snake 模型的海陆分割      | (37) |
| 2.2 海洋目标 SAR 图像增强方法         | (45) |
| 2.2.1 引力场增强                 | (45) |
| 2.2.2 静态小波增强                | (49) |
| 2.3 船舶目标在 SAR 图像中的地理定位方法    | (56) |
| 2.3.1 几何光学模型                | (56) |
| 2.3.2 R-D 模型                | (59) |
| 2.3.3 有理多项式模型               | (64) |
| 2.3.4 小结                    | (65) |
| 参考文献                        | (66) |
| 第 3 章 高分辨率 SAR 图像船舶目标检测     | (68) |
| 3.1 船舶检测性能分析                | (68) |
| 3.1.1 SAR 系统特性对检测性能的影响      | (68) |
| 3.1.2 成像区域环境对检测性能的影响        | (71) |
| 3.1.3 船舶目标特征对检测性能的影响        | (72) |
| 3.1.4 SAR 图像处理和检测方法对检测性能的影响 | (73) |
| 3.2 基于统计模型的 CFAR 目标检测       | (75) |
| 3.2.1 CFAR 检测理论基础           | (75) |
| 3.2.2 SAR 图像海洋杂波常用统计模型      | (76) |
| 3.2.3 分布模型的参数估计             | (81) |
| 3.2.4 基于各种统计模型的 CFAR 检测器    | (85) |
| 3.3 SAR 船舶检测几种经典算法          | (88) |
| 3.3.1 双参数 CFAR 检测算法         | (88) |
| 3.3.2 基于 K 分布的 CFAR 检测算法    | (89) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 3.3.3 基于模板匹配的 SUMO 检测算法          | (91)  |
| 3.3.4 小结                         | (92)  |
| 3.4 基于联合分布的 SAR 图像船舶检测           | (93)  |
| 3.4.1 算法原理与流程                    | (94)  |
| 3.4.2 实验与分析                      | (96)  |
| 3.5 基于多特征优化的高分辨率 SAR 船舶检测方法      | (99)  |
| 3.5.1 算法原理与流程                    | (99)  |
| 3.5.2 实验与分析                      | (103) |
| 3.6 基于长度归一化扫描的 SAR 图像尾迹检测方法      | (110) |
| 3.6.1 尾迹检测方法概述                   | (110) |
| 3.6.2 算法原理与流程                    | (112) |
| 3.6.3 实验与分析                      | (115) |
| 3.7 基于主成分分析的 SAR 图像商用船舶航向提取方法    | (119) |
| 3.7.1 算法原理与流程                    | (119) |
| 3.7.2 实验与分析                      | (123) |
| 参考文献                             | (124) |
| <b>第 4 章 高分辨率 SAR 图像船舶特征分析</b>   | (127) |
| 4.1 船舶特征概述                       | (127) |
| 4.2 SAR 图像船舶目标特征分析               | (128) |
| 4.2.1 船舶 SAR 图像特征                | (128) |
| 4.2.2 典型类别船舶 SAR 图像特征            | (130) |
| 4.3 SAR 图像船舶特征点提取分析              | (133) |
| 4.3.1 船舶峰值特征点                    | (133) |
| 4.3.2 船舶 SIFT 特征点                | (134) |
| 4.4 船舶 SAR 图像模拟                  | (138) |
| 4.4.1 SAR 图像模拟方法                 | (138) |
| 4.4.2 船舶 SAR 图像模拟分析              | (144) |
| 参考文献                             | (147) |
| <b>第 5 章 高分辨率 SAR 图像船舶目标分类识别</b> | (149) |
| 5.1 基于散射矩阵的船舶分类识别方法              | (149) |
| 5.1.1 算法原理与流程                    | (150) |
| 5.1.2 实验与分析                      | (153) |
| 5.2 基于几何结构的船舶分类识别方法              | (155) |
| 5.2.1 算法原理与流程                    | (156) |
| 5.2.2 实验与分析                      | (159) |
| 5.3 基于结构特征的船舶分类识别方法              | (161) |
| 5.3.1 算法原理与流程                    | (161) |
| 5.3.2 实验与分析                      | (166) |
| 5.4 基于几何和散射特征联合的船舶分类方法           | (169) |
| 5.4.1 算法原理与流程                    | (169) |
| 5.4.2 实验与分析                      | (175) |
| 参考文献                             | (177) |

# 第 1 章 绪 论

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)凭借其相对于光学遥感所具有的全天时、全天候的对地观测特点,在最近 30 年得到了飞速发展与广泛应用。以 Radarsat-2、TerraSAR-X 等为代表的新一代 SAR 系统所具有的高分辨率、多极化能力已成为雷达技术发展新的标志,也为地物目标的探测与识别研究及应用提供了新的机遇。本章围绕高分辨率 SAR 图像海洋目标检测与分类识别领域,介绍星载 SAR 传感器的最新发展,对目前国内外 SAR 图像船舶检测与分类识别相关技术的研究发展现状进行阐述。

## 1.1 高分辨率星载 SAR 系统

从 1978 年第一颗星载 SAR 系统 Seasat 成功发射、运行以来,星载 SAR 卫星系统经过 30 多年的发展,在 SAR 工作性能上得到了全面的提升,其中主要表现在以下四方面。

(1) 工作模式多样化。早期的 SAR 系统大多只有条带成像模式,随后出现了 Scan-SAR 扫描模式,而如今的星载 SAR 系统更是增加了聚束成像(spotlight)模式,使得现在的星载 SAR 系统不仅可以获得宽幅的扫描图像,而且可以针对目标检测与识别获取 1m 甚至更精细的高分辨率图像。

(2) 分辨率大幅提高。星载 SAR 系统经过 30 多年的发展,地面分辨率已从早期的 30m 左右提高至目前的米级分辨率。例如,早期 ERS-1/2、JERS-1 分辨率为 30m 左右,而 TerraSAR-X 的分辨率已达到了 1 m。

(3) 极化通道丰富。与单极化 SAR 数据相比,极化 SAR 可以提供更多地面目标信息。早期的星载 SAR 系统只能提供 HH 或者 VV 的单极化数据,之后如 ENVISAT-ASAR 具有了交替极化模式,可以提供 HH-HV 或 VV-VH 双极化的数据,而最新的星载 SAR 系统都普遍具备了获取地物全极化 SAR 数据的能力。

(4) 卫星重访周期缩短。与 ENVISAT-ASAR、ALOS-PAISAR 等卫星 35 天左右的重访周期相比,Radarsat-1 和 Radarsat-2 重访周期缩短为 24 天,TerraSAR-X 则缩短为 11 天,而由 4 颗卫星组成的 COSMO-SkyMed 星座,更是可以做到 24 小时的重复观测。卫星重访周期的缩短,大大提高了卫星对突发、重大事件持续观测的数据获取能力。

星载 SAR 系统的飞速发展,为 SAR 图像船舶目标的检测、分类识别提供了新的发展机遇,下面将对以 Radarsat-2、COSMO-SkyMed TerraSAR-X 为代表的新一代星载 SAR 系统的相关成像参数做详细介绍。

### 1. Radarsat-2

Radarsat-2 是加拿大 MDA 公司研发,并于 2007 年 12 月 14 日发射的第二代商业 SAR 卫星,其轨道参数见表 1.1。作为第一代商业卫星 Radarsat-1 的后继星,Radarsat-2 不仅具有 Radarsat-1 的优点,而且增加了许多新的观测模式,在分辨率、极化观测能力等方面都

取得了显著进步，其主要区别对比见表 1.2 所示，成为目前重要的 SAR 数据来源。

表 1.1 Radarsat-2 卫星轨道参数

| 轨道高度  | 轨道倾角  | 每天轨道圈数 | 重访周期 |
|-------|-------|--------|------|
| 798km | 98.6° | 14.3   | 24 天 |

表 1.2 Radarsat-2 主要创新

| 项目     | Radarsat-1 | Radarsat-2    |
|--------|------------|---------------|
| 分辨率    | 10~100m    | 1~100m        |
| 极化     | HH         | HH、HV、VV 和 VH |
| 观测方向   | 右视/左视      | 右视/左视         |
| 星载 GPS | 无          | 具备星载 GPS      |

相对于 Radarsat-1，Radarsat-2 具有更为丰富的观测模式，图 1.1 概括了 Radarsat-2 所具有的所有工作模式，主要包括条带扫描(stripmap)、宽扫描 SAR(scanSAR)与聚束 (spotlight)三种，同时在各工作模式下又具备不同的极化数据获取能力，详细的 Ra-darsat-2 数据产品见表 1.3。

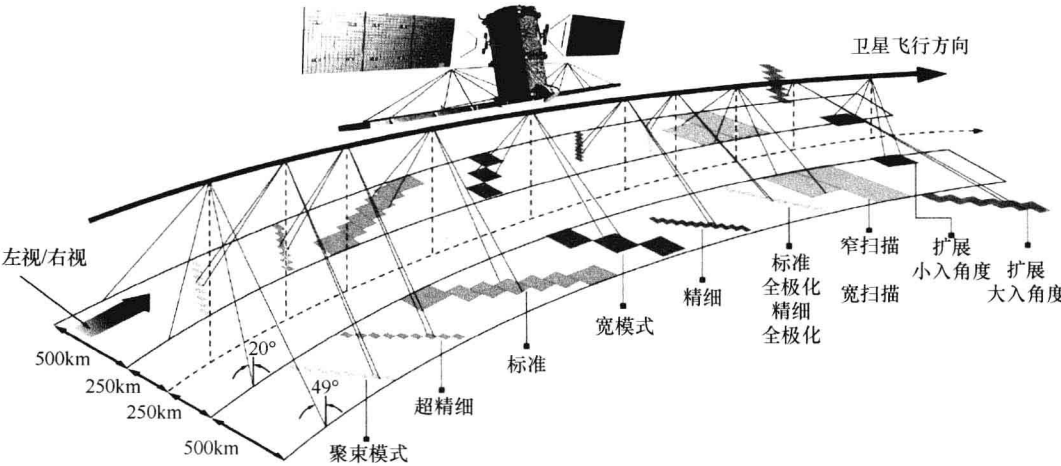


图 1.1 Radarsat-2 工作模式

Radarsat-2 PRODUCT DESCRIPTION RN-SP-52-1238 Issue 1/6; Nov. 2, 2009

表 1.3 Radarsat-2 主要数据产品参数

| 波束模式 | 产品         | 像素间隔<br>[Rng×Az]/m | 分辨率<br>[Rng×Az]/m | 幅宽<br>[Rng×Az]/km | 入射角/(°) | 极化方式                           |
|------|------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------|--------------------------------|
| 聚束模式 | SLC        | 1.3×0.4            | 1.6×0.8           | 18×8              | 20~49   | 单极化<br>HH 或者 VV 或者<br>HV 或者 VH |
|      | SGX        | 1×1/3              | (4.6~2.1)×0.8     |                   |         |                                |
|      | SGF        | 0.5×0.5            |                   |                   |         |                                |
|      | SSG<br>SPG | 0.5×0.5            |                   |                   |         |                                |

续表

| 波束模式      | 产品         | 像素间隔<br>[Rng×Az]/m | 分辨率<br>[Rng×Az]/m | 幅宽<br>[Rng×Az]/km | 入射角/(°) | 极化方式                            |
|-----------|------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------|---------------------------------|
| 超精细       | SLC        | 1.3×2.1            | 1.6×2.8           | 20×20             | 20~49   | 单极化<br>HH 或者 VV 或者<br>HV 或者 VH  |
|           | SGX        | 1×1                | (4.6~2.1)×2.8     |                   |         |                                 |
|           | SGF        | 1.56×1.56          |                   |                   |         |                                 |
|           | SSG<br>SPG | 1.56×1.56          |                   |                   |         |                                 |
| 精细        | SLC        | 4.7×5.1            | 5.2×7.7           | 50×50             | 30~50   | 单极化或者双<br>极化(HH+HV 或者<br>VV+VH) |
|           | SGX        | 3.13×3.13          | (10.4~6.8)×7.7    |                   |         |                                 |
|           | SGF        | 6.25×6.25          |                   |                   |         |                                 |
|           | SSG<br>SPG | 6.25×6.25          |                   |                   |         |                                 |
| 标准        | SLC        | 8(11.8)×5.1        | 9.0(13.5)×7.7     | 100×100           | 24~49   | 单极化或者双极<br>化(HH+HV 或者<br>VV+VH) |
|           | SGX        | 8×8                | (26.8~18.0)×24.7  |                   |         |                                 |
|           | SGF        | 12.5×12.5          |                   |                   |         |                                 |
|           | SSG<br>SPG | 12.5×12.5          |                   |                   |         |                                 |
| 宽模式       | SLC        | 11.8×5.1           | 13.5×7.7          | 150×150           | 20~45   | 单极化或者双极<br>化(HH+HV 或者<br>VV+VH) |
|           | SGX        | 10×10              | (40.0~19.2)×24.7  |                   |         |                                 |
|           | SGF        | 12.5×12.5          |                   |                   |         |                                 |
|           | SSG<br>SPG | 12.5×12.5          |                   |                   |         |                                 |
| 窄扫描       | SCN        | 25×25              | (79.9~37.7)×60    | 300×300           | 20~46   | 全极化<br>HH+VV+HV<br>+VH          |
| 宽扫描       | SCW        | 50×50              | (160~72.1)×100    | 500×500           | 20~49   |                                 |
| 精细<br>全极化 | SLC        | 4.7×5.1            | 5.2×7.6           | 25×25             | 18~49   |                                 |
|           | SGX        | 3.13×3.13          | (16.5~6.8)×7.6    |                   |         |                                 |
|           | SSG<br>SPG | 3.13×3.13          |                   |                   |         |                                 |
| 标准<br>全极化 | SLC        | 8(11.8)×5.1        | 9.0(13.5)×7.6     | 25×25             | 18~49   |                                 |
|           | SGX        | 8×3.13             | (28.6~17.7)×7.6   |                   |         |                                 |
|           | SSG<br>SPG | 8×83.13            |                   |                   |         |                                 |

注: Rng 表示距离向; Az 表示方位向

不同的工作模式, 根据处理的级别, 目前 Radarsat-2 的产品主要包括以下三种:

(1) 斜距产品: 单视复图像(Single Look Complex, SLC)。

(2) 地距产品: 扩展模式(SAR Georeferenced Extra Fine Resolution, SGX)、精细模式(SAR Georeferenced Fine Resolution, SGF)、窄扫描(SCN)、宽扫描(SCW)。

(3) 地理纠正产品: SSG, SPG。

2. COSMO-SkyMed 星座

2010 年 11 月 6 日，由意大利航天局和意大利国防部共同研发的高分辨率对地观测雷达卫星星座 COSMO-SkyMed(Constellation of Small Satellites for Mediterranean Basin Observation)的最后一颗卫星，即第四颗卫星 COSMO-SkyMed-4 在美国成功发射升空，标志着自 2007 年 6 月 8 日开始构建的 COSMO-SkyMed 雷达卫星星座搭建完成，进入正式运营的模式。

COSMO-SkyMed 系统是一个服务于民间、公共机构、军事和商业的两用对地观测系统，其目的是提供民防(环境风险管理)、战略(防务与国家安全)、科学与商业用途，并计划以后与阿根廷的 SAOCOM 星座(由 2 个 L 波段 SAR 卫星组成)组成更大的对地观测星座，提供与环境监视、风险管理、环境资源管理、海事管理及科学应用相关的数据与服务。

COSMO-SkyMed 雷达卫星所采用的工作频率选择为 X 波段，分辨率达到 1m。表 1.4 列出了 COSMO-SkyMed 卫星星座的主要轨道参数。

表 1.4 COSMO-SkyMed 卫星轨道参数

| 轨道高度    | 轨道倾角   | 每天轨道圈数  | 重访周期 |
|---------|--------|---------|------|
| 619.6km | 97.86° | 14.8125 | 16 天 |

与 Radarsat-2 卫星一样，COSMO-SkyMed 同样具有聚束、条带和扫描三种工作模式，如图 1.2 所示，其中条带式除了提供单极化数据外，还可以获得双极化数据(HH、VV 或 HH、HV 或 VV、VH)。不同工作模式的分辨率及幅宽见表 1.5。

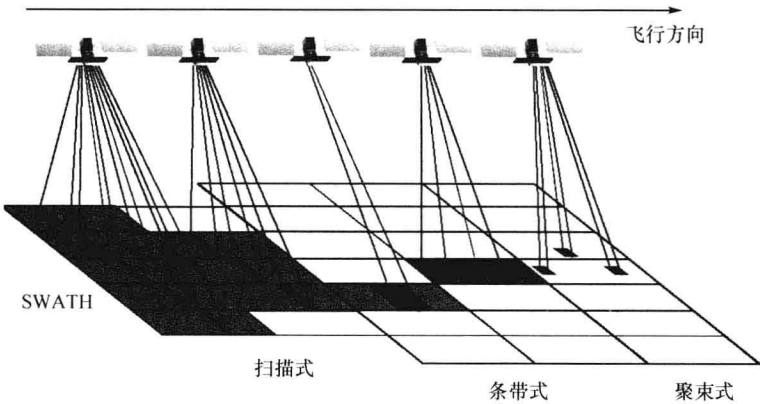


图 1.2 意大利 COSMO-SkyMed 卫星观测模式

COSMO-SkyMed System Description &. User Guide, Doc. No. ASI-CSM-ENG-RS-093-A, 04-05-2007

表 1.5 COSMO-SkyMed 不同模式图像分辨率及幅宽

| 项目    | 聚束模式 | 条带式 |     | 扫描式 |     |
|-------|------|-----|-----|-----|-----|
|       |      | 单极化 | 双极化 | 宽幅  | 巨宽  |
| 分辨率/m | 1    | 3   | 5   | 30  | 100 |
| 幅宽/km | 10   | ≥40 | ≥30 | 100 | 200 |

目前 COSMO-SkyMed 数据产品可以分为标准产品、高级产品和辅助产品。其中标准产品根据处理级别，可以为用户提供以下四种产品：

- (1) 0 级产品：原始信号。
- (2) 1A 产品：单视复数据斜距产品(Single-look Complex Slant, SCS)。
- (3) 1B 产品：多视幅度地距产品(Detected Ground Multi-look, DGM)。
- (4) 1C/1D 产品：其中 1C(GEC)是以地球椭球体纠正的地图产品，而 1D(GTC)则是根据实际数字高程模型纠正的地图产品。

3. TerraSAR-X(TSX)

TerraSAR-X 卫星于 2007 年 6 月 15 日从拜科努尔发射场成功发射，卫星设计寿命 5 年，采用 X 波段获取在多种工作模式下的地表雷达图像。与以往的 SAR 传感器相比，TerraSAR-X 提供了许多全新的特性，以满足日益增长的遥感 SAR 数据的商业需求。表 1.6 列出了 TerraSAR-X 主要的轨道参数。

表 1.6 TerraSAR-X 卫星轨道参数

| 轨道高度  | 轨道倾角   | 每天轨道圈数  | 重访周期 |
|-------|--------|---------|------|
| 514km | 97.44° | 15.1818 | 16 天 |

作为新一代 SAR 系统的代表，TerraSAR-X 同样采用聚束模式(Spotlight)、条带模式(StripMap)和扫描模式(ScanSAR)的工作模式获取数据，如图 1.3 所示，其主要成像参数见表 1.7。

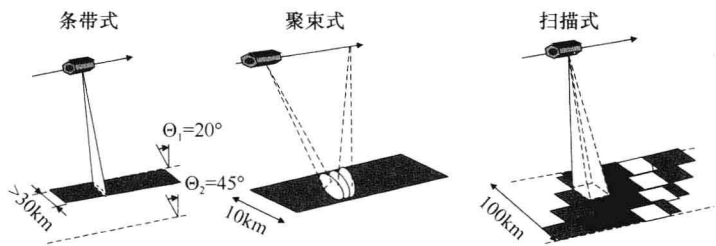


图 1.3 TerraSAR-X 工作模式

表 1.7 TerraSAR-X 不同模式图像分辨率及幅宽

| 项目          | 条带式<br>(SM) |                        | 聚束式                                   |       |            |       | 扫描式(SC)  |
|-------------|-------------|------------------------|---------------------------------------|-------|------------|-------|----------|
|             |             |                        | 高分辨聚束(HS)                             |       | 普通聚束(SL)   |       |          |
| 极化方式        | HH 或 VV     | HH/VV, HH/HV,<br>VV/VH | HH 或<br>VV                            | HH/VV | HH 或<br>VV | HH/VV | 单极化      |
| 幅宽/km       | 30          | 15                     | 5~10                                  |       | 10         |       | 100      |
| 入射角/(°)     | 20~45       |                        | 20~55                                 |       | 20~55      |       | 20~45    |
| 方位向分辨率/m    | 3.3         | 6.6                    | 1.1                                   | 2.2   | 1.7        | 3.4   | 18.5     |
| 地距<br>分辨率/m | 1.70~3.49   |                        | 1.48~3.49<br>0.74~1.77<br>(对应 5km 幅宽) |       | 1.48~3.49  |       | 1.7~3.49 |

TerraSAR-X 根据处理的级别, 主要提供以下四种数据产品:

- (1) SSC: 单视复数据斜距产品, 采用方位向-斜距坐标。
- (2) MGD: 多视地距幅度产品, 采用方位向-地距坐标, 未作地形纠正。
- (3) GEC: 以地球椭球体为参考的地理编码产品。
- (4) EEC: 以 DEM 地形为参考纠正的地理产品。



图 1.4 TDX 与 TSX 双基站系统

#### 4. TanDEM-X(TDX)

为了增强 TerraSAR-X 的地形测绘能力, 德国 DLR 在 2010 年 6 月 21 日发射了一颗与 TerraSAR-X 完全相同的另一颗卫星, 2 颗卫星在相同轨道上运行, 组成了利于 SAR 干涉处理的 TanDEM 工作模式, 如图 1.4 所示。

TDX 与 TSX 可以独自采用单基站的工作模式, 也可以根据需要进行联合工作的模式, 组成双站 SAR 系统。

TDX 的首要任务是为地形测绘服务, 提供全球的数字高程模型(DEM), 除此之外, TDX 与 TSX 所组成的联合观测模式, 构成了全球第一个星载顺轨干涉 SAR 处理系统, 使得对运动目标的监测, 速度估计成为可能。

## 1.2 星载 SAR 图像船舶检测

海洋遥感是卫星遥感技术的重要领域, 随着海洋权益日益重要, 海洋遥感在世界各国的经济和军事领域得到了广泛应用。SAR 系统由于具有全天时、全天候工作, 大覆盖面积等特点而成为卫星海洋船舶监测的主要数据源, 目前已有大量基于星载 SAR 的海洋船舶检测算法发表于国内外文献之上, 归纳起来可以分为: ①基于统计特征的船舶检测; ②基于图像处理的船舶检测; ③基于模板的船舶检测; ④基于多/全极化特征的船舶检测。

### 1. 基于统计特性的船舶检测

目前, 利用星载 SAR 检测海洋船舶的理论研究已经较为成熟, 有大量关于海洋杂波模型和海洋船舶检测的文献和报告发表。在这些公开发表的成果中, 应用最广和最有效的检测方法是从信号检测理论中引入的恒虚警(constant false alarm rate, CFAR)检测算法(何友, 1999)。SAR 影像中船舶表现为亮像素, 而海洋则为暗背景。根据海洋背景杂波的概率密度函数(probability density function, PDF)确定检测阈值。雷达后向散射低于检测阈值的船舶会被漏检, 而高峰值的背景杂波会引起虚警。因此 CFAR 算法的关键是确定检测图像的背景杂波概率分布模型, 在此基础上通过给定目标的恒虚警概率求取目标检测的阈值。

通常, 背景杂波分布模型是假设的。根据背景杂波统计特征确定杂波模型的概率密度函数 PDF, 从而确定 CFAR 算法的检测阈值。其中, 最早使用的杂波模型是高斯(双

参数)PDF。由于 SAR 影像受自身相干斑及噪声的影响, 高斯函数并不是十分准确的模型, 许多情况下, 高斯模型并不能很好地描述雷达海杂波这样的长拖尾分布, 但因其具有简单实用、适应性强的特性仍得到了广泛应用。实际中, 更适合雷达强度图像的 PDF 模型是负指数模型(单视图像)和 Gamma 分布模型(多视图像)。自从 1976 年 E. Jakeman 和 P. N. Pusey(1976)引入 K-分布的概念后, K-分布模型得到了越来越多的重视, 也是目前公认较好的海洋杂波描述模型。目前基于 K-分布模型的 CFAR 算法已应用于多个船舶探测系统之中, 且取得了较好的效果(Jiang et al., 1998; Losekoot and Cauzac, 2005)。其中有代表性的是加拿大 Satlantic 公司开发的 OMW 系统, 该系统使用基于 L 视的 K-CFAR 算法进行船舶检测。

另外, 根据背景杂波分布统计量估计方法的不同, 又可将 CFAR 算法分为均值类 (ML)CFAR 检测算法和有序统计量类(OS)CFAR 检测算法等。其中, ML 类 CFAR 算法包括: 单元平均 CFAR(CA-CFAR)、最大选择 CFAR(GO-CFAR)、最小选择 CFAR(SO-CFAR)等。这些检测算法具有各自不同的适应范围。CA-CFAR 在均匀杂波背景中, 检测性能较好。但在不均匀的杂波背景中, CA-CFAR 的检测性能严重下降。CA-CFAR 算法的不足促进了其他 CFAR 算法的发展。GO-CFAR 和 SO-CFAR 算法适合背景杂波不均匀的情况, 但各自只能解决其中一个问题, 并且还带来了一定的附加检测率的损失。其中, GO-CFAR 主要是对抗杂波边缘而设计的, 而 SO-CFAR 缓解了局部滑动窗口中出现多个空间邻近干扰目标引起的 CA-CFAR 检测算法性能下降的问题。OS-CFAR 源于数字图像处理的排序处理技术在邻近区域存在多目标情况下具有较好的检测效果, 但其最优统计量很难通过理论推导得到, 在均匀杂波背景下检测性能较差。

尽管相对来说 K-分布是模拟海洋杂波较精确的模型, 但仍然不能总是很准确地描述杂波的 PDF, 对于某些 SAR 影像可能会失效。Jeremy 等(2002)指出, 彩用 K-分布的 OMW 算法不能用于 CCRS C/X SAR 数据。为了得到适应性更广、模拟更精确的海杂波模型, 许多学者提出了新的模拟海洋杂波模型。1999 年 Banerjee 等(1999)针对超宽带 SAR 图像(Ultra Wide Band-Synthetic Aperture Radar, UWB-SAR), 提出了基于阿尔法稳健模型的目标检测算法, 虽然该算法并不是直接用于检测海洋目标, 但该模型能够自适应地模拟复杂地物背景, 因此得到了一些学者的关注。Liao 和 Wang(2008)等将此模型用于海洋船舶检测, 与基于高斯分布和 K-分布的 CFAR 算法相比, 得到了更好的检测效果。

2000 年加拿大的姜青山等(1998b)学者使用基于概率神经网络(PNN)的非参数模型代替了概率密度函数的参数模型来描述海洋背景的杂波分布。由于该算法只是针对 8 位 256 色灰度数据进行处理, 有较大局限性, 因此只是作为研究, 没有得到实际应用。而 2008 年 Du 等(2008)针对此 PNN 的不足, 提出了新的 C-PNN 模型。模型采用两种模块分别对 8 位和 16 位数据的 ERS-2 数据进行处理, 获得了好于传统 PNN 的检测率和运行效率。2008 年 Fei 等(2008)针对高分辨率 SAR 图像提出了一种基于马尔可夫链模型的新 CFAR 算法, 他采用一阶马尔可夫链模型, 同时考虑相邻像素间的相关性及其 PDF 信息, 利用仿真 Radarsat-2 数据和真实的 Convair-580 机载 SAR 数据开展了新算法的实验, 实验结果比传统 CFAR 算法的检测率提高 30%, 信噪比提高 2.84dB。另外 Liu 等(2008)提出了基于最佳极化 CFAR 的船舶检测系统。系统处理流程为: 极化变换/分

解—杂波分析—建模—主成分分析(PCA)—Multi-CFAR 检测。其中 Multi-CFAR 算法将三种彼此互补的 CFAR(OS-CFAR、OW-CFAR、CA-CFAR)按一定的融合方法集成一种 CFAR,该 CFAR 具有三种 CFAR 的优点。最后,利用仿真的极化 Radarsat-2 数据进行验证,算法在未增加计算复杂度情况下,获得比传统极化 CFAR 检测器更高的检测率。

一般来讲,CFAR 算法的核心是寻找适合描述海杂波背景的 PDF 以及通过不同估计方法对 PDF 参数进行估计,从而确定恒虚警率阈值,因此 CFAR 算法受背景统计区域的影响很大,往往背景统计区越大,PDF 描述越准确,但背景杂波变化可能更大而造成虚警增多,因此 CFAR 算法也是对背景统计区域窗口大小的权衡。针对 CFAR 算法对于不均匀的海洋杂波图像会产生大量虚警的问题,Lombardo 和 Sciotti(2001, 2002)、Sciotti 等(2002)学者提出了基于分割的 CFAR 检测算法。该检测算法是在 CFAR 检测器检测目标之前先将图像分割成若干较为均匀一致的区域,实验显示分割对单通道 SAR 影像检测性能的改善很明显,Sciotti 的进一步工作证实了对于多通道极化数据同样适用,但不足的是算法运行时间可能过长。

## 2. 基于图像处理的船舶检测

CFAR 算法的前提是目标与背景存在一定的对比度,对于目标、背景的灰度值相互混淆的情况(如高海杂波),CFAR 算法可能会失效。因此,针对这种情况,一些新的基于图像增强处理算法被相继提出。

Iehara 等(2001)、Kazuo 和 Shinsuke(2004)先后使用基于相关分析的多视 SAR 影像船舶检测算法。首先,计算两幅多视 SAR 影像的互相干系数,得到相关图,并利用船舶与海洋背景杂波相干性的不同,拉大两者的对比度,达到增强船舶、抑制噪声的目的,有利于高海杂波下的船舶检测;Lopès 等(1998)针对点目标在强背景噪声下,特别是单视影像,检测效果不佳的情况提出了一种解决办法:基于辐射度标准的最佳目标检测方法。通过 Spatial Whitening Filter (SWF)估计最佳辐射度,同时考虑目标与背景空间相关性。并以含有高海杂波海域的 Radarsat-1 的精细模式复数据进行实验,取得较好的检测效果。

目前用于高海杂波这种目标与背景对比度相差不大的复杂情况的检测算法中,研究效果较好的是基于多尺度分析的检测算法。与单一尺度(单一分辨率或单极化)分析不同,多尺度分析的基本思想是利用目标与背景噪声在不同尺度间相关性的不同,将两者分解到不同的尺度上并拉大彼此间的对比度,达到增强目标且抑制噪声的作用,从而不用任何检测算法或是使用简单的 CFAR 算法即可检测出船舶目标。这种基于多尺度分析的算法有基于多分辨率小波变换、基于子孔径分解等船舶检测算法。

随着多尺度小波变换概念的提出,小波变换已广泛应用到信号分析、图像识别、计算机视觉、大气与海洋波分析、目标检测等领域。该技术是一种多分辨率分解技术,由于 SAR 影像中每一像元都是由该像元所在的分率单元中所有散射体反射回波相干叠加得到的,因此在不同尺度下,自然背景与人为目标的统计特性是不同的,由此可以将船舶从海洋背景中分辨出来。Tello 等(2005)提出了一种新的基于离散小波分解的检测算法。并将该算法分别应用到船舶和线性地物两种目标进行实验。实验表明,该算法能