



海洋博士文库

合成孔径雷达海面风场、海浪 和内波遥感技术

杨劲松 著



海洋出版社

合成孔径雷达海面风场、 海浪和内波遥感技术

杨劲松 著

海洋出版社

2005 年 · 北京

内 容 提 要

本书根据作者的博士论文整理而成,是合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)海洋遥感研究的专著。全书共8章,第1~2章对SAR海洋遥感的有关研究背景和现状以及SAR海洋遥感基本原理进行了简要概述,第3~8章对海面风场、海浪和内波的星载SAR遥感中的仿真和探测技术进行了全面系统的研究与探讨。

本书内容新颖、实用,可供海洋遥感、海洋环境和海洋工程领域的科技人员以及大专院校相关专业高年级学生、研究生和教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术/杨劲松著. —北京:海洋出版社,2005. 10

(海洋博士文库)

ISBN 7-5027-6454-2

I. 合… II. 杨… III. 卫星载雷达:合成孔径雷达—海洋遥感—研究 IV. P715.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第111336号

责任编辑:高朝君

责任印制:刘志恒

海洋出版社 出版发行

<http://www.oceanpress.com.cn>

(100081 北京市海淀区大慧寺路8号)

北京季蜂印刷有限公司印刷

2005年10月第1版 2005年10月北京第1次印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:7.5

字数:200千字 印数:1~800册

定价:40.00元

海洋版图书印、装错误可随时退换

《海洋博士文库》丛书编委会

主 任：管华诗

副主任：徐 胜 相建海

委 员：(排名不分先后)

苏纪兰 巢纪平 袁业立

鹿守本 文圣常 冯士筭

曾呈奎 陈吉余 胡敦欣

秦蕴珊 施 平 丁平兴

金翔龙 汪品先 李启虎

王 颖 王义刚 唐启升

刘式达 徐 洵 刘瑞玉

博士生导师：苏纪兰 黄韦艮

编审组：刘莉蕾 陈茂廷 陈泽卿

作者简介

杨劲松，1969 年生于湖南宁远，1990 年毕业于浙江大学物理系，1996 年获浙江大学理论物理学硕士学位，2001 年获中国海洋大学物理海洋学博士学位，2001—2003 年在中国科学院地理科学与资源研究所从事博士后研究。现任国家海洋局第二海洋研究所研究员、硕士生导师，国家海洋局海洋动力过程与卫星海洋学重点实验室责任研究员，《海洋学研究》杂志编委。2000 年入选国家海洋局“双百人才工程”，2002 年入选浙江省“新世纪 151 人才工程”。现主要从事海洋微波遥感研究，先后承担了国家自然科学基金、国家 863、国防科工委和总装备部等项目 10 余项，获省部级科技进步奖 2 项，发表学术论文 50 余篇。

前 言

自 20 世纪 50 年代第一部合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 诞生以来, 这种微波传感器就因其全天候、全天时和高分辨率观测海洋的优势得到了迅猛的发展。1978 年, 美国成功发射了第一颗 SAR 卫星 Seasat, 揭开了星载 SAR 海洋遥感的序幕。其后, 美国 SIR-A (1981)、SIR-B (1984) 和 SIR-C/X-SAR (1994) 的成功飞行, 欧洲 ERS-1/2 (1991/1995) 和 Envisat (2002) 的成功发射, 俄罗斯 Almaz-1 (1991)、日本 JERS-1 (1992) 和加拿大 Radarsat-1 (1995) 的成功发射更是掀起了星载 SAR 海洋遥感的高潮。即将发射的、装载全极化 SAR 的加拿大 Radarsat-2 和日本 ALOS 卫星将翻开星载 SAR 海洋遥感的新的—页。经过多年的努力, 我国在不久的将来也将拥有自己的 SAR 卫星。

本书对 SAR 海洋遥感的有关研究背景和现状以及 SAR 海洋遥感基本原理进行了简要概述, 在此基础上, 全面系统地研究与探讨了海面风场、海浪和内波的星载 SAR 遥感中的仿真和探测技术。全书共分 8 章。第 1 章简要论述了 SAR 在海洋研究中的优势以及在海面风场、海浪和内波遥感方面的研究背景、现状和本书的研究内容。第 2 章是对 SAR 工作原理和 SAR 海洋遥感基本概念的概述。第 3 章利用散射计风速反演模式, 对不同海面风速、风向、雷达入射角、极化条件下的海面雷达后向散射截面以及不同的极化比模式进行了遥感仿真。第 4 章对海南省附近海域近岸海面风场、海面阻力系数、风应力以及空气动力学粗糙长度等进行了 SAR 遥感探测研究。第 5 章对文氏海浪谱的 SAR 图像谱进行了仿真研究, 并对倾斜调制、水动力调制、距离向聚束调制和速度聚束调制等各种调制传递函数在 SAR 海浪成像中的作用以及由此引起的 SAR 图像谱特征进行了分析。第 6 章利用 Hasselmann 非线性转换关系对经过辐射定标的台湾东北部海域海浪 SAR 图像进行海浪谱反演, 得到了二维海浪谱以及海浪波长、波向和波高。同时, 利用海浪传播理论和弥散关系, 直接由 SAR 实图像消除了海浪波向 180° 不确定性。第 7 章在 SAR 内波成像机理的基础上, 建立了包括 Korteweg-de Vries (KdV) 方程、作用量谱平衡方程和 Bragg 散射模型在内的内波遥感仿真模型, 系统地对内波的 SAR 图像特征以及雷达后向散射截面随雷达波段、极化方式、入射角、内波传播方向、内波振幅、跃层深度和跃层相对密度差等因素的变化进行了仿真, 分析了 SAR 内波遥感的最

佳雷达参数以及内波传播方向、振幅、跃层深度和跃层相对密度差对 SAR 内波探测的影响。第 8 章根据内波遥感仿真模型和内波的 SAR 图像特征,建立了内波亮暗条纹间距与内波半振幅宽度的关系,并由此给出了内波振幅的探测方法。同时对台湾东北部海域 SAR 图像中的内波波速、发生深度和振幅进行了实例研究。

博士论文是在苏纪兰院士和黄韦良研究员两位导师的悉心指导和严格要求下完成的。他们严谨的治学态度和勤奋的工作作风对我产生了潜移默化的影响,使我受益匪浅。在此我对他们表示诚挚的谢意。同时,我还要感谢黄韦良研究员和周长宝研究员在生活上给予我的无微不至的关心与帮助,使我能专心致力这一项艰苦的工作,并最终有所成就。

论文的研究工作得到了国家自然科学基金、国家 863 和国防科工委等项目的资助以及周长宝研究员、章家琳副研究员、Paris Vachon 博士、包明泉博士、刘安国博士和许明光博士等的帮助。此外,国家海洋局第二海洋研究所的领导、老师和同事们以及中国海洋大学研究生部的领导和老师们对我的关心与帮助,我也将铭记在心,谨此一并致谢。最后,我还要感谢我的妻子对我工作的支持和在生活上的照顾。

此次将博士论文整理出版,正值导师苏纪兰院士七十大寿,因而有幸将此书作为生日献礼,以感谢老师的谆谆教诲。

本书的出版得到了国家自然科学基金(40206023)的资助。

作 者

2005 年 8 月于杭州

目 次

第1章 绪论	(1)
1.1 研究背景和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(3)
1.2.1 海面风场遥感	(3)
1.2.2 海浪遥感	(4)
1.2.3 内波遥感	(5)
1.3 研究内容	(6)
1.3.1 海面风场遥感	(6)
1.3.2 海浪遥感	(6)
1.3.3 内波遥感	(7)
1.4 创新点	(7)
第2章 SAR 海洋遥感基本原理	(9)
2.1 引言	(9)
2.2 雷达成像几何关系	(9)
2.3 真实孔径雷达的分辨率	(10)
2.3.1 距离分辨率	(10)
2.3.2 方位分辨率	(11)
2.4 SAR 工作原理	(11)
2.4.1 合成孔径原理	(11)
2.4.2 脉冲重复频率	(14)
2.4.3 固定点目标的回波	(15)
2.4.4 目标运动的影响	(16)
2.5 海面微波散射基本概念	(18)
2.5.1 散射截面	(18)
2.5.2 镜面反射和后向散射	(19)
2.5.3 海面粗糙度	(20)

2.5.4 极化	(21)
2.6 散射模型	(21)
2.6.1 Bragg 共振散射	(21)
2.6.2 二尺度散射	(22)
2.7 小结	(23)
第3章 海面风场遥感仿真技术	(24)
3.1 引言	(24)
3.2 仿真模型	(24)
3.2.1 CMOD4 模式	(25)
3.2.2 极化比	(26)
3.3 仿真计算	(27)
3.3.1 参数条件	(27)
3.3.2 计算步骤	(27)
3.4 结果分析	(27)
3.4.1 与风速的关系	(27)
3.4.2 与风向的关系	(28)
3.4.3 与入射角的关系	(29)
3.4.4 与极化的关系	(29)
3.4.5 不同极化比模式的比较	(29)
3.5 小结	(30)
第4章 海面风场遥感探测技术	(31)
4.1 引言	(31)
4.2 探测方法	(31)
4.2.1 风向确定方法	(32)
4.2.2 风速反演方法	(33)
4.2.3 阻力系数和风应力计算方法	(35)
4.3 探测实例	(36)
4.3.1 SAR 图像	(36)
4.3.2 辐射定标	(37)
4.3.3 风向的确定	(38)
4.3.4 风速的反演	(38)
4.3.5 阻力系数和风应力的计算	(39)
4.3.6 计算结果	(39)
4.4 模式比较	(42)

4.5 小结	(44)
第5章 海浪遥感仿真技术	(45)
5.1 引言	(45)
5.2 成像机理	(45)
5.2.1 静止海面的成像机理	(45)
5.2.2 海面的运动效应	(47)
5.3 仿真模型	(48)
5.4 仿真计算	(53)
5.4.1 海浪谱形式	(53)
5.4.2 参数条件	(54)
5.4.3 计算步骤	(54)
5.5 结果分析	(54)
5.5.1 调制传递函数	(54)
5.5.2 仿真图像谱	(56)
5.6 小结	(62)
第6章 海浪遥感探测技术	(63)
6.1 引言	(63)
6.2 海浪谱反演	(63)
6.2.1 反演模型	(63)
6.2.2 反演方法	(63)
6.3 波向不确定性的消除	(66)
6.3.1 消除原理	(66)
6.3.2 消除方法	(67)
6.4 海浪波高计算	(68)
6.5 探测实例	(68)
6.5.1 流程图	(68)
6.5.2 SAR 图像	(68)
6.5.3 辐射定标	(69)
6.5.4 消除波向模糊	(71)
6.5.5 输入谱	(71)
6.5.6 计算结果	(72)
6.6 小结	(74)
第7章 内波遥感仿真技术	(75)
7.1 引言	(75)

7.2	成像机理	(75)
7.3	仿真模型	(76)
7.3.1	KdV 方程	(76)
7.3.2	作用量谱平衡方程	(78)
7.3.3	Bragg 散射模型	(79)
7.4	仿真计算	(81)
7.4.1	参数条件	(81)
7.4.2	计算步骤	(82)
7.5	结果分析	(82)
7.5.1	内波的 SAR 图像特征	(82)
7.5.2	内波振幅与 SAR 内波探测	(83)
7.5.3	跃层深度与 SAR 内波探测	(83)
7.5.4	跃层相对密度差与 SAR 内波探测	(85)
7.5.5	最佳雷达波段	(85)
7.5.6	最佳极化方式	(86)
7.5.7	最佳入射角	(86)
7.5.8	最佳雷达视向	(86)
7.6	小结	(87)
第8章	内波遥感探测技术	(89)
8.1	引言	(89)
8.2	探测模型	(89)
8.3	探测方法	(90)
8.3.1	内波波速	(90)
8.3.2	内波深度	(90)
8.3.3	内波振幅	(91)
8.4	探测实例	(92)
8.4.1	计算步骤	(92)
8.4.2	SAR 图像	(93)
8.4.3	水文状况	(93)
8.4.4	测量和计算结果	(94)
8.4.5	结果比较	(98)
8.5	小结	(100)
参考文献		(101)

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

传统海洋测量采用岸基观测站、船只和浮标等方式进行海上单点测量，不可避免地存在很多不足之处，比如：①采样点少，只能获得有限的点的资料，无法获得综观全局的信息，同时很难保证采样点具有代表性；②费用较高，难以大范围进行；③海上作业受天气影响较大，仪器的布放、监测及回收都相当困难，使得资料往往无法定期获取；④对测量人员不易到达的海域，也难以取得资料。海洋遥感技术以其间接的、大范围的测量方式克服以上种种局限与困难，成为弥补传统测量方法不足的新手段。遥感技术与海洋学的结合也促使了交叉学科——卫星海洋学的诞生和发展，并日渐成为海洋科学的重要分支之一。

SAR 是一种主动式微波成像雷达，通过测量海面后向散射信号的幅值及其时间相位，并通过适当的处理之后，产生海面后向散射强度的图像（即雷达观测到的海面粗糙度）。这种图像能极为详细地显示出海面空间变化的细节，其分辨率为数米到数十米的数量级。此外，由于 SAR 工作在微波波段，即使在黑夜也能正常工作，它发射的微波还可穿透云层，因而测量不受恶劣天气的影响。这种全天候、全天时和高分辨率观测海洋的优势是可见光和红外传感器以及其他微波传感器所没有的。

在 SAR 用于海洋遥感测量之前，人们仅希望它能够对各类涌浪（波长数百米的规则海浪）、船尾流，或许还有碳氢化合物或漂浮碎屑所造成的海面油膜成像。但是事实表明，1978 年发射升空的、仅工作了三个月的美国 Seasat SAR 能揭示出包括内波和海底地形特征等更多的现象（Fu 和 Holt 1982）。由于海洋学家以前从未使用过这种雷达对海洋进行俯视观测，所以他们难以想到，集中在海面以下数十米以深的海洋动力学现象和地形特征能够以海面粗糙度的形式反映出来，并被 SAR 所成像。

对于 SAR 海洋遥感来说，在一定的雷达参数和轨道条件下，海面的粗糙程度是影响雷达后向散射的主要因素。它所测量的海面粗糙度是由数厘米到数十厘米的表面张力波和短重力波引起的。SAR 对海洋学感兴趣的任何特征或现象（如风、流、海浪、锋

面、海面油膜、涡、内波和海底地形等)的成像能力取决于这些特征或现象以各种不同方式改变海面粗糙度的程度,这为 SAR 海洋应用开辟了新的领域,同时也促使对上述现象的成像机制进行广泛深入的研究,使得 SAR 海洋遥感成为卫星海洋学的一个十分令人感兴趣的研究方向。

海面风场是海洋和大气的重要要素,星载微波散射计是迄今为止最主要的遥感测量全球海面风场的传感器,其风速、风向测量精度分别达到 $\pm 2 \text{ m/s}$ 和 $\pm 20^\circ$,测量数据已广泛地应用于海面风场、海浪场和天气预报以及海洋和大气研究等领域。但是,散射计测量的空间分辨率通常在 $25 \sim 50 \text{ km}$,不能满足某些需要高空间分辨率风场数据的应用。此外,散射计无法测量近岸数十千米以内的海面风场。在近海(包括海湾、海峡、河口等)及岛屿和冰缘附近海域,风场在数百米到数千米的尺度内就有较大变化,空间分辨率较低的散射计不再适用。星载 SAR 则不同,它具有高空间分辨率(数米至数十米)测量海面风场的能力,能够提供大范围、高空间精度的海面风场信息,尤其适用于近海和岛屿以及冰缘附近海域海面风场以及局地风场的测量。2002 年发射的欧洲 Envisat 卫星没有装载散射计,其上的 SAR 作为高分辨率散射计兼任海面风场测量之重任,更推动了 SAR 海面风场测量研究。

海面风场作用在海面的风应力直接影响到大气与海洋环流以及海气之间的相互作用,也是推算风驱海流运动规律和海面油污扩散等的不可或缺的参数条件。随着遥感技术的发展,利用 SAR 对海面风应力、阻力系数以及空气动力学粗糙长度等海洋和大气的动力特性进行大范围、高空间分辨率测量已成为可能。

SAR 在海洋学中的主要应用之一就是对海浪进行研究。实际上,最初 SAR 之所以引起海洋学家们的极大兴趣,在很大程度上是由于它能提供任何其他技术手段从未获得过的关于波浪场的空间数据。毫无疑问,它可对海浪成像,并给出符合实际的波长估算值。然而,对于海浪是否总能被成像,什么方向、多长波长的海浪适于 SAR 成像,图像中的海浪与实际海浪有多少差别等问题的认识是不易通过现场观测来验证的,SAR 海浪遥感仿真研究因此成为解决这一问题的重要手段。

海浪的研究对海上经济和军事活动具有十分重要的意义。海浪可以用一个二维方向谱进行描述,某时某地的海洋波浪场的所有统计特征均可从谱函数获取。星载 SAR 能实现多波段、多极化、多视向、多俯角观测海浪,提供大范围、高精度的实时动态海面波浪场信息和二维海浪方向谱资料。二维海浪谱的测量有助于对海浪这种复杂的随机过程的内部物理结构和外在统计特性进行研究,也可为港口、海岸工程以及海上石油平台建设提供必不可少的波高、波长和波向等相关参数。

内波是一种海洋中尺度现象,对海洋工程、海洋军事和海洋科学具有重要意义,但由于内波发生的随机性,采用常规观测方法获取长时间大范围的内波观测资料要比获取海面风场和海浪等其他海洋要素的观测资料困难得多,星载 SAR 因而成为内波探测极

为重要的技术手段。实际上, SAR 所观测的具有明显图像特征的海洋现象, 除海面波浪外, 最经常、最广泛呈现的现象就是内波。自 20 世纪 70 年代末开始, 美国 Seasat、欧空局 ERS-1/2 和加拿大 Radarsat 等卫星上的 SAR 传感器获取了大量的内波图像, 为内波研究提供了丰富的资料。内波大小、形状和频率不一, 发生的深度也各不相同, 而可以成像的仅占其中很小一部分, 什么条件才是内波被 SAR 成像的有利条件? 这些问题也需要由遥感仿真来予以回答。

此外, 如果有可能建立 SAR 图像中的内波条纹特征与内波波要素之间的关系, 那么就可从 SAR 图像中获取大量的信息, 这些信息中有些是无法用常规测量技术获取的。经过多年的研究, 人们对内波的 SAR 图像特征和内波的时空分布特征, 已有较为充分的认识, 如何从提取波长、波向等内波外在属性的研究中摆脱出来, 进而对内波发生深度以及内波振幅等内波内在特性进行定量获取, 是目前内波遥感以及内波研究尤为关注又亟需解答的问题。

1.2 国内、外研究现状

1.2.1 海面风场遥感

(1) 海面风场遥感仿真

C 波段 VV 极化的 ERS-1/2 散射计海面风速反演模式——CMOD4 是目前海面风场遥感的业务化运营模式之一。遥感仿真也表明它在不同海面风速、风向以及雷达入射角条件下的海面雷达后向散射截面与实测资料有较好的吻合 (Stoffelen 1992)。

(2) 海面风场遥感探测

ERS-1/2 卫星上装载着的散射计和 SAR 是两种采用相同极化方式、工作在相同波段的微波传感器, 但却承担了不同的任务, 非成像的散射计主要用于海面风场的测量, 成像传感器 SAR 用于其他海洋现象的观测。Alpers 和 Brummer (1994) 在用 ERS-1 SAR 图像对海洋大气边界层涡旋的研究中, 首次将 CMOD4 模式用于 SAR 的风速测量。其后, Vachon 和 Dobson (1996) 对用该模式从 SAR 图像计算海面风速进行了较为系统的研究与评估, 在风向已知的情况下, 获得了与实测资料相比高于 ± 1.5 m/s 的精度。Lehner 等 (1998) 从多数 SAR 图像中可见的风条纹中获取了海面风向信息, 风向的误差仅为 $\pm 5^\circ$, 并用于 CMOD4 模式中计算风速。Horstmann 等 (2000) 利用与 ERS-1/2 SAR 有着不同极化方式的 Radarsat SAR 图像进行了海面风场反演研究, 也获得了较好的结果。Vachon 和 Dobson (2000) 则采用 CMOD-IFR2 模式对 Radarsat SAR 图像进行研究。Fetterer 等 (1998) 利用 ERS-1 SAR 图像对 CMOD4 和 CMOD-IFR2 模式进行了比较研究, 与实测资料相比, 反演风速的均方根误差分别为 1.1 m/s 和 1.3 m/s。国内在

这方面的研究才刚起步,到目前为止,仅王超和潘广东(2000)利用 SIR - C/X SAR 对南海海面风矢量进行了观测研究。

在海面风应力和阻力系数的遥感测量方面, Weissman 和 Graber (1999) 利用散射计测得的风速对其进行估算, Grima 等 (1999) 不仅用 ERS - 1/2 散射计计算了风应力,还将它作为环流模式的驱动力进行了敏感性研究,得到了较好的结果。目前还没有用 SAR 进行这方面研究的报道。

1.2.2 海浪遥感

(1) 海浪遥感仿真

经过多年的研究与讨论,人们对 SAR 海浪成像的机理已经达成广泛的共识 (Alpers 1981; K. Hasselmann 1985)。Alpers (1983) 和 Bruning 等 (1990) 用 Monte - Carlo 方法分别对一维和二维 JONSWAP 海浪谱的 SAR 图像谱进行了仿真研究, K. Hasselmann 和 S. Hasselmann (1991) 在包含倾斜调制、水动力调制和速度聚束调制等三种调制机制在内的 SAR 海浪成像机理的基础上,建立了海浪谱到 SAR 图像谱的非线性转换关系,并利用该关系对第三代海浪模式的 WAM 谱进行了 SAR 图像谱仿真研究, Zurk 和 Plant (1996) 还对实际 SAR 图像谱和仿真 SAR 图像谱作了比较研究。这些研究对深入了解 SAR 海浪成像机理以及 SAR 图像谱与海浪谱的差异起到了重要作用,也为 SAR 图像谱的海浪谱反演提供了可能。

(2) 海浪遥感探测

K. Hasselmann 和 S. Hasselmann (1991) 的非线性转换关系是海浪谱反演的奠基之作, Bao 和 Zhou (1992) 以及 Krogstad (1992) 分别用不同的方法对该关系进行了重新推导。利用该关系,可以从 SAR 图像中反演得到海浪谱和海浪的波长、波向和波高 (Bruning 等 1994; Hasselmann 等 1996; Plant 和 Zurk 1997; Monaldo 和 Beal 1998)。目前国际上使用信噪比定标后的 SAR 图像,采用线性 (Plank 和 Zurk 1997) 或非线性反演模式 (如 Bruning 等, 1994), 以 WAM 谱作为输入谱计算波高。该方法需要假设图像的噪声分布。Engen 和 Johnsen (1995) 还开发了利用交叉谱从 SAR 单视复图像中反演海浪谱的技术。以上反演方法中,均采用实测谱或海浪数值模式的预报后报谱作为输入谱。Mastenbroek 和 de Valk (1997) 利用 ERS - 1/2 上的散射计测得的风场结合参数化风浪谱反演 SAR 海浪图像中的风浪谱,将 SAR 图像谱中减去风浪谱和噪声谱后的剩余部分当作是有较长波长的涌浪谱。何宜军 (1999) 也用参数化海浪谱作为输入谱进行了海浪方向谱反演的研究。目前,星载 SAR 已成为全天候、全天时、高分辨率探测全球海浪的新的技术手段,并用于海浪数值预报模式 (如 WAM) 的数据同化中 (Hasselmann 等 1994, 1996)。

但是,星载 SAR 海浪遥感技术还存在着一些问题。海浪传播方向的 180° 不确定性

就是其中之一。除了使用作为输入谱的常规观测资料或海浪模式的预报谱外,目前只能使用单视复图像才能确定海浪的传播方向,其中有对单视复图像的每个个视(individual-look)图像进行时间序列分析的(Vachon 和 Raney 1989, 1991),有对个视图像作图像谱相位移动处理的(Vachon 和 West 1992),也有计算个视图像间的交叉谱,用交叉谱的虚部确定海浪方向的(Engen 和 Johnsen 1995),其中,交叉谱方法是用得较多的,也是较为成功的一种。以上各种采用单视复图像确定海浪方向的方法,均需要对复图像进行分视(split-look)处理,获得2~3个个视图像,但由于星载SAR的相干积分时间较短(如ERS-1/2和Radarsat SAR的名义积分时间约为0.6 s, JERS-1 SAR的名义积分时间小于1.7 s,而其实际相干积分时间比名义积分时间还要短),分视处理非常困难(Ouchi等 1999)。此外,由于在单视复图像中无法直观地观察到海浪条纹,需要将它转化为一般实图像才能确定该幅图像是否含有海浪信息及其所处位置。这些都不利于海浪探测的业务化运作。在Mastenbroek和de Valk(1997)的参数化方法中,风浪谱的传播方向由风向确定,是一种新的思路,不过其中涌浪谱180°方向模糊问题仍然无法解决。为此,开发一种简便易行的波向确定技术非常必要。

1.2.3 内波遥感

(1) 内波遥感仿真

人们利用SAR对内波的观测几乎是与对海浪的观测同时进行的(Elachi和Apel 1976),但是内波的成像机理却是在较晚的时候才被揭示出来(Alpers 1985)。Thompson和Gasparovic(1986)对内波在L波段和X波段SAR图像上的特征进行了仿真研究,并与内波在这两个波段的SAR图像中的实际特征作了比较,验证了Alpers(1985)的理论:SAR对内波的成像机理包括波流相互作用、水动力相互作用和Bragg相互作用。Liu(1988)采用KdV方程和二层海洋模型对纽约湾的非线性内波的演化过程进行了数值模拟,得到了与实验结果一致的结论。其后,Liu等(1998)又通过数值模拟的方式对SAR图像上的下降型内波和上升型内波不同的图像特征作了解释,并提出了这两种类型内波在跃层深度等于水深一半处相互转换的观点。

星载SAR对内波探测的能力与SAR工作波段、极化方式和雷达波束入射角等雷达参数密切相关。Schmullius和Evans(1997)曾利用SIR-C/X SAR多波段多极化资料讨论了内波遥感的最佳雷达波段和极化方式。由于资料的限制,他们无法比较全面地分析内波遥感的最佳雷达参数。此外,在相同的雷达参数条件下,会出现某些海域的内波能被SAR成像,另一些海域的内波不能被成像的情况,甚至在同一海域,也会出现类似的情况。模拟仿真是研究星载SAR内波遥感最佳雷达参数和最佳海洋环境的一种重要技术手段,但目前国内、外未曾开展此项工作。

(2) 内波遥感探测

从 SAR 图像上提取内波波要素的信息是内波探测的目的,内波的波长和波向容易从图像中直接测量得到,也可以通过计算内波的二维波谱而获得(Liu 等 1998; Hsu 和 Liu 2000)。内波的波速可以在已知跃层深度的情况下,利用内波的弥散关系计算出来(Alpers 和 Salusti 1983; Zheng 等 1993)。Porter 和 Thompson (1999) 以及 Li 等(2000) 利用关于内波产生的半日潮假定和内波的弥散关系,从 SAR 内波图像中计算了内波的波速和发生深度,与实测结果较为吻合。内波的振幅则是一个难以测量的量,Apel 和 Gonzalez (1983) 曾经对此进行过研究,但至今还没有合适的办法从 SAR 图像中获取。

1.3 研究内容

1.3.1 海面风场遥感

(1) 海面风场遥感仿真

为了将 CMOD4 模式用于 HH 极化的 Radarsat SAR 图像风场反演,对该模式在不同海面风速、风向、雷达入射角、极化条件下的海面雷达后向散射截面以及不同的极化比模式进行了遥感仿真。

(2) 海面风场遥感探测

结合散射计风速反演模式和极化比模式,利用 Radarsat SAR 图像开展了海南省附近海域近岸海面风场遥感探测研究,借助 SAR 图像纹理特征解决了风向 180° 不确定性,同时对几种不同模式反演海面风速的精度作了比较(杨劲松等 2001a)。此外,利用反演的海面风速对海面阻力系数、风应力以及空气动力学粗糙长度等海洋和大气要素进行了估算(杨劲松等 2001b)。

1.3.2 海浪遥感

(1) 海浪遥感仿真

利用 Hasselmann 非线性转换关系,对适合我国海区的文氏二维海浪谱的 SAR 图像谱进行了仿真研究,并对图像谱特征以及倾斜调制、水动力调制、距离向聚束调制和速度聚束调制等四种调制传递函数在 SAR 海浪成像中的作用进行了讨论(Yang 等 1998; 杨劲松等 1999)。

(2) 海浪遥感探测

从海浪传播理论入手,利用海浪的弥散关系,给出了一种直接由 SAR 实图像消除海浪波向 180° 不确定性的方法(Yang 等 2001a)。以文氏海浪谱为输入谱,采用逐次