

微波成像技术国家重点实验室基金资助

合成孔径雷达图像 海洋内波探测

种劲松 欧阳越 李 飞 朱敏慧 著



海洋出版社

微波成像技术国家重点实验室基金资助

合成孔径雷达图像 海洋内波探测

种劲松 欧阳越 李 飞 朱敏慧 著



海洋出版社

2010·北京

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达图像海洋内波探测/种劲松等著. —北京:
海洋出版社, 2010. 7

ISBN 978 - 7 - 5027 - 7773 - 9

I. ①合… II. ①种… III. ①遥感图像—应用—海洋—
内波—雷达探测 IV. ①P731

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 127142 号

责任编辑: 杨传霞

责任印制: 刘志恒

海洋出版社 出版发行

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

北京市海淀区大慧寺路 8 号 邮编:100081

北京画中画印刷有限公司印刷 新华书店发行所经销

2010 年 7 月第 1 版 2010 年 7 月北京第 1 次印刷

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张:10

字数: 150 千字 定价:56.00 元

发行部:62147016 邮购部:68038093 总编室:62114335

海洋版图书印、装错误可随时退换

序

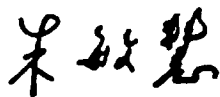
海洋不仅是海洋生物的天堂,也是人类赖以生存的基础。全球海洋的总面积约为 $3.6 \times 10^8 \text{ km}^2$,几乎为陆地面积的 2.5 倍。海洋是地球上未充分开发利用的最主要的资源宝库。我国是个海洋大国,具有巨大资源,又拥有国际航道的重要地位,是社会经济发展的重要物质基础和国防建设的重要阵地。海洋对人类来说总像是蒙着一层神秘的面纱,虽然人类早已登上远离地球 384 400 km 的月球,但至今还没有下潜超出 10 km 的海洋深处进行直接探测,对海洋的认识不足制约了我们合理开发海洋资源。

进入 21 世纪,在海洋强国、海洋强军战略思想指导下,在微波成像技术国家重点实验室成立之际,我们结合国家对微波成像技术国家重点实验室定位要求,确认拓展合成孔径雷达对海洋观测和海洋目标检测的应用作为主要研究方向。我们从海面微波散射特性、扰动的微波成像机理和海洋动力环境特性的研究角度出发,把微波遥感信息获取、处理和应用技术的研究用于海洋观测和海洋动力环境探测的目标上,在微波成像雷达系统级、时变的弱信号成像处理和海洋纹理信息提取三个层面上展开了全面研究工作,包括理论分析、计算机仿真和海上试验,取得了一系列突破和进展。

海洋随机多变,在众多复杂的海洋现象中,内波是一种中尺度自然现象,特别是在我国东南沿海和南海,更是频繁出现。大幅度内波在传播过程中产生的扰动可导致海水强烈辐聚和突发性强流,它们的剪切效应有可能对海洋工程、石油钻井平台和海底石油管道造成严重威胁。在 1990 年夏的东沙岛附近,当内孤立波经过时,石油钻井机难以操作,锚定的油罐箱在不到 5 min 内摆了 110° ,因此海洋工程设计和实施时必须考虑内波的影响。大振幅内波也可能对水下潜艇航行时造成灾难性后果。人们一直怀疑 1969 年美国“长尾鲨”号核潜艇的失事可能是由于内孤立波使其迅速下沉到超过可承受深度造成的。内波在陆架区的破碎引起海水的垂直混合,将底层富含营养盐的海水

带到表层,给浮游植物提供营养,这对海洋渔业起到了积极的作用。此外内波中存在的非线性现象也是一个良好的非线性理论研究对象。因此,对内波的探测在保护、开发和利用海洋资源方面、海洋工程和军事安全等方面都具有非常重要的应用价值。

作者将其近些年来的研究成果汇集撰写了本书,希望能对广大海洋科技工作者和从事合成孔径雷达海洋应用的研究人员有所裨益。



2010 年 1 月

前 言

合成孔径雷达(SAR)凭借其全天时、全天候、远距离、大范围、高分辨等优势,对光学、红外、电子侦察等其他海洋目标监视手段形成了有力补充,是海洋目标监视体系中不可或缺的传感器。SAR海洋图像中蕴含着丰富的海洋环境和目标信息,它能反映海浪、内波、海流、锋面、涡旋、浅海水深、上升流、表面风场、大气重力波、雨团、油膜、海冰、飓风、舰船及其尾迹等。SAR用于海洋环境监视、海洋目标监视有着其他传感器无法比拟的优势,甚至有人认为SAR是“海洋遥感最有效的传感器”。

另一方面,海洋状态的随机性和时变性、海洋与大气的交互作用、海洋各种自然现象相互耦合等都使得SAR海洋图像非常复杂,曾经有美国科学家发出感叹:“当解译这些复杂的海洋表面SAR图像时,会感觉似乎海洋和SAR两者都在嘲笑我们。”尽管海洋的随机性、时变性和复杂性使SAR海洋探测具有极大的挑战性,但这也正是SAR海洋遥感的独特魅力所在!

近年来,利用SAR图像进行海洋内波探测在海洋遥感领域受到很大关注,成为SAR重要的海洋应用之一。本书围绕SAR图像海洋内波专题,在内波参数反演、海洋环境和雷达观测条件对SAR内波成像的影响、内波SAR成像仿真等方面进行了详细深入的研究、探讨以及归纳总结。本书内容包括基础理论知识和笔者近年来的研究成果,也综述了具有代表性的国内外参考文献。

本书在编写过程中得到了中国科学院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室的领导 and 研究人员的大力指导、支持、关怀与帮助。特别是多年来,朱敏慧研究员高瞻远瞩,亲率我们在微波海洋探测研究这个前沿领域辛勤耕耘、锐意创新,并欣然为之作序,在此向她表示衷心的感谢和致敬!

本书出版受微波成像技术国家重点实验室基金资助。

种劲松

于中国科学院电子学研究所

目 次

第 1 章 绪 论	(1)
1.1 海洋内波	(1)
1.2 海洋内波的研究意义	(4)
1.3 利用合成孔径雷达图像研究海洋内波	(5)
1.4 SAR 图像内波观测实地实验	(12)
1.4.1 加拿大 SURSAT 项目实验	(12)
1.4.2 美国/加拿大 JOWIP 实验及 SARSEX 实验	(12)
1.4.3 美国/俄罗斯联合 JUSREX 实验	(14)
1.4.4 中国/美国/韩国联合 ASIAEX 实验	(15)
1.5 内波分布	(16)
第 2 章 内波流体力学基础及其 SAR 遥感机理	(21)
2.1 海洋内波基础和流体动力学模型	(21)
2.1.1 一维内孤立波传播模型	(21)
2.1.2 二维内孤立波传播模型	(32)
2.2 SAR 海洋内波成像机理	(34)
2.2.1 海面微波散射模型	(34)
2.2.2 SAR 内波成像机理	(39)
第 3 章 SAR 图像内波参数反演研究	(46)
3.1 SAR 图像内波参数反演研究现状	(46)
3.2 海洋内波参数反演方法	(48)
3.2.1 内波深度反演	(49)
3.2.2 内波波速反演	(50)

3.2.3	内波特征宽度反演	(51)
3.2.4	内波振幅反演	(53)
3.3	内波参数反演实验	(57)
3.3.1	反演实验 1	(58)
3.3.2	反演实验 2	(59)
3.3.3	实验分析及反演方法比较	(61)
3.4	基于仿真修正的序列 SAR 图像内波参数反演方法	(64)
3.4.1	基于仿真修正的内波参数反演方法	(64)
3.4.2	序列 SAR 图像内波参数反演实例	(67)
3.4.3	方法的优点分析	(72)
3.5	内波 SAR 图像质量客观评估	(73)
3.5.1	评估指标	(73)
3.5.2	指标计算及结果分析	(75)
3.6	小结	(77)
第 4 章	海洋环境和雷达观测条件对 SAR 内波成像的影响研究	(80)
4.1	环境和雷达参数对一维内波成像影响分析	(80)
4.1.1	雷达参数对内波成像影响分析	(82)
4.1.2	内波参数对内波成像影响分析	(90)
4.1.3	风场对各个波段内波成像影响分析	(93)
4.2	环境和雷达参数对二维内波成像影响分析	(109)
4.3	小结	(114)
第 5 章	内波二维数值模拟及其 SAR 成像仿真	(117)
5.1	内波数值模拟及其 SAR 成像仿真的研究现状	(117)
5.2	基于 KP 方程直布罗陀海峡内波仿真	(118)
5.3	基于 LL 模型的内波仿真	(121)
5.3.1	LL 模型推导与修正	(122)
5.3.2	基于 LL 模型的内波 SAR 图像仿真流程	(126)
5.4	内波经过东沙岛后分裂传播的过程仿真	(126)

5.4.1	仿真区域地形和初始条件	(127)
5.4.2	仿真结果与分析	(128)
5.5	内波极性转变全过程仿真	(132)
5.5.1	仿真区域地形和初始条件	(134)
5.5.2	仿真结果与分析	(137)
5.6	两列内波相遇现象仿真	(140)
5.6.1	仿真区域地形和初始条件	(141)
5.6.2	仿真结果与分析	(142)
5.7	小结	(145)

第 1 章 绪 论

我国是一个海洋大国,广阔的海域和漫长的海岸带蕴藏着丰富的海水资源、矿物资源、生物资源、化学资源、油气资源、动力资源、空间资源和旅游资源,是我国社会经济发展的重要物质基础和国防建设的重要阵地。21 世纪是海洋的世纪,人类社会政治、经济、军事的发展都离不开海洋,各种海洋现象如海浪、潮汐、涡流、涌浪、内波甚至海啸都是人们探索研究的内容。这些现象中海洋内波以其发生范围广(几乎在所有的海洋都有)、频度大(在夏季几乎平均每天都有)、对人类活动的影响大而成为海洋科学研究的一个重要分支。

1.1 海洋内波

顾名思义,内波(internal wave)是指在流体内部传播的波浪。Jackson 和 Apel^[1]曾经利用玩具店里卖的一种玩具盒子来通俗而形象地描述内波:透明的塑料玩具盒子中装着两层不同颜色的液体,这两种密度不同、不可融合的液体充满了整个盒子,当盒子倾斜或者晃动时,一个大振幅、低速度的波浪便沿两层液体的分界面传播,这就是内波。内波示意图如图 1.1。

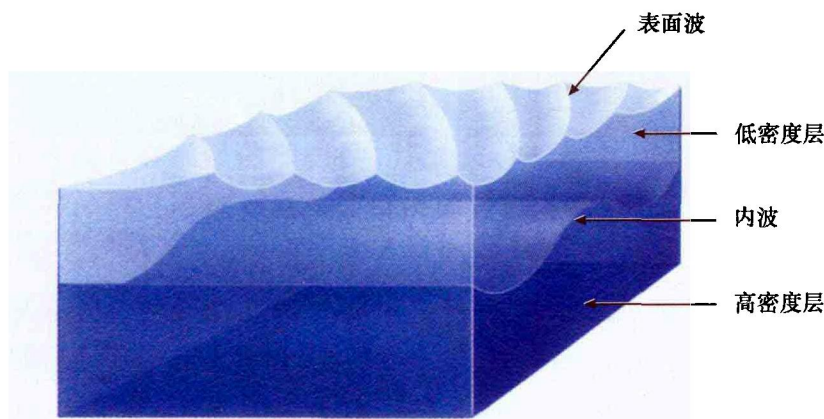


图 1.1 内波示意图^[2]

大气和海洋中都存在内波模式。大气内波(atmospheric internal waves)模式也称为大气重力波(atmospheric gravity wave),海洋内波模式称为海洋内波(oceanic internal wave)。大气内波和海洋内波均很常见,例如:天空中常出现的带状透光高积云或卷积云,这是高空气团流经下层另一种气团时所产生的,有云处为上升气流,无云处为下降气流,如图 1.2 和图 1.3 所示;乘坐飞机时,有时遭遇湍流,飞机上下颠簸,这大多是由大气内波引起的;海上航行时,如果看见海面水色相异并呈带状分布,或者海面漂浮物呈带状分布,这通常是水下有较强内波的迹象,如图 1.4 和图 1.5 所示。



图 1.2 大气内波照片 1(带状高积云)^[3]



图 1.3 大气内波照片 2

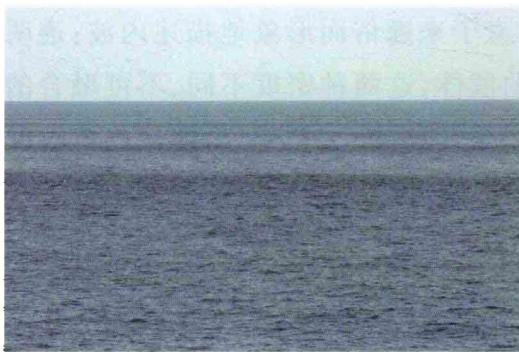


图 1.4 海洋内波造成的海面痕迹



图 1.5 阿根廷东部 Rosario 海峡的内波
(<http://www.raincoastgeo.org>)

内波产生应具备两个条件,一是流体中密度稳定分层,二是有扰动源,两者缺一不可。海洋中存在分层,海水吸收了太阳辐射的热量后,海洋近表面层温度升高,密度降低,导致了流体分层。对密度跃层(密度变化最大的区

域)的激励或扰动会导致内波。由于海水的密度分布经常处于不均匀状态,并且引力潮或强海流与起伏的海底地形相互作用、海底地震、航行舰船等都可能成为内波的扰动源,因此海洋内波是一种较普遍的海洋现象。

在1838年 Russell^[3,4]最早记录了内波,他发现苏格兰海峡浅水中一个单独不变的隆起,这个隆起是由于一艘拖船在海峡中突然停止而生成的。Russell 骑马追赶了这个波浪几英里,直到它消失在海峡的弯绕中。在1895年 Korteweg 等^[5]发现了内波一些有趣的数学性质并提出了著名的孤立子理论。

挪威航海者南森(Nansen)在1893—1896年的一次航海考察中发现船的航行速度显著降低,此时他注意到海水明显分为两层。这个现象在罗马时代称为“黏水”(sticky water),南森称之为“死水”(dead water),参见图1.6。在1904年 Ekman 解释这种“死水”现象是由于船消耗能量在两层界面处产生内波,所以船速减慢,即由船舶运动生成内波的增阻现象^[6]。

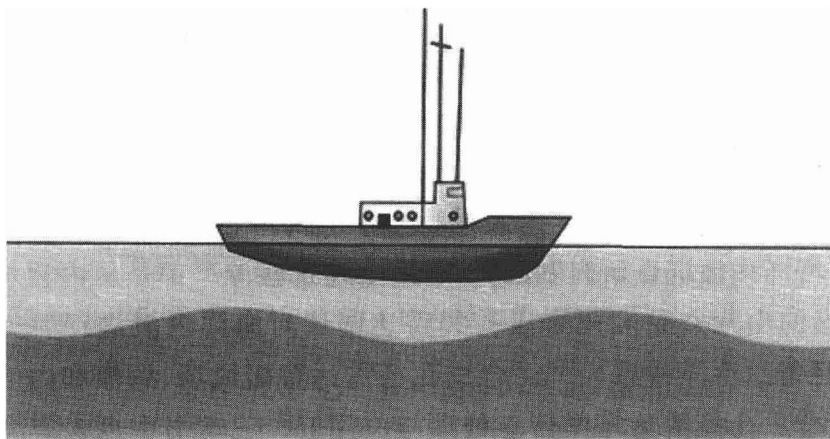


图1.6 “死水”使船速降低

海洋内波具有很强的随机性,其波长、波高、周期和能量等都分布在很宽的范围内。内波虽然不像海面波浪那样汹涌澎湃,但它隐匿水中,暗中作祟,经常使人们防范不及,有“水下魔鬼”之称。目前观测到的世界上最大的内波波高已达百米余。据我国台湾省《中国时报》报道,台湾大学团队在南海观测到振幅高达170 m的巨大内波,它相当于底层海水在十几分钟内爬了约40层楼高,水温瞬间下降11℃,海流上下震荡剧烈。破坏程度惨重的智利大地震所引起的海啸波高也只有25 m。由此可见内波的破坏力

之大。

通常将线性或弱非线性潮成内波称为内潮波 (internal tidal wave), 而将强非线性潮成内波称为内孤立波或孤立子 (internal solitary wave 或 soliton)。内孤立波是在非线性作用和频散作用相平衡的情况下产生的。非线性作用使内波波形变陡, 频散作用使内波波形展平, 两种作用平衡将使内波波形保持不变而传播很远的距离。海底山脊和大陆架是最常见的内孤立波生成地, 其他内孤立波的生成源包括海山、海峡、海岭、海沟、浅滩、河流、冰河流、洋流—洋流交互作用等。内孤立波通常由潮流垂直流入本地海底所致, 它们在相同季节、全日潮和半月潮的相同阶段以及海底地形上具有统计意义上的重复性^[1]。

目前国外系统论述内波的著作包括 1973 年出版的 *Surface and Internal Waves*^[7], 1974 年出版的 *Linear and Nonlinear Waves*^[8], 1976 年出版的 *Hydrodynamics of Surface and Internal Waves*^[9], 1981 年出版的 *Internal Waves in Evolution of Physical Oceanography: Scientific Survey in Honor of Henry Stommel*^[10], 2001 年出版的 *Dynamics of Internal Gravity Waves in the Ocean*^[11], 2005 年出版的 *Baroclinic Tides—Theoretical Modeling and Observational Evidence*^[12]。我国有关内波研究的著作有《海洋内波动力学》^[6]、《海洋内波基础和中国海内波》^[13]、《海洋内波混合研究基础》^[14]等, 上述这些专著都是从内波水动力学出发, 本书的出发点是利用合成孔径雷达图像对海洋内波进行研究, 另外, 《合成孔径雷达海洋遥感》^[15]、《合成孔径雷达海面风场、海浪和内波遥感技术》^[16]、《合成孔径雷达海洋信息处理与应用》^[17]三本书中也含有合成孔径雷达对内波研究的内容。

1.2 海洋内波的研究意义

内波发生机制的复杂性及时间和空间上的随机性, 使内波成为海洋领域研究的难题之一, 长期以来, 一直成为海洋学家潜心研究的前沿性课题。我国海域广阔, 内波活动频繁, 对海洋内波的研究有着迫切需求。海洋内波与海洋水声学、海洋生物学、物理海洋学、海洋工程学和军事海洋学等诸多学科有着密切联系, 同时与海洋资源开发、潜艇水下航行等也有着重要关联。

海洋内波场及其他海洋物理场是海洋生物的生存空间,海洋内波在生成、传播及消衰过程中所引起的能量交换对海洋动力学过程有着重要影响。内波的不稳定性与破碎也影响着温盐的垂直结构,内波在陆架区的破碎引起海水的垂直混合,将海底富含营养的海水带到表层,为浮游植物提供营养。

由于内波振幅巨大,经过时会造成海水强烈的突发流(波致流),其剪切效应会对海洋工程(如海上石油钻井平台、海底石油管道、钻杆和缆绳等)造成严重影响。1990年夏在东沙岛附近,当内孤立波经过时,石油钻井机难以操作,锚定的油罐箱在不到5 min内摆了 110° ^[18];加拿大戴维斯海峡深水的一座石油钻探平台,就曾遭内波袭击而不得不中断作业;安德曼海的一个石油钻井机曾在内波通过后被推移了 90° 并挪动了 30.48 m ^[19]。

海洋内波会改变声信号在海水中的传播路线,因而对水声信道的影响至关重要;内孤立波产生的强波致流会影响到水下武器的发射;人们一直怀疑1969年美国“长尾鲨”号核潜艇在大西洋中部潜航时,遇到振幅为100 m的内波使其迅速下沉到超过可承受深度而失事沉没^[13]。

综上所述,研究海洋内波在海洋资源、海洋工程以及海洋军事等方面都具有重要意义,受到各国政府和海洋学家的普遍关注。

1.3 利用合成孔径雷达图像研究海洋内波

目前内波研究的主要手段有锚定浮标的现场测量(例如温深仪、多普勒声学海流计 ADCP 等)、遥感观测手段(例如可见光航拍、合成孔径雷达观测等)。

传统的内波现场测量存在很多不足之处。文献[16]给出的传统测量手段的明显不足:采样点少,只能获得有限点的资料,无法获得纵观全局的信息,同时难以保证采样点具有代表性;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,往往无法定期获取数据;测量人员不易到达的海域也难以获取数据;传统的现场观测费用很高,难以大范围进行观测,只能记录测量点的内波局部信息,无法全面跟踪内波的传播和演变过程。因此,现场测量方法一般只能作为遥感观测方法的辅助手段,而可见光观测

内波的方法依赖于太阳光,也受到很大限制。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar,简称 SAR)具有全天时、全天候、远距离、大范围、高分辨率等优势,能够探测诸多海洋现象(如表面波、内波、海面风场、上升流、浅滩、海冰、雨团、舰船目标等)。SAR 海洋图像包含了丰富的海洋环境信息,可以提供大空间尺度的水平二维内波信息,对现场测量以及光学等观测手段形成了有力补充,因而是海洋内波观测不可或缺的遥感手段。SAR 遥感技术的应用使海洋内波大范围范围的观测与研究成为现实,因此 SAR 遥感成为海洋内波探测的主要推动力。

自从 20 世纪 70 年代末以来,美国“Seasat”,欧空局“ERS-1/2”和“ENVISAT”,加拿大“Radarsat1/2”等等星载 SAR 以及各国机载 SAR 传感器获取了大量的海洋内波图像,为内波研究提供了丰富的数据来源。

海洋内波在 SAR 图像上较易辨认,它表现为沿传播方向的大范围明暗相间的条带,这是由于内波传播引起海表小尺度波浪的辐聚和辐散,改变了海洋表面粗糙度,从而影响了雷达的后向散射截面,内波成像机理详见第 2 章。

通常来说,SAR 图像上海洋内波具有如下几个特征^[20]:

(1) SAR 图像上内波呈现交替的亮暗条带形式,亮暗分别代表内波的波峰和波谷;

(2) 深海内波的波脊线经常与海底等深线平行;

(3) 潮成内波呈分离的波包(packets)的形式传播,每个波包都由半日潮产生,波包之间的距离从 10km 到 90km 不等;

(4) 每个波包包含几个甚至几十个的独立波列,单独波列的波长从 100 m 到 200 km 不等,沿着波脊线,其长度可达 10 km 甚至 100 km 以上;

(5) 最大(指幅度、波长和波脊线长度最大)的内波一般出现在波包的最前沿,后面的波列则在各个方面都有衰减。

内波分为上升型和下降型两种,这取决于海水的上层厚度 h_1 和下层厚度 h_2 。当 $h_1 > h_2$ 时,为上升型内波,如图 1.7a 所示;当 $h_1 < h_2$ 时,为下降型内波,如图 1.7b 所示。

图 1.8a 和图 1.8b 分别给出上升型和下降型两种内波在 SAR 图像上的不同表征,上升型内波在 SAR 图像上是先暗后亮的,下降型内波在 SAR 图像上是先亮后暗的。由于季节原因,同一地区的密度跃层不同,因此同一地区

在不同季节既可能观测到上升型内波,又可能观测到下降型内波。Liu 等^[21]通过 SAR 图像就在南海同一海域既观测到 1993 年 4 月的上升型内波,又观测到 1993 年 6 月的下降型内波。另一方面,上升型和下降型两种类型内波在一定情况下可以相互转变,这称为内波的极性转变。有关内波极性转变的内容请详见第 5 章。

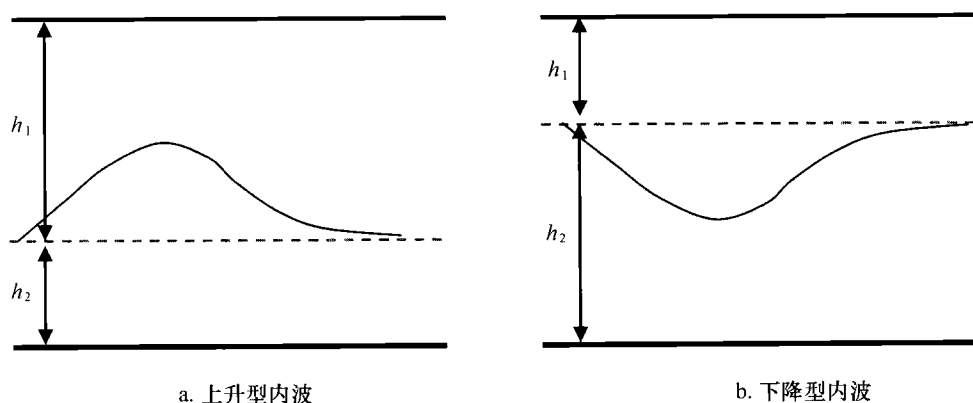


图 1.7 上升型和下降型内波与水深的关系

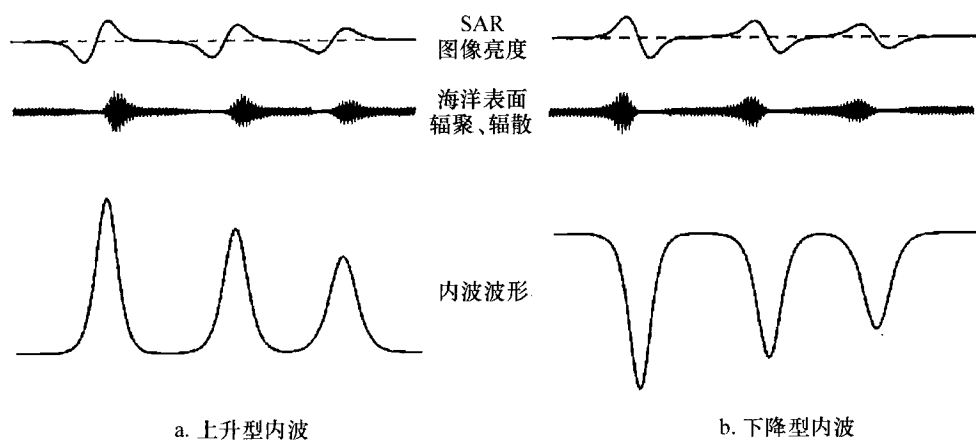


图 1.8 上升型和下降型内波在 SAR 图像上的表征

下面给出几个大气内波和海洋内波 SAR 图像的例子。图 1.9 是一景我国南海海洋内波的“ENVISAT”卫星 ASAR 图像,从图中可以看到丰富的海洋内波条纹;河口冲出的淡水形成的羽流也可以激发内波,图 1.10 就是华盛顿