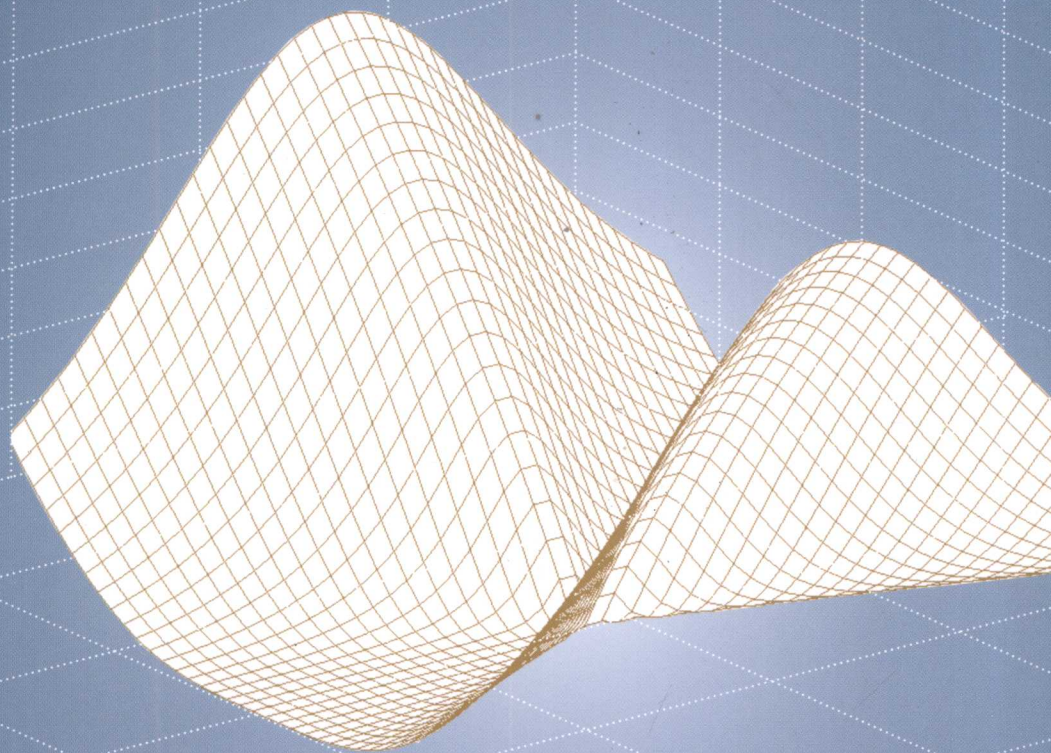


合成孔径雷达海洋遥感导论

杨永红 著



海洋出版社

合成孔径雷达海洋遥感导论

杨永红 著

海洋出版社

2009年·北京

内 容 简 介

本书对合成孔径雷达及其海面成像机理中的基本理论进行了详细的阐述,并对双站 SAR 中的前沿课题进行了研究与探讨。全书共分 6 章,内容包括合成孔径雷达、海浪与海浪谱模型、海面电磁散射计算、SAR 海面成像机理以及 SAR 内波成像机理等。

本书可供高等学校教师、相关专业的研究生或从事海洋微波遥感领域的科技工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

合成孔径雷达海洋遥感导论/杨永红著. —北京:
海洋出版社,2009. 11
ISBN 978 - 7 - 5027 - 7371 - 7

I. ①合… II. ①杨… III. ①合成孔径雷达—海洋遥
感 IV. ①TN958

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 216414 号

责任编辑:项 翔 鹿 源

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

北京盛兰兄弟印刷装订有限公司印刷 新华书店北京发行所经销

2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

开本:787 mm×1092 mm 1/16 印张:10

字数:187 千字 定价:48.00 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

前 言

当前,人类在生存与发展中面临着一些与海洋有关的问题和挑战,如海洋灾害频发、全球气候变暖以及海平面上升等重大问题。我国大陆海岸线长 1.8×10^4 km,岛屿海岸线长 1.4×10^4 km,是台风、风暴潮等海洋灾害多发区域。合成孔径雷达作为一种先进的海洋观测技术,其优势不仅在于可实现全天时、全天候的观测,而且能探测到诸多的海洋现象,如海浪、海流、内波、海底地形、浅海水深、边界流、涡旋和锋面等。此外,其在监测海面船只以及海面油污变化等方面也发挥着重大的作用。因此,SAR 在海洋科学、海洋环境、海上防灾减灾以及海洋资源等方面具有独特的应用价值和潜力。

SAR 海洋遥感属于交叉的新兴学科,其内容涉及物理海洋学、海面电磁散射计算和 SAR 信号处理,并与空间技术、微波技术、计算机技术、通信技术密切相关。由于海洋科学、海洋经济以及海上防灾减灾发展的客观需要,要求 SAR 海洋遥感图像从定性的分析过渡到定量的计算。在这一技术背景需求下,作者将近年来的研究工作整理成书,希望本书对高等学校教师、相关专业的研究生或从事海洋微波遥感领域的科技工作者具有一定的参考价值。本书探讨了 SAR 海洋遥感方面的诸多计算问题,在阐述理论方面力求深入浅出、易于理解,其内容具有一定的理论性、实用性和前沿性。

全书共分六章。第 1 章介绍了海洋与海洋科学的关系以及海

洋遥感学科的作用和地位,并对几种典型的 SAR 卫星系统进行了分析和阐述。第 2 章介绍了线性调频信号及其频谱的特点,重点阐述了基于高阶模糊函数的初始估计值与单纯形优化算法相结合的多项式相位信号的参数估计方法;介绍了 SAR 高分辨率成像的原理与距离-多普勒成像算法;简单分析了双站 SAR 产生的技术背景,详细阐述了适合于双站 SAR 的后向投影成像算法、双站 SAR 方位向移变特性以及相位噪声的特点。第 3 章介绍了几种常用的线性海浪模型与半经验海浪谱模型以及模拟随机海浪的方法。第 4 章介绍了海面电磁散射理论的发展状况,分析了基尔霍夫近似法、微扰法与两尺度法的特点。第 5 章介绍了 SAR 海面成像的理论背景;分析了轨道运动对 SAR 海浪成像的影响,SAR 海浪谱的线性变换及非线性变换,并结合大量的仿真予以说明;最后对 SAR 海浪成像这一领域进行了讨论和展望。在第 6 章中,主要是通过 KdV 方程、作用量谱平衡方程以及 Bragg 散射模型来阐述 SAR 内波成像的机理过程。

由于作者水平有限,书中错误与不当之处在所难免,欢迎读者批评指正。

杨永红

2009 年 8 月

目 次

第 1 章 绪论	(1)
1.1 海洋与海洋科学	(1)
1.2 海洋微波遥感	(2)
1.3 星载 SAR 系统简介	(4)
第 2 章 合成孔径雷达	(9)
2.1 线性调频信号	(9)
2.1.1 线性调频信号	(9)
2.1.2 线性调频信号的频谱	(11)
2.1.2 脉冲压缩技术	(12)
2.1.3 PPS 信号的参数估计	(15)
2.2 单站合成孔径雷达	(27)
2.2.1 距离 - 多普勒成像算法	(27)
2.2.2 SAR 分辨率	(35)
2.3 双站合成孔径雷达	(37)
2.3.1 BP 成像算法	(38)
2.3.2 方位向移变特性	(41)
2.3.3 BiSAR 相位噪声	(49)
第 3 章 海浪与海浪谱模型	(59)
3.1 波浪要素	(59)
3.2 海浪的线性模型	(62)

3.2.1	<i>Pierson</i> 模型	(62)
3.2.2	<i>Longuet-Higgins</i> 模型	(63)
3.2.3	随机海浪的数值模拟	(65)
3.3	分形海浪模型	(67)
3.3.1	<i>Weierstrass</i> 分形函数	(67)
3.3.2	分形海面模型	(69)
3.4	海浪谱模型	(70)
3.4.1	<i>Pierson-Moscowitz</i> 谱	(70)
3.4.2	<i>JONSWAP</i> 海浪谱	(71)
3.4.3	<i>Fung & Lee</i> 谱	(72)
3.5	海浪方向谱	(73)
3.5.1	散布函数	(73)
3.5.2	仿真	(75)
第4章	海面电磁散射理论基础	(79)
4.1	雷达方程	(80)
4.2	随机粗糙面的分类	(81)
4.3	基尔霍夫近似法	(82)
4.4	微扰法	(85)
4.4.1	<i>Bragg</i> 共振散射	(85)
4.4.2	微扰法	(86)
4.5	两尺度散射模型	(88)
第5章	SAR 海面成像机理	(91)
5.1	SAR 海面成像的理论背景	(92)
5.2	轨道运动对 SAR 海浪图像的影响	(93)
5.2.1	波浪描述	(93)
5.2.2	海面 SAR 成像过程	(95)

5.2.3 仿真	(96)
5.3 SAR 海浪谱线性变换	(98)
5.3.1 RAR 调制传递函数	(98)
5.3.2 速度聚束调制	(101)
5.3.3 SAR 调制传递函数	(102)
5.3.4 仿真	(103)
5.4 SAR 海浪谱的非线性变换	(108)
5.4.1 非线性映射	(108)
5.4.2 拟线性映射	(111)
5.4.3 仿真	(115)
5.5 SAR 海面成像模型的讨论	(122)
第 6 章 SAR 内波成像机理	(126)
6.1 KdV 方程	(126)
6.2 作用量谱平衡方程	(127)
6.3 Bragg 散射模型	(129)
6.4 仿真	(130)
附录 A 文氏海浪谱	(135)
附录 B Krogstad 法非线性映射	(137)
附录 C SAR 海浪谱的反演算法	(140)
参考文献	(143)

第1章 绪论

1.1 海洋与海洋科学

海洋占地球表面积的71%,海水占全球水量的97%,大气中的水分84%来自海洋。海水是一种含有多种溶解盐类的水溶液,水占96.5%左右,其余为多种溶解盐类、矿物和可溶性气体。同时,在海洋中蕴藏着丰富的渔业资源和矿物资源。海洋在调节全球气候变化和维持生态平衡起着重要的作用。

海洋科学是一个涵盖范围很广、与其他学科紧密相连的学科。其主要内容包括对海洋的物理、化学、生物和地质过程的基础研究,海洋资源开发利用以及海上军事活动等的应用研究。由于海洋因本身的整体性、海洋中各种自然过程相互作用的复杂性和主要研究方法、手段的共同性而统一起来,使海洋科学成为一门综合性很强的科学。在海洋科学体系中,既有基础性学科又有应用性学科,如基础性学科包括物理海洋学、化学海洋学、生物海洋学、海洋地质学以及环境海洋学等,应用性学科包括卫星海洋学、军事海洋学、渔场海洋学、业务化海洋学、航海海洋学以及海洋声学等。海洋科学的基本特点和趋势是学科分支的细化,分支学科的交叉、渗透和融合。海洋环境观测、海洋调查观测以及海洋遥感观测是研究海洋科学和开发/利用海洋资源的重要手段和方法。

科学研究的目的是为了社会、经济的可持续发展。当前,人类在生

存与发展中面临着一些与海洋有关的问题和困难,如海洋灾害频发、全球气候变暖以及海平面上升等重大问题。我国大陆海岸线长 1.8×10^4 km,岛屿海岸线长 1.4×10^4 km,为台风、风暴潮等海洋灾害多发区域。先进的海洋观测技术不仅能促进海洋科学的发展,同时也能促进海洋经济的发展。微波遥感技术是海洋观测技术中的一种重要的手段和方法,对物理海洋学、业务化海洋学以及军事海洋学也具有深远的意义。

物理海洋学是以物理学的理论、技术和方法,研究海洋中的物理现象及其变化规律,并研究海洋水体与大气圈、岩圈和生物圈相互作用的科学。它是海洋科学的一个重要分支,与大气科学、海洋化学、海洋地质学、海洋生物学有密切的关系,在海洋运输、资源开发、环境保护、军事活动、海岸设施和海底工程等方面有重要的应用。军事海洋学是研究和利用海洋自然规律,为海上军事行动提供科学依据和实施海洋保障的科学,是在海洋科学和军事科学基础上结合发展起来的研究领域。业务化海洋学是进行海、大洋和大气日常测量、测量资料分发和解读的活动,包括:海上风速风向、波高、波向、波谱、表层流、潮汐、风暴潮、浮冰以及海表温度;其目的是尽可能超前提供海洋未来状况的陆续预报,以最佳精度描述海洋现状(包括生物资源),搜集长期气候数据集,描述历史状况和显示发展趋势和变化的时序。

1.2 海洋微波遥感

海洋遥感属于交叉的新兴学科,其内容涉及物理学、海洋学和信息科学,并与空间技术、光电子技术、微波技术、计算机技术、通信技术密切相关。它不仅依赖于物理海洋学,同时也受到遥感器发展的制约。海洋遥感器根据所使用频谱范围的不同,分为光学传感器、微波传感器和激光传感器。与光学传感器相比,微波传感器的优势是可实现全天时、全

天候观测,且不受地理位置的限制;缺点是系统构成复杂。在微波传感器中,有微波辐射计、微波散射计、雷达高度计以及合成孔径雷达(SAR, synthetic aperture radar)。SAR作为一种主动式微波成像雷达,发射一定频率的微波,通过接收散射回波信号,进行成像处理后,得到具有高分辨率的图像。距离向的高分辨率是通过发射大时间-带宽乘积线性调频(LFM, linear frequency modulation)信号来实现的;方位向的高分辨率是通过遥感器平台的运动,在方位向上形成虚拟的大孔径天线来实现的。目前,SAR的分辨率可达到1 m以下。

SAR是一种探测海洋常用的微波遥感装置。由于SAR对海面粗糙度的变化很敏感,因此它能观测到海浪、海流、内波、海底地形、浅海水深、边界流、涡旋和锋面等海洋现象。此外,在监测海面船只以及海面油污的变化等方面也发挥着很大的作用。SAR在海洋资源、海洋环境、海上防灾减灾以及海洋科学研究等方面具有独特的应用价值和潜力。

图1.1为SAR海面成像示意图,主要是由三个模块组成:海面模型、海面电磁散射及SAR系统。SAR系统的主要功能是发射微波信号,并接收来自海面的散射信号,然后对回波信号进行成像处理,得到SAR海洋图像,在第2章将详细阐述与其有关的内容及其发展现状。海面模型分为线性模型和非线性模型,依据科学研究内容的不同,选择适合的模型;海浪谱模型主要是对海上实验数据拟和合而得到的,将在第3章阐述与其有关的内容。海面电磁散射是一个复杂的研究领域,依据微波的入射角,可将海面电磁散射大致分为三类:bragg共振散射(入射角 $\theta \in [20^\circ, 70^\circ]$)、近镜面散射($\theta \approx 90^\circ$)以及低略射角散射($\theta < 15^\circ$),将在第4章阐述与其有关的内容。在海面模型和海面电磁散射基础上,还将讨论SAR海面成像的机理,也就是说,海浪或者各种海洋现象是如何被SAR所“见”的,这是第5章主要讨论的内容。

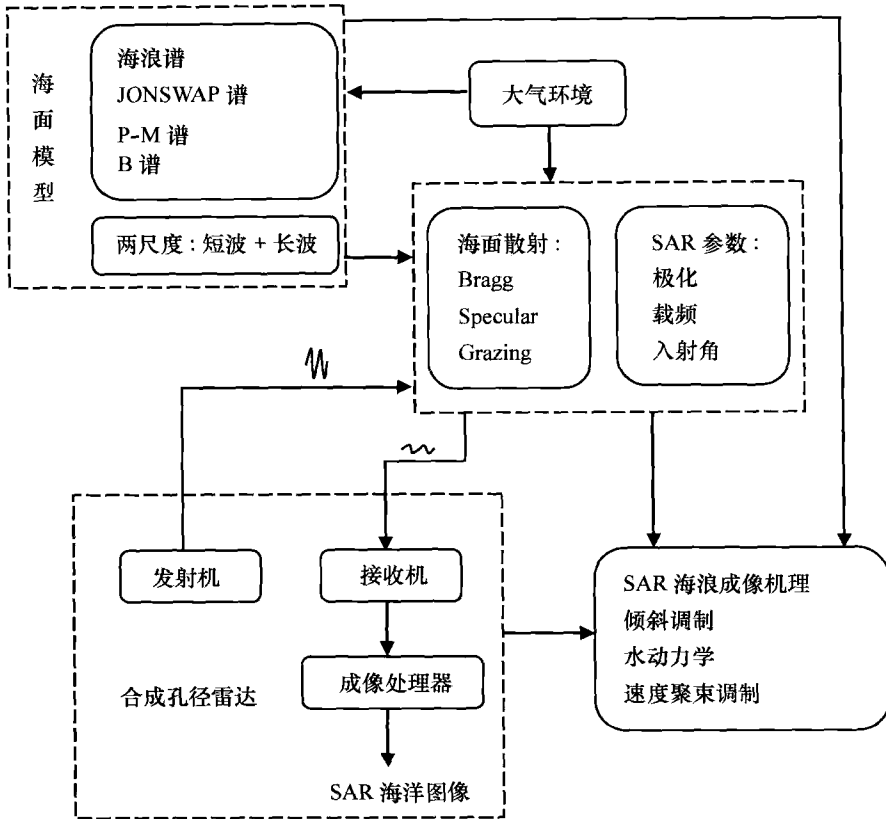


图 1.1 SAR 海面成像示意图

1.3 星载 SAR 系统简介

1978 年,美国宇航局 NASA 发射了 Seasat 卫星。它是世界上第一颗专门用于海洋观测试验的卫星。Seasat 卫星上载有 SAR、雷达高度计、微波散射计等微波遥感器。由于技术故障的原因,该卫星仅工作了 105 天就停止运行。在 Seasat 卫星运行期间获得了大量的微波海洋遥感测量数据,极大地促进了海洋遥感科学的发展。

1981年11月、1984年10月和1994年4月,美国宇航局NASA分别成功发射了SIR-A/B/C系列,实现了多波段和多极化探测能力;采用了相控阵波束扫描技术,可用于陆地和海洋研究。与此同时,其他国家也相继发射了SAR卫星用于科学研究和气象/海洋观测等。如1991年3月,俄罗斯成功发射了Almaz卫星;1992年2月,日本也成功发射了JERS-1卫星;1991年5月和1995年4月,欧空局成功发射了ERS-1/2系列;2000年,欧空局成功发射了ENVISAT卫星。

1995年11月,加拿大成功发射了RADARSAT-1卫星。它工作于C波段HH极化方式。其轨道参数如下:卫星高度796 km,轨道倾角 98.6° ,周期100 min,轨道重复周期24 d。由于该卫星天线具有一维(距离向)电扫描、波束成形和波束快速转换的能力,使得它的工作模式有标准波束观测模式、宽波束观测模式、高分辨率波束观测模式、扫描观测模式和扩展波束观测模式等。图1.2为RADARSAT观测模式的示意图。值得一提的是它的创新扫描模式,该模式通过在一个合成孔径时间内让雷达波束分别在几个不同的视角上扫描,实现宽测绘带成像。RADARSAT卫星可以向不同的用户提供多种分辨率、不同幅宽的SAR图像和数据。

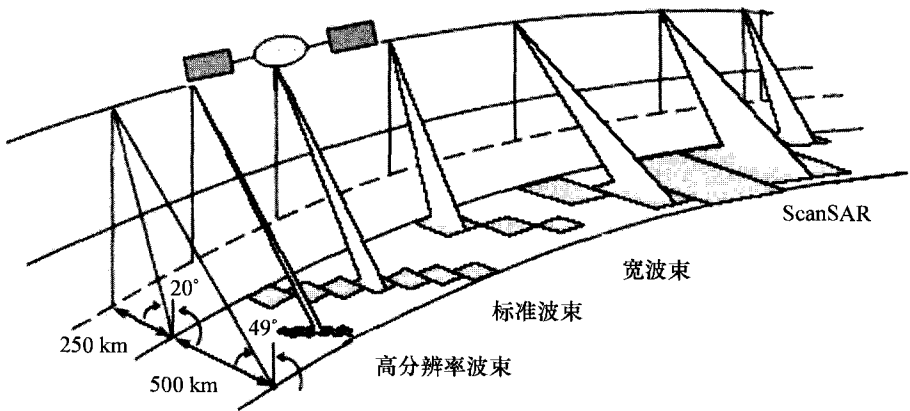


图 1.2 RADARSAT 观测模式

经过几十年的发展历程,单站 SAR 在理论和工程上都已十分成熟。与单站 SAR 相比,双站 SAR 可以获取丰富的目标信息,具有提高系统的抗摧毁性,抗隐身性等优点。随着一些关键技术(通信、电子器件)的完善和发展,使得 BiSAR 系统的研制成为可能。国内外机载双站 SAR 试验的成功,标志着 BiSAR 系统中的关键技术取得突破性进展。在许多国家的研究中心和试验基地进行机载 BiSAR 项目的同时,也相继提出了星载 Bi/Multi-SAR 的发展计划,如美国的 Techsat-21 计划、加拿大的 Radarsat-2/3 计划、意大利的 BISSAT 计划、法国的 Cartwheel、德国的 Pendulum 与 TanDEM-X 计划等。因此可以预见在不远的将来,当这些星载 BiSAR 卫星发射后,会成为一种新型探测海洋的手段和方法。星载 Multi-SAR 有时也称为分布式星载 SAR 系统。分布式小卫星 SAR 的工作模式主要有多发多收(主动式)和一发多收(半主动式)两种(图 1.3 和图 1.4)。

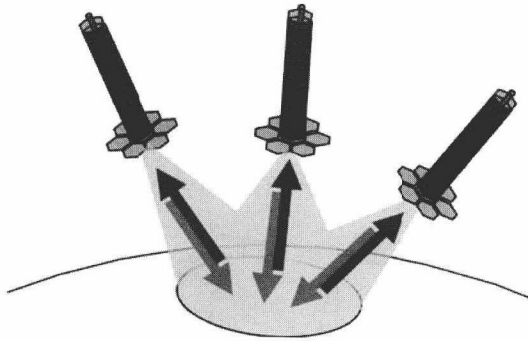


图 1.3 Mutli-SAR 多发多收/主动模式

在多发多收模式下,系统中所有小卫星的地位均等,它们都主动地发射和接收信号。该模式采用分布式的思想构建和设计,彻底体现了分布式系统的优势。它是从全新的角度研究分布式小卫星,因此构造比较复杂。其代表系统为美国的 TechSat21 计划。单发多收模式的分布式 SAR 系统采用传统大卫星伴随多颗小卫星的方式实现,系统中大卫星发

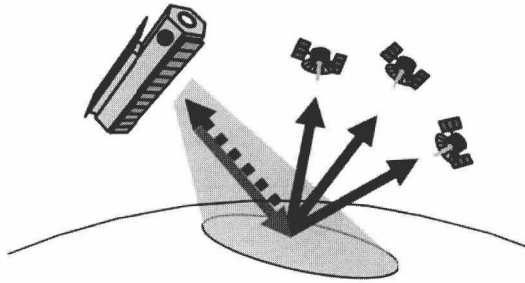


图 1.4 Mutli - SAR 一发多收/半主动模式

射信号,小卫星接收信号,系统对大卫星的依赖较强。它们之间的不同主要表现在小卫星的轨道构成和绕飞轨迹上面。

1998年,法国空间研究中心(CNES)的Massonnet提出了干涉车轮(Interferometric Cartwheel)的概念。如图1.5所示,由一颗主星和三颗辅星组成,小卫星群形成一个旋转的三角形(像一个飞旋的车轮),同时也可沿着与主星几乎相同的轨道飞行。主卫星为常规SAR卫星,小卫星跟随主卫星飞行。主卫星发射雷达脉冲信号,3颗具有接收功能的小卫星编队飞行的同时接收地面反射回来的信号。3颗小卫星飞行在主卫星之前或之后约100 km,并且在整个轨道上通过编队构型来保证进行干涉测量。主星发射的雷达脉冲,经地面反射后,可被主星和辅星同时接收。其属于“一发多收”的模式,可降低成本。主卫星可实现高分辨大测绘带成像。由于小卫星/辅星之间存在着固定的几何关系,雷达图像经相干处理后,可实现干涉测高。法国的干涉方案能克服当前获取干涉雷达数据的限制(欧空局ERS-1/2星对,获取的SAR数据会受到大气干扰,时效性和获取影像的相干性会受到影响;美国的SRTM任务,其干涉基线的长度会受到限制,并且系统研制耗资巨大),获取全球高精度的数字高程模型数据,可以充分利用现有的SAR卫星资源,同时发射小

卫星成本低,发展空间大。Cartwheel 主要应用于民用,如海洋监测、地形测高等方面。

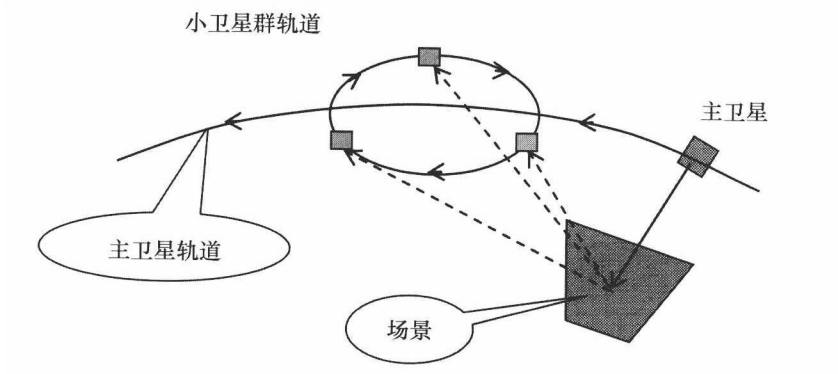


图 1.5 Interferometric Cartwheel 示意图

第 2 章 合成孔径雷达

SAR 作为一种主动式微波成像雷达,它发射一定频率的微波,通过接收散射回波信号并进行成像处理后,得到具有高分辨率的图像。距离向的高分辨率是通过发射大时间-带宽乘积 LFM 信号来实现的;方位向的高分辨率是通过遥感器平台的运动,在方位向上形成虚拟的大孔径天线来实现的。目前,SAR 的分辨率可达到 1 m 以下,在农业、林业、地质、水文、土壤湿度、海洋学、舰船和浮油探测、冰雪探测、地表覆盖测绘和高度测绘等领域广泛应用。SAR 的分类方法有很多种,根据天线扫描方式的不同,SAR 可分为条带式、扫描式和聚束式;根据收发平台位置的不同,SAR 可分为单站式、双站式和多站式;根据遥感器载体的不同,SAR 可分为机载式和星载式。

本章首先介绍了线性调频信号及其频谱的特点,重点阐述了基于高阶模糊函数的初始估计值与单纯形优化算法相结合的多项式相位信号参数估计方法;介绍了 SAR 高分辨率成像的原理与距离-多普勒成像算法;详细阐述了适合于双站 SAR 的后向投影成像算法、双站 SAR 方位向移变特性以及相位噪声的特点。

2.1 线性调频信号

2.1.1 线性调频信号

合成孔径雷达发射的是线性调频信号,由于 LFM 信号的声音与鸟