

双站SAR 成像处理技术

仇晓兰 丁赤飏 胡东辉 著

 科学出版社
www.sciencep.com

双站 SAR 成像处理技术

仇晓兰 丁赤飏 胡东辉 著

科学出版社

北京

TP751
Q771

内 容 简 介

本书深入探讨了双站 SAR 中的信号处理问题,以成像处理为重点,从分辨性能分析、回波仿真、成像算法、参数估计及运动补偿几个方面进行了系统、全面的阐述。为便于读者理解,第 2 章介绍了传统单站 SAR 的分辨原理和几种经典的成像算法以作为双站 SAR 信号处理的基础;此外,在介绍回波仿真、参数估计及运动补偿方法时,也涉及了一些单站 SAR 的内容以便于双站 SAR 的方法与之对比。

本书可供从事 SAR 信号处理(尤其是新体制 SAR 信号处理)的研究人员和技术人员,以及致力于 SAR 信号处理研究的硕士生、博士生参考阅读。对 SAR 的初学者也提供了入门级的帮助。

图书在版编目(CIP)数据

双站 SAR 成像处理技术/仇晓兰,丁赤飏,胡东辉著. —北京:科学出版社,2010.4
ISBN 978-7-03-027085-6

I. ①双… II. ①仇… ②丁… ③胡… III. ①遥感图象-数字图象处理
IV. ①TP751.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 050347 号

责任编辑:王志欣 孙 芳/责任校对:朱光光

责任印制:赵 博/封面设计:王 浩

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 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010 年 4 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 4 月第一次印刷 印张:14 3/4 彩插:4

印数:1—2 500 字数:287 000

定价:50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)是一种利用多普勒效应和脉冲压缩技术实现高分辨的微波成像雷达。自 1951 年美国的 Wiley 提出合成孔径的概念以来,经过 50 多年的发展, SAR 已广泛应用于环境保护、灾害监测、海洋观测、资源勘查、地质测绘、精细农业、政府公共决策及军事侦察等各方面,发挥着不可替代的重要作用。随着应用技术的发展,军事和民用领域新要求的不断提出,目前, SAR 正向着高分辨、宽覆盖、多极化、三维分辨等方向发展。为了更好地实现上述目的, SAR 的体制也正从传统的单一平台体制向基于多平台的分布式体制发展,双站 SAR 作为 SAR 从单平台向多平台发展的第一步,具有非常重要的地位。进入 21 世纪以来,双站 SAR 受到了国际上的普遍关注和大力发展,目前,正在从理论研究和演示试验阶段向实际应用阶段进发。

信号处理是双站 SAR 的关键问题之一,同时也是双站 SAR 的一个难点。随着双站 SAR 受到越来越多的关注,近年来,有关双站 SAR 信号处理的研究层出不穷,尤其在成像处理方面,已涌现了许多新的理论和方法,取得了颇为丰硕的研究成果。然而,目前国内外还均未见双站 SAR 成像处理方面的著作,以梳理并总结该方面的研究成果和发展状况。本书正是在这样的背景下,围绕双站 SAR 的信号处理难题,以成像处理为重点,从分辨性能分析、回波仿真、成像算法、参数估计及运动补偿几个方面进行了系统、全面的阐述。本书以作者近年来的研究工作为基础和线索,融入了其他研究者的研究成果,力图较为全面地呈现此领域目前的发展状况,从而为致力于新体制 SAR 信号处理研究的硕士生、博士生和其他科研人员提供有益的参考,也为推动我国 SAR 信号处理技术的进一步发展贡献绵薄之力。

本书策划过程得到了中国科学院电子学研究所科技信息中心副主任王桂颖老师的真诚帮助;撰写过程中,孟大地博士、韩冰博士分别为本书第 8 章和第 2 章的撰写提供了丰富的材料,李芳芳、韩伟等同学为本书的许多概念性示意图付出了辛苦的劳动。此外,本书的出版得到了国家 863 计划(项目编号:2009AA7010113)和中国科学院院长奖科研启动专项资金的资助,在此一并表示衷心感谢。同时,还要感谢中国科学院空间信息处理与应用系统技术重点实验室的支持,尤其感谢 SAR 数据处理研究小组所有成员的帮助,特别感谢作者家人的支持和鼓励。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2010 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 SAR 发展概况	1
1.1.1 SAR 发展历史	1
1.1.2 SAR 发展现状及发展趋势	2
1.2 双站 SAR 简介	8
1.2.1 双站 SAR 基本概念	8
1.2.2 双站 SAR 的优势及应用前景	8
1.2.3 双站 SAR 的发展现状	9
1.2.4 双站 SAR 的关键问题	12
1.3 本书内容概要	13
参考文献	13
第 2 章 SAR 信号处理基础	16
2.1 SAR 的距离分辨	16
2.1.1 距离分辨的基本概念	16
2.1.2 雷达分辨的经典理论	17
2.1.3 线性调频脉冲	18
2.1.4 匹配滤波器	19
2.2 SAR 的方位分辨	21
2.2.1 方位分辨的基本概念	21
2.2.2 合成孔径的基本原理	22
2.2.3 合成孔径的匹配滤波实现	23
2.3 SAR 的分辨单元	25
2.4 SAR 处理的理论模型——单点目标成像	27
2.4.1 单点目标 SAR 回波模型	28
2.4.2 单点目标成像	28
2.5 SAR 快速处理方法简介	31
2.5.1 RD 算法	32
2.5.2 CS 算法	35
2.5.3 ω -k 算法	38
2.6 小结	40

参考文献	40
第 3 章 双站 SAR 成像基础	43
3.1 双站 SAR 模式分类	43
3.2 双站 SAR 雷达方程	44
3.3 双站 SAR 空间分辨率	46
3.3.1 距离向分辨率	46
3.3.2 方位向分辨率	50
3.3.3 双站 SAR 分辨单元	63
3.4 小结	64
参考文献	64
第 4 章 双站 SAR 回波仿真	66
4.1 引言	66
4.2 传统的单站 SAR 回波仿真方法	67
4.2.1 回波模型及仿真原理	67
4.2.2 回波仿真的实现方式	69
4.2.3 仿真示例	72
4.3 移不变模式双站 SAR 的回波仿真方法	77
4.3.1 短基线移不变模式双站 SAR 的回波仿真方法	77
4.3.2 长基线移不变模式双站 SAR 的回波仿真方法	80
4.4 小结	85
参考文献	85
第 5 章 移不变模式双站 SAR 成像算法	87
5.1 引言	87
5.2 基于单站转化的成像方法	89
5.2.1 DMO 方法	89
5.2.2 DMO 方法的窄波束合成解释	92
5.3 基于单站等效的成像算法	93
5.3.1 基于基线中点单站等效的成像算法	94
5.3.2 基于双曲等效的成像算法	96
5.4 基于显式频谱近似的成像算法	114
5.4.1 LBF 成像算法	115
5.4.2 MSR 成像算法	118
5.4.3 基于 IDW 的成像算法	120
5.5 基于隐式频谱分解的成像算法	125
5.5.1 隐式频谱表达式	125

5.5.2 隐式频谱分解方法	127
5.5.3 隐式频谱分解误差	129
5.5.4 误差补偿方法	131
5.5.5 仿真示例	132
5.6 算法比较	139
5.6.1 波数域算法的比较	139
5.6.2 双曲等效多普勒域算法与 Ender 算法的比较	141
5.7 小结	143
参考文献	143
第 6 章 移变模式双站 SAR 成像算法	147
6.1 引言	147
6.2 一站固定模式成像算法	148
6.2.1 几何模型和信号特性	148
6.2.2 距离空变性的处理方法	149
6.2.3 方位空变性的处理方法	154
6.2.4 一站固定模式 NLCS 算法流程	162
6.3 匀速移变模式成像算法	163
6.3.1 几何模型和信号特性	163
6.3.2 改进的高效 NuSAR 算法	165
6.3.3 图像畸变及几何校正	169
6.3.4 仿真结果	170
6.4 小结	175
参考文献	175
第 7 章 双站 SAR 特殊应用模式及成像算法	177
7.1 引言	177
7.2 双站 SAR 前视成像研究	178
7.2.1 前视双站 SAR 构型	178
7.2.2 前视成像的二维分辨能力	179
7.2.3 前视双站 SAR 的信号特性及成像算法	180
7.2.4 仿真实验	182
7.3 双站 SAR 三维分辨研究	185
7.3.1 高程影响与双站 SAR 构型参数的关系式	187
7.3.2 高程已知的成像方案	194
7.3.3 双站 SAR 三维特性的应用潜力	195
7.4 小结	197

参考文献	197
第 8 章 双站 SAR 参数估计及运动补偿	199
8.1 引言	199
8.2 运动误差影响分析	199
8.2.1 姿态误差分析	199
8.2.2 运动误差分析	201
8.3 多普勒参数估计方法	206
8.3.1 中心频率定义	207
8.3.2 基于时频域预滤波的中心频率估计方法	209
8.4 SAR 运动补偿原理及方法	217
8.4.1 运动补偿的基本原理	217
8.4.2 基于传感器的运动补偿	219
8.4.3 基于 SAR 数据的运动补偿	223
8.5 小结	226
参考文献	227

第 1 章 绪 论

1.1 SAR 发展概况

雷达的英文原意为“无线电探测和测距(radio detection and ranging)”,它是利用电磁波对障碍物(目标)的反射特性来发现潜在的目标。雷达可以探测到的目标类型非常广泛,从建筑物、公路、桥梁、车辆、飞机、船舶等人造物体到山脉、河流、森林、沙漠、海浪等自然界地貌都可以成为雷达的探测目标;而且,雷达探测不受气象因素的影响,可以在黑暗、云雨条件下发现远距目标的存在。由于雷达具有这些特点,使得其自第二次世界大战出现以来,日益成为微波遥感领域的重要技术手段,在遥感应用的各个方面都扮演着越来越重要的角色。雷达的发展历史自始至终都同军事应用发生着紧密的联系,由于雷达在战场侦察、目标监视、武器制导等方面表现出来的巨大优势,极大地刺激了主要工业强国对雷达研究的兴趣,成为战后雷达技术突飞猛进的原动力,SAR 就是在这个过程中出现的一种崭新的高分辨雷达体制^[1~6]。

1.1.1 SAR 发展历史

SAR 是一种可实现二维高分辨率的微波主动成像雷达。合成孔径的概念最初是为改善雷达方位分辨率而提出的,在此之前,一般的机载雷达采用真实孔径方法以获得地面测绘区域的图像,即利用天线波束的方向性来区分不同的方位位置。真实孔径雷达的方位分辨存在一种固有的缺陷,即其方位分辨率与雷达和探测目标之间的距离有关,在一定的雷达波长和天线尺寸限制条件下,随着雷达和探测目标之间距离的增大,雷达方位分辨率逐渐降低。为获得远距离地区目标的高分辨率图像,就必须将天线波束做得非常窄,而窄波束的形成是通过把雷达天线做大的途径来实现的。对于机载成像雷达来说,雷达与目标之间的距离通常为几十公里至一百公里;对于星载成像雷达,雷达与目标之间的距离可高达数百公里。这样,仅仅要达到几十米的方位分辨率,就需要将雷达天线做到几公里甚至几十公里,这在实际中是根本不可能实现的。

为解决真实孔径成像雷达低方位分辨率的问题,人们一直在寻找各种新的方法。1951 年,美国 Goodyear 公司的 Wiley 首先提出通过频率分析的方法改善雷达的方位分辨率,从此奠定了 SAR 的理论基础。1953 年 7 月,伊利诺依大学控制系统实验室采用非聚焦型合成孔径的方法得到第一张 SAR 图像。同年夏,在美国

密执安大学举办的暑期研讨会上,许多学者提出通过载机运动将雷达真实天线综合成大尺寸线形天线阵列的新观点,标志着合成孔径概念真正进入了雷达研究领域。在此基础上研制出的 SAR 于 1957 年 8 月进行了飞行实验,获得了首幅大面积高分辨 SAR 图像,从此,SAR 得到了广泛的承认,并开始进入实用化阶段。

早期,SAR 是利用傅里叶光学透镜组来获取地物图像的,这种方法在使用上十分不方便。例如,需要不断对安放在光路上的透镜进行精细的调整;难以做到自动处理,并且图像质量通常也较低。为了克服光学方法的固有缺陷,人们开始研究 SAR 数字信号处理技术^[7~12]。同光学处理相比,数字处理有很大的灵活性,能适应各种不同场合的需要,特别是能满足星载 SAR 信号处理的特殊要求。应用数字技术处理 SAR 信号面临的主要困难是需要大的信息存储量和高的运算速度,这对硬件和软件都提出了很高的要求,因此,在很长一段时间内制约了 SAR 的发展。20 世纪 70 年代后,随着计算机技术和 SAR 快速成像算法的成熟,这一状况得以根本改变^[13~18]。1976 年,数字处理技术首次成功应用于对美国海洋卫星(SEA-SAT)数据的成像处理,获得了近 1 亿平方公里的地表图像,这一成就标志着 SAR 开始真正进入对地观测领域,宣告了空间遥感新时代的到来。此后,各主要西方国家和苏联相继发射了自己的星载 SAR,如 ALMAZ(苏联)、ERS-1/ERS-2(欧洲太空局)、RadarSAT-1(加拿大)等,在全球掀起了一股 SAR 研究和应用的热潮。

SAR 的原理性优点可以概括为以下几方面^[19]:①全天时、全天候的成像能力;②高方位分辨率;③图像分辨率与波长和雷达作用距离无关;④选择合适的波长,即能穿透一定的遮蔽物成像。正是 SAR 所具有的这些优点,使其在资源勘测、灾害预报、环境保护、军事侦察等方面得到了广泛的应用。时至今日,SAR 已经发展成为有着丰富内容的多学科综合研究领域,并不断开辟着新的研究方向,其在空间遥感领域的重要地位正日益得到体现。

1.1.2 SAR 发展现状及发展趋势

传统的 SAR 基于单一平台,并通常以单一频段和单一极化方式进行工作,然而为满足不同分辨率和测绘带宽的应用需求,其通常有多种成像模式。传统的 SAR 成像模式有如下几种(如图 1.1 所示)。

(1) 条带 SAR(stripmap SAR)。这是 SAR 最简单、最常见的模式,该模式下天线指向保持不变,天线波束随平台移动均匀地扫过地面上某一连续的条带,得到不间断的图像;其方位分辨率由天线长度决定。

(2) 扫描 SAR(scan SAR)。这是以牺牲方位分辨率来换取宽测绘带的一种成像模式,适合对大场景区域进行普查。该模式下,天线指向沿距离向间歇、周期性地扫描,也即天线波束在平台移动过程中轮流扫描多个条带,通过条带的拼接来获得宽测绘带。为保证观测的连续性,每个条带的驻留时间有限,场景目标无

法被天线孔径完整地照射,故方位分辨率由条带驻留时间决定,与条带模式相比,分辨率较低。

(3) 聚束 SAR(spotlight SAR)。这是以牺牲连续照射范围来获取方位向高分辨率的一种成像模式,适合对某个局部区域的详查。该模式下,天线波束指向随平台的向前移动而逐渐向后调整,从而使天线波束持续覆盖地面的某个圆域。通过天线指向的调整,SAR 在该区域的驻留时间可以突破天线长度的限制,从而获得更高的方位分辨率。然而,由于一次成像中天线波束在地面的覆盖范围未随平台的移动而向前推移,该模式一次只能对地面的一个有限圆域进行成像,其所获图像是不连续的。

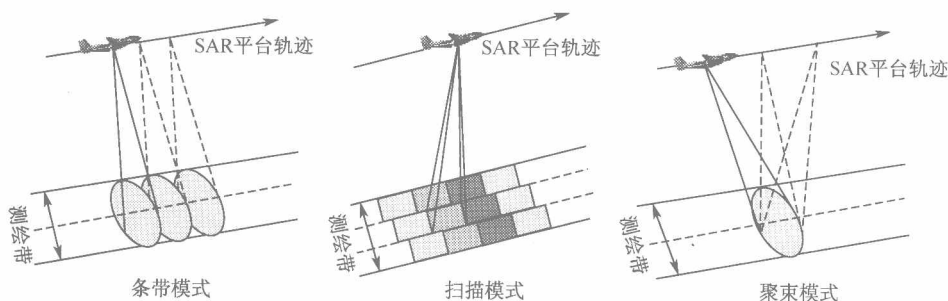


图 1.1 SAR 传统成像模式示意图

经过半个世纪的发展,SAR 已经成为一种成熟的空间遥感技术。随着人们对其应用潜力的不断认识和应用技术的不断发展,传统的工作体制和成像模式逐渐无法满足不断深化的应用需求,为此,能实现更多遥感功能的 SAR 新体制和新概念纷纷出现。表 1.1 对现役的一些具有代表性的先进星载和机载 SAR 系统的工作特性进行了总结。

从这些系统的设计特点可以发现,当前先进 SAR 系统已经摆脱了过去以单频/单极化/单通道为主的简单模式,进而向多频/多极化/多通道为特点的综合模式转化。发射信号形式也不再局限于传统的线性调频脉冲,还包括调频连续波(frequency modulation continuous wave,FMCW)、调频步进频、相位编码等复杂信号波形。这些技术的使用不仅进一步提高了 SAR 的分辨能力,还使它的探测范畴从目标的几何特性扩展到包括极化特性、高程特性和运动特性等在内的更广阔的信息空间。另外,随着大规模数字集成电路、轻型薄膜天线、数字化波束、脉冲标记等新技术、新工艺和新材料的应用,SAR 在结构上也逐渐向小型化、轻便化、模块化和多态化转变,这些都极大地拓宽了其在空间遥感领域应用的广度和深度。

综合现阶段 SAR 研究最新进展和前沿需求,其主要发展趋势体现在以下几个方面。

表 1.1 典型的先进星载和机载 SAR 系统

	系统	波段	极化	成像模式	分辨率 (最高)/m	发射/建 成时间	所属国家	其他
星载	RadarSAT-2	C	全极化	条带/扫描	3	2007	加拿大	双通道(试验)
	TerraSAR-X	X	单/双/全 极化	聚束/条带/扫 描/滑动聚束	1	2007	德国	双通道 ATI/重 轨 PolInSAR
	ALOS/ PALSAR	L	双/全极化	条带/扫描	7	2006	日本	—
	SAR-Lupe	X	多极化	条带/聚束	0.5	2006~ 2008	德国	共 5 颗星 (770kg/颗)
	Cosmo/ SkyMed	X	全极化	条带/扫描/ 聚束	1	2007~ 2010	意大利	共 4 颗星
	Envisat/ ASAR	C	单/双极化	条带/扫描	28	2002	欧洲太 空局	—
机载	F-SAR	X/C/S/ L/P	全极化	条带/聚束	0.3	2006	德国	ATI/XTI,重轨 PolInSAR,调频 步进频
	PAMIR	X	多极化	条带/聚束/ 滑动聚束	0.07	2001	德国	相控阵天线 InSAR, ISAR MTI(STAP)
	RAMSES	P/L/S/ C/X/Ku/ Ka/W	全极化	条带	0.1	—	法国	ATI PolInSAR
	PISAR	X/L	全极化	—	3	1997	日本	PolInSAR
	MiSAR	Ka	—	—	0.5	2002	德国	FMCW 体制 4kg
	MiniSAR	Ku/Ka/X	—	条带/聚束	0.1	2005	美国	12.3kg

(1) 高分辨率、宽测绘带 SAR。更高的分辨率和更广的测绘范围是 SAR 持续不变的追求主题。目前,由于突破了宽带和超宽带信号在实现上的技术难题,一些 SAR 系统在距离向已经能做到亚米级甚至厘米级的分辨精度。例如,德国 SAR-Lupe(如图 1.2 所示)的分辨率已达到 0.5m,而最新的美国长曲棍球系列卫星(第 5 颗)在精细模式下已经能达到 0.3m 的分辨能力;法国机载 SAR RAMSES 达到了 0.1m 的分辨率(如图 1.3 所示),而德国先进的机载 SAR(PAMIR)更是达到了厘米级的超高分辨率。在方位向,为了解决一直存在的分辨率和测绘带之间的需求矛盾,设计了一些新的成像模式(如滑动聚束模式),并提出了许多新的设计理念,其中,代表性的有方位多相位中心技术、分布式 SAR、中高轨/同步轨道 SAR 等。

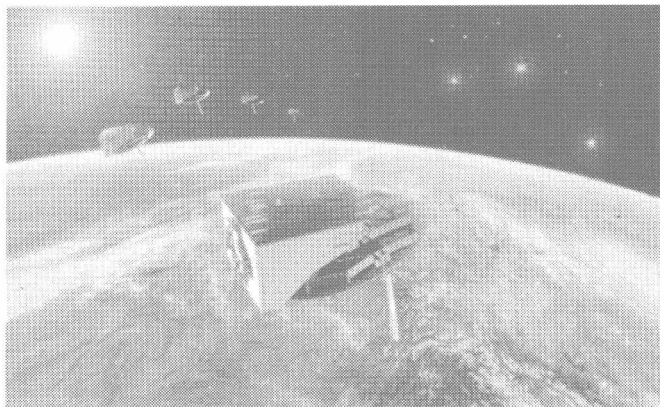
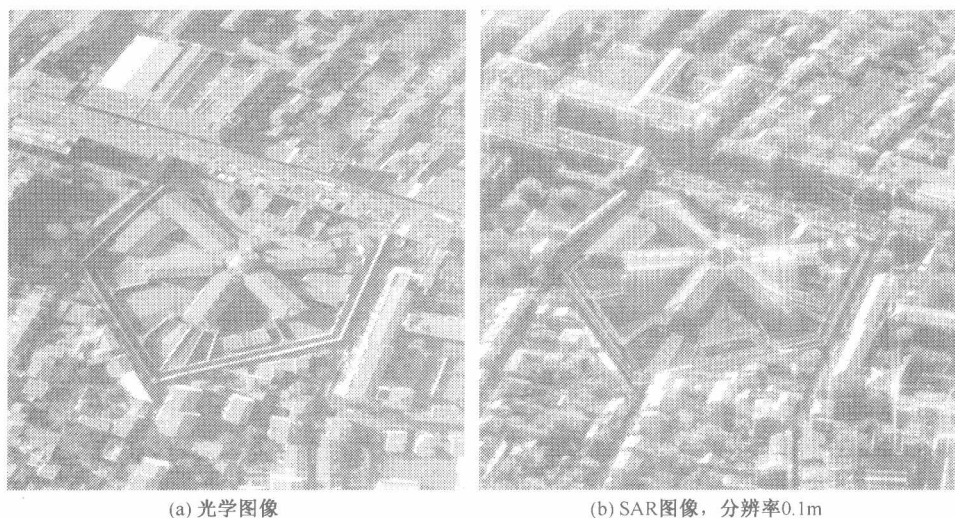


图 1.2 德国 SAR-Lupe 示意图



(a) 光学图像

(b) SAR图像, 分辨率0.1m

图 1.3 法国 RAMSES 高分辨率机载 SAR 图像与光学图像对比示意图

(2) 干涉 SAR(interferential SAR, InSAR)。干涉 SAR 概念的提出是 SAR 发展历史上一次革命性的飞跃,它使得 SAR 第一次具有了对地形进行三维测绘的能力,由于其在空间遥感,特别是军用遥感方面具有不言而喻的重要性,一经提出即引起广泛关注。干涉 SAR 通过对同一地区两次观测得到的复图像对来获取地面高程信息,在实现上包括单航过和双航过两种方式。美国于 2000 年 2 月发射的搭载在航天飞机上的 SRTM(如图 1.4 所示)就是一个典型的以干涉测量为目的 SAR 系统,它采用双天线单航过模式,两个天线之间以长 60m 的吊杆相连,提供了南北纬之间 60° 范围内的地形高度图像,其高程测量精度为 16m。进一步发展出的差分干涉 SAR(differential InSAR, DInSAR)还能监测出地表沿高程方向的

动态变化,因而广泛用于地表沉陷、冰川变化等方面,其中的永久散射体技术^[20~22]是目前该领域一个非常活跃的发展方向。

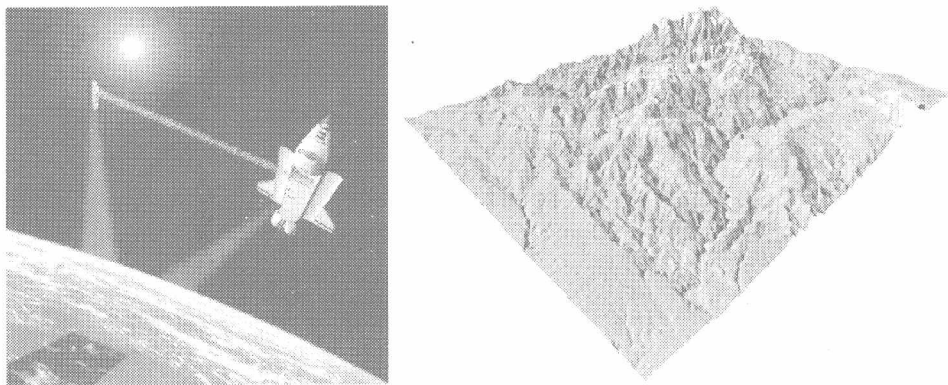


图 1.4 SRTM 系统及其获取地表高程信息示意图

(3) 多极化 SAR(polarimetric SAR, PolSAR)。早期, SAR 体制采用单一极化方式发射和接收电磁波[HH 或 VV, H 为水平(horizontal)极化的缩写, V 为垂直(vertical)极化的缩写]。单一极化相当于对电磁波矢量进行标量处理,因而损失了雷达回波所携带的相位,而相位信息包含了地面目标的散射机制。利用多极化技术,对不同极化图像(HH、VV、HV、VH)进行综合处理,就可以区分出具有不同散射特性的地面物体,从而对其进行精细的分类^[23~25]。多极化 SAR 在植被分类、森林测绘等方面有独到的作用,故目前先进的 SAR 系统(如 RadarSAT-2, TerraSAR-X, F-SAR)均具备了多极化甚至全极化的功能。

(4) 极化干涉 SAR(polarimetric interferential SAR, PolInSAR)^[26,27]。这是一种将极化和干涉结合起来的新技术,它综合了极化 SAR 对地物目标的分类优势和干涉 SAR 对地面高程的测量优势,可以分解出处于不同高度上的散射机制类型,其对于地表植被物理参数反演,特别是森林生物量估计有着十分重要的应用价值。同时,其对林下隐匿目标的探测能力也是军方十分感兴趣的内容。极化干涉 SAR 属于 SAR 遥感领域一个十分前沿的分支,从概念提出至今只有十余年的时间。目前,已有一些先进的机载和星载 SAR 具备了极化干涉数据的获取能力,但尚未实现常规运行模式的全极化干涉数据获取。就目前公开发表的资料来看,计划于 2015~2020 年发射的 Tandem-L 系统[德国宇航中心(DLR)研制,如图 1.5 所示]将携带极化干涉 SAR 模式。

(5) 三维 SAR(3D SAR)^[28]。三维 SAR 是近年来在传统 SAR 二维成像模型基础上发展出来的一种新型微波遥感技术。典型的三维成像体制有多基线层析(multi-baseline SAR tomography)、曲线 SAR(curveline SAR)、下视三维 SAR、圆周 SAR(circular SAR)等。从理论上讲,不管采用何种三维 SAR 体制,都必须形

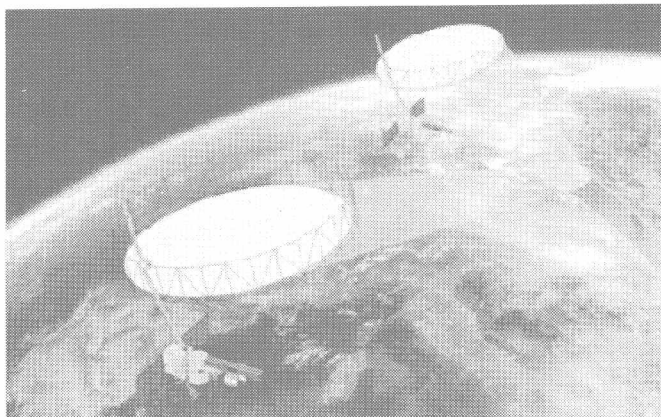


图 1.5 Tandem-L 概念图

成一个分布在立体空间中的采样阵列,这样,就能获得沿水平面和高度三个方向的分辨能力,从而突破干涉 SAR 无法进行高程分辨、只能进行高程测量的局限。三维 SAR 所面临的主要困难在于其空间采样的稀疏特性,为解决这一问题,需要利用一些新的信号处理理论和方法,如现代谱估计技术、压缩感知(compressed sensing 或 compressive sampling)^[29]理论等。

(6) 运动目标指示(moving target indication, MTI)^[30,31]与 SAR 结合。MTI 是军用遥感领域一个十分重要的应用方向。将 SAR 技术与 MTI 技术加以结合,不仅能进一步提高雷达对机动目标的检测性能,还能提供战场环境接近实时的高分辨率图像,对于指挥官及时掌握战场态势、做出正确军事部署、引导对地攻击并评估打击效果都具有不可估量的作用。这方面最著名的系统是美国的 E8-C JSTARS(联合侦查与目标攻击系统),该系统配备两种主战模式:WAS/MTI(广域监视/运动目标指示)模式和 SAR/FTI(合成孔径/静止目标指示)模式,其在 1991 年海湾战争中发挥了前所未有的优势。

以上列举的 SAR 体制和 SAR 模式,在物理实现上有两种技术途径,即单平台技术和多平台技术。单平台技术是指电磁波的发射和接收由处于相同空间位置处的同一部雷达和天线完成,现有的绝大多数 SAR 系统都采用这一方式。多平台技术则是指电磁波的发射和接收由处于不同空间位置处的两部或两部以上的雷达或天线完成的 SAR 技术,一般又将其称为分布式 SAR。同单平台技术相比,多平台技术的系统灵活性更强,可以更好地实现 SAR 各种对地观测功能,在高分辨率/宽测绘带成像、干涉测量和动目标检测等方面有明显的优势。同时,利用多颗卫星进行组网观测,还可以缩短 SAR 观测周期,提高 SAR 数据获取的时效性。多平台技术由于具有单平台技术不可比拟的优势,近年来受到 SAR 遥感领域的普遍关注,其中,双站 SAR 是多平台 SAR 的一种最简形式,它构成了后续更为复杂系统的基

础,因此,更成为了 SAR 领域的研究热点之一。1.2 节将单独针对双站 SAR 进行介绍。

1.2 双站 SAR 简介

1.2.1 双站 SAR 基本概念

双站 SAR 是多平台 SAR 的一种最简形式,它是指收发天线分置于两个不同平台的 SAR 系统,从信号处理的角度,也泛指同一个脉冲的收/发天线相位中心处于不同空间位置的 SAR 系统。在后者这一广义的层次,传统的单站 SAR 严格而言应为双站 SAR 的一种,因为脉冲经发射、地物散射至返回接收天线需经过一定的传播时间,由于 SAR 的运动,其在脉冲传播时间内已移动了一段距离,故同一脉冲的收/发时刻天线相位中心分处于不同的位置。然而,由于 SAR 运动速度与微波传播速度相比非常小,相位中心的移动可以忽略,可采用“停-走-停”(stop-go-stop)的近似认为收发位置重合。若无特殊说明,本书中双站 SAR 均指收发天线物理分离的情况。

1.2.2 双站 SAR 的优势及应用前景

与传统的单站 SAR 相比,双站 SAR 具有如下多个方面的优势及广阔的应用前景。

(1) 在军事应用上。由于接收机“静默”工作,双站 SAR 隐蔽性好,安全性高,抗干扰能力强;并且可以使用“远距发射、近距接收”的方式增加雷达作用距离,或降低发射功率以提高抗截获性能;另外,由于接收机不含大功率器件,其造价低廉,易于实现。

(2) 在干涉应用上。相比于双航过单站 SAR 的干涉,双站 SAR 可避免时间去相干,以提高干涉精度;相比于单站 SAR 双天线的干涉,双站 SAR 可以实现前者难以得到的长基线,从而提高高程测量的精度。

(3) 在地物的分类识别方面。双站 SAR 可得到目标不同方向的雷达截面积(radar cross section, RCS),有助于地表粗糙度及介电常数的获取(尤其是当单站 RCS 不是很强时)和地表杂波散射机理的研究;由于 RCS 随双站角而变化,双站 SAR 有助于提高图像分类和识别能力;在城区,双站 SAR 可避免建筑物顶部的强后向散射,降低图像动态范围,提高机动目标的信杂比。

(4) 在海洋应用领域。用双站 SAR 观测海洋可以得到更宽的海洋波谱,为 SAR 成像的海波模型引入显著的特征^[32,33]。

1.2.3 双站 SAR 的发展现状

鉴于上述优势,双站 SAR 技术引起了人们广泛的兴趣。涉及双站 SAR 技术的研究最早出现于 20 世纪 70 年代末。1977 年,美国 Xonics 公司研究表明,在双站模式下可以实现动目标检测和合成孔径成像。1979 年,Goodyear 公司和 Xonics 公司与美国空军签订合同,正式实施“战术双站雷达验证”计划,在 1983 年 5 月进行的试验中得到了不错的双站 SAR 图像,并成功地发现了隐蔽在树林中慢速运动的坦克。

20 世纪 80 年代后,美国有人提出了双站 SAR 的成像处理、数据校正处理、双星 SAR 成像系统,以及双站 SAR 自同步技术等有关专利。

进入 21 世纪后,由于定时精度、通信技术及导航技术的提高,双站 SAR 技术的发展掀起了新的热潮。关于双站 SAR 系统设计、同步技术、成像处理等各方面公开发表的文献日益增多,国际会议也对其投入了更多的关注。IGARSS 会议自 2002 年起就陆续出现关于双站 SAR 的文章,此后至今每年都设有“双/分布式 SAR”专题。2004 年起,EUSAR 会议也专门设立了双站 SAR 专题,发表了一系列关于双站 SAR 的特邀报告和学术论文。不但如此,一些技术发达国家已陆续开展了机载双站 SAR^[34~36]、地-机双站 SAR^[37,38]、星-地双站 SAR^[39] 和星-机双站 SAR^[40] 的试验,并得到了良好的图像。图 1.6 为英国于 2002 年开展的双站 SAR 实验所获得的图像。实验波段为 X 波段,收发天线均采用聚束模式,双站角约为 50° 。由于入射波和反射波方向不同,从图中可以明显看到树木的双阴影现象(见

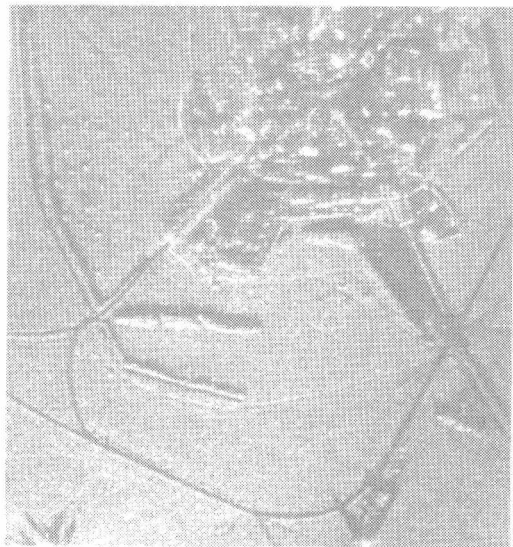


图 1.6 英国于 2002 年开展的双站 SAR 实验图像^[35]