

星载SAR 影像模拟与正射校正

XINGZAI SAR YINGXIANG MONI YU
ZHENGSHI JIAOZHENG

敖祖锐 常占强 张 晶 著



中国环境出版社

星载 SAR 影像模拟与正射校正

敖祖锐 常占强 张 晶 著

中国环境出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

星载 SAR 影像模拟与正射校正/敖祖锐, 常占强,
张晶著. —北京: 中国环境出版社, 2016.11

ISBN 978-7-5111-2947-5

I. ①星… II. ①敖…②常…③张… III. ①卫星
图像—图像处理—研究 IV. ①TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 276528 号

出 版 人 王新程
责任编辑 沈 建 郑中海
责任校对 尹 芳
封面设计 宋 瑞

出版发行 中国环境出版社
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67113412 (第二分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京中科印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2017 年 1 月第 1 版
印 次 2017 年 1 月第 1 次印刷
开 本 880×1230 1/32
印 张 4.5
字 数 105 千字
定 价 20.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种极具潜力的空间观测技术, 在地形测绘、资源勘探、灾害监测、军事侦察等方面表现出很好的应用前景。与传统光学遥感手段相比, SAR 技术具有全天时、全天候、覆盖范围大、几乎不受云雨天气制约等突出优势, 已成为测绘困难地区数据获取的重要手段之一。近年来, 国家西部测图工程、全国土地调查专项工程等国家重大专项战略的实施, 更加剧了对 SAR 系统的迫切需求。

在 SAR 系统的研制、设计及影像处理过程中, SAR 影像模拟技术起着至关重要的作用。在系统设计时, 利用 SAR 影像模拟技术, 可模拟 SAR 系统工作过程, 根据地面高程信息生成仿真 SAR 影像, 以验证 SAR 系统参数的合理性, 并在此基础上进行优化。在图像处理中, SAR 模拟技术得到的回波数据可以用于 SAR 系统成像算法的验证以及影像中的目标识别。InSAR 技术是合成孔径雷达遥感技术与射电天文干涉技术的结晶, 是现代空间对地观测技术的一次革命性飞跃。其中, 实现 SAR 影像模拟是进行二轨法 SAR 干涉处理、获取地面沉降信息的关键步骤之一。另外, SAR 影像模拟技术还有助于揭示 SAR 成像过程中电磁波与

不同地面目标互相作用的过程和机理,为地面目标的分类和参数反演提供数据来源,在多云雾地区,传统光学遥感受观测条件所限并不能获取到精确的地面信息,通过 SAR 影像模拟技术获取可用数据源更显得极其重要。可见,开展 SAR 影像模拟技术与方法研究对于 SAR 理论研究及其扩展应用具有重要的现实意义。

鉴于此,本书在深入研究 SAR 成像机制的基础上,提出了一种基于 RD-Muhleman 模型的 SAR 影像模拟方法,并选取了多个具有代表性的研究区,从毗邻渤海湾的华北平原北部边缘到“世界屋脊”青藏高原,根据地形地貌分为平原-丘陵、盆地-山区、高原-山区三个阶梯进行试验,分别对具有不同轨道精度、不同传感器类型、不同工作波段的多个 SAR 系统进行影像模拟,以验证所提出的 SAR 模拟方法的正确性、可行性及普适性。

SAR 在地表信息获取与地面观测方面受到一些不利因素的影响,特别是影像中的几何畸变问题,严重制约了 SAR 技术的应用,这就需要通过有效手段对 SAR 影像进行高精度的几何校正。目前,SAR 影像的几何校正处理主要借助于传统光学图像的处理方式。然而,光学遥感成像机制与 SAR 影像的成像机制之间存在显著差异,往往难以满足高精度应用需求。为此,本书立足于从 SAR 成像机理出发对 SAR 图像进行正射校正处理,在模拟 SAR 影像的基础上,结合 SAR 影像的几何和辐射特点提出了基于尺度不变特征的自动配准与正射校正方法,深入探讨了 SAR 影像模拟技术在正射校正中的应用。

本书是在总结国内外相关研究成果和作者从事 SAR 研究工作的基础上撰写完成的。全书的组织结构包括:第 1 章详细介绍了 SAR 的历史与现状、发展趋势以及 SAR 影像模拟的应用与意

义;第2章阐述了 SAR 成像基本原理和影像特征;第3章着重围绕 SAR 影像模拟关键技术展开论述;第4章提出了利用 RD-Muhleman 模型进行 SAR 影像模拟的方法,针对多种 SAR 系统进行了影像模拟实验,并对试验结果进行了综合评价;第5章探讨了基于 SAR 影像模拟的正射校正方法,并进行算法试验和精度评价,进一步验证了所提出的 SAR 影像模拟方法的正确性与可行性。

在进行 SAR 影像模拟实验过程中,中国地震局的张景发研究员,首都师范大学资源环境与旅游学院的余洁教授、谢东海博士、张志强博士等提出了建设性的意见与建议,在此表示衷心感谢!本书的撰写过程中,课题组的博士研究生薛腾飞,硕士研究生杨冉冉、姚骐、赵超为文稿的整理、校正做了大量工作;中国环境出版社的沈建副总编辑为本书的出版做出了很大努力,在此一并深表谢意。

本书是由国家自然科学基金重点项目(No. 41130043)、国家自然科学基金项目(No. 41671417)、国家高技术研究发展计划项目(863 计划, No. 2012AA1213-04)、教育部创新团队项目(No. IRT1271)、北京市自然科学基金项目(No. 8142009)联合资助出版,在此表示特别感谢!

由于作者水平所限,书中难免存在错误与不妥之处,敬请广大读者不吝指正。

目 录

第 1 章 合成孔径雷达概论	1
1.1 SAR 的历史与现状	2
1.1.1 PALSAR	4
1.1.2 COSMO-SkyMed	6
1.1.3 TerraSAR-X	7
1.1.4 RadarSAT-2	9
1.1.5 Sentinel-1	11
1.2 SAR 技术的发展趋势	13
1.2.1 高分辨率宽幅 SAR 成像技术	13
1.2.2 多基星载 SAR 技术	15
1.2.3 多极化 SAR 技术	17
1.2.4 多模式星载 SAR 技术	18
1.2.5 星载 SAR 图像质量提升技术	19
1.3 SAR 影像模拟的应用及意义	20
第 2 章 SAR 成像基本原理	24
2.1 真实孔径雷达成像原理	24

2.2	合成孔径雷达成像原理	27
2.3	SAR 成像处理方法	29
2.3.1	距离徙动	31
2.3.2	距离-多普勒 (RD) 算法	37
2.3.3	线频调空变平移算法 (Chirp Scaling)	41
2.4	SAR 影像特征	46
2.4.1	几何特征	46
2.4.2	SAR 影像的辐射特征	48
第 3 章	SAR 影像模拟原理	52
3.1	坐标系统及其转换	52
3.2	卫星轨道的描述	55
3.2.1	多项式轨道拟合法	55
3.2.2	开普勒轨道根数描述法	56
3.2.3	插值方法	59
3.3	定位模型的建立	60
3.3.1	基于等效中心投影的共线方程定位模型	60
3.3.2	距离-多普勒模型	62
3.3.3	有理多项式函数模型	63
3.4	图像灰度值模拟	65
3.5	灰度重采样	66
第 4 章	SAR 影像模拟方法与具体实现	68
4.1	RD-Muhleman 模型简介	68
4.2	利用 RD-Muhleman 模型进行 SAR 影像模拟	70
4.2.1	坐标系统的统一	72

4.2.2	SAR 成像点位置模拟	73
4.2.3	SAR 影像灰度值模拟	76
4.2.4	辅助数据产品生成	77
4.3	SAR 影像模拟实例与对比	79
4.3.1	平原—丘陵地貌的 SAR 影像模拟	80
4.3.2	盆地—山区地貌的 SAR 影像模拟	91
4.3.3	高原—山区地貌的 SAR 影像模拟	102
第 5 章	基于影像模拟技术的 SAR 影像正射校正	108
5.1	正射校正方法	111
5.1.1	SURF 算法	113
5.1.2	RANSAC 算法	120
5.2	正射校正流程	121
5.3	正射校正实例及精度评价	122
参考文献		128

第 1 章 合成孔径雷达概论

合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 是一种主动式微波成像传感器, 通过发射微波并接收地物的后向散射信号进行成像, 结合合成孔径技术对信号进行处理, 将多个较小尺寸的真实天线合成为一个大尺寸等效天线, 实现高分辨率成像。与传统光学遥感手段相比, SAR 具备全天候、全天时成像能力, 还有一定的穿透性, 可以穿透地表或植被获取被掩盖的信息, 是一种具有独特优势的地面观测手段。通过目标在 SAR 图像中的微波散射特性, 能够对目标进行探测与识别, 目前, SAR 已被广泛应用于军事和民生领域, 是实现军事侦察、资源调查、灾害监测等的重要技术手段。

由于星载 SAR 具有全球大范围高分辨率成像的能力, 因此从 1978 年美国发射第一颗 SAR 卫星 SEASAT 开始, 世界各国都开始进行星载 SAR 技术研究。尤其是近 10 年来, 随着空间信息技术的发展, 星载 SAR 正日益成为空间观测领域的研究热点。目前, 全球有 20 多个在轨运行的星载 SAR 系统, 包括 PALSAR-1/2、TerraSAR、COSMO-SkyMed SAR、RadarSAT-2SAR、SentinelSAR 等。同时, 各国也纷纷拟定了星载 SAR 系统发射计划。在未来几

年内,美国计划发展约10个星载SAR系统,欧空局计划发展约14个星载SAR系统,德国计划发展约5个星载SAR系统,日本计划发展2~4个星载SAR系统。

纵观星载SAR技术的发展历程,其经历了早期的孕育期(1970—1990年)、成长期(1990—2000年)到目前的蓬勃期(2000年至今),整个发展趋势已经从传统的单项技术突破转变为概念体制的更新,各种面向不同应用需求的先进星载SAR系统不断出现,呈现出工作模式多样化、分辨能力精细化、空间布局层次化的特点。

1.1 SAR的历史与现状

1951年,Carl Wiley首次利用多普勒频移技术将雷达的方位向分辨率改善至米级,标志着SAR的诞生。1953年7月,伊利诺伊大学的Sherwin等用机载X波段相干脉冲雷达对地面和海面的反射信号进行研究,得到了第一张非聚焦型的合成孔径雷达图。1953年夏,在美国密歇根大学的一个暑期讨论会上,许多学者提出了合成孔径的新概念,并认识到合成孔径的工作方式有聚焦和非聚焦之分。1957年8月,在密歇根大学和美国军方的联合攻关之下,世界上第一台机载SAR应用样机研制成功并进行了飞行试验,获得了第一张大面积的聚焦型合成孔径雷达图像。从此,合成孔径雷达得到了世界的广泛认可,并开始迅速发展。

在星载SAR技术取得进展后,美国于1978年6月发射了世界上第一个搭载SAR系统的卫星Seasat-A。此后不久,美国又开始研制高分辨率军事雷达卫星——Lacrosse,其分辨率优于1m。20世纪80年代,两颗对地观测的航天飞机成像雷达SIR-A和

SIR-B 分别进入太空, 获取了地球表面 $1\,600\text{万 km}^2$ 的雷达图像。进入 90 年代, 随着技术的逐步成熟及需求程度的加强, 星载雷达遥感呈现出空前的高潮。1991 年 3 月, 苏联把 S 波段的 ALMAZ-1 (金刚石 1 号) 卫星雷达送入轨道; 同年 7 月, 欧空局把 C 波段 SAR 卫星 ERS-1 遥感卫星发射升空, 并于 1995 年 4 月发射了 ERS-2; 1992 年 2 月, 日本成功发射了 L 波段 SAR 卫星 JERS-1; 1995 年, 加拿大成功发射了 C 波段 SAR 卫星 RadarSAT-1。2000 年 2 月 11 日, “奋进号” 航天飞机开展了为期 11 天的航天飞机雷达地形测绘任务, 即 Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)。此次测图任务获取北纬 60° 至南纬 60° 之间总面积超过 1.19亿 km^2 的雷达影像数据, 覆盖地球 80% 以上的陆地表面, 经过两年多的数据处理, 制成了数字地形高程模型 (DEM), 即现在的 SRTM 地形产品数据, 展示了 SAR 的巨大应用价值与潜力。

近十多年来, 国际上多个高分辨率卫星 SAR 系统相继发射升空, 如日本的 L 波段 SAR 卫星 PALSAR, 提供全极化 SAR 数据, 具备一定的干涉能力, 最高分辨率可达 8m ; 加拿大 RadarSAT-2 提供高分辨率的全极化影像, 最高分辨率可达 3m ; 意大利的 COSMO-SkyMed 系统, 最高分辨率可达 1m ; 德国的 TerraSAR-X 和 TanDEM-X, 最高分辨率可达 1m , 而且两者联合可用于全球高精度 DEM 的获取; 2014 年 4 月, 欧空局发射了 Sentinel-1A, 其 Stripmap 模式的空间分辨率达到 5m , 具有双极化、短重访周期、可精确确定卫星位置和姿态角等特点, 目前, 该数据已对用户免费开放, 大大丰富了可用 SAR 数据源。

1.1.1 PALSAR

PALSAR 是由日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace

Exploration Agency, JAXA) 和日本资源观测系统组织 (Japan Resources Observation System Organization, JAROS) 联合研发的主动式微波传感器, 是 JERS-1 的后继星。它利用 L 波段进行陆地观测, 入射角范围可达 $8^{\circ} \sim 60^{\circ}$, 其优点是不受云的干扰, 可昼夜进行观测。PALSAR 采用了卫星精确定位和姿态控制技术, 性能比 JERS-1SAR 更优越, 其主要参数信息如表 1-1 所示。

表 1-1 PALSAR 传感器主要参数信息

模式	高分辨率模式		扫描式合成孔径雷达	极化 (试验模式)
线性调频宽度 (Chirp Bandwidth)	28MHz	14MHz	14MHz, 28MHz	14MHz
极化方式	HH 或 VV	HH+HV 或 VV+VH	HH 或 VV	HH+HV+VH+VV
入射角	$8^{\circ} \sim 60^{\circ}$	$8^{\circ} \sim 60^{\circ}$	$18^{\circ} \sim 43^{\circ}$	$8^{\circ} \sim 30^{\circ}$
空间分辨率	7~44m	14~88m	100m (多视)	24~89m
幅宽	40~70km	40~70km	250~350km	20~65km
量化长度	5 位	5 位	5 位	3 位或 5 位
数据传输速率	240Mbit/s	240Mbit/s	120Mbit/s, 240Mbit/s	240Mbit/s
中心频率	1 270 MHz (L 波段)			

PALSAR 有 3 种工作模式, 如图 1-1 所示。运行中的常规模式为高分辨率 (Fine-resolution Beam, FB) 模式, 包括精细波束单极化模式 (Fine Beam Single polarization, FBS) 和精细波束双极化模式 (Fine Beam Dual polarization, FBD)。同时, PALSAR 设置了一个重要的观测模式, 即扫描模式 (ScanSAR), 该模式以空间分辨率为代价获取宽度达 250~350km 的合成孔径雷达影像, 比常规合成孔径雷达影像的幅宽高 3~4 倍。此外, PALSAR

还有极化模式 (Polarimetric)，可以获取单极化、双极化和全极化 SAR 数据。

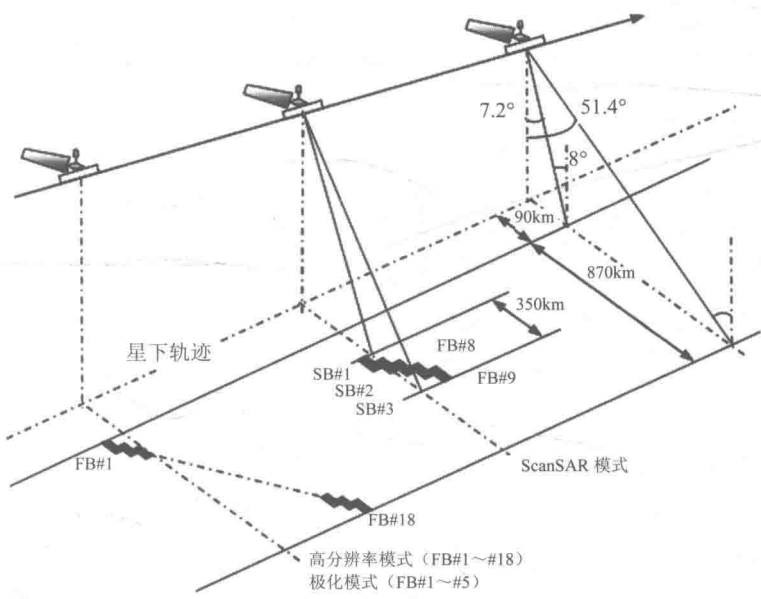


图 1-1 PALSAR 的观测模式示意图

ALOS PALSAR 传感器利用 L 波段多模式成像，提供高精度的轨道状态矢量，极大地丰富了对地观测雷达数据。PALSAR 特别适合用于大范围自然灾害的应急响应。同时，PALSAR 的全极化方式大大提高了分析地质结构、岩石分布的精度，对资源调查等非常有效，而且可获取植被信息，有助于全球范围内的植被监测、土地利用分类等工作的开展与进行。

1.1.2 COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed 是意大利宇航局和国防部建设的空间对地观测系统，它的星座由 4 颗太阳同步轨道卫星组成，每颗卫星都搭载具有多个成像模式的 X 波段合成孔径雷达。COSMO-SkyMed 是全球第一颗分辨率高达 1m 的 SAR 卫星。为了满足雷达干涉测量 (InSAR) 的要求，它的星座设计可实现观测时间间隔仅为 20s 的串飞模式，即 Tandem 模式，以降低时间去相干和大气效应对干涉测量的影响，还可提供多种系统响应模式，减少紧急情况下的重访周期。

COSMO-SkyMed 有四种波束模式：聚焦模式（包括民用的模式 2 和军用的模式 1）、条带模式（Himage 模式和 Pingpong 模式）、ScanSAR 模式（宽区域和大区域模式），如图 1-2 所示。

各种模式的特点如下：

(1) 聚焦模式：可以对 $10\text{km} \times 10\text{km}$ 区域进行成像，空间分辨率可达 1m。

(2) 条带 Himage 模式：能实现中分辨率、宽覆盖（空间分辨率 3m，幅宽 40km）观测成像；条带 Pingpong 模式能实现中分辨率、中覆盖、多极化方式成像，空间分辨率 15m，幅宽 30km。

(3) ScanSAR 模式：可实现幅宽 100km 或 200km 的大范围成像，其空间分辨率分别为 30m 或 100m。

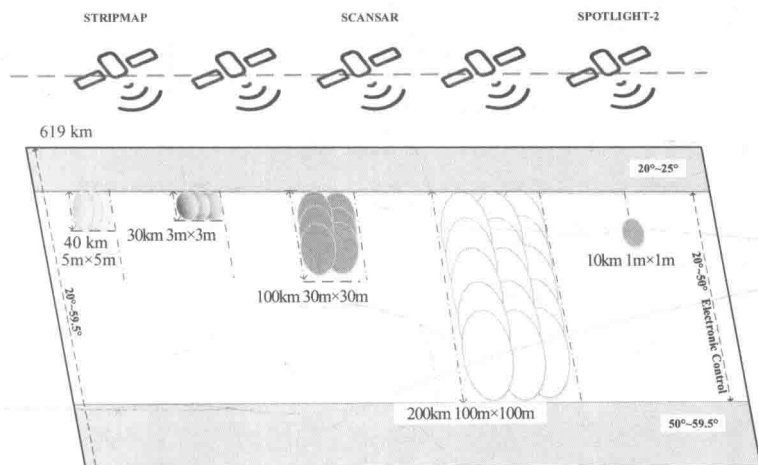


图 1-2 COSMO-SkyMed 成像模式示意图

1.1.3 TerraSAR-X

TerraSAR-X 卫星为德国研制的一颗高分辨率雷达卫星,携带一颗高频率的 X 波段合成孔径雷达传感器,可以聚束式、条带式 and 推扫式三种模式成像(图 1-3),并拥有多种极化方式。可全天时、全天候地获取用户要求的任一成像区域的高分辨率影像。

宽扫描成像模式即 ScanSAR 模式,该模式下获取的数据幅宽较大,而空间分辨率相对较低。通过雷达波束在两个或两个以上子测绘带之间的转换来实现超宽测绘带成像,其实际观测区域包含 4 个子观测带,极化方式为单极化(HH 或 VV),成像分辨率约为 16m,景幅大小约为 100km×150km。

条带扫描模式即 Stripmap 模式,通过将天线指向固定为飞行方向,使天线的轨迹在观测区域表面形成一个条带,是最常用的

成像模式。其极化方式为单极化 (HH 或 VV)、双极化 (HH+HH、HH+HV、VV+VH) 和全极化 (HH+VV+HV+VH) 三种。随着极化方式的不同, 成像分辨率也有所差异: 单极化方式成像分辨率为 3m, 而双极化方式成像分辨率为 6m。相应地, 在单极化成像方式下景幅大小为 30km×50km, 而双极化成像方式下景幅大小为 15km×50km。

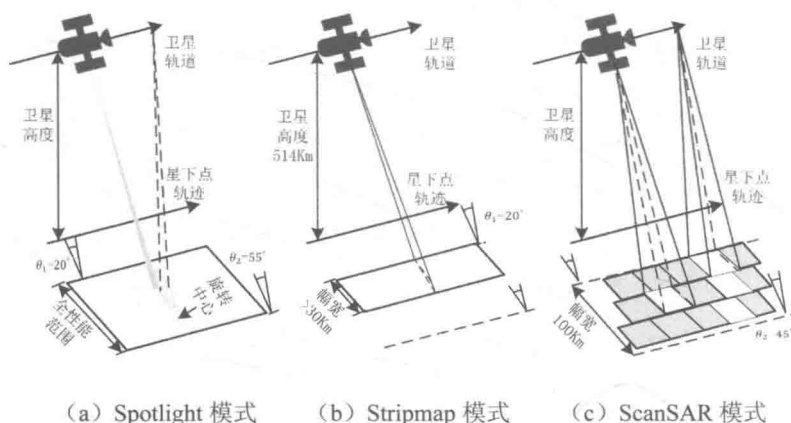


图 1-3 TerraSAR-X 成像模式示意图

聚束成像模式即 Spotlight 模式, 是 TerraSAR-X 的最高分辨率拍摄模式。该模式下控制雷达天线在整个成像时段内持续长时间照射观测区域, 以此增加天线的合成孔径长度, 提高方位分辨率。其极化方式为单极化 (HH 或 VV) 和双极化 (HH+HV)。相应地, 在单极化成像方式下, 成像分辨率为 1m, 景幅大小为 10km×10km; 而双极化方式成像下的分辨率为 2m, 景幅大小为 5km×10km。

TerraSAR-X 卫星在系统参数和轨道设计方面重点考虑了干