

航天高分辨率数据几何处理丛书

Research on High-resolution SAR Satellite
Standard Product Classification System

高分辨率SAR卫星 标准产品分级体系研究

张过
李贞
王霞
王兴玲
著



测绘出版社

航天高分辨率数据几何处理丛书

高分辨率 SAR 卫星标准产品 分级体系研究

Research on High-resolution SAR Satellite Standard
Product Classification System

张过 李贞 王霞 王兴玲 著

测绘出版社

·北京·

© 张过 李贞 王霞 王兴玲 2012

所有权利(含信息网络传播权)保留,未经许可,不得以任何方式使用。

内 容 简 介

本书主要介绍了国内外高分辨率商业合成孔径雷达(SAR)遥感卫星的发展现状及其相应产品的标准化现状。针对星载 SAR 传感器的特点,结合国内外标准产品分级的优缺点,提出了一套适用于高分辨率 SAR 卫星的标准产品分级体系,包括单视斜距复影像(SLC)产品、多视地距(MGD)产品、系统几何纠正(GEC)产品、精纠正(eGEC)产品、正射纠正(GTC)产品,并在此基础上详细叙述了各级产品的制作流程。针对这套方案,本书利用 TerraSAR-X、COSMO-SkyMed 等数据进行了验证。为便于科研和生产人员实现本书中的方案,书中还介绍了星载 SAR 传感器的严密成像几何模型和有理多项式系数(RPC)模型以及相应的正反变换等。

本书可供测绘、国土、航天、规划、农业、林业、资源环境、遥感、地理等空间地理信息相关行业的生产技术人员和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分辨率 SAR 卫星标准产品分级体系研究/张过等著. —北京:测绘出版社, 2012. 11

ISBN 978-7-5030-2571-6

I. ①高… II. ①张… III. ①高分辨率—遥感卫星—分级系统—研究 IV. ①V474.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 072516 号

责任编辑	万茜婷	封面设计	李 伟	责任校对	董玉珍
出版发行	测绘出版社	电 话	010—83060872(发行部)		
地 址	北京市西城区三里河路 50 号		010—68531609(门市部)		
邮政编码	100045		010—68531160(编辑部)		
电子信箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com		
印 刷	北京金吉士印刷有限责任公司	经 销	新华书店		
成品规格	184mm×260mm				
印 张	4.5	字 数	100 千字		
版 次	2012 年 11 月第 1 版	印 次	2012 年 11 月第 1 次印刷		
印 数	0001—1000	定 价	29.00 元		

书 号 ISBN 978-7-5030-2571-6/P·577

本书如有印装质量问题,请与我社门市部联系调换。

前 言

美国国家航空航天局(NASA)喷气推进实验室(JPL)于1978年6月28日发射了第一颗合成孔径雷达(SAR)卫星 Seasat。1981年和1984年JPL又利用航天飞机成功地发射了SIR-A和SIR-B卫星。1991—1995年,相继有ERS-1(欧洲空间局)、JERS-1(日本)、SIR-C(美国)、Radarsat-1(加拿大)和ERS-2(欧洲空间局)等雷达卫星发射成功,为星载SAR技术研究提供了数据保证。其他SAR卫星还包括:NASA研制的LightSAR,于2002年7月1日发射;欧洲空间局研制的Envisat卫星,于2002年6月发射;日本宇宙开发事业团(NASDA)和日本资源观测系统组织(JAROS)联合研制的ALOS卫星,于2006年1月24日发射,其搭载的PALSAR为L波段、全极化的传感器;加拿大空间局研制的Radarsat-2卫星,于2007年12月14日发射,它继承了Radarsat-1的优点,具有12种波束模式,尤其具有全极化功能;德国航空航天中心(DLR)研制的TerraSAR-X卫星,于2007年6月15日发射;意大利的COSMO-SkyMed系列卫星,共4颗现已全部发射,最近的一颗COSMO-SkyMed 4于2010年11月5日由Delta-2火箭成功发射升空。其中,TerraSAR-X、Radarsat-2和COSMO-SkyMed为高分辨率、多极化、多模式的雷达卫星。为了适应不同用户遥感影像处理能力的不同以及对定位精度要求的差异等,影像供应商会制作不同处理级别的影像以供用户选择。由于卫星设计的差异以及处理方案的不同,各卫星公司的影像产品分级方式差异巨大,处理精度也各不相同。

本书从SAR传感器特点出发,分析了各种高分辨率SAR影像产品分级方案的优缺点,基于高分辨率SAR卫星影像和RPC模型的特点,针对不同的几何处理级别,提出了一套影像产品的分级方案。本书中提出的高分辨率SAR影像产品分级方案,可为我国自己发射的高分辨率SAR卫星的影像分级方案提供借鉴。

本书共分为6章。第1章介绍了国内外高分辨率SAR卫星的发展现状,给出了常见的国内外高分辨率卫星的传感器及其特点;第2章介绍了高分辨率SAR卫星影像产品标准化现状及其相应的优缺点;第3章提出了高分辨率SAR卫星标准产品分级体系,并给出了各个产品的定义;第4章给出了各个产品的制作流程,并从理论上分析得出各项产品的制作流程不会损失几何精度;第5章介绍了SAR传感器严密成像几何模型的建立及其正反算方法,并给出了作为产品的RPC参数的求解方式及其正反算方式,用于进一步补充第4章中所用到的技术;第6章利用TerraSAR-X、COSMO-SkyMed等数据对本书提出的分级方案进行了验证,最终结果表明本书的方法是一种可行、通用的方式。

本书的研究得到了国家科技支撑计划项目“资源三号卫星立体测图标准与规范研究”(2011BAB01B01)、“地理国情监测应用服务”(2012BAH28B04)和国家自然科学基金重点

项目“多源高分辨率卫星影像的几何精处理、特征提取与智能化分类”(40930532)等课题的资助。

书中不足之处在所难免,欢迎广大读者批评指正。

目 录

第 1 章 高分辨率 SAR 卫星发展现状	1
§ 1.1 国外高分辨率 SAR 卫星发展现状	1
§ 1.2 国内高分辨率 SAR 卫星发展现状	8
第 2 章 高分辨率 SAR 卫星产品标准化现状	10
§ 2.1 TerraSAR-X 卫星产品分级体系	10
§ 2.2 Radarsat-2 卫星产品分级体系	11
§ 2.3 COSMO-SkyMed 卫星产品分级体系	12
§ 2.4 ALOS 卫星的 PALSAR 产品分级体系	13
§ 2.5 中国资源卫星应用中心 SAR 数据产品分级体系	13
第 3 章 高分辨率 SAR 卫星标准产品分级体系	15
§ 3.1 高分辨率 SAR 卫星标准分级产品	16
§ 3.2 高分辨率 SAR 卫星标准产品分级体系与其他 SAR 卫星产品分级体系 的对应关系	17
第 4 章 高分辨率 SAR 卫星标准分级产品的制作流程	18
§ 4.1 SLC 产品的制作流程	18
§ 4.2 MGD 产品的制作流程	19
§ 4.3 GEC 产品的制作流程	21
§ 4.4 eGEC 产品的制作流程	22
§ 4.5 GTC 产品的制作流程	24
第 5 章 高分辨率 SAR 卫星标准分级产品制作的基本算法	25
§ 5.1 高分辨率 SAR 卫星成像处理	25
§ 5.2 SLC 产品与 MGD 产品的严密成像几何模型	27
§ 5.3 GEC 产品的严密成像几何模型	35
§ 5.4 高分辨率 SAR 卫星轨道内插模型	37
§ 5.5 高分辨率 SAR 卫星 RPC 模型	38

第 6 章 高分辨率 SAR 卫星标准产品分级体系验证	57
§ 6.1 实验数据说明	57
§ 6.2 SLC 产品与 MGD 产品的 RPC 求解实验	58
§ 6.3 GEC 产品的 RPC 求解实验	60
§ 6.4 单片定向实验	61
§ 6.5 前方交会实验	62
§ 6.6 RPC 轨道产品精度验证	62
参考文献	64

第 1 章 高分辨率 SAR 卫星发展现状

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)因其不受天气条件限制能够穿透地表进行大面积、远距离的观测,并具有高分辨率、侧视成像的特点,备受地球科学以及相关领域研究人员的重视,近年来得到了迅速而蓬勃的发展。

从 1978 年美国发射第一颗 SAR 卫星 Seasat 开始,很多国家都在大力开展星载 SAR 系统的研究。早期的典型成像雷达系统有日本的 JERS-1(Japanese Earth Resource Satellite-1)、欧洲空间局的 ERS-1/2(European Remote Sensing Satellite-1/2)、加拿大的 Radarsat-1 等,这些都是单波段、单极化成像雷达系统。随着航天遥感技术的发展,星载 SAR 的技术水平和工作性能不断提高,并向着小型化、多功能、多模式、多星协作的方向发展,不仅提高了 SAR 卫星系统的观测时效性和遥感数据完备性,实现了观测区域的最大化,还增强了 SAR 卫星的分辨率以及在复杂电磁环境下抗干扰、识别目标等能力。科学技术的进步和星载 SAR 应用范围的不断扩大,将进一步促进 SAR 卫星技术的发展,其应用效果将会更加显著,其发展前景也将会更加广阔。

§ 1.1 国外高分辨率 SAR 卫星发展现状

美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, JPL)于 1978 年 6 月 28 日发射了第一颗 SAR 卫星 Seasat(L 波段, HH 极化)。1981 年和 1984 年 JPL 利用航天飞机又分别成功地发射了具有 L 波段、HH 极化的卫星 SIR-A(Shuttle Imaging Radar-A)和 SIR-B,其中 SIR-B 为可变视角。1991—1995 年,相继有欧洲空间局的 ERS-1(European Remote Sensing Satellite-1)、日本的 JERS-1(Japanese Earth Resource Satellite-1)、美国的 SIR-C、加拿大的 Radarsat-1 和欧洲空间局的 ERS-2 等雷达卫星发射成功,为星载 SAR 技术研究提供了数据保证。

近来许多国家又先后研发了新一代的 SAR 卫星。比较具有代表性的有:①Light-SAR(Light Synthetic Aperture Radar)卫星,由美国 NASA 研制,于 2002 年 7 月 1 日发射;②Envisat 卫星,由欧洲空间局研制,于 2002 年 6 月发射;③ALOS(Advanced Land Observing Satellite),由日本宇宙开发事业团(NASDA)和日本资源观测系统组织(JAROS)联合研制,于 2006 年 1 月 24 日发射,其搭载的 PALSAR 为 L 波段、全极化的传感器;④Radarsat-2 卫星,由加拿大空间局研制,于 2007 年 12 月 14 日发射,它继承了 Radarsat-1 的优点,具有 12 种波束模式,尤其具有全极化功能;⑤德国的 TerraSAR-X 卫

星,于 2007 年 6 月 15 日发射,是一颗兼顾科学研究和商业运行的高分辨率 SAR 卫星,鉴于其稳定并精确的轨道定位能力,可为 PS-InSAR 应用提供理想的数据源;⑥意大利的 COSMO-SkyMed 系列卫星,现已发射 4 颗,最近的一颗 COSMO-SkyMed 4 于 2010 年 11 月 5 日由 Delta-2 火箭成功发射升空,该项目称为“COSMO-SkyMed 星座”,由 4 颗 X 波段的 SAR 卫星组成。其中,TerraSAR-X、Radarsat-2 和 COSMO-SkyMed 为高分辨率、多极化、多模式的雷达卫星。表 1-1 列出了国外部分高分辨率 SAR 卫星。

表 1-1 国外部分高分辨率 SAR 卫星

卫星名称	所属国家或地区	发射时间	工作波段与极化方式	分辨率/m
Radasat-1	加拿大	1995 年	C 波段 HH	9
Radasat-2	加拿大	2007 年	L 波段 全极化	3
SRTM	美国	2000 年	C 和 X 波段 HH、VV、HV、VH	30、90
ERS-2	欧洲	1995 年	C 波段 VV	26
Envisat	欧洲	2002 年	C 波段 多极化	10、30、150、1 000
COSMO-SkyMed 1/2/3/4	意大利	2007 年/2008 年/ 2008 年/2010 年	X 波段 多极化	1、3、15、20、100
TerraSAR-X/L	德国	2007 年/2009 年	X 波段/L 波段 全极化/双极化	1、3、16
TanDEM-X	德国	2009 年		1
Risat	印度	2007 年		3

1.1.1 TerraSAR-X

TerraSAR-X 计划于 1997 年启动,由德国联邦教育科研部、德国航空航天中心和 Astrium GmbH 公司三家单位合作研制,并于 2007 年 6 月发射升空。TerraSAR-X 是一颗新的高分辨率 SAR 卫星,其搭载的 SAR 传感器工作于 X 波段,波长 3.2 cm,采用多极化、多模式成像。这颗卫星外形近似于六角形的棱柱,长约 5.2 m,直径约为 2.3 m。发射重量 1 000 kg 以上,其主要技术参数分别见表 1-2 和表 1-3。

TerraSAR-X 有多种成像模式,这些成像模式可以采用不同的极化方式——单极化、双极化、全极化。其传感器成像模式如图 1-1 所示,图中的 H_s 、 S_o 、 N_t 、 S_w 分别表示飞行

高度、卫星轨道、近地航向和距离向扫描宽度,入射角范围为 $[\theta_1, \theta_2]$ 。

表 1-2 TerraSAR-X 卫星设备参数

雷达载荷频率		9.65 GHz
射频功率		2 kW
入射角范围	条带模式或扫描模式	$20^\circ \sim 45^\circ$ (全性能范围); $5^\circ \sim 60^\circ$ (允许范围)
	聚束模式	$20^\circ \sim 55^\circ$ (全性能范围); $15^\circ \sim 60^\circ$ (允许范围)
极化方式		单极化、多极化和全极化
天线尺寸		4.8 m \times 0.7 m \times 0.15 m
侧视方向		右侧视
仰角波束数	条带模式或扫描模式	12(全性能范围);27(允许范围)
	聚束模式	91(全性能范围);122(允许范围)
方位角波束数		249(聚束模式)
脉冲重复频率		2.0~6.5 kHz

表 1-3 TerraSAR-X 卫星轨道和姿态参数

轨道高度	514 km
日轨道数	$15 \frac{2}{11}$
重访周期	11 天
轨道倾角	97.44°
升交点地方时	$18:00 \pm 0.25$ h
姿态控制	全零多普勒控制

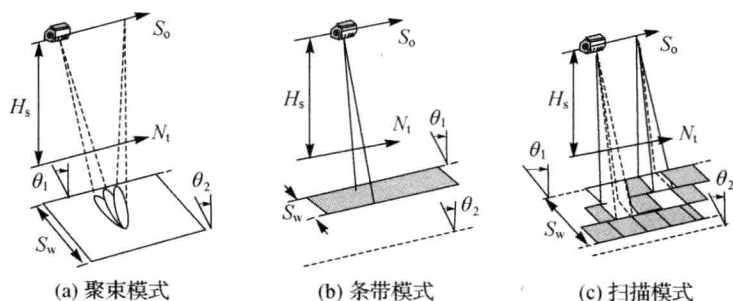


图 1-1 TerraSAR-X 传感器成像模式几何示意图

1. 聚束成像模式

聚束成像模式(spotlight mode)的主要特点包括几何分辨率高,入射角可选,采用多种极化方式等。聚束模式能够适应市场需求,提供多种成像方式的雷达影像数据产品。

以聚束模式获取的数据产品加上精密轨道数据,可以用于重复轨道干涉测量并获得观测目标区域的数字高程模型(digital elevation model,DEM)。

2. 条带成像模式

条带成像模式(stripmap mode)以入射角固定的波束沿航向推扫成像。这种模式的主要特点包括几何分辨率高,覆盖范围较大,入射角可选等。以条带模式获取的数据产品加上精密轨道数据,也可以用于重复轨道干涉测量并获得观测目标区域的 DEM。

3. 扫描成像模式

扫描(scanSAR mode)成像模式的天线(雷达波束)在成像时沿距离向扫描,从而使观测范围加宽,同时也将降低方位向分辨率。这种模式的特点包括中等几何分辨率,覆盖率高,能够平行获取多于 4 个扫描条带的影像,入射角可选,多种极化方式等。在扫描模式下,一周内 TerraSAR-X 能够以 16 m 的分辨率在全球任何地方覆盖大于 100 000 km² 的区域。

聚束模式、条带模式和扫描模式数据产品的参数见表 1-4,其中 M_1 、 M_2 、 M_3 分别表示聚束模式、条带模式和扫描模式下的数据产品, F_1 、 S_1 、 θ_m 、 F_2 、 S_2 、 J_m 分别表示方位向覆盖范围、距离向覆盖范围、入射角范围、方位向分辨率、距离向分辨率和极化方式。

表 1-4 聚束模式、条带模式和宽扫模式数据产品

数据产品 类型	F_1 /km	S_1 /km	$\theta_m/(\circ)$	F_2 /m	S_2 /m	J_m
M_1	10	15	20~55	2	1.3	单极化
M_2	可选	30	20~45	3	3	单极化
M_3	可选	100	20~45	15	16	多极化

根据应用领域的不同,聚束模式下获取的数据产品可分为两种,即高分辨率聚束模式(HS)数据和聚束模式数据。其中,高分辨率聚束模式数据的方位向覆盖范围为 5 km,方位向分辨率可达到 1 m。

TerraSAR-X 卫星是世界上第一颗民用领域分辨率达到 1 m 的雷达卫星,与以前 SAR 卫星主要被用于科学研究和军事等用途不同,它完全按照商业模式运作,主要为国土测绘、农业、林业部门、建设规划部门和矿业部门提供服务。

1.1.2 Radarsat-2

Radarsat-2 是由加拿大空间局(Canadian Space Agency,CSA)和 MDA(MacDonald, Dettwiler and Associates,Ltd.)公司联合出资开发的星载 SAR 系统。Radarsat-2 是加拿大继 Radarsat-1 之后的新一代商用 SAR 卫星。为了保持数据的连续性,Radarsat-2 继承了 Radarsat-1 所有的工作模式,并在原有的基础上增加了多极化成像、3 m 分辨率成像、双通道(dual channel)成像和运动目标检测实验(Moving Object Detection Experiment,MODEX)。Radarsat-2 与 Radarsat-1 拥有相同的轨道,但是 Radarsat-2 比 Radarsat-1 滞

后 30 min, 这是为了获得两星干涉数据。Radarsat-2 的用途是给用户 提供全极化方式的高分辨率的星载 SAR 影像, 在地形测绘、环境监测、海洋和冰川的观测等方面都有很高的应用价值, 其主要技术参数和系统参数见表 1-5 和表 1-6。

表 1-5 Radarsat-2 卫星参数

卫星种类	C 波段商用 SAR 卫星
发射时间	2007 年 12 月 14 日
轨道类型	太阳同步轨道
卫星高度	798 km(赤道上空)
重访周期	24 天
轨道周期	100.7 min
日轨道数	14
侧视方向	左右侧视
特征	11 种波束模式; 左右侧视缩短了重访周期; 丰富的极化信息

表 1-6 Radarsat-2 波束模式特征

波束模式	极化方式	入射角	标称分辨率		标称景大小
			距离向	方位向	
超精细	可选单极化: HH, VV, HV, VH	30°~40°	3 m	3 m	20 km×20 km
多视精细		30°~50°	8 m	8 m	50 km×50 km
精细	可选单极化: HH, VV, HV, VH	30°~50°	8 m	8 m	50 km×50 km
标准		20°~49°	25 m	26 m	100 km×100 km
宽	可选双极化: HH+HV, VV+VH	20°~45°	30 m	26 m	150 km×150 km
四极化精细	四极化: HH+VV+HV+VH	20°~41°	12 m	8 m	25 km×25 km
四极化标准		20°~41°	25 m	8 m	25 km×25 km
高人射角	单极化: HH	49°~60°	18 m	26 m	75 km×75 km
窄幅扫描	可选单极化: HH, VV, HV, VH	20°~46°	50 m	50 m	300 km×300 km
宽幅扫描		可选双极化: HH+HV, VV+VH	20°~49°	100 m	100 m

1.1.3 COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed(即宇宙-地中海观测卫星)系统是由 4 颗低轨中型卫星形成的星座

和军民两用地面数据分发机构组成的,其星座中的每颗卫星携带一个 X 波段、高分辨率、多极化 SAR 传感器。传感器的研制与生产由意大利阿莱尼亚航天公司(Alenia Spazio)和法国阿尔卡特公司合作研制完成。这 4 颗卫星能够实现针对大范围较低分辨率观测的扫描成像模式和针对小范围高分辨率观测的聚束成像模式其总体指标见表 1-7。

表 1-7 COSMO-SkyMed 总体指标

轨道类型	近极地太阳同步轨道
轨道高度	619.5 km
轨道倾角	97.86°
日轨道数	14.812 5
重访周期	16 天
偏心率	0.001 18
近地点	90°
半轴长	7 003.52 km
升交点地方时	6:00am
卫星数	4
轨道定相	90°
天线	采用配分射频功率放大与中频功率相移器结合,使波束可以在俯仰平面实现一维可调;由铝基碳纤维增强塑料制作,成带槽状波导,波束形成网络;3 个固定仰角波束宽度可以相互转换,保证星下点侧视范围在 20°~55°
天线尺寸	6 m×1.2 m
带宽	300 MHz
脉冲重复频率	3 000 Hz
平均功率	300 W
峰值功率	3.2 kW
数据压缩比	6 : 3
数据率	约 200 Mb/s
下行数据通道	X 波段
功耗	1.2 kW
重量	200 kg

COSMO-SkyMed 星座可以以两种基本模式运行:一种是常规轨道模式(nominal orbital configuration),另一种是干涉轨道模式(interferometric orbital configuration),如图 1-2 所示。

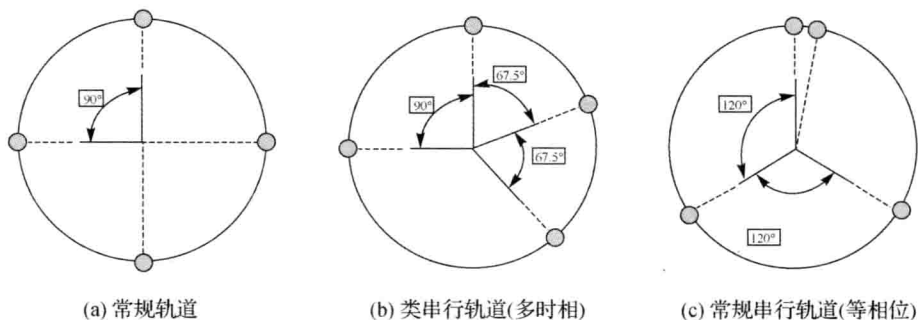


图 1-2 COSMO-SkyMed 星座轨道运行模式示意图

1. 常规轨道模式

对于对地观测而言,常规轨道模式的关键是保证卫星重复通过同一地区。这要求星下点保持在一个给定范围内变化(容许误差在 1 km 以内),而这需要卫星的主动空间推进器来维持整个星座轨道的几何特性。

2. 干涉轨道模式

干涉轨道模式主要用于实现 InSAR 测量,所以在这一模式下运行的卫星要保持其基线的变动范围在 100~3 500 m 内。因此,在干涉轨道模式下运行的卫星不但和常规轨道模式一样需要控制星下点,同时还要维持干涉基线在合理范围内。该模式对基线的控制有两种方式,即类串行(tandem)干涉轨道(时间间隔一天)和常规串行干涉轨道(时间间隔 20 s),并提供同一轨道平面内两颗卫星形成干涉和不同轨道上两颗卫星形成干涉的两种模式。

COSMO-SkyMed 系统的特点使其数据在以下几方面能得到广泛的应用:针对各种灾害处理的地面监测,国土安全监测,资源环境监测,海洋和海岸线控制,地形测绘,军事应用,科研机构 and 大专院校的学术应用以及各种商业应用等。

1.1.4 ALOS 的 PALSAR

日本 NASDA 机构于 1993 年开始了先进陆地观测卫星(Advanced Land Observing Satellite, ALOS)系统的概念性研究以及相应的遥感传感器制造和试验研究,直到 2006 年 1 月 24 日发射。ALOS 卫星携带的相控阵型 L 波段合成孔径雷达(Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar, PALSAR)可实现全天候的陆地观测,在测图、区域性观测、灾害监测、资源调查等方面做出了重要的贡献。

ALOS 的 PALSAR 系统参数见表 1-8。

表 1-8 ALOS 的 PALSAR 系统参数

轨道参数	类型	准太阳同步重访轨道		
	高度	691.65 km(赤道上空)		
	倾角	98.16°		
	重访周期	46 天		
工作频率	1 270 MHz(L 波段)			
工作模式	高分辨率模式 (high resolution)		扫描模式 (scanSAR)	全极化模式
极化方式	HH 或 VV	HH/HV 或 VV/VH	HH 或 VV	HH+HV+VV+VH
带宽	28 MHz	14 MHz	1 428 MHz	14 MHz
入射角	9.9°~50.8°	9.7°~26.2°	18°~43°	8°~30°
地面分辨率	7.0~44.3 m	14.0~88.6 m	100 m(多视)	24.1~88.6 m
数据量化	5 bit	5 bit	5 bit	3 或 5 bit
数据率	240 Mbit/s		120 或 240 Mbit/s	240 Mbit/s
测绘带	40~70 km		250~350 km	30 km
天线尺寸	8.9 m×3.1 m			
数据处理方式	数字			
脉宽	27 μs/16 μs			
脉冲重复频率	1 500~2 500 Hz			
采样频率	32 MHz 或 16 MHz			
调频斜率	负斜率(数字方式产生)			
T/R 组件数目	80 个			
波位数	18+5(扫描模式)			
峰值功率	2 kW			
天线类型	相控阵型			
天线重量	500 kg			
SAR 重量	600 kg			
侧视方向	右侧视			

§ 1.2 国内高分辨率 SAR 卫星发展现状

我国也发展了自己的高分辨率环境卫星,下面就“环境一号 C”小型雷达卫星即 HJ-1C

卫星进行介绍。

HJ-1C 卫星为 S 波段 SAR 小卫星,搭载 S 波段的 SAR。该卫星的 SAR 有效载荷具有两种工作模式,即条带模式和扫描模式,采用 $6\text{ m} \times 2.8\text{ m}$ 可折叠式网状抛物面天线。卫星入轨正常后,SAR 天线正常展开,经过一定的预备工作后,进入测绘带成像工作模式。HJ-1C 的 SAR 主要参数见表 1-9。

表 1-9 HJ-1C 卫星 SAR 有效载荷参数

工作频率	3 200 MHz
侧视方向	正侧视
空间分辨率	5 m(单视);20 m(距离向 4 视)
成像带宽度	40 km(条带模式);100 km(扫描模式)
辐射分辨率	3 dB
极化方式	VV
入射角	$25^{\circ} \sim 47^{\circ}$

HJ-1C 卫星采用降交点地方时为 6:00am 的太阳同步轨道,其标称轨道参数见表 1-10。

表 1-10 HJ-1C 卫星轨道参数

轨道高度	499.26 km
半长轴	6 870.230 km
轨道倾角	97.3671°
轨道周期	94.454 0 min
日轨道数	$15 \frac{7}{31}$
重访周期	31 天
重访总轨道数	472
降交点地方时	6:00am
轨道速度	7.617 km/s
星下点速度	7.063 km/s

从以上国内外 SAR 卫星的发展现状来看,SAR 卫星系统的发展趋势是分辨率越来越高、波段越来越多、重访周期越来越短以及多传感器集成。但是多传感器集成需要体积巨大、价格不菲的运行平台,这不仅对卫星系统、运载火箭提出了更高的要求,更增加了卫星发射和入轨失败的概率。而利用多个可进行对地观测的卫星组成对地观测卫星网络的小卫星集群系统将会克服这些缺点。

由于高分辨率 SAR 卫星可以大范围获取地面信息,因此无论在民用还是军用方面都有广阔的应用空间,因此各国都在积极地开发本国的 SAR 卫星系统。

第 2 章 高分辨率 SAR 卫星产品 标准化现状

目前,为了卫星影像数据的商业化运作,各个商业卫星运营商定制了独立的卫星影像产品分级,用户可以根据不同需求,选择所需的不同级别产品,但各种卫星影像产品的分级标准并不一样。

§ 2.1 TerraSAR-X 卫星产品分级体系^①

TerraSAR-X 的 RAW 数据通过 TerraSAR-X 多模式 SAR 处理器 TMSP 处理成基本数据产品,然后选取适当的处理流程和参数,进而处理成一系列不同级别的产品(见表 2-1)。

表 2-1 TerraSAR-X 卫星产品的基本分级

产品级别	级别英文名称	级别简称
单视斜距复影像产品	single look slant range complex	SSC
多视地距产品	multilook ground range detected	MGD
椭球改正后地理编码产品	geocoded ellipsoid corrected	GEC
增强椭球改正产品	enhanced ellipsoid corrected	EEC

2.1.1 单视斜距复影像产品

单视斜距复影像产品采用斜距方位向几何投影。该产品为雷达信号聚焦形成的基本单视影像,在方位向和距离向有相同的分辨率,且数据用复数表示。每个像素点处理成零多普勒坐标,即正交于飞行轨迹。

2.1.2 多视地距产品

多视地距产品,采用地距方位向几何投影(无地形改正)。该产品有较低的相干噪声,处理为近似正方分辨率单元。影像坐标是沿方位向和距离向定向的,利用 WGS-84 椭球模型和平均地形高程投影到地面的产品。

2.1.3 椭球改正地理编码产品

椭球改正地理编码产品,采用经椭球改正的地图几何投影(无地形纠正)。该产品是

① 该部分内容参考自文献(Schmidt et al,2007)。