

航天高分辨率数据几何处理丛书

Spaceborne SAR and InSAR Data Processing
Technology Based on RPC Model

基于RPC模型的 星载SAR和InSAR 数据处理技术

张过
秦绪文
著



测绘出版社

航天高分辨率数据几何处理丛书

基于RPC模型的星载SAR和 InSAR数据处理技术

Spaceborne SAR and InSAR Data Processing Technology

Based on RPC Model

张过 秦绪文 著

测绘出版社

· 北京 ·

© 张过 秦绪文 2013

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

本书主要介绍了基于有理多项式系数(RPC)模型的星载合成孔径雷达(SAR)和合成孔径雷达干涉测量(InSAR)的几何处理。针对星载SAR和InSAR数据的特点,提出了RPC模型替代星载SAR距离-多普勒方程及星载InSAR严密几何模型的观点,通过理论分析与实际数据实验验证了RPC模型的可替代性,并将RPC模型应用到星载SAR的平差、星载立体SAR核线影像和核线模型的构建、星载InSAR的数字高程模型处理、星载SAR的数字正射影像图制作中,并用高分辨率的SAR和InSAR数据验证了RPC模型用于星载SAR和InSAR处理的可行性和精度。

本书可供测绘、国土、航天、规划、农业、林业、资源环境、遥感、地理信息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

基于RPC模型的星载SAR和InSAR数据处理技术/张过, 秦绪文
著. —北京: 测绘出版社, 2013. 3
ISBN 978-7-5030-2573-0

I. ①基… II. ①张… ②秦… III. ①卫星载雷达—合成孔径
雷达—数据处理—研究 IV. ①TN958

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第073599号

责任编辑	万茜婷	执行编辑	李 莹	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)				
电子邮箱	smp@sinomaps.com	网 址	www.chinasmp.com				
印 刷	中煤地西安地图制印有限公司	经 销	新华书店				
成品规格	184mm×260mm						
印 张	8	字 数	200千字				
版 次	2013 年 3 月第 1 版	印 次	2013 年 3 月第 1 次印刷				
印 数	0001—1000	定 价	58.00元				

书 号 ISBN 978-7-5030-2573-0/P·579

本书如有印装质量问题, 请与我社门市部联系调换。

前 言

近年来,星载合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)数据因其全天时全天候成像、穿云透雨的能力,越来越多地被用于提取地面信息。20世纪90年代初,ERS-1/2(欧洲空间局)、JERS-1(日本)、SIR-C(美国)、Radarsat-1(加拿大)等雷达卫星发射成功,为雷达应用的研究提供了丰富的数据资源。而在2007年先后发射升空的TerraSAR-X(德国)、COSMO-SkyMed(意大利)、Radarsat-2(加拿大)等数颗多角度、多极化、多模式的雷达卫星在分辨率上大有提高(1~3m),直接促进了星载SAR的发展和应用。

本书从星载SAR传感器的特点出发,分析了星载SAR的各种成像模式、各个高分辨率SAR卫星的产品分级模式以及星载SAR的SLC产品的R-D模型;提出了星载SAR的GEC产品的严密几何模型,并针对星载SAR传感器的特点,进而提出了RPC模型可以替代星载SAR各个级别产品的严密几何模型,并通过多源数据实验进行了验证;在此基础上,研究了星载SAR的平差模型、基于RPC模型的星载SAR立体定向、基于RPC模型的星载立体SAR的核线影像和核线模型,以及基于RPC模型的星载SAR正射纠正等;研究了星载InSAR严密几何模型及用RPC替代的观点,并采用多源数据进行了验证,进而提出了RPC模型在星载InSAR的DEM处理中的应用方法。本书中提出的基于RPC模型的星载SAR和InSAR处理方案,对我国自己发射的高分辨率SAR卫星数据的处理具有借鉴意义。

本书总共分为8章。第1章介绍了国外高分辨率SAR卫星的发展现状,概述了星载SAR的成像模式以及高分辨率SAR标准产品,并分析了星载SAR的成像几何特点;第2章介绍了高分辨率SAR的R-D模型,提出了GEC产品的严密几何模型;第3章提出了高分辨率SAR的严密几何模型用RPC模型替代的可能性以及求解方法,并利用多源数据进行了实验;第4章给出了基于RPC模型的立体SAR平差方法以及采用多源数据验证的结果;第5章研究了基于RPC模型的星载立体SAR核线影像和核线模型的构建方法;第6章研究了星载InSAR的严密几何模型以及RPC模型;第7章研究了星载InSAR基于RPC模型的DEM处理方法;第8章研究了星载SAR基于RPC模型的DOM制作方法,并用多源星载SAR数据进行了理论精度和实际精度的对比分析。

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。同时,感谢祝小勇(第2章)、李贞(第3章和第4章)、

潘红播（第5章）、费文波（第6章和第7章）和墙强（第8章）为本书实验和编辑所付出的努力。

由于本书的研究属于作者首创，欢迎广大读者以批判的眼光阅读，有任何问题与建议，请直接联系作者（张过：guozhang.lmars@gmail.com；秦绪文：qinxuwen@163.com）。

目 录

第 1 章 绪论	1
§ 1.1 星载SAR的发展	1
§ 1.2 SAR影像独特的成像特征	8
§ 1.3 星载SAR几何模型的发展	9
§ 1.4 星载SAR的DOM制作现状	10
§ 1.5 星载立体SAR的研究现状	10
§ 1.6 星载立体SAR的核线研究现状	12
§ 1.7 星载InSAR的DEM制作现状	13
第 2 章 星载SAR的严密成像几何模型	15
§ 2.1 星载SAR的距离—多普勒模型	15
§ 2.2 距离—多普勒模型的定位方法	18
§ 2.3 星载SAR的SLC产品与GEC产品严密成像几何模型	25
第 3 章 星载SAR的RPC模型	28
§ 3.1 RPC模型	28
§ 3.2 星载SAR的RPC拟合分析	30
§ 3.3 星载SAR的RPC模型参数求解	32
§ 3.4 星载SAR的RPC模型正反变换	35
§ 3.5 星载SAR的RPC模型参数求解实验	37
§ 3.6 星载SAR定向误差分析与平差模型	43
第 4 章 星载立体SAR区域网平差	46
§ 4.1 星载立体SAR区域网平差原理	46
§ 4.2 实验及结果分析	48
第 5 章 星载立体SAR的核线模型	65
§ 5.1 基于RPC模型的核线生成	65
§ 5.2 星载立体SAR的核线模型重建	68
§ 5.3 实验及结果分析	69

第6章 星载InSAR严密成像几何模型和RPC模型	72
§ 6.1 星载InSAR测量原理	72
§ 6.2 星载InSAR严密成像几何模型	73
§ 6.3 星载InSAR的RPC模型	75
§ 6.4 星载InSAR的RPC模型参数求解	79
§ 6.5 星载InSAR的RPC模型参数求解实验	84
§ 6.6 星载InSAR的RPC模型误差评定	89
第7章 星载InSAR基于RPC模型的DEM提取方法	91
§ 7.1 基于RPC模型的轨道粗配准	91
§ 7.2 基于RPC模型的去平地效应	92
§ 7.3 基于RPC模型的去参考DEM相位	95
§ 7.4 基于RPC模型的相位估计	96
§ 7.5 基于RPC模型的相位高程转换	97
第8章 星载SAR的几何纠正	99
§ 8.1 星载SAR的几何纠正概述	99
§ 8.2 基于RPC模型的星载SAR影像模拟	99
§ 8.3 实验及结果分析	102
参考文献	117

第1章 绪论

§ 1.1 星载SAR的发展

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, 近年来得到了迅速的发展。

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) 卫星, 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, 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, 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。

1.1.1 成像模式

由于卫星测控技术的不断发展和完善, SAR卫星可以通过控制天线获得多种工作模式, 满足不同观测要求。以TerraSAR为例, 目前的高分辨率SAR卫星普遍具有以下工作模式 (Eineder et al, 2006)。

1. 条带模式

条带（stripmap）模式是基本的SAR成像模式，如ERS-1。当天线波束采用固定的仰角和方位角时，利用连续的脉冲序列发射微波从而形成地面条带。这种模式下生成的影像带在方位向成像质量不变。图1-1显示了条带模式的工作形式。其中条带长度取决于电池能量、存储能力和传感器的热量状态。

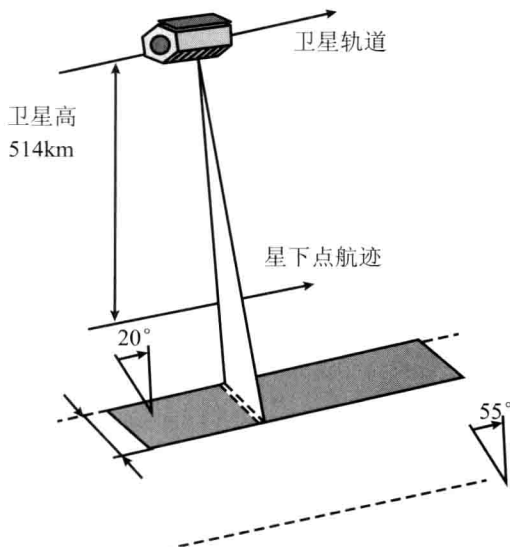


图1-1 条带式成像模式

2. 聚束模式

聚束（spotlight）模式在方位向采用相阵列波束控制技术增强照射时间，也就是合成了孔径的尺寸。因为较大的孔径能得到更高的方位向分辨率，但是同时影响了方位向影像尺寸，为了解决这个问题，采用聚束模式可以使天线波束停留在一景并且让景长符合天线波束宽度，如图1-2所示。

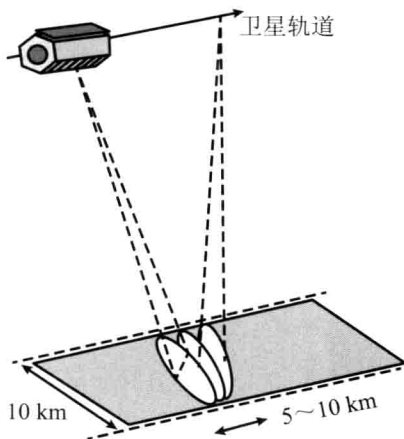


图1-2 聚束式成像模式

3. 扫描模式

扫描（scanSAR）模式利用4个条带波束联合工作达到100 km的幅宽。每个波束的成像区域称为子测绘带，虽然能得到较宽的测绘带宽，但是将导致方位向分辨率下降，如图1-3所示。

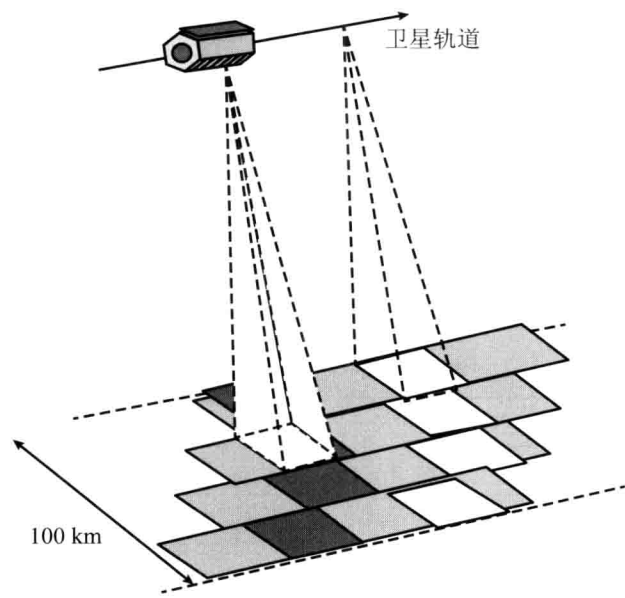


图1-3 扫描式成像模式

1.1.2 高分辨率SAR卫星概述

1. TerraSAR-X

TerraSAR-X卫星设备参数、轨道和姿态参数分别见表1-1和表1-2。

表1-1 TerraSAR-X卫星设备参数

雷达载荷频率		9.65GHz
射频功率		2kW
入射角范围	条带模式或扫描模式	20°~45°（全性能范围）；15°~60°（允许范围）
	聚束模式	20°~55°（全性能范围）；15°~60°（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 × 0.7 m × 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（聚束模式的）
脉冲重复频率		2.0~6.5 kHz

表1-2 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°
升交点地方时间	$18:00 \pm 0.25 \text{ h}$
姿态控制	全零多普勒控制

2. Radarsat-2

Radarsat-2卫星是2007年12月14日发射的C波段商用SAR卫星，具有11种波束模式并采用左右侧视缩短了重访周期。其与丰富的极化信息，参数与波束模式特征分别见表1-3和表1-4。

表1-3 Radarsat-2卫星参数

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

表1-4 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	$30^{\circ} \sim 40^{\circ}$	3 m	3 m	$20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$
多视精细		$30^{\circ} \sim 50^{\circ}$	8 m	8 m	$50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$
精细	可选单极化：HH，VV，HV，VH 可选双极化：HH+HV，VV+VH	$30^{\circ} \sim 50^{\circ}$	8 m	8 m	$50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$
标准		$20^{\circ} \sim 49^{\circ}$	25 m	26 m	$100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$
宽		$20^{\circ} \sim 45^{\circ}$	30 m	26 m	$150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$
四极化精细	四极化：HH+VV+HV+VH	$20^{\circ} \sim 41^{\circ}$	12 m	8 m	$25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$
四极化标准		$20^{\circ} \sim 41^{\circ}$	25 m	8 m	$25 \text{ km} \times 25 \text{ km}$
高入射角	单极化：HH	$49^{\circ} \sim 60^{\circ}$	18 m	26 m	$75 \text{ km} \times 75 \text{ km}$
窄幅扫描	可选单极化：HH，VV，HV，VH 可选双极化：HH+HV，VV+VH	$20^{\circ} \sim 46^{\circ}$	50 m	50 m	$300 \text{ km} \times 300 \text{ km}$
宽幅扫描		$20^{\circ} \sim 49^{\circ}$	100 m	100 m	$500 \text{ km} \times 500 \text{ km}$

3. COSMO-SkyMed

COSMO-SkyMed卫星参数见表1-5。

表1-5 COSMO-SkyMed卫星参数

发射时间	2007年6月8日
轨道类型	近极地太阳同步轨道
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
卫星高度	619.6 km
升交点地方时间	6:00 am
卫星数	4
轨道定相	90°

1.1.3 高分辨率SAR卫星产品

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并不一样。

1. TerraSAR-X卫星产品^❶

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。

1) 单视斜距复影像产品

单视斜距复影像(single look slant range complex, SSC)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) 多视地距产品

多视地距(multilook ground range detected, MGD)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。

❶ 该部分内容参考自文献(Schmidt et al, 2007)。

3) 椭球改正地理编码产品

椭球改正地理编码 (geocoded ellipsoid corrected, GEC) 产品, 采用经椭球改正的地图几何投影 (无地形纠正)。该产品是一种多视产品, 根据WGS-84参考椭球和平均高程进行投影和重采样。由于椭球改正没有考虑数字高程模型 (digital elevation model, DEM), 所以像素的定位精度变化取决于地形, 陡峭的入射角度和地貌会引起明显的误差。

4) 增强椭球改正产品

增强椭球改正 (enhanced ellipsoid corrected, EEC) 产品, 采用通过DEM经地形改正的地图几何投影。该产品与GEC产品一样均为多视处理影像, 根据WGS-84参考椭球进行投影和重采样, 并利用外部DEM进行影像的地形改正。由于使用DEM进行了地形改正, 所以像素的定位精度较高, 但是精度仍然取决于DEM的精度、分辨率以及入射角。

2. Radarsat-2卫星产品^①

1) 原始信号级

RAW产品, 即原始信号产品 (raw signal data product), 以复型方式将未经压缩成像处理的雷达信号数据记录在介质上。单波束模式和扫描 (scanSAR) 模式的数据均可生成RAW产品。

2) 地理参考级

(1) SLC产品, 即单视复型 (single look complex) 产品, 采用单视处理, 以32 bit复数形式记录影像数据。只有单波束模式的数据可以生成SLC产品。

(2) SGF产品, 即SAR地理参考精细分辨率 (SAR georeferenced fine resolution) 产品, 只能由单波束模式的数据生成。对标准模式、宽模式、超低和超高模式均采用 $12.5\text{m} \times 12.5\text{m}$ 的像元尺寸和4视处理; 对于精细模式, 采用 $6.25\text{m} \times 6.25\text{m}$ 的像元尺寸和1视处理, 影像数据存储为16 bit无符号整型。

(3) SGX产品, 即SAR地理参考超精细分辨率 (SAR georeferenced extra fine resolution) 产品, 与SGF产品相仿, 唯一的区别是SGX产品采用更小的像元尺寸, 因而产品的数据量较大。

(4) SGC产品, 即SAR地理参考粗分辨率 (SAR georeferenced coarse resolution) 产品, 也与SGF产品相仿, 唯一的区别是SGC产品采用更大的像元尺寸, 因而产品的数据量较小。

(5) SCN产品, 即窄幅扫描 (scanSAR narrow beam) 产品, 其像元尺寸为 $25\text{m} \times 25\text{m}$, 影像数据存储为8 bit无符号整型。

(6) SCW产品, 即宽幅扫描 (scanSAR wide beam) 产品, 其像元尺寸为

① 该部分内容参考自文献 (Dettwiler, 2008)。

50m×50m, 影像数据存储为8 bit无符号整型。

3) 地理编码级

(1) SSG产品, 即SAR地理编码系统校正 (SAR systematically geocoded) 产品, 是在SGF产品的基础上进行了地图投影校正。只有单波束模式的数据可以生成SSG产品。SSG产品的影像数据为16 bit或8 bit无符号整型, 由用户自行选择。

(2) SPG产品, 即SAR地理编码精校正 (SAR precision geocoded) 产品, 与SSG产品相仿, 不同之处在于采用地面控制点对几何校正模型进行修正, 从而大大提高了产品的几何精度。

3. COSMO-SkyMed卫星产品^❶

1) Level 0 产品

Level 0产品即RAW产品, 包括回波相位资料, 在解密和解压缩之后 (从BAQ编码数据转化到8bit均一的量化数据) 及进行内定标和误差补偿之后获得。该产品包括所有的辅助资料 (如传输单位、精确有日期的卫星相关坐标、速度向量、几何学传感器模型、载荷状态、标定资料等), 用于产生其他基础产品或中间产品。

2) Level 1A 产品

Level 1A 产品, 又称为侧视单视复数据 (single look complex slant, SCS或SLC) 产品, 由经过内部辐射定标的SAR聚焦数据组成, 采用零多普勒斜距方位向几何投影。

3) Level 1B 产品

Level 1B 产品, 又称为幅度地面多视图 (detected ground multilook, DGM) 产品, 由经过内部辐射定标、去散斑噪声、幅度探测的SAR聚焦数据组成, 采用零多普勒地距方位向投影, 并定义到相关椭球体或DEM上, 利用辅助数据重采样到规则的地面间距。

4) Level 1C 产品

Level 1C产品, 又称为椭球改正地理编码 (GEC) 产品, 由输入数据定义到一个相应的从预先设定系列中选取的椭球体上, 并采用从预先设定的某一地图相关系统获取的规则栅格。

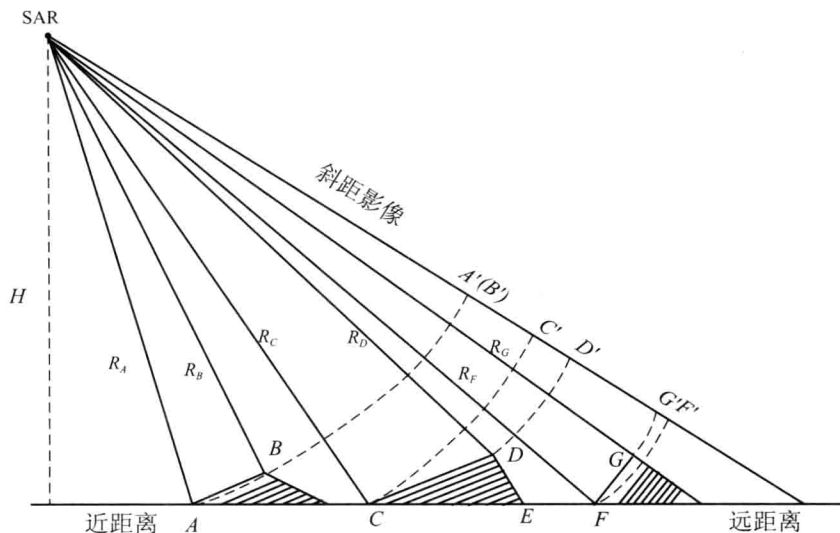
5) Level 1D 产品

Level 1D 产品, 又称为地理编码地形纠正 (geocoded terrain corrected, GTC) 产品, 由输入数据定义到相应的高程表面上, 并采用从预先设定的某一地图系统中获取的规则栅格。

4. 高分辨率SAR卫星标准产品分级体系

在对比国外高分辨率SAR卫星影像分级的基础上, 以相应的几何处理, 总结高分辨率SAR卫星标准产品的分级体系, 见表1-6。

❶ 该部分内容参考自文献 (Agenzia Spaziale Italiana, 2007)。



标到雷达的等距离点的分布,是以星下点为圆心的同心圆束;而在方位向上,卫星与地面目标相对运动所形成的等多普勒频移点的分布,是双曲线束;同心圆束和双曲线束的交点,就可以确定地面目标。与其他算法相比,R-D算法的优点在于:①不需要在星载SAR的视场中使用任何位置确知的参考点,仅仅依靠影像本身的辅助信息即可;②该方法与卫星的姿态资料毫无关系,这样就避免了由于引入准确性较差的姿态资料(翻滚、俯仰、偏航)而带来的误差;③随着SAR成像技术中的杂波锁定、自聚焦等技术的发展,该方法的精度主要取决于星历数据的准确性,而随着技术的提高,星历数据会越来越精确,所以其定位的精度也会大大提高。

§ 1.4 星载SAR的DOM制作现状

国外一些著名的SAR研究机构,包括美国阿拉斯加卫星设备、德国航空航天中心及美国喷气推进实验室等都发展了实用的正射纠正方法。自1996年来,袁孝康、周金萍、张永红、陈尔学等国内学者也陆续展开了各种星载SAR正射纠正方法的研究。

从国内外研究文献来看,星载SAR影像正射纠正方法可以归结为两大类:①由摄影测量学界发展的基于雷达共线方程的方法(Leberl, 1978; Konecny et al, 1988);②由SAR影像处理算法及系统开发领域专家提出的基于R-D定位模型的方法(Curlander, 1982)。

目前国内外均采用R-D定位模型进行正射纠正处理(Johnsen et al, 1995; Schreier et al, 1990),其方法又主要分为两类:①在星载SAR影像和相关地形图和正射影像上选取控制点,然后优化R-D模型参数进行正射纠正;②在山地和高山地等选点困难地区,利用对应区域的DEM和R-D模型参数来模拟星载SAR影像,通过真实SAR影像和模拟SAR影像的配准,建立真实SAR影像上像点跟地面点的对应关系从而进行正射纠正。

§ 1.5 星载立体SAR的研究现状

对于星载SAR影像而言,基于单星和大量控制点的区域网平差技术因SAR系统的发展而得到发展和应用。20世纪60年代起,人们发现雷达立体影像测图可以作为一种延续摄影测量方法的工作方式,用于提取地面高程(Laprade, 1963)。Crandall(1969)和Azevedo(1971)采用改进的框幅式共线条件方程作为平差的基础方程对机载雷达影像进行了区域网平差处理,获得满足生成1:25万正射影像的精度,即精度在百米量级。这时,由于机载SAR获取有效立体像对的能力有限,对立体SAR的研究仅停留在理论或模拟数据实验的阶段。1978年,首颗星载SAR卫星Seasat(美国)发射上天,随后美国利用航天飞机装载的成像雷达SIR-A和SIR-B也相继上天,同侧、异侧以及不同交会角的立体成像方式得以实现。学者们对立体SAR研究的兴趣也由机载雷达影像转向了星载雷