

TerraSAR-X 卫星及其在地球科学中的应用

陈艳玲 黄 斌 冯天厚

(中国科学院上海天文台, 上海 200030)

提 要

2007年6月15日德国成功发射了 TerraSAR-X 卫星,即将提供高达 1m 分辨率的多模式、多极化的星载 SAR 数据,其设计寿命为 5 年。该文较全面、系统地介绍了这一现代高分辨率雷达卫星的有关情况,主要涉及它的科学目标、结构和设计参数,处理算法和基本产品类型,以及在地球科学中的应用等方面,冀期以此为我国开展相关领域的研究工作提供参考。

主题词: 天体测量 — 综述 — TerraSAR-X — SAR 数据处理 — SAR 产品 — 地球科学
分类号: P237

1 引 言

SAR(Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达)因其不受天气条件限制能够穿透地表进行高分辨率、大面积、侧视成像的能力,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、蓬勃的发展。

随着 SEASAT、SIR-C/X SAR、SRTM、ERS-1/2、ENVISAT、RADARSAT-1、JERS-1 以及 ALOS 等 SAR 卫星的成功发射,SAR 已在资源、环境以及军事等领域越来越发挥着重要的作用。但由于其体积、重量及功耗均较大,影响其推广应用,因此目前正逐步向高分辨率、小型化的方向发展。TerraSAR-X 是第一颗分辨率达到 1m 的商用雷达小卫星,重约 1230kg,其外形为长 5.2m、直径 2.2m 的柱体。它具有多种成像模式,同时还能够提供高质量的雷达干涉数据,是新一代 SAR 卫星杰出的代表。

基于 TerraSAR-X 的特殊地位和影响,本文搜集了该卫星的有关信息,进行了编译和整理,较全面系统地介绍了 TerraSAR-X 卫星的科学目标、结构和设计参数等,以及处理算法和基本产品类型,阐述了它在地球科学中的应用,并进行了总结与展望。鉴于我国星载 SAR 小卫星理论及应用的研究目前正如火如荼地开展,并于 2006 年将其列入未来 15 年内力争取得突破进展的重大科技专项之一,本文冀望能为此提供参考。

2 TerraSAR-X 卫星

TerraSAR-X 卫星由德国空间中心(German Aerospace Center, DLR)和欧洲 EADS Astrium 公司合作开发(DLR负责其科学活动,Astrium负责商业运营),并于2007年6月15日在俄罗

斯 Baikonur 搭乘“第伯聂-1”火箭发射升空, TerraSAR-X 的设计目标^[1]为: 向科研人员提供高质量、多模式的 X 波段 SAR 数据, 以进行科学研究和应用, 在欧洲建立一个商业的 EO (Earth Observation) 市场, 发展可支撑的 EO 服务商业, 以便后继的系统可以完全由工业系统提供经费。

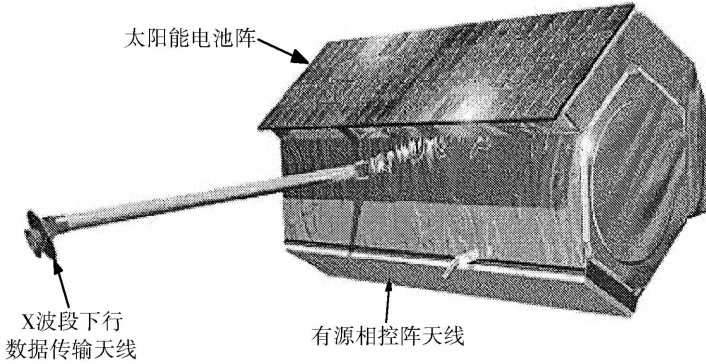


图 1 TerraSAR-X 外观

Fig. 1 The outer structure of TerraSAR-X

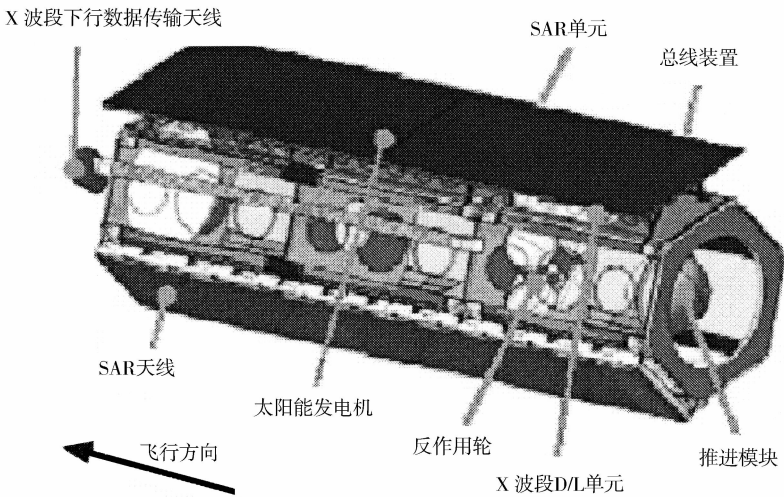


图 2 TerraSAR-X 内部结构^[2]

Fig. 2 The internal structure of TerraSAR-X

图 1 和图 2 分别为 TerraSAR-X 卫星的外观及内部构造图。可以看出, 卫星主要由 SAR 天线(长约 4.8m)、SAR 单元、推进模块、总线装置、反作用轮、X 波段下行数据传输天线以及太阳能电池阵发电机等部分组成。

TerraSAR-X 在距地 514km 高的极地轨道上围绕地球运转, 可收集高质量的 X 波段雷达数据, 卫星的运行不依赖气象条件、云层覆盖和照度, 分辨率可达 1m, 设计寿命为 5 年。其他相关的参数如表 1 所示。

表 1 TerraSAR-X 卫星基本参数^[2]

Table 1 The basic parameters of TerraSAR-X satellite

轨道高度/km	514.8	轨道倾角/(°)	97.44
轨道重复周期/d	11	轨道类型	太阳同步轨道
极化方式	HH, VV, HV, VH	侧视方向	右视
波长/cm (频率/GHz)	4.62 (9.65)	天线类型	有源相控阵天线
方位向扫描角/(°)	±0.75	天线尺寸/m	4.784 × 0.704 × 0.15
距离向扫描角/(°)	±19.2	波束宽度/(°)	方位向:0.33, 高度向:2.3
Chirp 带宽/MHz	5 ~ 300	PRF /kHz	3.0 ~ 6.5
功率消耗/W	605	峰值输出功率/W	2260
系统噪声/dB	5.0	数据存储/Gbit	256
ADC 采样率/Hz	330, 165, 110	数据传输/Mbit · s ⁻¹	300(X 波段下行链路)
RAW 数据特性	I&Q 8bit, BAQ 压缩至 4, 3, 2bit		

从表 1 中可以看出, TerraSAR-X 有几个很显著的特点: 分辨率高、多极化方式、卫星重访周期较短等。分辨率高意味着能提供地面目标更加精细的信息。多极化有效地提高了 SAR 对场景信息的获取能力, 为进一步分析、识别和检测目标提供了有力工具。卫星重访周期较短, 这为 InSAR(Interferometric Synthetic Aperture Radar, 合成孔径雷达干涉测量) 技术带来了极大的便利。相比 ERS-1/2 卫星 35d 的重访周期, 这一特点弥补了以往 SAR 干涉测量时间分辨率较低的不足。

此外, TerraSAR-X 有三种成像模式, 分别为聚束式、条带式 and ScanSAR 模式, 每种模式对应不同的带宽和分辨率, 具体内容见下节。

3 数据处理算法和产品

3.1 预处理

在接收到 SAR 数据后需要首先对卫星至地面接收站的下行数据进行解密, 然后对接收到的二进制传感器数据解码。再根据一些具体的查阅表以及处理规则进行天线模式改正、内部校准例行分析。但是由于查阅表和处理规则会随时间发生变化, 因此它们作为副本被存入 TMSP(TerraSAR Multi-Mode SAR Processor, TerraSAR 多模式 SAR 处理器), 这一处理器由 DLR 的 IOCS(Instrument Operation and Calibration Segment) 来生产和维护。

3.2 成像处理

星载 SAR 成像处理必不可缺的参数为多普勒中心频率和多普勒调频率。SAR 天线接收的方位谱对天线的斜视角有很强的依赖性。它的采样频率为 PRF , 因此可能会与基带信号混淆。多普勒中心频率估计即估算接收方位谱的中心频率及模糊数。模糊数的确定难度比较大, 其估算误差主要来源于方位向位置误差。所幸 TerraSAR-X 侧斜视角可以通过精度为 $0^\circ.01$ 的星上照相机获取。TMSP 可以利用精确的高度和轨道信息进行多普勒频率粗估计, 然后根据接收数据进行精确估计。

关键的成像参数估计完毕,就可对 SAR 初始数据进行成像处理。传统成像处理器只针对多模式中的一种成像模式,如果为多模式则需设计不同的程序来实现。TMSP 选择了 CS (Chirp Scaling) 成像算法进行成像处理^[3,4],这种算法可同时用于多模式成像。经过成像处理,可以得到反映目标散射特性的二维雷达图像。

3.3 校准

由于信号传播导致能量耗损以及天线在各个方向上发射功率不同,所以需要回波信号进行补偿。在进行天线功率方向图改正方面 TMSP 使用了一种新的方法,即用 250m 分辨率的 DEM (Digital Elevation Model, 数字高程模型) 来校正。因为天线方向图的投影与地形高度有关,可以利用这一关系来校正天线方向图。需要指出的是, TMSP 并没有对 SAR 图像进行入射角的校正。经过以上处理,即可得到雷达亮度信息,进而与 ERS 及 ENVISAT 卫星数据相容。

因 TerraSAR-X 是一颗小卫星,所以在工作状态下器件温度很容易升高从而导致相位漂移,这一问题由 SAR 天线通过数字移相器自动调节相温度以维持其稳定。InSAR 技术要求精确测定相位,而数字移相器的自动开关操作会影响相位的精确性,进而影响干涉性能。为解决这一问题, TMSP 通过事先对短时间间隔进行自动相位补偿,测量由补偿引起的相位变化,据此估算校准信号进行自动调节来改进仪器数据。

3.4 生成产品

由于成像模式、入射角以及带宽不同,导致距离向及方位向分辨率之比在 1: 15 (ScanSAR 模式) 和 3.5: 1.3 (聚束模式) 之间变化。为使用户自由选择分辨率和像元大小,需要对不同模式的图像进行时间域上的平均,这就用到多视处理。对于 ScanSAR 模式,需要对四种不同波束在空间重叠区域进行加权平均,才能得到一景数据。目前针对三种成像模式,每种极化方式都可提供在几何角度上多普勒频率为零的单视复数图像。

有时用户需要地理编码的图像,此时需要将斜距或伪地距图像投影到二维平面上, TMSP 采取了 UTM (Universal Transverse Mercator, 通用横轴墨卡托投影) 和 UPS (Universal Polar Stereographic, 通用极球面投影) 两种投影方式。

此外,所有的图像还需生成一个反映成像区大致位置以及地界或国界信息的低分辨率快视图。

经过以上处理,就可以进行复数、正射校正及地理编码级产品的发布与销售。这里给出 DLR 可提供的基本产品类型,如表 2 所示:

表 2 TerraSAR-X 基本产品^[5]

Table 2 TerraSAR-X basic products

	景幅大小 距离 × 方位/km	入射角	Max. quad. resolution 距离 × 方位/m	等价 σ^0 噪声/dB
单极化 条带式	30 × 50	20° ~ 45°	3.3 × 3.3	< -19
双极化 条带式	15 × 50	20° ~ 45°	6.6 × 6.6	< -19
单极化 聚束式	10 × 10	20° ~ 55°	2.2 × 2.2	< -19
双极化 聚束式	10 × 10	20° ~ 55°	4.4 × 4.4	< -19
单极化 聚束式 高分辨率	10 × 5	20° ~ 55°	1.3 × 1.3	< -19

续 表

	景幅大小 距离 × 方位/km	入射角	Max. quad. resolution 距离 × 方位/m	等价 σ^0 噪声/dB
双极化 聚束式 高分辨率	10 × 5	20° ~ 55°	2.7 × 2.7	< -19
ScanSAR	100 × 150	20° ~ 45°	13.5 × 13.5	-
全极化 聚束式	15 × 50	20° ~ 45°	6.6 × 6.6	-
HH/VV 极化	30 × 50	20° ~ 45°	9.5 × 9.5	-
复杂 ScanSAR 产品	100 × 150	20° ~ 45°	13.5 × 13.5	-

注: σ^0 为归一化雷达后向散射系数。

4 TerraSAR-X 卫星的应用

TerraSAR-X 的成功发射将能提供更多的 SAR 图像和数据,特殊的波段将更能突出星载 SAR 的优势,拓宽 SAR 的应用范围。以下从地形测绘、地质、土地资源环境、水文和海洋等四个方面阐述 TerraSAR-X 卫星在地球科学中的应用^[6]。

4.1 地形测绘

TerraSAR-X 在地形测绘上的应用,大的方面主要是从雷达图像中可分辨出山区、水域、高原、丘陵以及它们的走向和覆盖面积;在细部的地形测绘中,将进一步给出观测目标的海拔高度、坡度、坡向和位置精确定位等细致的地理参数。

InSAR 是目前可有效建立全球 DEM 的为数不多的工具之一,它有效利用了 SAR 的回波相位信息,测高精度为米级甚至亚米级。虽然除了 InSAR 技术外,雷达立体测量方法也可实现三维制图,由于后者只利用了灰度信息,其测高精度仅能达到数十米。总之,InSAR 及雷达立体测量目前在地形测绘方面的作用是其他技术不可替代的。

4.2 地质学

星载 SAR 图像和数据在提取断裂带、隐伏地质体、岩性等信息方面表现出特别的优势。国内一些研究单位将雷达图像用到地形测绘和地质勘探方面,取得了一些进展。

此外,在 InSAR 技术基础上发展起来的 D-InSAR 技术形变监测精度为厘米级甚至毫米级,同时具有大面积、快速、准确的优势,因此在形变监测中有着其他技术不可比拟的优势,目前已成为微波遥感领域的热点。早期 D-InSAR 形变监测主要集中在地震、火山、冰川等形变显著的地质现象上,随着 D-InSAR 技术的不断成熟和研究的不断深入,形变监测精度不断地提高,研究重点已逐步转移到监测地面的微小形变(如地面沉降、滑坡等灾害)的相关研究。

4.3 土地资源环境

TerraSAR-X 在农业方面的应用主要涉及如土地利用调查、土壤水分测量、作物生长与分类等。土地利用调查是对城市地区不同土地利用类型和农村及无人居住地区不同覆盖类型的识别和分类,有望在全球范围内推广和使用。在城镇地区,SAR 为高分辨率沉降监测、城区特征、基础设施区划、交通等提供了一种新的监测手段。土地覆盖类型测绘是对乡村和无人居住

区域土地覆盖类型的识别和测绘,目前正处于运作性演示阶段,所需细节的水平低于城市测绘。农作物类型的研究,主要针对雷达-目标之间的相互作用,比可见光和红外图像更容易进行分类。SAR 只能对土壤湿度进行相对测量,因为后向散射虽与土壤复介电常数相关,但它也受其它多种因素影响,因此很难单独地将土壤湿度对后向散射的影响分离出来。

在林地观测方面,通过极化 SAR 提取地表植被特别是森林的垂直结构参数是近年来的研究热点。除了树高测量,SAR 还可用于林区分类制图、森林灾害(如森林火灾,虫灾)监测等。

4.4 水文及海洋学

海洋和海岸带监测将是 SAR 数据最大的应用范围之一,世界上第一颗 SAR 卫星 Seasat 即是海洋卫星。SAR 海洋探测项目包括:海面风场、海浪有效波高和波向、水下地形、油膜污染、冰类型以及大洋环流等。海岸带监测主要包括海岸带地形特征的识别、测绘,可据此及时了解海岸带的变迁。SAR 可提供沿海地区(即使是不便观测的多雾地区)的数据,供地貌和海岸科研人员监测海岸地区地图测绘中的特征变化,进而保护沿海土地资源。

SAR 在军事上亦有广泛的应用,可作为军事侦察方面的有力武器,成为战场或战术侦察中不可缺少的工具。综上所述,可以看出 SAR 正在地球科学的各个领域发挥着越来越重要的作用。

5 结论与展望

TerraSAR-X 是目前最为先进的 SAR 卫星之一,本文比较详细地介绍了此卫星的数据处理步骤、产品和应用前景,希冀以此为有关读者的工作提供借鉴。

与 TerraSAR-X 卫星编队飞行的 TanDEM-X 卫星计划于 2008 年发射,届时两颗卫星将构成串行星对,形成一个高精度雷达干涉测量系统,设计高程定位精度优于 2m,是目前几个在轨的民用 InSAR 系统所不能达到的。此外,目前 SAR 在土地资源环境方面的应用还不够深入,在水文及海洋方面的研究也处于发展期,在地质灾害监测方面初露头角,TerraSAR-X 的成功发射必将促使研究人员进一步开展 SAR 在上述几个领域的应用研究,充分发挥 SAR 在空间大地测量学科中的杰出作用。

参 考 文 献

- [1] http://www.dlr.de/tsx/start_en.htm
- [2] <http://www.dlr.de/tsx/documentation/Satellite.pdf>
- [3] Eineder M, Schattler B, Breit H *et al.* Proceedings of IEEE IGARSS'05, 2005, 7: 4870 ~ 4873
- [4] Josef M, Richard L, Elke B. Sliding Spotlight SAR Processing for TerraSAR-X using a New Formulation of the Extended Chirp Scaling Algorithm. http://www.dlr.de/tsx/documentation/ihr_d3.pdf
- [5] http://www.dlr.de/tsx/documentation/SAR_Basic_Products.pdf
- [6] <http://www.dlr.de/tsx/application>

TerraSAR-X SATELLITE AND ITS APPLICATIONS ON ERATH SCIENCE

CHEN Yan-ling HUANG Cheng FENG Tian-hou

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

Abstract

TerraSAR-X is a new German little radar satellite that was just launched on Jun 15, 2007. The scheduled lifetime is 5 years. It carries a high frequency X-band SAR sensor that can be operated in different modes (resolutions) and polarization. TerraSAR-X will offer features that were not available from space geodesy before due to its high spatial resolution as high as 1 meter. This paper describes the advanced satellite systematically and completely. Firstly, the basic parameters, outer structure, imaging modes are illuminated in chapter 2. The sensor working in X-Band can operate in different operation modes, such as Spotlight, Stripmap, and ScanSAR mode, meanwhile it is able to provide interferometric radar data for the generation of DEM and deformation mapping. Secondly, the processing algorithms and products are listed in chapter 3. After the data is downlinked from the satellite, the DLR Payload Ground Segment for the TerraSAR-X then processes them step by step. The data processing includes pre-processing, CS (Chirp Scaling) imaging processing, radiometric and instrument phase calibration, multilook and ScanSAR beam stitching, and geocoding etc., which are all seen in chapter 4. Sequently, DLR can issue complex, ortho-rectified and geocoded data for the users. Those SAR data can be used in many science fields including topographic mapping, geology, land resources and environment management, hydrology and oceanography, etc. Finally the future of this satellite is briefly introduced.

Key words TerraSAR-X — SAR data processing — SAR products — earth science