

高分三号卫星图像质量指标设计与验证

赵良波¹ 李延¹ 张庆君¹ 刘杰¹ 袁新哲² 陈琦³

(1 北京空间飞行器总体设计部,北京 100094)

(2 国家卫星海洋应用中心,北京 100081)(3 中国资源卫星应用中心,北京 100094)

摘要 图像质量指标是衡量合成孔径雷达(SAR)卫星成像能力及定量化应用水平的重要指标。在进行高分三号(GF-3)卫星总体设计时,根据海洋、减灾、水利、气象等应用领域的需求,提出了能够兼顾各行业用户典型应用及定量化反演的图像性能要求,确定了几何质量指标和辐射质量指标2类共13项图像质量指标,分析了卫星平台、SAR载荷、空间传输、地面定标及处理等各项因素对图像质量指标的影响,总结了通过卫星总体设计保证各项图像质量指标的方法及手段。GF-3卫星的在轨测试及业务化运行,验证了图像质量指标的符合性,可为后续SAR卫星的研制提供设计参考。

关键词 高分三号卫星;合成孔径雷达;图像质量指标;几何质量;辐射质量;分块自适应量化
中图分类号:V474.2 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1673-8748.2017.06.003

Design and Verification of Image Quality Indexes of GF-3 Satellite

ZHAO Liangbo¹ LI Yan¹ ZHANG Qingjun¹ LIU Jie¹ YUAN Xinzhe² CHEN Qi³

(1 Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China)

(2 National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China)

(3 China Centre for Resource Satellite Data and Application, Beijing 100094, China)

Abstract: SAR(synthetic aperture radar)image quality is a series of important parameters to characterize the radar imaging and quantitative application ability of SAR satellites. In the system design of GF-3 satellite, according to the ocean application, disaster mitigation, water conservancy, meteorology and others, the image performance requirements are presented to meet the requirements of different users in typical application and quantitative analysis, and the geometric quality and radiation quality of 2 categories and 13 image quality parameters are determined. The influences of the satellite platform, SAR payload, signal transmission, ground calibration and image processing on image quality are determined, as well as the methods to ensure the image quality parameters through satellite system design are summarized. The conformity of the image quality parameters are verified by the test and operation on orbit, which provides references in design for the subsequent SAR satellites.

Key words: GF-3 satellite; SAR (synthetic aperture radar); image quality index; geometric quality; radiation quality; BAQ (block adaptive quantization)

收稿日期:2017-10-25;修回日期:2017-11-21

基金项目:国家重大科技专项工程

作者简介:赵良波,男,高级工程师,从事微波遥感卫星总体设计工作。Email:hitzlb@hotmail.com。

1 引言

高分三号(GF-3)卫星是中国首颗分辨率达到 1 m 的 C 频段多极化合成孔径雷达(SAR)卫星,具有全天时、全天候的成像能力,并可以通过左右姿态机动扩大观测范围、提升响应速度。卫星具有 12 种成像模式,最高 1 m 的空间分辨率,能够获得清晰的微波遥感影像;最大 650 km 的幅宽,可以完成大范围的监视监测;多极化的探测方式,大幅度提高了对目标特性的获取能力;高量化指标,可实现更细致、更准确的量化信息提取与反演。

GF-3 卫星的图像质量指标是指影响最终成像结果,且与用户应用直接相关的技术指标,它是由天地各系统相关指标所决定和影响的。对影响图像质量指标的因素进行分析,可以有针对性地进行卫星系统优化设计,达到提升最终成像结果的目的。因此,图像质量指标对 GF-3 卫星工程系统的设计具

有重要意义。通过参考比对国内外 SAR 卫星图像质量指标体系^[1-3],对各应用领域的实际需求进行分析论证,结合 GF-3 卫星的工程实际情况,确定其图像质量指标,并对影响各项图像质量指标的因素进行分解,提出了保证各项指标的设计方法及措施。通过 GF-3 卫星的在轨测试及运行,对图像质量指标的实现情况进行了验证。

2 图像质量指标需求

GF-3 卫星在设计之初,即明确是一颗具有多领域综合观测能力的 SAR 卫星。其获取的微波遥感数据,除满足海洋、减灾、水利、气象等领域的需求外,还要兼顾农业、环保、住建、交通、林业等其他行业用户的需求。多用户的需求,决定了 GF-3 卫星探测地物目标类型的多样性。各主要领域对 GF-3 卫星的需求如表 1 所示。

表 1 对 GF-3 卫星的主要应用需求

Table 1 Primary application demands for GF-3 satellite

应用领域	观测目标	主要指标需求					
		分辨率/m	幅宽/km	极化	辐射分辨率/dB	辐射精度/dB	定位精度/m
海洋	海上船舶	1~50	10~300	单、全极化	≤ 2.0	≤ 1.5	100
	海浪	10	≥ 20	全极化			100
	海冰	5~50	≥ 50	单、全极化			100
	海面风	50	≥ 50	双极化			500
减灾	滑坡泥石流	3	30	全极化			10
	积雪范围	25	150	全极化			100
	洪涝淹没范围	5	100	单极化			10
	干旱范围	25	150	全极化			100
水利	水体监测	10~25	150	单极化			200
	旱情监测	50	300	多极化			200
	水土保持	3	30	单极化			200
	堰塞水体	10	100	单极化			200
气象	台风	25	≥ 100	双极化			200
	强降水	25	≥ 100	双极化			200
	近海海冰	50	200	多极化			100
	极冰	100	500	多极化			200

为满足不同领域的需求,GF-3 卫星应具有以下性能^[4]:①探测频率对各领域观测目标均具有较强的适应性。通过对典型观测目标的适用探测频率进行统计分析,C 频段对绝大部分观测目标具有很好的适应性,可以满足海洋、减灾、水利、气象和其他领域的广泛需求。为此,GF-3 卫星采用 C 频段、5.4 GHz 作为探测频率。②采用多极化的探测方式,可提供除观测目标回波幅度、相位之外的极化特征信息,进而获得目标更完整的散射信息。针对不同

成像模式,在 GF-3 卫星上设计覆盖单极化、双极化及四极化的不同极化方式,同时极化图像具有高隔离和稳定性,即极化隔离度优于 35.0 dB,极化通道幅度不平衡度优于 ± 0.5 dB,极化通道相位不平衡度优于 $\pm 10^\circ$ 。③既能对特定区域高分辨率成像,又能满足中、低分辨率、大幅宽的需求。GF-3 卫星包括 12 种成像模式,分辨率范围为 1~500 m,幅宽范围为 10~650 km,以满足各领域的多样化需求。④具备高精度量化应用能力,能够对特定观测目

标完成定量化反演。GF-3 卫星相对辐射精度要求达到 1.0 dB(1 景),绝对辐射精度为 1.5 dB(1 景);同时辐射分辨率为 3.5 dB(分辨率 1~10 m)和 2.0 dB(分辨率 25~500 m),为各领域开展定量化应用奠定基础。⑤具有高灵敏度探测能力,能够对弱散射目标进行成像。噪声等效后向散射系数应优于 -19.0 dB。⑥具有在强回波目标附近检测弱目标的能力,以提高对图像的解译和目标判读能力,峰值旁瓣比优于 -20.0 dB,积分旁瓣比优于 -13.0 dB。⑦具有较高的模糊信号抑制能力,以降低杂散信号干扰。距离模糊度优于 -20.0 dB,方位模糊度应优于 -18.0 dB。⑧能够对图像中的地物目标进行精确定位,无控制点定位精度优于 230 m。

3 图像质量指标的实现

GF-3 卫星图像质量指标可分为几何质量指标和辐射质量指标两大类。几何质量指标包括空间分

辨率、成像幅宽及定位精度,主要反映图像的几何特性^[5];辐射质量指标包括峰值旁瓣比、积分旁瓣比、模糊度、辐射分辨率、辐射精度、噪声等效后向散射系数、极化隔离度与极化不平衡度,主要反映图像的可视性、可判性和解译能力。

为保证 GF-3 卫星图像质量指标的实现,通过仿真分析,并结合国内外 SAR 卫星的研制经验,将图像质量指标的影响因素分解为 3 个主要方面。①卫星平台性能:主要包括测轨、定位、测速、姿态控制、姿态导引及定时精度等。②SAR 载荷性能:主要包括收发信号带宽、通道幅相误差及稳定性、系统灵敏度、极化隔离度、通道增益稳定性、内定标精度、增益控制精度、采样量化精度、天线方向图、波束指向精度等误差。③传输路径影响和成像处理:主要包括大气衰减、成像算法、处理加权及展宽、地面高程模型、多普勒估计、多视处理及外定标误差等。对几何质量指标和辐射质量指标影响因素分解如图 1 和图 2 所示。

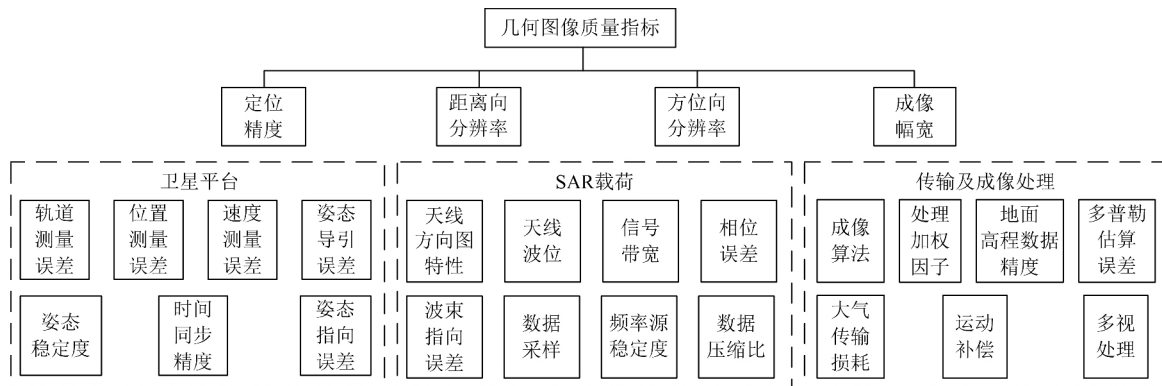


图 1 几何质量指标影响因素

Fig. 1 Influencing factors for geometric quality indexes

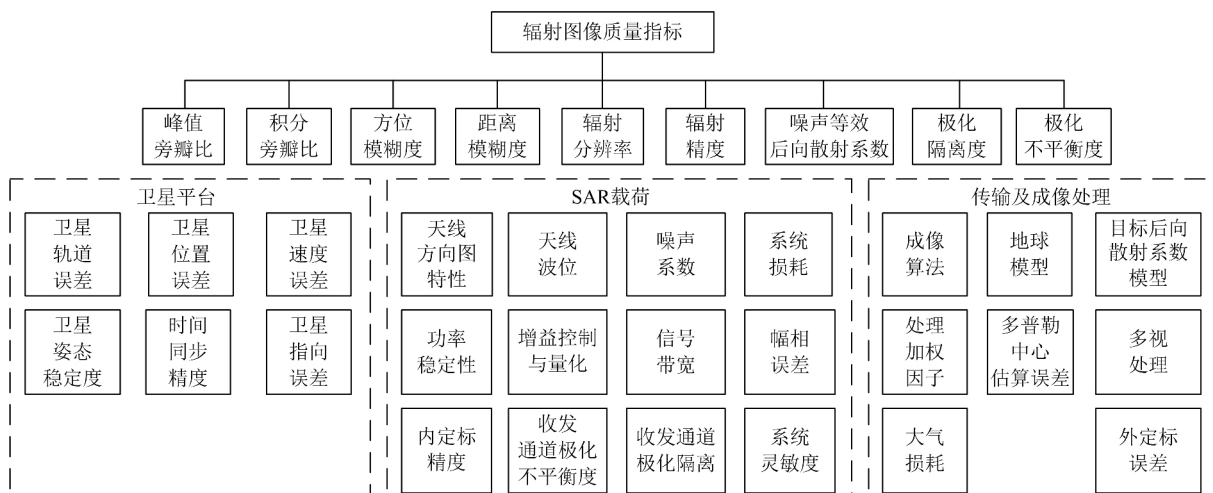


图 2 辐射质量指标影响因素

Fig. 2 Influencing factors for radiation quality indexes

GF-3 卫星在研制过程中,对各项影响因素均进行了分解及量化,并体现在卫星总体、SAR 载荷及地面系统的设计之中。

3.1 卫星平台设计

GF-3 卫星平台设计了 2 条独立的供电母线,平台供电母线采用 28 V 全调节母线,SAR 天线供电母线采用供电电压为 45~67 V 的不调节母线,并配置长 18.5 m 的双太阳翼,以满足 SAR 天线平均功率 8000 W 的能源需求。SAR 天线、太阳翼等大质量部件安装在卫星结构外侧,为保证卫星发射时的力学环境要求,并满足 SAR 天线在轨展开后优于 5 mm 的平面精度,卫星结构采用加强梁设计,为质量约 1300 kg 的 SAR 天线提供稳定的结构支撑。为提高图像质量,降低地面处理的难度,卫星在安装有 SAR 天线、太阳翼 2 个大挠性部件的条件下,实现了高精度的姿态控制及连续的二维导引,完成了高精度的实时轨道定位及速度测量,并为 SAR 载荷提供精确的时间基准。

卫星姿态控制系统采用星敏感器和陀螺测量的姿态确定方式,将姿态确定精度提高到优于 0.01° (3 轴, 3σ),再通过配置多个动量轮,实现高精度的姿态控制,可以达到姿态指向精度优于 0.03° (3 轴, 3σ),姿态稳定度优于 $0.001(^\circ)/s$ (3 轴, 3σ) 的指标要求。针对星载 SAR 回波信号的多普勒特性,设计偏航及俯仰二维姿态导引,极大地降低了回波信号的多普勒中心偏差。

为保证 GF-3 卫星的定位及测速能力,考虑到单频 GPS 无法消除电离层的影响,限制了事后处理的定位精度,卫星采用双频 GPS 进行导航定位,不但实现了实时定位精度优于 10 m (3 轴, 1σ),实时测速精度优于 0.2 m/s (3 轴, 1σ) 的指标要求,而且事后精密定轨采用 2 个频点消除电离层的影响,并通过高精度动力学模型,最终实现了 4 cm 的定轨精度。为保证 SAR 载荷的定时精度,设计 GPS 秒脉冲机制,由硬件秒脉冲和软件整秒授时联合实现高精度的时间同步,时间同步精度优于 $100\ \mu s$,满足了高精度时间同步需求。

3.2 SAR 载荷设计

GF-3 卫星 SAR 载荷由卫星舱外的 SAR 天线及舱内电子设备两大部分组成。

为满足多模式、多极化、高定量化的探测需求,SAR 载荷采用可展开平面固态有源相控阵天线,具有灵活的波束赋形及二维扫描性能。SAR 天线发射峰值功率达到 15 360 W,具有高精度的定标网络,

通过距离向波控码存储、方位向波控码实时计算的方式,根据成像模式、入射角的不同,可形成约 96 万个要求各异的发射/接收波束。为实现优于 35.0 dB 的极化隔离度要求,双极化波导缝隙天线由互补结构的窄边直缝水平(H)极化和宽边直缝垂直(V)极化波导缝隙天线交叉排列组成,使 2 种极化天线实现分别馈电,物理上完全独立,有效减小了 2 种极化天线之间的互耦。为保证射频收发通道的幅相稳定性,对阵面馈电网络的幅度/相位特性、元器件性能、装配工艺等进行严格控制,确保阵面单机状态具有良好的一致性;同时,对 SAR 天线阵面的温度进行智能随动控制,全阵面温度梯度可控制在 7°C 以内,从而大大减小了各射频通道因温度差异引起的幅度相位漂移,最终实现极化通道间相对幅度稳定度优于 0.3 dB,相对相位稳定度优于 5° 的技术指标。为保证 SAR 天线波束赋形特性,通过地面测试,获取 SAR 天线各辐射单元的幅度、相位基础数据,建立高精度的天线仿真模型,综合考虑互耦、反射等因素,保证了天线仿真模型的预测与实测结果在统计特性上高度吻合,为精确的波束赋形及波束指向控制提供了保证。

SAR 载荷电子设备根据不同的工作模式,完成数字基带信号产生、正交调制、中频放大、上变频、射频放大等功能,可灵活产生多种带宽、脉宽的线性调频信号。在地面对 2~240 MHz 共 11 种带宽的线性调频信号进行实测,结果表明,发射信号带宽误差优于 $\pm 1\%$,带内幅度起伏优于 0.7 dB,脉宽误差优于 $\pm 0.1\ \mu s$,能保证 SAR 载荷发射信号的稳定性。SAR 载荷接收噪声主要由 SAR 天线阵面收发(T/R)组件噪声及电子设备接收支路噪声共同决定,对阵面 T/R 组件的噪声系数进行 100%测试,并在各种接收带宽下对接收支路的噪声系数进行测试,最终得到 SAR 载荷系统噪声系数优于 3.5 dB。SAR 载荷采用中频直接采样的数字接收机方案,通过 A/D 转换芯片进行 8 bit 量化,实测有效量化位数优于 6.6 bit;对量化后的回波数据进行数字正交解调及 BAQ 压缩,降低了量化压缩对图像质量的损失。

SAR 载荷的内定标精度由 SAR 天线内定标网络及舱内电子设备内定标器的增益稳定性共同决定,SAR 天线定标时,水平极化信号及垂直极化信号共用同一套定标网络,经定标网络进行信号合成。内定标器是内定标过程中的核心单元,与 SAR 天线阵面定标网络一起实现 SAR 载荷的内定标功能。通过热真空试验对 SAR 天线及内定标器的温度增益

稳定性进行测试, SAR 天线内定标网络增益稳定性优于 ± 0.3 dB, 内定标器增益稳定度优于 ± 0.27 dB, SAR 载荷最终的內定标精度满足小于等于 0.6 dB 的指标要求。

3.3 地面系统设计

地面系统通过地面定标及地面处理 2 个方面保证 GF-3 卫星图像质量。通过地面定标, 精确建立 SAR 图像功率与目标散射特性之间的定量关系, 为图像处理过程中的几何、极化、辐射校正提供依据。地面定标采用多个角反射器及有源定标器, 为 SAR 载荷外定标提供精确的雷达截面积参考值, 其标称雷达截面积精度为 0.30 dB (3σ), 外校准雷达截面积精度为 0.18 dB, 可满足条带模式优于 0.5 dB、扫描模式优于 0.7 dB 的定标精度要求。同时, 有源定标器

的极化隔离度优于 -40.0 dB, 保证了极化隔离度定标精度优于 36 dB 的指标要求。

地面处理通过优化各成像模式的处理及成像算法, 降低多普勒参数估计误差, 合理设计加权函数, 保证成像展宽系数优于 1.11 的要求; 通过距离徙动校正、多普勒中心频率估计等手段, 满足成像处理系统增益稳定度优于 0.3 dB 的要求。

4 图像质量指标验证

GF-3 卫星在轨测试阶段, 在定标场布设了一定数量的三面角反射器及有源定标器, 通过星地联合测试, 对各模式下的图像质量指标进行全面验证, 各项指标的验证方法如表 2 所示。

表 2 图像质量指标验证方法

Table 2 Verification methods for image quality indexes

项目	在轨验证方法
分辨率	采用点目标法进行空间分辨率测量, 计算点目标冲激响应的半功率点处宽度所对应的空间距离
成像幅宽	在不同的成像模式下进行多入射角成像, 并统计各景图像的幅宽平均值
极化隔离度	图像经过极化定标后, 目标点在交叉极化图像中功率与同极化图像功率之比
极化通道不平衡度	图像经过极化定标后, 目标点在 VV 极化图像中与 HH 极化图像中的功率比和相位差
噪声等效后向散射系数	SAR 载荷工作在只接收模式下, 通过计算接收信号能量的平均值, 求得噪声等效后向散射系数
相对辐射精度	通过对成像场景内的角反射器或有源定标器成像, 计算目标的后向散射系数; 通过对多个具有相同标称后向散射系数值的点目标进行统计平均, 得到相对辐射精度
绝对辐射精度	布设已知后向散射系数的三面角反射器作为参考目标, 使用定标常数得到绝对定标后的三面角反射器的后向散射系数, 即后向散射系数测量值, 通过计算角反射器后向散射系数测量值与其标称值的偏差, 得到绝对辐射精度
辐射分辨率	对亚马逊雨林的均匀场景成像, 计算等效视数及图像信噪比, 进而求得辐射分辨率
峰值旁瓣比	选取各成像模式图像中的点目标, 计算冲激响应最高旁瓣峰值与主瓣峰值的比值
积分旁瓣比	选取各成像模式图像中的点目标, 计算冲激响应旁瓣能量与主瓣能量的比值
定位精度	对各模式下图像完成几何校正后, 计算图像上给定点的地理位置与其真实位置的误差, 并进行统计平均

以辐射分辨率测试为例, 图 3 中给出了标准条带模式下对亚马逊雨林的成像结果 ($R_1 \sim R_6$ 表示评价选定的成像区域), 通过选取亚马逊雨林的均匀场景, 计算图像中各选定区域的辐射分辨率, 并对各区域的计算结果进行平均, 结果表明标准条带模式下辐射分辨率小于等于 1.7 dB。

在精细条带 1 模式下, 进行定位精度测试的典型目标图像如图 4 所示, 通过选取图像中建筑物边缘、道路交叉点与实际地理位置进行比对, 并进行平均得到精细条带 1 模式下的平面定位精度优于 64 m。

各项图像质量指标测试结果如表 3 所示。测试结果均满足图像质量指标的要求, 部分指标达到国际同类卫星先进水平。

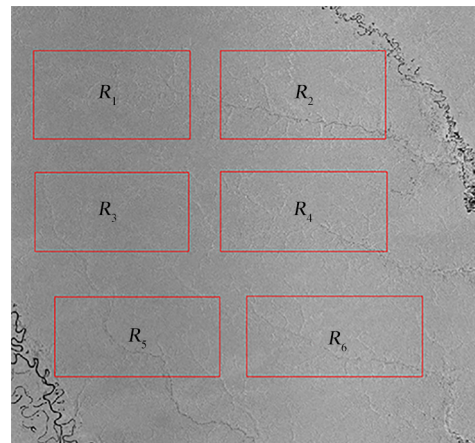
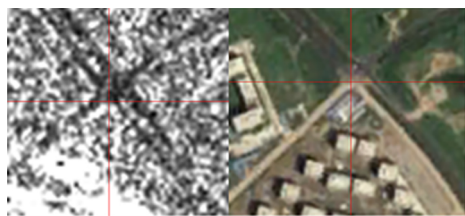
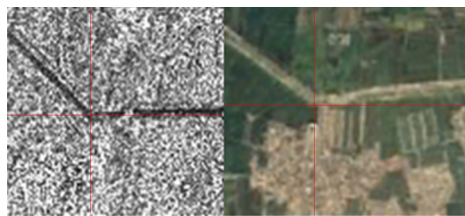


图 3 标准条带模式辐射分辨率测试

Fig 3 Radiometric resolution test in standard strip-map mode



(a) 建筑物边缘作为检查点



(b) 道路交叉点作为检查点

图 4 精细条带 1 模式下定位精度测试图例

Fig 4 Position accuracy test images in fine strip-map mode 1

表 3 图像质量指标验证结果

Table 3 Verification results of image quality indexes

项目		设计指标	在轨验证指标
分辨率/m		1.0~500.0	0.9~490.0
成像幅宽/km		10.0~650.0	11.9~667.8
极化隔离度/dB		≥ 35	≥ 37
极化幅度不平衡度/dB		$\leq \pm 0.50$	0.04~0.27
极化相位不平衡度/(°)		$\leq \pm 10.0$	$\leq \pm 6.9$
噪声等效后向 散射系数/dB	分辨率 1~10 m	≤ -19.0	≤ -20.0
	分辨率 25~500 m	≤ -21.0	≤ -22.0
相对辐射精度/dB		1.0	0.7~0.8
绝对辐射精度/dB		1.5	1.3~1.4
辐射分辨率/dB	分辨率 1~10 m	3.5	< 3.0
	分辨率 25~500 m	2.00	< 1.75
峰值旁瓣比/dB		< -20.0	< -22.0
积分旁瓣比/dB		< -13.0	< -15.0
定位精度 ^[5] /m		≤ 230.0	3.0~202.6

5 结束语

本文通过综合各行业用户的需求,确定了 GF-3 卫星各项图像质量指标。在卫星设计过程中,对各项图像质量的影响因素进行分析,并在卫星及 SAR 载荷的研制过程中,针对图像质量开展了一系列的设计保证工作。GF-3 卫星发射后,对各项图像质量指标进行了在轨测试验证,结果表明:在 GF-3 卫星 12 种成像模式下,各项图像质量指标满足

GF-3 卫星研制要求中规定的指标要求,且与地面仿真分析结果吻合性好,验证了各项误差分配及仿真分析方法的正确性,卫星除实现定量化应用外^[6],还首次实现了地面运动目标检测(GMTI)^[7]等重大技术突破,可为后续 SAR 卫星任务分析及研制提供参考。

参考文献 (References)

- [1] Satish Srivastava, Stephane Cote, Stephanie Muir. The Radarsat-1 imaging performance, 14 years after launch, and independent report on Radarsat-2 image quality[C]//Proceedings of IGARSS, 2010. New York: IEEE, 2010: 3458-3461
- [2] Zhang Han, Li Yu, Su Yi. SAR image quality assessment using coherent correlation function[C]//Proceedings of the 5th International Congress on Image and Signal Processing (ICISP 2012). New York: IEEE, 2012: 1129-1133
- [3] 黄艳,张永利,刘志铭.一种基于点目标的雷达影像质量评价方法[J].测绘工程,2012,21(1):30-34
Huang Yan, Zhang Yongli, Liu Zhiming. A method of SAR image quality evaluation based on pinpoint target [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2012, 21(1): 30-34 (in Chinese)
- [4] 张庆君.高分三号卫星总体设计与关键技术[J].测绘学报,2017,46(3):269-277
Zhang Qingjun. System design and key technologies of the GF-3 satellite[J]. Acta Geodaetica et Carto Graphica Sinica, 2017, 46(3): 269-277 (in Chinese)
- [5] 丁赤飏.高分三号 SAR 卫星系统级几何定位精度初探[J].雷达学报,2017,6(1):11-16
Ding Chibiao. Preliminary exploration of systematic geolocation accuracy of GF-3 SAR satellite system[J]. Journal of Radars, 2017, 6(1): 11-16 (in Chinese)
- [6] Junjun Yin, Jian Yang, Qingjun Zhang. Assessment of GF-3 polarimetric SAR data for physic scattering mechanism analysis and terrain classification [J]. Sensors, 2017, 17(12): 2785
- [7] Chenghao Wang, Guisheng Liao, Qingjun Zhang. First spaceborne SAR-GMTI experimental results for the Chinese Gaofen-3 dual-channel SAR sensor[J]. Sensors, 2017, 17(11): 2683

(编辑:夏光)