

合成孔径雷达卫星系统任务分析方法研究

吴炜琦 张育林

(国防科技大学航天与材料工程学院 长沙 410073)

摘要 系统地总结了国内外合成孔径雷达(SAR)卫星的发展现状及趋势,提出了大视角双侧视SAR卫星的新概念。针对SAR卫星有效载荷的特点,从用户需求分析和关键约束条件入手,研究了卫星轨道设计与覆盖性能分析方法,总结了雷达波位参数设计和系统性能分析方法,提出了SAR卫星系统星地一体化任务分析方法。通过计算机仿真,对大视角双侧视SAR卫星概念进行了初步可行性分析。

关键词 合成孔径雷达, 卫星系统, 任务分析, 性能分析

中图分类号: TN957

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2006)04-0619-05

Mission Analysis for Synthetic Aperture Radar Satellite System

Wu Wei-qi Zhang Yu-lin

(College of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The development of Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite is summarized. A new concept of high-elevation angle, double-side looking SAR satellite system is introduced. According to the analysis of the users' requirements and the key technical restriction, the performance of radar coverage is analyzed with the optimal orbital elements design for SAR satellite, and the beam position parameters design and system performance analysis are implemented. The space-ground integration approach of mission analysis for SAR satellite is proposed, basing on the characteristics of SAR payload. The computer simulation results are presented, which illustrates the validation of the new approach and the feasibility of high-elevation angle, double-side looking SAR satellite concept.

Key words Synthetic aperture radar, Satellite system, Mission analysis, Performance analysis

1 引言

合成孔径雷达(SAR)卫星是当今世界发展极为迅速、竞争非常激烈的空间对地观测系统,在国民经济和国防建设上均具有广阔的应用前景。SAR卫星作为一项复杂的航天系统工程,其总体方案设计是决定系统能否满足技术指标要求的关键技术。而任务分析(Mission analysis)是SAR卫星系统总体设计的基础。在欧洲空间局(ESA)和美国航空航天局(NASA)制定的卫星研制标准中,任务分析阶段对应于其中的阶段A,完成系统可行性论证和初步性能分析,是决定系统研制任务成败的关键阶段^[1]。

目前, SAR卫星正朝着高分辨率、多极化、多波段、多工作模式、高时间分辨率等方面发展^[2]。文献[3,4]介绍了SAR卫星的系统设计与信号处理技术。文献[5]—文献[16]介绍了国外SAR卫星的总体设计参数与主要指标,包括: SEASAT, SIR-A, SIR-B, SIR-C/X-SAR, ERS-1, JERS-1, ALMAZ, RADARSAT, ENVISAT和LACROSSE等卫星(如图1所示)。

SAR卫星同光学成像卫星的区别在于它能够实现大视角成像。光学卫星的空间分辨率随距离增加而变差,并且其轨道高度越低,观测视角越小,覆盖性能也越差。SAR卫星

的空间分辨率与距离无关,可以在较大的视角范围内进行侧视成像。但是,目前SAR卫星的视角一般不超过50度,可视观测带宽不足600km,难以满足军事侦察、灾害监视等特殊应用领域对高时间分辨率观测的迫切需求。

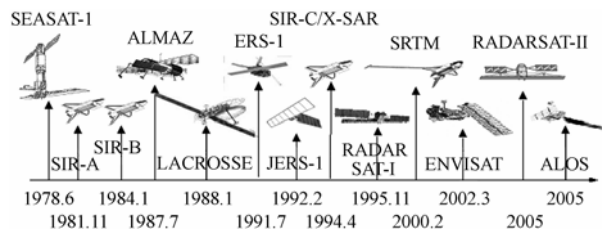


图1 国外SAR卫星发展历程

Fig.1 The development of SAR satellite abroad

本文针对SAR卫星有效载荷的特点,对SAR卫星系统星地一体化指标进行了总结,研究了SAR卫星轨道设计与覆盖性能分析方法,给出了雷达波位参数设计与系统性能分析方法,在此基础上提出了SAR卫星系统星地一体化任务分析方法。根据SAR卫星的发展现状、趋势及应用需求,提出了大视角双侧视SAR卫星的新概念,其可视观测带宽度可以达到2600km~3000km,对全球“重点地区”观测的重访周期小于1天,不仅可以更好地满足灾害监视等任务,还具有巨大的军事应用价值。

2 SAR 卫星系统星地一体化任务分析

由于影响SAR卫星图像质量的因素很多,涉及卫星平台、SAR有效载荷和地面信息处理等分系统,并且各种因素之间相互制约。因此,必须对SAR卫星系统进行星地一体化任务分析,在考虑各种工程误差因素的基础上进行指标设计,实现SAR卫星系统总体指标的优化。

SAR卫星系统星地一体化任务分析的核心内容包括:(1)卫星轨道设计与覆盖性能分析;(2)雷达波位参数设计与系统性能分析。其中,雷达波位设计是SAR卫星系统任务分析特有的研究内容。波位参数既是SAR有效载荷的主要工作参数,同时也是地面信息处理系统的关键成像参数。它是联系卫星和地面系统的纽带,是保证系统满足星地一体化图像质量指标的关键技术。

SAR卫星系统星地一体化图像质量指标分为两类:即描述图像空间性能的指标和描述图像辐射性能的指标。每一类指标又细分为表征能力、精度和范围的指标^[11]。表征图像空间性能的指标包括:(1)空间分辨率;(2)几何定位精度;(3)观测带宽度和入射角范围。表征图像辐射性能的指标是SAR卫星所特有的技术指标,主要包括:(1)辐射分辨率;(2)辐射精度、模糊度、峰值旁瓣比、积分旁瓣比和图像信噪比(SDNR);(3)动态范围和等效噪声^[11]。

基于航天工程总体设计的基本思想,并结合SAR有效载荷的特点,我们对星地一体化SAR卫星系统任务分析方法进行了研究。该方法以用户技术指标和工程约束条件为设计数据,采用自上而下的思想进行SAR卫星系统任务分析。首先

完成轨道参数设计和覆盖性能分析,然后进行雷达参数设计(包括系统参数和波位参数)和系统性能指标分析。在此基础上,通过星地一体化图像质量指标分析,实现卫星平台、有效载荷和地面信息处理3大分系统的工程参数设计与主要总体指标分配。图2详细地描述了SAR卫星系统星地一体化任务分析的系统框架和设计流程。

3 轨道设计与覆盖性能分析

3.1 轨道参数设计

应用需求、用户技术指标要求和工程约束条件是SAR卫星轨道参数设计的输入条件。综合考虑各种因素的影响,SAR卫星的最佳轨道应同时具备太阳同步轨道、回归轨道和冻结轨道特性。根据图2给出的星地一体化任务分析流程,可按如下步骤实现SAR卫星轨道参数优化设计:

- (1) 根据火箭运载能力、SAR天线发射功率和大气阻力共同确定卫星轨道高度的范围;
- (2) 根据卫星观测性能要求确定回归周期和重访时间,在此基础上确定卫星轨道高度;
- (3) 根据太阳同步轨道要求确定轨道倾角 i ;
- (4) 根据冻结轨道要求确定偏心率 e 和近地点幅角 ω ;
- (5) 根据雷达天线热控以及卫星组网要求确定升(降)交点地方时,并计算升交点赤经 Ω 。

冻结轨道对星载SAR系统设计非常有利,可以有效地减少系统设计的复杂性。冻结轨道分为两类:一类是轨道倾角 $i=63.43^\circ$ 的轨道;另一类是 $\omega=90^\circ$ 的近极地轨道。如要求全球覆盖,SAR卫星应选择第二种类型的冻结轨道。

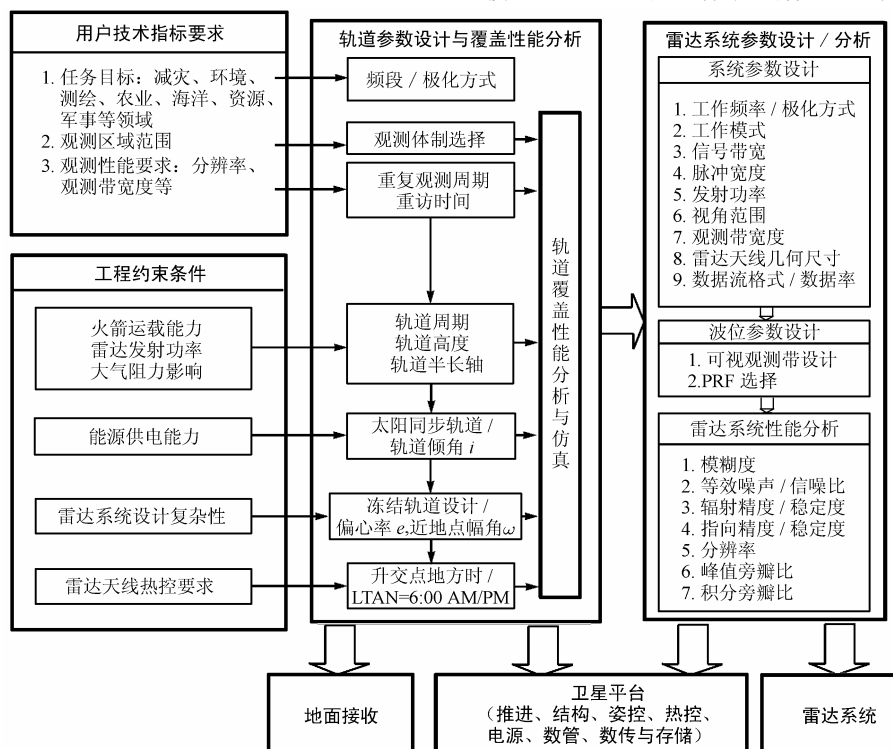


图2 SAR卫星系统星地一体化任务分析方法的系统框架和设计流程

Fig.2 Framework and design diagram of space-ground integration approach of mission analysis for SAR satellite

3.2 覆盖性能分析

SAR卫星的覆盖性能主要包括: (1)重访时间分析; (2) 可视观测能力(Access capability)分析; (3)全球覆盖能力(Coverage capability)分析; (4)系统响应时间和数据量分析。

与光学成像卫星相比, SAR卫星的覆盖性能和空间分辨率受轨道高度和观测视角的限制较小。SAR卫星的覆盖性能主要取决于轨道高度 H 、轨道倾角 i 和SAR天线入射角 θ_i 。图3(a)给出了卫星可视观测带宽度随轨道高度和入射角范围变化的规律, 图3(b)给出了全球覆盖性能随轨道高度和轨道倾角变化的规律。图3仿真曲线表明: SAR卫星的可视观测带宽度随轨道高度和入射角的增加而增加(图3(a)), 其全球覆盖性能在轨道倾角为 90° 时达到最佳(图3(b))。

由图3(a)可知: 在波束入射角范围为 $20^\circ\sim 75^\circ$ 的条件下, 单侧视SAR卫星的可视观测带宽度在轨道高度 $H=600\text{km}$ 时

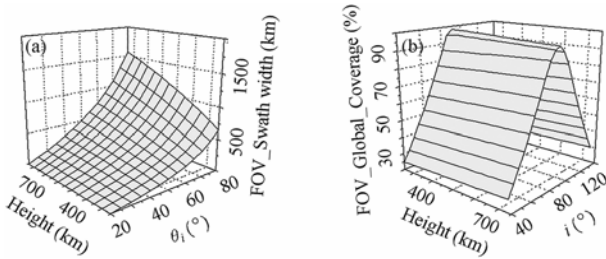


图3 SAR卫星的覆盖性能与卫星高度、轨道倾角和雷达入射角的关系
 (a) 可视观测带宽度(最小入射角 $\theta_{\min}=20^\circ$)
 (b) 全球覆盖百分比(入射角 $20^\circ\sim 55^\circ$)

Fig.3 The relationship between coverage and height of SAR satellite, orbit inclination angle and the angle of incidence

(a) Visible strap width(with minimum angle of incidence $\theta_{\min}=20^\circ$)
 (b) Percentage of coverage(with the angle of incidence $20^\circ\sim 55^\circ$)

达到 1300km , 在 $H=800\text{km}$ 时可达 1500km 。若卫星具备双侧视成像功能, 则所合成的可视观测带宽度达到 $2600\sim 3000\text{km}$, 能够在1天内对全球范围内的目标进行重复观测, 提升了SAR卫星的对地观测能力。基于上述分析结果, 卫星使用大视角双侧视SAR具有更好的覆盖性能。

4 雷达波位设计与性能分析

SAR卫星的覆盖能力可通过波位设计实现。SAR波位设计与性能分析分两步进行。首先进行SAR系统参数设计, 主要包括: 工作频率, 极化方式, 工作模式, 信号带宽, 脉冲宽度, 发射功率, SAR视角范围, 观测带宽度, SAR天线尺寸等(图2)。然后, 完成波位参数设计和图像质量指标分析。其中, 波位参数主要包括: 近距点视角、远距点视角、波束中心视角、脉冲重复频率、回波时延、回波窗位置和回波数据率等。图像质量指标包括: 观测带宽度、空间分辨率、模糊度和等效噪声。

基于星地一体化设计思想, 下面给出 SAR 波位设计与系统性能分析方法(图 4):

- (1) 根据数据率限制、调频脉冲压缩性能、距离徙动校正以及回避星下点回波和发射脉冲遮挡等约束条件确定各波位的观测带与脉冲重复频率;
- (2) 根据地球椭球模型、卫星轨道参数、平台姿态参数、天线性能参数、地面散射特性模型和SAR波位参数等条件进行系统模糊度指标分析;
- (3) 根据系统热噪声和ADC量化噪声分析各波位的等效噪声和信噪比指标;
- (4) 根据系统性能指标分析结果, 对波位设计参数进行修正, 完成波位参数的优化设计。

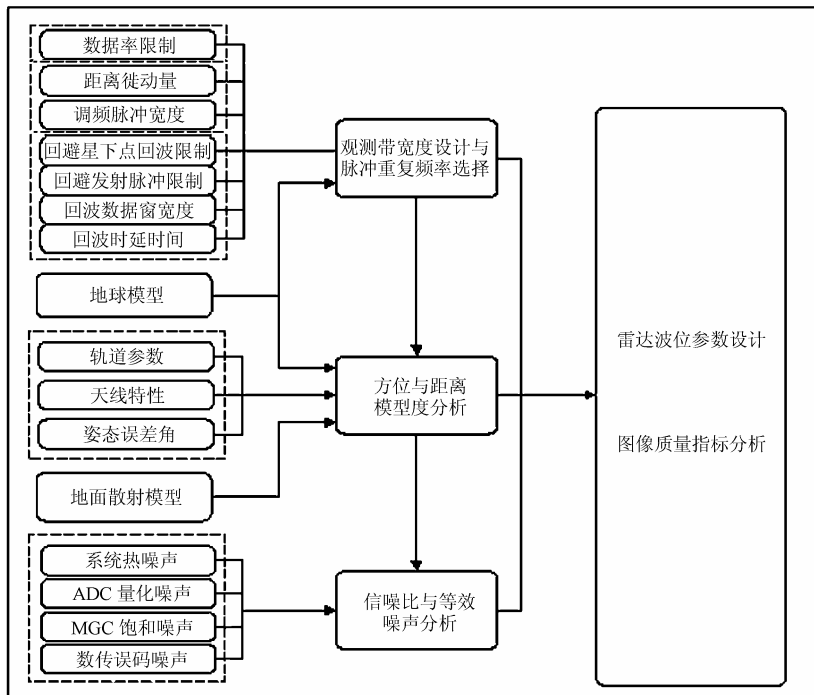


图 4 SAR 波位参数设计与性能分析流程

Fig.4 SAR beam position parameters design and performance analysis frame

5 大视角双侧视 SAR 卫星

机载 SAR 系统受载机飞行高度的限制, 为了实现远距离(100km)探测成像的要求, 其 SAR 波束的入射角可以工作在 $75^\circ\sim 80^\circ$ 范围内。在这种大视角条件下获取的 SAR 图像能够凸现地形、地貌的结构特征, 更有利于图像的解译判读和信息提取。但是, 受 SAR 发射功率、天线尺寸和姿态控制精度等因素的限制, 目前 SAR 卫星的入射角一般不超过 55° , 只有加拿大的 RADARSAT-1 卫星进行了大视角成像试验。

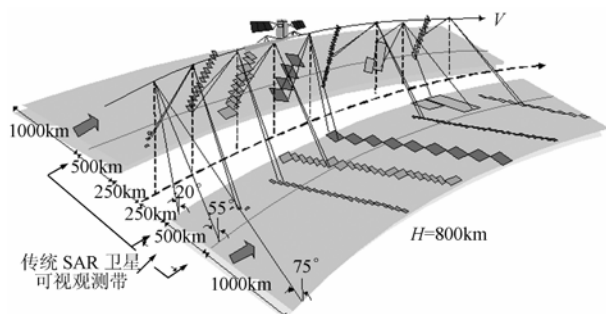


图5 大视角双侧视SAR卫星系统概念示意图
Fig.5 High-elevation angle double-side looking SAR satellite concept design

针对未来 SAR 卫星的功能需求分析, 本文提出了大视角双侧视 SAR 卫星系统概念。距离模糊是大视角双侧视 SAR 卫星面临的主要矛盾, 需要进行深入研究。增加 SAR 天线高度是解决距离模糊问题直接的手段。当轨道高度 $H=620\text{km}$ 且入射角 75° (视角 63°) 时, 50km 的观测带所对应的 SAR 天线 3dB 波束宽度仅为 0.42° 。此时, L 波段 SAR 天线的高度要达到 32m , X 波段 SAR 天线的高度为 4m , 才能满足观测带宽的指标要求。综上所述, 大视角双侧视 SAR 卫星工作在 X 波段比较合适。

大视角双侧视 SAR 卫星需要解决以下关键技术: (1)距离模糊抑制技术; (2)高精度、高稳定度平台姿态控制技术; (3)在大视角、大距离徙动条件下的高精度成像处理技术; (4)满足双侧视观测的卫星构型设计; (5)大型、轻量化相控阵天线技术等。

6 仿真结果与分析

作为算例, 图 6 给出了一组覆盖性能的对比分析结果。它们的轨道高度均为 620km 左右, 回归周期均为 29 天, 重访时间分别为 5 天和 1 天。图 6(a)和图 6(b)分别为单(右)侧视和双侧视 SAR 卫星观测能力的仿真曲线。仿真结果表明: 采用大视角双侧视星载 SAR 体制能够在 1 天内实现对全球 99.5% 的目标进行重复观测。

假设大视角双侧视 SAR 卫星的轨道高度 $H=625\text{km}$, 雷达工作波长 $\lambda=0.03\text{m}$, 方位向天线长度 $L=9\text{m}$, 脉冲重复频率为 1880Hz , 方位分辨率为 5m 。分别对距离向天线高度 $D=4\text{m}$, 4.5m 和 5.0m 三种参数条件进行距离模糊度 (RASR) 指标分析如图 7 所示。

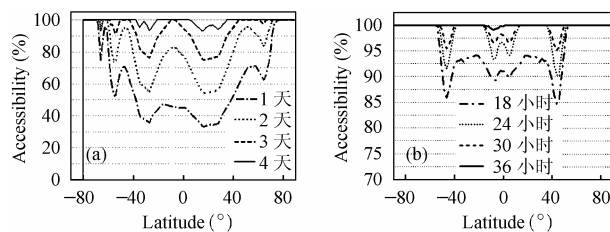


图6 大视角双侧视SAR卫星与单(右)侧视SAR卫星覆盖性能对比分析

- (a) 单(右)侧视 SAR 卫星(入射角 $20^\circ\sim 55^\circ$)
(b) 大视角双侧视 SAR 卫星(入射角 $20^\circ\sim 75^\circ$)

Fig.6 The coverage analysis of high-elevation double-side looking and single(right)-side looking SAR satellite

- (a) Single(right)-side looking SAR satellite (with the angle of incidence $20^\circ\sim 55^\circ$)
(b) High-elevation double-side looking SAR satellite (with the angle of incidence $20^\circ\sim 75^\circ$)

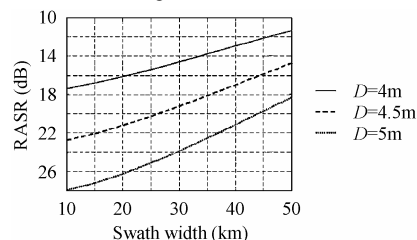


图7 距离模糊度(RASR)随观测带宽度变化规律
Fig.7 Variation of RASR with the swath width

仿真结果表明: 当 $D=4.0\text{m}$ 时, RASR 指标较差, 不能满足设计要求; 当 $D=4.5\text{m}$ 时, RASR 优于 -16dB 对应的观测带宽约 45km ; 当 $D=5\text{m}$ 时, 天线 3dB 波束宽度对应的观测带宽约 40km , 此时 RASR 优于 -20dB 。

可见, 在天线高度和雷达发射功率足够的条件下, 大视角双侧视 SAR 卫星具备 1 天内全球重复观测的能力, 且在 $40\sim 45\text{km}$ 观测带宽度内的 RASR 指标优于 -16dB 。若采用自适应波束形成和交替发射正交脉冲技术, 可进一步改善距离模糊度指标。综上所述, 在理论上这种新体制 SAR 卫星是可行的, 最新技术动向也表明, 大视角双侧视 SAR 卫星很可能成为未来 SAR 卫星的重要发展方向。

参考文献

- [1] Wertz J R, Larson W J. Space mission analysis and design[M]. Third edition, Torrance, California: Microcosm Press, 1999.
- [2] 郭华东. 感知天地——信息获取与处理技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [3] Curlander J C. Synthetic Aperture Radar Systems and Signal Processing[M], New York, John Wiley & Sons, Inc., 1991.
- [4] 魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [5] Born G, Dunne J A, Lowe D B. SEASAT Mission Overview[J], Science, 1979, 204: 1405-1406.
- [6] Jordan R L. The SEASAT-A synthetic aperture radar system[J]. IEEE Journal of Ocean Engineering, 1980, OE-5(4): 154-164.

- [7] Elachi C, *et al.*. Spaceborne synthetic-aperture imaging radars: Applications, techniques and technology[J]. *Proceedings of IEEE*, 1982, 70(10): 1174–1207.
- [8] Cimino J B, *et al.*. SIR-B the second shuttle imaging radar experiment[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1986, 24(7): 445–452.
- [9] Yoshiaki N, Hideo N, *et al.*. Japanese earth resources satellite-1 synthetic aperture radar[J]. *Proc. IEEE*, 1991, 79(6): 800–808.
- [10] Jordan R L, *et al.*. The SIR-C/X-SAR synthetic aperture radar system[J]. *IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 829–839.
- [11] Rekenhaller D A. Digital processing for the "ALMAZ" SAR imagery[A]. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium 1992*: 603–605.
- [12] Luscombe A P, Ferguson I, *et al.*. The RADARSAT synthetic aperture radar development[J]. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 1993, 19(4): 298–320.
- [13] Parashar S. RADARSAT program[A]. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*[C], 1994. IGARSS'94. Pasadena, USA, Vol. 3: 1709–1713.
- [14] Fox P. The Radarsat II mission[A]. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*[C], 1999. IGARSS'99. IEEE 1999, Vol. 3: 1500–1502.
- [15] Desnos Y L, Buck C, Guijarro J, *et al.*. The ENVISAT advanced synthetic aperture radar system[A]. *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium*[C], 2000, vol. 3: 1171–1173.
- [16] Adam J A. Peaceful watchdogs[J]. *IEEE SPECTRUM*, November 1989, 28–33.
- [17] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- 吴炜琦: 男, 1962年生, 在职博士, 长期从事航天工程的总体技术和管理工作.
- 张育林: 男, 1958年生, 博士生导师, 长期从事分布式航天器系统研究.