

毫米波 SAR 卫星未来发展展望

王 辉^{1,2,3}, 付玉龙^{1,2,3}, 李金亮^{1,2,3}

(1.上海市毫米波空天信息获取及应用技术重点实验室,上海 201109; 2.上海卫星工程研究所,上海 201109;
3.上海航天技术研究院 毫米波成像技术重点实验室,上海 201109)

摘要:合成孔径雷达(SAR)是一种主动微波遥感设备,具有不受天气、气候影响的优点,具备全天时、全天候观测的能力,在全球测绘、自然灾害防治等领域得到了广泛的应用。目前在轨SAR卫星主要频段为L、C、X、Ku等,毫米波(Ka)SAR卫星因易实现超高分辨率、系统体积小、重量轻等优点已成为未来SAR卫星的发展热点之一。本文分析了毫米波SAR卫星的特点,综述了其发展现状,阐述了其主要应用方向,展望了毫米波SAR卫星技术的发展趋势。

关键词:雷达遥感;毫米波;合成孔径雷达卫星;调频连续波;脉冲

中图分类号: TN 958; TN 959 **文献标志码:** A

DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.001

Development Prospects of Millimeter Wave SAR Satellites

WANG Hui^{1,2,3}, FU Yulong^{1,2,3}, LI Jinliang^{1,2,3}

(1.Shanghai Key Laboratory of Remote Sensing and Millimeter Wave Information Acquisition and Application Technology, Shanghai 201109, China; 2.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 3.Key Laboratory of Millimeter Imaging, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: Synthetic aperture radar (SAR) is an active microwave remote sensing equipment. It has the advantage of not being affected by weather and climate, has the ability of all-day and all-weather observation, and has been widely used in the fields such as global surveying, global mapping, and natural disaster prevention. At present, the main frequency bands of on-orbit SAR satellites are L, C, X, Ku, etc. Millimeter-wave (Ka) SAR satellites have become one of the hotspots for the development of SAR satellites in the future, owing to their advantages such as easy realization of ultra-high resolution, small size, and light weight. In this paper, the characteristics of millimeter-wave SAR satellites are analyzed. The development status is reviewed, the main application directions are described, and the development trend of millimeter-wave SAR satellite technology is prospected.

Key words: radar remote sensing; millimeter wave; synthetic aperture radar satellite; frequency modulated continuous wave; pulse

0 引言

合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)是一种主动微波遥感设备,它通过雷达平台和目标之间的相对运动,在一定积累时间内,将雷达在不同空间位置上接收的宽带回波信号进行相干处理得到目标二维图像。在距离向,SAR通过发射宽带线性调频信号并进行脉冲压缩来提高分辨率;在方位向,SAR利用目标和雷达的相对运动形

成一个虚拟的合成孔径来获得高分辨率,通过在匀速直线运动的平台上以一定的脉冲重复频率发射和接收脉冲信号,将回波信号进行相干处理之后实现方位向高分辨率。由于SAR不受天气、气候的影响,具备全天时、全天候的优势,其在军事侦察、全球测绘、自然灾害防治等军民领域得到了广泛的应用。

自1978年第一颗SAR卫星SeaSAT成功发射

收稿日期:2022-03-21;修回日期:2022-04-07

作者简介:王 辉(1972—),女,博士,研究员,主要研究方向为星载毫米波SAR体制。

以来,星载 SAR 技术受到了各国的高度重视,目前在轨的 SAR 卫星主要频段已涵盖 L、C、X、Ku 等^[1-3]。毫米波是处于微波和光波之间的电磁波,频率范围为 30~300 GHz(波长 1~10 mm),其中 Ka 波段(35 GHz)具有极佳的星载 SAR 能力,为目前毫米波星载 SAR 卫星主要关注的大气窗口频段。与厘米波段相比,毫米波 SAR 有如下优点:带宽可以更大、天线尺寸更小,更容易实现超高分辨率;具有类光学特性,目标轮廓效应更加清晰;对植被、雪、土壤等的穿透力较弱,更加适合数字表面模型的生成;在相同干涉测量精度下,毫米波干涉 SAR (Interferometric SAR, InSAR)基线要短许多,更加适合单星多模式观测^[4-5];系统体积小、重量轻,更利于轻小型化 SAR 卫星的实现等。基于上述优点,毫米波 SAR 卫星技术的研究与应用已成为国内外对地观测的研究热点。

本文以毫米波 SAR 卫星的发展为背景,首先分析了毫米波 SAR 卫星的特点,其次综述了其发展现状。在此基础上,进一步阐述了毫米波 SAR 卫星的主要应用方向,并从连续波体制和脉冲体制两个方面展望了毫米波 SAR 卫星技术的发展趋势。

1 毫米波 SAR 卫星概述

1.1 毫米波 SAR 卫星特点

与低频段的 SAR 相比,毫米波 SAR 具有如下特点^[6-7]:

1) 可实现高分辨率。毫米波 SAR 的工作频率更高,系统可发射相对较大的带宽信号,可获得距离向高分辨率;毫米波 SAR 工作波长更短,系统天线的实孔径尺寸更小,可获得方位向高分辨。

2) 体积小、重量轻。毫米波波段天线及射频模块的尺寸远小于低波段,因此毫米波 SAR 系统具有体积小、重量轻的特点。

3) 干涉基线短。毫米波波长短,因此在获取相同的干涉测量精度时,毫米波 InSAR 所需的基线比低频段 SAR 要小很多。

4) 目标轮廓效应明显。雷达工作频段越高,目标轮廓效应就越明显。在 Ka 波段,目标几何外形的轮廓能产生更强的回波,有利于获取清晰的目标几何特征。

5) 穿透力较弱。毫米波对植被、雪、土壤等的

穿透力较弱,更加适合观测对象表面信息的提取,并形成观测区域高精度数字表面模型。

6) 姿态控制与测量精度要求高。毫米波较短的波长使得其天线波束宽度较窄,为了保证成像质量,对波束指向精度提出了更高的要求。波束指向精度的保证,一方面取决于天线自身的波束指向;另一方面也依赖于卫星平台的姿态控制精度。特别是天线的方位向波束宽度,往往小于 0.1° 。从控制角度要满足星载毫米波 SAR 天线波束指向精度的要求极为困难,往往需要结合姿态测量信息在成像处理时进行补偿,对卫星平台的姿态测量精度提出了较高的要求。而应用于干涉测绘时,毫米波较短的波长使得其对基线长度的需求较低,使得毫米波 InSAR 具备实现单星高精度干涉的能力,是毫米波 SAR 的一大优势。但是单星干涉测量,其基线倾角的确定在很大程度上取决于卫星平台的姿态确定精度,同样对卫星平台的姿态确定能力提出了严苛的要求。

7) 供电能力要求高。星载毫米波 SAR 较大的传输损耗,要求 SAR 系统天线具有较高的功率孔径积,即毫米波 SAR 系统需要较高的发射功率;同时,毫米波频段功放组件较低的效率,使得毫米波 SAR 系统的功耗问题凸显,功耗往往达到上万瓦甚至更高。大功率的脉冲供电需求,给卫星平台供电分系统的设计带来了巨大挑战。因此,满足毫米波 SAR 在轨的有效工作时长成为毫米波 SAR 卫星设计面临的重要难题。

8) 热控要求高。一方面,星载毫米波 SAR 较高的功耗和较低的功放组件发射效率,使得卫星平台供给的大量功率在 SAR 天线工作时被转化为热耗,而及时排散发射天线大功率 TR 组件和多通道电源组件工作时发出的热量,并将 TR 组件温度一致性控制在指标范围内,这对星载毫米波天线热控提出了极高要求。同时,为了满足幅宽覆盖的要求,毫米波 SAR 天线的距离向尺寸往往较小,不能给天线热控提供足够的散热面,这就要求卫星平台在结构布局设计时给 SAR 天线留出足够的散热面空间。另一方面,毫米波频段射频电路幅相特性受温度变化的影响非常大,因此卫星平台需要采取针对性热控措施,将舱内射频单机的工作温度控制在较小的温度范围内,以保证其工作性能的稳定。

9) 载荷占比要求高。相比传统频段星载 SAR,

毫米波 SAR 天线较小的尺寸使得毫米波 SAR 卫星具有较好的轻小化潜力。但是毫米波 SAR 对卫星平台姿态、供配电、热控等方面的高要求,又制约了整星小型化的实现。因此,为了充分开发毫米波 SAR 卫星的轻小化潜力,高载荷占比的设计与实现是毫米波 SAR 卫星必须攻克的关键技术,从某种程度上来说也是决定毫米波 SAR 卫星成败的核心因素之一。

1.2 毫米波 SAR 卫星发展概况

由于毫米波段大气衰减大于传统低频段,前期星载毫米波 SAR 卫星的发展受到了较多的限制。近年来,随着大量毫米波 SAR 技术研究的开展和相应工艺水平的提高,星载毫米波 SAR 卫星技术开始进入快速发展阶段。

2003 年,美国洛克希德·马丁公司首次提出了 Ka 波段星载可重构孔径聚束 SAR 的设计方案^[8],如图 1 所示。该方案中卫星轨道高度为 700 km,采用 $8.51\text{ m} \times 2.90\text{ m}$ 的卡塞格伦天线,发射功率密度为 25.5 W/m^2 ,馈源为高功率固态收发(Transmit/Receive, TR)阵列器件,每个 TR 器件输出功率为 $2\sim 4\text{ W}$,数据率为 $0.10\sim 0.44\text{ Gbit/s}$,入射角为 $15^\circ\sim 70^\circ$,距离向和方位向设计分辨率都为 1 m 。

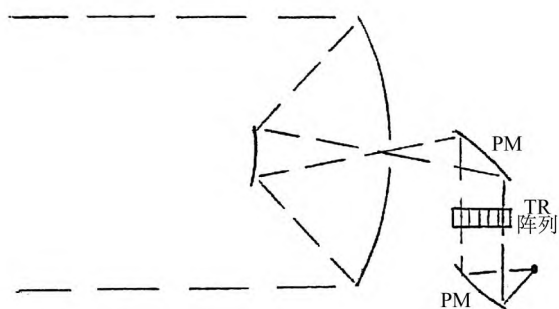


图 1 Ka 波段星载可重构孔径聚束 SAR 系统

Fig. 1 Schematic diagram of Ka-band reconfigurable SAR

2005 年,德宇航针对地球探索者计划(EE8)提出了 SIGNAL 系统(SAR for Ice Glacier and Global Dynamics)^[9]。SIGNAL 是一种创新的 Ka 频段 SAR 卫星,轨道为 750 km 太阳同步轨道,测高精度 $10\text{ cm}\sim 1\text{ m}$,测绘带宽 20 km ,其主要目的是准确测量冰川、冰盖、极地变化、海拔、流速,为更好地了解冰川盆地的水文以及为南北极水循环提供科学研究支撑,填补全球冰川的平衡和动力学数据库的空

白。该系统使用一对编队飞行卫星,获得所需的长基线以实现高灵敏度和测量的稳定性。

2006 年,加州理工学院喷气推进实验室提出了“冰川和陆地冰面地形干涉仪”(Glacier and Land Ice Surface Topography Interferometer, GLISTIN)系统的论证方案,该系统是一个实现冰川和冰层表面测绘的新型单平台 InSAR,一颗星安装两部天线,干涉基线为 8 m ^[10-11],如图 2 所示。该系统具有高空间分辨率、高垂直测量精度,并且不受云层覆盖影响的特点。为解决宽测绘和高发射功率的限制,GLISTIN 采用数字波束合成技术(DBF)。GLISTIN 为天基系统中首次提出这样的设计理念。通过论证,该系统在内陆表面高程测量精度优于 10 cm ,在沿海地区高程精度达到几十厘米。该系统轨道高度大约为 600 km ,运行于 92° 倾角非太阳同步轨道,地面测绘带宽为 70 km ,其他主要参数见表 1。



图 2 GLISTIN 系统

Fig. 2 Schematic diagram of GLISTIN system

表 1 GLISTIN 系统参数表

Tab. 1 Parameters for GLISTIN system

参数	数值
中心频率/GHz	35
带宽/MHz	80
峰值发射功率/kW	1.5
脉冲宽度/ μs	25
脉冲重复频率/kHz	4
天线长度 \times 宽度/ m^2	4×1.01
观测幅宽/km	70

2007 年,美国国家研究理事会发布了第一个有关地球科学和应用的 10 年空间观测计划——“地表水和海洋地形”(Surface Water and Ocean

Topography, SWOT) 卫星^[12-13], 如图 3 所示。该星主要由 NASA 与法国航天局(CNES)合作研制, 其他参与方包括加拿大和英国航天局。项目人员已完成了 SWOT 有效载荷模块研制, 目前正在与法国提供的卫星平台集成。SWOT 发射计划一再推迟, 预计 2022 年 12 月由 SpaceX“猎鹰-9”火箭发射。SWOT 主载荷之一为 Ka 波段的 InSAR, 其工作频率 35 GHz, 信号带宽 200 MHz, 可以实现 0.75 m 的斜距分辨率和 5 m 的地距分辨率。系统采用 4 m × 0.2 m 的相控阵天线, 干涉基线长度为 10 m, 采用星下点双测绘带模式, 同时对星下点两侧进行观测, 每个测绘带宽度为 60 km, 两侧共 120 km, 详细参数见表 2。SWOT 可实现海面的高精度和宽测绘带测量, 从而对海洋中小范围的变化进行研究, 同时也可测量陆地水体高度, 对陆地水体的储存、流失导致的空间和时间分布进行研究。

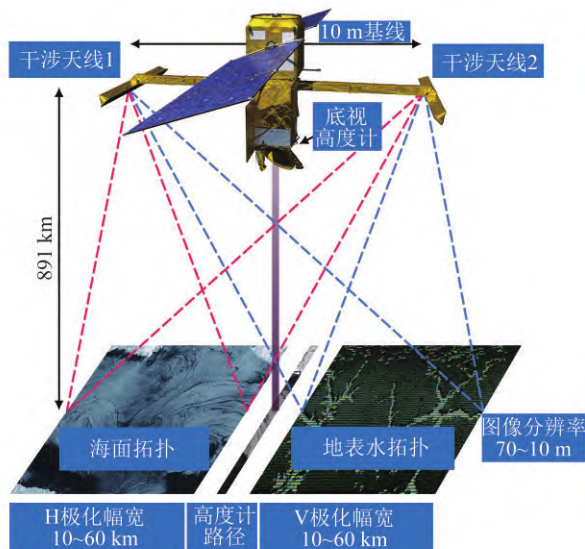


图 3 SWOT 系统

Fig. 3 Schematic diagram of SWOT system

2008 年, 欧空局 (European Space Agency, ESA) 提出了基于扫描接收技术 (Scan on Receive, SCORE) 的 Ka 波段星载 SAR (Interferometric SAR, InSAR) 的设计方案。鉴于系统组件在高频段容易产生较大的损耗, 因此在设计时采用收发分离的天线架构: 发射时选用高增益的反射面天线, 接收时选用 8 通道的相控阵天线, 并采用基于 DBF 的扫描接收技术。采用这种系统架构, 能有效降低对发射功率的需求, 采用扫描接收技术还能减小雨

表 2 SWOT 系统参数表^[12-14]

Tab. 2 Parameters for SWOT system^[12-14]

项目名称	设计指标
卫星发射质量	约 2 000 kg
卫星尺寸	展开尺寸: 14.875 0 m × 10.498 6 m × 5.008 7 m
卫星发射轨道	轨道高度: 约 890 km 轨道倾角: 77.6°
载荷	载荷质量: 880 kg 载荷功率: 1 407 W 载荷数据量: 8.6 Tbit·d ⁻¹
InSAR	数据率: 6 Gbit·s ⁻¹ 质量: 约 294 kg 在轨平均功率: 810 W 发射功率: 1.5 kW 数据率: 陆地: 271 Mbit·s ⁻¹ 海洋: 3 与数传固存间的数据率: 360 Mbit·s ⁻¹ 收拢尺寸: 3.0 m × 2.8 m × 2.8 m 展开尺寸: 5.0 m × 10.6 m × 1.0 m
底视高度计	频段: C, Ku
姿轨控分系统	3 台星敏感器 8 台太阳敏感器 (+Z、-Z 轴各 4 台) 4 台反作用飞轮 (0.215 N·m 及 20 N·m·s) 2 台磁力矩器 3 台磁力矩器 300 A·m ²
推进分系统	贮箱: 130 L 8 台推力器
测控分系统	频段: S 事后定轨精度 3 cm
供电分系统	蓄电池: 320 Ah (150 kg) 太阳阵构型: 双翼太阳阵, 每翼 3 块基板 太阳阵驱动方式: 固定翼 总面积: 35 m ²
数传分系统	频段: 8.025~8.400 GHz 极化: 左右旋双圆极化 天线跟踪范围: ±60° 极化隔离: 25 dB 下传数据量: 7.9 Tbit·d ⁻¹ 数据率: 310 Mbit·s ⁻¹ 固存容量: 2.3 Tbit
寿命	> 3 a, 目标 5 a
火箭	猎鹰 9 号火箭

水后向散射对成像性能的干扰^[6]。

2010 年欧空局又进行了 Ka 波段 SAR 单平台高分辨率干涉的验证工作, 用于获取高精度数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM), 其中 DSM 瞄准 HRTI-3 标准^[15-16]。该系统采用单星双天线一发两收体制和 DBF 扫描接收技术, 如图 4 所示。该系统工作频率为 35.75 GHz, 发射带宽为 300 MHz, 发射天线尺寸为 2 m × 0.35 m 的, 接收天线直径为 2.25 m, 接收天线干涉基线为 12 m, 能够获得 1 m × 1 m 的分辨率, 详细参数见表 3。

表 3 欧空局 Ka InSAR 参数表
Tab. 3 Parameters for ESA Ka InSAR

参数	数值	参数	数值
中心频率/GHz	35	基线长度/m	12
带宽/MHz	300	测绘带宽/km	16
峰值发射功率/kW	3.5	轨道高度/km	500
平均发射功率/W	472	占空比/%	13.5
入射角/(°)	34	分辨率/m	1×1
发射天线尺寸/m	2×0.35	高度分辨率/m	2
接收天线直径/m	2.25	数据率/(Gibt·s ⁻¹)	2×2

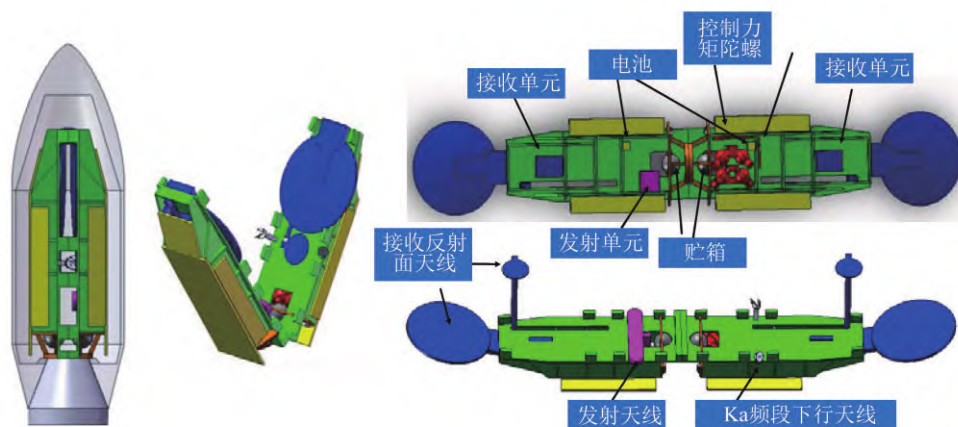


图 4 欧空局 Ka InSAR

Fig. 4 Schematic diagram of ESA Ka InSAR

2012年,意大利阿莱尼亚宇航公司(Alenia)提出一种在Ka频段工作的单星SAR干涉仪,采用变异的双基方案满足单星干涉测量需求,采用三根天线:其中一根只用于发射,安装在卫星本体;另外两根接收天线安装在吊杆顶端。通过天线的设计和部署,能够实现交轨干涉和顺轨干涉的能力^[17]。系统示意图如图5所示,系统详细参数见表4。

表 4 意大利阿莱尼亚航天公司 Ka InSAR 参数表

Tab. 4 Parameters for Alenia Ka InSAR

参数	数值
轨道高度/km	500~800
中心频率/GHz	35.75
带宽/MHz	<500
峰值功率/W	3 500
基线长度/m	11
距离×方位分辨率/测绘带宽	HR模式:1 m×1 m/8 km MR模式:100 km
高程精度/m	2
载荷质量/kg	700

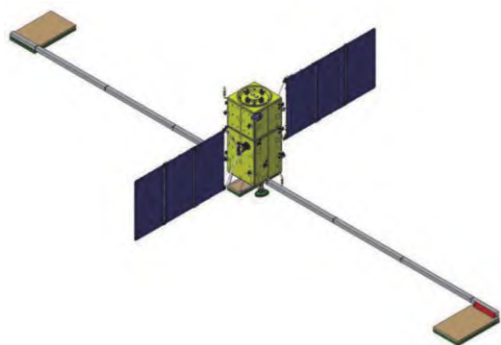


图 5 阿莱尼亚宇航公司 Ka InSAR

Fig. 5 Schematic diagram of Alenia Ka InSAR

2012年,德宇航(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)在欧空局提供基金条件下,也对Ka波段InSAR系统进行了研究并提出了设计方案^[18],如图6所示。该方案中卫星向两侧各伸出10 m的天线支撑臂,2个发射天线安装在天线支撑臂末端,2个接收天线则安装在卫星星体上,干涉基线长度约为10 m,2个发射天线和2个接收天线均

为抛物面天线。该系统在方位向两发两收,采用 DBF 技术,并在数据处理上采用多孔径处理方法 (Multi-aperture Processing Method, MAPS) 降低 PRF,同时获得宽测绘带,距离向采用 SCORE 技术

获得高增益。系统结构可以调整为 4 个相位中心的结构,以同时实现干涉和地面运动目标检测技术 (Ground Moving Target Indication, GMTI),系统详细参数见表 5。

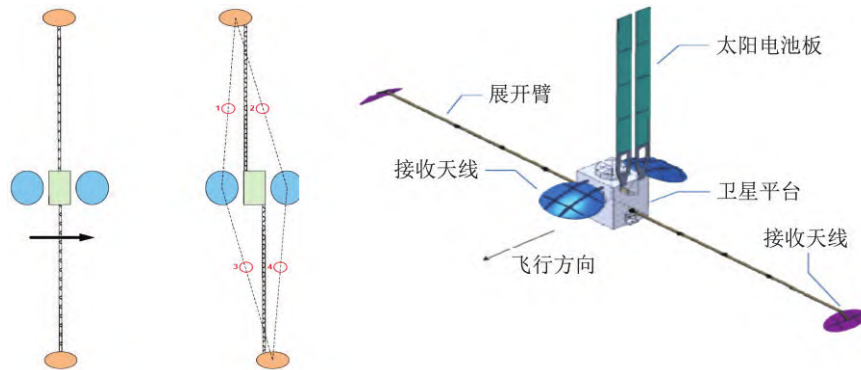


图 6 德宇航 Ka InSAR

Fig. 6 Schematic diagram of DLR Ka InSAR

表 5 德宇航 Ka InSAR 参数表

Tab. 5 Parameters for DLR Ka InSAR

参数	数值
轨道高度/km	550
中心频率/GHz	35.75
发射天线尺寸/m	2.0×0.4
接收天线/m	2×2
峰值功率/W	3 500
基线长度/m	10
测绘带宽/km	12~15

2014 年,阿斯特里厄姆公司 (Astrium GmbH) 和德宇航在欧空局的支持下提出了一种 9 通道 MPAS Ka SAR 系统,可以同时实现干涉和 GMTI^[19-22],如图 7 所示。双偏置发射天线安装在 10 m 展开臂末端,接收天线长 13 m 由 9 个单偏置天线模块组成。轨道高度 400~450 km,测高精度 1.80~2.85 m,窄幅工作模式下距离向分辨率为 2 m,测绘带宽 12 km,宽幅模式下距离向分辨率为 5 m,测绘带宽 50 km。

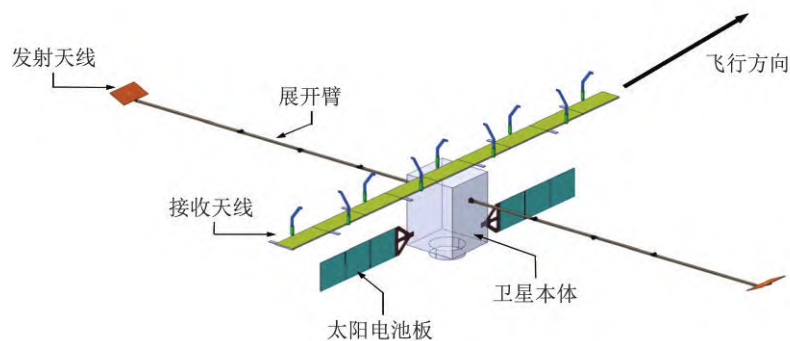


图 7 阿斯特里厄姆公司 Ka InSAR

Fig. 7 Schematic diagram of Astrium GmbH Ka InSAR

2016 年,德宇航提出了一种在 Ka 波段中运行的单通道跨轨道星载 InSAR 方案^[23],如图 8 所示。该单通道跨轨 SAR 扫描波束侧视角为 25°,包含 1 副发射天线和 2 副多功能接收天线 (Multi-Function Antenna, MFA)。发射天线为馈源阵列位于为焦

平面的单偏置反射面天线。基于每个波束一个馈源的设计,以及利用放置在馈源阵列和 2 kW 放大器之间的开关矩阵,该天线能够生成 8 个高程扫描波束。每副接收天线为馈源阵列,位于焦平面的偏置三反射面,以实现扫描接收操作。每个接收天线

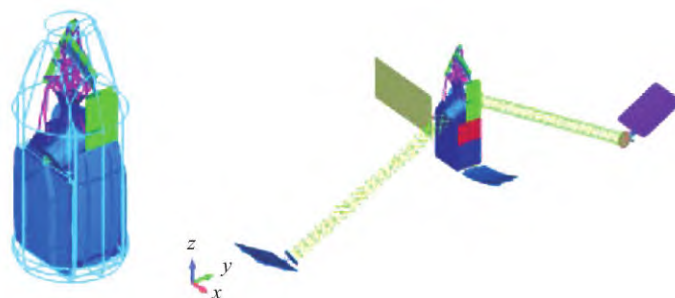


图 8 德宇航 Ka 波段单通道跨轨道星载 InSAR

Fig. 8 Schematic diagram of DLR Ka-band InSAR antenna farm

可产生 56 个波束,每个波束由 3 个相邻馈源产生。接收天线位于可展开臂的尖端,展开后支撑臂与卫星本体间的夹角为 60° 。

经过 10 多年的发展,星载毫米波 SAR 技术已经由单纯的技术验证性质的系统探索论证阶段,发展到具有明确应用和工程研制计划的系统设计、研制阶段。随着天基毫米波遥感机理研究的不断深入和各国相应项目的不断推进,星载毫米波 SAR 系统在不久的将来将很快加入到在轨星载 SAR 卫星的大家庭中。

2 毫米波 SAR 卫星应用前景

2.1 冰雪探测

冰川、冰盖、海冰和积雪是全球冰冻圈的重要组成部分,是气候和生态环境变化的指示器。在经济全球化、区域一体化不断深入发展的背景下,冰川、冰盖和积雪探测在战略、经济、科研、环保、航道、资源等方面的价值不断提升,受到国际社会的普遍关注。海冰监测有定点监测、机载和船舶监测、可见光遥感、近红外遥感、远红外遥感和微波卫星遥感等技术手段,其中卫星遥感因幅宽大、重访周期短等技术优势成为海冰监测的主要手段。可见光及近红外遥感卫星具有分辨率较高、直观等特点,但其受日照、云雾、雨雪等天气的影响较大,难以满足全天时、全天候监测需求^[24]。远红外遥感卫星通过获得的热红外图像温度分布可明显区分出海冰和海水,但其测量精度受雨雪风云天气及季节影响较大^[25]。积雪监测方法主要有花杆法、自动气象站超声高度计测量法、地面微降雨雷达、云星载廓线雷达、激光雷达、微波遥感等^[26-27]。微波遥感具有全天时、全天候的工作能力,主要包括 SAR、微波高度计、微波辐射计等,其中 SAR 因其分辨率高、轮廓清晰、幅宽大等优势

是未来冰雪探测发展的趋势。相比于其他微波频段,毫米波具有冰雪穿透能力小的优点,可用于大气-雪、大气-冰、大气-水界面高精度观测^[28-29];毫米波频段高,实现厘米级测高和亚米级每秒测速所需接收天线基线长度在 10 m 量级,具备单星多模式集约高效,具有避免重轨和分布式 SAR 时间去相干的优势。通过毫米波 SAR 图像可实现冰雪测绘、海冰密集度测量、海冰分类,对极区人类活动、北极航道进行观测,保证极地科考、航行安全等。通过单星毫米波 SAR 干涉测高可绘制冰雪覆盖地区 DSM 图、海冰厚度图、冰雪储量变化图等,推动极区、高原冰雪物质平衡研究,提高冰雪变化预测精度,为冰雪与全球气候变化等科学研究提供参考。通过单星毫米波 SAR 干涉测速,可对冰川、冰盖变化,极区洋流、极区涡流、海洋亚中尺度现象,陆地水资源评估等进行动态观测,为极区交通线路规划、洪涝、海洋灾害预测等提供科学依据。

2.2 农作物识别与分类

我国是农业生产和消费大国,及时掌握农作物类型、分布、结构、长势等信息,是我国农作物生产管理、农业结构调整及粮食政策制定等的重要科学依据。国内外学者利用光学遥感影像对不同时空尺度下的多种农作物进行了种类识别与长势监测研究^[30]。我国大部分农作物生产地区长期受云雾覆盖,光学遥感常常无法获取完整的、连续的有效数据。SAR 全天时、全天候的监测能力,能够提供不同于光学遥感的消息。毫米波 SAR 成像具有类光学、轮廓清晰、穿透性弱等特点,更容易反映不同农作物的高度、冠层结构、几何特性信息,提高农作物识别与分类的精度。此外,毫米波 SAR 图像纹理特征清晰,可解决农作物遥感监测存在的“异物同谱”

和“同物异谱”的现象,可为全天时农作物精细化监测提供科学支撑^[31]。

2.3 森林参数反演

森林是全球陆地生态系统中的最大碳存储库,全球地面生态系统的生物量 90% 都是由森林组成。准确地掌握森林参数信息,对森林的科学管理、可持续性开发和利用具有非常重要的意义^[32]。对森林参数估测有多光谱、高光谱光学遥感,激光雷达和微波遥感等方法^[33-34]。多光谱、高光谱等光学遥感具有对森林的表层特征表现敏感、直观的优点,在叶面积指数、森林树种等森林参数反演的应用中,早期发挥了很大作用,但其穿透性较弱,不能够获取森林内部信息^[35]。激光雷达具有森林垂直结构信息获取的能力,在树高、森林生物量反演等方面起到了重要作用,但其受大气、云雾及复杂地形的影响较大^[35]。SAR 依据雷达波与森林散射体后向散射系数进行测量,更具有物理含义。目前长波 L、P SAR 由于能够获取森林中下部及内部信息,已被广泛应用到森林参数的估计中。研究表明,L 等波段获取的森林冠层高程精度低于地面高程精度^[7]。精确测量森林不同树木不同生长阶段冠高、冠幅等生长结构信息,对生物量估计、森林精准培育等至关重要^[36]。利用毫米波对树冠穿透性小、图像轮廓清晰及纹理特征清晰的特点,可精确获取森

林冠层高程信息,绘制树冠数字表面模型,在推动森林有效管理、森林报告、灾害预防等方面具有重要应用价值。

3 毫米波 SAR 卫星发展趋势

3.1 脉冲体制毫米波 SAR 卫星技术

脉冲体制 SAR 由于收发同置的优点,是目前星载 SAR 应用中的主要形式。本节基于毫米波 SAR 的特点,重点论述脉冲体制毫米波 SAR 技术在面向干涉测量、视频成像观测、双频观测、自适应观测等 4 个方面的发展趋势。

3.1.1 毫米波高精度 InSAR 卫星技术

毫米波高精度 InSAR 卫星主要用于极地综合观测、陆地水监测、冰雪测绘等前沿任务,助力我国在高频 SAR 卫星领域的发展,提升极地、洋流观测综合观测能力,填补我国天基极区遥感高精度测绘手段空白,实现高纬度地区全天时全天候监测。综合考虑极区目标穿透特性、观测目标后向散射特性等因素的影响,毫米波高精度 InSAR 卫星择优选取 Ka 频段。综合考虑高精度干涉时 Ka 基线需求、分布 InSAR 系统的时间去相关性等因素,毫米波高精度 InSAR 卫星采用单星部署沿航迹、跨航迹多接收天线的多模式干涉方式,系统详细设计见文献^[37],卫星示意如图 9 所示。

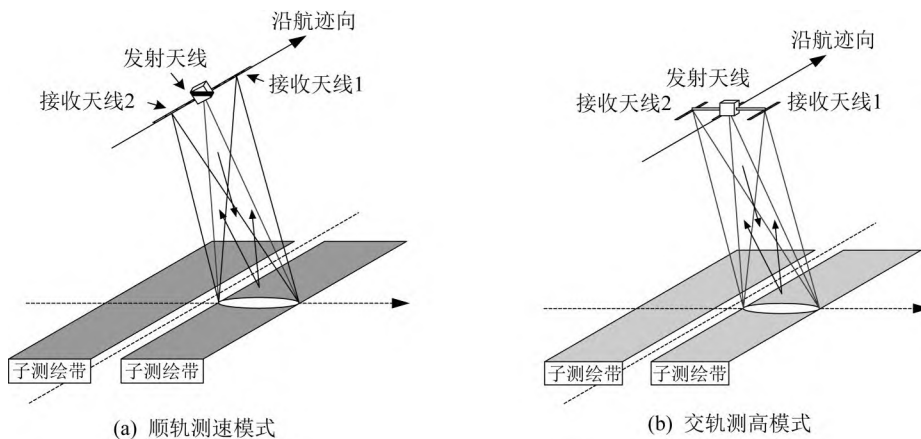


图 9 毫米波高精度 InSAR 工作

Fig. 9 Operation schematic diagram of millimeter wave high-precision InSAR

卫星轨道根据观测需求、测量精度、幅宽等因素择优选取,一般建议选择极地轨道,以满足极区冰雪、极地洋流等重点观测区域需求。主载荷毫米波 InSAR 采用单发射天线对星下点两侧交替扫描,实

现观测带倍增;交轨向通过布置于星体垂直航迹两侧的天线形成空间基线对目标区域测高;顺轨向通过布置于星体航向前后的天线形成时间基线对目标区域测速,详见文献^[38]。交轨、顺轨相位中心基线

长度在十米量级,卫星具备 3 种工作模式:标准测高模式,可实现百公里幅宽下厘米级高精度测高;标准测速模式,可实现百公里幅宽下亚分米/秒的高精度测速精度;传统高度计测高模式,可实现数十公里幅宽下厘米量级测高。

系统特点:1) 多模式干涉。基于 Ka 频段干涉基线短的优势,单星可实现成像、测速、测高。2) 测绘带宽大。相比于传统高度计几十公里的测绘带宽,可实现百公里测绘,大大缩短覆盖时间,并可实现海洋亚中尺度现象的观测。3) 高精度基线保持和测量。可实现毫米级基线展开精度及多自由度基线测量。

3.1.2 毫米波视频 SAR(VISAR)卫星技术

在相同方位分辨率下,与低频段相比,Ka 频段波束较窄,所需要的合成孔径时间短,具备高分辨率、高帧率视频成像得天独厚的优势。毫米波 VISAR 卫星将毫米波 SAR 技术与视频技术相结合,主要用于热点区域、运动目标的持续监测和跟踪,所获得的视频产品能够直观地反映出热点地区运动目标位置、速度及运动趋势等动态信息,如图 10 所示。毫米波 VISAR 通过天线的电扫描控制天线波束始终照射目标区域,从而获得对目标区域的持续观测能力;通过对大角度聚束模式下回波数据的合理分割,形成该场景的序贯图像序列,经过图像处理以后以视频的形式再现目标场景的信息。方位向采用偏置相位中心多波束技术降低 PRF,距离向采用 DBF-SCORE 技术提高接收增益,降低数据率,并采用阴影检测方法实现动目标监测^[30]。毫米波 VISAR 运行于太阳同步轨道,卫星主要工作模式为聚束模式,该模式下图像分辨率可达亚米级,测速精度可达亚分米/秒,帧率优于 10 Hz 并且可调。

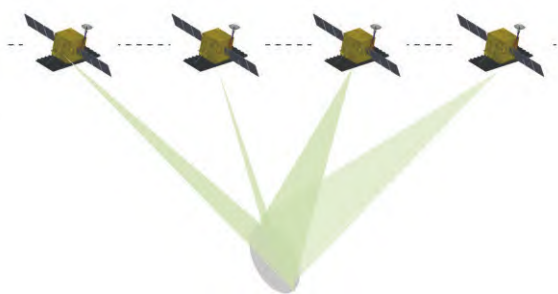


图 10 毫米波 VISAR 工作

Fig. 10 Operation schematic diagram of millimeter wave VISAR

3.1.3 毫米波双频 SAR(DSAR)卫星技术

传统波段(L、C、X) SAR 图像存在判读效果不佳、细节描述能力不强的问题,毫米波 DSAR 卫星技术旨在通过单平台多源信息融合的理念,利用毫米波特点,实现高效率、精准化观测,如 Ka+L 双频(如图 11 所示)、Ka+X 双频等,图 11 中给出了一种 Ka+L 双频 SAR 工作示意图,利用毫米波穿透性小、轮廓及纹理特征清晰的特点,可以弥补 L 频段树冠高程精度低等问题,通过双频段数据融合可提高森林参数反演、农作物识别的精细化。图 11 中毫米波 DSAR 卫星运行在太阳同步轨道,工作在双频融合模式下,Ka 带宽内双频共同测绘覆盖,进一步对共同目标区域双频数据融合,可实现高效率、精细化观测;Ka 频段和 L 频段也灵活组合以实现多种工作模式,如可在距离向通过测绘带宽拼接实现幅宽扩大模式观测等。

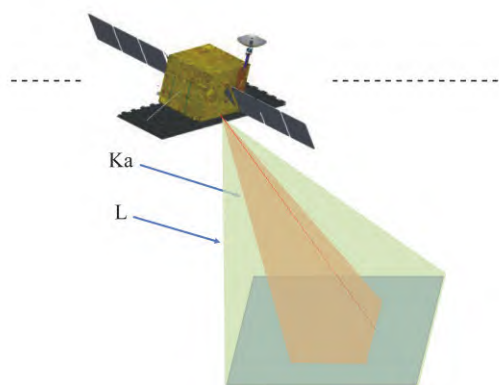


图 11 毫米波 DSAR 工作

Fig. 11 Operation schematic diagram of millimeter wave DSAR

3.1.4 毫米波 ZSAR 卫星技术

传统 SAR 在系统设计和信号处理中通常基于一定的假设开展,如信号衰减特性、杂波分布等采用已知或者先验模型为指导,信号处理中假设外界环境在空间上均匀、时间上平稳等,且系统发射信号为固定形式,通过接收端自适应处理及滤波算法设计来提高性能,为开环系统。面对复杂环境、多背景环境,传统 SAR 紧靠开环系统难以取得满意的效果。毫米波自适应 SAR(ZSAR)卫星系统是一种实现发射—环境—接收的全自适应闭环环路系统,如图 12 所示。

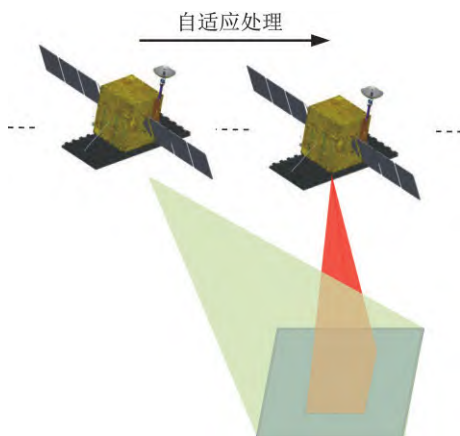


图 12 毫米波 ZSAR 工作

Fig. 12 Operation schematic diagram of millimeter wave ZSAR

星载毫米波 ZSAR 系统的典型工作模式为: 1) 采用大幅宽工作模式实时成像, 获取大范围场景信息; 2) 结合先验信息进行重点区域、目标识别; 3) 针对重点区域、目标类型优化工作模式、系统参数, 其中 Ka 频段合成孔径时间短、散射特性丰富, 易于实现实时成像和实时检测, 数据库可在轨实时更新。

3.2 调频连续波毫米波 SAR 卫星技术

调频连续波毫米波 SAR 是调频连续波 (Frequency Modulated Continuous Wave, FMCW) 技术与毫米波 SAR 技术的结合。与传统脉冲体制 SAR 相比, FMCW 毫米波 SAR 采用去斜率接收方式, 仅需很低的距离向采样频率即可记录下回波信号, 极大降低了 A/D 采样及处理设备的性能要求; FMCW 毫米波 SAR 具有很大的时宽带宽积, 其峰值发射功率比相同平均功率脉冲雷达的峰值发射功率大大降低, 采用固态放大器就可满足要求^[39-40]。因此, FMCW 毫米波 SAR 可以做到结构简单、体积小、重量轻、成本低。尤其是在星载条件下, 小型化系统将有助于减少对平台空间和负荷的需求, 有利于提高平台机动性、灵活性和续航能力, 具备广阔的发展前景。

FMCW 毫米波 SAR 卫星作为一种创新性技术体制, 既可用于开展传统空间遥感应用, 又可满足未来一段时期军民各领域多类型、多维度、多方向的应用需求。鉴于 FMCW 毫米波 SAR 卫星同时具有低成本、规模小、可快速构建的特点, 可通过多种

具有创新性的编队形式, 实现在不同应用领域满足多类型的需求。

3.2.1 轻小型毫米波 SAR 卫星技术

轻小型毫米波 SAR 卫星是一项高度创新的卫星应用方案, 其充分考虑星载模式下收发信号功率、信噪比以及收发天线之间的隔离, 系统采用双星平台。轻小型毫米波 SAR 主要应用于对地观测, 系统如图 13 所示。发射天线和接收天线分别安装在 2 个小卫星平台上。发射星和接收星组成飞行编队, 发射星向观测区发射 Ka 波段信号, 接收星接收回波信号。卫星轨道高度可根据需要观测的对地幅宽和观测分辨率进行适当选取, 一般建议选择太阳同步轨道, 双星系统星间距离主要依据发射星信号功率对接收星回波接收能力的影响开展分析, 一般在几十公里。与传统的 FMCW SAR 不同, 系统发射信号采用高占空比。卫星系统采用双星编队时, 工作模式更加灵活, 可根据不同的用户需求选择条带模式、聚束模式、滑动聚束模式等。卫星系统详细方案及关键技术见文献[41]。

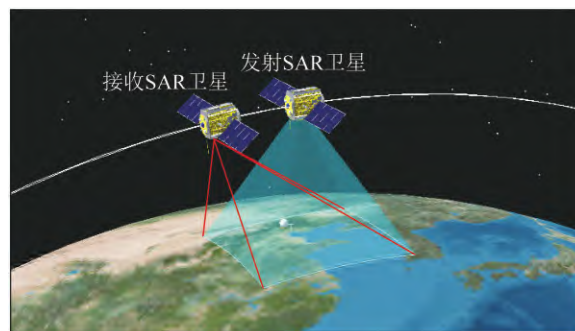


图 13 轻小型毫米波 SAR 卫星系统

Fig. 13 Schematic diagram of light and small millimeter wave SAR satellite system

轻小型毫米波 SAR 卫星系统特点: 1) 收发分置 SAR 成像系统。为了能够在时序上实现发射信号与回波信号的隔离, 在 SAR 卫星采用 FMCW 技术对地实施成像任务时, 通过将发射系统和接收系统分置于不同卫星平台实现发射信号与回波信号的隔离, 可以实现近 100% 的占空比, 从而大大减少 T 组件数量, 有利于部署在小卫星平台实现。2) 编队飞行设计。系统内的两颗卫星轨道参数基本相同, 仅双星相位存在较小差异, 在轨飞行时双星前后跟随飞行, 可以通过多种在轨编队完成各类任务应用, 包括双星跟飞编队、螺旋编队等。3) 星间高

精度同步与测量。空、时、频、相四同步技术。4) 实时成像。卫星通过星载实时数据处理完成遥感业务数据的在轨实时处理,卫星可随时向地面提供最新的数据信息产品。5) 高扩展能力。借助轻小型毫米波 SAR 卫星的研究基础,使用多颗卫星形成不同长度组合的基线,多星系统具备以高分辨率和短重复周期实施各类遥感任务的能力。

3.2.2 多基线毫米波 InSAR 卫星技术

InSAR 的相位解缠是 InSAR 面对的另一个难题,多基线 InSAR 相位解缠技术不需要满足相位梯度小于等于 π 的假设,具有良好的相位解缠绕能力,其系统设计及数据处理近年来逐渐受到广泛关注。通过对轻小型毫米波 SAR 卫星系统进行拓展,按照特定的轨道编队构型采用一发多收的方式,可实现多基线交轨干涉,如图 14 所示。

图 14 中,多基线毫米波 InSAR 系统由 1 颗发射星 4 颗接收星构成,共形成 4 个相位中心,如图 15 所示,构成了 3 条交轨基线。为保证基线倾角尽可能为 0° ,卫星编队采用侧摆形构型,选定其中 1 颗接收

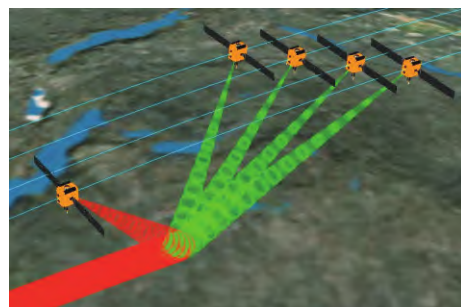


图 14 多基线毫米波 InSAR 卫星系统

Fig. 14 Schematic diagram of multi-baseline millimeter wave InSAR satellite system

星为基准,保证其与发射星的轨道倾角、轨道半长轴、偏心率、近地点幅角、升交点赤经都相同,只修改其平近点角,使得两星顺轨向距离在约 10 km 的范围之内;对 3 颗接收星设计不同的升交点赤经,使得卫星拉开交轨向距离,使其满足交轨向基线要求,并通过小幅度修改 3 颗接收星的平近点角,使其拉开顺轨向距离。在多基线交轨干涉模式下,可实现厘米级测高精度。

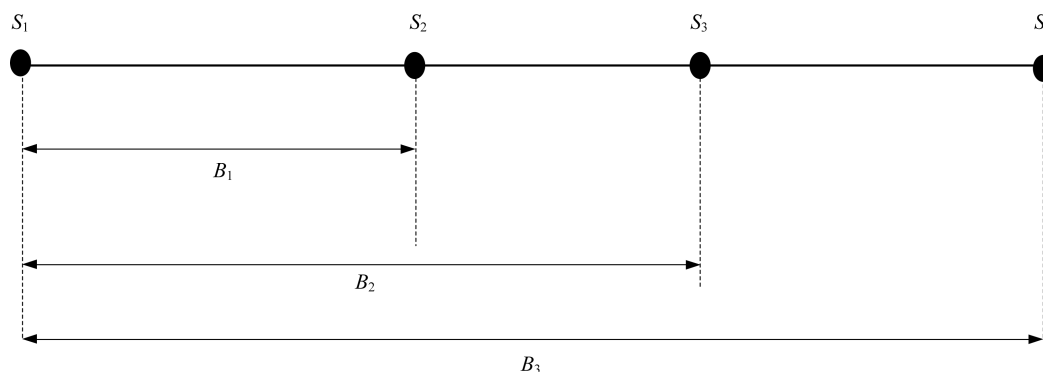


图 15 多基线毫米波 In SAR 系统基线

Fig. 15 Schematic diagram of multi-baseline millimeter wave InSAR system baseline

3.2.3 多基线毫米波 GMTI InSAR 卫星技术

GMTI 在军事侦察、农业勘探、地质勘探、灾害防治等军民领域具有重要的意义。多基线毫米波 GMTI InSAR 卫星可解决单基线卫星盲速、最小可检测速度与最大模糊速度不可兼得等问题^[42],且具有较平坦的速度响应速度,越来越受到人们的重视。利用轻小型毫米波 SAR 卫星系统高扩展性,按照特定的轨道编队构型采用一发多收的方式,可实现多基线毫米波 GMTI,如图 16 所示。

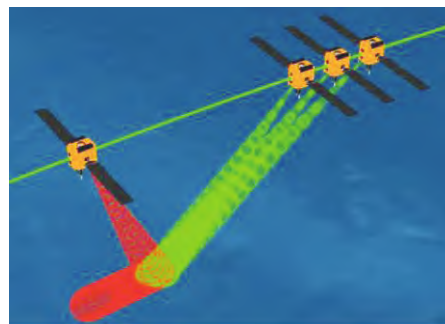


图 16 多基线毫米波 GMTI SAR 卫星系统

Fig. 16 Schematic diagram of multi-baseline millimeter wave GMTI SAR satellite system

图 16 中,多基线毫米波 GMTI InSAR 卫星系统由 1 颗发射星 3 颗接收星构成,共构成了 3 条顺轨基线。整个卫星系统采用串行编队,所有发射星与接收星的轨道倾角、轨道半长轴、偏心率、近地点俯角、升交点赤经都相同,对三颗接收星设计不同的平近点角,使得卫星拉开顺轨向距离。在多基线顺轨干涉模式下,可实现亚米级/秒测速精度。

3.2.4 毫米波高分宽幅 SAR 卫星技术

高分宽幅 (High Resolution Wide Swath, HRWS) 测绘是 SAR 系统发展的趋势之一。一方面,宽测绘带宽可以获取更大观测区域信息,帮助快速了解区域宏观信息,缩短重访周期等;另一方面,高分辨率可以获取观测区域更多的细节信息,提高目标图像识别的准确性。传统 SAR 系统由于天线面积的制约,高分辨率和宽测绘带宽不可兼得。基于轻小型毫米波 SAR 体积小、重量轻、成本低的优点,通过多组卫星编队飞行,便可解决这一矛盾,如图 17 所示。图 17 中,毫米波高分宽幅 SAR 卫星系统由 4 组轻小型毫米波 SAR 卫星组成,整个系统采用串行编队,所有发射星与接收星的轨道倾角、轨道半长轴、偏心率、近地点幅角、升交点赤经都相同,只修改每颗卫星的平近点角,使其拉开顺轨向距离,组内星间距离约为 10 km,多组卫星距离向观测带宽拼接便可实现百公里级高分宽幅测绘。

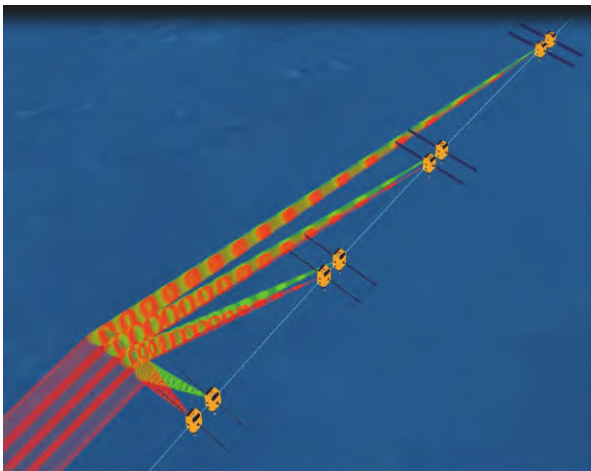


图 17 毫米波 HRWS SAR 卫星系统工作

Fig. 17 Operation schematic diagram of millimeter wave HRWS SAR satellite system

4 结束语

经过 20 多年的发展,L、C、X、Ku 等多种频段

SAR 已在全球测绘、灾害防治、资源勘探等领域得到了广泛的应用。与低频段相比,毫米波 SAR 因其独特的特点,在测绘、冰雪监测、农作物分类、森林参数反演等军民领域具有巨大的应用潜力。相信随着毫米波技术的发展,毫米波 SAR 卫星必将对地观测带入一个超高分辨率、高精度、宽带测绘、多模式系统工作的新时代。

参考文献

- [1] 李春升,王伟杰,王鹏波,等.星载 SAR 技术的现状与发展趋势[J].电子与信息学报,2016,38(1):229-240.
- [2] 邓云凯,赵凤军,王宇.星载 SAR 技术的发展趋势及应用浅析[J].雷达学报,2012,1(1):1-10.
- [3] 邓云凯,禹卫东,张衡,等.未来星载 SAR 技术发展趋势[J].雷达学报,2020,9(1):1-33.
- [4] 郑世超,王辉,孙志强,等.Ka 波段机载双模式干涉 SAR 系统设计及测量精度分析[J].上海航天,2018,35(6):1-7.
- [5] 吴思利,王辉,郑世超,等.Ka 数字波束合成-合成孔径雷达顺轨干涉性能分析[J].上海航天,2021(1):72-79.
- [6] 王辉,赵凤军,邓云凯.毫米波合成孔径雷达的发展及其应用[J].红外与毫米波学报,2015,34(4):452-459.
- [7] 李道京.毫米波干涉合成孔径雷达[J].高科技与产业化,2013(11):40-43.
- [8] TOMIYASU K. Conceptual spaceborne Ka-Band spotlight synthetic aperture radar with reconfigurable aperture [C]// IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium. 2003:539-541.
- [9] BÖRNER T, DE ZAN F, LÓPEZ-DEKKER P, et al. SIGNAL: SAR for ice, glacier and global dynamics [C]// Geoscience & Remote Sensing Symposium. 2010: 2884-2887.
- [10] SADOWY G, HEAVEY B, MOLLER D, et al. Technology demonstration of Ka-band digitally-beam formed radar for ice topography mapping [C]// IEEE Aerospace Conference. 2007: 1-10.
- [11] MOLLER D, HEAVEY B, RIGNOT E, et al. A novel Ka-band digitally beamformed interferometric synthetic aperture radar for glacier and ice-sheet topographic mapping: concept and technology [C]// European Conference on Synthetic Aperture Radar, VDE. 2008: 1-4.
- [12] MORROW R, FU L L, ARDHUIN F, et al. Global observations of fine-scale ocean surface topography with the surface water and ocean topography (SWOT) mission[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6: 232.

- [13] DURAND M, FU L L, LETTENMAIER D P, et al. The surface water and ocean topography mission: observing terrestrial surface water and oceanic submesoscale eddies [J]. *Proceedings of the IEEE*, 2010, 98(5): 766-779.
- [14] DIRECTORYEOPORTAL. SWOT (Surface Water Ocean Topography) mission [EB/OL]. [2022-01-15]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/s/swot>.
- [15] LUDWIG M, D'ADDIO S, ENGEL K, et al. A spaceborne Ka-Band SAR interferometer concept based on scan-on-receive techniques [C]// *European Conference on Synthetic Aperture Radar*. 2010: 1-4.
- [16] LUDWIG M, D'ADDIO S, AGUIRRE M, et al. Imaging Ka-Band SAR interferometer [C]// *2011 3rd International Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*. 2011: 1-4.
- [17] GERMANI C, VENTURINI R, LUDWIG M, et al. Ka-Band sar interferometer [C]// *Geoscience & Remote Sensing Symposium*. 2012: 5598-5601.
- [18] SCHAEFER C, LÓPEZ-DEKKER P. Interferometric Ka-Band sar with DBF capability [C]// *European Conference on Synthetic Aperture Radar*. 2012: 7-10.
- [19] YOUNIS M, LÓPEZ-DEKKER P, PATYUCHENKO A, et al. Digital beamforming architecture and techniques for a spaceborne interferometric Ka-Band mission [C]// *IEEE Radar Conference*. 2013: 1-5.
- [20] TIENDA C, YOUNIS M, LOPEZ-DEKKER P, et al. Ka-band SAR system supporting Xti-Ati [C]// *EUSAR, European Conference on Synthetic Aperture Radar*. 2014: 1-4.
- [21] TIENDA C, YOUNIS M, LOPEZ-DEKKER P, et al. Ka-Band reflectarray antenna system for SAR applications [C]// *The 8th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*. 2014: 1603-1606.
- [22] LÓPEZ-DEKKER P, SCHAEFER C, TIENDA C, et al. Ka-Band SAR instrument with joint Xti-Ati mode capability [C]// *19th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference*. 2013: 14-17.
- [23] LORI M, ZOLLA P, PFEIFFER E, et al. Design and performance of a spaceborne Ka-Band interferometric sar antenna system [C]// *IEEE International Symposium on Antennas & Propagation*. 2016: 1373-1374.
- [24] 郑杨龙. 基于 SAR 图像分类的北极海冰密集度研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [25] 张晰. 极化 SAR 渤海海冰厚度探测研究 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [26] LI C J, REN J W, XIAO C D, et al. Accumulation and geochemical evidence for the little ice age episode in eastern antarctica [J]. *Sciences in Cold and Arid Regions*, 2019, 11(1): 12.
- [27] 刘奕辉. 基于多源数据的南极降雪重建及其影响研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- [28] STROEVE J, NANDAN V, WILLATT R, et al. Surface-based Ku-and Ka-Band polarimetric radar for sea ice studies [J]. *The Cryosphere*, 2020, 14(12): 4405-4426.
- [29] TONBOE R T, NANDAN V, YACKEL J, et al. Simulated Ka-and Ku-band radar altimeter height and freeboard estimation on snow-covered arctic sea ice [J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 1811-1822.
- [30] 胡九超. 基于高分辨率合成孔径雷达 (SAR) 的高原山区烟草识别方法研究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2015.
- [31] 王利花, 金辉虎, 王晨丞, 等. 基于合成孔径雷达的农作物后向散射特性及纹理信息分析: 以吉林省农安县为例 [J]. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2019, 27(9): 9.
- [32] 徐新良, 曹明奎, 李克让. 中国森林生态系统植被碳储量时空动态变化研究 [J]. *地理科学进展*, 2007(6): 1-10.
- [33] 肖虹雁, 岳彩荣. 合成孔径雷达技术在林业中的应用综述 [J]. *林业调查规划*, 2014, 39(2): 132-137.
- [34] 陈小花, 陈宗铸, 雷金睿, 等. 高光谱遥感的森林信息应用研究进展 [J]. *热带林业*, 2021, 49(2): 5.
- [35] 李兰, 陈尔学, 李增元, 等. 合成孔径雷达森林树高和地上生物量估测研究进展 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, 31(4): 625-633.
- [36] 周凯, 曹林. 遥感在森林精准培育中的应用现状与展望 [J]. *遥感学报*, 2021, 25(1): 423-438.
- [37] 付玉龙, 王辉, 李金亮, 等. 毫米波高精度干涉 SAR 卫星及关键技术 [J]. *上海航天*, 2021, 38(增刊 1): 8-12.
- [38] 吴思利, 王辉, 郑士超. 毫米波高精度干涉 SAR 技术研究 [J]. *上海航天*, 2021, 38(增刊 1): 13-19.
- [39] 于彬彬. FMCW-SAR 信号处理与成像技术研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [40] 陈翔, 王辉. 调频连续波合成孔径雷达滑动聚束成像算法 [J]. *上海航天*, 2019, 36(5): 8.
- [41] 李金亮, 王辉, 陈翔, 等. Ka 频段调频连续波 SAR 卫星及关键技术 [J]. *上海航天*, 2021, 38(增刊 1): 56-69.
- [42] 左臣婕. 分布式小卫星 SAR 地面运动目标检测及速度估计 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (电子学研究所), 2007.