FMCW体制毫米波SAR星座未来应用方法初探

赵 强[1,2,3],袁英男[1,2,3],王 辉[1,2,3],陈 翔[1,2,3],郑世超[1,2,3]
(1.上海卫星工程研究所,上海201109;2.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;
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: 近年来,随着天基遥感应用需求的不断多样化,具备干涉测高、干涉测速等能力的多星合成孔径雷达(SAR)组网系统概念面临工程化实现的难题。为降低组网星座成本和规模,提升工程可实现性,提出了双星调频连续波(FMCW)体制毫米波SAR系统概念,并针对其中星间同步、内定标、星间数据传输等关键问题进行了详解。在双星系统的基础上,设计了多星组网拓展方式,使系统具备了高分宽幅、干涉测高、干涉测速等能力,为未来SAR星座应用方法研究提供参考。

关键词: 调频连续波; 合成孔径雷达星座; 毫米波
中图分类号: TN 958.95 **文献标志码:** A **DOI:** 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.03.002

Future Application Methods for FMCW Millimeter Wave SAR Constellation

ZHAO Qiang[1,2,3], YUAN Yingnan[1,2,3], WANG Hui[1,2,3], CHEN Xiang[1,2,3], ZHENG Shichao[1,2,3]
(1.Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 201109, China; 2.Shanghai Key Laboratory of Remote Sensing and Millimeter Wave Information Acquisition and Application Technology, Shanghai 201109, China; 3.Key Laboratory of Millimeter Imaging, Shanghai Academy of Spaceflight Technology, Shanghai 201109, China)

Abstract: In recent years, with the increasing diversification of application requirements for space-based remote sensing, the concept of multi-satellite synthetic aperture radar (SAR) networking system with capabilities such as interferometric altimetry and interferometric velocity measurement is facing the challenge of engineering realization. In order to reduce the cost and scale of the networking constellation and improve the engineering feasibility, in this paper, the concept of dual-satellite frequency modulated continuous wave (FMCW) millimeter-wave SAR system is proposed. The key issues such as inter-satellite synchronization, internal calibration, and inter-satellite data transmission are discussed in detail. Based on the dual-satellite system, a multi-satellite networking expansion method is designed, which enables the system to have the capabilities such as high-resolution wideband, interferometric altimetry, and interferometric velocity measurement, providing a reference for future research on SAR constellation application methods.

Key words: frequency modulated continuous wave; synthetic aperture radar constellation; millimeter wave

0 引言

随着天基观测应用需求的不断提高[1],合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)任务概念越来越多涉及大量卫星和更多的分块功能。例如,SAR星座任务利用多基线交轨干涉测量法[2-3],用于生成具有分米高度精度的高分辨率数字高程模型;通过减少多角后向散射测量散斑,以改进场景表征特性,获取超分辨率图像。此外,SAR星座任务还为先进的矢量变形监测[4]和运动物体的速度测量[5]提供了更好的解决方案,为对流层水汽和电离层的提取,以及海洋表面洋流和地形及其随时间的短期和长期演变的反演提供了可能[6]。

当前,只有欧洲和中国的少量双基地SAR系统还部署在太空中。造成各国对双基地和多基地

收稿日期: 2022-03-22; **修回日期:** 2022-04-06
作者简介: 赵 强(1989—),男,硕士,工程师,主要研究方向为毫米波SAR卫星设计。

SAR 系统投入较少主要是因其高复杂性和高成本。SAR 卫星本身接收、存储和下行雷达数据的硬件成本昂贵，部署多颗卫星必须成倍地增加硬件数量，同时还必须增加硬件以实现精确的相位同步，并需要高下行能力将雷达数据从多颗卫星传送到地面。

为了应对这些挑战，2017 年，德国宇航局主要技术专家 KRIEGER 等[7]提出了 Mirror SAR 的概念，该概念已应用于德国宇航局的 TerraSAR-X、TanDem-X 卫星，以及德国宇航局与空客合作研发的高分辨率宽幅（High-Resolution and Wide-Swath，HRWS）卫星。Mirror SAR 是一种多基地 SAR 任务概念，其系统架构包括一组空间上独立的发射星和接收星。Mirror SAR 的一个关键特征是使用分布式合成孔径雷达系统，其中发射雷达信号和雷达回波采集由不同的平台执行。与此同时，Mirror SAR 彻底简化接收卫星，通过将雷达回波从接收星发送到发射星的类似应答器的路由来实现。由于接收星仅仅充当空间中继，因此既不需要装备齐全的雷达接收器，也不需要昂贵的数据存储和下行系统。

采用高频段和新体制的 SAR 载荷系统也能在保证系统高性能的同时显著减小系统成本[8]。毫米波频段 SAR 系统相比与传统低频段，所需天线尺寸小，系统重量轻，因此能实现 SAR 星座系统的低成本、轻量化[9]。与此同时，传统的脉冲体制 SAR 发射占空比较小，造成系统的峰值功率远大于系统的平均功率，因此需要大量的功放组件满足高峰值发射功率需求，导致组件在载荷成本中占据了很高的比重，难以满足星载 SAR 轻小型化发展的需求。将调频连续波（Frequency Modulated Continuous Wave，FMCW）技术引入星载 SAR，通过更高的发射占空比大幅降低峰值发射功率（如图 1 所示），SAR 系统所需组件通道数量减少，可以有效降低系统规模，从而更好地匹配轻量化、低成本的卫星发展要求[10]。因此采用 FMCW 体制、毫米波频段的近距离 SAR 星座编队，可以在完成未来多种对地观测任务的条件下实现轻量化和低成本化。

1　FMCW 体制毫米波 SAR 概念

近几年，毫米波频段由于其波段短、目标散射特性丰富的优势已经在机载领域获得了较多的应用。但毫米波频段 SAR 对功率器件的要求高、波长短导致的距离向幅宽小等难题限制了其在卫星上的应用，因此当前尚没有一个成熟的星载 FMCW 体制毫米波 SAR 系统。

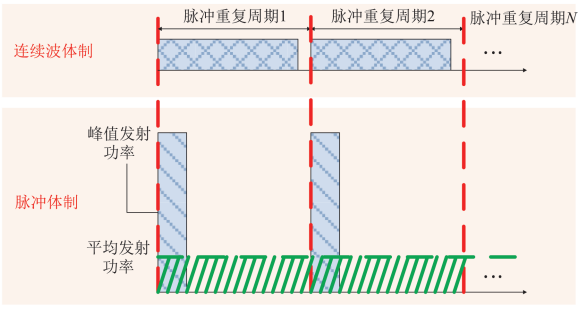


图 1　脉冲与连续波发射功率对比

Fig. 1　Comparison of transmission power by pulses and continuous waves

由于 FMCW SAR 系统的收发端信号是同时工作的，因此需要充分考虑 SAR 系统发射端和接收端之间的隔离度。通常采用了双星平台的方案来解决这一问题，将 SAR 系统发射端和接收端置于不同的平台上，利用电磁波的空间衰减提高收发端隔离度[11]。

双星 FMCW 体制毫米波 SAR 系统主要用于对地观测，系统工作时的星间相对关系如图 2 所示。

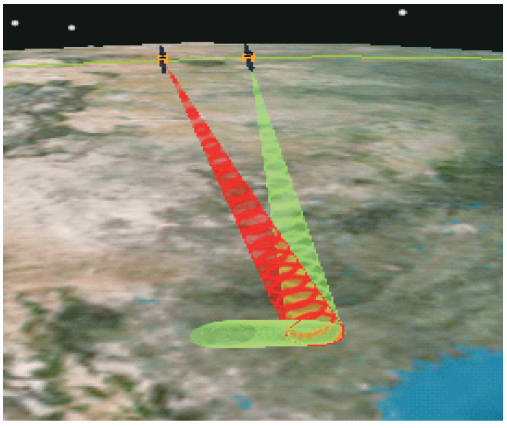


图 2　双星 Ka FMCW SAR 工作

Fig. 2　Operation schematic diagram of the double-satellite Ka FMCW SAR

发射天线和接收天线分别装在两颗小卫星上。发射星和接收星形成了一个飞行编队，前者向观测区域发射毫米波频段 FMCW 信号，后者接收地面的回波信号。通过综合考虑轨道高度、成像幅宽的约束，优化发射端发射信号的占空比，能够进一步的节约发射功率，降低系统代价。双星 FMCW 体

制毫米波SAR系统与传统单星SAR卫星一样可以进行条带、聚束、滑动聚束等多种模式[12]的SAR成像。

双星FMCW体制毫米波SAR的原理如图3所示。图3的上半部分为发射星,主要包括了中央电子设备、频综接收机、预功放和发射天线,下半部分为接收星,主要包括了中央电子设备、频综接收机、接收天线和实时处理单元。频综接收机主要接收高频回波信号并且对回波信号进行差拍处理,使得信号可以被低速率数字接收机直接采集。

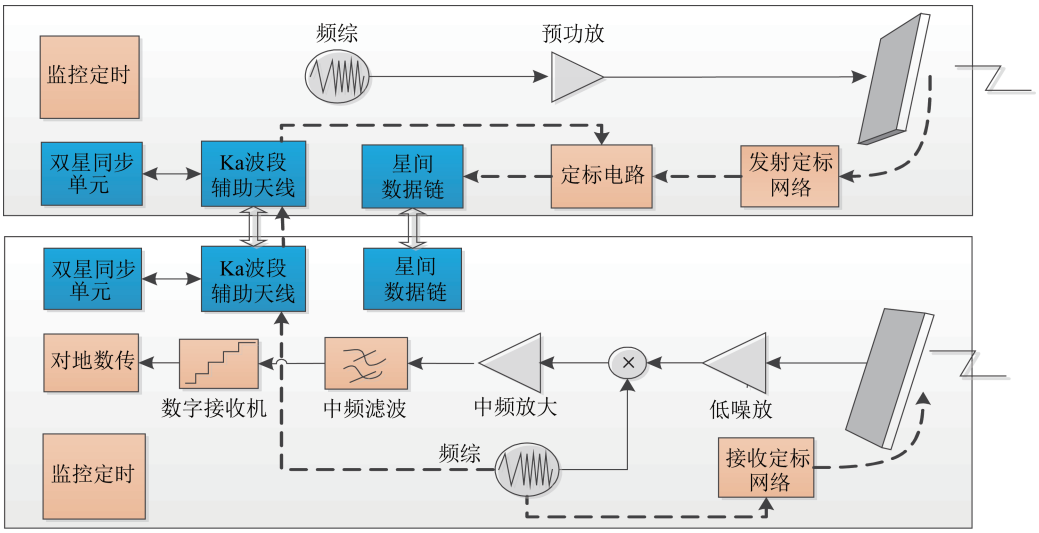


图3 双星FMCW体制毫米波SAR原理

Fig. 3 Principle of dual-satellite FMCW millimeter-wave SAR system

因收发雷达不共频率源导致的空间同步、时间同步、频率同步和相位同步问题,是所有双基雷达系统工程化实现所必须解决的问题[13]。双星FMCW体制毫米波SAR系统的方位向合成孔径距离较短且星间距离较大,采用传统的双星全零多普勒导引将导致载荷收发天线辐照地表的不同区域,无法有效录取回波。因此采用辅瞄主的方案,在收到回波后,再分析多普勒特性,进行二次校正。时间同步和频率同步可以通过双星所装配的时频同步单元实现,星间通过时频同步天线实现星间建链,通过微波对传的方式实现双星平台高精度时统,并基于高精度的时间基准生成高稳的频率基准输入到频综。主天线工作时,利用星间相位同步天线实现异中频毫米波频段信号对传,基于所对传的信号进行收发端信号源、信号通道相位信息提取,提取星间相位差并进行补偿,实现双星间的相位同步[14]。

双星FMCW体制毫米波SAR系统的另一个设计重点是SAR系统的内定标。内定标是监测SAR系统工作状态的重要手段[15],高精度星间定标的最终目的是从定标数据中获得SAR系统的增益变化,并利用这一结果校正SAR图像,提高图像质量。在双星系统中,发射星和接收星布置在不同的卫星平台上,SAR系统的星间定标难度较大。通过分别在发射星和接收星设置星间定标天线,通过星间定标天线建立起发射定标和接收定标之间的链路,可以实现对完整的系统链路的定标。

2 Mirror Link可行性

Mirror SAR是一种多基地SAR任务概念,雷达接收天线被重新安置到一个独立的接收(Rx)卫星,但雷达信号接收链组件下转换、A/D转换、海量存储和数据下行链路仍在发射(Tx)卫星上[16]。

一个Tx卫星和一个Rx卫星的Mirror SAR编队中的主要雷达信号流如图4所示。Tx卫星向地面场景发射雷达信号。由于双基地采集的系统几何结构,不会因发射干扰而导致条带宽度减小。地面反射的雷达回波由Rx卫星的雷达天线接收,并通过保留信号相位的模拟镜像连接转发给Tx卫星。在Tx卫星上,通过使用雷达信号产生的相同振荡器进行下行转换。该方案有效简化了双静态SAR系统中通常需要的同步设计。经过对回波信号进行数字化和大规模存储后,获得的雷达数据由Tx卫星向下传输到地面站。

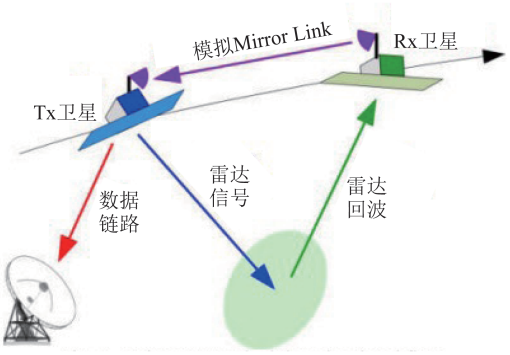


图 4　Mirror SAR 信号流

Fig. 4　Signal flow of the Mirror SAR

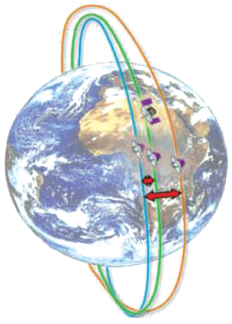


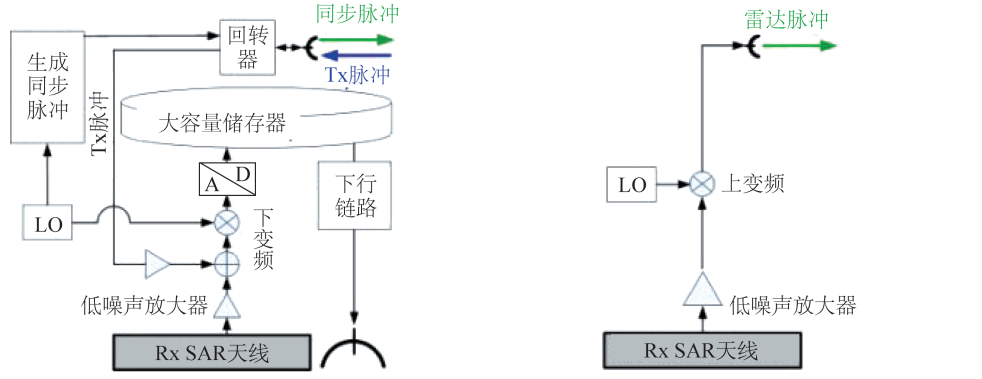
图 5　Mirror SAR 系统实例

Fig. 5　Example of the Mirror SAR system

Mirror SAR 概念的另一个重要能力是在单航过程中同时获取几个 Rx 基线，为高度精确的 SAR 干涉测量创造了技术条件。一个带有 1 个 Tx 和 3 个 Rx 卫星的 Mirror SAR 编队如图 5 所示，1 颗 Tx 卫星和 1 颗 Rx 卫星在同一轨道上前后飞行，另外 2 颗 Rx 卫星与第 1 颗 Rx 卫星一同以螺旋形绕 Tx 轨道飞行。其中，螺旋轨道概念已经通过 TanDEM-X 任务的 2 颗近距离编队卫星进行了演示[17]。

用于双基地 SAR 操作的全功能 Rx 卫星的原理如图 6(a)所示。除了从 Rx 卫星 SAR 天线到下行链路的完整 SAR 接收链外，还需要 Tx 和 Rx 卫星的本振(Local Oscillator，LO)同步。Rx 卫星通过一个单独的同步天线接收 Tx 卫星的脉冲，并向 Tx 卫星发送自己的 LO 同步脉冲，用于向下转换。2 颗卫星接收到基于另一颗卫星的雷达脉冲时产生的振子差分相位噪声和频率偏差，可以通过地面补偿。

Mirror SAR 任务概念中的 Rx 卫星的原理如图 6(b)所示。包括 A/D 转换在内的所有接收链都位于 Tx 卫星上，从地面接收到的雷达回波信号也在 Tx 卫星上调制成光学信号或甚高频无线电信号。因此极大地简化了 Rx 卫星的构造，可以实现在 Mirror SAR 编队中布置多颗 Rx 卫星，以提供多个测量基线。



(a) 用于双基地SAR操作的全功能Rx卫星　　(b) Mirror SAR Rx卫星，具有相位保持的镜像连接

图 6　双基 Mirror SAR 中的 Rx 卫星原理

Fig. 6　Block diagram of the Rx satellite in the double-satellite Mirror SAR

有几种实现 Mirror Link 的方法。可综合考虑技术成熟度或成本约束，选择最优方案。一般来讲，光链路是技术上的最佳解决方案。

1) 直接转发。类似直接应答器的解决方案，只是将接收到的地面反射信号在 Rx 卫星上放大后转发给 Tx 卫星，需要考虑从 Tx 卫星传输到地面的雷达脉冲的干扰。

2) 光学 Mirror Link。光链路能够为雷达信号相位同步提供最高的数据传输速率，即通过用雷达信号调制光载波的振幅实现相位保持高带宽链路。Rx 卫星的功能只是接收地面反射的雷达信号，并将其调制到光载波上发送到 Tx 卫星。Tx 卫星接收到光

信号后,使用雷达信号产生的本振执行基带的下转换,或者使用相干I/Q解调器直接对雷达频段内的信号进行采样,如图7所示。光链路组件会引入内部延迟,必须由硬件进行校准,但所需的硬件规模较小。

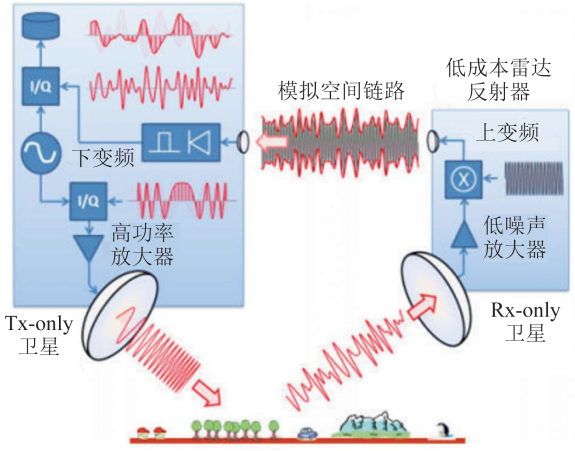


图7 在光学Mirror Link链路原理

Fig. 7 Schematic diagram of the optical Mirror Link

3) 高射频Mirror Link。除了光载波,Mirror Link还可以使用高射频载波。所使用载波频率往往比雷达主频率高得多。

3 毫米波SAR星座未来应用

星载FMCW SAR在轨收发分置的方式使得Rx卫星上只有很少的功能,而在Tx卫星方面有更多的功能,就注定了这个系统可以用较少的Tx和多颗Rx卫星来构建卫星编队[18]。通过在轨试验验证,演示应用模式,优化技术体制,评估系统可用性,在形成高可判读性的精细化SAR对地观测能力、灵活可扩展的轻小型SAR卫星装备的基础上,可以通过星簇组网实现可重构的高分宽幅成像、高精度干涉、动目标检测等一体化观测能力。可扩展的功能具体包括:

1) 高分宽幅类光学详查星座。

目标识别率和信息获取周期是天基详查的关键指标,而目标识别、确认和描述的准确性和获取速度主要取决于图像的分辨率和幅宽[19]。面对国家经济高质量发展的新局面,迫切需要发展高分辨率宽幅微波成像卫星,以实现对热点地区的重点观测。

在前文双星系统的基础上,在顺轨方向上增加多颗发射星和接收星,可实现子带拼接高分宽幅成像,如图8所示。

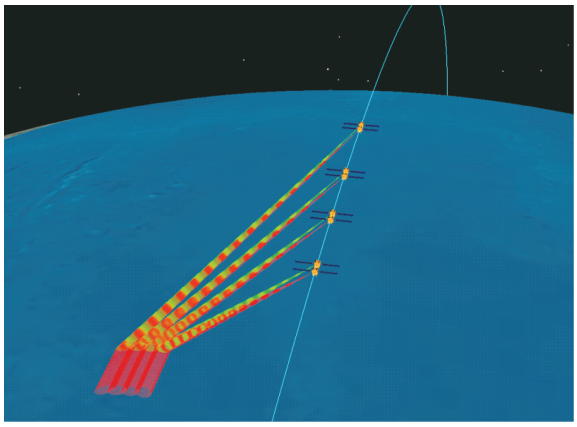


图8 子带拼接高分宽幅成像

Fig. 8 Schematic diagram of sub-band stitching HRWS imaging

2) 多基线InSAR干涉测高。

干涉测高能力可生成数字表面模型产品[20],其中包含了等高线、坡度图等信息,能够广泛应用于国土规划、环境监测、农业估产等领域[21],取得了十分显著的社会效益和经济效益。

在演示验证的基础上可增加1颗接收星实现干涉,同时增加2~3颗接收星实现多基线干涉提高干涉测量精度[22]。多基线InSAR如图9所示。

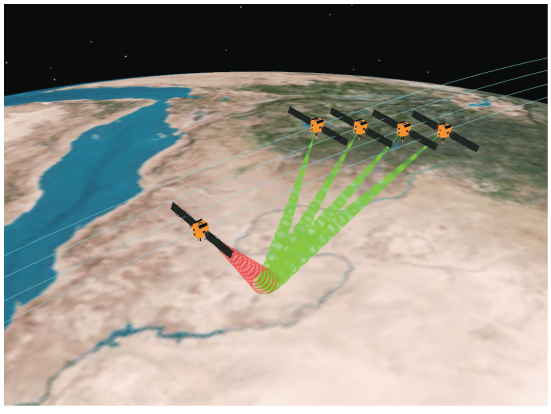


图9 多基线InSAR

Fig. 9 Schematic diagram of multi-baseline InSAR

3) 多基线顺轨干涉动目标检测。

随着社会的高速发展,交通场景中的动目标问题备受关注。通过对城市道路中的车辆进行动目标检测,有助于为城市道路建设及交通规划提供数据保障[23]。同样,可以通过对海冰、洋流等海面动目标进行大范围的检测[24],获取全球气候等研究的宝贵素材,有助于灾害防治和环境保护[25]。

在演示验证的基础上增加1颗接收星实现

GMTI（地面动目标检测），增加 1～2 颗接收星实现多基线 GMTI。GMTI 卫星系统工作构型如图 10 所示。

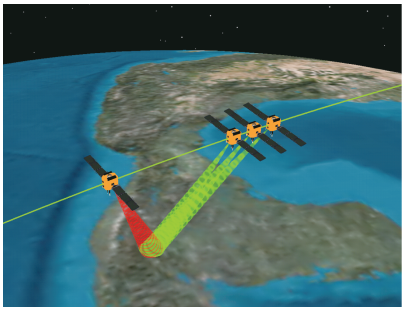


图 10　长短基线顺轨测速

Fig. 10　Schematic diagram of long and short baseline speed measurement along the track

4　结束语

本文以降低多星组网成本和规模为出发点，提出了全新波段、全新体制的双星 FMCW 体制毫米波 SAR 系统，通过对 SAR 系统中的系统设计、星间同步、内定标等重点问题进行分析，并对国际最前沿的 Mirror Link 星间链路技术进行对比，论证了双星 FMCW 体制毫米波 SAR 系统的工程可行性。同时双星 FMCW 体制毫米波 SAR 系统具备高可拓展性，通过增加卫星数量，提高组网规模，形成多条观测基线，能够灵活实现高分宽幅、干涉测高、干涉测速等功能。星载 FMCW 体制毫米波 SAR 系统为一种小规模、低成本、易拓展的多功能天基组网 SAR 系统。

参考文献

[1] 王辉，袁英男，郑世超，等.Ka 波段调频连续波 SAR 综合信息获取需求分析[J].上海航天，2021，38(增刊 1)：49-55.

[2] 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)：56-60.

[3] 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.

[4] 朱建军，杨泽发，李志伟.InSAR 矿区地表三维形变监测与预计研究进展[J].测绘学报，2019，48(2)：135-144.

[5] 刘晓龙，宋伟东，张永红，等.应用雷达干涉技术的交通设施形变监测研究[J].测绘科学，2016，41(1)：28-32.

[6] 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.

[7] 秦小芳，张华春，张衡，等.TerraSAR-X/TanDEM-X 升降轨双基干涉模式获取 DEM 方法研究[J].雷达学报，2018，7(4)：487-497.

[8] 洪伟韬，陈寒江，张泽，等.毫米波步进频连续波 SAR 成像系统研究[J].光学与光电技术，2022，20(1)：58-64.

[9] 姜漫，王辉，孙志强，等.W 波段 FMCWSAR 系统实现与试验[J].上海航天，2018，35(6)：12-17.

[10] 江志红，赵懿，皇甫堪，等.调频连续波 SAR 的研究进展[J].现代雷达，2008(2)：20-24.

[11] 邢孟道，林浩，陈溅来，等.多平台合成孔径雷达成像算法综述[J].雷达学报，2019，8(6)：732-757.

[12] 李学仕，孙光才，邵鹏，等.基于数字阵列雷达的同时多模式 SAR 成像体制研究[J].雷达学报，2014，3(4)：480-489.

[13] 韦维，朱岱寅，吴迪.机载 SAR 多模式统一化成像处理技术研究[J].雷达科学与技术，2020，18(6)：625-632，639.

[14] 刘永，徐若曦，冯彤，等.双基地 SAR 相位同步误差影响分析[J].计算机仿真，2019，36(9)：15-19.

[15] 邬伯才，沈明星，陈曦.基于数字阵列 SAR 系统的内定标技术研究[J].空军预警学院学报，2017，31(4)：253-256.

[16] MASSONNET D. Capabilities and limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(3): 506-520.

[17] KRIEGER G, MOREIRA A, FIEDLER H, et al. TanDEM-X: a satellite formation for high-resolution SAR interferometry [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2007, 45(11): 3317-3341.

[18] 尹建凤，张庆君，刘杰，等.国外编队飞行干涉 SAR 卫星系统发展综述[J].航天器工程，2018，27(1)：116-122.

[19] 张润宁，王旭莹，王志斌.星载高分宽幅 SAR 技术发展趋势分析[J].航天器工程，2022，31(1)：1-9.

[20] 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.

[21] 张增祥，汪潇，温庆可，等.土地资源遥感应用研究进展[J].遥感学报，2016，20(5)：1243-1258.

[22] 陈利军，张瑞，郭旭东，等.多源星载 SAR 地形干涉测量精度分析[J].测绘通报，2020(7)：13-17.

[23] 祖晖，付建胜，张政委，等.星载 SAR 技术在智能交通中的应用浅析[J].公路交通技术，2013(6)：117-122，130.

[24] 李凉海，刘善伟，周鹏，等.SAR 卫星组网观测技术与海洋应用研究进展[J].海洋科学，2021，45(5)：145-156.

[25] 杨燕，李震，黄磊，等.高分辨率 SAR 影像提取冰川面积与冰面河[J].遥感技术与应用，2019，34(6)：1155-1161.