

文章编号: 1001- 2486(2009) 04- 0087- 06

星载 SAR-GMTI 研究进展*

梁甸农¹, 蔡斌¹, 王敏², 董臻¹

(1. 国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073; 2. 装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要:星载 SAR-GMTI 系统具有地面(海面)大面积侦察、监视和运动目标检测、跟踪、定位的能力, 是航天侦察的重要手段之一, 可以为战场指挥、精确打击、态势评估提供高质量的情报信息。主要讨论星载 SAR-GMTI 系统及其研究进展, 简述了国内外研究、发展现状, 分析了现有的星载 SAR/GMTI 系统的优缺点和关键技术, 探讨了星载 SAR-GMTI 系统所面临的技术挑战和研究重点。

关键词:星载 SAR 系统; SAR-GMTI; 关键技术; 研究重点

中图分类号: TN957 文献标识码: A

Research Process of Spaceborne SAR-GMTI Systems

LIANG Dian-nong¹, CAI Bin¹, WANG Min², DONG Zhen¹

(1. College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: Spaceborne SAR-GMTI Systems have the ability to detect, track and relocate moving targets of the ground or the sea. The systems may provide high quality information for battlefield command, pinpoint strike and state evaluation, which is an important technique for space based reconnaissance. In this paper, Spaceborne SAR-GMTI Systems and relevant research process are introduced. The significant researches and development status quo in this field are discussed, and their limitations and key techniques are analyzed. Finally, the technique challenge and research emphasis are proposed.

Key words: spaceborne SAR systems; SAR-GMTI; research process; research emphasis

合成孔径雷达(SAR, Synthetic Aperture Radar)是现代雷达技术的重大突破,在军事侦察、地质普查、灾情勘查、遥感等领域应用广泛。而星载 SAR-GMTI (Ground Moving Target Indication) 系统具有地面(海面)大面积侦察、监视和运动目标检测、跟踪、定位的能力,是航天侦察的重要手段之一,具有重要的军事应用价值。与空载系统相比,星载系统具有轨道高、覆盖范围广、安全性高等优点;与星载光学侦察系统相比,SAR 系统具有全天候、全天时、探测隐蔽目标能力强、提供丰富的地表散射特性信息等优点。遥感系列卫星的成功发射为我国星载 SAR-GMTI 的系统论证、需求分析、性能评价等奠定了良好的基础。

单星载 SAR-GMTI 系统发展较早,技术也较为成熟,可兼容多种 GMTI 处理技术。国外的 Discoverer ①计划(美国),COSMO-SkyMed 计划(意大利),航天飞机的 SRIM 计划(德国),TerraSAR-X 计划(德国),以及 RADARSAT-2 计划(加拿大)是影响较大的代表系统。然而,单星载 SAR-GMTI 系统受到功率孔径积和基线长度的限制,对于地面慢速运动目标检测能较弱,系统自由度也较小,杂波抑制能力较弱。

近十年来,新的分布式星载 SAR-GMTI 系统受到了广泛的重视,美国空军实验室(AFRL)、法国宇航局(CNES)、德国宇航中心(DLR)以及国内多所研究机构,在轨道设计、卫星一体化设计、数据处理等多方面都展开了深入的研究。与单颗卫星 SAR-GMTI 系统相比,分布式卫星通过星间通信、同步工作、自主队形保持等多种手段,可获得多个灵活、有效基线,突破单星雷达几何尺寸的限制,增加了系统自由度,大大提高了地面慢速、弱小运动目标的检测和测速能力,缓解了覆盖范围和重访时间之间的矛盾。对于检测和监视缓慢运动的洋流、冰川、海上漂浮物也有突出的性能。

本文从系统发展和国内外研究现状入手,阐述了星载 SAR-GMTI 系统的研究进展,分析了现有的星

* 收稿日期: 2008- 11- 04

作者简介: 梁甸农(1936—),男,教授,博士生导师。

载 SAR-GMTI 系统的优缺点和关键技术,探讨了星载 SAR-GMTI 系统所面临的技术挑战和研究重点。

1 国内外研究现状

目前国外在轨/在研的星载 SAR-GMTI 系统按照系统体制可细致分为两类:单星双/多相位中心系统和分布式卫星系统,如图 1 所示,择其代表系统详细阐述如下。

1.1 单星双/多相位中心系统

(1) TerraSAR-X (TSX) 计划^[1]: DLR 开发,于 2007 年 6 月 15 日发射成功,第一批 SAR 图像和 SAR-GMTI 数据已公布, X 波段,多成像模式,多极化。相控阵天线沿航向长 4.8m,分列为两块。TSX 的实验模式采用了交替发射/接收脉冲技术,形成了 3~4 个虚拟相位中心,采用 DPCA-ATI 混合杂波抑制方法改善 GMTI 的性能。TSX 还将道路交通网做为先验信息以提高动目标检测和测速能力。

(2) RADARSAT-2 计划^[2]: 加拿大 CSA&MDD 开发,于 2007 年 12 月发射成功, C 波段,具有 3m 的高分辨率,全极化成像, SAR-GMTI 为实验模式 (MODEX)。与 TSX 类似, RADARSAT-2 也采用了虚拟多相位中心技术。

(3) SRTM 实验^[3]: 美国 JPL 和德国 DLR 联合开发,在主天线外增加一个辅助接收天线,切轨基线 60m,顺轨基线分量 7m。DLR 据此开展了大量实验研究,地面汽车上装相机和 GPS 接收机用于定位,装龙伯透镜以增大 RCS,将 GMTI 处理结果与 GPS 定位数据比较,取得一致性很好的结果。

(4) COSMO-SkyMed 计划^[4]: 意大利 ASI 开发,采用 4 颗 SAR 卫星(X 波段)均匀分布在圆形太阳同步轨道上,第一颗星已于 2007 年 6 月 8 日发射上天,2009 年将全部发射完成。每颗卫星的天线航迹向分裂为 5 个相位中心,可工作在全发/全收、全发/5 收、全发/前后交替收、前后交替发/5 收共 4 个模式,灵活的收发机制提供了多个可选的相位中心,有利于 GMTI 信号处理。

总的来说,该系统卫星平台高速运动,地杂波扩展严重,单星系统基线长度受限,慢速运动目标检测困难,即 MDV 高,重定位精度低。研究表明,在 X 波段,要得到可接受的 MDV 和定位精度,基线长度必须超过 100m。针对这一问题,一种方案是采用单星超大孔径天线,另一种方案是采用分布式卫星系统。

1.2 分布式卫星系统

(1) Interferometric Cartwheel, Pendulum 和 Carpe 计划: 法国 CNES 提出的 Cartwheel 计划是利用在轨或计划发射的 SAR 卫星作主星,若干小卫星形成编队接收主星信号,可以实现沿航迹干涉测洋流。德国 DLR 在 Cartwheel 的基础上,提出了 Interferometric Pendulum 的概念,切航迹基线可以灵活调节,更适合 GMTI 方面的应用。Carpe 是一种 Cartwheel 和 Pendulum 的混合模式,其性能介于二者之间。从原理上讲,凡能提供合适顺轨基线的卫星编队都可执行 GMTI 任务,例如 Cartwheel 编队,但 Cartwheel 星座的顺轨基线在卫星绕飞周期中变化很大,且同时存在较强的切轨分量,对 GMTI 来说不是一种好的编队方式,比较适合 GMTI 的是沿航向编队。

(2) TanDEM-X 计划^[5](图 2): DLR 开发,定于 2009 年发射,是一颗与 TSX 几乎完全相同的 SAR 卫星,将与 TSX 协同工作。DLR 提出了创新的 HELIX 双星紧密编队构形,便于基线自主调节和防止碰撞,在一定的纬度和下视角范围内,切航迹基线可调整至很小的值,而沿航迹基线可调整至 100m,能够实现双星 4 相位中心的多基线 SAR-GMTI 功能。单星短基线和双星长基线相接合,解决了最小可检测速度 (MDV) 和盲速(测速区间)之间的矛盾,测速标准差可达到 0.04m/s。

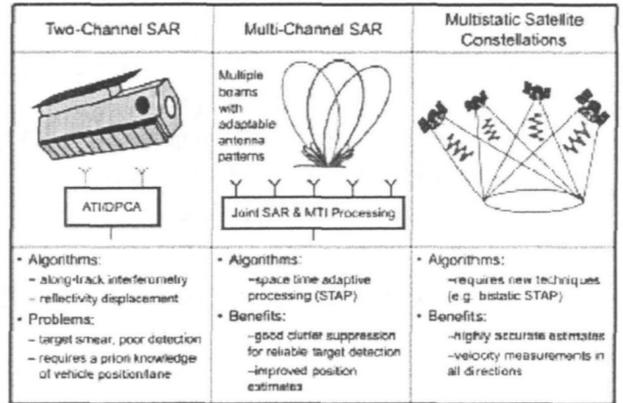


图 1 星载 SAR-GMTI 系统
Fig. 1 Spaceborne SAR-GMTI systems

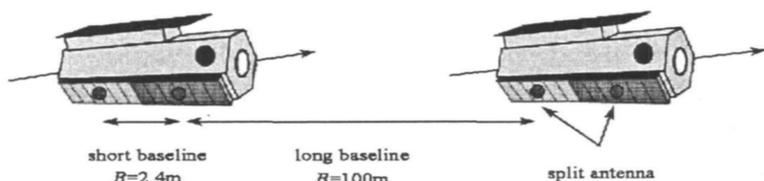


图 2 TanDEM-X 双站 4 相位中心示意图

Fig. 2 Four phases center in bistatic SAR of TanDEM-X

除此之外,计划中的 RADARSAT-2/3 串行编队和 COSMO-SkyMed 计划中的多颗卫星编队也会将分布式卫星系统的研究工作引向深入。以上两类系统可相互结合,形成多星/多相位中心系统,提高目标检测和测速性能。

国内多家机构针对单星和分布式卫星 SAR-GMTI 技术开展过较为全面的研究,提出了较多系统设计和信号处理方法,进行了多个批次的机载验证实验,为进一步发展打下了良好的基础。中科院电子所依托多批次机载飞行试验结果,在系统论证和数据处理等方面开展过深入研究^[6]。北京航空航天大学在单/多星载 SAR-GMTI 的系统设计与信号仿真、处理方面进行过多年的研究。航天科技集团五院、八院在卫星一体化及有效载荷设计方面进行过深入研究,为星载实验打下坚实基础。西安电子科技大学在单/多星载 SAR-GMTI 信号处理技术方面开展过深入的研究。国防科技大学在分布式星载 SAR-GMTI 的系统建模与仿真、误差分析与抑制和星间同步技术等方面有较深入的研究。另外,电子科技集团 14 所、38 所、南京航空航天大学、装备指挥技术学院、中科院计算所、中科院空间科学与应用研究中心、清华大学、成都电子科技大学等单位也在开展深入的研究工作。

总的来说,星载 SAR-GMTI 技术方兴未艾,目前在轨工作或即将发射上天的 SAR-GMTI 系统大都处于实验模式,还有较大的研究和发展空间。再者,分布式星载 SAR 系统另外一个重要应用是 InSAR 测高,上文中的 SRIM 计划和 TerraSAR-X/TanDEM-X 双星计划均以 InSAR 测高为主要应用背景。与 SAR-GMTI 系统相比,星载 InSAR 技术的研究时间较长,技术成熟度较高。

2 星载 SAR-GMTI 系统关键技术

本节以多星/多相位中心系统为基准,将单/多星系统的关键技术和难点融合在一起进行介绍,实际上,单/多星系统的部分关键技术是一致的。

2.1 卫星编队构形技术

目前国际上所提出的全球监视卫星系统实现任意地点、任意时间连续监视的星座设计,保证对任意突发战争的区域实现及时、不间断的密切关注,其成本是非常高的,难度很大,世界上很少有国家能承担如此庞大的项目开支和风险。因此,大多数机构的研究重点在于针对目前在轨的或在研的卫星,设计优化的编队构形,保证当卫星数目增加时,设计方法也能够适用。对多星/多相位中心系统而言,沿航向编队性能最优,编队构形要小,构形尺寸过大会带来较多的盲速。但实际中,考虑到碰撞风险和卫星控制能力等因素,理想的、稳定的沿航向编队难以实现,需要考虑立体编队构形设计问题。以国内研究机构为例,国防科技大学提出了基于信号正交原理的沿航向编队优化设计方法和基于遗传算法的立体编队设计方法^[7]。西安电子科技大学提出了一种星载沿航迹干涉 GMTI 最优基线设计方法。

2.2 星间同步技术

对多星/多相位中心 SAR-GMTI 系统而言,各雷达间的时间、频率及波束三同步问题是系统必须解决的关键技术之一。分置的接收机解调信号所用的基准频率源和发射信号的频率源位于不同的卫星上,星间基准频率源的不一致将在 SAR 图像间引入额外相位误差;时间同步是保证收发雷达触发脉冲间的同步以及收发脉冲重复频率间的一致性,各卫星对同一场景回波同时采样,便于 SAR 图像几何校准和图像配准;分布式卫星的收发天线波束,必须能够同时覆盖同一地域,星间的相对姿态误差和波束指向、抖动误差是波束同步误差的主要来源。不同于普通的双/多站雷达或只具备单一成像功能的双/多站

SAR 系统, SAR-GMTI 系统对回波/图像间相干性要求更高, 必须借鉴现有的同步方法, 研究新的同步方案。

2.3 星间测量技术与误差抑制

星间状态测量包括卫星速度、姿态, 星间基线长度和基线长度变化率, 基线姿态和姿态变化率, 编队卫星绕飞平面的空间方向等参数。主要的测量手段包括无线电测量、激光测量、GPS 测量和以上测量技术的组合方案。在误差分析与抑制中, 一方面, 以上技术及其组合会对整个系统引入测量误差, 建立测量误差模型, 进行特性分析, 结合测量技术和数据处理方法(如参数化估计方法等), 对误差进行分离和抑制; 另一方面, 建立测量误差与 GMTI 精度特征量之间的关系, 分析各类误差对系统性能的综合影响, 为系统设计提供支撑。

2.4 信号处理技术

(1) 双/多站保相成像

目前大多数 SAR-GMTI 杂波抑制方法, 是利用地面场景和运动目标图像之间相位差异, 因此双/多站成像算法除了要考虑幅度信息(防止散焦、模糊、分辨率下降等)外, 还要具有好的保相性能。特别是编队卫星在大斜视角、大双基角或非平行飞行轨迹等情况下, 对成像算法精度要求更高。

(2) SAR 回波/图像预处理

在星载 SAR-GMTI 处理过程中, 抑制地面杂波依靠双/多站回波或图像作相干处理, 抑制的效果在很大程度上取决于双/多通道回波或图像的相干性。影响回波或图像相干性的因素包括: (a) 接收机通道幅相一致性; (b) 天线方向图精度, 即进行滤波器设计采用的发射方向图和接收方向图的准确程度; (c) 卫星和天线的偏航、俯仰和横滚引起的误差; (d) 地球自转效应; (e) 双/多站成像误差; (f) 观测时间和视角引起的去相关; (g) 图像配准误差。

解决以上问题可以采用如下方法: 天线方向图盲校正; 回波/图像域通道均衡方法; 最小二乘频率域补偿方法^[8]; 采用修正的沿航向编队构型抑制地球自转效应; 双/多站保相成像算法; 快时间维和慢时间维滤波可以消除方位视角谱和快时间谱的去相关, 快时间滤波器的参数精度依赖于地面斜率的精度, 要求对于观测地面的高程有一定的先验知识; 高精度图像配准方法。

(3) 地杂波抑制

对多星/多相位中心 SAR-GMTI 系统中常见的杂波抑制方法包括 DPCA、ATI、SAR-STAP、信号子空间方法(SSP)、DPCA-ATI、MTMF(Moving Terrain Matched Filtering)和基于 FrFT(Fractional Fourier Transform)的杂波抑制方法等。对于监视地面运动目标而言, 由于编队构型、任务需求和轨道摄动等诸多因素的影响, 卫星之间存在沿航迹和切航迹的混合基线。卫星间的切航迹基线加剧了基线去相关引起的相位随机噪声, 使得图像中运动目标相位和地面高程相位混合在一起, 而动目标所在地面高程引入相位差难以估计和抑制, 给杂波抑制和动目标检测造成了较大的困难。一方面, 通过编队设计和高精度轨道技术, 使得系统满足信号处理基本条件, 降低信号处理的难度和负担, 如 TanDEM-X 的双星 SAR-GMTI 模式^[5]; 另一方面, 研究新的信号处理方法, 解决这一瓶颈问题。

(4) 动目标检测

动目标检测常用恒虚警检测方法(CFAR), 杂波场景可分为均匀区域、非均匀区域和极度非均匀区域, 而目标常用的模型是 Swerling 0, I 模型。从测量角度讲, 动目标检测又可分为幅度检测、相位检测、幅相联合检测^[9]、矩阵特征值/相位联合检测等。检测概率和虚警概率是系统设计的重要指标, 也为其他指标设定提供依据(如最小可检测速度, 测速区间等)。

(5) 动目标参数估计

动目标参数估计包括, 动目标速度、位置(方位向重定位)、动目标回波信号的多普勒中心频率和调频斜率等。其中, 动目标切航迹速度与方位向偏移量为确定性函数关系, 可利用动目标干涉相位、地面交通网先验信息、波达方向估计(DOA)等方法。而动目标信号的多普勒中心频率与调频斜率是杂波抑制后动目标的聚焦、成像的重要参数。以上参数的估计精度也是衡量星载 SAR-GMTI 系统性能的重要

指标。

2.5 星载 SAR-GMTI 概念体制框架设计

星载 SAR-GMTI 系统设计应从任务需求出发,充分考虑系统成本和系统性能两大综合约束,研究各系统模块与设计量间的约束关系,确定设计顺序和原则,优化设计方案,建立性能评价指标与方法,且充分依托地面仿真系统和机载实验系统,验证设计方法和技术可行性,再者,对关键技术进行攻关,为星上系统研制提供有力支持。

3 未来的研究热点和新技术

未来的星载 SAR-GMTI 系统会向多频/多极化/多相位中心/多星系统发展,本节简要介绍了未来的研究热点和新技术。

(1) 先进的信号处理方法

在过去的二十余年间,星载 SAR-GMTI 信号处理方法有了较大的发展,但仍有较大的局限性,一些瓶颈问题尚未得到很好的解决,部分技术还处于理论研究阶段,无法应用于实际系统。比如,杂波抑制方法对回波/图像间相干性有较强的依赖性,这对回波/图像的预处理技术提出了较高的要求;DPCA 方法对地面场景的均匀/非均匀特性较为敏感,在非均匀场景中 DPCA 检测性能会急剧下降;常用的 ATI 方法严格来讲不是一种杂波抑制方法,其性能受限于地杂波强度和相干性,实际更适合于洋流的检测;基于 FrFT (Fractional Fourier Transform) 的杂波抑制方法运算量大,且精度较低;星间切航迹基线引起的动目标干涉相位和地形干涉相位耦合,尚未有很有有效的解决方法;基于地面道路先验知识的检测方法,适用于交通事故监视,在平原或海面不适用;对于星载系统而言,目前杂波抑制和检测方法大都集中在沿切航迹运动目标,对沿航迹运动目标尚未有十分有效的解决方法;多频/多基线信号处理方法解决测速区间与最小可检测速度之间存在矛盾。先进的信号处理方法能为系统的设计和使用提供有力支持,推动新概念和新系统的出现,是重要的研究方向。

(2) 系统建模与仿真

系统建模与仿真技术是星载 SAR-GMTI 系统原理验证、性能分析、指标分配和优化设计的重要工具。仿真模型需要在适当粒度上反映星载 SAR-GMTI 的特点和本质^[10],包括卫星平台的轨道和编队设计、地球自转、高精度星间基线测量、时间/频率/波束同步、雷达系统多种工作模式、各种误差和噪声的注入与评估、动目标和自然场景建模、回波和图像仿真,以及数据算法和性能评价。例如,FGAN 专为研究天基相控阵天线多通道 SAR-GMTI 建立模拟系统 SpaceSim,加拿大开发的 SBRMTISIM 软件等。

(3) 实时数据处理

从航天侦察技术来讲,SAR-GMTI 任务对时效性要求很高,从发展远景看,星上实时处理是必需的。国内外多家机构都在开展星上实时处理技术的研究。

(4) 多极化 SAR-GMTI 技术^[11]

加拿大研究机构利用机载多极化 SAR 系统,开展了多极化 SAR-GMTI 系统与信号处理技术的研究。一方面,交叉极化可形成多相位中心,提供足够的系统自由度,而运动目标在多极化图像中形成方位向平移和相位差异,传统的 DPCA 和 ATI 方法可直接应用于此;另一方面,多极化系统对植被覆盖/掩盖的运动目标有更好的检测和监视效果。

(5) MIMO SAR-GMTI 概念系统

MIMO (Multiple Input Multiple Output) 雷达利用多发射机/多接收机分置(多发多收)、发射正交波形或多载频信号(波形或频率分集),形成远多于阵元个数的观测通道,可等效为降低了空间采样间隔,缓解了星载 SAR 成像中测绘带宽与分辨率之间的矛盾,扩大了地面动目标可检测速度范围,提高了动目标参数估计和成像性能。MIMO SAR-GMTI 概念系统是传统的单发多收/多发多收系统的自然延伸与拓展。

4 结束语

星载 SAR-GMTI 技术在情报获取、灾害监测和地质勘测等方面有着广泛的应用前景。研究机构要加强应用研究,结合我国实际情况,论证对星载 SAR-GMTI 的要求,用应用需求推动研究工作。同时,充分吸收机载 SAR-GMTI 研究成果,探究星载 SAR-GMTI 新概念、新原理、新方法,寻求解决目前存在瓶颈问题的途径。再者,进一步开展星载 SAR-GMTI 的全数字和半实物仿真实验工作,用系统仿真手段检验新概念、新原理、新方法的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] Meyer F, Hinz S, Laika A, et al. Performance Analysis of the TerraSAR-X Traffic Monitoring Concept [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 2004, 61: 225- 242.
- [2] Sikaneta L J, Gienull I, Chiu C, et al. An Airborne Synthetic Aperture Radar (SAR) Experiment to Support RADARSAT- 2 Ground Moving Target Indication (GMTI) [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2002, 28(6): 794- 813.
- [3] Breit H, Eineder M, Holzner J, et al. Traffic Monitoring Using SRIM Along-track Interferometry [C]//Proc. IGARSS, Toulouse France, July 21 - 25, 2003: 1187- 1189.
- [4] Lombardo P, Colone F, Pastina D. Monitoring and Surveillance Potentialities Obtained by Splitting the Antenna of the COSMO-SkyMed SAR into Multiple Sub-apertures [J]. IEE Proc. Radar Sonar Navig., 2006, 53(2): 104- 116.
- [5] 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.
- [6] 郑明洁. 合成孔径雷达运动目标检测和成像研究[D]. 北京:中国科学院电子学研究所, 2003.
- [7] 杨凤凤, 黄海风, 梁甸农. 基于遗传算法的分布式卫星 SAR-GMTI 编队优化[J]. 电子学报, 2007, 35(6): 1037- 1041.
- [8] Tong W, Zheng B, Zhang Z H, et al. Improving Coherence of Complex Image Pairs Obtained by Along-track Bistatic SARs Using Range-azimuth Prefiltering [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(1): 3- 13.
- [9] Gienull C H. Statistical Analysis of Multilook SAR Interferograms for CFAR Detection of Ground Moving Targets [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42 (4): 691- 701.
- [10] 王敏, 梁甸农, 董臻, 等. 分布式小卫星 SAR 回波仿真快速算法[J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 61- 64.
- [11] Chen Liu. Effects of Target Motion on Polarimetric SAR Images [J]. Can. J. Remote Sensing, 2006, 32(2): 51- 64.