

分布式小卫星合成孔径雷达研究进展

周荫清,徐华平,陈 杰

(北京航空航天大学电子信息工程学院,北京 100083)

摘 要: 分布式小卫星合成孔径雷达(SAR)是上世纪末提出的一种新的对地观测系统.本文主要讨论分布式小卫星 SAR 技术及其研究进展.综述了分布式小卫星 SAR 的研究现状,给出了分布式小卫星 SAR 的基本概念,讨论了分布式小卫星 SAR 的三种系统功能和两种基本工作模式,最后探讨了目前实现分布式小卫星 SAR 系统所面临的技术挑战以及未来的研究重点.

关键词: 分布式小卫星 SAR; 三维地形成像; 动目标检测; 成像

中图分类号: TN959 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 12A-1939-06

Research Progress of Distributed Small Satellites Synthetic Aperture Radar

ZHOU Yin-qing, XU Hua-ping, CHEN Jie

(School of Electronic and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Distributed small satellite synthetic aperture radar (DSS-SAR) is a new way to observe the earth's surface from space, which is proposed in the last years of the 20th century. In this paper, the DSS-SAR technique and its research progress are mainly discussed. After a brief review of its recent progress, the concept of DSS-SAR is described and its mission and means of implementation are presented. At last, the key problems and the prospect in this field are pointed out.

Key words: DSS-SAR; topographic mapping; GMTI; imaging

1 引言

上世纪五十年代发展起来的合成孔径雷达(SAR)技术是现代雷达领域的重大进展,它具有全天时、全天候工作的特点,对地表有一定的穿透力,能同时在距离向和方位向获得高分辨率,在军事侦察、农业勘察、洋流监测、地质勘探及灾情调查等方面具有广阔的应用前景.自1978年第一颗SAR卫星SEASAT卫星发射成功,星载SAR以它作用距离远、观测范围广的优势引起各国科学家的极大关注,并得到很大的发展.

随着星载SAR图像产品的广泛应用,人们要求星载SAR系统具有更强大的功能.为满足这些需求,星载SAR向着多极化、多模式、多波段方向发展,其系统组成越来越复杂,研制周期越来越长,造价也越来越高.即便如此,由于卫星平台的限制,使得单星SAR系统性能的提高仍受到很大束缚.因此,在上个世纪末,分布式小卫星SAR技术应运而生.

分布式小卫星SAR利用多颗小卫星协同工作,构成虚拟卫星,能够实现单星SAR系统目前还很难完成的一些任务,这主要表现在三个方面:(1)同时获得高分辨率和大测绘带宽度;(2)提供全球范围内的高精度三维地形高程图;(3)对慢动目标进行检测和显示.

在军事应用中,高分辨率图像是获取正确情报的保证,大测绘带则是缩短重访周期、快速获取信息的重要手段;大面积

和高精度的三维地形高程图不但是地理信息系统的重要组成部分,而且对于武器制导、战场指挥决策以及制定战略战术计划等都有至关重要的意义;很多军事目标在实际中都处于运动状态,因此运动目标的检测、识别、显示和速度估计对军事作战也是非常重要的,另外洋流等运动目标的信息也与人们的生活息息相关.分布式小卫星SAR可以同时在这三个方面很好地满足军事需求和社会需求,从这一点说,它是一种非常理想的对地观测系统.另外,分布式小卫星SAR还具备可靠性高和灵活性好的特点;由于小卫星可以批量生产,发射架重复使用率很高,因此还具有成本低等优点.分布式小卫星SAR是本世纪SAR技术发展的重要方向之一.

本文在给出国内外研究现状的基础上,从基本概念、系统功能、工作模式等方面综述分布式小卫星SAR的研究进展,最后指出实现该系统所面临的技术挑战,并对其未来的研究重点进行展望.

2 国内外研究现状

国外对分布式小卫星雷达的研制工作表现为两种思路:一是美国空军实验室开展的TechSat 21计划;另一个是欧洲国家在研的分布式干涉SAR系统,代表系统有ICW(Interferometric cartwheel)、IPD(Interferometric pendulum)以及ICP(Interferometric carpe).

分布式小卫星系统的研制最早是在美国开始的. 1995 年, 美国空军空间技术小组发起了对分布式小卫星完成空间任务的技术挑战和优势的探索. 1997 年美国空军实验室明确了分布式小卫星的空间任务, 并于 1998 年提出了 TechSat 21 计划, 主要用于研究分布式小卫星系统中的各个技术难点. TechSat 21 计划采用空基雷达作为有效载荷^[1,2], 可以实时地提供 GMTI 和 SAR 数据, 进行雷达成像. 针对 TechSat 21 的系统任务, 美国宇宙公司概念设计中心 CDC 进行了系统级设计, 提供了三个方案^[1]: 方案一采用现有技术, 系统由 35 颗低轨卫星组成, 卫星重量估计为 12500kg; 方案二采用 2003—

2005 年之前的技术, 系统仍由 35 颗卫星组成, 但卫星重量预计降为 4400kg; 方案三采用虚拟卫星技术, 系统由位于 7 个轨道平面内的 35 个星群组成, 每个星群包括 8 个卫星.

为了支持 TechSat 21 计划, 美国空军联合了 10 所大学花费了两年多时间设计和组装小卫星, 着重探索分布式小卫星在编队飞行、星间通信、姿态控制以及微型传感器和推进器等方面的低消耗设备的研制^[1]. 2001 年, 美国空军研究实验室确定了以三颗小卫星组成分布式卫星系统的 TechSat21 飞行试验计划, 预计在 2004 年 7 月前发射升空, 在轨工作时间为一年. 目前, 针对 TechSat21 系统所做的具体研究见表 1.

表 1 TechSat 21 计划的研究情况

研究内容	研究者与参与单位	研究情况
系统总体方面	Nichols 研究院的 Skinner 等 ^[3]	采用一种智能代理模型, 分析如何采用最少的卫星数目实现对特定区域的完全覆盖, 并保证每颗卫星之间不发生相互碰撞的问题
	Das 等 ^[4]	给出了一个分布式小卫星系统的设计实例和一个小卫星的设计构型
命令与控制	美国空军实验室的 Zetocha 等 ^[5,6]	提出了卫星群测控指令和控制系统的构架, 并进行了测试
小卫星编队飞行	MIT 空间系统实验室的 Sedwick 等 ^[2]	给出了几种采用燃料消耗最少达到最佳空间构形的编队飞行方法, 分析了每种方法情况下卫星的在轨寿命
	Burns 等 ^[7]	从编队构形、编队控制、相对导航以及姿态确定与控制四个方面研究空间构形设计
GMTI	Enright 等 ^[8]	提出采用在轨数据处理解决 GMTI 任务中的大数据量, 分析了几种在轨数据处理方法, 提出了它们对卫星总体的要求和可能的解决方案
	Sedwick 等 ^[9]	给出了一种 GMTI 的数据处理方法, 分析了天线阵的排列和干涉 GMTI 雷达系统的性能

法国宇航局 (CNES) 的 Massonnet 等^[10,11] 提出了干涉转轮 ICW 的概念, 讨论了 ICW 的空间基线, 分析了天线的指向和定位问题, 提出了对系统时钟的要求, 分析了图像的模糊度, 并研究了提高空间分辨率的成像处理方法. 为了结合已有单星 SAR 系统实现 ICW, CNES 开展了一系列的活动: 1999 年 12 月与日本国家航天发展中心 NASDA 签署了联合声明, 相互合作将 ICW 技术应用于日本计划在 2003 年发射的 ALOS 单星 SAR 系统^[12]; 和 Alcatel 公司的空间研究所进行合作, 开展了 ICW 有效载荷方面的研究^[13,14]; 和德国 DLR 共同研究将 ICW 应用于 2003 年欧空局将要发射的 ENVISAT 卫星系统^[15]. 另外, Mittermayer 等^[16] 分析了 ICW 的系统性能和基线特性, 估计了干涉测高的精度. 为了解决 ICW 中基线的耦合问题, Morcia 等^[17] 提出了 IPD 系统, 它通过采用不同的轨道倾角实现了沿轨迹和垂直轨迹方向基线的解耦, 有利于沿轨迹基线干涉任务的实现, 并可简化基线的设计过程. 随后, Fiedler 和 Krieger 等^[18-21] 还提出了综合 ICW 和 IPD 系统特性的 ICP, 比较了这三种系统的基线特点, 分析了它们的系统性能.

国内在分布式小卫星 SAR 方面的研究工作还刚刚开始, 主要是中科院电子所在分布式小卫星微波成像雷达系统方面的一些概念性研究和北京控制工程研究所关于小卫星编队飞行及轨道构成方面的研究^[22]. 北京航空航天大学星载 SAR 课题组在星载干涉 SAR 技术和机载动目标检测成像多年研究的基础上, 针对分布式小卫星 SAR 系统的数据处理展开了大

量的研究工作. 北京航空航天大学宇航学院在分布式小卫星轨道设计和星座设计方面也开展了许多工作. 哈尔滨工业大学在小卫星的一体化设计技术方面取得了一定的研究成果. 另外, 国防科技大学、西安电子科技大学、中科院计算所、中科院空间科学与应用研究中心也正在开展分布式小卫星 SAR 技术方面的研究工作.

3 分布式小卫星 SAR 技术综述

3.1 基本概念

分布式小卫星合成孔径雷达 (SAR) 是以一种新的星座概念—编队飞行小卫星群作为平台, 以 SAR 作为有效载荷的空间对地观测系统. 与单星 SAR 相比, 它不但实现了系统功能的增加, 而且还能够获得系统性能的提升, 极大地拓展了单星 SAR 的总体性能和应用领域.

分布式小卫星 SAR 的概念不是简单的将一颗卫星上的 SAR 有效载荷分成几个部分, 装备到不同的小卫星上; 而是作为装载 SAR 的平台, 每颗小卫星都是完整的、相对独立的, 具有一定的功能^[1]. 分布式小卫星 SAR 中小卫星之间的这种独立性是相对的, 它们之间同时还是相互联系、相互制约的. 一方面每颗小卫星都有自己的结构、供电系统、中央电子系统、姿态控制, 并且都能够自主控制和操作; 另一方面, 它们之间还要通过星间链路维持连续的相互通信和同步, 通过轨道构成和简单的、低费用的推动装置来保持和调整编队构形; 此外, 多颗小卫星只有组合在一起协同工作, 才能够实现传统单

颗星不可能完成的一些任务^[4,23]。

图 1 给出了分布式小卫星协同工作的空间示意图。这些小卫星在沿着各自的轨道绕地球运动的同时,还按照一定的空间编队构形围绕一个中心点做绕飞运动。图中给出的是一种不需要消耗燃料、被动稳定的椭圆形空间编队构形。一般来说,小卫星的空间构形可以设计成任意形状,实现主动编队飞行。但是对于这种空间飞行轨道,这需要消耗大量的燃料,实际中很难实现。因此通常采用一种基本不需要消耗燃料,主要依靠小卫星的轨道构形来实现的编队飞行。这时小卫星的绕飞轨迹为椭圆或圆形,每颗小卫星的轨道周期都相同,且都等于绕飞轨迹的周期^[22]。

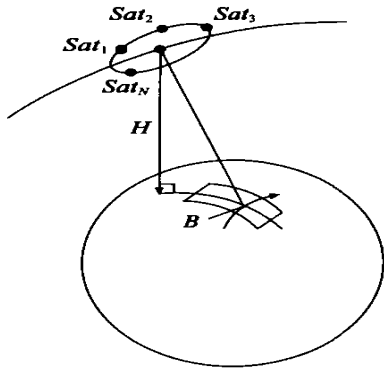


图 1 分布式小卫星协同工作的空间示意图

3.2 系统功能

分布式小卫星 SAR 不仅能够实现单星 SAR 的成像功能,而且还具备高精度三维地形成像、地面慢速运动目标检测以及同时获得高空间分辨率和大测绘带的 SAR 图像^[10]。

3.2.1 高精度三维地形成像 分布式小卫星 SAR 系统能够提供全球范围内的高精度三维地形高程图。目前,单颗 SAR 卫星上还很难同时安装两部天线,它通过重复观测来获得干涉 SAR 复图像对来实现三维地形成像,两次观测时间间隔内地形的运动变化将大大降低图像间的相关性,从而引起测高精度的降低;而且其基线在一个轨道周期内是变化的,很难保证整个轨道周期的基线长度都满足系统性能要求,因此也很难获得全球范围内的高精度三维地形高程图。虽然航天飞机上可以通过桅杆连接来同时安装两部天线,但由于在空间工作,桅杆的长度不可能太长,因此大大限制了基线长度,使得系统性能受到限制。分布式小卫星间不需要实物连接,可以提供灵活的基线长度;而且它还可以通过多颗小卫星获得的多幅 SAR 图像的不同组合在整个轨道周期内提供稳定的基线长度,因此采用分布式小卫星 SAR 实现三维地形成像,解决了单星 SAR 中的许多难题,可以在全球范围内获得高精度的三维地形高程图。

分布式小卫星 SAR 中,多颗小卫星的回波信号可以提供多幅干涉图像,实现多基线干涉。多基线干涉 SAR 是上个世纪九十年代提出的一种技术^[24~26],它的基本思想是利用较多的干涉图像获取更高精度的三维地形高程图。基于多基线干涉提高三维地形成像性能的思路主要有两种:一是在图像干涉步骤方面,利用多幅 SAR 单视复图像提高干涉相位图的

质量^[24~31],简化相位展开过程,这主要体现在多基线干涉得到的干涉相位图具有更高的干涉相位估计精度、更大的模糊基、更大的极限平均视数等三个方面;另一种是采用迭代的方法减小地形高度估计误差^[32]。

3.2.2 地面慢速运动目标检测 单颗卫星采用多孔径的方法实现 GMTI,大大增加了卫星的复杂程度和设计成本,且不易实现。采用分布式小卫星系统,将接收天线安置于不同的小卫星上,能够较容易地进行慢动目标的检测和显示。

采用分布式小卫星 SAR 实现运动目标检测有两种方式:一种情况下,不同小卫星运动目标回波信号之间以及静止目标回波信号之间均存在一定的相位差,利用静止目标与运动目标之间相位差的不同来实现运动目标的检测;另一种情况下,不同小卫星运动目标回波信号间存在相位差,而静止目标间不存在相位差,通过检测信号之间的相位差就可以实现运动目标与静止目标的分离。

采用分布式小卫星 SAR 可以获得较好的动目标速度响应。它不但具有良好的低速性能,而且具有较平坦的速度响应,能较好地解决盲速问题。目前,分布式小卫星 SAR 实现动目标检测主要有:多天线、双(三)频 SAR 小卫星系统以及天线方向图合成等三种方法。进行动目标检测的技术难点主要有:高精度星间距离的测量;基于干涉原理,进行地面杂波抑制;利用多天线波束形成的方法解决盲速问题。

3.2.3 同时获得高空间分辨率和大测绘带的 SAR 图像 由于 SAR 系统信号时序中信号脉冲宽度、脉冲重复周期和测绘带宽之间的制约关系,使得单星 SAR 的 StripMap 模式很难同时实现高分辨率、大测绘带 SAR 成像。虽然单星 SAR 系统中采用了 Spotlight 和 SCANSAR 两种模式来提高分辨率和增大测绘带宽,但它们都不可避免地带来了新的问题——Spotlight 不能在方位向获得连续的图像,SCANSAR 则引起了方位向分辨率的降低。分布式小卫星 SAR 通过结合多颗小卫星的 SAR 回波信号,可以获得同时具备高分辨率和大测绘带宽的 SAR 图像。

图 2 给出了分布式小卫星 SAR 实现高分辨率、大测绘带成像的两种工作方式。图 2(a)中,单星 SAR 的参数设计仅需要保证足够高的空间分辨率,整个系统的大测绘带是通过将不同小卫星的 SAR 图像在距离向拼接获得的。图 2(b)中,设计单星 SAR 的参数以保证足够大的测绘带宽,而高分辨率则通过对多颗小卫星 SAR 图像进行提高分辨率的数据处理来获得。

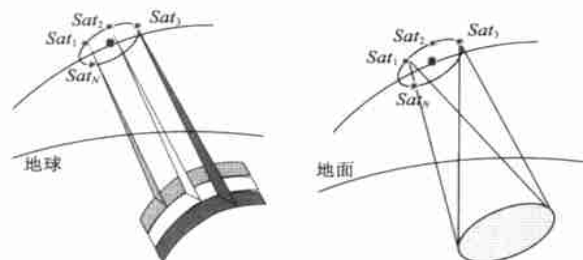


图 2 分布式小卫星 SAR 实现高分辨率、大测绘带成像的两种工作方式

3.3 基本工作模式

分布式小卫星 SAR 的工作模式主要有多发多收和单发多收两种.如图 3 所示,多发多收模式下,系统中所有小卫星的地位均等,它们都主动地发射和接收信号.该模式采用分布式的思想构建和设计,彻底地体现了分布式系统的优势.它是从全新的角度研究分布式小卫星,因此构造比较复杂.其代表系统为美国的 TechSat 21 计划.

单发多收模式的分布式 SAR 系统采用传统大卫星伴随多颗小卫星的方式实现,系统中大卫星发射信号,小卫星接收信号,系统对大卫星的依赖较强.ICW、IPD 和 ICP 三种系统均采用这种一发多收的工作模式,它们之间的不同主要表现在



图 3 多发多收模式,代表系统 TechSat 21 计划

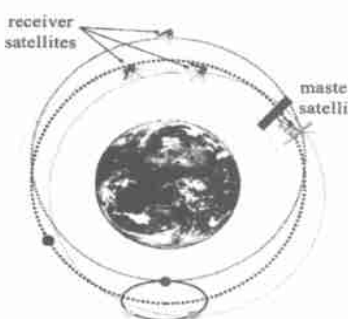


图 4 三颗小卫星构成的 ICW 系统

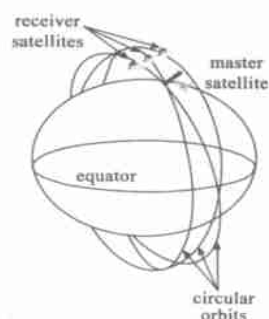


图 5 三颗小卫星构成的 IPD 系统

4 面临的技术挑战及未来的研究重点

4.1 面临的技术挑战

分布式小卫星 SAR 要求小卫星群按照一定的空间编队构形协同工作,这就使得实现分布式小卫星 SAR 系统还面临着很多其它的技术挑战.图 6 给出了实现分布式小卫星 SAR 系统尚需解决的关键技术^[34].

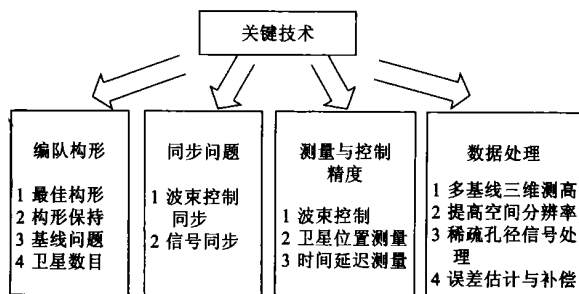


图 6 分布式小卫星 SAR 系统的关键技术

如图 6 所示,分布式小卫星 SAR 系统的关键技术主要体现在以下四个方面:

(1) 空间编队构形.小卫星群按照一定的空间构形编队飞行,由于在空间不可能提供较大的推动力,因此必须寻求消耗燃料最小的最佳构形^[2],并且要提供能够保持这种构形的方法.基线长度直接影响分布式小卫星 SAR 三维测高精度、空间分辨率改善因子以及动目标的最小可检测速度,因此基线设计也是一个至关重要的问题.另外考虑到造价问题,还需要

小卫星的轨道构成和绕飞轨迹.如图 4 所示^[33],ICW 系统中,小卫星均采用椭圆轨道,形成了不需要消耗燃料的被动稳定空间编队构形;它们的绕飞轨迹为一个位于轨道平面内、且长半轴与短半轴之比为 2 的椭圆.如图 5^[33],IPD 系统中小卫星采用圆形轨道,不同小卫星的升交点赤径和轨道倾角略有不同;小卫星沿垂直于大卫星轨道平面方向做简谐振动,绕飞轨迹为一垂直于大卫星轨道平面的直线,需要消耗少量燃料来保持空间构形.ICP 是 ICW 和 IPD 相结合的产物,该系统部分小卫星遵循 ICW 中小卫星的绕飞轨迹规律,另一部分则遵循 IPD 中小卫星的绕飞轨迹规律,通过选择合适的轨道参数,该系统编队构形的保持可以不需要消耗燃料.

研究能够实现系统功能的小卫星的最小数目;

(2) 同步问题.多颗小卫星波束之间需要同步地照射地面区域,完成观测任务.小卫星协同工作,它们之间需要相互通信,这就要求信号在空间、频率和时间上的同步

(3) 测量与控制精度.分布式小卫星 SAR 系统三维测高、提高分辨率和动目标检测三种功能的实现需要小卫星波束对地面同一区域的覆盖达到一定的重叠率,这就要求具有足够高的波束控制精度.分布式小卫星 SAR 的数据处理要求提供足够高精度的基线信息,这需要很高的卫星位置测量精度.另外,电离层引起的传播时延对数据处理的影响很大,因此必须具有高精度的时延测量技术^[21];

(4) 数据处理.数据处理技术是面向用户的最后一环,因此也非常重要.除了要对单颗小卫星的 SAR 回波数据进行单视复图像成像处理外,分布式小卫星 SAR 的数据处理主要包括多基线三维测高成像处理、提高空间分辨率的数据处理和用于动目标检测的稀疏孔径信号处理.另外,当系统提供的时延和基线信息精度不够时,还需要利用回波信号本身,进行运动误差的估计和补偿.

4.2 未来的研究重点

结合分布式小卫星 SAR 的三种系统功能,未来的研究重点主要体现在:

(1) 研究能够兼顾三种系统功能成像性能实现的、合理的基线设计方法;

(2) 寻求最优的小卫星空间编队构形,以更好地解决垂直轨迹基线与沿轨迹基线之间的耦合问题,同时能够提供在一

个轨道周期内长度变化较小的系统基线长度;

- (3) 多基线方法提高干涉 SAR 三维测高精度;
- (4) 分布式小卫星同时实现大测绘带、高分辨率成像;
- (5) 稀疏孔径成像进行慢速运动目标的检测与显示;
- (6) 有效载荷 SAR 的小型化。

5 结束语

分布式小卫星 SAR 利用多颗小卫星之间的协同工作,能够提供高精度的数字高程图、进行地面慢速运动目标的检测和显示以及同时实现大测绘带、高分辨率 SAR 成像。目前该系统具有多发多收和单发多收两种工作模式:多发多收模式从整体概念的角度进行研究,因此系统的构建比较复杂;单发多收模式结合了现有的传统大卫星,发展也比较快。分布式小卫星 SAR 系统的实现在编队构形、协同工作、测量精度以及数据处理等方面还面临着一系列的技术挑战。为了很好地实现分布式小卫星 SAR 的三种系统功能,未来的研究工作将重点在基线设计、空间编队构形设计、多基线干涉、提高分辨率成像、稀疏孔径成像以及有效载荷小型化等方面展开。

参考文献:

- [1] Luu KM, Martin M, et al. University nanosatellite distributed satellite capabilities to support TechSat 21 [A]. AIAA/USU Small Satellite Conference Logan UT [C]. USA: SC99-III-3, 1999.
- [2] Sedwick RJ, Kong EM C, Miller D W. Exploiting orbital dynamics and micropropulsion for aperture synthesis using distributed satellite systems: applications to techsat 21 [R]. USA: AIAA, A9845988, 1998.
- [3] Skinner J M, Tollefson M V, Rosenstock J C. Cooperative intelligent agents for distributed satellite systems [R]. USA: AIAA, A9845918, 1998.
- [4] Das A, Cobb R. TechSat 21-Space missions using collaborating constellations of satellites [A]. 12th AIAA/USU Conference on Small Satellites [C]. USA: SSC98-VF-1, 1998.
- [5] Zetocha P. Satellite cluster command and control [A]. IEEE Aerospace conference proceedings [C]. Big Sky, MT: IEEE, 2000. 49 - 54.
- [6] Zetocha P A, Brito M. Development of a testbed for distributed satellite command and control [A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. Big Sky, MT: IEEE, 2001. 2-609-2-614.
- [7] Burns R, McLaughlin C A, et al. TechSat 21: Formation design, control and simulation [A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings [C]. Big Sky, MT: IEEE, 2000. 19 - 25.
- [8] Enright J P, Miller D W R, Sedwick J. Information architecture analysis and optimization for space-based distributed radar [R]. USA: AIAA, A9942104, 1999.
- [9] Sedwick RJ, Hacker TL, Marais K. Performance analysis for an interferometric space-based GMTI radar system [A]. IEEE National Radar Conference- Proceedings [C]. Alexandria, VA, USA: IEEE, 2000. 689 - 694.
- [10] Massonnet D. Capabilities, limitations of the interferometric cartwheel [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39 (3): 506 - 520.
- [11] Massonnet D, et al. A wheel of passive radar microsats for upgrading existing SAR projects [A]. IGARSS [C]. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000. 1000 - 1003.
- [12] National Space Development Agency of Japan, Centre National d'Etudes Spatiales. Agreement between NASDA and CNES on an action plan for the cooperation in the field of earth observation for natural disaster monitoring [EB/OL]. www.nasda.go.jp/press/1999/12/cnes-991216-e.html.
- [13] Ramongassie S, Phalippou L, Thouvenot E, Massonnet D. Preliminary design of the payload for the interferometric cartwheel [A]. IGARSS [C]. Honolulu, HI, USA: IEEE, 2000. 1004 - 1006.
- [14] Martinerie F, Ramongassie S, Deligny B. Interferometric cartwheel payload: development status and current issues [A]. IGARSS [C]. Sydney, NSW: IEEE, 2001. 390 - 392.
- [15] Runge H, Bamler R, Mittermayer J, Jochim F, Massonnet D, Thouvenot E. The Interferometric Cartwheel for ENVISAT [EB/OL]. http://envisat.esa.int/.
- [16] Mittermayer J, Krieger G, et al. Interferometric performance estimation for the interferometric cartwheel in combination with a transmitting SAR-satellite [A]. IGARSS [C]. Sydney, NSW: IEEE, 2001. 2955 - 2957.
- [17] Moreira A, Krieger G, Mittermayer J. Comparison of several bistatic SAR configurations for spaceborne SAR interferometry [A]. IGARSS [C]. Sydney, NSW: IEEE, 2001.
- [18] Fiedler H, Krieger G, et al. Analysis of satellite configurations for spaceborne SAR interferometry [A]. International Symposium Formation Flying Mission & Technologies [C]. Toulouse, France, 29 - 31 October, 2002.
- [19] Fiedler H, Krieger G, et al. Analysis of bistatic configurations for spaceborne SAR interferometry [EB/OL]. http://www.weblab.dlr.de/rbrt/pdf.
- [20] Krieger G, Wendler M, et al. Performance analysis for bistatic interferometric SAR configurations [A]. IGARSS [C]. Toronto, Ont, Canada: IEEE, 2002. 650 - 652.
- [21] Krieger G, Fiedler H, et al. Analysis of multistatic configurations for spaceborne SAR interferometry [J]. IEEE Proceedings Radar Sonar Navigation, 2003, 150 (3): 87 - 96.
- [22] 林来兴. 发展我国小卫星星座和测控技术 [J]. 飞行器测控学报, 2000, 19 (3): 17 - 22.
- [23] Martin M, Stallard M J. Distributed satellite missions and technologies the TechSat 21 program [R]. USA: AIAA, A9942052, 1999.
- [24] Lombardo P, Lombardini F. Multi-baseline SAR interferometry for terrain slope adaptivity [A]. IEEE National Radar Conference [C]. Syracuse, NY, USA: IEEE, 1997. 196 - 201.
- [25] Xu W, et al. Phase-unwrapping of SAR interferograms with multi-frequency or multi-baseline [A]. IGARSS [C]. Pasadena, CA, USA: IEEE, 1994. 730 - 732.
- [26] Ferretti A, et al. Multi baseline interferometric techniques and applications [A]. Proceedings of FRINGE 96—ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry [C]. Zurich, Switzerland: IEEE, 1996. 243 - 252.
- [27] Lombardo P, Lombardini F. Absolute phase retrieval in a three-element synthetic aperture radar interferometer [A]. Proceedings 1996 CIE International Conference Radar [C]. Beijing, China: IEEE, 1996. 309 -

312.

- [28] Corsini G, et al. Reduction of the phase-unwrapping drawbacks by the three-antenna interferometric SAR system [A]. IGARSS [C]. Singapore: IEEE, 1997. 1536 - 1538.
- [29] Berizzi F, et al. Simulation model and performance analysis of a three-antenna INSAR system. Radar 97 [A]. IEE Conference Publication [C]. Edinburgh, UK: IEEE, 1997. 119 - 123.
- [30] Corsini G, et al. Simulated analysis and optimization of a three-antenna airborne INSAR system for topographic mapping [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1999, 37(5): 2518 - 2529
- [31] Lombardini F, et al. Application of array processing techniques to multibaseline InSAR for layover solution [A]. IEEE National Radar Conference Proceedings [C]. Atlanta, GA: IEEE, 2001. 210 - 215.
- [32] Robertson A E. Multi-baseline interferometric SAR for iterative height estimation [D]. Provo, UT: Brigham Young University, 1998.
- [33] Romeiser R, Schwabisch M, et al. Study on concepts for radar interferometry from satellites for ocean (and land) applications [R]. USA: KRIOLiS Report, 2002.
- [34] 徐华平. 分布式小卫星合成孔径雷达理论与方法研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学研究生院, 2003.

作者简介:



周荫清 男, 1936 年生于湖南湘潭, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 主要从事信息获取与处理、高分辨率成像雷达和时变谱估计等方面的教学和科研工作。



徐华平 女, 1977 年生于陕西渭南, 现为北京航空航天大学电子信息工程学院博士后, 主要从事高分辨率雷达成像、分布式小卫星 SAR 实现方法等方面的研究工作。

陈 杰 男, 1973 年生于河南郑州, 现为北京航空航天大学在站博士后, 主要研究方向: SAR 系统星地一体化任务分析与仿真、高分辨率星载 SAR 成像处理以及分布式星载干涉 SAR 系统设计与信号处理等。