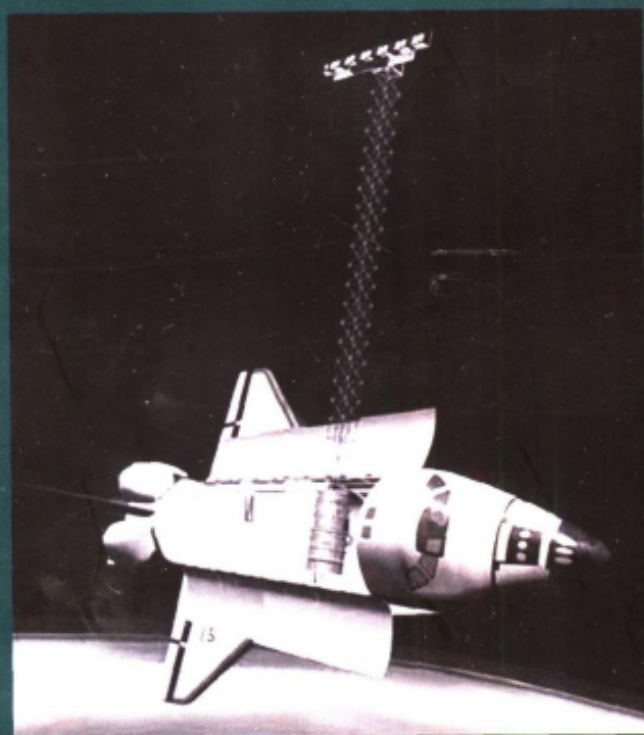


高等学校测绘类系列教材

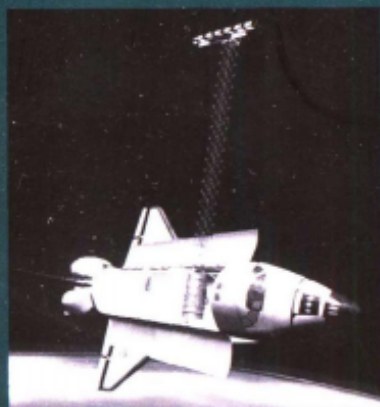
雷达影像干涉测量原理

舒宁 编著

武汉大学出版社



■ 责任编辑 / 王金龙 ■ 版式设计 / 支 笛
■ 责任校对 / 黄添生 ■ 封面设计 / 曾 兵



ISBN 7-307-03904-4



9 787307 039049 >

ISBN 7-307-03904-4/TP · 13
定价: 11.00元

TP
S68

高等学校测绘类系列教材

雷达影像干涉测量原理

舒 宁 编著

武汉大学出版社

内 容 提 要

雷达影像干涉测量是近年来微波遥感发展的一个重要方向,是国际遥感界的一个研究热点,已成为实施数字地球战略及地形测绘、地震火山监测、冰川地质调查、水文生态环境分析的重要手段。本书系统地介绍了雷达影像干涉测量的有关原理和方法,主要阐述了复型数据的配准、干涉图的生成、干涉图的处理、相位解缠、高程计算、数字高程模型的生成、雷达影像干涉测量在地形形变监测和提高影像分辨率方面的应用原理等,并详细说明了各有关领域对雷达干涉测量的应用需求和应用研究情况,还介绍了新近的研究成果。本书适用于有关专业高年级本科学生和研究生,也可以作为有关研究人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

雷达影像干涉测量原理/舒宁编著. —武汉:武汉大学出版社,2003.4

高等学校测绘类系列教材

ISBN 7-307-03904-4

I. 雷… II. 舒… III. 雷达图象—干涉测量法 IV. TP75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 000079 号

责任编辑:王金龙

责任校对:黄添生

版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:武汉理工大印刷厂

开本:787×1092 1/16 印张:6.5 字数:163千字

版次:2003年4月第1版 2003年4月第1次印刷

ISBN 7-307-03904-4/TP·133 定价:11.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 雷达、SAR 与 INSAR	1
第二节 欧洲的 FRINGE 和美国地学界的一次历史性会议	5
第三节 主要的研究小组和主要的软件	6
第四节 INSAR 的初步应用	7
第五节 INSAR 的未来	9
第六节 DEM 的获取技术与 INSAR	11
第二章 雷达干涉测量基本原理	13
第一节 一般原理	13
第二节 三种干涉测量方式和差分干涉测量	15
第三节 基线参数估计	20
第四节 INSAR 数据和处理流程	23
第三章 数据配准	26
第一节 数据预处理	26
第二节 控制点的自动搜索	29
第三节 重采样与配准质量评价	30
第四节 基于影像数据的高精度多级配准方案	32
第五节 基于结构信息的影像匹配方法	36
第四章 干涉图的生成和处理	40
第一节 干涉图的生成及其信息特点	40
第二节 干涉相位数据中的平地分量去除	45
第三节 简单的滤波方法和基于坡度估计的自适应滤波方法	48
第四节 基于梯度的自适应滤波和二级滤波法	50
第五章 相位解缠	53
第一节 确定性法	53
第二节 枝剪法	56
第三节 数值算法	58
第四节 加权解缠算法	59

第六章 高程计算的数学模型	62
第一节 相对于一个点的 INSAR 高程计算模型	62
第二节 相应于相邻点的 INSAR 高程计算数学模型	64
第三节 无需基线估计的高程计算方法	66
第七章 数字高程模型的生成	69
第一节 利用基于等效中心投影的构像方程	69
第二节 基于成像矢量关系和多普勒频率方程的构像方程	73
第三节 基于多普勒频率方程的定位方法	76
第四节 相邻点地距分析法	81
第八章 在地形形变和地物平面位置分析中的应用原理	84
第一节 地形形变量测原理的进一步分析	84
第二节 提高距离向分辨率的基本原理	85
第三节 距离向分辨率的提高——振幅均衡处理和典型实例	88
第四节 坡度估计、叠掩的识别和重复观测数据选择原则	90
第九章 INSAR 应用的需求与课题	93
第一节 冰雪监测与 INSAR	93
第二节 地形与地质构造和侵蚀	94
第三节 水文、生态环境和全球变化	95
第四节 火山观测和地震监测	97
参考文献	100

第一章 绪 论

近年来,人们已渐渐熟悉了 SAR(合成孔径雷达),开始研究讨论 SAR 影像的应用问题。而 INSAR (Interferometric SAR,雷达干涉测量)成为其中一个讨论的课题,虽然目前了解这方面的理论和方法的人并不多,但已有更多的人开始关注和重视这个课题,不少人已开始涉足这方面的研究和应用。

第一节 雷达、SAR 与 INSAR

战争,作为政治集团之间、国家之间矛盾和斗争的最高形式,是人类文明史的共生物,要写人类文明史就离不开写人类的战争史。人类希望没有战争,希望战争永不存在,人们诅咒战争,害怕战争,但有时又不得不拿起战争的武器为和平和自由而奋斗。人们同时还发现,战争这个怪物,居然还推动了科学与技术的发展,因为战争的需要高于一切,安全的需要高于一切,自由的需要高于一切,于是逼着人们以新的科学技术手段去制造新的武器,以赢得战争。

雷达就是在第二次世界大战中产生的新型装备之一。地面雷达用于搜索来犯目标以防御,飞机上、舰艇上的雷达则用于搜索目标以攻击。雷达搜索时可以在阴极射线管(CRT)上显示目标,后来为了成像显示,产生了 SLAR(侧视雷达),在 CRT 显示时可记录在胶片上,形成像片。SLAR 一般载于飞机上,形成图像。为了提高分辨率,人们发明了合成孔径雷达技术(SAR)。只需要短小的天线,就可以达到与原来长天线同样的效果,使影像具有更多细节,即空间分辨率得到提高,这里的关键技术就是相位史的记录与分析。雷达接收机所接收的信号不仅有回波强度信号,而且有时间信息,即脉冲发射到被目标反射返回接收机的时间,这一时间信息可以转化为距离信息,所谓雷达影像是距离投影成像就是这个意思。而距离又意味着可以演算出每一回波的相位,针对同一目标的若干回波相位所形成的相位史,是刻画细微目标极其重要的信号,这一信号的提取就为提高雷达影像的空间分辨率奠定了基础。

SAR 已有五十多年的历史。20 世纪 50 年代,美国军队开始装备 SAR,后来,美国航空航天局(NASA)和密执安环境研究所(ERIM)将 SAR 转化为民用。由于很短的天线就能获取高分辨率影像,SAR 才终于用到航天器上。最初的 SAR 应用在北美、巴西、哥伦比亚和巴拿马,并取得了很多成果,表明 SAR 获取信息的全天候、全天时特点,让红外和可见光摄影技术大为逊色。由于 SAR 对地面坡度、目标表面形态敏感,可以从坡度估计转而用于估计目标点高程,进一步拓宽了 SAR 的应用范围。随着 SAR 技术的发展,它广泛应用于水利、农业、海洋、地质和环境等方面的工作、工程中。干涉测量技术则是 SAR 应用中较晚出现的一个方向,或者说,一个新的应用领域。

对于同一目标的两个脉冲(如不同位置上两个天线接收的)回波,产生了两个相位信息,这之间的相位差异关系对于估计那个目标的三维坐标具有重要的意义,这就是雷达影像干涉测量技术的基础。可是这一技术最早不是应用在我们这个地球上,而是在火星和月球上。20

世纪 60 年代末, NASA 第一次采用 INSAR 技术对火星和月球表面进行了观测。1974 年 Graham 第一个将这一技术用于地球表面的地形制图。美国喷气推进实验室(JPL)在 INSAR 早期研究中做了许多工作。1985 年他们首次在公开出版的刊物中介绍了 INSAR 技术成果, 1986 年在旧金山海湾, 他们用机载的 INSAR 装置获得了高程精度达 $2 \sim 10\text{m}$ 的测量成果(Zebker 和 Goldstein)。他们在飞机的两侧各安放一个天线, 天线之间的距离为 11.1m (即基线), 由其中一个天线发射雷达波, 再由两个天线接收来自地面同一目标的回波, 得到可用于干涉测量的数据, 这种方法直到现在都被公认为是最好的方法。1978 年, 海洋卫星(SEASAT)发射之后, 由于美国军方的限制, 直到 20 世纪 80 年代后期才将数据交付民用, 这颗卫星原本作为海洋观测的工具, 也获取了一些陆地的数据, 是 JPL/NASA 第一次获得的卫星成像雷达数据。这颗卫星只工作了 100 天, 因为电路大量短路而停止工作, 但它仍推动了卫星雷达遥感的发展。Goldstein 等人利用相距三天的死谷棉球盆地(Cottonball Basin of Death Valley)的海洋卫星数据用干涉测量方法测出地面高程, 并将结果与该地域的地形图进行了比较, 结果表明吻合很好。Gabriel 和 Goldstein 还利用航天飞机成像雷达 SIR-B 在 1984 年 10 月重复轨道上的观测数据(两轨道交角为 1.2°)对加拿大境内落基山脉(Rocky Mountains)的地形进行了计算。Li 和 Goldstein 针对基线在干涉测量中的作用进行了研究分析, 发现不同基线($60 \sim 1\text{m}$)条件下的测量结果具有系统变化的规律, 具体表现为所生成的干涉条纹的系统性变化。

欧洲在 20 世纪 80 年代对干涉测量的研究也已有所开展。德国汉诺威大学摄影测量与工程测量学院还开展了水下声纳干涉测量的研究, 他们利用船体侧面安装的声纳装置(20kHz)进行海底地形测量, 采取的干涉测量方法原理与 INSAR 一样, 仅仅是所获信号的频率、信号处理、传感器目标、信号介质与 INSAR 不同, 这些研究工作为以后的 INSAR 的研究应用打下了基础。

1991 年 7 月, 欧洲空间局(ESA)发射了第一颗载有合成孔径雷达装置的卫星 ERS-1, 如图 1-1-1 所示。这颗卫星的重复观测周期为 3 天、35 天、168 天, 获取 C 波段数据, 是继海洋卫星之后的第一颗具有里程碑意义的商用雷达卫星, 它标志着微波遥感及应用一个高潮的到来。诸多国家的科学技术人员对这一星载 SAR 数据开展了研究和应用, 对其潜在应用价值和局限性进行了估计, 发表了许许多多的文章, 其中也包括了干涉测量的研究及未来 INSAR 技术发展的建议。ERS-1 只有一个天线, 只能依靠重复观测的数据作干涉测量。一些研究指出, 其中 50% 左右的重复观测均可作干涉测量(SOLAAS, 1994), 这预示着航天雷达干涉测量研究将有一个重大的发展。有人说, 当 ERS-1 升空时, INSAR 还是个孩子, 那么在以后的十年中, 它就迅速长大了。

1995 年 ERS-2(图 1-1-2)升空, 其轨道与 ERS-1 相近, 两颗卫星相对同一地区而言, 其观测时间仅相差一天, 被称为干涉测量的 Tandem 模式。两卫星的组合, 使 INSAR 的重复观测周期缩短, 不仅对雷达影像的应用, 而且对 INSAR 的研究和应用, 起到了极大的推动作用。

在雷达遥感应用的高潮时期, 日本于 1992 年发射了 JERS-1(图 1-1-3), 加拿大于 1995 年发射了 RADARSAT。人们利用其重复观测数据也进行了干涉测量尝试。美国利用航天飞机上所载成像雷达 SIR(Shuttle Imaging Radar)继 SIR-A(1981 年)和 SIR-B(1984 年)之后, 又进一步实施了 SIR-C/X-SAR 计划, 由 JPL 和德国航空研究中心 DLR、意大利航空航天局联合进行, 采用 C 波段和 X 波段(德、意提供)全极化雷达成像工作模式, 是一次成功的多频段、多极化雷达遥感。DLR 研究人员还利用其数据进行了干涉测量试验(Moreira, 1995)。NASA 在积极推进航天雷达遥感计划的同时, 在原来 AIRSAR(Aircraft SAR)的基础上, 又研制了 TOPSAR

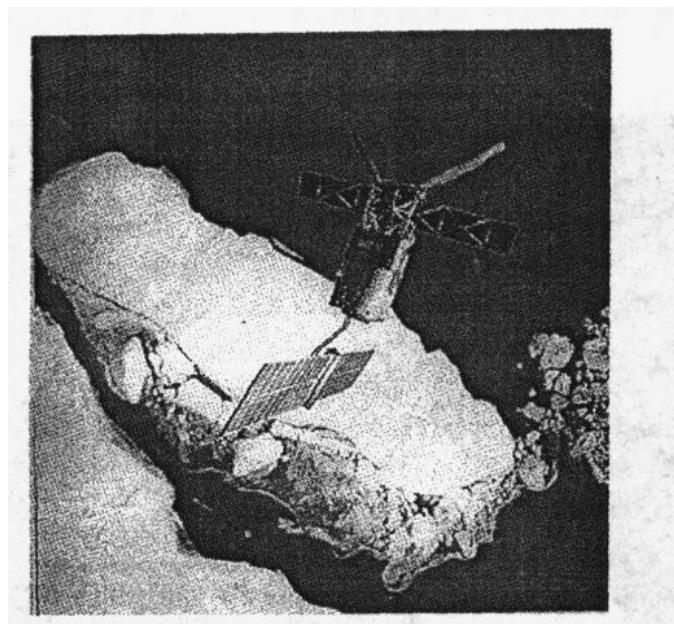


图 1-1-1 欧洲空间局(EESA)发射的第一颗载有合成孔径雷达装置的卫星 ERS-1

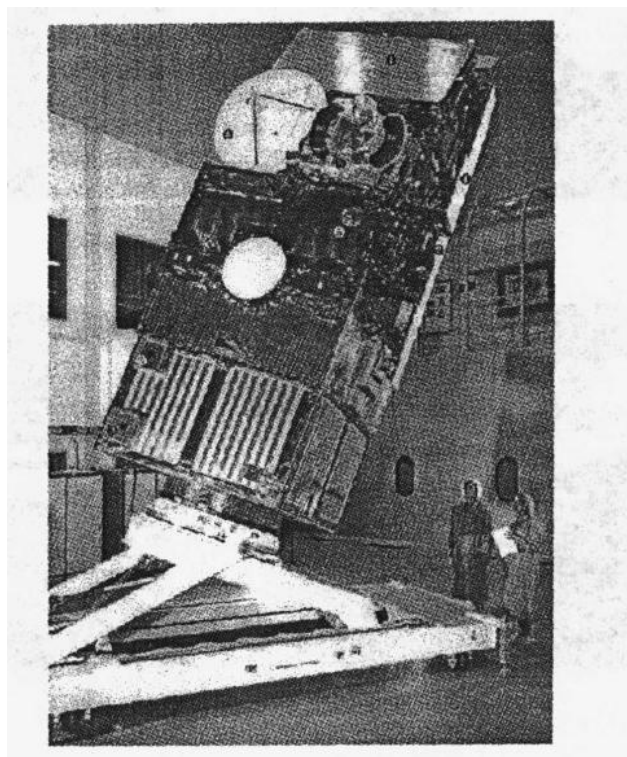


图 1-1-2 卫星 ERS-2

(Topographic SAR)。他们在 DC-8 型飞机(如图 1-1-4 所示)左侧垂直方向上安装了两个天线,基线为 2.6m,雷达工作波段为 C 波段(波长 6cm),并于 1994 年将 GPS/INS(全球定位系统/惯性导航系统)装载到这一飞机上,干涉测量的平地精度为 1m,山地精度为 3m,数据的水平分辨

率为5~10m。这一航空 INSAR 方案的目的是要在某些方面取代航空摄影,并为发展航天 INSAR 做准备。

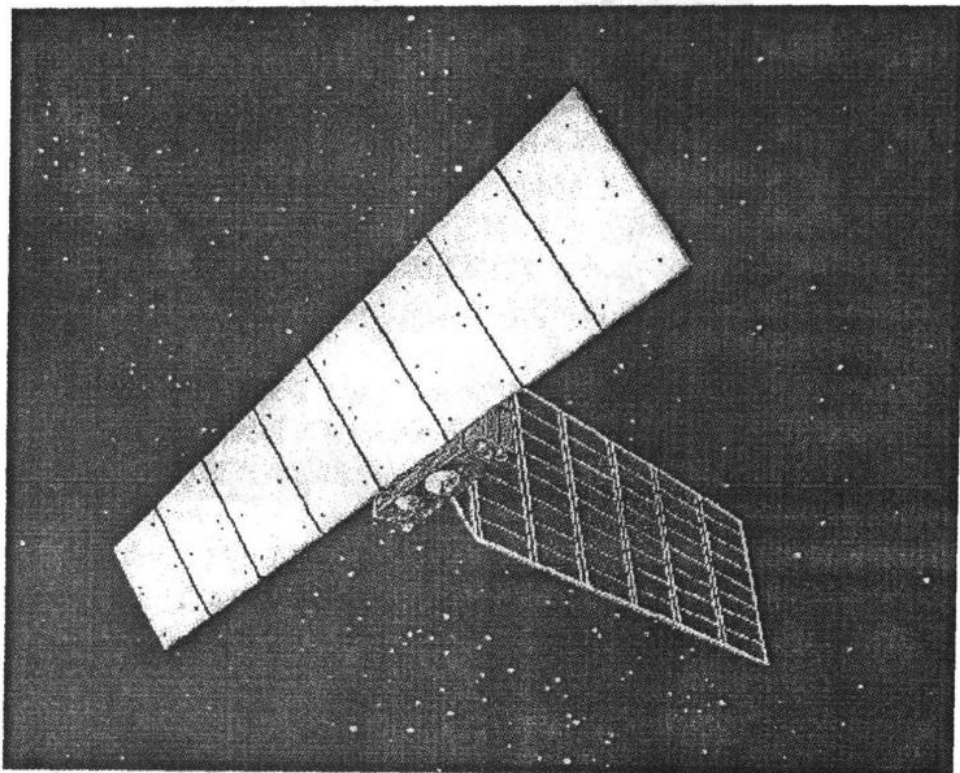


图 1-1-3 卫星 JERS-1



图 1-1-4 DC-8 型飞机

我国自 20 世纪 70 年代末研制出合成孔径雷达,后又研制出微波辐射计、高度计、散射计和微波扫描仪,在机载微波遥感、成像机理和应用研究方面做了大量的工作,雷达干涉测量的研究只是最近几年的事,在测绘、地质、环境监测等方面的应用研究也取得了进展,但与北美、欧洲国家相比,仍有很大的差距,因此需要加强 INSAR 的研究。

第二节 欧洲的 FRINGE 和美国地学界的一次历史性会议

ESA 在发射了雷达遥感卫星之后, 为了加强和促进欧洲各国 INSAR 研究和应用, 并推动 ERS-1 数据在全球范围内的干涉测量应用, 成立了一个专门的工作组, 称为 ERS-1 FRINGE, 这个工作组的负责人是 Steve Coulson。工作组设在意大利, 它为促进 INSAR 研究和应用, 做了很有意义的工作。

在 ERS-2 发射之后, 欧洲各国和美国等对 ERS 的 INSAR 应用十分活跃, 在此基础上, FRINGE 工作组于 1996 年 9 月 30 日至 10 月 2 日在瑞士的苏黎士召开了关于 ERS SAR 干涉测量应用的国际会议, 会议名为 FRINGE 96—ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry, 其论文集包括了 67 篇论文, 涉及 INSAR 技术在地震、冰川、森林、土地利用制图、湿地监测、地壳形变观测、矿区地面沉降监测等许多方面的应用研究。这次会议不仅对欧洲、美国, 而且对其他关注 INSAR 研究的国家和科学技术工作者都是一个极大的促进。

整个 20 世纪 90 年代都可以说是一个 INSAR 时代, 这一时期的研究成果、论文及其在世界主要相关杂志中的比重, 都表明一个 INSAR 研究高潮的出现, 而有些成果引起了相关领域科学家们的关注和思考, 以及对 INSAR 研究和应用的深入讨论。

1993 年, Goldstein 等人利用 ERS-1 相隔 6 天的数据作干涉测量处理, 量测出南极冰川的运动速度, 这是第一次用空中观测数据对冰川运动的量测, 没有依靠任何地面控制数据。同一年, Massonnet 等人利用 ERS-1 间隔数月的数据, 量测出地震等震线的位移变化。1994 年他们经研究指出 14 个月前后的变化也可以利用干涉测量方法进行监测, Zebker 等人甚至指出这一监测工作不需要已有地形数据的支持也能进行。1995 年 Massonnet 等人利用 INSAR 技术对埃特拉火山进行监测, 研究表明可以通过 INSAR 预测活火山的未来活动。所有这些研究都是鼓舞人心的, 表明与传统方法截然不同, 是研究地球表面的全新方法, 大大拓展了人们的监测工作能力, 是一个革命性的进步。这些进步引起了地学界极大地注意和认真地思考。

1994 年 2 月 3 日至 4 日在美国卡罗拉多州波尔得(Boulder), 来自美国各地代表了地球科学学科所有领域的 39 位科学家, 对雷达干涉测量问题进行了深入地讨论。他们分析了 INSAR 已有的应用领域和可以开拓的新领域, 分成 6 个专业组讨论了应用研究问题, 并提出相关的建议。这 6 个专业组是火山监测、地震和断层观测、山脉隆起和侵蚀调查、冰层和冰川监测、水文生态和环境监测及 INSAR 技术。这次会议在各方面的讨论和建议十分具体, 这些将在第九章中予以介绍。在这次会议上科学家们呼吁搜集已有的干涉雷达数据和地形数据以逐步积累为日后研究所必需的数据; 更多地研究因为时间差异所造成的去相关问题(Decorrelation), 以解决重复轨道观测和动态监测中因时间差异带来的数据处理的困难及制约一些领域利用 INSAR 进行变化监测的问题; 21 世纪有关 SAR 的探测计划应更加优化, 以使 INSAR 的观测更顺利, 具有更高的质量和更好的可靠性。在这次会议之后, 各个专业组又继续工作了一年, 详细讨论和制订了各专业方向上利用 INSAR 技术的计划。因此, 这次会议成为美国地学界有关 INSAR 的一次历史性会议, 对推动 INSAR 的应用研究和 INSAR 的技术发展, 推动地学领域工作方法的变革、全球雷达遥感和 INSAR 应用, 都将起到很好的作用。随着时间的推移, 这种作用将会逐渐显示出来。

欧洲的 FRINGE 工作组和美国的波尔得会议对 INSAR 的发展都是很重要的事件, 在 INSAR 发展的初期阶段, 它们的作用是不可低估的。

第三节 主要的研究小组和主要的软件

如果今天在《IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing》、《International Journal of Remote Sensing》、《Photogrammetry and Remote Sensing》等著名杂志上去数一数有关 INSAR 的文章,一定会感到这方面的研究是何等的火热。在《FRINGE 96》文集中,可以看到欧洲、北美主要国家在 INSAR 研究中的主导作用,了解这些国家的主要研究单位和主要研究小组,注意他们的研究动态,对于了解 INSAR 研究的前沿课题,掌握先进的方法和应用技术,应该是十分有益的。

在美国,大部分的研究都是在 JPL 实验室进行的,JPL 实验室实际上是 INSAR 研究应用的开拓者和先锋,其中,H. A. Zebker, R. M. Goldstein, A. K. Gabriel, S. N. Madsen 等人是 JPL 研究人员的主要代表,他们在机载和星载 SAR 干涉测量研究方面都作出了重要贡献。在加拿大,INSAR 研究主要在加拿大遥感中心(CCRS)进行。A. L. Gray, P. L. Farris-Manning, P. W. Vachon 等人是其主要代表。在1993年和1995年他们所发表的论文中,表明他们主要在机载 SAR 干涉测量方面做了大量研究工作。后来,加拿大发射了 Radarsat 卫星,他们又集中力量进行星载系统 INSAR 的研究。在欧洲,有几个主要的研究中心。在德国,是斯图加特的 PH. Hartl 研究小组。在意大利,是米兰的 C. Prati 和 F. Rocca 研究小组,那不勒斯的 S. Vetrella 研究小组。在瑞士,主要是苏黎士遥感实验室的 U. Wegmüller 等人。在法国,主要是图鲁兹空间研究中心(CNES)的 D. Massonnet, T. Rabante 等。在荷兰,则有国际航空测量和地学学院(ITC)的 D. van Halsema 等人,代尔夫特大学(Univ. of Delft)和 FEL-TNO 等研究单位。此外,欧洲一个重要的研究中心,即前述的 ESA FRINGE 工作组,其负责人为 S. Coulson (E-mail: coulson @ mail. esrin. esa. it)。

经过十余年的 INSAR 研究,现在已经有了很多用于 INSAR 的软件,它是研究的成果,也是进一步研究的工具。当然其中有的仅是教学版,在网上甚至可以下载。有的软件已开始商业化,有的著名遥感图像处理软件系统中,包括了新的 INSAR 模块,如 PCI、ERDAS 中,就可以利用其 INSAR 模块做应用研究工作。主要的 INSAR 软件还有 QUICK-LOOK, GEMSAR, GAMMA, ASF/STEP, ISAR 等。

加拿大 PCI 公司(<http://www.pci.ca>)在 PCI 软件系统中加了一个模块 IFSAR,具有 7 个方面的功能,从生成干涉图、相干图、数字高程模型到影像变形改正等。经过处理的 ERS 和 SIR-C/X-SAR 干涉图证明了该模块的可操作性。由于 PCI 本身是商业化软件,加了 IFSAR 模块后,功能拓展了,形成了 INSAR 商业化软件,促进了 INSAR 应用,也增加了公司的利润。

美国亚特兰大 ERDAS 公司也于 1997 年宣布可提供 INSAR 模块。Vecxel 的 INSAR 处理软件通过采用 JERS, ERS-1/2 和 RADARSAT 数据作干涉测量也取得成功。(<http://www.vecxel.com/prod-srv/ifsar.html>)

意大利米兰大学(Politecnico di Milano)研制的 QUICK-LOOK 主要为快速干涉测量处理而设计,在降低空间分辨率、减少计算复杂度的前提下很快生成干涉图,如在 UNIX 工作站上 100km × 100km 范围(即一景 ERS 数据)按 50m × 50m 分辨率,只要 10 分钟即可生成干涉图。

德国航空航天研究中心(DLR)研制了 GEMSAR (Global Elevation Model from SAR),其中包括了 SAR 影像处理、干涉图生成和数字高程模型(DEM)生成等,可用于不同传感器所获得

的 SAR 数据。

GAMMA ISP (Interferometric SAR Processor) 软件 (<http://www.primenet.com/~gamma>) 是苏黎士遥感实验室和美国 JPL 的科技工作者共同研制的力图商业化的软件,已成功用于 SEASAT, ERS-1/2, JERS, SIR-C, RADARSAT 的数据和航空 SAR 数据。ISP 的干涉测量功能包括了干涉测量处理的主要步骤,如基线估计、干涉影像的精确配准、干涉图生成、相关估计、相位平地成分去除、干涉图的自适应滤波、相位解缠、高程的精确估计和坡度图生成等,ISP 还包括了 SAR 影像处理,如滤波预处理、距离向压缩、自动聚焦、方位向压缩和多视处理等。

美国阿拉斯加大学地球物理研究所 ASF (Alaska SAR Facility) 根据科技教育计划 STEP (Science Technology and Education Program) 研制了许多 SAR 数据分析工具,如定标、校正、镶嵌等,其干涉测量软件模块是一个完整的 INSAR 软件,包括了全部 INSAR 环节,甚至还有生成 DEM 后的地学编码处理等。ASF/STEP 的 INSAR 软件还提供原代码 (<http://www.images.alaska.edu/STEP.htm>)。

按照与 ESA 签订的合同,由米兰大学研制的 ISAR 软件主要为提供给 FRINGE 工作组开展研究工作而设计,以 ERS-1/2 数据作为其数据处理的主要对象,ISAR 不包括解缠部分,只生成干涉图,用户可在此基础上作进一步的开发应用。

第四节 INSAR 的初步应用

20 世纪 90 年代 INSAR 得到了空前发展,人们除了研究 INSAR 技术本身的问题外,还将 INSAR 广泛地加以应用,许多文章介绍了其各方面应用的情况,分析了应用中的问题,探讨了进一步拓展其应用的可能。

地形图测绘是 INSAR 的一个主要应用领域,1974 年 Graham 引入 INSAR 技术时首先就是在测图方面的应用。在开展 INSAR 研究的初期,几乎都是与地形图测绘有关,从航空 INSAR 到航天 INSAR,人们的研究不断深入。1993 年 Madsen 等人对飞机上天线的运动补偿问题进行了深入研究,提出了相关的处理技术方法,以提高通过 INSAR 制图的精度。在 Walnut Gulch 试验区获得相对平坦地区的精度为 2.2m,山地的精度为 5m 左右。他们指出,在利用 GPS 和 INS(惯导系统)之后,确定飞机位置的精度可以达到 10m ~ 20m,确定姿态的精度可以达到 $0.01^\circ \sim 0.02^\circ$,进行测图的高程误差可以小于 $\pm 2\text{m}$ 。

1994 年 Zebker 等人分析了利用 ERS-1 数据测制地形图的问题,指出高程误差主要来自相位估计误差和基线估计误差两个方面的影响。利用 ERS-1 进行干涉测量的制图相对误差可以小于 $\pm 5\text{m}$ 。De Fajio 和 Vinelli 指出,要很好地进行相位解缠必须利用控制点数据。

传统的测图方法需要飞机飞行两次以形成雷达立体影像,费时、耗财,且数据处理也十分复杂,而 INSAR 则可由飞机上两个天线在一次飞行中完成。因此,美国和欧洲许多国家如德、英、荷、丹等国纷纷研制机载 INSAR 系统。

坡度估计是一个重要方面,INSAR 数据本身就是与地表面坡度相关的,不一定要在整个 INSAR 计算全部完成之后再作坡度估计,而可在完成某些环节的计算之后进行。1992 年 Werner 等人做了坡度估计方面的研究工作,他们直接利用干涉图计算相位梯度,在基线参数已知的情况下,对地表面坡度进行了估算。1993 年 Wegmüller 等人不经相位解缠也将地面坡度数据解算出来,其估算相对误差低于 1%。

在计算出坡度数据后,可以估算出地面局部入射角,这对于 SAR 数据的目标解译是十分

重要的。坡度数据还可以用于 SAR 后向散射系数的规范化计算、干涉测量相关结果的优化或校正,对地貌研究、土壤侵蚀分析、流域水文分析等地学分析应用都是有价值的。

变化监测是 INSAR 应用的一个最重要的方面,1992 年 ESA-ESRIN、斯图加特大学和米兰大学的联合研究项目的完成第一次证实了 INSAR 在变化监测方面的适宜性,试验区设在波恩,两个预先布设的角反射器经 ERS-1 重复观测发现高度变化了 1cm,并表明可以探测几毫米的变化。

Werner 等指出,通过干涉测量过程中相位去相关或者由于地表面均衡运动造成的相干相位位移都可以对地表面变化作出估计。

在荷兰进行地面沉降监测是一个很有必要的课题,1995 年 Van Halsema 等利用 ERS-1 SAR 数据进行了深入研究,试验表明有 5mm ~ 10mm 的变化。他们发现了相位变化与土壤类型的相关关系,沿海岸沙质土壤的相位值较大,而淤泥却相对显得“上升”了。由于两次观测时的温度分别是 -2.4°C 和 $+4.6^{\circ}\text{C}$,霜冻和含水量引起了地表面探测数据的变化,霜冻的土地表面要稍高出含水量少的土地,含水量不同的泥地在干涉图中表现了出来,事实上含水量不同即复介电常数不同,就会导致雷达穿透能力的不同,在霜冻土地中的穿透力要强,如果这种现象显著就会导致相位失相关。

利用 INSAR 数据可以对土地利用类型分类工作提供有益的信息。1993 年 Askne 和 Hagberg 对此做了研究,他们利用瑞典北部的 ERS-1 数据所计算出的相干图(coherence map)进行了试验,发现基线越长,对地表微小运动和变化越敏感,利用相干图可以区分林地和开阔地。此外,他们还指出了风和雪的融化对相干图的影响。1995 年 Wegmüller 也指出干涉测量中的相关数据(Interferometric Correlation)与后向散射目标是相对独立的两个量,包含了目标类别属性的补充信息。

1987 年 Goldstein 和 Zebker 利用装载在 NASA CV990 型飞机上的 L 波段雷达干涉测量数据进行了洋流量测试,在改正航偏误差和飞行运动改正之后,相位差数据即可用于探测风力、海潮、内波或船舶尾浪等形成的洋面变化,当然,各种洋面运动类型还不能区分开来。

INSAR 对于极地冰川运动和陆地边缘的探测是一个重要的工具。1993 年 Goldstein 等人利用 INSAR 数据对南极冰川进行分析,对垂直方向的运动可探测到 1.5mm 的变化,在水平方向则为 4mm;海岸线的估算精度大约为 500m。Hartl 等人于 1994 年利用差分干涉测量技术量测了冰架上的运动变化,其结果为 5cm,与所预计的相当。

利用 INSAR 技术观测地震十分成功的例子是 1992 年美国加州兰德斯地震时的干涉测量结果,由于地震破坏的不同程度和对地表面不同震动的影响,应用 INSAR 技术得到的等震线具体表现为地形图等高线的变化,Massonnet 等将 ERS-1 数据和地形数据相结合得到干涉图,与地面观测结果吻合。地面观测由布设的 GPS 网的连续观测来进行,INSAR 技术观测结果与之比较,表明误差小于 $\pm 4\text{cm}$ 。根据在断层地区量测的地表变化和地震实况图建立起来的弹性错位模型在干涉条纹图上大部分都得到了反映,Zebker 等指出,在利用地形数据(通常是 DEM)的过程中,DEM 本身的误差、DEM 与 SAR 数据的配准、该地区是否有较好的 DEM 数据都是必须要考虑的重要问题。

火山活动研究关系到灾害预测、防灾准备工作、灾害程度估计等,由于 INSAR 技术可以用于动态地表形变监测,可以进行大范围的连续观测,这为火山活动研究提供了一个非常好的工具。Evans 等人对 1991 年 7 月冰岛 Hecla 火山的机载 TOPSAR 数据进行了研究,表明 INSAR 可用于估计火山地貌变化和因岩浆、火山灰造成的毁坏情况等。由于机载 SAR 数据空间分辨

率高(10m),INSAR 分析的垂直方向精度可达 1m~5m。1993 年 Mougini-Mark 和 Garbeil 观测到意大利 Somma 火山口边缘及火山口内侧深度地貌,这在常规地形图上是从来没有过的。INSAR 数据还被用来估计岩浆流的厚度与宽度等。活火山的现场观测对于观测人员和仪器设备都是十分危险的,而且观测点有限,而利用 INSAR 技术则不再存在这些问题。由于 ERS 地面接收站有限,世界上有的地区的活火山观测如中非、巴布亚新几内亚等无法获得 SAR 数据,随着后来 JERS-1 和 RADARSAT 的升空,这些地区的数据获取问题可以通过磁带记录加以解决。

INSAR 应用研究目前是一个十分活跃的领域,应用中遇到的问题如重复观测频率、电离层和水蒸气干扰所致误差等都要求科学技术人员进行更深入的研究,以保证更好的应用效果。

第五节 INSAR 的未来

航天 INSAR 应用中遇到的主要问题是去相关、基线估计等,而这些问题对于航空 INSAR 来说是不存在的。飞机上装载两个天线,其基线已知,而两天线所接收的同一目标信息的时差几乎为零,去相关的问题就不存在了。当然,航空 INSAR 也有缺点,那就是平台的稳定性问题和运动补偿问题等。

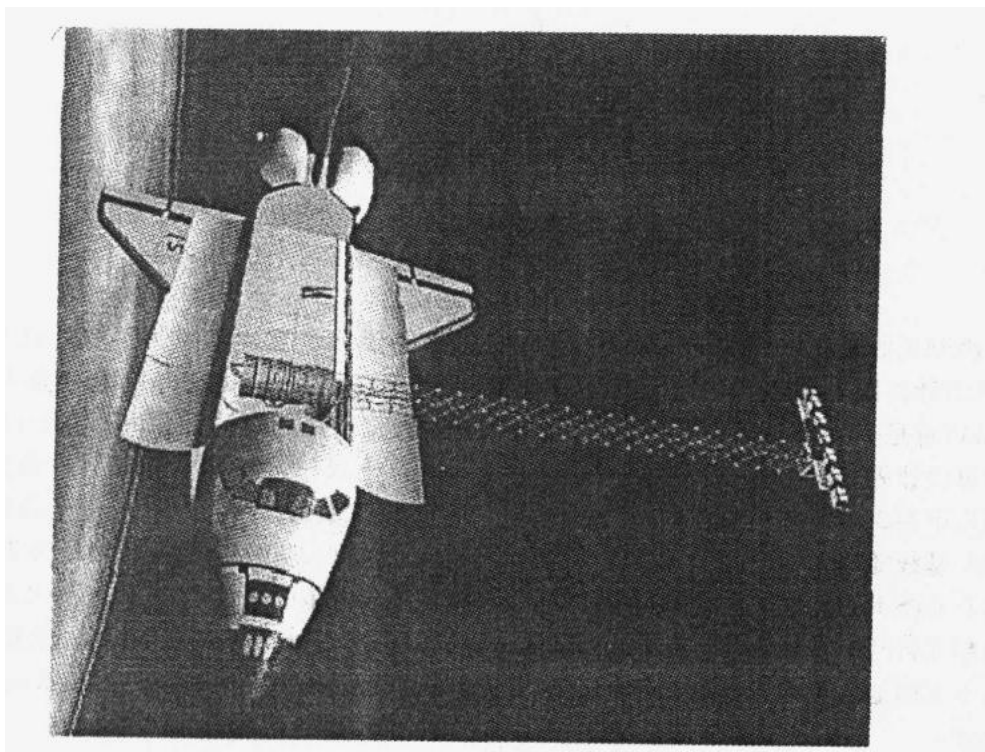


图 1-5-1 第一颗真正的 INSAR 卫星——SRTM

在 ERS-1 升空后,航天 INSAR 开始发展起来,ERS-2 上天后,更加促进了 INSAR 的发展。单星重复轨道观测时间周期较长,ERS-1/2 双星就被认为是一个很好的方案而倍受青睐,但两星轨道之间仍有差异,并不能作为 INSAR 的最佳轨道方案。INSAR 专家们认为这两颗星还没

有为 INSAR 很好地考虑到轨道设计问题。ERS-1 虽然可作 INSAR 平台,但它不是专为 INSAR 而设计的。SIR-C 1994 年的两次飞行(4 月和 10 月),由于在控制轨道方面作了不少努力,得到了很多 INSAR 数据,而且可以对比试验 X、C、L 3 个波段的数据在获取 DEM 和变化监测方面的作用,但当时仍是重复观测方案。RADARSAT 数据对 INSAR 是一个重要的补充,但它也不是专门用于 INSAR 的卫星。由于重复观测仅限于短时间间隔,对沙漠、干旱地区有效,在天气条件变化时去相关问题严重,不利于 INSAR 应用,而各国 INSAR 的研究和应用的热潮一浪高过一浪,对于专用于 INSAR 的航天计划呼声日高,SRTM(Shuttle Radar Topography Mapper)计划终于问世。美、德、意联手,利用美国航天飞机,装载两个天线,其间隔为 60m,载有 GPS 接收机,在 200km 的高空第一次实现了专门的 INSAR 航天计划。SRTM 于 2000 年 2 月成功地获取了覆盖地球陆地绝大部分的 INSAR 数据,一次性获取全球 DEM,极大地鼓舞了全球科学技术人员。SRTM 是第一颗真正的 INSAR 卫星,如图 1-5-1 所示。这在 INSAR 发展的历史上是又一个极其重要的里程碑,它是数字地球计划的一个非常重要的步骤。SRTM 获取 INSAR 数据的方式如图 1-5-2 所示。

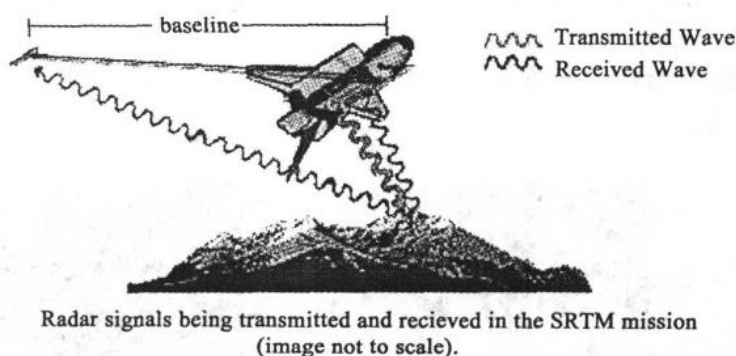


图 1-5-2 SRTM 获取 INSAR 数据的方式

INSAR 的未来一片光明。新的 TOPSAT 卫星计划已在孕育之中。JPL 已为提出的 TOPSAT 计划做了许多准备工作,包括在机载 TOPSAR 上的预演试验,如 GPS-INS 导航定位。TOPSAT 将是一个双星系统,但不同于 ERS-1/2,两颗星不是间隔一天,而是只相隔 1km,预计其轨道设计将更加优化。TOPSAT 将有多波束激光测高仪作为补充,卫星设计寿命为 3 年,两颗卫星可在 3 个月内获取南纬 70°到北纬 70°的 INSAR 数据。两极地区由激光测高仪补测,INSAR 基线随纬度不同而异,在赤道为 2km,随着纬度增大,基线逐渐减小,最小为 700m,星上将载有 GPS-INS 导航定位和姿态定向系统,以精确确定卫星的位置、姿态和 INSAR 基线。GPS 定位精度将是 10cm,INSAR 数据的精度将达到平面精度 30m,高程精度 2~5m,激光测高仪在起伏不大的地区预计可达到 1m 精度,计划选择某些地区由激光测高仪量测植被高度和地表粗糙度。

TOPSAT 的未来计划准备将 INSAR 数据获取范围扩展到南纬 82°到北纬 82°。

TOPSAT 的设计和不久将来的升空运行,是 INSAR 发展历程中的又一个重大事件,对全球环境、资源、经济社会可持续发展,灾害预报、防治和监测都将具有重要的意义。

第六节 DEM 的获取技术与 INSAR

对地表面形态的研究,即地形、地貌的研究,是一个最基础、最重要的研究,而获得高质量的 DEM 就成为其关键。DEM 不仅关系到地形图的绘制,而且与环境监测、资源调查、灾害防治、经济建设等方面都有着极其重要的关系。如水土保持必须掌握坡度数据,排灌系统的建立需要了解地表地势情况,导航安全首先要掌握地形情况,防洪调度必须以 DEM 为基础,公路选线需要研究地形地貌,地震研究必须建立地表面运动的数据库,冰川监测需要掌握冰川变化的动态数据等,不一而足。既然是各方面工作的基础,就应掌握获取 DEM 的方法和技术,对 DEM 获取技术有一个全面的了解。

地面测量是传统的工作方式,是获取 DEM 的最精确的方法,通常利用一些测量仪器进行,现在多以全站仪为量测工具。大比例尺测图和局部工程项目的实施,均采用地面测量方式。这种工作方式的缺点是在环境、地形复杂的情况下,由于通视条件差,而造成工作量大、成本高等问题。

除了地面测量以外,利用航空、航天遥感技术获取 DEM 的方法包括了摄影测量、激光扫描和雷达成像。摄影测量也属于经典工作方式,需要少量地面控制量测数据,利用摄影测量仪器(目前多是用解析测图仪)即可获取大面积 DEM,采用数字自动测图软件则是摄影测量技术的现代化工作方式。除了航空摄影测量外,航天摄影测量的数据获取手段也日臻完善。俄国 KFA1000、KWR1000 相机可以从航天器上摄取高分辨率相片,美国航天飞机上采用德国的量测摄影机 MC 和 NASA 的大焦距相机 LFC,我国返回式卫星上的宽幅相机都获得了高质量的相片。利用卫星上 CCD 线阵扫描仪在相邻轨道或沿轨道获取同一地区的两景或多景影像,也为获取 DEM 提供了有效的手段。特别是沿轨道两个或三个 CCD 线阵通过不同观测角度(前倾、铅直、后倾)的扫描是获取立体影像的最佳手段。

激光扫描成像(Laser Profiling)是新近发展起来的一项技术,在飞机下方安装激光测距仪器,在飞行中沿垂直飞行方向扫视成像,激光被地物反射由测距仪接收后,既有强度信息可供成像,又有时间信息可供计算距离,由此计算出地面各点的高程,这一方法必须以精确确定飞机的瞬时位置和姿态为前提,利用 GPS/INS 是可以做到的。激光扫描方式最适合于城市,因为高楼大厦和建筑群的高度量测对于摄影测量方式是比较困难的,而激光扫描十分便捷。我国已开始了这方面的研究。

通过雷达遥感获取 DEM 有 3 种方式:雷达立体影像测图、雷达影像阴影—形状的坡度估计方法和雷达干涉测量。

雷达立体影像测图是延续摄影测量方法的一种工作方式,因为雷达影像是以侧视距离成像,其立体影像以同向侧视成像为宜,采用这种方式的并不多。利用 Apollo-17 成像雷达和 SIR-B 影像的立体量测试验是其中成功的例子。由于数据质量好,达到了 10~100m 的精度。

仅用单幅雷达影像,根据信号与地面坡度的关系,对地面各部分坡度进行估算,从而计算高程,被称为 shape-from-shading 方法,其困难在于建立信号与坡度关系的模型,因为有许多不可预计的因素,如植被覆盖、地表面粗糙度、影像非均匀表面纹理等,计算时需要满足边界条件或地面信号一般为低频,即地面起伏不大。加拿大遥感中心利用 SEASAT 数据计算出的数字地面模型精度达到 22m,而在一般情况下是比较困难的。

雷达干涉测量相比其他两种利用 SAR 数据获取 DEM 的手段具有更高的精度,也是研究