

航天雷达遥感的作用与发展

郭华东

(中国科学院遥感应用研究所)

摘 要

本文论述了迄今为止唯一获得地球表面航天雷达图像的 Seasat SAR、SIR-A 及 SIR-B 三颗成像雷达系统在地球科学研究中的作用,对未来十年以 ALMAZ SAR、ERS-1 SAR、JERS-1 SAR、SIR-C、Radarsat SAR 和 EOS SAR 为主的国际性主动微波遥感系统进行分析,指出研究过程中新的概念和趋势,展望了 90 年代航天雷达遥感技术发展及应用的前景。

关键词 成像雷达 遥感卫星 航天飞机 地球科学

一、前 言

把地球作为一个整体研究的时候,遇到了如下困难:地球陆地表面 65% 的面积,分别被 45% 的植被、10% 的干沙及 10% 的积雪冰川覆盖。但研究全球地质,包括大陆岩石单元的展布,大陆地形地貌特征,大地构造格局并由此推断地壳成分、成矿潜力及地质演化,则必须探测分析其下伏的基岩性质。同时,占陆地面积 45% 的植被是人类赖以生存的主要资源之一,了解全球植被分布、植被性质及自然和社会造成的动态演变已愈加重要。而这些植被更多地分布在热带亚热带地区。占地球表面 60% 面积的海洋,是人类重要的资源宝库,海洋表面状况,海浪运动形式,极地冰盖的性质、展布和动态变化等,等待着深层次的研究。这些构成地球研究要素的许许多多涉及到全球地质、再生资源、自然灾害,海洋调查的课题,期盼着新的、对以上困难具有解决能力的探测技术的出现。

合成孔径侧视成像雷达,装载在航天平台上构成的航天雷达遥感系统,已成为宏观地球科学探测中重要的、及至特殊情况下唯一有效的探测工具。它具有全天候、全气候,一定的穿透能力,而这些是可见光、红外遥感难以做到的,同时具有机载雷达所不及的星载雷达遥感特点。90 年代,航天雷达遥感已呈现令人瞩目的发展趋势。本文从航天雷达遥感系统与地球科学关系的角度,论述其技术及应用进展。

二、航天雷达对地球科学的贡献

1978 年 6 月,首次用于探测地球表面的海洋卫星合成孔径雷达升空,这部 L 波段 HH 极化、具有 25 米方位及距离分辨力的雷达系统,虽然仅运行 100 天,但取得了海洋及陆地的丰富的图像信息。1981 年 11 月,装载在航天飞机哥伦比亚号上的成像雷达 1 号 (SIR-A) 进行了成像飞行。SIR-A 同样是一部 L 波段 HH 极化合成孔径雷达,获取了地球表面 1000 万平方公里的雷达图像,其自然景观的变化包括从亚马逊河和印度尼西亚的热带

雨林到北非和沙特阿拉伯的干旱沙漠地带,中国从东至西也成像 3 个条带。在 SIR-A 系统基础上发展起来的 SIR-B 于 1984 年 10 月进入太空。SIR-B 计划有 12 个国家的科学家参与,其研究内容繁多,包括以探测前寒武纪结晶基底到海面状况,从寻找地下水到监测瘴气延伸范围,从寻找消失的古城到识别油沫等 43 个研究课题^[1]。其系统参数比 Seasat SAR 和 SIR-A 有了重要变化和提高。显著特点是视角的变化,其不再为一固定角度,而是在 15° — 60° 之间变化。随着视角的改变,SIR-B 的距离分辨力、覆盖宽度、信噪比及动态范围全部随之变化,距离分辨力得到成倍的提高。SIR-B 运行中由于天线的故障,未能按计划全部成像。尽管如此,它仍获取了地球表面 600 万平方公里的雷达图像^[2]。

Seasat SAR、SIR-A 及 SIR-B 是迄今为止对地球表面探测的三颗航天雷达系统(见表 1)。它们的上天,为地球科学研究注入了生机,在地质、水文、海洋、植被等诸方面研究中取得重要的成果。本文择要叙述。

表 1 三颗航天成像雷达系统参数
Table 1 Characteristics of Three Spaceborne Imaging Radar

参 数	SEASAT-SAR	SIR-A	SIR-B
飞行高度	800km	260km	352,274.225km
频 率	1.28GHz	1.28GHz	1.28GHz
波 长	23.5cm	23.5cm	23.5cm
极 化	HH	HH	HH
视 角	20°	47°	15° — 60°
成像宽度	100km	50km	20—50km
天线尺寸(m)	10.7×2.16	9.4×2.16	10.7×2.16
带 宽	19MHz	6MHz	12MHz
方位分辨力	25m	40m	14×46 m
距离分辨力	25m	40m	20—30m
数据处理方式	数字	光学	数字、光学

1. 陆地地表调查

在干旱、基岩裸露地区,航天成像雷达可直接识别岩性、构造。利用 SIR-A 图像,笔者对新疆柯坪山地区进行了地质分析,解译出 6 种地质单元,分别为奥陶系、志留系及泥盆系、二迭系、冲积洪积扇、盐湖相沉积及表面平滑的第四系。即不仅可将地层区分到系,而且可将第四系细分成 3 个亚类。这其中,地面粗糙度的影响起了重要作用,利用瑞利判据可定量划分第四系亚类边界。在内蒙古吉兰泰地区,我们通过对 SIR-A、SIR-B 图像的分析^[3],发现了先前未知的大型走滑断层,酸性花岗岩基中的基性岩脉在图像上历历在目,更有意义的是,由于其较高的介电常数值而引起的强回波及特征地质背景,一个长达 10 数公里的含金构造蚀变带已被识别出来,采样分析结果部分样品已达工业品位^[4,5]。著名的美国西部圣德安烈斯大断裂中段一直不易定位。用机载光学遥感图像,Ka 波段雷达图像及天空实验室照片均不能分析出它的确切位置。Seasat SAR 问世后,对这个问题迎刃而解。其机制在于根据瑞利准则,断裂两侧的粗糙度不同,在 L 波段雷达图像上清楚显

示。在南美的安第斯山脉,用 SIR-B 图像发现了大片的熔结凝灰岩带,改变了地质学家们对区域性火山活动时代的看法。

在热带亚热带雨林区,由于植被覆盖及云雾的影响,用其它遥感波段难以获得理想的图像,航天雷达在这些区域显示出更大的优越性。用 Seasat SAR 在牙买加的研究表明,它能唯一提供构造与岩性的信息。用 SIR-A 作为主要工具,对印尼进行了大面积的区域地质调查。在马来西亚,受茂密的雨林的制约,传统地质图只反映出河边、沟渠两岸的地质内容,用 SIR-B 图像对地质图作了大量补充,解译出具有意义的系统背斜等地质构造。在婆罗洲及苏门答腊,10 年间仅获取小部分可用的陆地卫星图像,SIR-B 成像后提供了十分有用的信息。在澳大利亚北部,用 SIR-B 图像研究了树林覆盖下的铝土矿产地质。

在孟加拉,通过航天雷达图像的分析,不仅圈定了树丛掩盖下洪水分布范围,而且根据树林异常回波划分出造成疟疾的蚊子繁殖区域。在亚马逊河森林区,用 SIR-B 资料可以精确地确定了砍伐区范围,而用地面调查方法却十分困难。用 Seasat SAR、SIR-A 和 SIR-B 对土壤湿度的研究表明:一立方厘米土壤中水分若增加 0.1 克,雷达回波将增加 2.3 分贝。

2. 雷达穿透性——次地表地质特征调查

航天雷达对地球科学的贡献之一是证明了雷达穿透性的存在。位于埃及及苏丹边境的撒哈拉沙漠是世界上最干旱的地区。美国地质调查局的专家们曾用 Landsat 图像在该区进行了 4 年的研究,发现的仅是广泛分布的平坦的小沙原。当解译新获取的 SIR-A 图像时,他们发现了纵横交错的河床、沟渠及支流广泛存在。显然,雷达穿透了干沙层,野外研究也证明了这一点。SIR-B 图像再一次证实了古河网的存在,并又发现了新的河网。McCauley 等人分析了新生代以来该地区复杂的河流演变史,建立了水网演变模型。他们认为,新发现的这条河流曾是横穿非洲大陆的主要水系,它发源于红海山脉,向西在古尼日尔河三角洲注入大西洋,是类似于现代尼罗河规模大小的一条干流。同时,还在该地区发现了距今约 25 万年的旧石器工具。加州大学的研究者用 Seasat SAR 对莫哈维沙漠的分析,发现了被冲积扇埋藏的岩墙。参加 SIR-B 研究计划的中东小组,分析了 SIR-B 对沙特阿拉伯干旱地区的穿透能力。JPL 的研究人员与 SIR-B 飞行进行同步实验,表明他们掩埋在内华达地区沙层下 2 米的雷达响应器,对 SIR-B 脉冲有尖锐的响应。用 SIR-A 对我国内蒙地区的研究发现,雷达穿透了干沙层,揭露了其下岩体的存在。

3. 海洋调查

海洋学研究是地球科学研究中的薄弱环节之一,原因在于其面积的广阔性,特点的复杂性及不易接近的程度,成像雷达系统是探测海洋的有力工具。为此,第一颗星载雷达的目的便是为海洋调查设置的^[4]。

用航天雷达成功地监测了研究区内中小型海洋波浪,特别是观察到了海洋内波,这种大规模的海洋运动,用常规手段极难调查。诸如安达曼海的内波、纽约长岛附近的内波,均清楚地暴露在雷达图像上。由于海冰与海水物理性质的差异,雷达是识别海冰的十分

有用的传感器, SIR-B 试验时,近南极海面的大量海冰、冰山被成像。在日本海海面上,日本科学家撒下的 2.5 平方公里的油膜,用航天雷达精确地探测到其分布范围。

有意义的成果之一是台风发生区海况监测。1984 年 10 月 12 日,当 SIR-B 飞越美国东海岸上空时,正遇上约瑟夫号台风,此时风速为 90 海里,厚厚的云层覆盖着海面。同时成像的卫星图像完整地反映出这个台风系统,而由宇航员同步摄影获得的照片更清楚地显现出由台风引起的巨厚的云层,台风漩涡及台风眼。SIR-B 获得台风区 600 平方公里的图像,穿透了巨厚的云层,揭示了台风下海面上至少有 2 个波浪系统。它充分显示了成像雷达进行海况及灾害调查的无可比拟的能力。

三、90 年代的航天雷达遥感

三颗航天雷达在地球科学探测中显示出了杰出成就,使得各国竞相研制发展航天雷达系统。未来 10 年,欧洲空间局、日本、加拿大、美国等国家与组织将先后发射苏联,金刚石卫星 SAR、欧洲地球资源卫星 1 号 (ERS-1) SAR、日本地球资源卫星 1 号 (JERS-1) SAR、航天飞机成像雷达 3 号 (SIR-C)、雷达卫星 (Radarsat) SAR 及地球观测系统 (EOS) SAR,形成航天雷达遥感的崭新局面。笔者以表 2 的形式,对其系统参数进行了归纳。从某种意义上讲,90 年代将是雷达遥感的时代。

1. SIR-C 计划

SIR-C 是航天飞机雷达遥感计划的最后一步,是一关键的系统。将在这部雷达的基础上,直接发展成为 EOS SAR 系统,省去了计划中的 SIR-D 的研制。

表 2 计划发射的航天成像雷达系统
Table 2 Spaceborne Imaging Radar Systems Lunched in 1990'

参数 \ 系统	ALMAZ SAR	ERS-1 SAR	JERS-1 SAR	SIR-C	RADARSAT SAR	EOS-SAR
发射日期	1991.3	1991.4	1992.2	1992	1994	1998 年后
发射国家(组织)	苏联	欧洲空间局	日本	美国	加拿大	美国
工作期	—	3 年	2 年	—	5 年	10 年以上
轨道高度(千米)	300	675	568	225	789	824
波段	S	C	L	L, C, X	C	L,C,X
极化	HH	HH	HH	HH (L,C) VV(L,C,X) VH(L,C) HV(L,C)	HH	HH(L,C,X) VV(L,C,X) VH(L,C) HV(L,C)
入射角	30°—60°	23°	35°	15°—55°	20°—59°	15°—60°
分辨力(米)	15×30	25×25	18×18	30×(60—10)	28×15	<30
成像宽度(千米)	2×350	100	75	15—90	100—500	33—100

SIR-C 是一部复杂的系统。实际上由 4 部独立的雷达构成,即 L 波段水平极化雷达, L 波段垂直极化雷达, C 波段水平极化雷达及 C 波段垂直极化雷达。同时,德国研制的 X

波段 VV 极化雷达系统将与之组装在一起,这样形成了 9 个成像通道^[7]。

与其它系统比较,它有 3 个显著特点:(1)是运行在地球轨道高度的第一部多波段同时成像雷达;(2)是地球轨道高度第一部高分辨力 4 种极化同时成像雷达;(3)是第一部在 2 个不同季节成像的多参数成像雷达。它的应用同样包含地质、水文、植被、冰川、海洋 5 个领域^[8]。

2. ERS-1 SAR 计划

经过长期的试验研究后,欧洲空间局推出的 ERS-1 SAR 计划于 1991 年度发射。该雷达系统为 C 波段、HH 极化,具有 25×25 米的分辨力,成像宽度为 100 公里,入射角设计为 23° 。这个角度与海洋卫星 SAR 比较接近,这与它探测的主要目标是海洋有关。它包括海洋环境监测,海洋天气预报,洋流、海冰等,同时,也对极地地区及陆地成像^[9]。

3. JERS-1 SAR 计划

携带合成孔径雷达的 JERS-1 将于 1992 年 2 月发射升空。工作寿命为两年。

JERS-1 SAR 是一部 L 波段 HH 极化雷达,具有 18×18 米的方位及距离分辨力,成像宽度为 75 公里。卫星 1 天绕地球运行 15 圈,44 天可覆盖全球一次。数据可在星体上由高密度磁带机记录,然后在地面处理。除北极及南极的部分地区外,可获取全球的雷达数据。执行数据处理任务的日本地球观测中心将向用户提供每景范围 75×75 公里的 1600/6250bpi 磁带或 24 厘米黑白胶片,拟定的应用领域主要为地质能源、农林、陆地、冰雪、海洋、湖沼等。

4. Radarsat 计划

Radarsat 是加拿大十数年来潜心发展的目标,携带上天的是一部 HH 极化,C 波段合成孔径雷达。将在美国的合作下,于 1994 年发射,寿命 5 年。1994 年,恰逢 ERS-1 SAR 和 JERS-1 SAR 停止工作时间,Radarsat 及时地进行世界范围内的接力服务,其主要目的是进行海冰、海洋、再生资源及非再生资源调查。

雷达卫星 SAR 具有较强的工作能力。它有 5 种波束工作模式,其成像宽度可在 45 公里至 500 公里范围内选择,入射角可在 20° — 59° 范围内变化,相应地,分辨力最高可达

表 3 雷达卫星 SAR 波束特征
Table 3 Characteristics of Radarsat SAR Beams

参 数	标准波束	宽辐射波束	高分辨力波束	扫描雷达波束	试验波束
入射角	$20-49^\circ$	$20-40^\circ$	$37-49^\circ$	$20-49^\circ$	$49-59^\circ$
成像宽度(千米)	100	150	45	300 或 500	75
分辨力(米)	28×25	28×35	10×10	100×50 100×100	28×30

(据 S. Ahmed, 1990)

10 × 10 米,最低为 100 × 100 米。其波束特征见表 3。

与已有的及计划发射的航天雷达系统相比, Radarsat SAR 有如下 3 个特点: (1) 具有 45、75、100、150、300 至 500 公里的不同辐射宽度成像能力; (2) 分别为 11.6、17.3、30.0MHz 雷达带宽的灵活使用使距离分辨力可调; (3) 强大的数据处理能力。

雷达卫星的高功能使得成像能力增强。SAR 每天可覆盖 73°N 至北极全部地区, 3 天可覆盖加拿大全国及北欧地区, 24 天即可覆盖全球一次^[10]。

5. ALMAZ SAR 计划

ALMAZ 为天然金刚石之意, 是苏联研制的雷达遥感卫星, 于 1991 年 3 月 31 日发射进入工作状态。ALMAZ 携带的 SAR 为 S 波段, HH 极化, 15—30m 距离及方位分辨力。星体上装有两部天线, 可供左右向发射脉冲, 接收信号。数字记录形式。可向用户提供磁带、软盘及胶片, ALMAZ 是有对南北纬 78° 之间地球上大部分地区成像的能力, 成像间隔时间仅为 1—3 天。

6. EOS SAR 计划

美国的地球观测系统是其航天领域中的核心计划之一, 是 NASA 对美国全球变化研究中最重要贡献。EOS 计划初步由两个阶段完成, 即 EOS-A 和 EOS-B。EOS-A 将运行 15 年时间, 由分别工作 5 年的 3 颗卫星组成, 拟于 1988 年发射。EOS-B 第一颗卫星计划 EOS-A 发射 2 至 3 年后升空, 总寿命亦为 15 年。其目的致力于辐射平衡, 大气环境, 陆地表面, 海洋、冰川、板块构造的研究, 更重要的是开展全球变化的研究。

合成孔径雷达是 EOS 系列传感器中十分重要的系统。该系统是在大量机载雷达试验及海洋卫星 SAR、SIR-A、SIR-B、特别是 SIR-C 的基础上发展而成的高性能的雷达系统。具有 L、C、X 3 个工作波段, L、C 波段均为 HH、HV、VH、VV 4 种极化同时成像方式, X 波段为 HH、VV 极化同时成像, 需 6 个雷达接收器同时工作。入射角在 15°—60° 范围内可调, 斜距分辨力可达 7 米, 距离分辨力小于 30 米。

7. 几个新设想

在以上这些新的成像系统发展的同时, 人们已经在意识到它们的不足及局限性。如两个 ERS-1 SAR 分别为 100 公里及 75 公里的有限的成像宽度及对全球成像的时间周期相对较长。为提高其能力, JPL 的科学家们正在进行一个称之为全球雷达成像仪 (GLORI) 的可行性研究计划。GLORI 具有双视向各 400 公里的成像宽度, 计划采用 C 波段, 分辨力 100 米, 可在 EOS 上进行实时数据处理, 每两天即可对全球成图一遍, 实现其对全球的快速、连续性观测。

另一个发展方向是研制低频成像雷达。雷达穿透能力正比于波长, 计划研制 400MHz 频率的雷达系统, 可增加对干旱区的穿透深度。对南极冰盖, 可穿透数公里深度。探测金星的 S 波段成像雷达, 以 250 米的分辨力对星体表面成像。金星外围常年云雾缭绕, 航天雷达是目前对其探测的最有用的工具。

地形要素是地球表面遥感图像分析的关键因子。利用雷达或可见光与红外波段生成

的三维图像可获得较逼真的地形信息,但往往受到不能在较大范围内推广的限制。由此一种经济的、快速成像的、以数字形式直接测量全球地表地形的传感器变得愈加需要。为此, JPL 提出了扫描雷达高度计(SRA)的设想。在 250 公里的高空,以 37GHz 的频率,用 8 米长天线发射窄波束,可获得 250 米距离分辨率图像。在方位向,利用合成孔径技术,仅用 0.3 米长天线,即可达到同等分辨率。SRA 垂直于航线在 150 公里的成像宽度内来回扫描,航天飞机两次飞行就可获取全球的地形数据,其高度误差可小于 3 米。

90 年代,这些系列航天雷达的成功发射,相信将为地球科学研究带来革命性变革。资源丰富的南极洲,将揭开它真正的面纱,以亚马逊河为代表的热带雨林区,将会提供更多的物产信息,浩瀚的干旱沙漠区,将会有更多的地理地质现象被唤醒。板块构造、全球变化、海洋研究,在航天雷达的支撑下,将会取得令人鼓舞的成就。

四、结 语

地球表面由大气圈、水圈、岩石圈构成了一个复杂的系统,需要愈来愈先进的技术手段去研究。航天雷达遥感是迄今发展起来的最新最有力的技术系统之一。已发射的 3 颗雷达显示了在地球科学探测中的杰出成就。未来 10 年发射的雷达系统,将给人们提供高质量的雷达数据。90 年代是航天雷达蓬勃发展的时代,应珍惜这一时机,利用这一机遇,参与国际性计划同时尽早开展诸如 SRA 新型传感器的调研与实施,加速发展我国的星载雷达计划。

参 考 文 献

- [1] C. Elachi, J. Cimino and M. Settle, Overview of the Shuttle Imaging Radar-B-Preliminary Scientific Results, Science, Vol. 232, pp. 1511—1515, 1986.
- [2] J. Cimino, C. Elachi and M. Settle, SAR-B-The Second Shuttle Imaging Radar Experiment IEEE TRANSECTION ON Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-24, No. 4, pp. 445—452, 1986.
- [3] 郭华东,航天飞机雷达对阿拉善高原沙漠及次地表岩石的回波响应,环境遥感,1(1),pp. 34—43,1986.
- [4] 郭华东,雷达遥感及其地质应用的进展,空间遥感研究文集,pp. 119—124,学术期刊出版社,1988.
- [5] Guo Huadong Wang Chao and Zhang Yunhe, Airborne SAR and SIR Data for Geologic Investigation in Hugu Area, China, Submitted to The 8th Thematic Conference on Geologic Remote Sensing Proceedings, 1991.
- [6] Lee-Lueng Fu, B. Holt, Seasat Views Oceans and Sea Ice with Synthetic-Aperture Radar, JPL publication, 81—120, 1982.
- [7] B. L. Huneycutt, Innovative operating Modes and Techniques for the spaceborne Imaging Radar-C Instrument, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 4, pp. 603—608, 1990.
- [8] JPL, Shuttle Imaging Radar-C Science plan, JPL Publication, 1986.
- [9] G. Duchossois, Status and Future plans for ERS-1, Satellite Microwave Remote Sensing, Ch. 31, pp. 501—514, 1983.
- [10] S. Ahmed, H. R. Warren M. D. Symonds, and R. P. Cox, The Radarsat System, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 28, No. 4, pp. 598—602, 1990.

Role and Development of Spaceborne Radar Remote Sensing

Guo Huadong

(Institute of Remote Sensing Application, Academia Sinica)

Abstract

This paper deals with the role of the Seasat SAR, SIR-A and SIR-B in earth science research, which have acquired the spaceborne radar images of the earth surface uniquely. The activities of the active microwave remote sensing in the coming ten years have been described, especially the ALMAZ SAR, ERS-1 SAR, JERS-1 SAR, SIR-C, Radarsat SAR and EOS SAR systems. It is prospected that the 1990's will be the key decade for technical development and geoscience application of the spaceborne radar remote sensing.

Key words imaging radar remote sensing satellite space shuttle earth science