

航天多波段全极化干涉雷达的地物探测^{*}

郭华东

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 航天飞机成像雷达3号及X波段合成孔径雷达(SIR-C/X-SAR)计划是一项包括中国在内有13个国家合作进行的大型雷达对地观测研究计划。SIR-C/X-SAR具有L、C、X3个波段及L、C波段HH、HV、VH、VV极化，X波段VV极化同时成像的能力，可获得全极化及干涉雷达数据，是本世纪内最先进的航天成像雷达系统。该文系统介绍了SIR-C/X-SAR中国项目开展以来取得的研究成果。重点阐述了我国雷达试验区及与SIR-C/X-SAR成像飞行同步开展的航天—航空—地面立体同步观测试验和对干涉的穿透性试验，以及在相关领域和不同地区的应用，包括昆仑山火山群的发现，广东肇庆植被覆盖区地质体的识别，明、隋两代长城的探测与极化响应分析，海洋及城市特征研究，并介绍了利用干涉雷达数据生成数字地形模型的结果。

关键词 航天雷达，SIR-C/X-SAR，地物探测

1 前言

1994年4月与10月，航天飞机成像雷达3号及X波段合成孔径雷达(SIR-C/X-SAR)两次升空，分别进行了为期10天的空间对地探测，获得了全球300多个雷达试验区，累计为 1×10^{13} 比特的雷达数据。试验获得了极大成功。

SIR-C/X-SAR是一项大型国际空间雷达对地观测计划，其硬件系统由美国宇航局、德国空间局及意大利空间局联合研制。除以上3个国家外，另有来自澳大利亚、加拿大、中国、英国、法国、日本等13个国家的科学家共同开展这一合作研究计划。整个计划由52个研究项目组成，其中包括SIR-C/X-SAR中国研究项目^[1,2]。

迄今为止，所有的航天成像雷达系统，包括Seasat SAR，SIR-A，SIR-B，Almaz-1 SAR，JERS-1 SAR，ERS-1和2 SAR，Radarsat SAR，均为单波段单极化雷达系统，而SIR-C/X-SAR有3个显著的技术特点，它是：(1)运行在地球轨道高度的第一个多波段同时成像雷达系统；(2)地球轨道高度第一个多极化同时成像雷达系统；(3)具有干涉测量能力的雷达系统。该系统极大程度地利用了电磁波波长、极化、振幅及相位信息，使微

波波段的电磁波“资源”能够得以深入开拓，为更准确更有效地识别地物提供了新的手段。

作为SIR-C/X-SAR研究计划的有机部分，SIR-C/X-SAR中国项目组开展了多学科领域的研究工作，与航天飞机雷达飞行同步开展了机载雷达飞行及实时观测试验，利用先进的雷达数据，进行了地球表面及次地表自然与人造地物的探测与识别。该文介绍了这方面的研究成果。

2 SIR-C/X-SAR系统特征及中国试验区

2.1 SIR-C/X-SAR系统特征

SIR-C/X-SAR有3个工作波段，即L、C及X波段，3个波段可同时对同一地物成像。在L及C波段，设计有4种极化组合，即HH、HV、VH、VV。同时，SIR-C可提供4种极化回波的相位差数据，据此可求出每一象元的全散射矩阵，获得全极化信息。X波段为VV极化(表1)。视角机上可调，范围在 $15^\circ-60^\circ$ 间^[1]，数据主要在机上记录并存储，少部分数据通过中继卫星实时传输至地面处理。

SIR-C/X-SAR发展并采用了4种先进技术，分别为干涉雷达成像技术、扫描雷达成像技

^{*}美国宇航局(NASA)合同项目，中国国家自然科学基金项目，中国科学院院长基金项目。

收稿日期：1996年12月10日

术、定标技术及 SAR 数据实时处理技术。利用重复轨道干涉成像原理, 在 SIR-C 第 2 次飞行的后 3 天, 进行了干涉雷达飞行, 获取了包括中国试验区在内的干涉雷达数据; 出于对大尺度资源环境探测及技术试验的需要, 两次飞行均用了扫描雷达模式成像, 扫描雷达的成像条带宽度可达 $200\text{km}^{[3]}$; 进行了雷达辐射定标, 可直接从 SIR-C 数据求出地物的雷达散射系数; 这使得雷达遥感定量研究成为可能; 另一个关键技术是研制成功 SAR 地面实时处理器, 这是一部数据输入速率达 45M bps 的高速处理器, 可连续地输出 SAR 图象条带, 每秒钟可处理 7km 成像带的数据。

2.2 SIR-C/X-SAR 中国试验区

试验区的正式设计始于 1990 年。在 SIR-C/X-SAR 系统参数及能力已确定前提下, 选择了新疆、内蒙古、华北、广东、湖北及台湾 6 个试验区。主要应用领域包括地质、植被、海洋及穿透性研究等。根据目标所处的地形地貌及探测目的的不同, 首先确定每一试验区中心点的标准视角, 并在此基础上选择成像模式, SIR-C/X-SAR 共有 23 个成像模式, 除 X-SAR 为 X 波段 VV 极化模式外, 其余 SIR-C 的 22 种模式分别是 L、C 波段与 HH、HV、VH、VV 极化的不同组合, 模式 21、22 为专门的干涉雷达成像模式。不同模式除获取雷达信息不同外, 亦受到成像宽度的影响 (表 2)。

在 1994 年 4 月及 10 月的两次飞行中, 按照设计要求, SIR-C/X-SAR 对所有中国试验区全部成像。每一试验区名称取自该试验区中心点的地理名称, 在实际飞行成像时, 在 $15\text{--}90\text{km}$ 宽度内, 根据开机时间长短, 每个试验区成像长度不等, 可达数百公里, 有的甚至超过 2000km 。如广东试验区包括海南、香港等地区数据, 华北试验区包括河北、北京、山东等地区数据。两次飞行共获中国试验区约 90 分钟的 SIR-C/X-SAR 数据。与此同时, 在奋进号航天飞机上的宇航员, 在 SIR-C/X-SAR 对地面成像的同时, 在天气条件允许情况下, 利用长焦距相机对试验区拍照, 获得许多宝贵的资料, 十分有利于与雷达图象的对比研究。

3 雷达飞行同步实验

3.1 航天—航空—地面立体同步雷达遥感试验

定量遥感的重要方法之一是在进行星、机载

遥感飞行的同时进行地面实况测量。我们在北京试验区开展了这一试验。在 SIR-C/X-SAR 过顶时, 机载 SAR 在同一地区进行成像飞行, 车载散射计在地面进行同步测量, 同时测量地表目标物粗糙度并采集样品。

1994 年 4 月 18 日上午 SIR-C/X-SAR 过顶北京试验区, 利用中国科学院电子研究所研制的机载合成孔径雷达 (CASSAR) 在 7200m 高度同时成像。CASSAR 工作在 X 波段, 具 4 种极化方式, 空间分辨率 $10\times 10\text{cm}$, 飞行方向及电磁波束发射方向均与航天飞机 SAB 一致, 入射角为 $73.93^\circ\text{--}83.12^\circ$ 。所用电子部 22 所研制的车载散射计工作在 X 及 L 波段, 可测量任何 4 种线极化方式下天线照射区域内散射信号的强度, 天线装载于吊车平台上, 可进行任意方向及 $0^\circ\text{--}84^\circ$ 俯角范围内的测量。观测前, 首先利用金属球对散射计进行绝对定标, 并保证系统的稳定性。对每一种目标, 在不同方向及 $0^\circ\text{--}84^\circ$ 俯角范围内以 6° 的步进测量目标散射系数。主要测量的分布式目标为冬小麦、裸土、稻茬、水体等。对 40 余块农田进行了同步地面实况测量。时值春耕前期, 主要农作物为冬小麦, 此外有少量春大麦。部分裸地已被整平以待春耕, 并开始灌水, 部分裸地尚未被耕翻。在地面同时测量了土壤粗糙度, 土壤含水量及农作物含水量。

在航天飞机成像雷达试验中利用分布式目标的车载散射计测量数据进行航天飞机成像雷达及机载 CASSAR 的定标, 取得了较好的结果。在图象线性动态范围内拟合精度小于 2dB (L 波段除外)^[4]。但是, 由于分布式目标动态范围的限制, 如与有源目标相配合, 将有利于扩展定标的动态范围。

对实时获取的土壤湿度和冬小麦含水量与雷达图象的关系分析表明, 土壤湿度与雷达图象灰度之间的线性关系较好, 而冬小麦含水量与图象灰度之间的线性关系不如前者, 反映出二者对 SAR 回波的响应不同。

3.2 SIR-C 对干沙的穿透性试验

利用分别于 1981 年及 1984 年上天的 SIR-A 及 SIR-B 两部航天成像雷达, 笔者曾研究并发现了 L 波段 SAR 对内蒙古阿拉善地区干沙的穿透现象^[5]。该次试验中选择这一地区作为雷达穿透性定量研究试验区。试验区位于巴丹吉林沙漠东缘,

表 1 SIR-C/X-SAR 系统参数
Table 1 SIR-C/X-SAR System Parameters

参 数	L 波段	C 波段	X 波段
轨道高度 (km)		225	
波长 (cm)	23.5	5.8	3.1
极化方式		HH, HV, VH, VV	VV
方位分辨率 (m)		30×30	
斜距分辨率 (m)		13×26	10×20
成象宽度 (km)		15-90	15-60
视角 (°)		20-55	
波束宽度 (MHz)		10, 20	
脉冲长度 (μ s)		33, 17, 8.5	40
数据速率 (mbps)		90	45
数据获取时间 (h)		> 100	

注: 除表中已标明外, L 及 X 波段其它参数同 C 波段

表 2 SIR-C/X-SAR 工作模式
Table 2 SIR-C/X-SAR Mode

模 式	A 通道	B 通道	C 通道	D 通道	成象宽度
1	—	—	—	—	仅 X-SAR
2	L-HH	L-HH	L-HV	L-HV	2 倍宽度
3	L-HV	L-HV	L-VV	L-VV	2 倍宽度
4	C-HH	C-HH	C-HV	C-HV	2 倍宽度
5	C-HH	L-HH	L-VV	L-VV	2 倍宽度
6	C-HH	C-HH	C-VV	C-VV	2 倍宽度
7	L-HH	L-HH	C-VV	C-VV	2 倍宽度
8	L-HH	L-HH	C-HH	C-HH	2 倍宽度
9	L-VV	L-VV	C-VV	C-VV	2 倍宽度
10	L-VH	L-VH	C-HV	C-HV	2 倍宽度
11	L-HH	L-HV	C-HH	C-VV	标准宽度
12	L-VH	L-VV	C-VH	C-VV	标准宽度
13	L-HH	L-VV	C-HH	C-VV	标准宽度
14	L-HH	L-VH	L-HV	L-VV	标准宽度
15	C-HH	C-VH	C-HV	C-VV	标准宽度
16	L-HH, L-VH	L-HV, L-VV	C-HH, C-VH	C-HV, C-VV	窄宽度
17	L-HH	L-HH	L-VV	L-VV	标准宽度
18	C-HH	C-HH	C-VV	C-VV	标准宽度
19	L-HH	L-HH	C-HH	C-HH	标准宽度
20	L-VV	L-VV	C-VV	C-VV	标准宽度
21	L-VH	L-VV	C-VV	C-VV	标准宽度, 干涉模式
22	C-VV	C-VV	C-VV	C-VV	2 倍宽度, 干涉模式
23	L-VH, L-HH	L-VV, L-HV	C-VH, C-HH	C-VV, C-HV	标准宽度

这里气候干燥, 干沙层覆盖的地表表面十分平坦。在 SIR-C/X-SAR 临近过顶前, 在地下埋设了 12 个角反射器, 其中 4 个埋设在自然沙层中, 6 个埋设在人工运移的干沙中, 另 2 个置于地表。1994 年 4 月 18 日下午 2 时, SIR-C/X-SAR 按预定时间在试验场准时过顶。

在该试验区又分为两个试验场: 1 号试验场选择在阿拉善三角地的西部。这里约 1m 厚的沙层充填在基岩之间形成的低凹地, 局部地区还有少量的基岩露出, 但绝大部分为沙层覆盖。雷达图象, 尤其是长波段雷达图象上, 这一三角状基岩完全显示出来。在这里设 4 个角反射器, 底部深度约 1m。选择 1 号试验场的原因是: (1) 观察微波波段电磁波在自然条件下的穿透现象和介质的湿度对电磁波衰减的影响作用; (2) 揭示微波电磁波在自然沙层中的衰减过程。2 号穿透试验场选择在戈壁滩地区, 约 20cm 厚的干沙层覆盖在新生代未固结的冲洪积物上, 表面极其平坦。埋设 6 个角反射器, 底部深度 0.93—2.73m。采取在戈壁沉积物上挖坑, 当坑口足够开阔时, 将角反射器埋入坑中, 再覆盖上从远处运来的干沙, 让电磁波完全在干沙中传播。选择 2 号试验场的目的是研究微波电磁波在干沙介质层中的衰减过程, 测量干沙的实验性穿透深度和穿透条件。研究结果表明:

(1) SIR-C/X-SAR 对阿拉善地区的干沙介质的理论最大穿透深度为 2.82m, 但深度大于 2.82m 的地物仍然可能被探测到^[9], 其极限探测深度通过各个角反射器的理论计算穿透深度与其回波响应强度间的相关分析而得到。

(2) L 波段 SAR 能够探测到沙层下基岩。原因: 一是沙层覆盖约为 1m, 因此, 有些沙层基岩界面深度在 0.65m 之内, 可被探测到。二是仍有小于 $1/e$ 的能量经沙层与基岩界面的强烈散射而返回雷达天线, 在雷达工作灵敏度之内而被探测到。

4 地物探测与识别

4.1 基岩裸露区火山探测

这里所指基岩裸露区为西昆仑山地区。西昆仑山位于塔里木板块与西藏—印度板块的交接地带。长期以来一直为地学界所关注, 尤其是该区新生代以来的火山活动, 对探讨和研究该区板块构造的活

动规律和地质历史具有十分重要的意义。在分析这一地区的 SIR-C 图象时, 在未有任何先知资料情况下从雷达回波特征分析认为存在一火山地质现象, 遂进行野外验证。在海拔 5600m 高度, 发现了 5 个火山锥并区分出两种不同的熔岩流^[7, 8]。多波段多极化 SAR 图象在识别火山锥时起到关键作用。对单波段单极化图象比较分析表明, L—HV 识别火山机构能力明显优于 L—HH、C—HH、C—HV 及 X—VV 图象 (图 1), 而 L、C 波段及 HH、HV 极化的组合可达到最好效果。从雷达与火山熔岩相互作用机理角度分析, L 波段与熔岩粗糙度的相关性使得其具有更强识别能力, 而熔岩形成的去极化作用亦是交叉极化优于同极化的重要原因。

该研究发现的 5 个火山锥呈塌陷的圆形放射状, 与周围地表起伏高度相差不多, 锥体面积不到 1km^2 , 其塌陷面积可达 $3\text{—}4\text{km}^2$ 。另外, 存在两种不同产状的熔岩流。一种为块状熔岩, 主要分布在塌陷的火山锥四周, 在地表呈杂乱状分布, 其中最大的块体高度可达 1m 以上。岩石普遍发育气孔和杏仁构造。另一种为绳状熔岩, 主要分布在火山锥南侧, 呈近水平的扇形熔岩被产出, 不整合覆盖于三叠纪片岩之上, 近南北向延伸约 23km, 宽 10—12km。表面较为平坦, 呈饼状, 气孔较块状熔岩细小、分散。

利用在该区采集的 7 个火山岩样品进行岩石化学、稀土元素、微量元素及同位素的分析得出, 该区火山岩为响岩质碱玄岩, 火山岩的 K—Ar 同位素年龄为 3.97—7.45Ma, Rb—Sr 同位素等时线年龄为 4.65Ma, 属于中新世至上新世。

4.2 植被覆盖区岩性构造区分

在亚热带地区, 由于植被茂密, 土壤层厚, 岩石露头少, 交通困难, 地质调查工作难度很大, 而雷达可以探测植被覆盖下的地质现象, 获得一些难以从可见—红外遥感资料上获得的信息。广东肇庆试验区的研究工作展示了多波段多极化航天飞机成像雷达图象在探测植被覆盖下的地质构造和岩性方面的能力。

在 L—HH (R), L—HV (G), C—HV (B) 3 个通道的彩色合成图象上, 有一组青色和灰黄色组成的条带, 它们互相平行, 具有清晰的边界和锯齿状形态。这些条带在彩红外象片 (1: 35, 000)

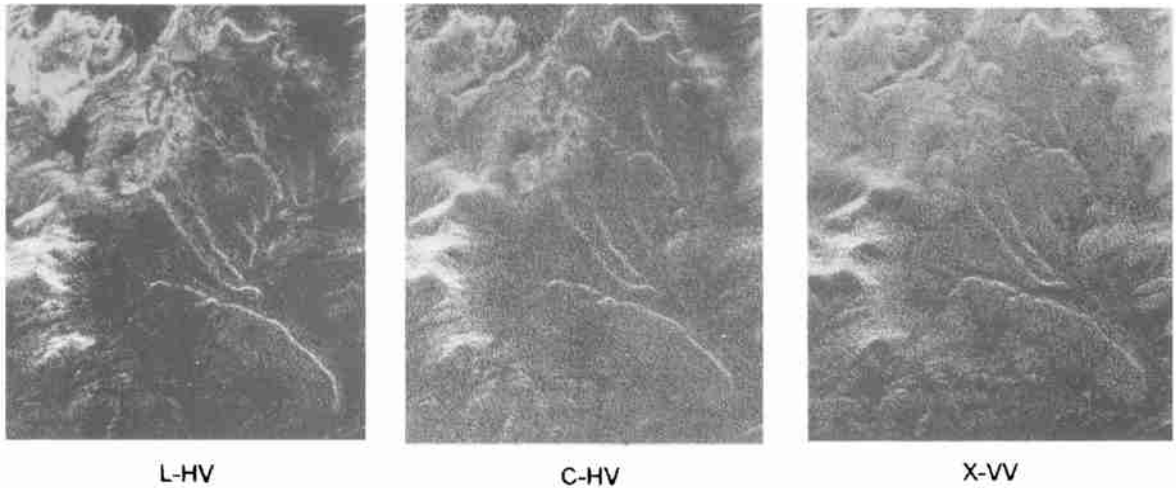


图 1 西昆仑火山吸熔岩的多波段多极化 SAR 图像

Fig 1 L, C, X-band and HV, VV SAR Imagery of Volcanoes in Western Kunlun Mountain.

上没有显示, 野外调查证实这些条带是泥盆纪柱头组岩层。不同条带是由于岩石类型及其风化破碎的程度不同而造成的。这些代表不同岩性的条带信息主要来自 L 波段图象, 而在 X 波段图象上没有显示。对于 X 波段的雷达图象, 植被层就象一个包络面覆盖在山坡上, 只能显示植被和地形的特征, 而波长较长的 L 波段, 则记录了来自植被冠层、植被枝干及地面的 3 部分信息, 因此, 岩石风化沉积物的粒度的差别所反映的岩性信息以粗糙度的差异表现在雷达图象上^[9]。

弧形构造与金矿成矿具有很好的相关性。SIR-C/X-SAR 图象清晰显示了位于广东河台金矿以东的一个弧形构造带。一系列的山脊山谷呈弧形排列, 延伸约 30km。它的南边是一个花岗岩体, 具备了金矿成矿条件。位于弧形构造带内的一个金矿化点已被发现。初步认为此弧形构造是一个合金构造带。

4.3 明、隋代长城的识别

利用多波段多极化成像雷达, 识别出位于宁夏—陕西交界处的古长城。该长城位于宁夏盐池县到陕西定边、安边县, 盐池县境内共有古长城 3 道, 一道为隋代修筑, 两道建于明代, 明代长城向东延伸到陕西定边、安边境内。

隋长城修建于公元 585 年, 黄土夯筑, 倾塌十分严重, 断断续续呈残包状, 残高 1—3m, 宽约 4m。明长城分 2 道, 称头道边及二道边, 头道边修于 1531 年, 黄土夯筑, 基宽 6—8m, 残高 6—8m, 夯层厚 10—13cm。二道边基宽 6—8m, 残高

1—4m, 顶宽 1—3m, 夯层厚 13cm, 每隔百米左右筑方形敌台, 大部分已倾塌殆尽, 仅有少数地段保留。

航天飞机在这个地区平行于长城飞行, 雷达波垂直于城墙发射, 形成的角反射器效应使得雷达能够有效地识别长城。在干沙覆盖长城区段, 由于雷达的穿透能力, 长城被完整地显示在 SAR 图象上。波段与极化在探测长城这类线性目标时具有重要作用^[10]。从波段分析, L 波段明显优于 C 波段, 而对于极化, HH 极化显然比 HV 极化效果好, 明、隋长城在 L—HH 及 C—HH 图象上显示比较清楚。在 C—HV 图象上已很难识别二者的同时存在 (图 2)。图 3 为两代长城 (L—HH 图象右侧) 及长城左侧的道路 (仅见于 L—HV 图) 的雷达后向散射强度可视化模型。明、隋两代长城对 HH 极化有强响应。而其左侧的道路, 由于路边树木的体散射效应, 对 HV 极化有强响应, 使道路仅见于 HV 极化图象上。

4.4 海洋表面状况监测

海洋占据地球表面的 70%, 蕴藏着人类赖以生存的重要资源。而海面上的天气状况往往非常恶劣, 给光学遥感手段监测海况带来极大困难。成像雷达是进行海洋观察的最理想的工具之一。在 SIR-C/X-SAR 对中国雷达试验区成像时, 获得了南海、东海、渤海部分海域的图象, 从 SAR 图象可以探测到船舶, 推测其大小及运动方向和速度, 港口及船舶停泊状况。并且观察到了多种海洋动力学现象以及由于海底地形变化而引起的海面波浪的差

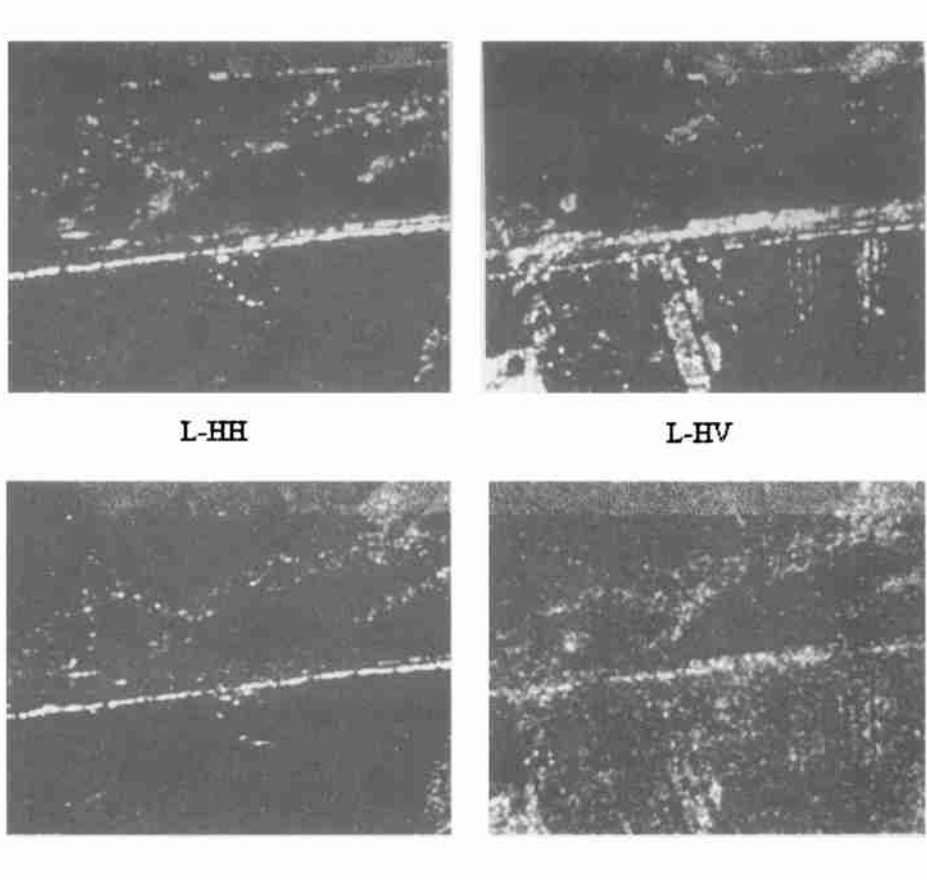


图 2 陕西境内明、隋古长城对 L、C 波段及 HH、HV 极化 SAR 的回波响应
Fig. 2 L、C-band HH、HV SAR Responses from the segment of the Great Wall in Shanxi Province

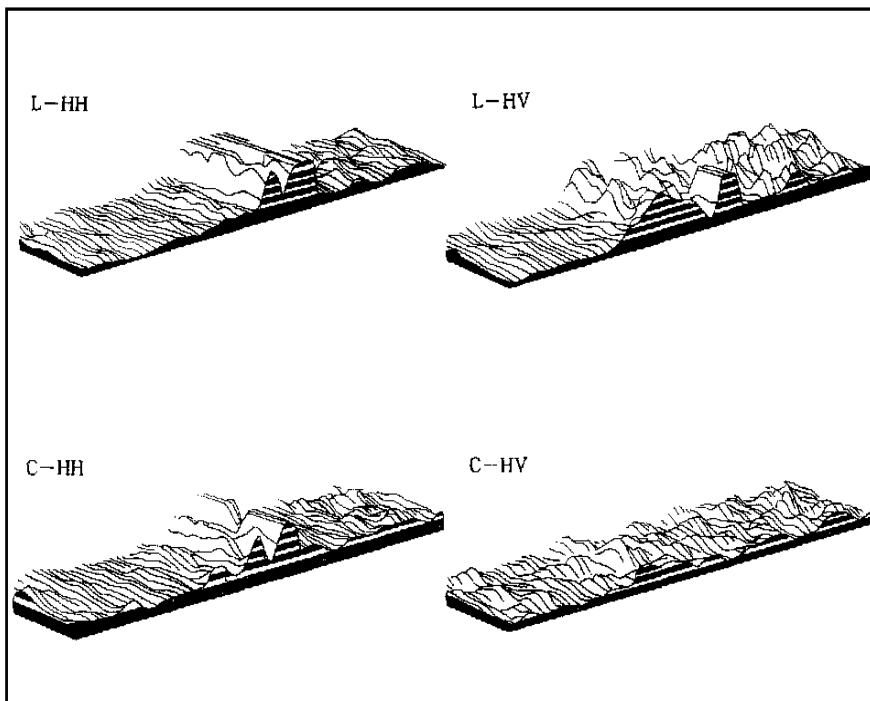


图 3 明、隋两代长城及道路的雷达后向散射强度可视化模型

异等。通过分析,可以看出极化对海浪的探测有较大影响。台湾附近海面, HV 雷达图象要比 HH 图象给出的现象丰富得多。

4.5 城市目标显示

SIR-C/X-SAR 覆盖了我国南方一些重要的城市,包括台北、香港、深圳、肇庆等市。这些城市不易被光学遥感手段成象,雷达显示出丰富的信息,揭示出城市扩展现状及趋势。特别是街道和建筑物结构及走向的不同在多波段多极化 SAR 图象上特征的不同,可为城市规划提供新的重要的依据。如在台北市 L-HH、C-HH、C-HV 合成 SIR-C 图象上,清晰地展示出淡水河桥梁分布、城区街道展布、大交通干线延伸及城市用房向周围山区谷地扩展的现状。在香港地区的 SAR 图象上,可以看出即使在阴雨条件下, SAR 亦可以捕捉到海面上展布的众多船只信息。

4.6 利用干涉雷达生成数字地形模型

干涉雷达技术于近年来得到迅速发展,它使人们从空间可直接获取精度为厘米量级的高程数据,从而使直接获取三维信息成为可能。

利用 L 波段 VV 极化 SIR-C/X-SAR 昆仑山干涉雷达数据进行了数字高程模型 (DEM) 信息提取^[8]。干涉雷达数据提取三维信息主要包括干涉雷达信号数据的处理、成象参数的归一化、数据的几何精配准、平坦地形相位纠正以及相位的解缠,经过以上处理,可获得斜距向数字高程模型,利用成象参数计算出正射投影的数字高程模型。由获取的干涉测量相位图和相干图可以看出,相位的变化与地形能很好地吻合。将 DEM 与研究区仅有的 1:10 万地形图比较,DEM 显示了更多的细微信息^[11]。研究结果表明,用干涉雷达获取 DEM 是非常有效的,特别是在人烟稀少,环境恶劣的地区,干涉 SAR 更是一种有效的测绘手段。

5 结论

利用运行于航天高度的第一颗多波段多极化成象雷达的数据,在 SIR-C/X-SAR 中国试验区取得系列研究成果。在航天—航空—地面三位一体同

步试验中求出地物与图象的线性关系、干沙区雷达穿透性实验中表明长波段 SAR 可穿透数十厘米至数米的干沙层。发现 5 个先前未知的火山口及两种熔岩,识别出植被覆盖下岩层的展布,区分出不同时代的长城及部分被干沙覆盖的古长城,用干涉 SAR 数据生成 DEM,开展了海洋及城市的分析。对不同波段、不同极化识别地物的能力进行了对比。研究表明,多波段全极化干涉雷达在地球资源及环境探测中有极其重要的作用。

参 考 文 献

- [1] Ellen R. Stofen, Diane L. Evans *et al.* Overview of Results of Spaceborne Imaging Radar - C, X - band Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, **33** (4): 817-828.
- [2] 郭华东. 雷达对地观测科学研究. 遥感科学新进展. 北京: 科学出版社, 1995.
- [3] C. Y. Chang *et al.* First SIR-C Scansar Results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, **34** (5): 1278-1281.
- [4] 王超, 郭华东, 李林. 星—机—地雷达遥感试验. 科学通报, 1996, **41** (4).
- [5] 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应. 环境遥感, 1986, **1** (1).
- [6] 邵芸, 郭华东, 刘浩. 航天飞机成象雷达 SIR-C/X-SAR 穿透试验研究. 遥感科学新进展, 北京: 科学出版社, 1995.
- [7] Guo Huadong, Liao Jinjuan, Wang Changlin, Wang Chao, T. Faruq, D. Evans. Use of Multifrequency and Multipolarization Imaging Radar for Detection of Volcano in Western Kunlun Mountain Region. Submitted to Remote Sensing of Environment.
- [8] 郭华东, 廖静娟, 王长林. 航天飞机 SIR-C/X-SAR 对西昆仑山新生代火山的探测. 科学通报, 1997, **42** (1).
- [9] Guo Huadong, Zhu Liangpu, Shao Yun, Lu Xingqiao. Detection of Structural and Lithological Features Underneath a Vegetation Canopy Using SIR-C/X-SAR Data in Zhao Qing Test Site of Southern China. *Journal of Geophysical Research*, 1996, **101** (E101), 23101-23108.
- [10] JPL Space Radar Reveals Ancient Segments of China's Great Wall. *Earth Observation Magazine*, 1996, **5** (6).
- [11] 王超等. 干涉雷达数据提取数字高程模型. 北京: 测绘出版社, 1996.

作 者 简 介

郭华东, 男, 生于 1950 年 10 月, 1981 年毕业于中国科学院研究生院。现任中国科学院遥感应用研究所研究员。近 20 年来从事遥感研究, 出版论著 6 本, 发表论文 90 余篇。

Spaceborne Multifrequency, Polarametric and Interferometric Radar for Detection of the Targets on Earth Surface and Subsurface

Guo Huadong

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101*)

Abstract Shuttle Imaging Radar C and X-band Synthetic Aperture Radar mission (SIR-C/X-SAR) is an international cooperation program in radar for Earth observation. There are 13 countries including China participated in this program. SIR-C/X-SAR has three bands—L, C, X, polarimetry and interferometry imaging capability, the L and C band have polarization mode of HH, HV, VH, VV, and X band is only with VV polarization mode. This paper introduces the China SIR-C/X-SAR program, its progress and achievements since its beginning at six years ago. While the shuttle flew over China, the Chinese scientists carried out the real time experiments including the spaceborne—airborne—ground data collection and sand layer penetration experiment. Volcanos up to 5600m at sea level is discovered by SIR-C/X-SAR in Kunlun Mountains. The lithological and structural features underneath vegetation cover is detected. A segment of Great Wall in a desert region of the Ming and Sui dynasty has been identified, even part of the wall buried by Sand. The preliminary results of oceanography and urban study is also introduced and the interferometry technology for generating DEM is presented.

Key words Spaceborne radar, SIR-C/X-SAR, Target detection