

# 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\*

郭华东

(中国科学院遥感应用研究所)

1985年11月18日收到

## 一、前言

装载在航天飞机哥伦比亚号上的成象雷达1号(SIR-A)于1981年11月进行了成象飞行,三年后的1984年10月航天飞机挑战者号又载变换参数的成象雷达2号(SIR-B)进行了试验。两部雷达均获取了我国内蒙阿拉善高原的图象。这是迄今仅有的中国国土的两批航天雷达图象。它为我们提供了有关沙丘及次地表岩石的新资料。

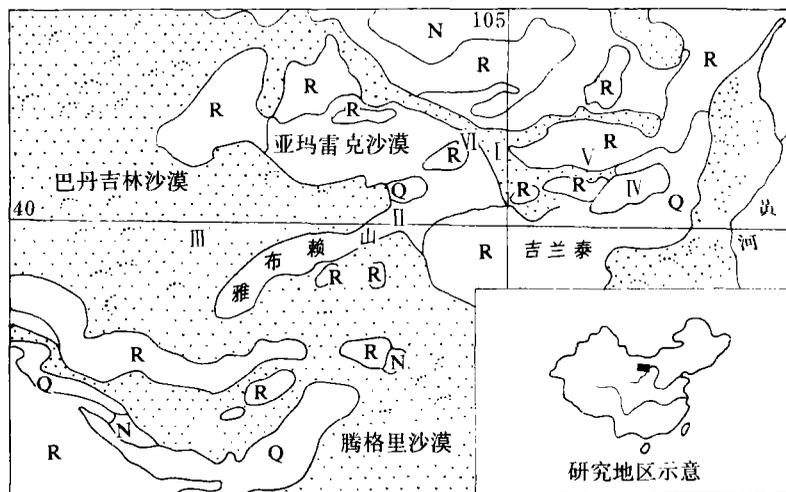
阿拉善高原是中国最干旱地区之一,包含了全国13个大沙漠中的3个沙漠,大大小小的沙丘极其发育,其中巴丹吉林沙漠拥有世界上最高的沙山,其间亦分布有准平原、丘陵及强烈剥蚀的低山地。

对雷达成象机理的大量研究表明,雷达后向散射强度的大小,主要取决于系统参数波长、极化、俯角及地面参数复介电常数和表面粗糙度的变化。这些理论已被成功地运用在解译各种地物如岩石、植被、建筑物等目标中。从1983年开始的本课题研究,基于以上理论,对阿拉善高原亚玛雷克沙漠的SIR-A图象分析,首先在室内建立了散射模型,然而实地验证的结果发现,该模型存在着结论性的错误。

显然,沙漠区雷达散射机理有其特征所在,为此,本文对阿拉善高原的亚玛雷克、腾格里、巴丹吉林沙漠、双井子沙丘及铁库乌拉、阿尔腾敖包基岩体六个研究区(图1)的雷达图象进行了深入分析。同时,笔者两年来又先后考察了腾格里沙漠南缘,库姆塔格沙漠东部,美国死谷盆地沙丘,俄勒冈及凯拍拉韦特高原沙漠及西藏中部沙丘,对比分析了这些地区的航天航空雷达图象,结果表明,物质结构、介电性质、地形参数均有特性的沙丘,对雷达的回波影响与其它地物相比有重要区别,同时发现了SIR-A及SIR-B对薄层沙的穿透能力。

该研究的数字图象处理工作在美国地质调查局天体地质部VAX11/750计算机上完成。文中采用了布伦德根据遥感数据划分的新的沙丘分类系统<sup>[1,2]</sup>。

\* 研究过程中得到美国地质调查局 G. G. Schaber, C. S. Breed, J. F. McCauley 及俄勒冈州立大学 A. J. Lewis 的帮助;与喷气推进实验室 C. Elach, R. Blom 及阿肯色大学 H. MacDonald 和 W. Waite 进行了有益的交流;姜建华、李小民同志参加了野外工作,在此一并致谢。



比例尺: 1:400万

图1 阿拉善高原地质草图。图中示出了六个研究区位置

Fig. 1 Simplified Geologic Map of the Alashan Plateau Showing Location of the Six Study Sites

I—亚玛雷克沙漠, II—腾格里沙漠, III—巴丹吉林沙漠, IV—双井子研究区, V—铁库乌拉研究区, VI—阿尔腾敖包研究区。R—基岩, N—第三系, Q—第四系

## 二、SIR-A 及 MSS 图象的计算机增强

SIR-A 是一部 HH 极化 L 波段合成孔径雷达, 以光学记录方式成象。雷达在机上给出记录地面目标回波相位和振幅信息, 从而获得表达其散射强度变化的数据胶卷, 然后在地面实验室利用光学相关器处理成图象胶片。

为有效地认识来自沙漠区的雷达散射特征, 研究中对 SIR-A 图象进行了数字增强处理, 同时, 对用作匹配分析资料的陆地卫星 MSS CCT 数据也作了计算机增强处理。

试验中, 首先对研究区雷达图象覆盖的  $2439 \times 4600$  个象元数字化, 对 SIR-A 资料主要进行高通滤波方法处理。与机载雷达图象一样, SIR-A 图象上最常见的缺点是斑点较多, 在沙丘区容易与沙丘的点状回波混淆, 用滤波方法处理, 可降低其斑点噪声。

滤波窗口的选择是重要的, 对 MSS 资料进行滤波处理, 选用  $101 \times 101$  窗口已成为常习<sup>[3]</sup>, 但对这种沙丘区, 航天雷达图象窗口的最佳选择无例可寻。为此, 研究中依此选用了  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$ ,  $25 \times 25$  及  $101 \times 101$  四个窗口。同时进行了分段滤波方法处理。由于在一些地物目标背景下, 雷达的后向散射强度会发生激烈变化, 象基岩、植被、建筑物等一类物体, 由于本身的高介电常数、高粗糙度及产生的角反射器效应, 会有很强的回波, 而平地、水面、干沙等一类目标, 则回波较弱。两类地物的 DN 值相差较大, 形成图象上的大反差, 显然对解译是不利的。分段滤波的原理, 是将数据的原始值与低通滤波值相除, 起到一个“平滑”的效果, 把相邻目标的高反差调整到适中。在本试验中, 分段滤波后的图象即反映了降低花岗岩的强散射与沙丘的弱回波造成的大反差的效应。研究证明, 这是处

理雷达图象的一种有效方法。

将 5 种方法处理出的图象结果进行评价,用  $5 \times 5$  高通滤波窗口及分段滤波后的图象质量是比较理想的。因此,试验中选择  $5 \times 5$  窗口滤波图象作为基本分析图象(图版 II 图 2)。

陆地卫星 MSS 图象是与 SIR-A 图象匹配分析的重要资料。除选用了一些地区的光学处理假彩色合成图象外,为突出沙丘形态,还采用了 1977 年 6 月的 CCT 磁带进行数字处理。选择对地质应用效果较好的 4、5、7 三个波段,首先对每一波段进行拉伸变换处理,然后进行三个波段的假彩色合成。洗印工序是在高清晰度彩色合成仪上完成的。处理结果十分理想,达到了增强的效果。在光学处理图象上不能反映的沙丘特征,在数字合成图象上得以逼真的显示。

### 三、沙漠的 SIR-A 雷达回波

SIR-A 在阿拉善高原区以  $N80^\circ W$  方向大致由东往西飞行,波束发射方向向北。覆盖宽度为 50 公里的两个条带平行穿越该区。下面分述三个沙漠研究区。

#### 1. 亚玛雷克沙漠

亚玛雷克沙漠位于阿拉善高原中部,其西部和南部分别为巴丹吉林和腾格里沙漠。SIR-A 图象对该沙漠的覆盖范围如图 1 所示。沙漠约 150 公里长,5 公里宽。来自 NW 方向的盛行风控制了沙丘由 NW 向 SE 的迁移趋势,成带状的沙丘,沿着其南由中生代花岗岩和混合花岗岩组成的迭布斯格乌拉山、和其北由古生代石英闪长岩及前震旦混合岩类组成的丘陵、准平原地带发育。平面透视时,该沙漠形成了一条“沙河”。亚玛雷克与巴丹吉林实际上是相连的,后者是前者的沙源,由 NW 向风将沙粒从巴丹吉林搬运至此地。

在光学处理的假彩色合成陆地卫星图象上,该沙丘仅仅显示为一条浅黄色的条带,数字处理假彩色合成图象,则突出了沙丘形态(图版 II 图 3),结合野外工作分析表明,该沙漠主要由复合型新月形沙丘链组成(图版 III 图 4),并含有少许星状沙丘。沙丘由非常细小的沙粒组成,高度一般为 10—30 米,个别星状沙丘可高达 70—80 米,沙丘落沙坡朝向平行于沙丘运移方向,整个沙丘区无任何植被。

图版 II 图 2 为这个地区的 SIR-A 图象。可以看到,沙丘带两侧的基岩有很强的回波,在雷达图象上显示明亮,低矮植被、岩石露头及其间布满沙的混合目标,在图象上表现为中等亮度。亚玛雷克沙丘带的回波十分低,整个沙带从 NW 至 SE 方向图象的 DN 值分段变化,表现为四个不同的 DN 值范围。

分析表明,随着沙丘落沙坡朝向的改变,及沙脊线与雷达波束之间夹角的变化,雷达图象的 DN 值,即图象灰度也在相应变化(表 1 及图版 II 图 2)。D 段因其由岩石露头与沙相间分布,因而显示出中等亮度的斑点状回波之特征区别于其它三段。基岩一般有较强回波,这已被大量工作及理论证实。A、B、C 三段含有同样类型的复合型新月形沙丘链(图版 III 图 5),偶尔有少量星状沙丘,没有植被存在,落沙坡朝向随沙带的走向变化。SIR-A 的飞行方向为  $N80^\circ W$ ,照射方向  $N10^\circ E$ ,雷达飞行方向和 A、B、C 三段落沙坡

朝向的夹角分别是  $50^\circ$ ,  $10^\circ$  和  $-20^\circ$ 。

表1 亚玛雷克沙漠的雷达成象参数

Table 1 Radar Image Parameters of Yamaleike Desert

段	灰度	落沙坡朝向	雷达波束与落沙坡夹角	沙丘类型
A	亮点状	S30°E	50°	复合型新月形链, 少许星状
B	中等亮点状	S70°E	10°	复合型新月形链
C	非常暗	N80°E	-20°	复合型新月形链, 少许星状
D	中等斑点状	S30°E	—	风吹沙, 基岩露头

从表1和以上讨论可以看出, 雷达回波的强弱, 即图象灰度的亮暗, 取决于雷达照射方向与落沙坡朝向之间夹角的变化。在  $50^\circ$  角时(表1 A段), 入射的雷达电波能量, 照亮大部分落沙坡表面, 产生相对强的回波;  $10^\circ$  角时(表1 B段)雷达波束仅仅照在落沙坡边缘, 回波较低; 在  $-20^\circ$  时(表1 C段), 雷达波照在沙丘的迎风面, 没有回波。金字塔形的星状沙丘在几个方向均有回波。当落沙坡方向垂直于雷达照射方向时, 沙漠显示出最强回波, 以下两节的分析更加强了这一论点。

## 2. 腾格里沙漠

该研究区实际分布范围, 为位于雅布赖山两侧沙丘的复合体(图1)。雅布赖山呈NE走向, 其西为巴丹吉林, 东为腾格里。为避免混淆, 我们将前者称北巴丹吉林, 后者称北腾格里。

强劲的西北风穿过浩瀚的巴丹吉林沙漠抵达雅布赖山西沿, 受山体的阻挡, NW 向风转为  $N30^\circ E$  方向, 即沿平行于山体走向的方向推进。由这种转向风形成的复合型新月形沙丘链的落沙坡, 朝向为  $N30^\circ E$ , 与巴丹吉林沙漠主体沙丘的 SE 朝向是不一致的, 这就是以上定义的北巴丹吉林沙漠。北腾格里沙漠同样也是由复合型新月形沙丘链组成的, NE 方向风将沙吹至雅布赖山北端, 由于不再有山体的阻挡, 因而继续受 NW 向风影响, 沙粒又重新向 SE 方向迁移, 其落沙坡朝向为  $N50^\circ E$ 。

在 SIR-A 图象(图版 IV 图8)上, 北巴丹吉林沙漠无回波, 北腾格里沙漠具有亮点状回波, 这种现象十分相似于亚玛雷克沙漠, 分别对应于它的 C 段和 A 段。对陆地卫星图象(图版 IV 图9)分析表明, 该研究区沙漠与亚玛雷克沙漠的特征是相同的, 二者均为复合型新月形沙丘链, 均无植被分布。因此, 它们的成象机理是相同的。北巴丹吉林沙漠由于其迎风坡面向雷达而无回波, 北腾格里沙漠, 其雷达波束与落沙坡朝向之夹角为  $60^\circ$ , 产生亮点状回波。

## 3. 巴丹吉林沙漠

位于阿拉善高原中偏西部的巴丹吉林沙漠(图1), 总面积约 44000 平方公里, 大部分沙丘都很高, 平均高度为 200—300 米, 个别地方达 500 米, 沙脊间距约 3 公里, 是世界上最高的沙丘, 已成为沙山<sup>[4]</sup>。

如前节所述, 该区的主导风为 NW 方向, 主要沙丘类型为复合型链状沙山, 沙山两侧发育有重叠的沙丘, 或称二级沙丘。二级沙丘在落沙坡上呈缓状起伏, 高度不大, 与沙山脊线成垂直或斜交关系。在迎风坡上发育较好, 高度由数米至 50 米, 越接近沙山上部越高。沙漠中分布有大大小小的湖泊二百多个, 最大的面积约 1.5 平方公里, 水深 6.2 米。

自湖边向外,依次分布有沼泽化盐生草甸和盐生草甸,前者宽数米至十几米,主要植物种属为海菲菜、海乳草等,后者宽 5—6 米,植物高大茂密,主要为芨芨草、芦苇及白灌丛等<sup>1)</sup>。

在巴丹吉林沙漠的 SIR-A 图象上,显示出大量的亮斑回波(图版 III 图 6)。回波类型可分为三种。

(1)新月形回波。呈短轴弓形状,形似新月。长轴平行于雷达飞行方向,即垂直于波束照射方向。这是该区最主要的回波类型;

(2)亮点状回波。它们相似于亚玛雷克沙漠的 A、B 段及北腾格里沙漠,这种亮点状回波一般分布在两个沙脊线之间;

(3)圆圈状回波。主要是围绕着湖泊周围的回波。

在陆地卫星图象上可以比较容易地辨认出这些沙山的几何形状(图版 III 图 7),空中照片更清楚地显现出它们的实际特征。MSS 图象表明,沙山的脊线方向为 NNE,落沙坡朝向是 SSE。这说明 SIR-A 图象未能真实地反映出该沙山的形态<sup>[5]</sup>。比较分析 MSS 和 SIR-A 图象发现,三种回波各有不同的成因。新月状回波是面向雷达照射源,即面向南的落沙坡引起的,落沙坡背向照射源时无回波出现;亮点状回波来自于面向照射源的二级沙丘,它们的大小类似于亚玛雷克沙漠,因此有相似的回波;环湖的植被为海菲菜、芦苇、芨芨草等,因其相对高的介电常数和粗糙度而呈亮的圆圈状回波。

#### 四、沙漠的 SIR-B 雷达回波

在 SIR-A 的基础上,发展成的 SIR-B 系统,变换了部份参数,成为一部工作性能更加完善的雷达。表 2 将它们作了比较。从表 2 可以看出,SIR-B 的波长、极化方式与 SIR-A 是相同的,重要的是几何参数上两点改变。一是其视角不再是固定的,而是在 15°—60° 范围内变化,这意味着对应于不同的探测目标,可选择其中最佳视角图象。随着视角的改变,距离分辨力、覆盖宽度、信噪比及动态范围全部随之变化。距离分辨力可得到成倍的提高,如在 47° 视角时,距离分辨力将由 SIR-A 的 40 米变为 SIR-B 的 20 米。二是采用了实时数字记录,SIR-B 在航天飞机上获取的所有的数字资料,通过跟踪及数据中继

表 2 SIR-A 和 SIR-B 成像参数比较

Table 2 Image Parameters Comparison between SIR-A and SIR-B

成 象 参 数	SIR-A	SIR-B
飞行高度(公里)	260	352,274,225
极 化	HH	HH
波 长(厘米)	23.5	23.5
视 角(度)	47	15—16
覆盖宽度(公里)	50	20—50
距离分辨力(米)	40	14—46
方位分辨力(米)	40	20—30
数据处理方式	光学处理	数字处理,部分光学处理

卫星(TDRS)的 Ku 波段天线传送至地面接收站,每秒 46 兆比特数据率的 SIR-B 数据,可以容易地由每秒传送 50 兆比特的 Ku 波段卫星进行实时传输。数字记录方式可使得对雷达数据进行的定量分析<sup>[6]</sup>,比光学成象的 SIR-A 数据更能准确地反映回波性质。

此外, SIR-B 在中国北部大致以平行于经度的方向飞行。这个方向与大约沿纬度方向飞行的 SIR-A 方向垂直,换句话说,它们的电波发射方向亦是垂直的。两部雷达的航线在亚玛雷克东部双井子一带相交,同一地区发射电波基本垂直的雷达图象的复合,给我们的对比分析研究带来了很大的便利。

亚玛雷克沙漠由西向东成带状展布,在沙漠东端双井子附近,受到 NNE 走向狼山山系的影响,流动沙减少。风吹沙翻越山体后,以沙原形式存在于地表,在离山体 15 公里远处,又开始形成新月形沙丘,落沙坡朝向  $S60^{\circ}E$ 。在计算机增强的 MSS 图象上,可以比较容易地识别出这些特征。

在 SIR-A 图象上,双井子新月形沙丘象其西部的沙原一样, DN 值趋向于图象上的最小,没有任何存在沙丘的迹象(图版 V 图 10)。小沙原对 L 波段雷达呈镜面反射,入射电波全部反射掉,没有回波,因此在图象上呈暗色调。新月形沙丘为什么也没有回波呢?由分析可知, SIR-A 电波束仅照在迎风坡上,这些沙丘在 SIR-B 图象上得到了清楚的显示(图版 V 图 11)。落沙坡朝向是  $S60^{\circ}E$ , SIR-B 的照射方向为  $N70^{\circ}W$ ,波束方向基本上是垂直于落沙坡朝向的。与此相同性质的腾格里沙漠南缘的大面积新月形沙丘亦是 SE 朝向,在 SIR-B 图象上也显示出密集的亮点状回波。

前已述及, SIR-B 与 SIR-A 的波长、极化是相同的,在这种情况下,视角、分辨力的轻微差别亦不会是重要的影响因素,因此以入射波束接近垂直的两部雷达对同一沙丘的不同成象效果,更有力地证明了只有落沙坡朝向雷达时有回波,迎风面没有回波,雷达照射方向对刻画沙丘有重要影响。

## 五、次地表岩石的雷达散射

亚玛雷克东端的铁库乌拉地区,是一个长 10 公里、宽 2 公里北东走向的谷地,其北沿山脉由前震旦纪混合岩类组成,南沿为前震旦纪片麻岩、石英岩类,谷地表面广泛分布分选精细的薄层沙质冲积物。

两侧基岩均有较亮的雷达回波,冲积谷地基本无回波,图象上显示很暗,而中间部分是亮的(图版 II 图 2 右上侧)。光学处理的 MSS 图象上显示谷地表面仅由单一的冲积物质组成,没有任何存在岩石露头的痕迹,在数字合成的 MSS 图象上,也仅在强反射背景下显示出两个弱反射斑点(图版 II 图 3 右上侧)。

经推算, SIR-A 图象上四平方公里面积内有回波。数字记录成象的 SIR-B 图象上呈现出更强的回波(图版 V 图 11 左上侧)。计算机处理的 MSS 图象上显现的两个小斑点,是不可能产生如此大面积的雷达回波的。显然,这种散射能量来自近地表地质体, MSS 图象上呈现的两个小斑点是基岩的显示,即白垩系砂砾岩的反射,因此,可推断 SIR-A 和 SIR-B 图象上的大面积回波均来自这种砂砾岩。雷达穿透了覆盖在它上面的薄的冲积层,因而,探测到了它的存在。

类似的另一研究区是位于铁库乌拉以西约 100 公里的阿尔腾敖包地区。SIR-A 图象上,清晰呈现一三角形亮回波体,从亮度和纹理看,这是该区固有的基岩散射特征(图版 V 图 12)。在陆地卫星图象上,这一三角形分解成了三个部分,上端及下部是基岩的显示,中间很明显是一条风吹沙带(图版 V 图 13)。有意义的是在 1971 年出版的 1:50 万宁夏地质图上,该沙带被描写为风吹沙分布区,说明 MSS 提供的信息与地质图是完全吻合的。那么,这个沙带在 SIR-A 图象上显示的基岩特征又如何解释呢?看来, SIR-A 亦穿透了该区的沙层,亮的回波来自其下的岩石。

地质资料表明,阿尔腾敖包三角区上下端的基岩,分别为前震旦纪变质岩和中生代花岗岩类。中间沙层下为片麻岩,上有约 2 米厚的沙层覆盖。该区冬季气温低于  $-20^{\circ}\text{C}$ ,夏季干沙表面温度可达  $74^{\circ}\text{C}$ ,恶劣的气候条件,造成了岩石的强烈风化剥蚀,从巴丹吉林沙漠吹来的沙覆盖其上,表面平滑,象 MSS 图象上所显示的,而下伏基岩,由于粗糙度和介电常数较大,形成了强散射体。

长波段雷达穿透理论已被一些研究所证实。近年来, McCauley<sup>[7]</sup> 和 Blom<sup>[8]</sup> 等曾相继报道了航天雷达的穿透能力。通过对 SIR-A 及 Seasat 雷达图象的分析,他们分别发现了一些干沙埋藏下的古河道及被冲积物覆盖着的岩墙。1984 年 10 月与 SIR-B 飞行同步,喷气推进实验室的研究人员也发现,他们掩埋在内华达地区沙层下 2 米的雷达响应器,对 SIR-B 脉冲有尖锐的回答。

理论研究表明,雷达穿透表层的条件,一是要求表层颗粒细,二是厚度小,三是要非常干燥。从上述已知,铁库乌拉及阿尔腾敖包地面能满足前两个条件。气象资料告诉我们,阿拉善高原的平均年降雨量在 150 毫米以下,个别地区甚至低于 10 毫米,干燥度 4—12,其中与阿尔腾敖包相邻的巴丹吉林沙漠,干燥度达 7—12,蒸发量为降水量的 31.5 倍,表明该区异常干燥。因此也满足第三个条件。以上讨论说明,航天飞机雷达已分别穿透了铁库乌拉和阿尔腾敖包地区薄的冲积层和沙层,具有探测次地表基岩的能力。

## 六、两类地物回波的理论考虑

上述分析说明了 SIR-A 及 SIR-B 对沙丘的成象特征及穿透性能。显然,沙丘对雷达波的响应机理有异于基岩、植被一类“常规”地物。1980 年,我们曾对我国若干地区沉积岩、火成岩及变质岩三大岩类 20 个岩石标本进行了介电常数  $\epsilon$  的测定,其平均值为 6.67,干沙  $\epsilon$  的平均值为 3。另外,由于沙丘表面存在有沙波纹,其表面粗糙度与基岩没有重要区别。换言之,沙丘与其它地物的介电常数和粗糙度的差异,虽然是影响雷达回波的重要因素之一,但不是最主要的。笔者认为,引起回波差异的最主要的因素是沙丘的几何形态和沙丘与雷达的相对位置,其次是沙丘的疏松性,后者导致吸收了更多的人射电波能量。

正如大家所熟知的,典型新月形沙丘的落沙坡角度近似一个常数—— $32^{\circ}$ ,迎风坡角度一般远远低于此值,许多不到  $10^{\circ}$ 。理论研究表明,对于均一介质,当电波垂直照射于该表面时,回波最强。对侧视雷达而言,即工作俯角  $\beta$  与坡度角  $\alpha$  之和等于  $90^{\circ}$  时,也就是在入射角  $\theta$  为  $0$  的情况下,可以满足这个条件(图 14)。亦如所知,雷达俯角是其视角的

余角,因此, SIR-A 的俯角为  $43^\circ$ , 则  $\alpha + \beta = 75^\circ$ , 这与  $90^\circ$  理论值相差  $15^\circ$ 。从两个方面可解释引起回波的原因。一是叠置在  $32^\circ$  落沙坡之上, 分布着次级沙丘及波纹, 使实际的散射面角度比归一的  $32^\circ$  更大, 因而更逼近于  $90^\circ$ ; 二是  $90^\circ$  是最大散射强度条件值, 实际上回波能量是在以  $90^\circ$  为中心的一定范围内变化的,  $90^\circ$  只是可以达到最强散射值的极限条件。

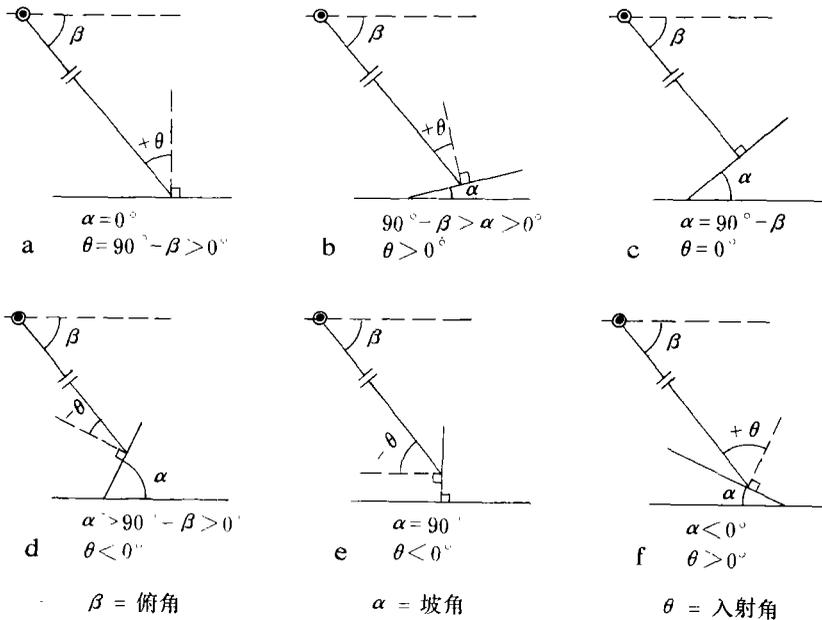


图 14 俯角、入射角、坡角之间的关系

Fig. 14 Relationship Among Depression Angle, Incident Angle and Slope Angle

用上述理论来解释三个沙漠的回波机理就比较容易了。落沙坡垂直于波束方向有最强回波是因为  $\beta + \alpha$  值最大; 雷达斜射落沙坡时回波能量小, 是因为此时坡度角为视角,  $\alpha$  值小, 相应地散射面也小; 当雷达波照射在迎风坡上时, 因  $\alpha$  值过小, 迎风坡成为一镜面反射体, 因而没有任何回波。这就回答了研究初期按常规地物建立散射模型而导致错误结论的原因。

雷达的穿透理论是一个十分复杂的问题, 也是许多学者长期以来探求的课题。对于阿拉善高原地区的穿透现象, 笔者认为可结合伊拉奇雷达散射模型来解释<sup>[9]</sup>。象铁库乌拉和阿尔腾敖包地区这样干燥均一的沙层, 是一种低损耗层, 这样就导致了微波脉冲向沙层下部入射, 此时在空气与沙层界面会发生电波的折射。折射的结果, 入射角变小。这个角度就是电波抵达沙层与基岩界面时的入射角。如前所述, 入射角越小, 回波越强。于是, 表面被干沙覆盖的地质体, 在雷达图象上反而可以起到增强成象的效果。研究表明, 在大入射角和 HH 极化条件下, 穿透现象比较明显, SIR-A 则具备了这些条件。

## 七、结 论

航天飞机雷达图象上无植被沙丘的回波来自朝向雷达波束的落沙坡,其回波强度随雷达波束与沙脊线夹角的增大而减弱,落沙坡朝向垂直于雷达波束时有最强回波,背向雷达时无回波。二级沙丘有同样的散射机理。雷达照射方向是刻画沙丘的关键参数。

航天飞机雷达对薄的冲积物及干沙具有穿透、从而发现基岩的能力,同一下伏地质特征,用陆地卫星图象不能发现。因此,用 L 波段雷达研究我国干旱区次地表地质是一种有潜力的手段。

## 参 考 文 献

- [1] C. S. Breed and T. Grow, "Morphology and Distribution of Dunes in Sand Seas Observed by Remote Sensing," In a Study of Global Sand Seas, ed. E. D. McKee, pp. 253—302, USGS professional Paper 1052, 1979.
- [2] C. S. Breed et al., "Regional Studies of Sand Seas Using Landsat (ERTS) Imagery," In a Study of Global Sand Seas, ed. E. D. McKee, pp.305—398, USGS Professional Paper 1052, 1979.
- [3] M. J. McDonnell, "Box-Filfering Technigues", Computer Graphics and Imaging Processing 17, PP. 65—70, 1981.
- [4] A. S. Walker, "Deserts of China," American Scientist, Vol. 70, pp. 366—376, 1982.
- [5] J. B. Cimino, J. P. Ford and C. Elachi, editors, "The Shuttle Imaging Radar-A (SIR-A) Experiment", JPL Publication 82—77,1982.
- [6] C. Covault, " Challenger Crew Obtains Significant Science Data, " Aviation Week and Space fechnology, pp. 16—19, 1984.
- [7] J. F. McCauley, G. G. Schaber, C. S. Breed, M. J. Grolier, C. V. Haynes, B. Issawi, C. Elachi and R. Blom, Subsurface Valley and Geoarcheology of Eastern Sahara revealed by Shuttle Radar, Science, Vol. 218, pp. 1004—1019,1982.
- [8] R. Blom, R. E. Crippen and C. Elachi, "Detection of Subsurface Features in Seasat Radar Images of Means Valley, Mojav: Desert, California," Geology, Vol. 12, pp. 346—349,1984.
- [9] C. Elachi, L. E. Roth, and G. G. Schaber, "Spaceborne Radar Subsurface Imaging in Hyperarid Regions," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-22, No.4, pp.383—388, 1984.

## Space Shuttle Radar Response from Sand Dunes and Subsurface Rocks of Alashan Plateau

Guo Huadong

*(Institute of Remote Sensing Application Academia Sinica)*

### Abstract

SIR-A and SIR-B images of three sand dunes and two bedrock regions in Alashan Plateau of north central China have been studied and compared to the digital processing Landsat imagery and field investigation data. The results of the study show that radar illuminating direction is a key factor, which results in the echo strength change for the same type and size of sand dunes. The sand dunes in which the slipfaces are oriented to radar beam have a bright-point response and the dunes in which the gentle slopes face the radar beam have a dark signature on the radar images. Two Precambrian metamorphic rock bodies buried beneath the thin layer of alluvial material or aeolian sand have been detected by using the spaceborne radar imagery. A preliminary scattering model was given to explain the imaging mechanism.

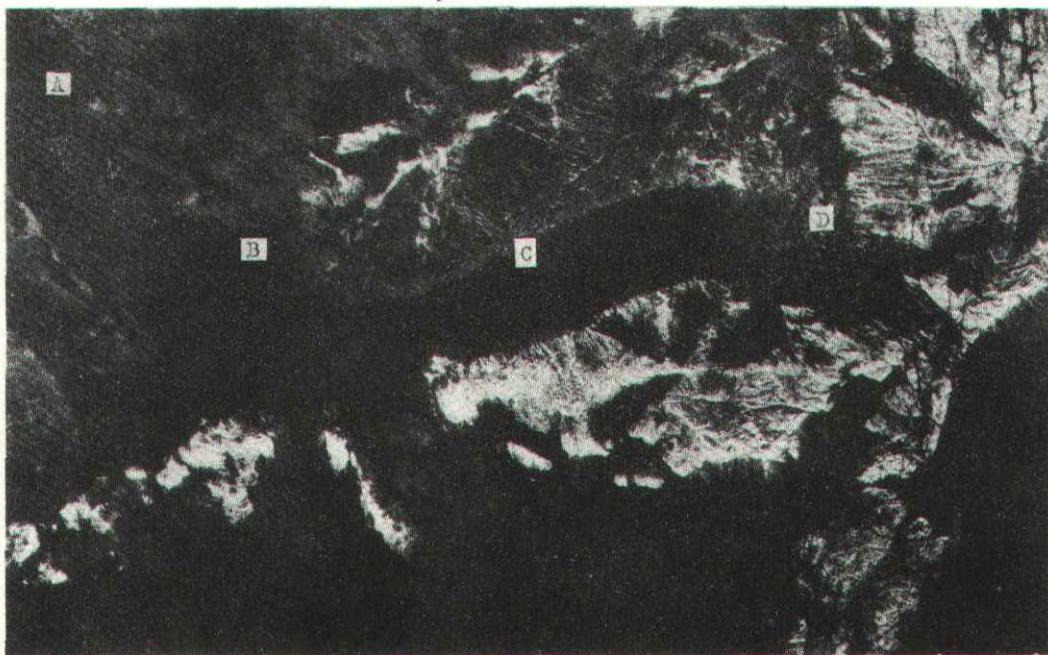
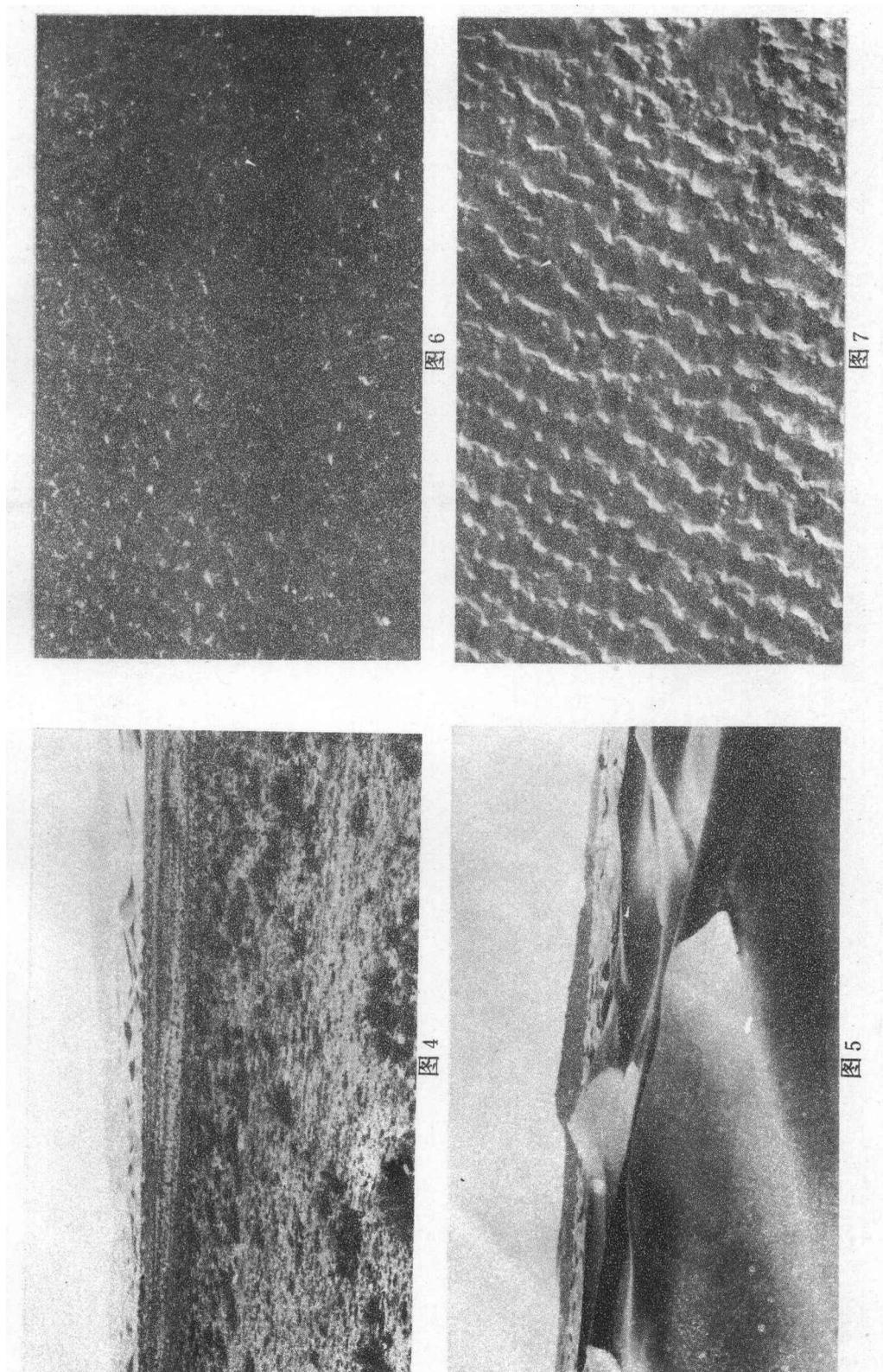


图 2



图 3



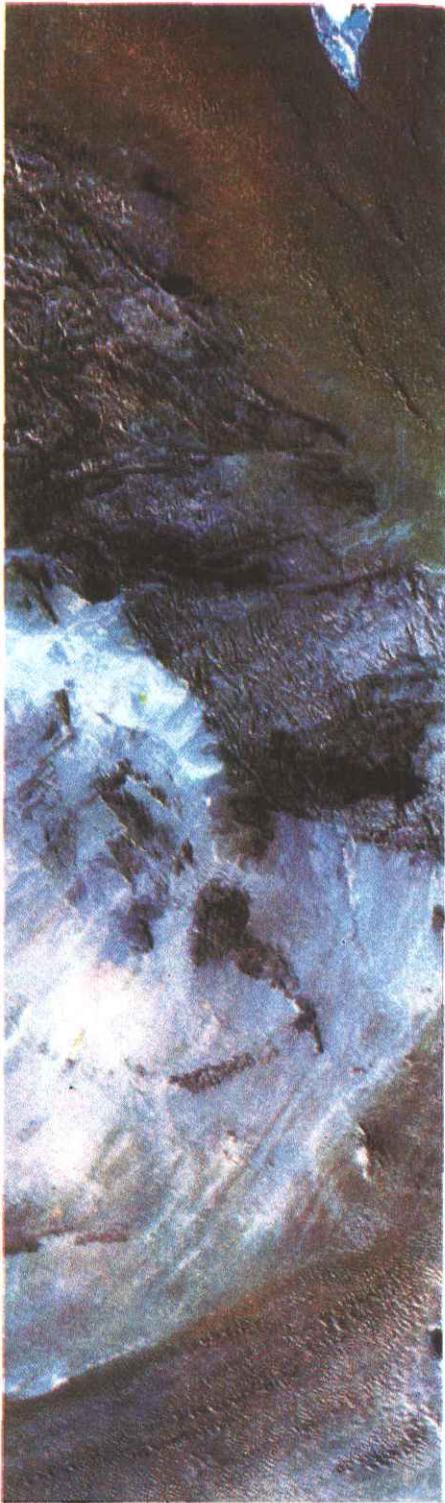


图 9

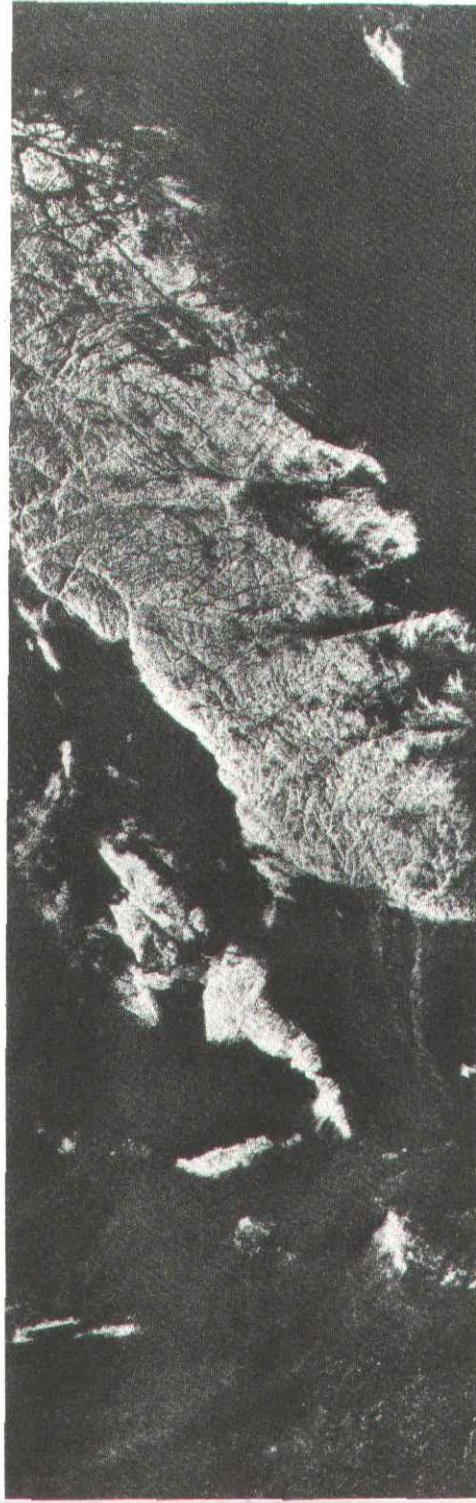


图 8

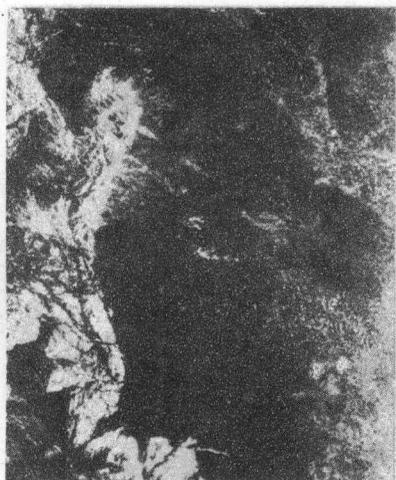


图11



图10



图12



图13