

文章编号: 1007-4619 (2002)05-0334-05

# SAR 干涉测量的相干性特征分析及积雪划分

李 震, 郭华东, 李新武, 王长林

(中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 雪盖面积是高山地区和季节雪盖区水文、气象模型的重要输入因子。SAR 干涉测量不仅能够生成高精度的 DEM, 而且能够通过重复轨道雷达信号的相干性来探测地表覆盖的变化。通过分析比较四景重复轨道 ERS-1/2 的 SAR 图像发现, 裸岩、裸地、灌丛等未受到扰动的地表相干性高, 湖面、雪盖等变化明显的地表相干性低。积雪覆盖后的地表面, 其相干性急剧降低, 利用其相干性特征可以进行积雪划分。根据上述特性, 利用地物的散射强度和 SAR 重复轨道的相干测量进行雪盖划分, 分类精度达到 82%, 结果表明利用 SAR 干涉测量的相干性特征进行雪盖制图是可行的。

**关键词:** SAR 干涉测量; 相干度; 散射特性; 积雪划分

**中图分类号:** TP79      **文献标识码:** A

## 1 引 言

雪盖的高反射特性使其成为决定地球辐射平衡的关键因子, 是区域和全球气候变化的重要内容之一。雪盖的空间分布是山区和季节雪盖区水文、气象模型的重要输入因子。监测雪盖面积对了解全球水循环、气候变化、水资源调查有重要的意义。由于雪的高反射特性, 利用遥感技术来获取雪盖信息多采用可见光、红外通道数据。由于 SAR 具有穿透云层、全天候、部分穿透性及高分辨率的能力, 近年来 SAR 在冰雪遥感领域有了更广泛的应用<sup>[1]</sup>。SAR 干涉测量技术(InSAR) 不仅能够生成高精度的 DEM<sup>[2]</sup>, 而且能够通过重复轨道雷达信号的相位差信息和相干性特征来探测地表覆盖的变化<sup>[3-4]</sup>。目前在卫星平台上进行的干涉测量主要是采用重轨干涉测量技术(repeat pass interferometry), 即利用同一系列雷达天线在相同地区重复轨道获取数据来实现, 它要求所获取的相同地区数据之间必须具有一定的相干性, 才能提取有效信息开展进一步的分析应用。

当前, SAR 进行雪盖制图主要采用单轨的单频率、单极化和多频率、多极化方法。由于干雪与裸地、

矮植被很难区分, 这些方法只能分出湿雪<sup>[5]</sup>。新的研究表明, 即使是湿雪, 其在 C 和 X 波段的散射强度和极化特性也与光滑的干土层、冲积面等地表相同<sup>[6]</sup>。积雪覆盖后的地表面, 其相干性发生了很大的变化, 利用其相干性变化特征我们可以进行积雪划分。本文通过比较重复轨道 ERS-1/2 的 SAR 图像, 分析不同地表的相关性特征。根据相干性特征, 利用地物的散射强度和 SAR 重复轨道的相干度测量, 进行雪盖划分的方法研究, 建立利用 SAR 重复轨道的相干度划分雪盖的方法。

## 2 实验区与实验数据

实验区位于昆仑山脉中段北坡, 北纬 35°56'—36°35', 东经 90°32'—91°44'。平均海拔高度 4892m, 属大陆性干旱—半干旱气候, 冬春季有降雪过程。实验区南部是新青峰冰帽, 由 46 条各种形态的冰川组成山地冰川组合体系, 中部有大量的冰川群, 分布着不同类型的冰川, 冰川上部存在常年不化的积雪<sup>[7]</sup>, 北部有少量的戈壁, 还包括山前冲积扇、河沟、内陆湖等, 区内主要土地类型有灌丛、湖泊、戈壁、裸岩、裸土、冰川、积雪等。图 1 是实验区 1998 年 3

收稿日期: 2001-04-10; 修订日期: 2001-07-19

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(批准号:KZCX2-303, KZCX1-10-06)、国家自然科学基金(批准号:40001015, 49989001)和中科院遥感所开放室知识创新项目(CX000019)资助。

作者简介: 李震(1966—), 男, 副研究员, 1988年毕业于武汉测绘科技大学, 1998年获中科院兰州冰川所理学博士学位, 主要从事冰雪遥感、微波遥感研究, 已发表论文 30 余篇。Email: zli@irsa.irsas.ac.cn



图 1 试验区 1998 年 3 月 27 日的 ERS-2/SAR 散射强度图像

Fig.1 The ERS-2/SAR scattering intensity image at test site in Mar.27, 1998

月 27 日的 SAR 图像,图中标出了 5 类不同地物类型的测试区。

实验数据为 ERS-1/2 卫星的单视复数 (SLC)SAR 数据,成像波段为 C 波段(5.67cm),天线发射和接收均为垂直(VV)极化方式。雷达波在图像中心的入射角约为 23°,图像的大小为 120km × 110km。空间像元大小,距离向约为 8m,方位向为 4m,距离向和方位向的分辨率分别为 10m 和 5m。数

据包括成像时间相差一天的串接(TANDEM)数据和普通 SLC 格式的 SAR 数据,时间分别为 1998 年 3 月 27 日、5 月 1 日、9 月 17 日和 18 日(表 1)。3 月 27 日实验区内部分地表有积雪覆盖,海拔高的地区覆盖范围较广;5 月和 9 月份的数据冰川上部有积雪覆盖,大部分地区无积雪。除此而外,还收集了实验区 3 月 16 日和 4 月 1 日的 LANDSAT/TM 图像,以此作为地表覆盖类型和积雪划分的参考和依据。

表 1 试验区 ERS-1/2 干涉 SAR 数据像对的基本参量

Table 1 The basic parameters of ERS-1/2 SAR interferometric pairs at test site

像对序号	日期(1998 年)	轨道号	垂直基线/m	水平基线/m	时间间隔/天	入射角/(°)	像对倾角/(°)
1	3.27-5.01	15332-15883	-251.4	-124.3	35	23.28	0.0048
2	3.27-9.17	15332-37510	746.1	334.4	175	23.32	0.0046
3	9.17-9.18	37510-17837	302.4	196.2	1	23.30	0.0019

### 3 地物相干特征分析

重轨干涉测量数据的相干性是干涉测量最重要的参数之一,它用相干度(degree of coherence)来表示,相干度用下式表达<sup>[8]</sup>:

$$\rho = \frac{|\langle s_1 \cdot s_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle s_1 \cdot s_1^* \rangle \langle s_2 \cdot s_2^* \rangle}} \quad (1)$$

$s_1$ 、 $s_2$  分别表示重轨干涉测量获取的数据,重轨干涉测量雷达数据都是复数形式。其中  $\langle \cdot \rangle$  表示期望值,\* 表示复数共轭,并且  $\langle s \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i$ ,表示图

像窗口的期望值。据此,可以计算出两数据相应像元的相干度。相干度的范围在 $0-1$ 之间, $0$ 表示不相干, $1$ 表示完全相干。

理论和实验研究表明干涉测量的相干性是由于干涉像对的时间间隔、空间基线、地形效应和系统噪声等四个方面的因素决定的,通常时间越长,相干度越低;空间基线越短,相干度越高<sup>[9]</sup>。时间间隔的差异是由于下垫面散射特征的变化导致的相干性差异,利用这种差异,同时考虑不同地物的后向散射特征,可以进行地物分类。我们计算了1998年3月至9月期间几种不同地表类型在不同时间间隔的相干度(表2)。

表 2 实验区不同时间间隔、  
不同地表类型地物的相干度

Table 2 The coherence degree of interferometric pairs  
for different types in test site at different

类 别	相干度		
	3.27-5.01	3.27-9.17	9.17-9.18
积雪	0.08	0.10	0.31
裸岩	0.76	0.09	0.83
裸土	0.62	0.29	0.68
灌丛	0.44	0.11	0.62
冰川	0.24	0.07	0.46
湖泊	0.07	0.05	0.13
戈壁	0.50	0.33	0.74

从表2中可见,9月17日与9月18日之间时间间隔短,基线较短,故有较高的相干度,除湖泊、积雪和冰川外,其它地物的相干度都大于 $0.6$ 。湖泊由于风力的作用,表面粗糙度即使在较短的时间内也会有较大的变化,积雪和冰川在夏季会由于融化过程导致表面有所变化,故相干度相对较低;其它地物相干度较高,并随稳定性增加而增加(图2c)。3月27日与9月17日之间,由于时间间隔长,基线距离大,所有地物的相干度都小于 $0.35$ ;其相干度图像(图2b)除上部

河道两侧相对较高以外,其余部分都很低,不能提取任何信息。3月27日与5月1日之间,由于时间间隔相对较长,基线相对较短,其相干度相对较低,不同地物由于其变化程度不同表现出不同的相干度特征。积雪覆盖地区由于地表覆盖前后差别较大,相干度较低;湖泊的相干度同样也很低;裸岩、裸土、灌丛和戈壁的相干度较高;冰川表面会根据其运动变化的大小而导致相干度的变化。

## 4 积雪分类与结果

从上述分析可以发现,短时间间隔的SAR相干度图像中,仅积雪覆盖区和湖泊的相干度急剧下降。利用这一特性,结合不同地物的后向散射特征,可以进行积雪划分。

本实验利用3月27日-5月1日的相干度图像,采用较简单的阈值划分方法,可将雪盖和湖泊与其它地物划分开来。再根据积雪与湖泊在散射强度上巨大的差异,在散射强度图上将二者区分开来,达到积雪划分的目的。分类过程的第一步是将相干度进行判别,共分为两类。当像元的相干度值小于 $0.1$ 时,归到积雪水体类;当像元的相干度值大于 $0.1$ 时,归到其它类别。分类过程的第二步是将3月27日的强度图像进行水体划分。当像元的强度值小于 $32$ 时,归到水体类;当像元的强度值大于 $32$ 时,归到其它类别。第三步将积雪水体类与提取的水体类别相减,即得到积雪覆盖图(图3)。

积雪分类结果与TM积雪覆盖图进行比较,积雪分类精度达到 $82\%$ 。图4显示的是利用上述方法划分的积雪分布图,其中,图4(a)是9月17日与9月18日相干度、3月27日与5月1日相干度、3月27日强度图的合成彩色图像,图4(b)是利用相干度和强度图像划分的积雪覆盖图,图4(c)是TM分类结果图。

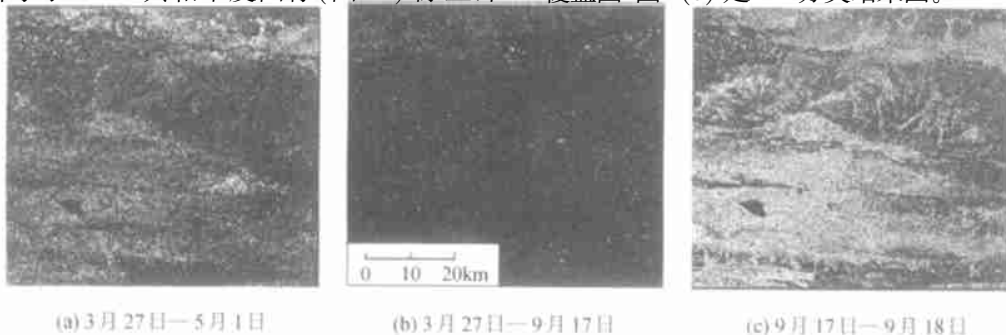


图 2 研究区不同时间间隔相干度图像

Fig.2 The images of coherence degree for different time interval at test site

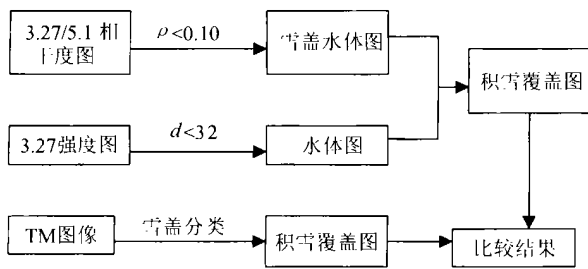


图3 积雪分类流程图

Fig.3 The procedure diagram of snow cover classification with coherence image and intensity image

## 5 讨论与结论

(1) 重轨SAR干涉测量中,相干度与时间间隔、

基线长度有密切的关系。基线越短,时间间隔越短,相干度越高。地表特性变化大的地物类别有较低的相干度,如湖泊、冰川;相反地表特性变化小的地物类别有较高的相干度,如裸岩和干燥裸土。

(2) 结合不同地物的散射特性,重轨SAR干涉测量雷达数据可以用于地物类别划分。分类过程中,要考虑基线的去相关作用,尽可能选择基线间隔短的数据。

(3) 利用SAR干涉测量的相干度可用来探测地表的变化特征。相干度划分积雪覆盖方法简单可行,但应用过程中,应考虑时间的去相关作用。尽可能选取时间间隔短,前后有雪和无雪的数据,若有间隔期内雪盖变化很大,而其它地物变化不大的影像最为理想。

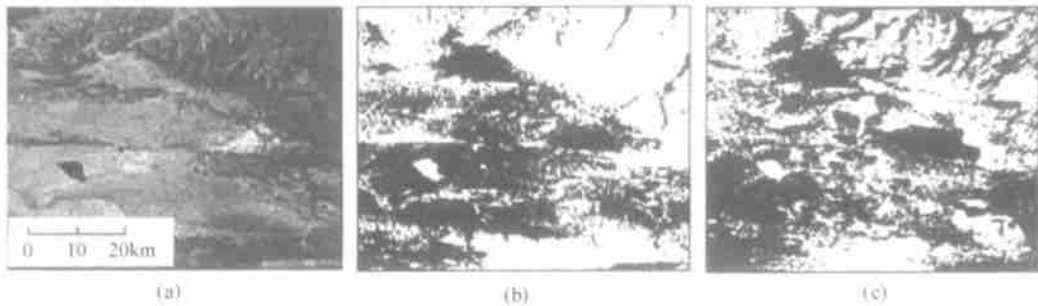


图4 SAR相干度和强度合成及积雪分类比较图

Fig.4 The composition image of SAR coherence degree and intensity, and the comparison of the snow mapping result

(4) 考虑到地形和系统噪声的去相关作用,对于多种地表类别的划分,还应进一步对SAR数据进行定标处理,结合地物的后向散射系数,进一步研究后向散射和相干度的关系

## 参考文献 (References)

- [1] Fily M, Dedieu J, Surdyk S. A SAR Image Study of a Snow-covered Area in the French Alps[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **51**:253-262.
- [2] Zebker H A, Goldstein R M. Topographic Mapping from Interferometric Synthetic Aperture Radar Observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, **91**(85):4993-4999.
- [3] Massonnet D, Rossi M, Carmona C, et al. The Displacement Field of the Landers Earthquake Mapped by Radar Interferometry[J]. *Nature*, 1992, **364**:138-142.
- [4] Remi M, Rignot E. Flow of Glacier Moreno, Argentina, from Repeat-pass SIR Image Comparison of the Phase Correlation Method with Radar Interferometry[J]. *Journal of Glaciology*, 1999,

**45**(149):93-100.

- [5] Li Z, Zeng Q, Sun W. The Study of Snow-cover Mapping with SAR Image in Tianshan Mountain[J]. *Journal of Glaciology and Permafrost*, 1996, **18**(4):366-372. [李震, 曾群柱, 孙文新. 山地区SAR数据雪盖制图研究[J]. *冰川冻土*, 1996, **18**(2):366-372.]
- [6] Shi J, Dozier J. Mapping Seasonal Snow with SIR-C/X-SAR in Mountainous Areas[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1997, **59**(2):294-307.
- [7] Li Z, Sun W, Zeng W. Measurements of Glacier Variation in the Tibetan Plateau Using Landsat Data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, **63**(3):258-264.
- [8] Zebker H A, Villasenor J. Decorrelation in Interferometric Radar Echoes[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, **30**(5):950-959.
- [9] Lu Z, Freymueller J T. Synthetic Aperture Radar Interferometry Coherence Analysis over Katmai Volcano Group, Alaska[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, **103**(B12):29,887-

## SAR Interferometry Coherence Analysis and Snow Mapping

LI Zhen, GUO Hua-dong, LI Xin-wu, WANG Chang-lin

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

**Abstract:** For climatological and hydrological investigations, the areas covered by snow and their spatial variability are important parameters, particularly in alpine regions. Snow and ice also play important interactive roles in the regional climates through its effect of increasing surface albedo. The interferometric SAR technique not only can produce a high-resolution digital elevation models, but also can detect the changes in the surface over the orbit repeat cycle from the correlation properties of the radar echoes. With or without the snow cover, the measurement of interferometer correlation will be shown great difference over, which time describes processes occurring on the time scales of the orbit repeat time and size scales on the order of a radar wavelength. Except backscattering intensities in each scene and their changes between two passes, the coherence measurement between repeat pass will provide another useful measurement for mapping snow covers over large areas.

We compare four ERS-1 repeat pass SAR image in the Tibet plateau test area, the first one in March (with snow), the second one in May (without snow), the rest two is a tandem in September (without snow). The result shows that if the ground is completely undisturbed between viewings the signals will be highly correlated. Otherwise, the decorrelation will occur. Lake and snow cover have very low coherence between two data-tades with and without snow cover, and the coherence measurements from the bare surface and the short vegetation are significantly higher. On other way, the entire target may show very low coherence if there are great decorrelations due to other parameters, such as spatial baseline, rotation and temporal. We will demonstrate the method and result for snow mapping by using both backscattering and coherence measurements with repeat passes ERS-1 image data at the Kuntunshan Mountain, the Tibetan plateau ( $36^{\circ}03'N$ ,  $91^{\circ}00'E$ ). For validation of this method, we compared classification result with that derived from TM image. An accuracy of better than 82% can be achieved if we consider the classification result from TM image as the ground truth. The results show that the coherence measurements provide an effective way to map snow-covered area.

**Key words:** SAR interferometry; coherence degree; scattering characteristic; snow mapping