

合成孔径雷达影像提取雪盖信息研究*

李 震 曾群柱

(中国科学院兰州冰川冻土研究所 兰州 730000)

摘 要 在分析合成孔径雷达(SAR)成象机理及雪盖参数散射特性的基础上,利用航天飞机承载的成象雷达(SIR-C)获取的多波段、多极化 SAR 数据,进行提取雪盖信息的实验。结果表明 C 波段 HH、VV 影象能很好地区别湿雪与非雪盖区,而区分干雪与岩石较困难;L 波段 HH、VV 影象较容易将雪盖同其它物体区分开;C、L 波段的交叉极化 HV、VH 区分干雪与岩石效果很好。故利用多波段、多极化 SAR 进行雪盖制图是可行的。

关键词 合成孔径雷达,后向散射,雪盖提取

1 引 言

雪盖在气候系统与气象研究中是非常重要的。在水文研究中,模拟和预报融雪径流都要求了解雪盖信息及其空间变化情况,而确定雪盖的范围与雪的干、湿状况是最基本的要求。利用遥感技术获取雪盖信息在可见光、红外通道与被动微波方面应用较多。由于微波具有穿透云层的能力,主动微波传感器——合成孔径雷达(SAR)又具有较高分辨率,故 SAR 的应用以全天候、部分穿透性及高分辨率的优势成为冰雪遥感中最有希望的技术之一。

合成孔径雷达数据用于提取雪盖信息在 80 年代已有报道^[1]。随着电磁波理论、电子技术及雷达技术的发展,SAR 更频繁地用于雪冰研究^[2,3]。近年来,多极化、多频率的 SAR 数据为提取雪盖信息提供了更多的选择,使研究者通过分析比较能找出适于提取雪冰信息的最佳方法。美国航空航天局(NASA)于 1994 年 4 月和 10 月在航天飞机上承载成象雷达(SIR-C),获取了多极化、多频率的 SAR 数据。本研究利用这次飞行获取的 SAR 数据,进行雪盖制图的方法研究。

2 理论基础

微波遥感是利用微波波段的电磁波与物质相互作用(表面散射、体散射和辐射)的传输特征获取数据,以识别目标形态和特征。主动微波遥感则是由天线发射信号,到达目标后被散射,由接受天线和接收机测得来自特定方向的散射信号。

微波信号传输的雷达方程^[4]为:

* 本研究得到加州大学施建成博士悉心指导,谨致谢意。

收稿日期:1995 年 6 月 26 日;收到修收稿日期:1995 年 8 月 2 日

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t}{L_t} \cdot \frac{1}{4\pi r_t^2 L_{m,t}} \cdot \sigma_A \cdot \frac{1}{4\pi r_r^2 L_{m,r}} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi L_r} \cdot \frac{1}{L_p} \quad (1)$$

P_r : 接收机功率 P_t : 发射机功率 L_r : 接收系统损耗系数 L_t : 发射系统损耗系数
 $L_{m,r}$: 媒质中接受损耗系数 $L_{m,t}$: 媒质中发射损耗系数 r_t : 发射机与目标间距 r_r :
 接收机与目标间距 G_t : 目标方向上发射机天线增益 G_r : 目标方向上接收机天线增
 益 σ_A : 雷达散射截面 L_p : 极化损失系数 λ : 雷达波长

对于合成孔径雷达而言, 由于具有: $r_t=r=R$, $G_t=G_r=G$

故由(1)式知

$$P_r = \frac{P_t \cdot G^2 \cdot \lambda^2}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \cdot \sigma_A = \frac{P_t \cdot A^2 \cdot \sigma_A}{4\pi \lambda^2 R^4} \quad (2)$$

其中: $A = \lambda^2 \cdot G / 4\pi$

由于目标散射系数: $\sigma^0 = \frac{\sigma_A}{\Delta A_t}$

故(2)式用散射系数表示为:

$$P_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \sum_{i=1}^N \frac{P_t G_t^2 \sigma^0 \Delta A_t}{R_t^4}, \quad \bar{P}_r = \frac{\lambda^2}{(4\pi)^3} \int_s \frac{P_t G^2 \sigma^0 dA}{R^4} \quad (3)$$

从合成孔径雷达传输方程(3)式可以看出, 影响回波信号的因素包括目标体和雷达系统参数两个方面。而这两个方面分别由目标粗糙度、介电常数、波长、极化方式和入射角等决定。

提取雪盖信息可以通过雪的介电常数、粗糙度与其它目标的区别, 划分积雪覆盖范围。并且可利用一定的物理模式及积雪的辐射测量实验数据, 反演雪冰的各物理参数。

据 ULABY 等人研究, 雪的介电常数随液态水含量增加而增加, 干雪的介电常数主要受密度变化的控制。如图 1^[4] 所示, 干雪的表面粗糙度对后向散射系数影响不大, 而

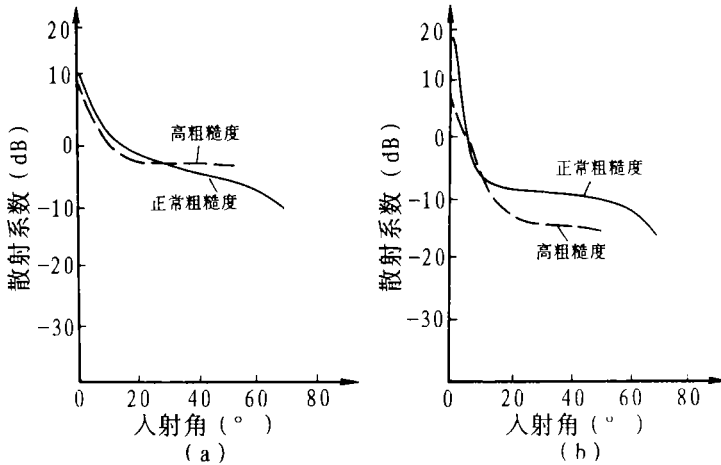


图1 雪表面粗糙度对 σ^0 的影响

a: 干雪 b: 湿雪

Fig.1 The response of roughness of the snow surface to back-scattering coefficient

湿雪有着明显的影响。

近年来, J. C. SHI^[5] 对此有了更进一步的研究, 认为在低含水量雪中, 小入射角时, 其回波由面散射控制, 大入射角时则由体散射控制。对粗糙度较大, 含水量较大的雪而言, 无论入射角如何皆由面散射控制。当体散射为主时, 湿度与散射系数呈负相关, 当面散射为主时, 湿度与散射系数呈正相关。

3 雪盖信息提取

根据上述理论与实验, 本研究利用 SIR-C 的 SAR 影像提取雪盖信息, 进行雪盖制图。

3.1 研究区域与数据

实验区位于加州 Mammoth 山区, 经度 119° 05' W, 纬度为 37° 40' N。该地区通常在 11 月初到次年 5 月底都有降雪, 加州大学在此设有常年观测站, 收集有多年的雪冰研究观测资料。SIR-C 在 1994 年的两次飞行中都获取了该地区的 SAR 多极化、多波段数据。其中包括 1.25GHz (L band)、5.3GHz (C band) 两个频率, HH、VV、HV、VH 4 种极化方式, 数据分辨率为方位向 23.07m, 距离向 13.32m。同时, 选取同时期该区无云 TM 影像作为比较验证用数据。

3.2 雷达后向散射系数图象

由于 SIR-C 产生的 SAR 数据是以 JPL STOKES 矩阵 M 格式存储^[6]:

$$\overline{M} = \begin{bmatrix} \overline{M}_{11} & \overline{M}_{12} & \overline{M}_{13} & \overline{M}_{14} \\ \overline{M}_{21} & \overline{M}_{22} & \overline{M}_{23} & \overline{M}_{24} \\ \overline{M}_{31} & \overline{M}_{32} & \overline{M}_{33} & \overline{M}_{34} \\ \overline{M}_{41} & \overline{M}_{42} & \overline{M}_{43} & \overline{M}_{44} \end{bmatrix}$$

其中

$$\overline{M}_{11} = 1/4[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HH}^* + \overline{S}_{VV} \times \overline{S}_{VV}^* + 2 \times \overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{HV}^*]$$

$$\overline{M}_{12} = 1/4[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HH}^* - \overline{S}_{VV} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{13} = 1/2\text{Re}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HV}^*] + 1/2\text{Re}[\overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{14} = -1/2\text{Im}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HV}^*] - 1/2\text{Im}[\overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{22} = 1/4[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HH}^* + \overline{S}_{VV} \times \overline{S}_{VV}^* - 2 \times \overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{HV}^*]$$

$$\overline{M}_{23} = 1/2\text{Re}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HV}^*] - 1/2\text{Re}[\overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{24} = -1/2\text{Im}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{HV}^*] + 1/2\text{Im}[\overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{33} = 1/2[\overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{HV}^*] + 1/2\text{Re}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{34} = -1/2\text{Im}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

$$\overline{M}_{44} = 1/2[\overline{S}_{HV} \times \overline{S}_{HV}^*] - 1/2\text{Re}[\overline{S}_{HH} \times \overline{S}_{VV}^*]$$

而 Mueller 矩阵 M 有:

$$M = \tau \hat{Q} \overline{M} Q \quad (4)$$

其中

$$\tau = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

利用公式(4), 将 STOKES 矩阵转换成 Mueller 矩阵, 再利用下式(5)分别计算不同波段 4 种极化方式的后向散射系数图象。

$$\begin{bmatrix} \sigma_{VV}^0 \\ \sigma_{VH}^0 \\ \sigma_{HV}^0 \\ \sigma_{HH}^0 \end{bmatrix} = 4\pi \times \cos\theta_{OS} \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{12} \\ M_{21} \\ M_{22} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 OS: 表示观察方向

3.3 去噪声和山区入射角影响校正

由于象素随机起伏效应而产生的斑点噪声对判读分析将产生强烈的影响, 进行 SAR 图象处理首先需要进行去斑点噪声处理。常用的方法有中值滤波、均值滤波、李氏滤波及图形滤波等方法。本研究根据实地应用效果的比较, 先取 9×9 矩阵做均值滤波, 产生去斑点后置图象, 效果明显改善。

实验区位于山区, 地形起伏较大使得象点入射角变化十分显著, 由于后向散射系数与当地入射角有关, 同一类目标会由于象点入射角不同而造成后向散射系数值的差别。象点散射系数有公式:

$$\sigma^{\alpha}(\theta_i) = \sigma_n^0 \times f(\theta_i) \quad (6)$$

其中 σ_n^0 是由目标散射特性控制的量, 而 $f(\theta_i)$ 则是由象点入射角控制的量。只有对后向散射系数进行规一化处理, 去除入射角的影响, 才能进行准确分类。较常用的两个模式是:

$$f(\theta_i) = \cos(\theta_i), \quad f(\theta_i) = \cos^2(\theta_i)$$

前者在粗糙度较低时适用, 后者只在典型植被等应用效果较好, 而实际应用中较少有这样的理想状态。本实验经过比较, 确定 $f(\theta_i) = \cos^2(\theta_i)$ 。

由公式(6)知, 进行规一化改正必须知道每一象点的当地入射角, 其计算公式^[7]为:

$$\cos\theta_s = \cos S \times \cos\theta_0 + \sin S \times \sin\theta_0 \times \cos(T - A) \quad (7)$$

θ_s : 象点当地入射角 S : 象点坡度 θ_0 : 传感器高度角 A : 象点坡向 T : 飞行方向方位角

参数 T 、 θ_0 由飞行系列参数提供, S 、 A 则利用该区的数字高程模型(DEM), 经过匹配处理后, 由 DEM 产生试验区的坡度、坡向图象。

用公式(7)求得象点的当地入射角后, 利用公式(6)对 SAR 图象进行象点入射角归

一化处理产生改正后的散射系数图。

3.4 分类与比较

经入射角校正的分波段、分极化图象共 8 幅, 对每一幅影象分别进行拉伸处理, 并建立类别为湖泊、裸地、林地和积雪训练区, 然后进行 BAYES 监督分类。

将各幅分类图象以同期无云 TM 图象为基准进行分类精度比较, 判别分类结果(表 1)。

表 1 C、L 波段不同极化方式 SAR 图象积雪分类精度

Table 1 The snow cover classification accuracies of C、L band polarized SAR images compared TM

以 TM 为基准分类精度	C 波段				L 波段			
	HH	VV	HV	VH	HH	VV	HV	VH
积雪(%)	82.1	80.3	73.2	72.1	81.4	90.2	74.2	73.1
总体(%)	72.7	73.4	70.0	70.4	60.7	60.1	50.2	51.4

结果表明, C 波段 HH、VV 影象能很好地区分湿雪与非雪盖区, 精度在 80—82% 之间, 但区别干雪与岩石较为困难, 其整体的分类精度为 73%。L 波段很容易将雪盖与其它物体区分开来, 精度可达到 90%, 但整体分类效果较差, 仅 60%。各波段的交叉极化却能较好地将干雪与岩石分开, 综合利用多波段、多极化影象能够改善雪盖分类的精度, 达到雪盖制图的目的。

4 结 语

由于 SAR-C 飞行资料以美国本土为主, 故研究选取的区域在加州境内, 这次飞行也获取了天山地区及西藏等地雪盖区的影象, 我们将在获取该地区资料后, 结合国内研究基础进行进一步的工作。尤其青藏高原常年为云层覆盖, 用可见光及红光影象尚无彻底解决云层影响的办法, 合成孔径雷达的全天候特征提供了有云状态下雪盖制图的可能, 同时欧空局 ERS-1 和日本 JERS-1 环境资源卫星分别携带 C 波段和 L 波段的 SAR 传感器, 将此结果用于青藏高原雪盖制图将填补红外与可见光传感器的不足。

参 考 文 献

- [1] C. Matzler, E. Schanda. Snow Mapping with Active Microwave Sensors. *Int. Jour, Remote Sening*. 1984, 5 (2).
- [2] J. Shi, *et al.* Snow Mapping in Alpine Regions with Synthetic Aperture Radar. *IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1994, 32 (1).
- [3] H. Rott, R. E. Davis. Multifrequency and Polarization SAR Observations on Alpin Glacier, *Ann, Glaciol.* 1993, 17.
- [4] F. T. Ulaby, *et al.* Microwave Remote Sensing, Voluer 2, Radar Remote Sensing and Surface Scattering and

Emission Theory. Addison-Wesley Publishing Company. 1982.

- [5] J. Shi, J. Dozier. Radar Back-scattering Response to Wet Snow. Proceedings IGARSS'92, 1992, 2.
- [6] F. T. Ulaby, C. Elachi, Radar Polarimetry for Geoscience Application. Artech House, Inc. 1990
- [7] J. Dozier, J. Erew, Rapid Calculation of Terrain Parameters for Radiation from Digital Elevation Data. IEEE, Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 1990, 28 (5).

作者简介

李震, 男, 1966年10月生, 武汉测绘科技大学摄影测量与遥感专业毕业, 现为中国科学院兰州冰川冻土研究所博士生, 主要从事冰雪遥感、图象处理、雷达应用等方面研究, 已发表论文7篇。

The Method Study of Snow-cover Mapping with SAR Image

Li Zhen Zeng Qunzhu

(Lanzhou Institute of Glaciology and Geocryology, Chinese Academy of Sciences)

Abstract According to the imaging principle of Synthetic Aperture Radar and back-scattering characteristics of snow, authors examined the capability of snow-cover mapping with multifrequency and multipolarized SAR images from SIR-C carried by shuttle. The result shows that C-band HH and VV images can be used to discriminate between wet-snow and snow-free area, but there is a problem to separate rock from dry snow; L-band HH and VV images are easily to separate snow-cover area from others; and cross-polarized SAR images of C, L-bands can be used to discriminate between dry-snow and rock. So it is possible to map snow-cover using SAR data.

Key words Synthetic aperture radar, Back-scattering, Snow-cover extracting