

文章编号: 1007-4619 (2002) 06-0406-06

# 雷达后向散射模型及其在雷达图像地形影响纠正中的应用

孙国清

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101; 美国马里兰大学地理系)

**摘要:** 在从雷达估测森林生物量时,经常遇到的一个问题是地形对雷达信号的影响。地形使得雷达波的入射角度改变,使每个雷达图像像元所包含的地表面积改变。由于地面的起伏,植被本身的结构也不同,纠正这种由地形而不是植被类型引起的雷达图像的变化是一个很复杂的问题。除了需要高质量的地形数据外,还必须理解植被雷达信号随地形变化的规律。

提出一种可用来模拟森林及其它植被处于山坡上的雷达后向散射模型。结合 DEM 数据,模拟的结果可用来进行雷达图像的地形影响纠正。如果多极化或多波段图像存在,通过雷达模型可用从一种极化推导出的地形信息来纠正其它极化的图像数据。

**关键词:** 后向散射模型;雷达图像;地形影响;生物量

**中图分类号:** TP751.1/TP722.6 **文献标识码:** A

## 1 引言

在用合成孔径雷达(SAR)估测森林生物量时,经常遇到的一个问题是地形对雷达信号的影响。地形对雷达信号的影响及其纠正是一个非常复杂的问题<sup>[1-4]</sup>。雷达入射角定义为雷达波入射方向与像元地表垂线之间的交角。通常所讲的入射角都假定地表是水平的,我们可称之为名义上的入射角。地表倾斜角和方位角决定像元的实际或本地雷达入射角;为方便起见,简称为入射角。雷达后向散射模型的模拟<sup>[5-8]</sup>及实际图像<sup>[9,10]</sup>都表明从森林覆盖返回的雷达后散射信号是随入射角而变化的。朝向雷达的坡面减小雷达的入射角,这使得被一个雷达图像像元所照射的地表面积增加(图1两平行线间的距离为雷达的斜距分辨率,它们与地表相交的地方(粗黑线)为一个雷达像元所照射的面积)。背向雷达的坡面产生相反的效应,如果背向雷达的坡面的坡度大于雷达的名义入射角,就会产生雷达阴影。

从图1中还可以看到,由于树木生长在山坡上

面,这片森林的空间结构(如树冠的相对位置)改变。直接受到雷达波照射的部位改变。一个雷达像元所照射的部位(两平行线之间的部分)及其所包含的地表、树干、树枝、树叶也不一样,这些都引起雷达图像信号的改变。

通常所用的最简单的纠正地形影响的方法是用数字高程模型(DEM)计算每个像元的入射角度,然后用这个入射角纠正像元所照射的地表面积<sup>[11,12]</sup>:

$$\sigma_1 = \sigma_0 (\sin \theta_0 / \sin \theta) \quad (1)$$

这里  $\theta_0$  是雷达在图像中心的名义入射角; $\theta$  是用 DEM 计算出的人射角。 $\sigma_0, \sigma_1$  分别是原图像和纠正后的数据。

如果要纠正雷达后向散射受人射角的影响,我们必须知道一个像元内的覆盖类型以及这种地表类型的雷达信号随入射角的变化。少数研究者曾尝试用简单的雷达散射模型和 DEM 来进行这种纠正,如 Goeying 等人<sup>[13]</sup>用 DEM 和一个经验的雷达模型对冻原地带的 ERS-1 雷达图像进行了纠正。如果雷达模型能够模拟某种地表类型(如森林)在多种坡度和坡向的雷达信号,DEM 就可以直接用来进行雷达信号

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家 863 计划项目(2001AA132040)、国家自然科学基金重点项目(49989001)及美国宇航局(NASA)资助。

作者简介: 孙国清(1947—),男,1981年获南京大学遥感硕士学位,1990年获加州大学圣巴巴拉大学地理学博士,从1984年起从事后向散射模型及森林微波遥感研究。现为美国马里兰大学研究教授,NASA项目首席科学家,中国科学院遥感应用研究所特聘教授。

的地形影响纠正。这种雷达模型必须是三维的,可以模拟从一个三维的地表覆盖单元返回的雷达信号。本文所介绍的模型是用于森林雷达研究,特别

是对雷达估计森林生物量方法的改进,在介绍模型以后,本文也简要地介绍了该模型在实际图像纠正中的应用。

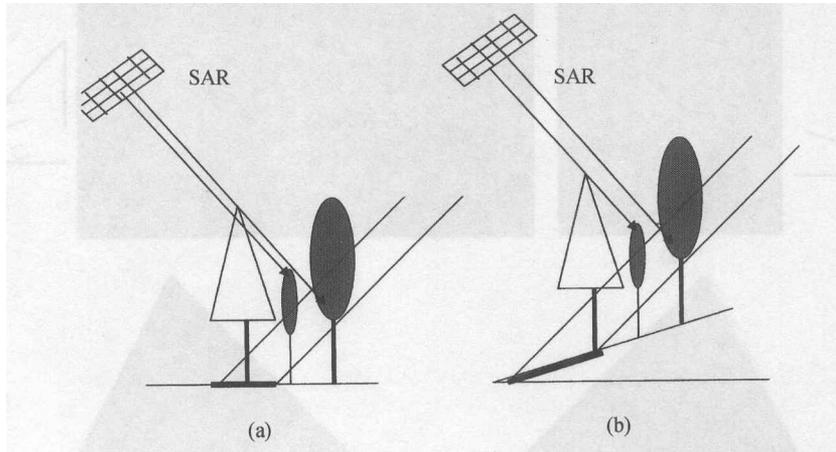


图1 雷达入射示意图

(a)表示平地森林,(b)为树木长在坡上的情形

Fig.1 Radar incidence scheme

## 2 雷达后向散射模型

雷达后向散射信号是雷达入射波与地表某一部分相互作用的结果。除了雷达本身的参数以外,决定信号的是地表水分的含量(决定各散射体的介电常数);以及这些水分在空间的分布(在粗糙的土壤表面以及植物的各部位)。模拟雷达后向散射的第一步是建立一个三维的森林覆盖的几何模型。建立一个这样的模型首先要知道每棵树的位置、胸径、高度、树种、树冠的大小和形状,以及地表的坡度和坡向。由于树种的不同,树冠形状也不一样,树冠是由树枝和树叶组成的,一般情况下,我们假定树枝和树叶在树冠内是均匀分布的。树叶可是针状的也可是蝶状的,并具有一定的取向分布,树枝的大小和取向用直方图或分布函数来决定。树干用介电圆柱体模拟。根据所模拟的雷达图像的分辨率,整个森林覆盖的立体模型被分成小立体单元。这些单元可分为下列之一:树冠;树干;空间和地表。当雷达波穿过或遇到这些单元时,就受到散射和吸收。雷达后向散射信号主要来源于4个部分,即直接从树冠和地表返回的散射;在来回途中地表的后向散射可能受到树冠的衰减;以及树冠和地面,树干和地面双重散射后返回雷达的信号<sup>[13]</sup>。图版I图2(a)是模拟的4棵在水平粗糙面上的树。它们有不同的树高、胸径和树冠形状。亮的树冠表示直接从树冠返回的散射;黑的树冠是地表直接后向散射受到树冠衰减的

结果。因为入射角是 $45^\circ$ ,它们以树根位置对称。图版I图2(b)是同样的树在一斜面上的效果。这些树仍垂直于水平表面,所以树冠的图像(亮椭圆)并没改变。但树冠在地面上投下较长的阴影,从地面直接返回的后向散射也减小了。

## 3 后向散射模拟

当上面提及的有关一个森林覆盖的数据齐全时,它的整个雷达图像可从模型来模拟。图版I图3表示在 $150\text{m} \times 200\text{m}$ 范围内,每棵树的位置及相对大小。共7000多棵树的位置,胸径树种都从实地测出。这是一片典型的北方成熟松林。每一棵树的位置、胸径都为实测数据。同时对树高、树冠的宽度和长度进行抽样测量。从抽样数据求得相关关系,再用这种关系从胸径求出每棵树的高度和树冠大小。图版I图4是这些树木在平面上的模拟雷达图像。LHH图像上的亮点是由树干和地面双重散射引起的。这种散射在地面有坡度时会明显减弱<sup>[2]</sup>。

为了用模型模拟雷达后向散射随地形的变化,我们引进地面坡度。我们假定当地面有坡度时,每棵树的水平位置保持不变,仅在垂直方向上随坡度而改变。相对于雷达的入射方向来说,坡度的朝向也可以在 $0-360^\circ$ 之间改变。坡度可以在 $0^\circ$ 到雷达入射角之间改变。但当坡度与入射角相同时,图像可能或者缩为一条线,或者消失为阴影。图5是坡度为 $20^\circ$ ,方位角(相对于雷达位置)从 $0-315^\circ$ (每次改变 $45^\circ$ )时的

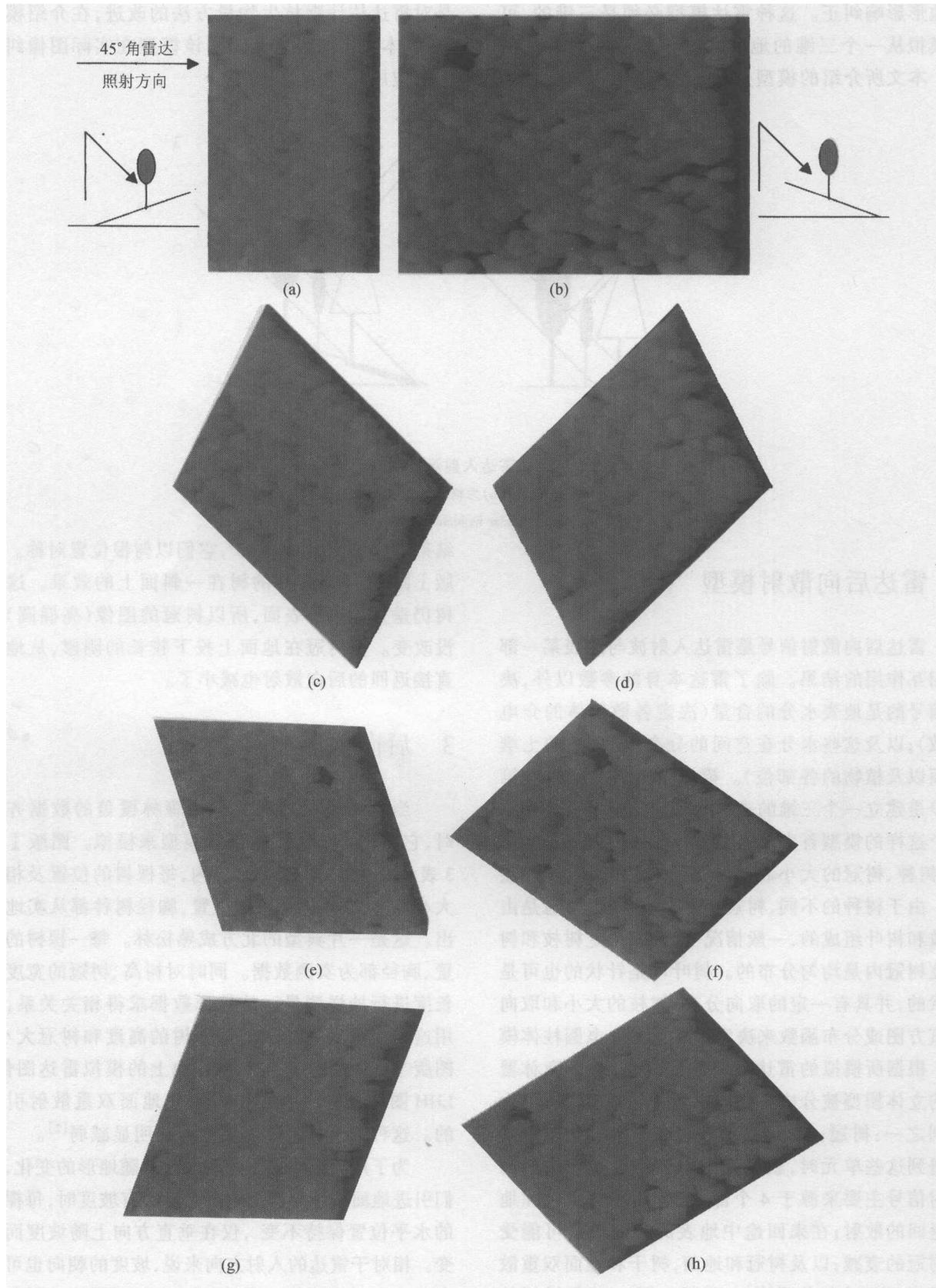


图 5 运用三维模型模拟的坡度为 20°时的森林图像(方位角从 0°—315°,每次改变 45°)

(a)方位角为 0°;(b)方位角为 180°;(c)方位角为 45°;(d)方位角为 315°

(e)方位角为 90°;(f)方位角为 135°;(g)方位角为 270°;(h)方位角为 225°

Fig. 5 Simulated radar images of a stand on 20°slopes and various aspects(from 0° to 315°,every 45°)

模拟图像。雷达后向散射的强度(图像中的亮度)取决于几个因素。主要的是(1)每个像元所包含的地表面积。这一点在图中看得很明显。由于坡度和方位的影响,同一片森林的雷达像元数目变化很大。(2)树木之间的阴影状况的改变。当坡度面向雷达时,阴影较少,从某一树冠返回的散射受到较小的衰减。(3)由于当地入射角的变化,从地表的直接散射也随之变化。同样一片森林,由于处于不同的坡度上,形成完全不同的雷达图像。在每一种情况下,实际的雷达入射角可以从名义入射角以及坡度坡向算出。雷达后向散射系数也可以从图像的平均值求出。

图版II图6显示的是平均的L波段后向散射系数与雷达入射角的关系。雷达的名义入射角是 $45^\circ$ ,运用了3种不同的坡度( $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ ),以及8个方位角。图中也显示了HH, HV和VV3种变化。我们知道雷达后向散射取决于坡度和坡向。而坡度和坡向又决定了实际的雷达波入射角。图版II图6中对每个来说,有3条曲线,它们对应于不同的坡度。这3条曲线具有相似的趋向,而且比较接近。如果它们能被看作同一组数据,我们就可以用一个比较简单的,即雷达信号随入射角变化的关系进行图像纠正。否则,我们必须在坡度坡向这个二维空间内寻找图像纠正的系数。

为了建立以模型为基础的雷达地形影响纠正方法,我们必须模拟各种植被覆盖在各种地形状况下的信号。这实际是不可能的,因为植被覆盖地千变万化的。在实际应用中,我们只能用几种比较简单的模型近似现实。为了进一步检验图版II图6中所示的关系,需模拟不同的森林样地,幼林(灌木)及裸地的雷达后向散射图像。

#### 4 应用雷达后向散射模型进行地形纠正

图版II图7是山地森林L波段HV极化的雷达图像。许多研究<sup>[15-18]</sup>证实L波段HV极化的雷达图像可以用来估计森林的地上总生物量。但由于地形影响,像图版II图7所示的图像无法直接用来估计森林的地上总生物量。这种地形对雷达后向散射的影响必需考虑或纠正。在理想情况下,这样做必需知道该像元的地物覆盖类型,像元所在位置的地形及该地物覆盖类型的雷达信号与其生物量和地形的关系。地物覆盖类型可从其它方法或其它遥感数据获取。雷达信号与其生物量和地形的关系可以从模型或测

量得到。

如果空间分辨率和精确度合适的数字地形数据(DEM)存在,图版II图6中模拟的雷达后向散射与实际入射角之间的关系可以直接用于地形纠正。图版II图6中模拟的关系可以用一个简单的模型来拟合。Ulaby等建议下列简单的植被覆盖雷达后向散射模型<sup>[9]</sup>:

$$\sigma^0(\theta) = \sigma_0 \cos^p \theta \quad (2)$$

这里 $\theta$ 是实际入射角, $\sigma_0$ 和 $p$ 取决于不同的雷达波长和极化方向。当 $p=1$ 时,该模型表示散射系数依赖于 $\cos\theta$ ,即把地面像元面积投影到与雷达入射方向垂直的平面上。而当 $p=2$ 时,这模型即是光学中的朗伯散射。Ulaby等指出,尽管 $p=1$ 或 $2$ 很少能非常地近似实际的散射,但 $p$ 等于一个介于1和2之间的值,可以用于近似植被覆盖的雷达后向散射。图版II图8—图11是一个用DEM纠正雷达图像地形影响的例子。图版II图8是一LHH雷达图像。图版II图9是从地形数据和雷达位置计算出的当地入射角的余弦。图版II图10是从陆地卫星TM图像分类得到的地面基本覆盖。图版II图11是地形影响纠正后的图像。方法是用图6中模拟的LHH数据拟合公式(2),估算出 $\sigma_0$ 和 $p$ 。选定参考入射角 $\theta_0$ ,对属于森林的像元,用下列式子进行纠正:

$$\sigma^0(\theta_0) = \sigma^0 \frac{\cos^p \theta_0}{\cos^p \theta} \quad (3)$$

对森林以外的像元,因暂无合适的模型,仅用简单的方法,即用公式(1)纠正因不同入射角引起的像元所包含的不同地表面积<sup>[11]</sup>。

在无地形数据的情况下,我们可以利用多极化或多波段陆地图像,从一个波段或极化的陆地图像估计出地形(当地入射角)的影响,再用此信息纠正我们所需要的波段或极化。例如对图版II图7中的LHV图像进行纠正,可以利用另一极化即LHH图像。用模拟的数据拟合等式(2),对LHH和LHV,可以得到下列两个等式:

$$\sigma_{HH}^0(\theta) = 0.361 * \cos^{1.78} \theta \quad (4)$$

$$\sigma_{HV}^0(\theta) = 0.203 * \cos^{1.50} \theta \quad (5)$$

LHH极化有较强的穿透植被层的能力而探测到地表的散射,所以对地形影响比较敏感。利用它可以估计当地雷达入射角,再用它来纠正地形对LHV图像的影响。等式(4)中的 $\sigma^0$ ,即0.361,很可能与实际雷达图像不同。很多因素都会引起这种差别,如图像的标定,雷达模型中的不当假设等。但这仅仅对纠正后的图像引进一个因子。等式(5)中的 $\sigma^0$ 也一样,但在

进行纠正时并不用到它。把  $\theta$  和  $\theta_0$  代入等式(5)并相除可得到:

$$\sigma_{\text{HV}}^0(\theta_0) = \sigma_{\text{HV}}^0(\theta)(\cos\theta_0/\cos\theta)^{1.50} \quad (6)$$

参考入射角可以任选,但通常选用图像中心的雷达名义入射角。经过上述纠正,图 7 所示的图像成为图 12。很明显,在图版 II 图 7 中明显的地形特征在图 12 中已不存在。但地表的基本特征,如右下角的湿地(黑区),左边山区内被采伐过的地块(黑色斑块),以



图 12 用多极化图像和没有 DEM 的后向散射模型对图 7 地形影响纠正后图像

Fig. 12 Terrain effect corrected image of

Fig. 7, using multi-polarization images and backscatter model without DEM

及缺乏树木的山谷等仍可辨别。这种经过纠正的图像可进一步用于地表分类,尤其是用来估计地上生物量。

## 5 结 论

在具有明显地形起伏的地区应用雷达图像时,必须设法处理地形对雷达后向散射的影响。地形影响的纠正需要高质量的数字地形数据和适当的雷达散射模型。本文介绍的模型可模拟植被在山坡上的后向散射,并尝试了在没有地形数据情形下,用多极化图像对某一图像进行地形纠正的方法。基于模型的

方法是有潜力和前途的方法。我们将继续在联合应用土地覆盖图、数字地形数据和雷达后向散射模型的基础上,来纠正雷达图像地形影响,并估计森林物理参数方面进行研究。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Luckman A J. The Effects of Topography on Mechanisms of Radar Backscatter from Coniferous Forest and Upland Pasture [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5):1830—1834.
- [2] van Zyl, J J. The Effect of Topography on Radar Scattering from Vegetated Areas [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, 31(1):153—160.
- [3] Bayer T, Winter R, Schreier G. Terrain Influences in SAR Backscatter and Attempts to Their Correction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29(3):451—462.
- [4] Rauste Y. Incidence-angle Dependence in Forested and Nonforested Areas in Seasat SAR Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11(7):1267—1276.
- [5] Lang R H, J S Sidhu. Electromagnetic Backscattering from a Layer of Vegetation: a Discrete Approach [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1983, GRS-21, 62—71.
- [6] Tsang L, J A Kong, R T Shin. Radiative Transfer Theory for Active Remote Sensing of a Layer of Nonspherical Particles [J], *Radio Science*, 1984, 19(2):629—642.
- [7] Ulaby F K, K Sarabandi K McDonald, et al. Michigan Microwave Canopy Scattering model (MIMICS) [J], *Int J. Remote Sensing*, 1990, 11(7):1123—1253.
- [8] Sun G, Simonet D S, Strahler. A H. A Radar Backscatter Model for Discontinuous Coniferous Forest [J]. *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1991, 29:639—650.
- [9] Ulaby FT, Moore, R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing, Active and Passive, Volume III*. Artech House, Norwood, MA, USA. 1982.
- [10] Beaudoin A, Le Toan T, Goze S, Nezy E, et al. Retrieval of Forest Biomass from SAE Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1994, 15(14):2777—2796.
- [11] Kellndorfer J, Pierce L E, Dobson M C, et al. Toward Consistent Regional-to-global-scale Vegetation Characterization Using Orbital SAR Systems [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(5):1396—1411.
- [12] Shi J C, J Dozier. Mapping Seasonal Snow with SIR-C/X-SAR in Mountainous Areas [J] *Remote Sensing of Environment*, 1997, 59(2):294—307.
- [13] Goering D J, H Chen, L D Hinzman, et al. Removal of Terrain Effects from SAR Satellite Imagery of Arctic Tundra [J], *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1):185—194.
- [14] Sun G, Ranson. K J A Three-dimensional Radar Backscatter Model of Forest Canopies [J], *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(2):372—382.
- [15] Ranson K J, G Sun. Mapping of Boreal Forest Biomass from Spaceborne Synthetic Aperture Radar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997,

- 102(D24):29 599—29 610.
- [16] Rignot E, Way J B, Williams C *et al*. Radar Estimates of Aboveground Biomass in Boreal Forests of Interior Alaska[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 32(5):1117—1124.
- [17] Bergen K, Dobson M C, Pierce L E, *et al*. Characterizing Carbon in a Northern Forest by Using SIR-C/X-SAR Imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 63, (1):24—39.
- [18] Le Toan T, Beaudoin A, Riou J, *et al*. Relating Forest Biomass to SAR Data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30(2):403—411.

## Radar Backscatter Model and Its Application in Terrain-effect Reduction of Radar Imagery

SUN Guo-qing

(*Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; University of Maryland, College Park, MD 20742, USA*)

**Abstract:** A common problem encountered in biomass estimation from radar image is the terrain effects appeared in radar images. Topography changes the local radar incidence angle, determines the surface area to be illuminated by a image pixel. In addition, the underlying terrain influences the spatial structure of vegetation layer. It is a complex task to correct or reduce this unwanted fluctuation in radar backscattering due to topography. In general, both high-quality digital elevation model (DEM) and the dependence of backscattering of various land covers on topography are required. The radar backscatter model introduced in this paper simulates radar backscattering from vegetations on various slopes. The backscattering-slope relationships derived from simulation, and a DEM forms the basic for a model-based radar terrain effect correction method. If the multi-band or multi-polarization radar data exist, model simulation can help to infer the topographic information from one channel of radar image, and then use it to correct other channels.

**Key words:** backscatter model; radar imagery; terrain effect; biomass

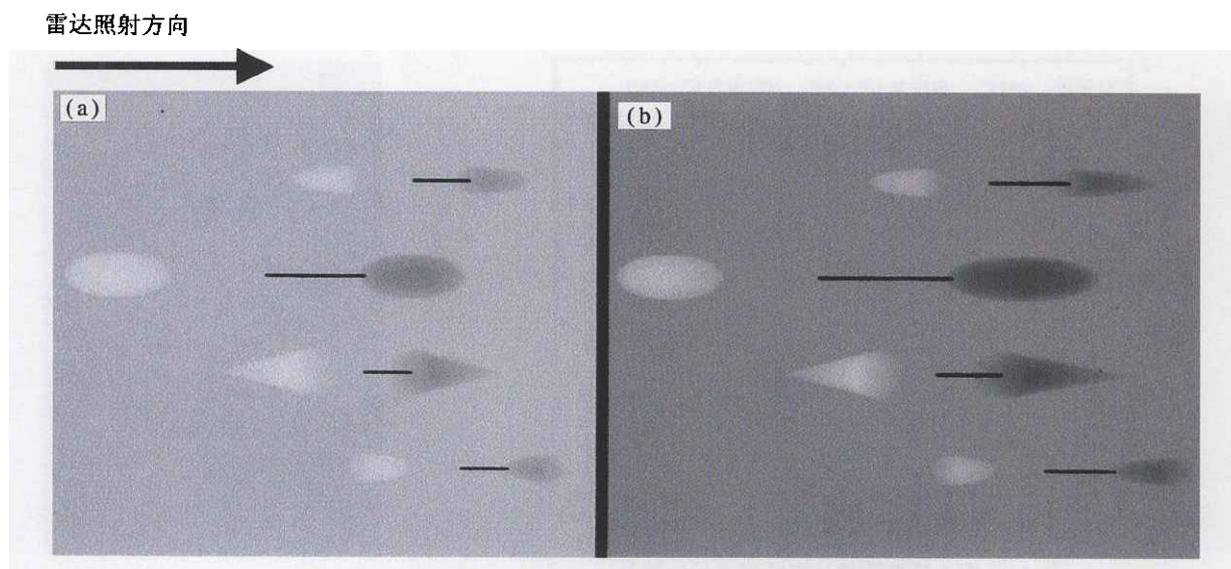


图 2 4 棵具有不同树冠的树在平地 (a) 和坡度上 (b) 的图像 (雷达从左往右以  $45^\circ$  角入射)

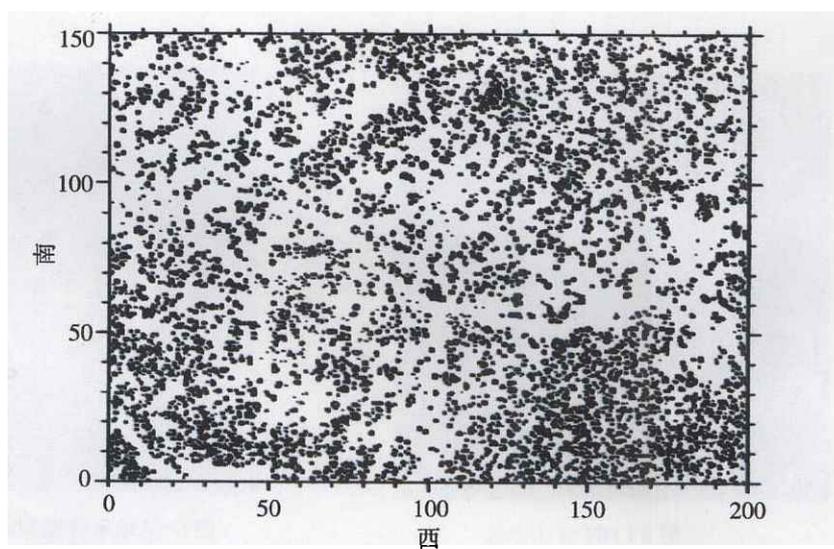


图 3 树木位置和相对大小  
(圆圈的大小只表示胸径的相对大小, 与二轴的比例不附)

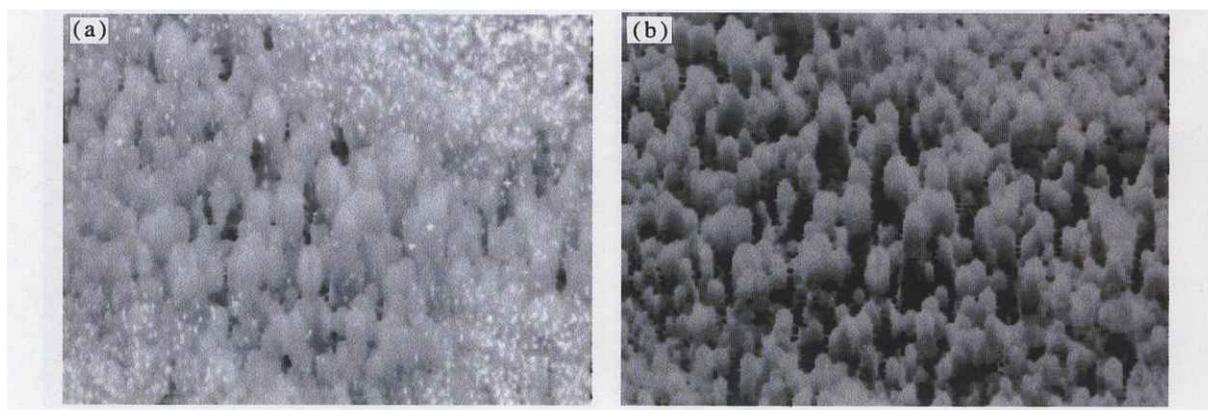


图 4 图 3 所示的森林样地的模拟雷达图像 (水平地面, 树干都垂直于地面, 雷达入射角为  $45^\circ$ , 从上)

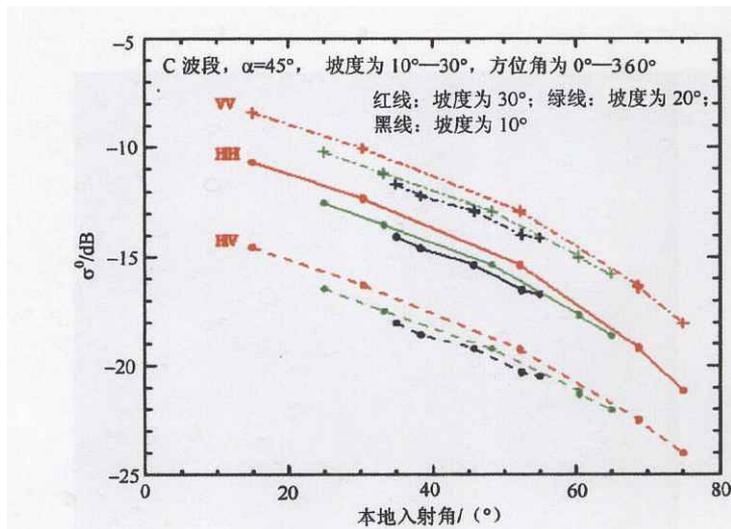


图 6 从图 5 模拟图像计算的雷达后向散射系数随实际入射角变化的关系



图 7 山地森林 L 波段 HV 极化



图 8 LHH 雷达图像



图 9 从地形数据和雷达位置计算出的当地入射角的余弦

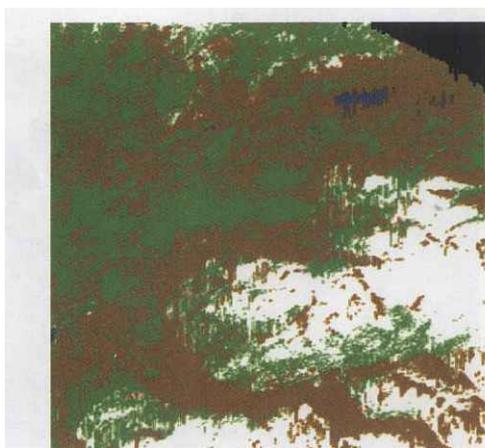


图 10 从陆地卫星 TM 图像分类得到的地面基本覆盖



图 11 地形影响纠正后的图像