

文章编号: 1007-4619 (2001) 02-0086-04

非均匀植被地表全极化散射的高分辨率 雷达图像的模拟

张 巍, 金亚秋

(复旦大学 波散射和遥感中心, 上海 200433)

摘 要: 用自然地表非球形散射体全极化一阶散射的 Mueller 矩阵解, 在选定高空间分辨率条件下, 计算具三维空间结构与非均匀分布的植被地表的全极化后向散射。用射线跟踪法, 按射程计算将散射投影在平面图像对应单元的像素点上, 得到自然地表的雷达图像模拟。改变非均匀地表的组成, 如树木数目与高度、下垫地表、隐藏目标等, 产生各种条件下自然地表景象产生的雷达图像模拟。作为一个对比, 模拟图像与机载 SAR 图像在散射量级以及 P, L, C 波段多通道散射的物理解释上作了比较。

关键词: 非均匀地表; 全极化散射; 雷达图像模拟

中图分类号: TP 722.6 **文献标识码:** A

1 引 言

合成孔径雷达(SAR)极化散射成像是微波遥感最重要的进展之一^[1]。自然地表的 SAR 高分辨率成像技术在地面分类与物理水文参数反演、地面目标识别等对地观测领域有十分重要的应用。由极化散射的电磁理论, 地面植被模拟成有空间取向的非球形散射体, 比如, 树叶为盘状或针状粒子, 枝茎为针状, 树干为柱状等。由一阶极化散射的 4×4 维 Mueller 矩阵解^[2], 可计算 4 维散射强度参数的 Stokes 矢量的全极化后向散射。但是, 这一模型是平行分层、均匀分布的植被覆盖。对于具三维空间结构非均匀分布的自然地表, 问题就更复杂。但是, 非均匀三维空间结构, 如植被形状与覆盖、空隙间隔等对高分辨率雷达图像的影响是明显的。无论是对于目标识别还是地理生态研究, 非均匀空间结构正是一种重要的信息。

非均匀自然地表景象生成及其雷达图像的模拟可以为上述问题提供一个直接的可视化方法。Sun 等按选定的空间分辨率将散射体(如树冠)分解成相应的空间单元, 将这类单元的体散射, 地面的面散射

及其相互作用, 用射线法和射程计算投影到平面图像的各对应像素点上, 产生雷达图像的模拟^[3]。雷达后向散射反映非均匀三维空间结构的特征在这种模型中得到了体现。但是该工作尚未讨论非均匀分布的多成分地表的图像模拟, 也未讨论全极化散射的图像模拟。全极化散射测量技术表现出地表更多的物理信息。

本文用全极化一阶散射的 Mueller 矩阵解和射线法, 研究了具空间结构和非均匀分布特征的各类植被地表的全极化高分辨率(0.5 m)雷达图像的模拟。作为一种对比, 在散射量级上以及 P, L, C 波段的散射解释上与机载 SAR(分辨率 8 m)观测作了比较。

2 全极化散射的 Mueller 矩阵解

由椭圆角 χ 和方位角 ψ 定义的任一极化的入射波 E_i 可以表示为垂直(V)与水平(H)线极化波之和。由 SAR 极化测量技术, 可得到散射场 E_s , 或复的 2×2 维散射矩阵 \bar{S} , 写为

$$E_s = \begin{bmatrix} S_{VV} & S_{VH} \\ S_{HV} & S_{HH} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{Vi} \\ E_{Hi} \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期: 2000-04-13; 修订日期: 2000-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 49831060, 69771007, 863-818-06-05 等项目资助。

作者简介: 张巍(1976-), 男, 上海浦东人, 1998 年获复旦大学电子工程系电子学与信息系统专业学士学位, 同年升直升复旦大学电子工程系硕士研究生。发表学术论文 10 篇。主要研究方向为 SAR 图像的模拟、处理和应用, 电磁场与波传播理论及其应用, 计算电磁学以及空间通信与遥感等。

由 \bar{S} 可得到 4 个 Stokes 参数的散射强度——Stokes 矢量 I_S 。用 4×4 维实的 Mueller 矩阵写为^[2]

$$I_S = \bar{M} \cdot I_i(\chi, \psi) \quad (2)$$

因此,由极化测量技术,可得到 \bar{S} 和 \bar{M} 。

为模拟极化散射,并得到各物理参数(如植被高度、疏密,地面粗糙度、含水量等)对极化后向散射回波的影响,由电磁理论将植被散射体模拟成有空间取向的非球形散射体(如盘状、针状、柱状等)。对于 P, L, C 波段的 SAR,由一般化的 Rayleigh-Gans 近似,可得到参数化模型的一阶 Mueller 矩阵解^[4]。它包括 5 部分的散射贡献:

$$\bar{M} = \sum_{n=1}^5 \bar{M}_n \quad (3)$$

其中 \bar{M}_1 表示为树冠中叶、茎的体散射; \bar{M}_2 为粗糙地面的面散射; \bar{M}_3 为树干的体散射; \bar{M}_4 为树冠-地表的散射; \bar{M}_5 为树干-地表的散射。在树叶与树干体散射以及体、面散射耦合项中包含了散射体的消光系数 $\bar{\kappa}_e$,空间取向 Euler 角 (β, γ) 的分布等。 \bar{M} 的解析表达式可参见文献[2]。由(3)式可计算对任一极化入射波和各物理参数条件下的同极化 \bar{M} 与交叉极化 (σ_d) 后向散射。这些数值结果与机载 SAR (空间分辨率为 8 m)、星载 SAR (空间分辨率为 12.5m) 的图像都作了比较,是一致的^[4]。

3 高分辨率雷达图像的模拟

图 1 是三维空间结构的树木景象图。在高分辨率条件下,树林覆盖不均匀,树木间距、地面目标等都对雷达图像产生重要的影响。

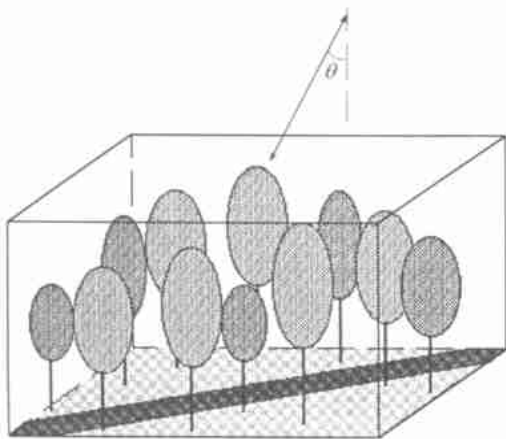


图 1 三维空间结构树木景象

(Fig. 1- Scene of 3-dimensional trees)

当电磁波穿越某单元时,该单元为空隙、树冠或

树干是由它们的占空位置确定的。当波传播到树冠中某单元时所经历的衰减包括树冠内的衰减和树与树之间的相互遮掩引起的衰减。树冠内衰减由树冠体平均消光系数 κ_{ep} ($p=V, H$) 和该单元的位置确定。树木之间衰减由植被层平均消光系数 $\langle \kappa_{ep} \rangle$ ($p=V, H$) 计算。

现考虑 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 平面内,用 Monte-Carlo 方法产生随机分布的 1000 棵树。考虑到树木相互间有间隔不会重叠,因此规定在产生新树时,若与已有的树之间距离 $< 1.5 \text{ m}$,则放弃此树;若此距离 $\geq 1.5 \text{ m}$ 而 $< 2.15 \text{ m}$ 时,则设定为小树;若距离 $\geq 2.15 \text{ m}$ 时,则定为大树。所产生的树木的平面分布图参见图 2。选定大树树干半径 50 cm ,树高是 $14.4-21.6 \text{ m}$ 之间的随机均匀分布值;小树树干半径 25 cm ,树高在 $7.2-10.8 \text{ m}$ 之间随机选定。树干的介电常数由文献[5]定为 $(15+5i) \epsilon_0$ 。树冠的形状为简单起见,均选为椭球形(可以是不同形状的)。树冠的半径和高度参照文献[6]测量得到的经验公式,树冠椭球的半宽定义为 $r=0.15607 H$,半长定义为 $b=0.22517 H$, H 是树高。树种为针叶林,针叶的半径为 1 mm ,长度为 5 cm ,介电常数由文献[5]定为 $(22.5+7.5i) \epsilon_0$ 。下垫地面的介电常数为 $(15+2i) \epsilon_0$,地面起伏高度的标准偏差为 1 cm ,相关长度是 10 cm 。树冠中针状树叶的空间取向 Euler 角 γ 在 $(0^\circ, 360^\circ)$ 内均匀分布, β 在 $(0^\circ, 80^\circ)$ 内均匀分布。

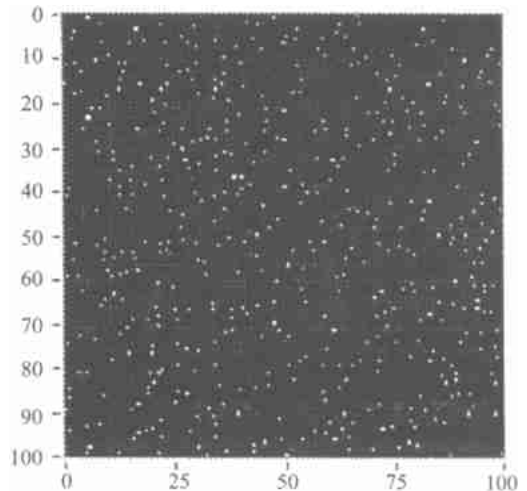


图 2 树木的平面分布图

Fig. 2 Randomly spatial distribution of trees

图 3 给出了单棵树散射图像的模拟方法。空间分辨率选为 0.5 m ,因此,把树冠、树干均分解成 $(0.5 \text{ m})^3$ 的单位元。当雷达波入射在树冠上时,树冠中各单元的体散射回波由 \bar{M}_1 计算,并按射程将相同射程的单元散射投影到图上的 A 区域内。区域 B

是由于波通过树冠衰减投影在地表上的阴影,减少了该区域地面由 \bar{M}_2 计算得的面散射。当波射在树干上时,其体散射回波由 \bar{M}_3 计算,投影在图中的线 ao 上。树冠-地表的散射由 \bar{M}_4 计算,在图中区域 O 就代表了树冠-地表后向散射对应的射程区域。树干与地表间相互作用的散射由 \bar{M}_5 计算,它与树根处 o 点有着相同的射程。因此,投影在点 o 上的树干-地表的后向散射会比较亮。树干的体散射回波比树冠体散射(模拟图像的主要内容)要小一个数量级以上,一般可以忽略。同样的方法可用来模拟森林中人造目标的雷达图像。

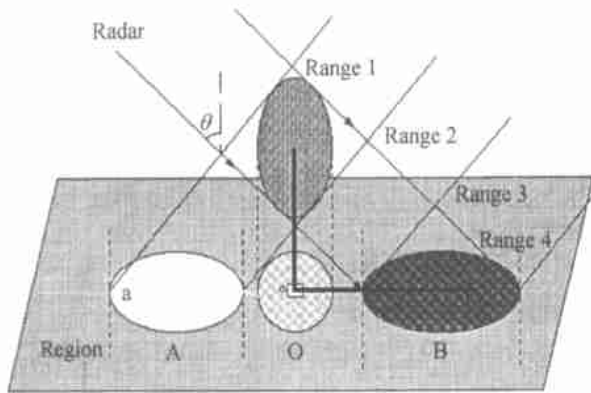


图 3 单棵树散射图像的模拟

Fig. 3 Image simulation of a single tree

所有单元的上述后向散射按相同的射程累加到平面图像上各对应位置的像素点上,对每棵树都进行同样的操作,在每个像素点上作累加,最终形成雷达的模拟图像。

4 非均匀植被地表的雷达图像模拟

按图 2 的树木分布,图版 I 图 4 给出 C 波段 30° 入射角 HH, VV, HV 3 种线极化回波功率组合的雷达图像模拟。其中 σ_{HH} 为红色, σ_{VV} 为绿色, σ_{HV} 为蓝色,灰度取值范围为 $(0-0.45)$ 。图像的色调表征了对应极化的后向散射强度,3 种颜色组合产生的黄色越亮表示总回波功率越强。从图版 I 图 4 中可以看出模拟图像中树木的空间结构与非均匀分布。

对于圆极化(椭圆角 $\chi = \pm 45^\circ$)入射,由(2)式计算 I_s 可知,交叉极化 σ_d 比同极化 σ_c 要强。图版 I 图 5 给出了 C 波段 30° 入射圆极化波的交叉极化 σ_d 的图像模拟。随机分布的树木产生较强的圆极化的交叉极化回波。

由计算可知,树冠-地面、树干-地面散射的 σ_{HH}

要比 σ_{VV} 强得多,一般前者的 σ_{HH} 比 σ_{VV} 强 20dB 左右,后者也有 8dB 左右。因此改变下垫地面的介电特性,将明显改变 σ_{HH} 。图版 I 图 6(a) 是 $100m \times 100m$ 平面上 500 棵树与下垫陆地介电常数为 $(15 + 2i)\epsilon_0$ 的 HH, VV, HV 的总回波功率雷达图像模拟;而图版 I 图 6(b) 是下垫面为水面,介电常数为 $(72 + 22i)\epsilon_0$ 时的总回波功率雷达图像模拟。可以看出,图版 I 图 6(b) 中有大量红色 (σ_{HH}) 圆盘,这是由树冠-地面散射产生的图像。比图版 I 图 6(a) 约增强了 18dB。这张图可作为森林中水灾情况的一种模拟图像,图中灰度取值范围是 $(0-0.2)$ 。

假定在地面上有对角方向上 8.5m 宽的林间道路。图版 I 图 7(a), (b) 分别给出入射角 30° 和 60° 时 C 波段 HH, VV, HV 总回波功率图像模拟。可以看出树木对下垫地面的遮蔽,当入射角增大时,由于树冠各单位元体散射射程趋近,在平面图像上投影变小,而使道路不易遮蔽容易看清。这一方法对于自然地表与目标景象生成及其雷达观测图像预估是有意义的。

应该指出,现有的机载或星载 SAR 图像(分辨率大于 5m)还不能与本文的高分辨率(0.5 m)雷达模拟图像作完全的对照。本文的模拟图像是作为一种理想的高分辨率雷达图像的生成技术,用于自然地表与目标的雷达图像的预估。但是,为与现有的 SAR 图像作定性的对比,图版 I 图 8(a) 给出 1993-08-12 加拿大 Albert 王子国家公园一块地域机载 SAR 的 P, L, C 3 波段 HH, VV, HV 回波功率总和^[4](空间分辨率为 8 m)。在彩色图中红色为 P 波段,蓝色为 C 波段,绿色为 L 波段。一般讲来,随着频率升高,散射增强。图版 I 图 8(a) 右半部树木茂盛,高频 C 波段散射要强于 P 波段,而在图 8(a) 左半部的地面没有多少树,覆盖着有耗均匀介质(如湿雪等),其本身的体散射在 P-C 波段均很小,散射主要来自于下垫地表。假定均匀耗覆盖层的介电常数为 $\epsilon' + i\epsilon''$,入射和散射波经过厚度为 d_0 的覆盖层的衰减可写为: $A = \exp(-4k''d_0 \sec \theta)$, 其中 $k'' \left[\approx \frac{1}{2} (2\pi\nu/30) \epsilon'' / \sqrt{\epsilon'} \right]$ 为该介质层的波数的虚部,与频率 ν (GHz) 成正比。因此, C 波段的入射和散射得到的衰减要明显大于 P 波段,观测到的散射主要来自于 P 波段,使得图版 I 图 8(a) 左半部表现为红色。尽管本文的高分辨率(0.5m)雷达与该 SAR 不同,不是与真实的 SAR 图像作完全的一一对比,这里也不讨论 SAR 成像与信号机理,只是用理论模拟

与现有的实验结果作定性的对比。我们用图版 I 图 8(b)模拟了右半部是树木(C 波段散射强),左半部是均匀地表覆盖(P 波段散射强)的 P, C 二波段 HH, VV, HV 极化回波图像。在数值上与 SAR 图像给出的值也是一致的。作为信息的补充,图 9(a), (b)分别给出图版 I 图 8(a)A-A 处 C 波段和 P 波段的 σ_{HH} , σ_{VV} 的值,可以看出,在地理位置 620-800 与 800-1000 处 P 与 C 波段的散射明显不同。

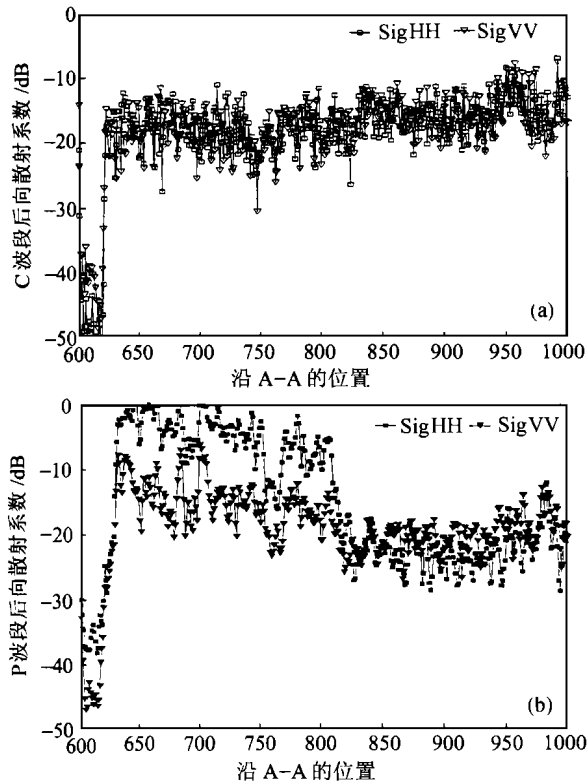


图9 SAR 图像中的 HH, VV 后向散射数据
(a) C 波段, (b) P 波段

5 结论

本文用地表植被全极化散射的 Mueller 矩阵解计算了地表植被散射体各单位元的散射。用射线跟踪法和射程计算,将散射体各单位元的散射投影到平面图像各对应单元的像素点上,得到了具三维空间结构和非均匀分布的地表植被高分辨率雷达图像的模拟。用这一方法可模拟各种物理条件下地表环境的各种极化的高分辨率雷达图像,用以解释和分类识别树木空间结构、间隙、下垫地表状态、人造目标等,为自然地表与目标景象生成技术及其全极化散射雷达观测图像提供理论模拟方法。

参考文献 (References)

- [1] Zebker H. A., Van Zyl J. J. Image radar polarimetry: a review [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, **79**(11): 1583-1605.
- [2] Jin Y. Q. *Electromagnetic Scattering Modelling for Quantitative Remote Sensing*. [M]. Singapore: World Scientific, 1994.
- [3] Sun G., K. J. Ranson. A three-dimensional radar backscatter model of forest canopies [J]. *IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens.*, 1995, **33**(2): 372-382.
- [4] Jin Y. Q., Zhang N. X., Chang M. Simulation of polarimetric scattering from tree canopy and eigenanalysis of microwave SAR imagery [J]. *Journal of Quantitat. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 1999, **63**: 599-611.
- [5] Matzler C. Microwave (1-100 GHz) dielectric model of leaves [J]. *IEEE Trans. on Geosci. Rem. Sens.*, 1994, **32**(5): 947-949.
- [6] Sun G., K. J. Ranson. Radar modelling of forest spatial patterns [J]. *INT. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(9): 1769-1791.

Image Simulation of High Resolution Radar for Fully Polarimetric Scattering from Heterogeneous Canopy Surface

ZHANG Wei, JIN Ya-qiu

(Center for Wave Scattering and Remote Sensing, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Employing the Mueller matrix solution of random non-spherical particles, fully polarimetric scattering from heterogeneous canopy surfaces with 3-dimensional spatial structure is calculated. By using the ray tracing method, the scattering from all cells of scatters under a certain radar resolution is mapped into the image pixels. The radar images are simulated for different spatial structures such as number and density of trees, underlying land media, embedded target, etc. It is also compared with the AirSAR image for data validation and image physics.

Key words: heterogeneous surface; polarimetric scattering; image simulation

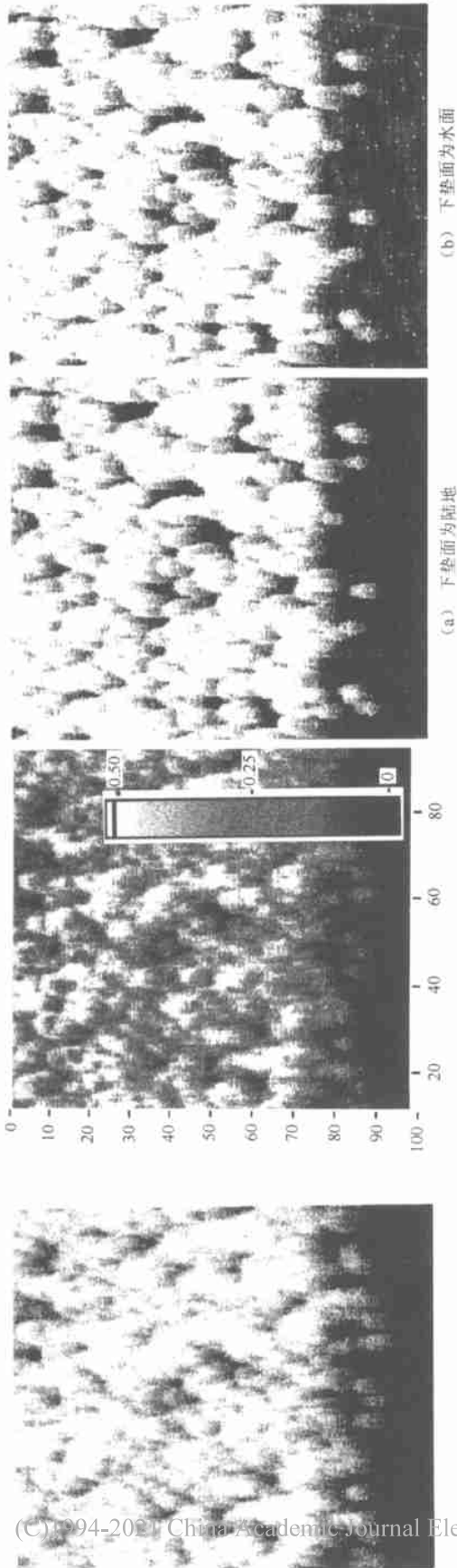
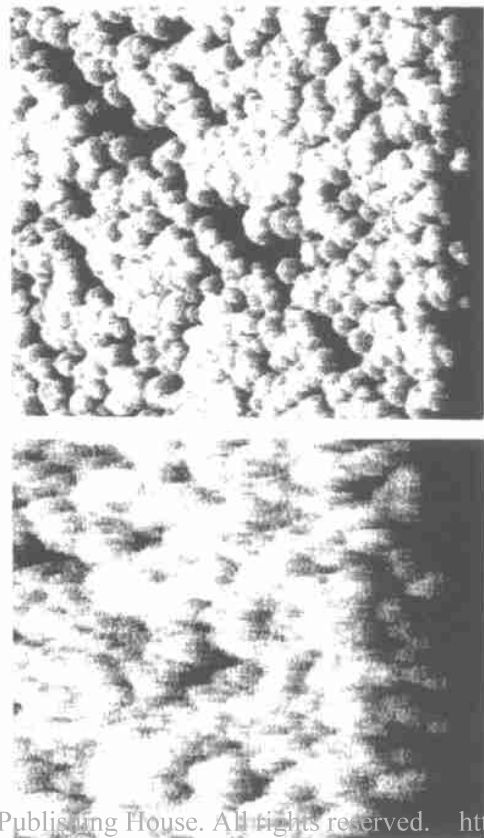


图 4 HH, VV, HV 总回波功率的雷达图像模拟

图 5 圆极化波的交叉极化 σ_{χ} 模拟图像

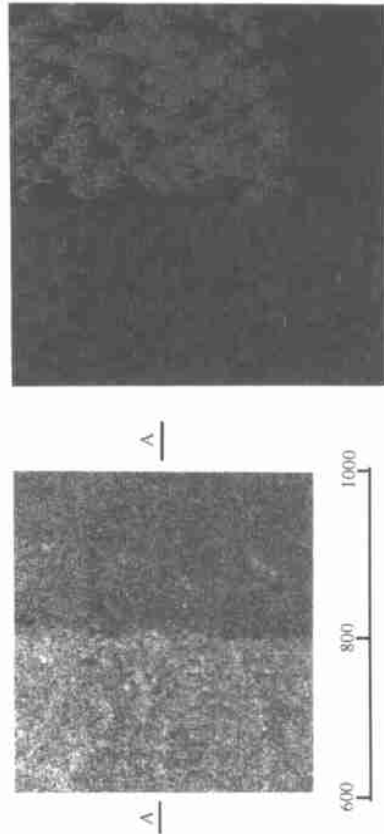
图 6 HH, VV, HV 总回波功率图像模拟



(a) 30°入射

(b) 60°入射

图 7 有林间道路的雷达图像的模拟



(a) 机载 SAR 图像

(b) 模拟图像 ($d_0=50\text{cm}$, $\epsilon_r\epsilon_z=0.01$)

图 8 机载 SAR 图像与模拟图像