

文章编号: 1007-4619(2000)增-0129-06

多参数 SAR 数据森林应用潜力分析

廖静娟, 邵 芸

(中国科学院 遥感应用研究所 遥感信息科学开放研究实验室, 北京 1000101)

摘要: 利用多参数机载全球雷达(GlobeSAR)数据和航天飞机成像雷达(SIR-C/X-SAR)数据, 分别在我国南、北方两个试验区进行森林识别与分类, 以及蓄积量估测的试验。为了更好地了解雷达后向散射与森林结构特征的关系, 分别从雷达图像上提取了后向散射系数和强度, 进行森林类型识别效果的分析, 以及森林结构参数与雷达后向散射强度的相关分析。结果显示多波段、多极化 SAR 数据能有效地识别不同类型的森林。雷达的后向散射强度对森林的结构参数, 尤其是森林的平均胸径和高度较为敏感, 据此对试验区的森林蓄积量进行了估测, 并分析了多参数 SAR 在森林应用中的潜力。

关键词: 多参数 SAR 数据; 森林应用

中图分类号: TP722.6/TP79 **文献标识码:** A

1 引言

由于全球的许多环境问题都与森林资源的减少息息相关, 因而利用遥感手段进行森林监测, 对于了解全球的环境问题, 如碳循环、水循环以及能量平衡等极为重要。随着全球人口的增加, 森林资源不断减少, 因而准确、实时地获取全球森林变化的有关信息显得尤其重要。然而, 利用传统的方法获取的这方面信息往往难以保证其精度的准确性, 而遥感方法却可以满足这种需求。特别是在多云雨和雾的热带-亚热带地区及高纬度地区, 当可见光和红外遥感受到极大限制时, 微波遥感却能成为能获取各种森林的生物物理参数的有利工具, 并可提高人们对全球气候、水循环和能量平衡等的认识。

许多的机载和星载成像雷达系统已经被广泛应用于森林生态遥感试验中。例如, 以美国宇航局喷气推进实验室(NASA/JPL)的 CV-990/980 AIRSAR 和加拿大遥感中心(CCRS) CV-580 SAR 为代表的多波段、多极化合成孔径雷达系统, 在北美和欧洲开展了大量试验^[1-6]。而以 Seasat SAR、SIR-B、SIR-C/X-SAR 和 ERS-1 SAR 等为代表的星载成像雷达系统也对北方森林和热带-亚热带地区

的森林进行了大量的遥感试验^[7-11]。这些试验和研究均表明, 雷达对于森林的结构参数(包括生物量)极为敏感, 能较大程度地用于森林制图和监测中。同时, 通过森林微波后向散射模型的建立, 较好地了解和认识森林结构参数与电磁波相互作用的机理, 从而进一步开展森林结构参数估测和森林动态监测。

本文的研究是利用多参数 SAR 数据, 进行多波段、多极化雷达数据识别森林类型效果的分析, 以及森林结构参数与雷达后向散射的相关性分析, 从而开展估测森林的蓄积量的试验, 进一步分析多参数 SAR 数据在森林应用中的潜力。

2 试验区与数据

2.1 试验区概况

我国地域辽阔, 南、北方森林分布差异较大。为了更好地了解 SAR 数据在森林应用中的潜力和效果, 本研究结合已有的数据源, 各选取南北两个试验区进行研究。一个试验区为三北防护林区, 另一个试验区为广东肇庆地区。

三北防护林区位于陕西省宜川县, 地处陕北黄

收稿日期: 1999-12-15; 修改日期: 2000-08-10

基金项目: 国家“攀登计划”资助项目(95-预38), 国家自然科学基金重大项目(49493403), 美国宇航局 SIR-C/X-SAR 科学计划中国项目和全球雷达遥感(GlobeSAR)计划中国项目资助。

作者简介: 廖静娟(1966—), 女, 1993年获中国科学院地球物理研究所固体地球物理专业博士学位。现任中国科学院遥感应用研究所副研究员, 主要从事雷达遥感地物散射特性、信息提取及应用研究, 已发表论文20余篇。

土高原地区, 平均海拔 1300m—1400m, 地表切割破碎, 呈千沟万壑的黄土丘陵地貌。气候属暖温带, 年降水较少, 为干旱-半干旱地区。该地区的森林为我国三北防护林的一部分, 森林类型主要有阔叶林、针叶林和混交林。

广东肇庆试验区地处我国南方, 为热带-亚热带地区, 降雨较多, 气候湿润, 地势起伏不大, 平均海拔变化不超过 100m, 平均坡度 15°。森林主要为人工林, 60%以上为针叶林, 阔叶林和混交林极少。针叶林以松树为主, 平均年龄 10—15 年, 平均胸径 5—8cm, 树冠基本未郁闭, 密度大约为每公顷 850—5500 棵。

2.2 数据及处理

本研究采用的数据有两类, 一类为美国奋进号航天飞机携带的成像雷达 SIR-C/X-SAR (Shuttle Imaging Radar-C/X-Band Synthetic Aperture Radar) 系统获取的多波段、多极化航天成像雷达数据。另一类为加拿大 CV-580 系统获取的双波段、多极化航空成像雷达 GlobeSAR 数据。这两类数据的系统参数见表 1。

表 1 SIR-C/X-SAR 和 GlobeSAR 数据的系统参数

Table 1 The system parameters of SIR-C/X-SAR and GlobeSAR data in the study

系统参数	SIR-C/X-SAR	GlobeSAR
波长 / cm	L (23.5), C (5.8), X (3.1)	C (5.66), X (3.24)
极化	HH, HV, VH, VV	HH, HV, VH, VV
方位分辨率 / m	25×25	6×6
距离分辨率 / m	13×26	6×6
成像宽度 / km	15-90 (L 和 C), 15-60 (X)	22
像元大小 / m	12.5×12.5	6×6
视角 / (°)	20-55	
成像高度	225km	5400m
成像平台	航天飞机	飞机

对多波段、多极化的 SIR-C/X-SAR 数据进行几何配准, 产生多通道彩色合成图像, 然后对图像进行增强 Lee 滤波, 以消除雷达图像的斑点噪声。而对于机载 GlobeSAR 数据, 首先进行了天线方向的校正, 然后利用数字化的 1:50000 地形图对其进行几何校正, 并合成 C 和 X 波段 HH、HV 和 VV 极化的彩色合成图像。

3 多波段多极化 SAR 数据识别森林类型的效果分析

多波段、多极化 SIR-C/X-SAR 数据经过配准后, 合成为彩色图像, 根据图像上呈现的不同色调, 可以直接从图像上区分出三北防护林试验区的不同森林类型。然后参照 1:50 万《中国黄土高原地区森林图》^[12], 在多波段、多极化彩色合成图像上选取 5—7 个训练样区, 利用最大似然法对多波段、多极化的雷达数据进行监督分类, 区分出针叶林、阔叶林、混交林、河道或冲沟以及雷达阴影几种地物类型。根据分类结果进行样区统计及精度分析, 可得出针叶林的分类效果最好, 精度达 79.7%, 其次为混交林, 精度为 68%, 阔叶林的精度最低, 为 60.2%。分类结果的平均分类精度为 75.10%, 全局精度为 70.4%。由此可见, SIR-C/X-SAR 数据对于三北防护林的识别与分类较为成功。

由于雷达图像反映的是地物几何形态、地表特征与电磁波相互作用的结果, 可以通过地物的雷达后向散射系数来表示, 因而在分析雷达识别不同森林类型的效果时, 可以利用不同类型森林的雷达后向散射系数来讨论。在本研究中, SIR-C/X-SAR 数据是已经过精确定标的雷达数据, 能直接从图像上提取记录地物散射特征的雷达后向散射系数, 因而利用 SIR-C/X-SAR 系统的有关定标结果^[13], 我们提取了雷达图像上识别出的三北防护林 3 种类型森林的雷达后向散射系数 (表 2)。从表 2 中可见, 对单波段单极化图像而言, 三北防护林的这 3 种类型森林的雷达后向散射系数值较为相近, 因而在单波段单极化雷达图像上难以区分出来。当波长不同而极化相同时, 针叶林、阔叶林和混交林的雷达后向散射系数值变化也不大, 如 LHH 和 CHH, 其后向散射系数值变化在 -3.56—-5.75 之间; LHV 和 CHV 变化在 -5.84—-7.96 之间; XVV 变化在 -3.37—-3.64 之间。这是因为波长主要反映雷达对森林树冠不同程度的穿透能力, 一般波长越长, 穿透树冠的深度越大, 长波段 (如 P、L 波段) 雷达可以穿透整个树冠, 揭示出树冠下树枝、树干和地表的信息, 而 C 和 X 波段则主要反映来自树冠的信息^[14, 15], 因此波长对于森林类型的识别并不十分理想。而当波长相同极化不同时, 这 3 种森林类型的后向散射系数都相差较大, 说明极化对区分不同的森林类型较为有效, 这是由于极化主要反映森林的表面形态和森林特征, 对树叶的形态具有较强的刻画能力, 故对

森林类型的识别较为有效^[16-18]。因此通过对多波段、多极化雷达数据的合成,可以充分发挥波长和极化的不同作用,使之能明显区别出不同的森林类型。

表2 三北防护林试验区不同森林类型的雷达后向散射系数值 (db)

Table 2 The backscattering coefficients of different forest types in the test site of Three North Shelter Forest

森林类型	针叶林	阔叶林	混交林
LHH	-4.68	-5.75	-4.58
LHV	-7.28	-7.96	-7.62
CHH	-4.67	-4.86	-3.56
CHV	-6.50	-6.19	-5.84
XVV	-3.64	-3.37	-3.46

4 基于雷达后向散射与森林结构参数相关性的森林蓄积量估测分析

前人研究表明,雷达的后向散射对森林的物理结构参数极为敏感^[6, 8, 19]。因此,研究雷达的后向散射和森林参数之间的关系显得尤为重要。它可以使人们更加深入地了解雷达后向散射与森林物候变化的关系,改善森林雷达后向散射模型,从而进一步提高雷达监测森林生态系统的能力。

在该研究中,利用GlobeSAR数据进行了广东肇庆试验区的雷达后向散射与森林结构参数相关性分析。由于GlobeSAR数据没有进行定标,因而直接提取与地面实测数据相对应的雷达后向散射强度来代替雷达后向散射系数。其中,提取的每个区域的雷达后向散射强度值为不少于200个像元点值的平均值。地面实测的森林参数包括有基本面积(basal area)、森林密度、树的平均高度和胸径。

对雷达后向散射的强度和森林参数进行的相关散射强度相关分析得出(表3),树的平均高度和胸径与雷达后向散射强度相关性较高。随着树的平均胸径和高度的增加,C-HH、C-VV、X-HH和X-VV的散射强度增加(图1,图2),从而说明,随着树体积的增加,雷达后向散射也相应增强。然而,树的密度和基本面积却与雷达的后向散射强度相关性极低,这说明,树的密度虽然增加了,但树的体积参数(如胸径、树高、树冠高)的变化却是极不规则的,因而密度和基本面积不是影响雷达后向散射变化的主要因素。

表3 GlobeSAR数据与森林结构参数相关分析结果

Table 3 The correlation coefficients between GlobeSAR data and forest stand parameters

	基本面积	森林密度	平均高度	胸径
C-HH	0.29	-0.44	0.93	0.93
C-VV	0.09	-0.42	0.90	0.91
X-HH	0.70	-0.49	0.97	0.97
X-VV	0.53	-0.29	0.87	0.87

基于对上述相关性的认识,利用多元线性回归方法,建立了森林蓄积量与雷达后向散射强度之间的回归方程。通过回归方程,对试验区内面积约600hm²的松树林进行了蓄积量估测,并选取3个子区进行精度分析得出,估测值与实测值之间的误差分别为15.4%,2.9%和10.3%,与地面实测结果基本吻合,可以满足实际调查的需要。在此基础上,我们将肇庆试验区的森林蓄积量划分为5级,每级所占的百分比见表4。从表中可见,该区森林的蓄积量以10—30 m³/hm²等级为主,其次为30—60 m³/hm²等级,说明该区森林的年龄以幼龄—中龄为主。显示出多波段多极化SAR数据估测森林蓄积量的能力。

表4 广东肇庆地区森林蓄积量估测结果

Table 4 The results of forest volume estimation in the Zhaoqing test site, Guangdong Province

蓄积量 / m ³ /hm ²	面积 / hm ²	百分比 / %
<10	134.7	22.1
10—30	273.9	45.0
30—60	189.3	31.1
60—90	5.4	0.9
>90	5.5	0.9

5 多参数SAR数据森林应用潜力分析

雷达遥感在森林中的应用已引起人们的广泛重视,许多大型的国际合作计划都将森林生态的有关研究作为重要的内容。在不同的森林应用中,不同系统参数的SAR数据的应用潜力不尽相同。在此主要就SAR数据在森林类型识别与分类,以及生物量(蓄积量)估测方面的应用进行分析。

利用雷达遥感技术进行森林类型识别与分类已经取得了不少成功的经验。以上的研究表明,对于森林类型的识别,主要依赖于SAR图像色调的

不同，其次图像的纹理在某些程度上也有一定效果。多波段、多极化彩色图像的生成，在一定程度上提高了识别森林类型的能力，而多入射角的雷达

图像则对地形变化较大地区的森林类型识别较为有利^[7-9]，因此，多波段、多极化和多入射角的 SAR 数据对于森林识别较为有利。

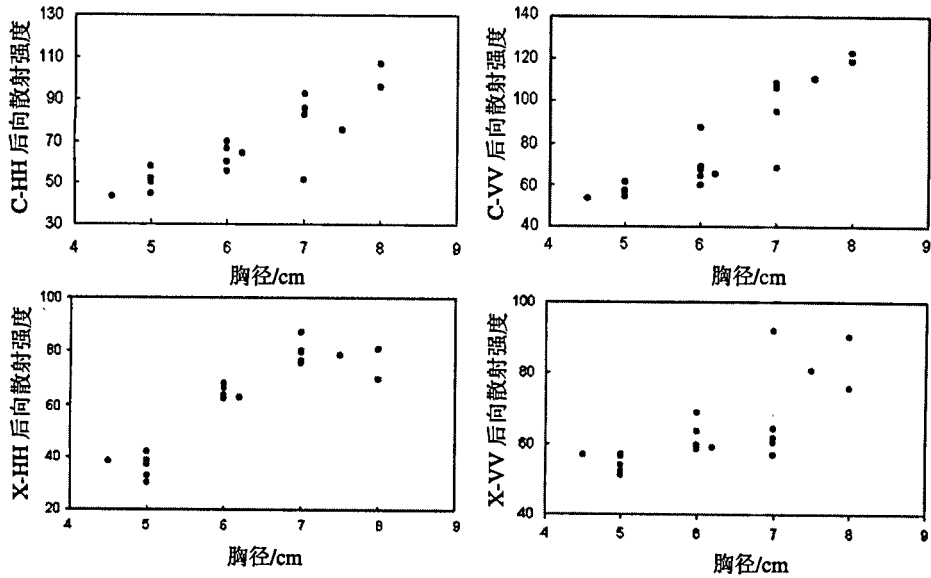


图1 森林的平均胸径随雷达后向散射强度变化的关系

Fig.1 Stand mean diameter at breast height vs. backscatter intensity from C- and X-band, HH and VV polarization

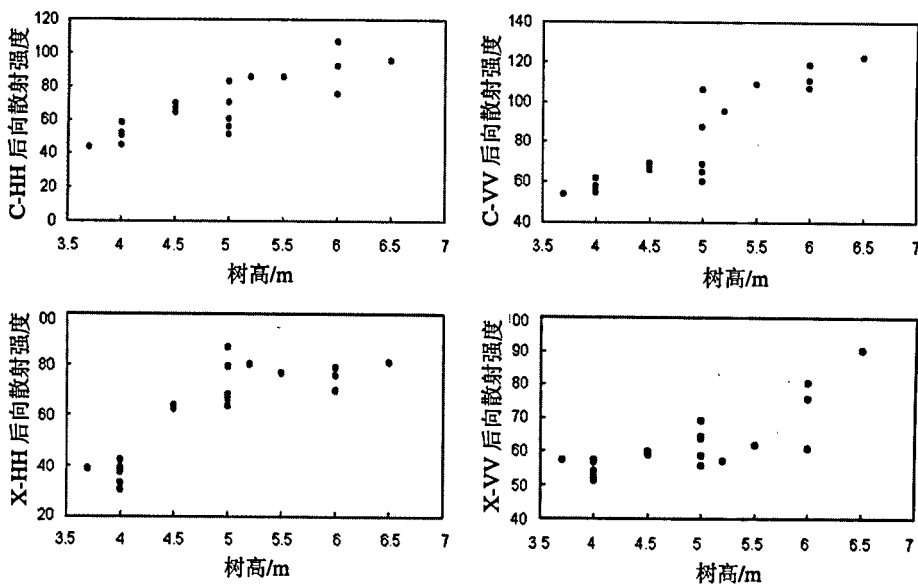


图2 树高随雷达后向散射强度变化的关系

Fig. 2 Tree mean height vs. backscatter intensity from C-and X-band, HH and VV polarization

雷达遥感方法应用于森林生物量或蓄积量的估测，其出发点是因为雷达的后向散射对森林的结构参数极为敏感，通过建立雷达后向散射系数与森林结构参数之间的定量关系，可以实现这种估测。许多研究表明，单波段、单极化雷达的后向散射对生物量的敏感性在生物量达到一定水平时就出现了饱和。生物量对雷达后向散射的依赖关系与雷达的波长有关，波长越长，饱和点越高。而对于极化，

一般 HV 极化对生物量最为敏感，VV 极化敏感性较差^[20]。某些研究者认为，单波段单极化情况下饱和点的出现代表了 SAR 能监测地表生物量变化能力的上限^[21, 22]；然而这个结论忽略了这样一个事实，即雷达的后向散射不仅与森林的总生物量有关，而且还与树的各种成分的生物量（如树枝生物量、树叶生物量、树干生物量）和树的物理结构参数（如树高，胸径等）相关。由于不同频率、不同

极化的微波后向散射分别来自树的不同部位, 因而可以利用多参数 SAR 数据来实现对地表生物量的估测。

6 结 论

综上所述, 多参数 SAR 数据对于森林类型的识别主要表现在多波段、多极化数据的合成, 可以充分发挥波长和极化在森林类型识别中的作用, 从而在雷达图像有效地区分不同的森林类型, 而单波段、单极化图像却难以区分不同森林类型。对于森林蓄积量的估测, 则主要表现在多参数雷达的后向散射对森林的结构参数极为敏感, 因而可以利用雷达后向散射强度或后向散射系数与森林结构参数建立定量关系, 从而估测蓄积量或生物量。因此, 多参数 SAR 数据在森林应用中具有较大的潜力, 能在森林监测中发挥重要作用。

参 考 文 献 (References)

- [1] Zebker, H.A., J.J. Van Zyl, S.L., Durden, L. Norikane. Calibrated imaging radar polarimetry: technique, examples, and applications[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1991, (29): 942—961.
- [2] Le Toan, T., A. Beaudoin, I. Riou, D. Guyon. Relating forest biomass to SAR data[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(2): 403—411.
- [3] Beaudoin, A., T. Le Toan, S. Goze, E. Nezry, A. Lopes, E. Mougin, C. Hsu, H. C., Han, J. A. Kong, R. T. Shin. Retrieval of forest biomass from SAR data[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15(14): 2777—2796.
- [4] Rignot, E. J. M., C.L. Williams, J. Way, L.A. Viereck. Mapping of forest types in Alaskan boreal forests using SAR imagery[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1051—1058.
- [5] Skriver, H. H. B. Mortensen, P. Gudmandsen. Calibration and modelling of MAESTRO 1 polarimetric SAR data of a forest area in Les Landes, France[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1994, 15(14): 2737—2754.
- [6] Ranson, J. G. Sun, J.F. Weishampel, R. G. Knox. Forest biomass from combined ecosystem and radar backscatter modeling[J]. *Remote Sensing Environ*, 1996, 59: 118—133.
- [7] Ford P., D. J. Casey. Shuttle radar mapping with diverse incidence angles in the rainforest of Borneo[J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1988, 9(5): 927—943.
- [8] Dobson, C. L. Pierce, K. Sarabandi, F. T. Ulaby, T. Sharik. Preliminary analysis of ERS-1 SAR for forest ecosystem studies[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1992, 30(2): 203—211.
- [9] Ranson, J. S. Saatchi, G. Sun. Boreal forest ecosystem characterization with SIR-C/XSAR[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, 33(4): 867—876.
- [10] Stofan, R. D.L. Evans, C. Schmullius, B. Holt, J. J. Plaut, J. J. Van Zyl, S. D. Wall, J. Way. Overview of results of Spaceborne Imaging Radar-C, X-band synthetic aperture radar (SIR-C/X-SAR)[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, 33(4): 817—828.
- [11] Rignot, E. J. M., C.L. Williams, J. Way, L.A. Viereck. Mapping of forest types in Alaskan boreal forests using SAR imagery[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1994, 32(5): 1051—1058.
- [12] Map Compilation Committee for Environment and Resources in Loess Plateau in China. Series of map for Environment and Resources in Loess Plateau in China, No. 5: (1:500,000) map of forestry. Map Publisher of Xi'an, 1994. [中国黄土高原地区资源环境遥感系列制图编辑委员会. 中国黄土高原地区资源与环境遥感系列地图之五: 中国黄土高原地区森林图(1:50万). 西安地图出版社, 1994.]
- [13] Freeman, A. M. Alves, et al. SIR-C Data Quality and Calibration Results[J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1995, 33(4): 848—857.
- [14] Richards, J. A., Woodgate, P. W., Skidmore, A. K. An explanation of enhanced radar backscattering from forest[J]. *Int. J. of Remote sensing*, 1987, 8(7): 1093—1100.
- [15] Wu, L. K., Moore, R. K., Zoughi, R. Sources of scattering from vegetation canopied at 10 GHz[J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1985, GE-23(5): 737—745.
- [16] Hirose, H., Matsuzaka, Y., Kobayashi, O. Measurement of microwave backscatter from a cypress without leaves[J]. *IEEE Trans. On Geosci and Remote Sensing*, 1989, 27(6): 698—701.
- [17] Wu, S. T. Potential application of multipolarization SAR for pine-plantation biomass estimation[J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 1987, GE-25(3): 403—409.
- [18] Hoekman, D. H., Radar backscattering of forest stand, *Int. J. of Remote Sensing*, 1985, 6(2): 325—343.
- [19] Ferrazzoli, P., L. Guerriero. Radar sensitivity to tree geometry and woody volume: a model analysis[J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, 33(2): 360—371.
- [20] Kasischke, E. S., Melack, J. M., Dobson, M. C. The use of imaging radar for ecological applications: a review[J]. *Remote Sens. Environment*, 1997, 59: 141—156.
- [21] Imhoff, M. L. Radar backscatter, biomass saturation: ramifications for global biomass inventory[J]. *IEEE Trans. Geosci. and Remote Sensing*, 1995, 33: 511—518.
- [22] Waring, R. H., Way, J. B., Haant, E. R., Jr., et al. Imaging radar for ecosystem studies[J]. *Biosci.*, 1995, 45: 715—723.

The Potential of Multiparameters SAR Data in Forest Applications

LIAO Jing-juan, SHAO Yun

(*Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101*)

Abstract: This paper presents the results of forest discrimination, classification, and volume estimation in two test sites of China using multiparameters airborne and spaceborne imaging radar data. The SAR data were acquired during SIR-C/X-SAR and GlobeSAR missions. To improve the understanding of radar backscatter to canopy geometric feature, we extracted backscatter coefficient and intensity to analyze the effect of forest type discrimination, and the relationship between forest parameters and radar backscatter. This study shows that it is very efficient for multifrequency and multipolarization SAR data to discriminate different types of forest. The intensity of radar backscatter is also quite sensitive to the forest parameters, especially diameter at breast height (dbh) and tree mean height. Based on this sensitivity, the forest volume of the test site was estimated. Finally, the potential of multiparameters SAR data for forest applications was analyzed.

Key words: Multiparameters SAR data; Forest applications