

广东肇庆地区 SIR-C森林雷达后向散射特征分析*

廖静娟 郭华东

(中国科学院遥感应用研究所 北京 100101)

摘 要 森林雷达后向散射特征的研究是森林微波遥感应用的重要前提。本文利用不连续树冠森林微波后向散射模型模拟了肇庆地区松树林的雷达后向散射特征,并与从 SIR-C 图像提取的雷达后向散射特征进行对比,从而分析和探讨了该区松树的雷达后向散射机制。

关键词 SIR-C, 森林雷达后向散射特征, 分析

1 引 言

在雷达遥感应用中,对于图像的解译,依赖于人们对雷达后向散射过程的理解及对各种后向散射机制的充分认识^[1]。因此,森林微波后向散射特征的研究,在森林微波遥感应用中引起了众多研究者的重视。一般来说,根据树冠覆盖率可将森林分为连续树冠森林和不连续树冠森林。即当树冠覆盖率 > 60% 时,为连续树冠森林;当树冠覆盖率 ≤ 60% 时,为不连续树冠森林^[2]。从 70 年代后期开始,陆续发展了许多森林微波后向散射模型^[3-7]。这些模型均以层状树冠结构为基础,将树冠假设为均匀分布的散射层,对具有浓密树冠结构的森林较为适用,可以成功地预测它们的后向散射特征,因此称为连续树冠森林微波后向散射模型。但这些模型对树冠密度较低的森林和疏林地却不适用。

90 年代初, Sun 等人^[8]在几何光学树冠模型^[9]的基础上,通过间隙率(gap probability)方法和耦合辐射传输理论(coupling radiative transfer theory)建立了不连续树冠森林微波后向散射模型。该模型能够预测非郁闭的林分和疏林地的森林微波后向散射特征。后来 Wang 等人^[10]又对模型进行了补充完善,并成功地预测了孟加拉南部 Ganges 三角洲的热带红树林的后向散射特征^[11],以及加利福尼亚州 Mt. Shasta 东南部 Ponderosa 松树和阿拉斯加北方森林的雷达后向散射特征^[12,13]。

本文研究以广东肇庆松树为例,开展航天飞机

成像雷达 SIR-C 图像的森林雷达后向散射特征分析,并利用 Wang 等人^[10]的不连续树冠模型模拟了该区松树的雷达后向散射特征,从而与 SIR-C 图像上提取的雷达后向散射特征进行对比,探讨森林的雷达后向散射机制。

2 理论模型

由 Sun 等人^[8]提出, Wang 等人^[10]又对其进行了补充和完善的不连续树冠森林微波后向散射模型是单棵树后向散射模型与间隙率模型的综合。模型将单棵树看作为散射体和衰减体,利用散射和衰减的概率来计算整个森林的散射。模型用 4×4 的 Mueller 矩阵代表 4 种主要散射成分,即:地表散射(M_s)、冠层体散射(M_c)、冠层与地表相互作用散射(M_m)和树干与地表双向作用散射(M_d)。根据入射与返回的雷达信号在路径中经过冠层后衰减的次數,又对每种主要的成分定义了各种子成分,每种子成分的后向散射由其出现的概率决定。因此,总的后向散射(M_t)为:

$$M_t = M_s + M_c + M_m + M_d \quad (1)$$

对于线性极化(HH, HV, VH 和 VV),后向散射系数为:

$$\begin{aligned} \sigma_{hh} &= 4\pi \cos\theta_0 M_t(2,2); \quad \sigma_{hv} = 4\pi \cos\theta_0 M_t(2,1); \\ \sigma_{vh} &= 4\pi \cos\theta_0 M_t(1,2); \quad \sigma_{vv} = 4\pi \cos\theta_0 M_t(1,1); \end{aligned} \quad (2)$$

这里 θ_0 为雷达入射角。

在雷达与地面相互作用中,雷达波穿过 n ($n = 0, 1, 2, \dots$) 棵树树冠的概率 $P(n)$,可用 Poisson 分

* 国家自然科学基金重大基金资助项目,编号:49493403。

收稿日期:1997-09-04;收到修改稿日期:1998-02-24

布式给出：

$$P(n) = r^n e^{-r} / n! \quad (3)$$

其中 r 为树干密度与树冠投影区平均面积的乘积，即树冠投影区总面积与整个森林面积之比。 $P(0)$ 表示雷达波未穿过树冠， $P(1)$ 表示穿过一棵树树冠，依次类推。在实际计算中，当 $n > 2$ 时， $P(n)$ 极小，因此，可假设 $n > 2$ 时， $P(n) = 0$ ，则

$$P(2) = 1.0 - P(0) - P(1) \quad (4)$$

3 研究区与数据获取

3.1 研究区概况

研究区位于广东省肇庆地区东北，属亚热带—热带气候。区内主要土地类型有农田、林地、果园及水体等。林地的森林类型主要以人工针叶林为主，树种为马尾松和美国湿地松，平均树龄 10—15 年，树冠基本未郁闭。林下部分地区有少量杂草及灌丛，林区地势平坦，起伏较小，平均海拔变化不超过 100m，平均坡度 15°。土壤成分为泥和粘土，粗糙度中等。由于该区气候湿润多雨，故土壤含水量在短期内变化较大。

3.2 数据获取

SIR-C 数据 SIR-C 数据为 1994 年 10 月美国奋进号航天飞机获取的合成孔径成像雷达数据，拥有 L(23.5cm) 和 C(5.9cm) 两个波段，HH, HV, VH 和 VV 4 种极化方式。图像中心的人射角为 28°，像元大小为 12.5m × 12.5m，距离向和方位向分辨率均为 25m，像幅宽度 24km。

地面数据 地面数据包括森林参数、地表参数和介电常数。其中森林参数为野外实地测量和地方林业部门调查数据的综合(表 1)。表中树密度为地方林业部门的调查数据，树枝密度和树叶密度是根据摄影照片估测出的。在野外对树高(h)、树冠宽度(w)和高度(d)、树干平均胸径(dbh)、树枝、树叶的长度和直径进行了实地测量，并利用测量数据对树高、树冠宽度和高度与树干平均胸径进行了回归分析，求得了它们的回归方程。

由于地物的介电常数主要对后向散射影响较大，而对地物的体散射影响较小^[14]，因而在模拟计算中采用了 Sun 等人^[8]测得的树干、树枝和树叶的介电常数，同时，Sun 等人认为树干、树枝和树叶的介电常数是—致的，并测得它们在 L 和 C 波段的介电常数分别为 (20.0, -j5.0) 和 (22.5, -j7.5)。此外，我们利用微

波网络仪同轴探头法对野外实时采集的地表土壤进行了测量，测得土壤的介电常数为 (4.1, -j0.3)。地表粗糙度则用粗糙度仪在实地直接进行测量，测得相关长度和均方根高度分别为 0.09m 和 0.01m。因此，在 L 波段，我们采用小扰模型来预测地表的后向散射，而在 C 波段则用几何光学模型来预测。

表1 广东肇庆地区松树参数

Table 1 The parameters of pine forests at Zhaoqing area, Guangdong Province

参 数	数 值
树密度/棵/hm ²	2565
树干平均胸径/cm	4.7
树高/m	$h=25.68dbh+5.02$
树冠宽度/m	$w=7.04dbh+2.64$
树冠高度/m	$d=0.61dbh+2.25$
树枝密度/m ⁻³	大: 4.49, 中: 24.65, 小: 22.3
树枝长度/m	大: 0.82, 中: 0.31, 小: 0.12
树枝直径/cm	大: 1.02, 中: 0.48, 小: 0.24
树叶密度/m ⁻³	4000
树叶长度/cm	2.3
树叶直径/mm	1.0

4 森林雷达后向散射特征分析及机理探讨

4.1 SIR-C 图像提取与模拟计算两种后向散射系数的对比

在多波段、多极化 SIR-C 数据 (L-HH, L-HV 和 C-HV) 合成的彩色图像上 (图版 I 图 1)，松树呈绿色。由于 SIR-C 数据已经定标，因而可以从中提取松树的后向散射系数。对于 L 和 C 波段，SIR-C 数据分别具有 ± 2dB 和 ± 3.2dB 的定标不确定性^[15]。同时，利用不连续树冠模型，分别计算了入射角为 28° 时 L 和 C 波段 HH, HV 和 VV 极化的森林雷达后向散射系数。

表2 L和C波段松树的雷达后向散射系数

Table 2 The Radar backscatter coefficients of pine forests at L and C bands

	SIR-C 图像提取		模拟计算 σ^0 (dB) ($\theta = 28^\circ$)
	σ^0 (dB)	sd*	
L-HH	-8.1	1.1	-9.5
L-HV	-16.1	1.0	-20.0
L-VV	-9.0	0.8	-10.9
C-HH	-11.5	1.0	-12.2
C-HV	-14.1	0.9	-17.2
C-VV	-12.9	0.5	-12.6

*sd: 标准偏差

表 2 为 SIR-C 图像提取的后向散射系数和模拟计算的后向散射系数,其中 SIR-C 图像提取的后向散射系数值均为不少于 50 个像元点的平均值,并且使图像上提取后向散射系数的点与实地测量点一致。从表中可见:

(1) 模型能较好地预测 L 和 C 波段同极化的雷达后向散射特征,模拟值和 SAR 图像上提取的值相比略有差异,但基本在定标的不确定范围内。对于交叉极化,模型对 C 波段的预测显然比 L 波段好;

(2) L 波段同极化的后向散射系数均比 C 波段的大,说明在 L 波段同极化下,松树的雷达回波均比 C 波段强;

(3) 不论 L 波段还是 C 波段,同极化后向散射系数均比交叉极化大,HH 后向散射系数均比 VV 大,说明同极化的雷达回波比交叉极化强,HH 回波

比 VV 强。以下将利用后向散射模型来解释这些特征。

4.2 雷达后向散射特征分析及机理探讨

根据不连续树冠森林微波后向散射模型,松树的后向散射可以由 4 部分组成,即地表散射、冠层体散射、冠层与地表相互作用散射和树干与地表双向作用散射。因此,可以通过模型计算各种散射作用对松树总后向散射的贡献,从而分析和探讨散射作用机理。

从图 2,3 可见,对于 C 波段,松树的雷达后向散射主要来自于冠层体散射,入射波能量基本不能达到树干层和地表,故后向散射强度基本上由冠层体散射的强度决定,而与树干和地表参数关系不大,并且由于本区松树的树冠不连续,树冠密度在空间上

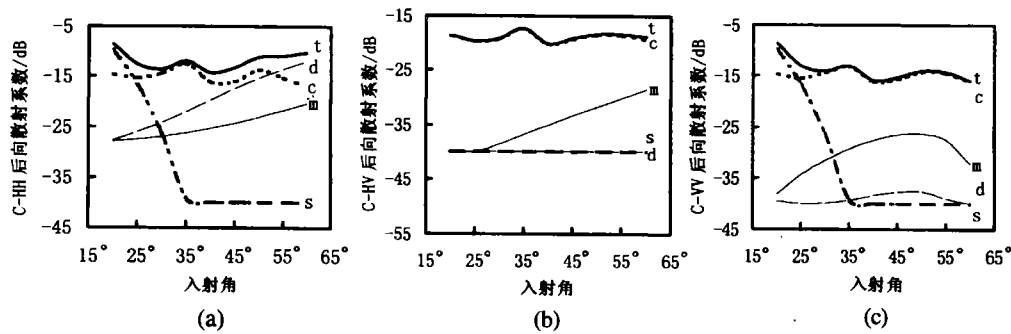


图 2 模拟计算的肇庆地区 C 波段松树的散射成分对比

(a)模拟的 HH 后向散射成分; (b)模拟的 HV 后向散射成分; (c)模拟的 VV 后向散射成分
(c=冠层体散射; d=树干与地表双向作用散射; m=冠层与地表相互作用; s=地表散射;
t=总后向散射)

Fig.2 Comparison of modeled backscatter components at C-band for pine forests at Zhaoqing area

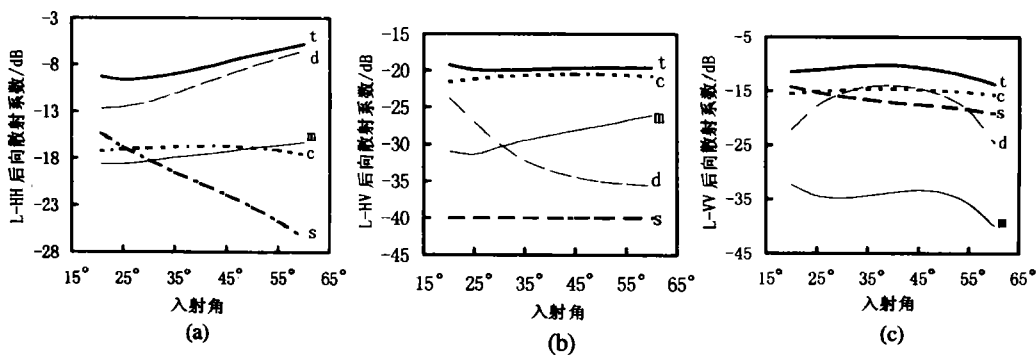


图 3 模拟计算的肇庆地区 L 波段松树的散射成分对比

(a)模拟的 HH 后向散射成分; (b)模拟的 HV 后向散射成分; (c)模拟的 VV 后向散射成分
(c=冠层体散射; d=树干与地表双向作用散射; m=冠层与地表相互作用; s=地表散射;
t=总后向散射)

Fig.3 Comparison of modeled backscatter components at L-band for pine forests at Zhaoqing area

分布不均匀,故当入射角变化时,树冠体散射出现波动。但对于 L 波段,由于波长较长,入射波能最大限度地穿透树冠层,到达树干和地表,这样雷达的后向散射不仅来自于树干和地表的双向散射、冠层和地表的相互作用散射,也部分来自于地表散射及冠层体散射。因此,L波段的雷达回波普遍比 C 波段强。

对于极化,不论 L 波段还是 C 波段,交叉极化的雷达后向散射均主要来自于冠层体散射,故交叉极化的后向散射强度常常比同极化的弱(图 2,3)。在 L-HV,入射波能量穿过树冠层时不仅产生体散射,而且有一定程度的衰减,因而 L-HV 的雷达回波甚至比 C-HV 弱。

在 C-HH 中,随着入射角增大,树冠与地表以及树干与地表的散射作用将增加。在 C-VV 中,当入射角小于 50° 时,随着入射角增大,也将增加树干与地表之间的双向作用散射(图 2),故 C 波段 HH 和 VV 极化的散射强度均比 HV 极化强,而且 HH 比 VV 强。

在 L-HH,后向散射主要来自于树干与地表的双向散射,并随着入射角增大,双向散射的贡献亦越大。而在 L-VV,地表散射、冠层体散射和树干与地表的双向作用散射共同决定总的后向散射强度,其中地表散射随着入射角增大而减弱,树干与地表的双向作用散射在 $35^\circ-45^\circ$ 时达到最大,冠层体散射则变化很少(图 3),从而决定了 L-VV 的雷达回波强度比 L-HH 弱。

5 结 论

不连续树冠森林微波后向散射模型能较好地预测肇庆地区松树的雷达后向散射特征。根据模拟计算的结果可知,L波段和 C 波段的雷达后向散射特征有较大的差别,对于 C 波段,不论同极化还是交叉极化,冠层体散射是松树后向散射的主要来源;而对于 L 波段,HH 极化的后向散射主要来自于树干与地表的双向作用,HV 极化则主要来自于冠层体散射,VV 极化则为地表散射、冠层体散射和树干与地表的双向散射共同作用的结果。

参 考 文 献

- Richards. Radar Backscatter Modeling of Forests: A Review of Current Trends. *Int. J. Remote Sens.*, 1990, 11(7):1299—1312.
- UNESCO. International Classification and Mapping of Vegetation. 1973. (Paris: United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization).
- A. K. Fung, F. T. Ulaby. A Scatter Model for Leafy Vegetation. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1978, GE-16(4):281—285.
- N. Engheta, C. Elachi. Radar Scattering Model from a Diffuse Vegetation Layer over a Smooth Surface. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1982, GE-20(2):212—216.
- Richards, G. Sun, D.S. Simonett. L-band Radar Backscatter Modeling of Forest Stands. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1987, GE-25(4):487—488.
- Sun, D. S. Simonett. Simulation of L-band HH Radar Backscattering for Coniferous Forest Stands: A Comparison with SIR-B Data. *Int. J. Remote Sens.*, 1988, 9(5):907—925.
- F. T. Ulaby, K. Sarabandi, K. C. McDonald, M. Whitt M. C. Dobson. Michigan Microwave Canopy Scattering Model. *Int. J. Remote Sens.*, 1990, 11(7):1223—1253.
- G. Sun, D.S. Simonett, A.H. Strahler. A Radar Backscattering Model for Discontinuous Coniferous Forests. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1991, 29(4):639—650.
- Li, A, H. Strahler. Modeling the Gap Probability of a Discontinuous Vegetation Canopy. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1988, 26(2):161—170.
- Y. Wang, J. Day, G. Sun. Santa Barbara Microwave Backscattering Modeling for Woodland. *Int. J. Remote Sens.*, 1993, 14(8):1477—1493.
- Y. Wang, M. L. Imhoff. Simulated and Observed L-HH Radar Backscatter from Tropical Mangrove Forests. *Int. J. Remote Sens.*, 1993, 14(15):2819—2828.
- Y. Wang, F. W. Davis, J. M. Melack. Simulated and Observed Backscatter at P-, L-, and C-Bands from Ponderosa Pine Stands. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1993, 31(4):871—879.
- Y. Wang, J. L. Day, F. W. Davis, J. M. Melack. Modeling L-Band Radar Backscatter of Alaskan Boreal Forest. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1993, 31(6):1146—1154.
- 日本遥感研究会编(刘勇卫,贺雪鸿译). 遥感精解. 北京:测绘出版社, 1993.
- A. Freeman, M. Alves, et al. SIR-C Data Quality and Calibration Results. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sens.*, 1995, 33(4):848—857.

作 者 简 介

廖静娟,女,1966年5月生。1993年在中国科学院地球物理研究所获固体地球物理专业博士学位。现从事雷达遥感应用及应用基础研究,已发表论文10余篇。

Analysis of Forest Radar Backscatter Mechanism for SIR-C Data at Zhaoqing Area of Guangdong Province

Liao Jingjuan Guo Huadong

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

Abstract It is very important to study forest radar backscattering mechanism for forest microwave remote sensing applications. In this paper, we use the discontinuous canopy microwave backscattering model in conjunction with the ground truth measurements to model the radar backscatter behavior from pine forests at the Zhaoqing area, Guangdong Province. It is very well for the model to predict the radar backscatter of pine stand at L-, and C-band, and the contribution from each of the scattering mechanisms to the total backscatter is calculated. The results are used to discuss the effect of the physical properties of the forest components on the radar backscatter. They are also used to show not only the backscatter but also the relative contribution from various scattering mechanisms that will help in the quantitative interpretation of SAR data. So the comparison of the backscatter coefficients from the model prediction and SIR-C data is done, and the radar backscatter mechanism of pine forests is analyzed and discussed.

Key words SIR-C, Forest radar backscatter mechanism, Analysis