

文章编号:1007-4619(2002)06-0440-11

水稻时域后向散射特性分析:雷达卫星观测与模型模拟结果对比

邵芸,廖静娟,范湘涛,刘浩

(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)

摘要: 利用已有的微波后向散射模型模拟计算了水稻的雷达后向散射特性,分析了一个生长周期内水稻冠层与微波电磁波的相互作用。重点分析植物物理参数对其后向散射特征的影响及其随极化而变化的规律,以及这些特征在整个水稻生长周期中的变化规律。输入后向散射模型的数据包括通过田间测量获取的水稻物理参数。在地面测量的同时或准同时获取了中国广东肇庆试验区的多时相雷达卫星(RADARSAT)遥感图像。雷达卫星观测结果和后向散射模型模拟计算结果的分析表明:在水稻的生长过程中,水稻的后向散射特征随其物理参数的周期性变化而变化,并且在不同的极化状态具有不同的变化规律,这从理论上预示了多时相多极化雷达遥感技术进行水稻长势监测的潜力。

关键词: 雷达遥感;水稻;后向散射系数;时域分析;模型模拟

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

二十多年来,科学家们建立了许多植被微波后向散射模型^[1-6]。植被物理参数特性作为参数直接输入模型,并且从这些模型中分析出各种植物的后向散射特性。从简单的“云层”状模型发展到多层多元模型,如 Ulaby 所提出的 MIMICS 模型。就像 MIMICS 模型所显示的模型复杂性那样,尽管在认识、分析雷达图像特征,目标信息提取的基础理论方面已取得了一些进展,但是迄今为止,雷达遥感模型模拟计算的结果在很大程度上还是试验性的,在多数情况下甚至是不确定的。因此,雷达遥感数据的运行性运用更需要对微波与植被及土壤之间的相互作用机理有更深刻的了解,更需要研究发展精度更高更完善的模型。本研究引进由 Sun(1991)发展的,并由 Wang(1993)实现的森林微波后向散射模型,计算模拟水稻后向散射特性。

水稻是人类的主要粮食作物,在世界粮食供应中举足轻重,对中国更具有特殊意义。因此,水稻的

长势监测和估产十分重要。水稻种植遍布全中国,据 1991 年统计^[7],全国水稻种植 $33 \times 10^4 \text{ km}^2$,占世界水稻种植面积的 23%。全国水稻总产 $1.9 \times 10^7 \text{ t}$,占世界水稻总产量的 37%。平均每公顷产量 5.8t,是世界平均产量的 1.63 倍。1991 年全国水稻耕种面积只占耕地总面积的 30%,但产量却占粮食总产的 42%。据《2000 年中国统计年鉴》(中国国家统计局,2000 年),1999 年中国水稻总产 $1.9 \times 10^7 \text{ t}$,占全国粮食总产的 43.8%。由于世界人口增加对粮食需求增长,水稻产量预计将大幅度提高。因此,每年水稻的栽种面积和产量对上至国家、省区下至粮食市场和农民来说都至关重要。

水稻是喜温好湿的作物。世界绝大部分水稻生长在阴雨连绵,温暖湿润的环境里。同样,中国水稻绝大部分(90%)分布在华东华南地区,主要在长江下游地区。这些地区丰富的水资源和温暖的气候适宜水稻生长。长江以南地区每年的晴天数都在 50 天以下,即水稻生长区为少晴多云地区。在这些地区用光学遥感来监测水稻生长情况受到限制。因此,具有全天时、全天候、高重复覆盖率的合成孔径

收稿日期:2002-04-01;修订日期:2002-06-08

基金项目:中国科学院知识创新工程项目“数字地球基础理论研究”(KZCX2-312)和国家自然科学基金重点项目(49989001)资助。

作者简介:邵芸(1961—),女,博士,中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室常务副主任,研究员,博士生导师。1986 年毕业于北京大学。主要从事雷达遥感应用基础研究,特别是雷达农业遥感应用基础研究。已在国内外公开发表论文 70 余篇,出版专著 5 部。

雷达(SAR)可以成为热带、亚热带地区用于农业监测的重要的高分辨率遥感数据源之一。雷达遥感还能反映湿度、粗糙度,以及植被几何结构,与光学遥感数据互补。

雷达遥感研究领域已做了许多富有成效的研究工作,包括水稻和非水稻分类^[8-10]。Shao等人通过使用多时相雷达卫星数据和时域散射特性的分析,识别出4种类型的水稻,其生长周期从80天到120—125天,制作了水稻分布图^[11-17],并对水稻的可能产量进行了预估。水稻的生长周期长短对水稻的产量和质量都具有重要影响^[15-17]。

已有的研究^[15-17]表明,多时相C波段HH极化雷达卫星数据能够区分从80天到120—125天四种生长周期不同的水稻类型。这项研究为用户提供了两种信息,即各种类型水稻的种植面积及其可能的产量。虽然运用多时相雷达遥感数据及其他辅助信息进行水稻监测和估产的方法已被引入全国农作物估产系统,但在实际运用中却不够经济。随着多极化SAR雷达数据和极化测量SAR雷达数据的出现,水稻的介电特性和几何特性参数可以独立求解,这将大大提高目标的可探测性和分类精度。这项研究旨在为今后极化测量和多极化雷达遥感数据水稻监测和估产应用提供理论分析。

本研究目的为:

(1) 研究微波电磁波与水稻冠层间的相互作用过程与机理;

(2) 研究植物物理参数对其后向散射特征的影响,研究水稻后向散射特性及其极化特性在一个完整的水稻生长周期中的变化规律;

(3) 通过模型预测水稻极化散射特性,并据此研究极化测量或多极化雷达数据进行水稻监测和估产的潜在能力。

目前,可供实际应用的多极化或极化测量星载雷达遥感系统尚在研制中。为研究水稻的极化散射特性,我们引进Sun(1991)年建立的模型,模拟计算水稻后向散射特征。模型所输入的数据,包括地面测量的水稻物理参数。模型用于研究水稻的时域后向散射特征,特别是水稻生长周期内的极化特征研究。研究中,还将C波段HH极化45°入射角时的模型计算结果与肇庆试验区多时相雷达卫星遥感图像进行了对比分析。

2 试验区概况、雷达遥感数据与水稻物候历

2.1 试验区与雷达数据

试验区位于北纬112.30°,东经22.30°,广东肇庆地区。所用的多时相雷达数据为1997年4月至7月间获取的标准模式的7景RADARSAT图像。分辨率为25m,覆盖面积100km×100km。其中4景图像是S6模式($\theta = 41-46^\circ$),分别于4月25日,5月19日,6月12日和7月6日获取,3景图像是S5模式($\theta = 36-42^\circ$)分别于6月4日,6月29日和7月22日获取。

2.2 水稻物候历

肇庆试验区一年收获两季稻:早稻(春季稻)和晚稻(秋季稻)。水稻的一个生长周期内,有5个主要生长时期:1)插秧期,秧苗从苗床插秧到水田,具体时间随每年气候尤其是温度的高低变化而提前或推迟。2)秧苗生长期,秧苗长出根系。3)分蘖期,生长期结束进入繁殖期。4)抽穗期,穗开始形成。5)成熟期,水稻成熟,预备收割。早稻的5个生长时期分别为3月25日—4月5日,4月15日—25日,5月10日—30日,6月10日—25日,7月5日—31日。每个生长时期的具体日期会随水稻生长周期中的气候状况变化而变化,成熟速度和生长周期视品种而定。上述水稻物候历代表了肇庆试验区典型的水稻生长特性,水稻的物候历随地理位置、生态环境、气候、水稻品种,特别是插秧时间的不同而变化。

3 研究方法

3.1 水稻物理参数测量

水稻的物理参数的地面测量与RADARSAT卫星过顶同步进行,但由于无法预先知道RADARSAT过顶的确切日期,因此,有些地面测量与RADARSAT的过顶时间不完全一致,前后仅相差一、二天。在一块面积为300m×400m的试验样地内(图1),取20墩水稻样本进行测量。每一个水稻采样点的间距为100m。测量记录内容包括:日期、样本序号、行距、

墩距、每墩水稻的株数、茎秆高、茎秆宽、每墩水稻的鲜重、含水量和每株水稻的叶数；茎秆直径和茎秆叶片间夹角；还有气象数据，包括气温、气压、相对湿度、风速、风向等。所有水稻物理系数的地面测量数据都输入数据库(表 1)。

3.2 水稻生物量测量

水稻的鲜生物量由水稻鲜重、每墩间距、每墩株数和每株叶数决定。这样，我们得到水稻鲜生物量 M 为：

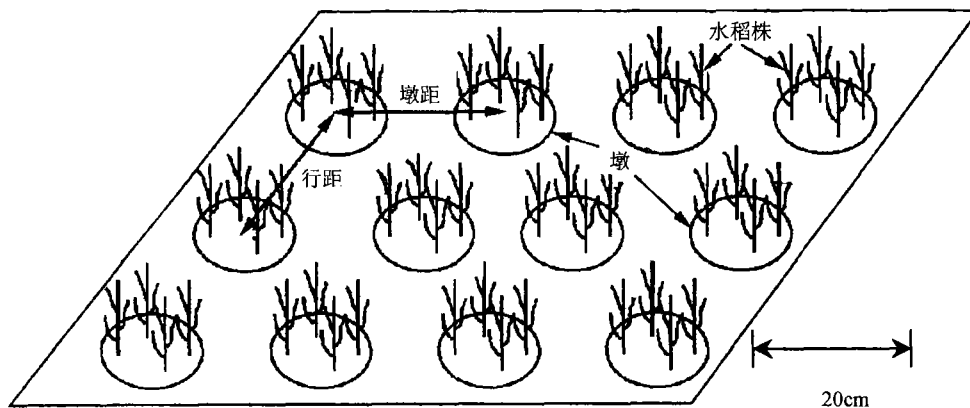


图 1 水稻研究样区选择和采样策略示意图

Fig.1 Schematic showing site selection and sampling strategy for rice plots

表 1 水稻物理参数和 RADARSAT 导出的后向散射系数

Table 1 Backscatter coefficients calculated from RADARSAT images and the physical parameters of rice

测量日期	生物量 /(g/m ²)	鲜重/g	含水量 /%	茎高 /mm	叶长 /mm	叶片数	后向散射系数 /dB
3月28日	80	0.455	80.8	167.4	101.45	5	
4月11日	257	1.18	82.4	300.35	140.45	5	
4月22日	1034.17	3.33	85.2	456.26	258.58	5	-8.57996
5月4日	2333.43	5.02	83.8	638.15	327.90	5	
5月19日	3767.83	12.32	77	806.3	397.75	5	-8.84906
6月5日	5262.42	13.66	72.3	938.7	408.40	5	-8.47233
6月12日	4618.6	13.34	72.6	923.2	424.00	4	-9.02087
6月29日	5886.96	17.89	55	905.25	415.05	4	-6.52986
7月7日	3771.75	11.39	54.58	902.75	438.50	3	-6.61776

$$M = [1000/a \times 1000/b] \times W_f \times N$$

其中：

- a ——行距；
- b ——排距；
- W_f ——每墩的鲜重；
- N ——每墩的株数。

3.3 水稻介电常数

水稻的含水量，由新鲜水稻与烘干水稻的重量差决定。水稻的含水量以百分比表示，计算如

下^[18-19]：

$$m_g = (m_f - m_d) / m_f \times 100\%$$

其中：

- m_f ——每墩鲜重；
- m_d ——每墩干重。

水稻的含水量在幼年期为 80%，分蘖期为 85%。在分蘖期结束时含水量逐渐减少，到成熟期降至最低点，55%。水稻生长初期含水量比成熟期高出 30%^[15-17]。水稻冠层的介电常数由 Ulaby 和 El-Rayes 提出的经验模型计算得出(表 2)。

表 2 水稻生长周期内(3月28日—7月7日)随时间变化的水稻介电常数

Table 2 Rice dielectric constant as time variation in rice growth cycle(from 28, Mar to 7, July)

日期	稻龄/d	ϵ'	ϵ''	$m_d/\%$
3月28日	2	32.281486	-10.221949	80.8
4月11日	16	33.436552	-10.565054	82.4
4月22日	27	35.511979	-11.180154	85.2
5月4日	39	34.465654	-10.87026	83.8
5月19日	54	29.627641	-9.431165	77
6月5日	71	26.517746	-8.499077	72.3
6月12日	78	26.710599	-8.557079	72.6
6月29日	95	16.662313	-5.477335	55
7月7日	105	16.453078	-5.411363	54.58

3.4 水稻物理参数与介电特性分析

1996年春、秋和1997年春都进行了水稻物理参数测量。只有1997年的测量数据被输入了模型,用于进行讨论分析,1996年的测量数据仅作为参考。3季的地面测量结果具有很好的一致性。这里仅讨论1997年地面测量的结果。表1是地面测量的部分水稻结构参数,图2是随时间变化的水稻生物量(鲜重)。随着水稻的生长发育,生物量也随之增加。抽穗期时生物量减少,到成熟期时又增加。3个季节生物量的测量结果是一致的。

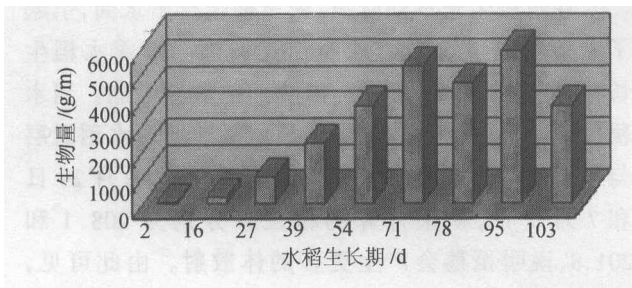


图 2 1997年3月28日至7月7日水稻生长期内的水稻生物量变化(鲜重/m²)

Fig.2 Biomass(fresh weight per m²)of rice as a function of time for the rice growth cycle from March 28 to July 7,1997

如图2所示,水稻生物量在插秧后的头30天内缓慢增加,之后就迅速增加直至抽穗期前的第71天,到71天后有所减少,随后又增加。71天前每茎5叶。随着水稻的成熟,叶片干枯减少。最后,每株水稻仅有3片叶片。第一次生物量减少是由于78天左右,稻穗的形成导致了叶片的逐渐减少,第二次生物量增加是由于95天后水稻开始灌浆。在1996年的春秋两季地面测量中也观测到了类似的变化。

当水稻成熟后,稻穗的重量会压低水稻茎秆,使得水稻的茎干高度降低。水稻介电常数随时间变化规律见表2所示。介电常数在5月中旬之前逐渐增加,随后迅速减少,直至收割,因为水稻逐渐干枯成熟。根据气象数据,取水稻生长周期内的平均季节性温度,则水的介电常数假设为74。

3.5 模型刻画与输出

模型假设雷达发射的电磁波波束与水稻冠层发生3种形式的相互作用:1)至少与一株水稻发生相互作用;2)不与水稻冠层相互作用,即通过水稻秧苗间隙直接入射水面并产生镜面反射;3)波束到达水稻茎秆后,产生二次反弹(二面角)散射。电磁波波束与水稻冠层的相互作用,随水稻秧苗密度大小和水稻冠层湿度在整个生长周期内的变化而变化。

水稻后向散射能量有3部分组成:1)水稻冠层本身的体散射能量;2)水稻冠层下水面的面散射;3)水稻茎秆和叶片与水面间的多次散射。因此水稻后向散射系数 σ^0 应为是这3项之和,即:

$$\sigma^0 = \sigma_s^0 + \sigma_v^0 + \sigma_m^0$$

其中:

σ_s^0 ——水面的面散射;

σ_v^0 ——水稻冠层的体散射;

σ_m^0 ——水稻冠层与水面间的相互作用和水稻茎秆叶片与水面间的二次反弹散射。

对于水稻冠层,茎秆散射可用有限长的圆柱体来近似计算,这里,有限长圆柱体的半径为地面所测水稻茎秆宽度的一半。叶片散射用椭圆盘的物理光学模型来近似计算。水面反射能随表面粗糙度而变化,用微扰模型计算。

模型输入参数为地面测量的水稻物理参数;根据水稻含水量计算的介电常数,茎秆高,茎秆宽,叶片长,叶片宽,墩距、行距及每墩株数。测量日期分别是 1997 年 3 月 28 日,4 月 11 日,4 月 22 日,5 月 4 日,5 月 19 日,6 月 5 日,6 月 12 日,6 月 29 日和 7 月 7 日。模型计算输出某一入射角时的 5 个参数,这 5 个参数是 HH 极化、HV 极化和 VV 极化后向散射系数、VV—HH 相位差及 HH—VV 相关系数。模型同时还计算输出某一入射角时水稻冠层散射、水面与水稻冠层相互作用、二次反弹散射、水面反射和水稻冠层的后向散射总功率。这些参数都随入射角的变化而变化,但不同的参数其变化规律也不同。模型计算输出了大量数据,表 3、表 4、表 5 和图 3、图 4、图 5 仅列出其中部分筛选出的模型计算结果。表 3 和表 4 给出的是模型根据 1997 年 3 月 28 日和 6 月 29 日所测量的水稻参数,计算出的不同入射角时的后向散射系数。表 5 是当入射角为 45°时,计算得出的随时间而变化的水稻后向散射系数。

4 模型模拟结果与讨论

表 3 和表 4 是随入射角变化而计算得出的后向散射系数。如表 3 所示,水稻在生长阶段的初期,冠层散射、水面与水稻冠层相互作用、二次反弹、水面反射、水稻冠层总后向散射功率,在 HH、HV、VV 极化状态下均相对变化很小,VV—HH 相位差和 HH—VV 相关系数也基本如此。只有水面与水稻冠层相互作用的 VV—HH 相位差除外,它随入射角增大,相位差从 288°降低到 191°,即入射角越小,多次散射越多。以上分析说明水稻插秧后的短时间内,入射角并不起重要作用。从模型计算结果可以观察到,水稻插秧 16 天后,后向散射系数变化趋于复杂,水稻冠层回波趋于增强。特别是 HH 极化水面与水稻冠层相互作用的后向散射系数从 3 月 28 日的 -12.69dB 跃升到了 4 月 11 日的 -4.77dB。随着秧苗生长,后向散射系数增大,后向散射特性也随入射角的不同出现了更多变化。

比较表 3 和表 4 可以看出,随着水稻日渐成熟,后向散射特征随着极化的变化,其后向散射机理趋于更为复杂。雷达后向散射系数变化的趋势不是简单的增大或减小,HH 极化和 HV 极化时,6 月 29 日的冠层后向散射系数比 3 月 28 日的约高 10dB。VV 极化在入射角为 35°和 50°时有两个高峰。显然 VV 极化随入射角不同有更多变化。HH 和 HV 极化的

水面与水稻冠层相互作用和二次反弹散射随入射角增大而减小。对于 VV 极化来说,入射角对水面与水稻冠层相互作用和二次反弹散射的影响没有对 HH 和 HV 那样强。但是 VV 极化在 35°时达到最高点 -14.4dB,其他入射角角度时的后向散射系数都更低。VV 极化后向散射系数的最大差别也仅有 3dB,远远小于 HH 和 HV 极化的变化差别。就水稻而言,HH 和 HV 极化对入射角更为敏感。水面与水稻冠层相互作用的 VV—HH 相位差从 273°降低到 204°,清晰表明在水稻冠层中发生了多次散射。对于冠层后向散射和水面与水稻冠层相互作用,HH—VV 相关系数在 3 月 28 日幼年期时约为 0.3 和 0.4,在 6 月 29 日成熟期时约为 0.6 和 0.5,这意味着 HH 和 VV 极化的相关性很低,所以 HH 极化和 VV 极化可以作为相对独立的水稻冠层特性的测量数据。

表 5 是以入射角为 45°时,计算得出随时间变化的水稻的后向散射系数。当入射角为 45°时,水稻的冠层后向散射在 HH 和 HV 极化时,随水稻的生长而增长(见图 3,图 4)。但水稻 VV 极化后向散射系数,在水稻的早期生长阶段是增大的,但之后就保持相对稳定(见图 5)。Le Toan 等人 1997 年在利用 ERS-1 数据进行水稻研究时曾经指出随着水稻生物量的增加,雷达后向散射达到饱和状态。这一结论与本模型的计算结果(见表 5)相符。

在水稻生长早期阶段,秧苗稀疏露出水面,引起了大量水面与水稻冠层的相互作用。随着水稻生长,冠层渐渐密集,面散射减少而体散射增加。当水稻成熟时,冠层渐渐干枯,微波电磁波穿透水稻冠层与水面之间形成多次散射。成熟期时,如 6 月 29 日和 7 月 7 日,模型计算的相位差分别为 208.1 和 201.8,说明稻穗会产生更多的体散射。由此可见,多极化或极化测量 SAR 数据可能为我们提供更多的关于水稻穗的信息。

对于冠层后向散射,HH—VV 相关系数在生长早期阶段很低,如 3 月 28 日时为 0.41;在秧苗发育期约为 0.7;到抽穗期时较高,如 6 月 5 日和 12 日;到成熟期又降至 0.66。这表明在水稻生长中期,HH 和 VV 极化有较强的相关性,而在早期和成熟期则 HH 和 VV 的相关性较弱。表 1 和表 2 显示水稻在生长初期含水量高而生物量低,从第 39 天分蘖期到第 95 天抽穗期结束前,含水量高,生物量也高,在成熟期,含水量低而生物量高。HH 和 VV 极化之间的强相关性 with 高含水量和高生物量相一致;HH 和 VV 极化之间的低相关性也与低含水量,低生物量相一致。

表 3 模型计算得出的随入射角而变化的后向散射系数(3月28日)
Table 3 Backscatter coefficients with variation of incidence angle calculated from the simulated model (28, Mar, 1997)

入射角 / (°)	HH/dB			HV/dB			VV/dB			VV-HH 相位差/(°)			HH-VV 相关系数												
	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P					
20	-20.63	-12.69	-15.27	-40	-10.35	-24.88	-21.34	-24.16	-40	-18.4	-20.6	-20.28	-20.36	-40	-15.64	0.1	288.11	239.27	359.7	273.01	0.386	0.34	0.58	1	0.31
25	-20.69	-13.54	-16.6	-40	-11.27	-24.89	-21.81	-26.27	-40	-19.14	-20.61	-20.93	-18.15	-40	-14.93	0.3	253.91	227.46	359.6	243.25	0.39	0.35	0.84	1	0.4
30	-20.77	-13.82	-17.96	-40	-11.82	-24.92	-21.86	-27.92	-40	-19.45	-20.63	-20.09	-16.45	-40	-13.86	0.5	248.28	232.54	359.5	243.94	0.394	0.3	0.92	1	0.42
35	-20.87	-14.1	-18.91	-40	-12.22	-24.94	-21.73	-29.21	-40	-19.54	-20.65	-20.05	-15.41	-40	-13.26	0.7	234.49	245.51	359.3	250.27	0.399	0.3	0.95	1	0.43
40	-20.97	-14.21	-18.7	-40	-12.26	-24.97	-21.68	-30.17	-40	-19.61	-20.68	-19.71	-14.8	-40	-12.81	0.9	231.25	262.05	359.1	263.71	0.405	0.25	0.97	1	0.44
45	-21.09	-14.5	-17.31	-40	-12.09	-25.01	-21.73	-30.85	-40	-19.71	-20.71	-20.01	-14.47	-40	-12.66	1.2	218.53	275.5	358.8	273.94	0.411	0.26	0.97	1	0.48
50	-21.23	-14.73	-15.47	-40	-11.57	-25.04	-21.84	-33.1	-40	-19.82	-20.76	-20.18	-14.35	-40	-12.61	1.4	210.78	283.17	358.5	281.85	0.418	0.23	0.96	1	0.54
55	-21.42	-15.01	-13.74	-40	-10.91	-25.12	-22.03	-31.62	-40	-19.98	-20.82	-20.71	-14.49	-40	-12.81	1.7	200.11	286.32	358.1	285.17	0.425	0.24	0.97	1	0.59
60	-21.66	-15.24	-12.28	-40	-10.18	-25.23	-22.32	-31.87	-40	-20.21	-20.88	-21.36	-14.89	-40	-13.19	2.2	191.74	286.68	357.7	286.2	0.43	0.24	0.97	1	0.63

表 4 模型计算得出的随入射角而变化的后向散射系数(6月29日)
Table 4 Backscatter coefficients with variation of incidence angle calculated from the simulated model (29, Jun, 1997)

入射角 / (°)	HH/dB			HV/dB			VV/dB			VV-HH 相位差/(°)			HH-VV 相关系数												
	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P					
20	-10.38	-3.1	-5.51	-40	-0.64	-15.02	-15.8	-16.53	-40	-10.97	-13.38	-16.12	-15.36	-40	-10.02	9.7	273.16	307.8	359.4	302.97	0.512	0.66	0.7	1	0.47
25	-12.84	-4.08	-6.44	-40	-1.74	-18.69	-15.24	-18.96	-40	-12.51	-16.18	-16.98	-12.28	-40	-9.86	13.3	256.5	271.42	359.1	271.69	0.44	0.54	0.93	1	0.6
30	-12.62	-5.42	-7.63	-40	-2.89	-18.09	-14.95	-21.19	-40	-12.58	-11.76	-16.03	-10.15	-40	-7.25	5.07	239.5	268.47	358.8	267.22	0.31	0.42	0.97	1	0.52
35	-11	-7.12	-9.06	-40	-4	-11.52	-14.84	-23.41	-40	-9.67	-5.62	-14.44	-9.39	-40	-3.72	20.4	225.8	269.58	358.5	292.93	0.53	0.52	0.98	1	0.3
40	-15.61	-9.26	-10.66	-40	-6.34	-21.23	-15.97	-25.6	-40	-14.49	-16.62	-15.46	-9.38	-40	-7.81	3.6	213.7	272	357.8	264	0.4	0.52	0.99	1	0.59
45	-10.88	-11.49	-12.32	-40	-6.75	-15.38	-16.7	-27.66	-40	-12.91	-15.16	-15.49	-9.76	-40	-7.84	11.7	208.1	275.4	357.5	283.2	0.66	0.52	0.99	1	0.45
50	-15.39	-14.02	-13.89	-40	-9.61	-14.14	-18.13	-29.47	-40	-12.59	-7.04	15.74	-10.34	-40	-4.99	29.6	205.1	280.3	357	311.24	0.64	0.52	0.99	1	0.31
55	-11.12	-16.5	-15.2	-40	-8.86	-13.74	-19.53	-30.94	-40	12.66	-10.8	-16.68	-11	-40	-7.35	0.7	204.5	286.5	357	312.79	0.56	0.57	0.99	1	0.45
60	-13.61	-18.99	-16.11	-40	-10.94	-15.3	-21.3	-32.05	-40	-14.2	-15	-17.78	-11.71	-40	-9.36	2.2	204.5	293.9	356.6	315.5	0.85	0.61	0.98	1	0.58

表 5 模型计算得出的入射角为 45°时, 随时间而变化的后向散射系数(水稻生长周期为 3 月 28 日至 7 月 7 日)
 Table 5 Rice backscatter coefficient as time calculated from the simulated model (incidence angle is 45°, the rice growth cycle from March 28 to July 7, 1997)

测量日期	HH/dB			HV/dB			VV/dB			VV-HH 相位差/(°)			HH-VV 相关系数												
	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P	Cm.	C-G	D-B	Sur.	T-P					
March 28	-21.09	-14.5	-17.31	-40	-12.09	-25.01	-21.73	-30.85	-40	-19.71	-20.71	-20.01	-14.47	-40	-12.66	1.2	218.53	275.5	358.8	273.94	0.411	0.26	0.97	1	0.48
April 11	-17.57	-8.35	-15.8	-40	-7.21	-19.76	-16.27	-29.93	-40	-14.54	-17.82	-15.6	-12.9	-40	-10.21	0.3	268.89	276.24	358.7	282.35	0.69	0.52	0.99	1	0.52
April 22	-14.64	-8.37	-13.18	-40	-6.42	-18.79	-16	-32.15	-40	-14.1	-14.26	-17.85	-13.55	-40	-10.08	18.2	47.9	260.58	358.3	333.22	0.67	0.54	0.97	1	0.25
May 4	-15.84	-13.48	-21.13	-40	-11.64	-18.25	-20.72	-38.65	-40	-16.28	-14.94	-23.47	-20.55	-40	-13.43	30	37.8	269.77	358.7	18.39	0.89	0.52	0.97	0.999	0.49
May 19	-17.54	-14.56	-21.38	-40	-12.23	-19.03	-22.41	-38.28	-40	-17.35	-15.96	-25.21	-21.1	-40	-14.42	22	16.08	268.67	358.1	5.69	1	0.62	0.97	0.999	0.56
June 5	-15.32	-16.54	-22.89	-40	-11.84	-17.51	-22.96	-38.98	-40	-16.92	-16	-23.81	-22.1	-40	-14.87	15.8	234.3	272.15	358.7	330.66	1	0.60	0.98	1	0.62
June 12	-13.32	-17.85	-24.95	-40	-11.79	-16.34	-23.02	-39.07	-40	-15.48	-17.36	-21.69	-23.05	-40	-15.21	5.3	254.3	275.61	358.7	345.78	1	0.58	0.99	1	0.64
June 29	-10.38	-11.49	-12.32	-40	-6.75	-15.78	-16.9	-27.66	-40	-12.91	-15.16	-15.49	-9.76	-40	-7.84	11.7	208.11	275.4	357.8	283.2	0.66	0.52	0.99	1	0.45
July 7	-10.77	-11.03	-11.42	-40	-6.29	-15.5	-16.76	-26.79	-40	-12.89	-14.99	-15.54	-8.85	-40	-7.21	10.1	201.8	275.2	357.1	281.12	0.65	0.51	0.99	1	0.48

表 3, 4, 5 中, Cm. 表示冠层散射, C-G 表示水面与水稻冠层相互作用, D-B 表示二次散射, Sur. 表示面散射, T-P 表示总散射功率。

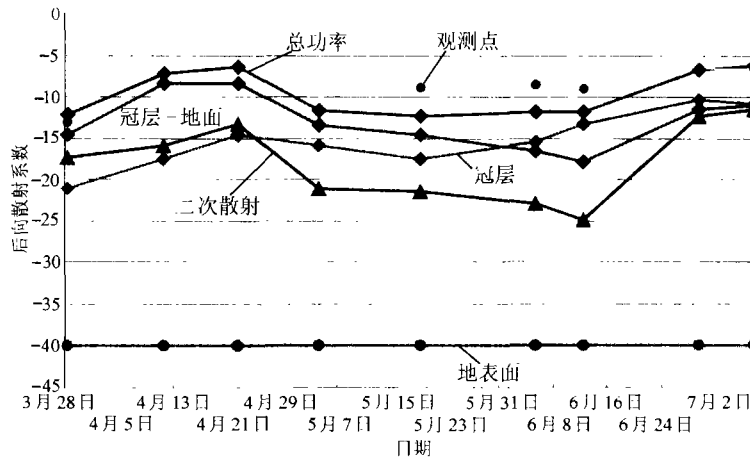


图 3 1997 年 RADARSAT 卫星观测与模型模拟水稻后向散射系数结果对比

Fig. 3 Comparing modeling results with RADARSAT observations in 1997

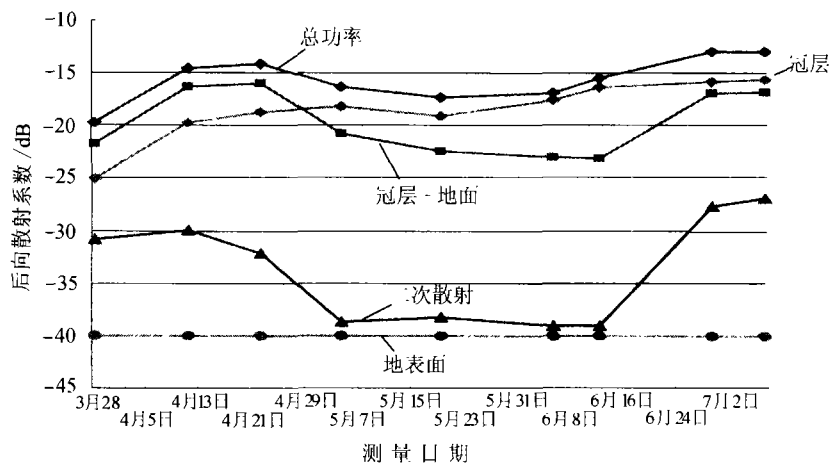


图 4 C 波段 HV 极化模型模拟结果

Fig. 4 Modeling results for C-band, HV polarization

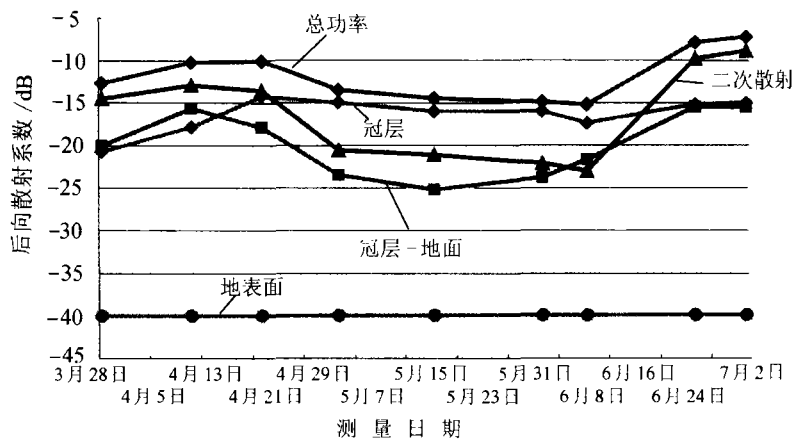


图 5 C 波段 VV 极化模型模拟结果

Fig. 5 Modeling results for C-band, VV polarization

此模型计算结果表明,HH 和 VV 极化对水稻物理参数的不同方面敏感。由此可预见,HH 和 VV 极化可以作为水稻生长初期和成熟期相对独立的水稻冠层测量数据,在分蘖期和抽穗期则不可。还需做进一步遥感观测和研究,以增加结论的可信度。

我们分析了诸要素间的相互关系,包括生物量、含水量、茎秆高与由模型计算得出的冠层、水面与水稻冠层、二次反弹、后向散射总功率的 HH/HV 极化比和 HH/VV 极化比之间的关系。水面与水稻冠层相互作用的 HH/HV 极化比与水稻生物量及茎秆高度相关性高,其相关系数分别为 0.7 和 0.64。冠层散射的 HH/VV 极化比与含水量的相关性最强,为 0.87。HH/HV 极化比与含水量的相关系数为 0.77。这表明极化测或多极化 SAR 数据在水稻含水量估测方面极具潜力,可为水稻长势监测发挥作用。

对水面与水稻冠层相互作用而言,HH—VV 相关系数在早期较低,3 月 38 日为 0.26,在秧苗发育

期和分蘖期约为 0.5,在抽穗期如 6 月 5 日,12 日较高,之后在成熟期又降到 0.51,在整个水稻的生长期,HH—VV 的相关性并不强。

在图 3 中我们可以比较模型计算结果和从多时相雷达遥感数据中提取的雷达后向散射系数。模型计算结果很好预测了水稻生长初期和成熟期的后向散射特征。但是,模型计算的结果低估了水稻从分蘖期到成熟期间的后向散射系数。这需要进行进一步的研究以得到更为具体的结论和合理的解释。

雷达遥感数据与水稻物理参数相关性分析表明(表 6、7):后向散射系数与水稻的茎秆高、生物量、鲜重和叶长密切相关。其相关系数分别为 0.95, 0.96, 0.97 和 0.87。但雷达遥感观测数据与水稻冠层含水量的关系并不密切。水稻的结构参数与从雷达卫星观测数据中导出的后向散射系数有很高的相关性,这一点使我们对水稻这样一个集面散射、体散射于一体的复杂散射体的雷达后向散射特性研究及其前景充满了信心。

表 6 模型计算得出的 HH/HV,HH/VV 极化比与水稻物理参数的相关系数(1997)

Table 6 The correlative coefficient calculated from the simulated model between HH/HV,HH/VV polarization ratio and rice physical parameters

	冠层		冠层—地面		二次散射		总功率	
	HH/HV	HH/VV	HH/HV	HH/VV	HH/HV	HH/VV	HH/HV	HH/VV
生物量/ g/m^2	-0.372	0.598	0.704	0.57	0.105	0.024	0.35	0.18
含水量/%	0.772	0.877	-0.442	-0.619	0.336	-0.647	0.209	-0.362
茎高/cm	-0.329	0.558	0.645	0.467	0.07	-0.05	0.348	0.087

表 7 水稻物理参数与 RADARSAT 数据导出的后向散射系数间的相关系数(1997)

Table 7 The correlative coefficient between backscatter coefficient calculated from RADARSAT observation and rice physical parameters(1997)

	生物量/ (g/m^2)	鲜重/g	含水量/%	茎高/cm	叶长/cm
相关系数	0.962315	0.90584	-0.513272	0.949106	0.865551

5 结 论

本研究中,引进了用于预测植被冠层后向散射特性的辐射传输模型,以研究水稻在 C 波段的时域后向散射特性及其随极化而变化的规律。模型计算结果与雷达卫星观测数据基本相符,但还需进一步研究,以使模型更为完善。

在水稻生长初期和晚期,极化对稻田的雷达后向散射特性的影响小,但随着水稻成熟,可以观察到极化响应的多变性。这是因为在植被生长旺盛期,

体散射的作用增强,而在植被生长早期和晚期,面散射和二次反弹作用较强。

本研究结论概括如下:

(1) 水稻插秧后的短时间内,入射角并不起重要作用;

(2) 随着秧苗生长,后向散射系数增大,后向散射特性也随入射角的不同出现了更多变化;

(3) 随着水稻日渐成熟,后向散射特征随着极化的变化趋于更为复杂。雷达后向散射系数变化的趋势不是简单的增大或减小;

(4) 就水稻而言,HH 和 HV 极化对入射角更为

敏感。水面与水稻冠层相互作用的 VV—HH 相位差表明在水稻冠层中发生了多次散射,HH 极化和 VV 极化可以作为相对独立的水稻冠层特性的测量数据;

(5) 当入射角为 45°时,水稻的冠层后向散射在 HH 和 HV 极化时,随水稻的生长而增大,但水稻 VV 极化后向散射系数,在水稻的早期生长阶段是增大的,但之后就保持相对稳定;

(6) 在水稻生长早期阶段,秧苗稀疏露出水面,引起了大量水面与水稻冠层的相互作用。随着水稻生长,冠层渐渐密集,面散射减少而体散射增加。当水稻成熟时,冠层渐渐干枯,微波电磁波穿透水稻冠层与水面之间形成多次散射。成熟期时,相位差约为 201.8,说明稻穗会产生更多的体散射。由此可见,多极化或极化测量 SAR 数据可能为我们提供更多的关于水稻穗的信息。

(7) 对于冠层后向散射,HH—VV 相关系数在生长早期阶段很低,到抽穗期时较高;到成熟期又降低。这表明在水稻生长中期,HH 和 VV 极化有较强的相关性,而在早期和成熟期则 HH 和 VV 的相关性较弱。水稻在生长初期含水量高而生物量低,在中期含水量高,生物量也高,在成熟期,含水量低而生物量高。HH 和 VV 极化之间的强相关性与高含水量和高生物量相一致;HH 和 VV 极化之间的低相关性也与低含水量,低生物量相一致。表明,HH 和 VV 极化对水稻物理参数的不同方面敏感。可预见,HH 和 VV 极化可以作为水稻生长初期和成熟期相对独立的水稻冠层测量数据,在分蘖期和抽穗期则不可。

(8) 水面与水稻冠层相互作用的 HH/HV 极化比与水稻生物量及茎秆高度相关性高,冠层散射的 HH/VV 极化比和 HH/HV 极化比与含水量的相关性最强。这表明极化测量或多极化 SAR 数据在水稻含水量估测方面极具潜力,可为水稻长势监测发挥作用。

(9) 对水面与水稻冠层相互作用而言,HH—VV 的相关性并不强;

(10) 模型计算结果和从多时相雷达遥感数据中提取的雷达后向散射系数相关分析表明:雷达后向散射系数与水稻的茎秆高、生物量、鲜重和叶长密切相关,但雷达遥感观测数据与水稻冠层含水量的关系并不密切。水稻的结构参数与从雷达卫星观测数据中导出的后向散射系数有很高的相关性,这一点使我们对水稻这样一个集面散射、体散射于一体的复杂散射体的雷达后向散射特性研究及其前景充

满了信心。预示着将要发射的,具有多极化功能的 ENVISAT 和 RADARSAT-2 雷达卫星数据在水稻监测和估产中可发挥重要作用。

参考文献 (References)

- [1] Eugheta. N. and Elachi, C. Radar scattering from a diffuse vegetation layer over a smooth surface[J]. *IEEE Trans on Geosci. and Remote Sensing*. 1982, **GE-20**, (2):212—216.
- [2] Karam M. A. and A. K. Fung. Electromagnetic scattering from a layer of finite length randomly oriented dielectric circular cylinders over a rough interface with application to vegetation[J], *Int. J. Remote Sensing*. 1988, **9**:1109—1134.
- [3] Richards, J. A. Radar backscatter modeling of forests; a review of current trends[J], *Int. J. of Remote Sens.*, 1990, **11**(7):1299—1312.
- [4] Sun, G. Simonett, D. S. and Strahler, A. H. A Radar backscattering model for discontinuous coniferous forests[J], *IEEE Trans on Geosci. and Remote Sens.* 1991 **29**(4):639—650.
- [5] Ulaby, F. T. and Elachil Eds C. Radar Polarimetry for Geoscience Applications[M]. 1990, Norwood, MA: Artech Horse.
- [6] Wang, Y and Imohoff, M. L. Simulated and Observed L-HH Radar, Backscatter from Tropical Mangrove Forests[J], *Int. J. Remote Sens.* 1993, **14**(15):2819—2828.
- [7] Zhao Rui, Wang Yanyu, Dai Jingfang editor-in-chief. Rice monitoring and production estimation using remote sensing[M], Beijing: Chinese science and technology press, 1996. [赵锐, 王延颐, 戴锦芳主编, 中国水稻遥感动态监测与估产, 北京: 中国科学技术出版社, 1996.]
- [8] Le Toan. T., Ribbes, F., Wang, L. F., et al. Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 1997, **35**(1), 41—56.
- [9] Kurosu. T., Fujita, M., and Chiba, K. Monitoring of rice crop growth from space using the ERS-1 C-band SAR[J], *IEEE Trans. Geosci., Remote Sens.* 1995, **33**(4):1092—1096.
- [10] Kurosu. T., Fujita, M. and Chiba, K. The identification of rice fields using multi-temporal ERS-1 C band SAR data[J], *Int. J. Remote Sensing.* 1997, **18**(14):2953—2965.
- [11] Shao Yun, F. Verjee, S. Staples, Cutting through cloud[C], GIS Asia Pacific, 1997, October/November, Singapore.
- [12] Shao Yun, Fan Xiangtao, Wang Cuizhen, Liu Hao, Estimation rice growth stage using Radarsat data[C], Proc. of Geos. Remote Sensing, IEEE, 1997, vol. 4, Singapore.
- [13] Shao Yun. The GlobeSAR Data for Vegetation Discrimination[C], Microwave Remote Sensing for Earth Observation, Beijing: Science Press, 1995, 195—201.
- [14] Shao Yun, Guo Huadong, Fan Xiangtao, Liu Hao. Studies on Rice Backscatter Signatures in Time Domain and Its Applications [J], *Journal of Remote Sensing*, 2001, **5**(5):14—20. [邵芸, 郭华东, 范湘涛, 刘浩. 水稻时域散射特征分析及其应用研究[J], 遥感学报, 2001, **5**(5):14—20.]
- [15] Shao Yun, Fan Xiangtao, Liu Hao et al. Rice monitoring and production estimation using multitemporal RADARSAT[J], *Remote Sensing of Environment*, 2001, **76**:310—325.

- [16] Shao Yun, Brian Brisco, Guo Huadong, Fan Xiangtao. Analysis of Multi-temporal RADARSAT Imagery for Rice Land Cover Discrimination in Subtropical Region[J]. *Asian Journal of Geoinformatics*, 2002, 2(3):21—31.
- [17] Guo Huadong, Shao Yun. Airborne Dual-band Fully-polarization SAR Information Analysis[J]. *Journal of Remote Sensing*, 1997, 1(2): 14—20. [郭华东, 邵芸, 航空双波段全极化 SAR 信息分析[J], 遥感学报, 1997, 1(2):14—20.]
- [18] Ulaby, F. T., Moore, R. E. and Fung, A. K. Microwave remote sensing: active and passive [M], 1981-1986, Vol. 1, 2 and 3, Addison-Wesley Publishing Company.
- [19] Ulaby, F. T. and M. A. E. Rayes. Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part H. Dual-dispersion model[J]. *IEEE Trans. Geosci, Remote Sens.* 1987, **GE-25**:550—557.

Analysis on Rice Backscatter Signatures in Time Domain: Comparison Between Radarsat-SAR Observation and Simulated Model Results

SHAO Yun, LIAO Jin-juan, FAN Xiang-tao, LIU Hao

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The study simulates the radar backscatter coefficients of rice using developed microwave backscatter simulated model, and analyze the interaction between microwave electromagnetic wave and rice crown within a rice growth cycle. The emphasis is paid attention to the effects of rice physical parameters to the rice backscatter coefficient and the law as polarization variation. The data include the rice physical parameters measured in field and Radarsat-SAR remote sensing multi-temporal images acquired at the same time around Zhaoqing test site, Guangdong province. The comparison between Radarsat-SAR observation results and the backscatter simulated model results shows that rice backscatter characteristic varied as the physical parameters variation in the rice growth cycle, and that the variation law is different with the polarization modes. It provides theoretical support for multi-temporal and multi-polarization SAR remote sensing technology application to rice monitoring and production estimation.

Key words: SAR; rice; backscatter coefficient; time domain analysis; model simulation