

文章编号: 1007-4619 (2000) 01-0014-08

水稻微波后向散射系数的模拟分析

曾琪明, 马洪兵, 张 涛

(北京大学 遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871)

摘要: 提出了一套完整的水稻一次后向散射作用的物理模型, 通过该模型可以定量地模拟水稻对入射电磁波的后向散射作用, 包括不同入射角、不同时相、不同波段、不同极化等各种情况, 从而得到大量有价值的模拟结果。通过深入分析这些结果, 可以对如何利用 SAR 遥感数据更准确、更经济、更方便地进行水稻识别、长势监测及产量评估等工作提供理论依据和方法指导。

关键词: 矢量辐射传输理论; 后向散射系数; 水稻; 微波遥感

中图分类号: TP722.6/S 511 **文献标识码:** A

1 引言

中国水稻种植面积和总产量均居世界第一位, 对水稻进行实时的长势监测和产量评估对于中国农业的发展和国民经济的稳定繁荣有着举足轻重的意义。由于中国南方水稻的主要产区阴雨天气多, 获取清晰可用的多光谱遥感图像没有保障, 给常规遥感技术的应用带来了困难。而微波可以穿透云雾, 不受天时、气候的限制, 使得 SAR 成为水稻长势监测和估产的重要技术手段。近年来, 机、星载 SAR 及其应用技术突飞猛进的发展, 特别是多颗 SAR 卫星的上天, 为 SAR 的应用提供了可靠的数据保障, 因此发展 SAR 的水稻长势监测和估产技术是具有重要现实意义的。

为了将 SAR 技术应用于水稻识别、实时长势监测和产量预测工作中, 必须了解水稻微波后向散射系数的有关规律。Ewe 等定性地给出了水稻生长的 3 个主要阶段后向散射系数的变化规律^[1]。Takashi Kurosu 等提出了一种统计模型, 给出了水稻的微波后向散射系数与生长天数、高度、干重等的经验公式^[2], 表明从水稻插秧或播种到乳熟前期, σ^0 是增加的, 之后直到收获, σ^0 逐渐减小。Stephen 等采用 Distorted Born Approximation 方法给出了一个公式, 描

述了水稻微波后向散射系数与叶面积指数(LAI)之间的关系^[3]; 结果表明 σ^0 随 LAI 的增加而减小。Toan 等将稻茎用有限长圆柱体近似, 稻叶用椭圆盘近似, 稻田用无限大水面近似, 采用 Monte-Carlo 方法将各组成部分对水稻后向散射的贡献综合在一起, 提出了一个理论模型, 并将该模型用于水稻的识别和监测应用^[4]。

该文以矢量辐射传输(VRT)理论^[5]作为建模的理论基础, 参照 Ulaby 等建立的森林微波一次后向散射模型^[6], 提出了一套完整的水稻一次后向散射模型, 根据模型模拟结果讨论了水稻后向散射系数随时相、入射角、波段和极化等因素的变化规律, 并就其在实际工作中的意义进行了探讨。

2 水稻微波后向散射模型

根据 SAR 技术的特点, 该模型假定水稻为一个由稻叶和稻秆组成的均匀散射层, 分布在水面上, 同一高度处的 Stokes 矢量强度分布是一致的。在水稻层内, 按照 VRT 理论, 可以分别写出上、下行 Stokes 矢量满足的 VRT 方程组:

$$\begin{aligned} \mu \frac{d}{dz} I_r^+(\mu, \phi, z) = \\ - \kappa_r^+(\mu, \phi) \cdot I_r^+(\mu, \phi, z) + F_r^+(\mu, \phi, z) \quad (1) \end{aligned}$$

收稿日期: 1998-11-16; 修订日期: 1999-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(49301014)、国家九五科技攻关项目(96-B02-04-02)和 863 计划(863-308-13-03)资助。

作者简介: 曾琪明(1964—), 男, 硕士, 副教授。1985年毕业于北京大学遥感与地理信息系统研究所, 一直从事遥感与地理信息系统的研究工作, 共参加课题研究 10 余项, 主持课题 6 项, 包括国家攻关、863 计划、国家自然科学基金项目, 发表论文 10 余篇。

$$-\mu \frac{d}{dz} I_r^-(-\mu, \phi, z) = -\kappa_r^-(-\mu, \phi) I_r^-(-\mu, \phi, z) + F_r^-(-\mu, \phi, z) \quad (2)$$

其中 κ_r^\pm 表示水稻层的衰减矩阵, $F_r^+(\mu, \phi, z)$ 和 $F_r^-(-\mu, \phi, z)$ 为各方向的 Stokes 矢量强度经散射到 (μ, ϕ) 和 $(-\mu, \phi)$ 方向上的能量, 称为散射源函数, 有

$$F_r^+(\mu, \phi, z) = \frac{1}{\mu} \left[\int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(\mu, \phi; \mu', \phi') I_r^+(\mu', \phi', z) d\mu' d\phi' + \int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(\mu, \phi; -\mu', \phi') I_r^-(-\mu', \phi', z) d\mu' d\phi' \right] \quad (3)$$

$$F_r^-(-\mu, \phi, z) = \frac{1}{\mu} \left[\int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(-\mu, \phi; \mu', \phi') I_r^+(\mu', \phi', z) d\mu' d\phi' + \int_0^{2\pi} \int_0^1 P_r(-\mu, \phi; -\mu', \phi') I_r^-(-\mu', \phi', z) d\mu' d\phi' \right] \quad (4)$$

其中, $P_r(\mu, \phi; \mu', \phi')$ 为从 (μ', ϕ') 方向散射到 (μ, ϕ) 方向的散射相矩阵。

在水稻散射层和空气层交界处以及在水稻散射层和水层交界处分别有边界条件:

$$I_r^-(-\mu, \phi, 0) = I_0 \delta(\mu - \mu_0) \cdot \delta(\phi - \phi_0) \quad (5)$$

$$I_r^+(\mu, \phi, -h) = R_w(\mu) \cdot I_r^-(-\mu, \phi, -h) \quad (6)$$

其中 I_0 为入射的 Stokes 矢量。 R_w 是反射率矩阵, 与水体的反射系数有关。用迭代法求解微分方程 (1), (2) 并代入边界条件 (5), (6), 得一阶后向散射解为:

$$I^{bs}(\mu_0, \phi_0) = I_1^+(\mu_0, \phi_0 \pm \pi, 0) = T(\mu_0, \phi_0) I_0 \quad (7)$$

其中,

$$T(\mu_0, \phi_0) = \frac{1}{\mu_0} QD_r(\mu_0, \phi_0 \pm \pi; -h/\mu_0) \cdot Q^{-1} R_w(\mu_0, \phi_0 \pm \pi) QA_1 Q^{-1} \cdot R_w(\mu_0, \phi_0) D_r(\mu_0, \phi_0; -h/\mu_0) Q^{-1} + \frac{1}{\mu_0} QD_r(\mu_0, \phi_0 \pm \pi; -h/\mu_0) \cdot Q^{-1} R_w(\mu_0, \phi_0 \pm \pi) QA_2 Q^{-1} + \frac{1}{\mu_0} QA_3 Q^{-1} R_w(\mu_0, \phi_0) \cdot QD_r(\mu_0, \phi_0; -h/\mu_0) Q^{-1} + \frac{1}{\mu_0} QA_4 Q^{-1} \quad (8)$$

这里 Q, Q^{-1} 分别是衰减矩阵 κ_r 的特征矢量组成的矩阵及其逆矩阵, D_r 是与 κ_r 的特征值有关的对角矩阵, 其对角元素为 $D_{ii}(\mu, \phi; -z/\mu) = \exp[-\lambda_i(\mu, \phi)z/\mu]$, λ_i 是 κ_r 的第 i 个特征值。而 A_1, A_2, A_3 和 A_4 分别为

$$A_1 = \int_{-h}^0 D_r(-\mu, \phi; -(z'+h)/\mu) Q^{-1} P_r(-\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) QD_r(\mu_0, \phi_0; -(z'+h)/\mu) dz' \quad (9)$$

$$A_2 = \int_{-h}^0 D_r(-\mu, \phi; -(z'+h)/\mu) Q^{-1} P_r(-\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) QD_r(-\mu_0, \phi_0; z'/\mu_0) dz' \quad (10)$$

$$A_3 = \int_{-h}^0 D_r(\mu, \phi; z'/\mu) Q^{-1} P_r(\mu, \phi; \mu_0, \phi_0) QD_r(\mu_0, \phi_0; -(z'+h)/\mu_0) dz' \quad (11)$$

$$A_4 = \int_{-h}^0 D_r(\mu, \phi; z'/\mu) Q^{-1} P_r(\mu, \phi; -\mu_0, \phi_0) QD_r(-\mu_0, \phi_0; z'/\mu_0) dz' \quad (12)$$

(8) 式表明水稻的后向散射矢量由 4 种机制组成: 1. 入射波直接被水稻散射回去, 即直接散射项, 记作 D-BS; 2. 入射波经水稻层的散射到达水面后, 经水面反射到水稻层, 经水稻层衰减回到雷达, 记作 SRE; 3. 入射波经水稻层衰减到达水面, 经水面反射回到水稻层, 经水稻层散射回去, 记作 ERS; 4. 入射波经水稻层衰减到达水面, 经水面反射到水稻层, 经水稻层的散射改变方向下行, 再次经水面反射到水稻层, 并经水稻层的衰减后回到雷达, 简称水面-水稻-水面项, 记作 W-R-W。可以看出, 第二项与第三项是互逆的, 可统称为水稻-水面项。这几种情形如图 1。

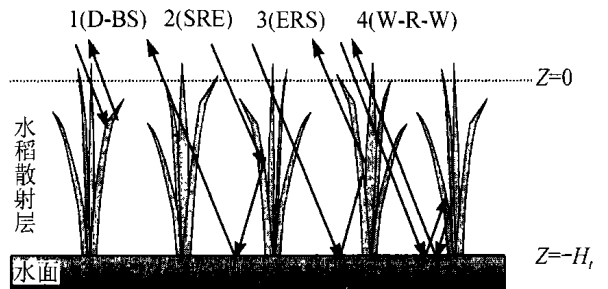


图 1 水稻一次后向散射的 4 种组成机制

Fig. 1 The component of the rice first-order backscattering

至于后向散射系数, 有:

$$\sigma_{VV}^0 = 4\pi \mu_0 [T]_{11}, \quad \sigma_{HH}^0 = 4\pi \mu_0 [T]_{22}, \quad \sigma_{HV}^0 = 4\pi \mu_0 [T]_{21}, \quad \sigma_{VH}^0 = 4\pi \mu_0 [T]_{12} \quad (13)$$

水稻的散射作用主要是由稻叶和稻秆两种器官

引起的, 所以为了求解水稻模型中的 κ_r 和 P_r 矩阵, 需要对稻叶和稻秆分别进行模型化处理。

根据稻叶的生长特点和几何特征, 将叶子作为长方形的具有均一介电常数但无导磁性的薄片型电介质处理是比较恰当的^[6]。叶子模型中主要涉及的物理参数和几何参数包括复介电常数、叶子厚度、叶长、叶宽、叶面法向的俯仰角、叶面积与矩形面积比等, 采用物理光学模型^[7]计算平面片状电介质散射交叉相的方法求叶子的散射振幅矩阵, 并进而求得稻叶的散射相矩阵和衰减矩阵。

稻秆可以作为质地均一的、有限长的、沿竖直方向伸展的圆柱形电介质处理, 其主要的物理参数和几何参数有复介电常数、稻秆的高度、横截面直径等。首先依据无限长圆柱体电介质散射场的有关模型求出散射振幅矩阵^[8], 再对其结果进行一定修正, 使其适用于有限长圆柱体, 并进一步求得稻秆的散射相矩阵和衰减矩阵。

3 水稻后向散射系数的模拟分析

为获取水稻生长的几何、介电等参数, 以及这些参数在水稻生长期内的变化, 我们于 1997 年对广东省增城市早稻进行了测量。增城市位于广州市东, 早稻的物候规律一般为: 4 月中下旬为水稻的分蘖期, 5 月上旬为水稻的拔节期, 5 月中下旬为水稻的

分化期和孕穗期, 6 月上旬为水稻的出穗期, 6 月中下旬为灌浆和种子成熟期, 整个生活周期为 100 天左右。增城市境内从北到南, 地貌从丘陵过度到东江平原, 水稻的生长物候期从北到南也逐渐提前, 水稻品种也有所不同。我们在全市 4 个乡, 7 个大地块, 30 个采样点, 进行了 9 次测量。这 9 次测量的日期分别为 4 月 12 日、4 月 22 日、5 月 2 日、5 月 12 日、5 月 22 日、6 月 2 日、6 月 12 日、6 月 22 日和 7 月 2 日, 在后文相应的图中时间序列即指这 9 个日期。

以增城市水稻的实测参数作为输入, 利用该模型对水稻后向散射系数随频率、波长、极化、入射角的变化进行了模拟, 并对这些参数的影响在整个水稻生长期内的变化规律进行了分析, 详尽分析如下。

3.1 水稻后向散射的主导机制

大多数情况下, 在水稻后向散射系数中占主导地位的是水面-水稻项(包括 ERS 和 SER), 这两项作用之和几乎决定了后向散射系数的大小。以 C 波段 23° 入射角为例, VV 极化下, 水面-水稻项比另外两项作用之和高达 17 dB 以上, 相差最多时可达 25 dB 左右, HH 极化下, 比另外两项作用高 16 dB 以上, 相差最多时可达 29 dB 左右, 如图 2。由于 ERS 和 SRE 两项大小基本相同, 所以它们在图中几乎重合。占第 3 位的是直接后向散射项(D-BS), 占第 4 位的是水面-水稻-水面项(W-R-W)。

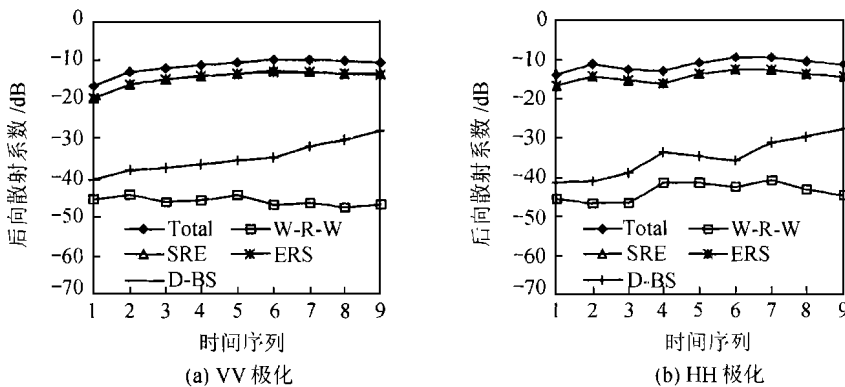


图 2 后向散射各组分随时相的变化(C 波段, 入射角 23°)

Fig. 2 The variations of the rice backscattering with the date (C-band, incidence angle = 23°)

水面-水稻项通常占据主导地位的原因是水稻具有明显的竖直伸展性(包括稻秆和倾角较小的稻叶), 水面又有较强的反射作用, 水面和水稻之间形成了类似于二面角效应的结构, 所以后向散射比较强; 而 D-BS 和 W-R-W 主要受水稻层后向散射作用

控制, 且分布随机性大, 所以后向散射中这两项都比较小。

3.2 水稻后向散射随时相的变化

从后向散射中各组分随时相变化趋势上看, 水

面-水稻项在水稻营养生长期增加较快,在生殖发育期时处于稳定并略有下降;D-BS 项在整个过程中基本呈上升趋势;而 W-R-W 项则大体呈下降趋势(图 2)。造成这一结果的原因是,在水稻生长初期,水稻植株很小,密度较小,且植株的竖直结构明显,所以散射较小。到了生殖发育期,水稻植株个体较大,密度增大,而稻叶角度明显增加,所以直接后向散射增长迅速;而衰减作用也增强,使得水面-水稻项变化平缓,甚至略有下降。

综合 3 种机制变化的结果,水稻后向散射系数

总体上是先随水稻生长增大,然后略有下降,这一结果与 Takashi Kurosu 的结论是一致的^[2]。

3.3 水稻后向散射随入射角的变化

图 3、图 4 分别是水稻生长早期和中后期后向散射系数随入射角变化的模拟结果。在水稻生长早期,不论是 VV 极化,还是 HH 极化,后向散射系数随入射角波动的幅度较小。在水稻生长后期,后向散射系数的波动幅度变大,波动起伏次数增加。

在水稻生长的早期,后向散射系数随入射角的

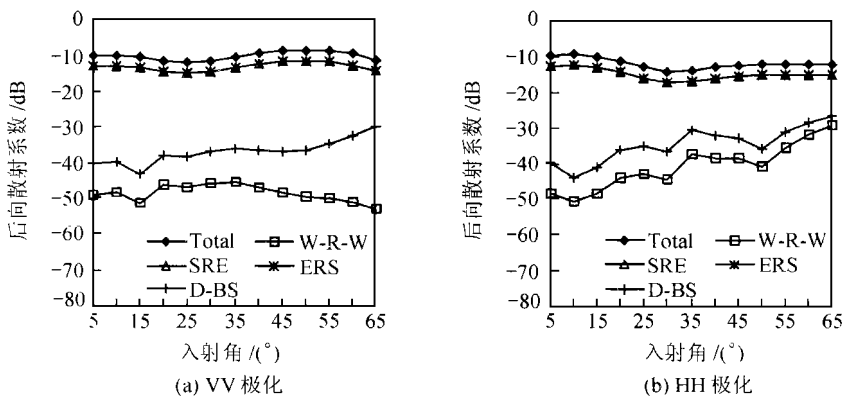


图 3 水稻生长早期(5月2日)C波段各组分随入射角的变化

Fig. 3 The Variations of the rice backscattering with the incidence angle at C-band (05/02)

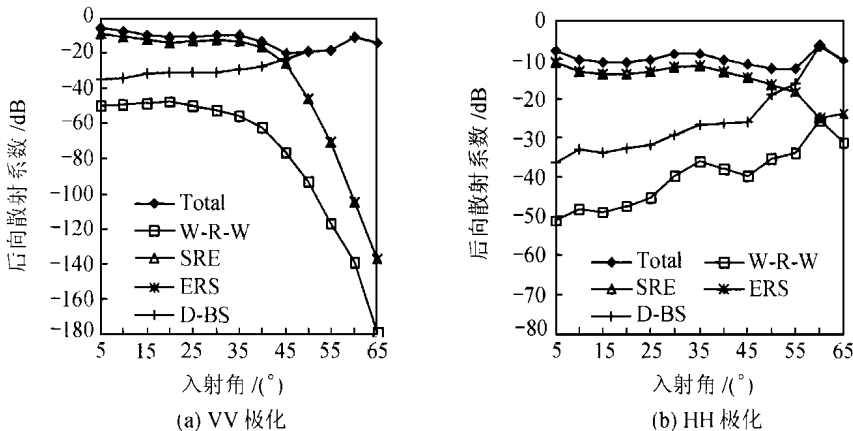


图 4 水稻生长后期(6月22日)C波段各组分随入射角的变化

Fig. 4 The variations of the rice backscattering with the incidence angle at C-band (06/22)

变化基本受水面-水稻项控制;在后期,入射角小于 40°时主要受水面-水稻项控制,在 40°—50°之间同时受水面-水稻项和 D-BS 项的影响,大于 50°基本受直接 D-BS 项的控制。

3.4 水稻后向散射随波段的变化

总体上看,L波段的后向散射系数与C波段的

后向散射系数表现基本类同,但值要小很多。X波段则与L、C波段的表现相差较大(图5)。

不论是L、C波段,还是X波段,水面-水稻项基本上都是后向散射的主导项,但X波段由于波长更小,散射衰减更加显著,因此在生长后期下降幅度很大,且随时相、入射角和极化的变化也表现出更多的波动。D-BS项在不同波段下都随水稻生长期呈上

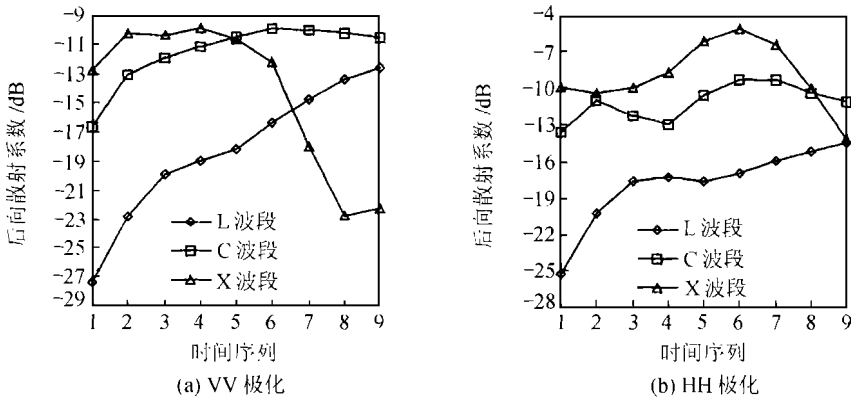


图 5 入射角为 23°时,各波段后向散射系数随时相的变化

Fig. 5 The variations of the rice backscattering with the date at each band (incidence angle=23°)

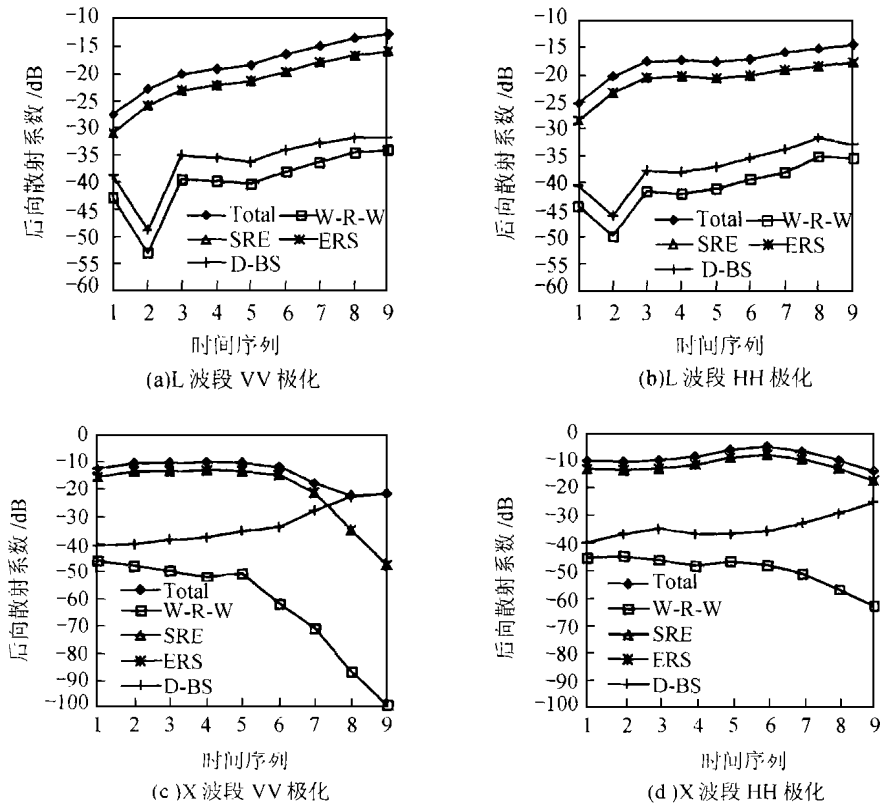


图 6 L 及 X 波段下,入射角为 23°时各组分随时相的变化

Fig. 6 The variations of the rice backscattering with the date (L- and X-band, incidence angle=23°)

升趋势,随频率增大,上升趋势越明显,幅度越大。在水稻成熟期,X 波段 VV 极化的 D-BS 项超过了水面-水稻项,成为后向散射中的主导项(图 2、图 6)。

3.5 水稻后向散射随极化方式的变化

图 7 是 C 波段下 4 种极化方式的后向散射系数随时相的变化曲线。可以看出交叉极化的后向散射系数比同极化的后向散射系数小,尤其在水稻生长

的中后期差距较大;HV 极化的后向散射系数比 VH 极化的后向散射系数小,这是因为水面对水平极化波的反射率大于垂直极化波的反射率。

从水稻后向散射系数的各组分看,HV 与 VH 极化的两个水面-水稻项的变化规律表现为“共轭”关系,即 HV 极化的 ERS 项与 VH 极化的 SRE 项相同,HV 极化的 SRE 项和 VH 极化的 ERS 项相同。除此之外,HV 与 VH 极化的其它各项都具有相似的散射行

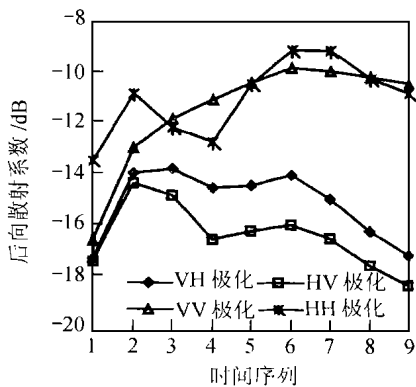


图 7 C 波段下,入射角为 23° 时 4 种极化方式的后向散射系数随时相的变化

Fig. 7 The variations of the rice backscattering of each polarization with the date (C-band, incidence angle = 23°)

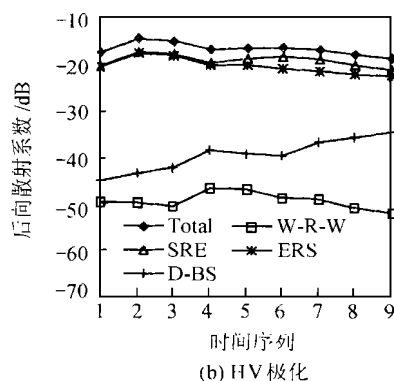
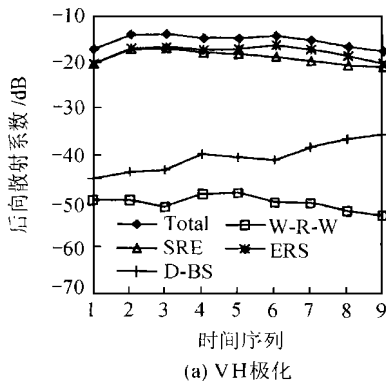


图 8 C 波段下,入射角为 23° 时交叉极化的各分量随时相的变化

Fig. 8 The variations of the rice cross-polarization backscattering with the date (C-band, incidence angle = 23°)

4 结 论

该模型是基于辐射传输理论和经典电磁学的结果,在一定的模型假设下的产物。我们的结果与国际同行的结果进行比较,规律和数量级基本一致^[2, 4],但由于缺乏散射计测量结果,无法进一步进行模型的有效性检验。与卫星数据(Radarsat 和 ERS-1/2)初步比较,数量级和规律基本吻合,但由于获取的星载 SAR 数据时相少,且获取条件差别较大,进一步对比分析正在进行中。

该模型模拟的结果充分说明频率、入射角和极化对水稻后向散射系数都有显著的影响,且随水稻的生长有显著的变化。但由于我们没有对其它作物和地物的散射规律及数据进行分析,对于分类问题给出最终的定论为时尚早。虽然如此,单从水稻自身的散射规律也可得出一些有意义的结论。

为。从整体上看,VV 极化的后向散射系数变化比较平滑,HH 极化的后向散射系数变化比较复杂,其原因是 HH 极化对稻叶的倾角较为敏感(图 2、图 8)。

3.6 水稻后向散射随时相和入射角变化的三维视图

因为后向散射系数与时相和入射角的关系比较紧密,很难分离二者对后向散射系数变化的影响,为了清晰全面地反映二者与后向散射系数的关系,这里给出 L 波段、C 波段及 X 波段的后向散射系数随时相和入射角变化的三维视图(图 9)。从图 9 中能够清楚地看出 L 波段随时相和入射角的变化比 C 波段和 X 波段更平滑。

从水稻散射机制看,由于水面的镜向散射很强,所以水面-水稻项占据主导地位。对于其它旱作农作物,由于田间一般没有持水,地表较为粗糙,主导散射机制会有所不同。

从波段选择看,虽然 L 波段的各种变化规律比较单调,且动态范围较大,但绝对数值较低,因而 SAR 的信噪比小,所以不适合水稻及一般农作物识别和监测。X 波段和 C 波段动态范围比 L 波段小,C 波段的后向散射系数一般比 X 波段小,X 波段的后向散射系数随时相变化较复杂。从监测和识别的角度,利用 C 波段建立雷达后向散射系数与水稻植株高度、时相变化的统计关系效果更好,这一点与实际结果一致^[4,9]。

从入射角的模拟结果分析,由于多种因素交互控制,后向散射系数随入射角变化呈波动状,且转折点随生长时相、频率和极化的不同而不同,难以简单地确定什么角度下后向散射系数与水稻生长时相呈

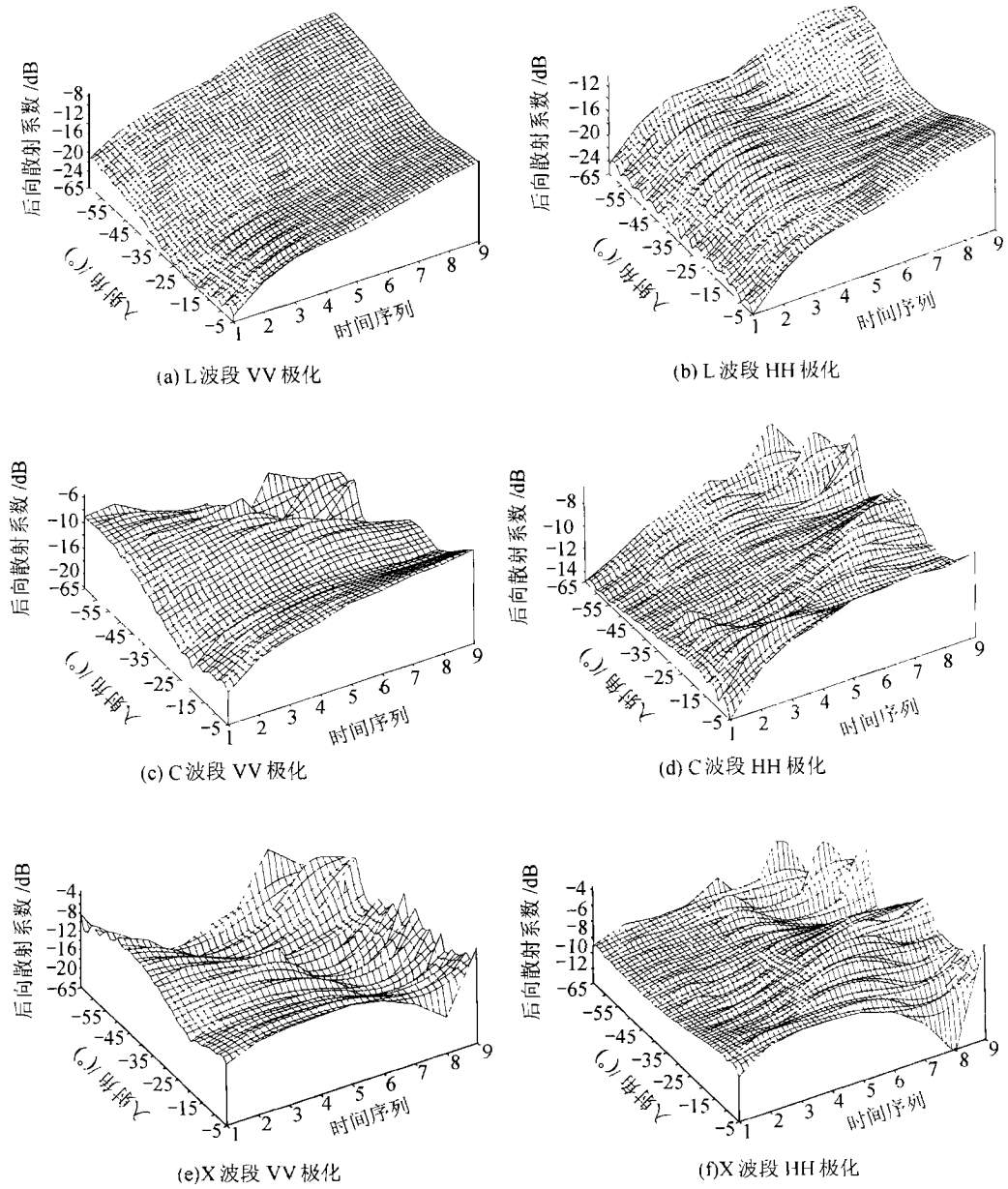


图 9 不同波段下水稻后向散射系数随时相和入射角变化的三维视图

Fig. 9 The 3-D view of the variations of the rice backscattering with the date and incidence angle

较单调的关系。在 C 波段 VV 极化下,入射角为 25° — 35° 时,水稻后向散射系数与时相关系相对较单调;在 C 波段 HH 极化下,入射角在 35° — 45° 为佳。从雷达系统工作的角度出发,可以选择 20° — 45° 为宜。角度太小,距离向分辨率恶化;而入射角太大,图像阴影增多,图像亦变暗。

水稻的交叉极化后向散射系数比同极化一般要低 4 dB 左右,且随时相变化趋势与同极化不同,显然如果有多极化数据可用,水稻识别、分类和长势监测效果将会改善。分析极化模拟结果,HH 极化对

叶倾角较敏感,因此在时相变化上表现出波动,VV 极化随时相变化较平滑和单调。因此选择 VV 极化进行识别和监测,关系更简单。

利用 SAR 影像进行水稻识别、分类和长势监测,仅使用单一频率、时相、极化是很困难的。SAR 影像所反映的是后向散射系数,这个物理量与人们日常生活中的经验相差较远。虽然 SAR 影像上的某些地貌特征比较明显,但其它几何纹理不显著,伴随较强的斑点噪声(研究有效的滤波算法仍然是目前 SAR 影像处理的热点^[10, 11]),因此单一频率、时

相、极化的 SAR 影像在识别上类似遥感应用初期的小比例尺黑白光学卫片, 分类应用是有限的。多时相影像合成不仅可以加入多个时相的信息, 而且可以以彩色的形式表现出时相的差异, 是目前雷达影像分类的主流方法, 但难点的图像校正的配准。

参考文献 (References)

- [1] Ewe, H. T., Chuah, H. T., Ismail, A., Loh, K. H., Nasrudin, N. Paddy Crop Monitoring Using Microwave Remote Sensing Technique [J]. *Geocarto International*, 1995, **10**(3): 33—41.
- [2] Takashi Kurosu, Masaharu Fujita, Kazuo Chiba. Monitoring of Rice Crop Growth from Space Using the ERS-1 C-band SAR [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(4): 1092—1096.
- [3] Stephen L. Durden, Leslie A. Morrissey, Gerald P. Livingston. Microwave Backscatter and Attenuation Dependence on Leaf Area Index for Flooded Rice Fields [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, **33**(3): 807—810.
- [4] Toan, T. L., et al., Rice Crop Mapping and Monitoring Using ERS-1 Data Based on Experiment and Modeling Results [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1997, **35**(1): 41—56.
- [5] Ulaby, F. T., Elachi, C. Radar Polarimetry for Geoscience Application [M]. Artech House, Inc., 1990.
- [6] Ulaby, F. T. et al. Michigan Microwave Canopy Scattering Model (Version 1.0), Radiation Laboratory Report, No. 0224863-T [R] 1988.
- [7] Senior T. B. A. et al. Measuring and Modeling the Backscattering Cross Section of a Leaf [J]. *Radio Science*, 1987, **22**(6): 1109—1116.
- [8] Ruck, G. T. et al. Radar Cross Section Handbook, Vol. 1—2 [R]. Plenum Press, New York, 1970.
- [9] Aschbacher, J., et al. Assessment of ERS-1 Data for Rice Crop Mapping and Monitoring [C]. Proceedings of IGARSS '95, Florence, Italy, 1995, 2183—2185.
- [10] Fukuda, S., Hirokawa, H. Suppression of Speckle in Synthetic Aperture Radar Image Using Wavelet [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(3): 507—519.
- [11] Dong, Y., et al., Speckle Suppressing Using Recursive Wavelet Transforms [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1998, **19**(2): 317—330.

Simulation and Analysis for the Microwave Backscattering Coefficient of Rice

ZENG Qi-ming, MA Hong-bing, ZHANG Tao

(Institute of RS & GIS, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the Vector Radiative Transfer Theory (VRT) and SAR technology characteristics, several sub-models for rice are constructed such as leaf scattering model, leaf extinction models, trunk scattering model, trunk extinction model and water reflection model. Then an integrated model including all the main physical processes of rice first-order scattering mechanisms is achieved. By simulations using the validated model, the backscattering coefficient of the rice canopy which can be deduced from the SAR data will be obtained. It will be helpful in theoretical and methodological guidance for using SAR data to make rice fields mapping, rice growth monitoring and rice production forecasting more effectively, more economically and more expediently. In this paper, all of the models are introduced in detail and systematically. Based on the simulation results, the variations of the rice backscattering coefficient with the date, incidence angle, wave band and polarization change are discussed. At the end of this article, some valuable quantificational results and practical conclusions are summarized.

Key words: VRT; backscattering coefficient; rice; microwave remote sensing