

文章编号: 1007 4619(2006) 04 0502 13

# 多频率多极化地表辐射参数化模型<sup>\*</sup>

施建成<sup>1</sup>, 蒋玲梅<sup>2,3</sup>, 张立新<sup>2,3</sup>

(1 遥感科学国家重点实验室, 中国科学院遥感应用研究所与北京师范大学, 北京 100101;

2 遥感科学国家重点实验室, 北京师范大学地理学与遥感科学学院, 遥感与地理信息系统研究中心, 北京 100875

3 环境遥感与数字城市北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘 要:** 发展了针对对地观测系统被动微波辐射计 AMSR-E 应用的裸露地表辐射模型。首先, 利用 1993 年法国 NRA 地面试验数据对 A IEM 在宽波段高频率和大角度的辐射信号模拟能力进行评价。验证结果表明, A IEM 模型模拟值与地面实测数据吻合很好, 说明 A IEM 模型能很好模拟宽波段和大角度的辐射信号。在此基础上, 用 A IEM 模型建立了一个针对 AMSR-E 传感器参数配置, 包含各种地表粗糙度和介电特性的裸露地表辐射模拟数据库。利用 A IEM 模拟数据和地面实测数据对目前人们使用的半经验地表模型进行了比较和分析, 发展了多频率多极化的地表辐射参数化模型—— $Q_p$  模型。该模型中, 地表粗糙度对辐射信号的影响通过粗糙度参数  $Q_p$  来表示。参数  $Q_p$  可简单表示为均方根高度与相关长度的比值 ( $s/l$ )。从  $Q_p$  模型与 A IEM 模型模拟的发射率比较结果来看, 它们之间的绝对误差很小, 不超过  $10^{-3}$ 。因而, 本文发展的参数化模型可用作模拟地表辐射的前向模型, 如用于估算 AMSR-E 传感器的亮温值, 同时模型的发展有利于提高人们对辐射机制的理解和认识。

**关键词:** 微波; 模型; 地表发射率; 粗糙度

**中图分类号:** TP722.6 **文献标识码:** A

## A Parameterized Multi Frequency Polarization Surface Emission Model

SHI Jian-cheng<sup>1</sup>, JIANG Ling-mei<sup>2,3</sup>, ZHANG Li-xin<sup>2,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences and Beijing Normal University, Beijing 100101, China

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and the Institute of Remote Sensing Applications of Chinese Academy of Sciences, Center of Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3. Beijing Key Laboratory for Remote Sensing of Environment and Digital Cities, Beijing 100875, China)

**Abstract** This study develops a parameterized bare surface emission model for the applications in analyses of

收稿日期: 2005-08-15 修订日期: 2005-10-25

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (973) (G2000077908) 资助。

作者简介: 施建成 (1955—), 男, 博士生导师, 1991 年毕业于美国加州大学圣巴巴拉分校地理系。目前主要研究雷达后向散射模型、土壤水分和积雪物理参数反演等。E-mail: shi@guardian.ices.ucsb.edu

\* “海峡两岸遥感研讨会专栏”序言: 在中国科学院和中国台湾中央大学的大力支持下, 以及云南大学、北京师范大学的协助下, 2005 年 8 月由中国科学院遥感应用研究所主办的“海峡两岸遥感研讨会”在云南大学成功召开。

近年来, 海峡两岸的学者们在各自的遥感领域内取得了重要的成就。加强合作、及时探讨区域乃至全球性的环境遥感问题, 并使之更好地服务于人类, 这十分重要, 定期举行学术研讨会成为海峡两岸遥感科学家们的共识。本次大会是两岸学者第一次在遥感学术研究领域进行全面交流的盛会, 双方共有 130 余位学者参加。开幕式上, 大会主席中国科学院遥感应用研究所所长李小文院士、中国台湾中央大学陈哲俊教授、中国科学院国际合作局局长郭华东教授、中国台湾中央研究院刘绍臣教授、中国气象局卫星中心“风云三号”总工程师董超华教授等著名专家做了精彩的特邀报告。本次会议主要讨论了水文模型、植被的影响与监测、土地利用、大气校正与水质、图像处理等主题。会议的主要学术成果和各研究领域有代表性的论文, 经评选, 形成本专栏。

在这些文章作者中, 中国台湾中央大学的陈昆山教授是世界著名的微波遥感专家, 他是面散射模型 IEM 的创始人。孙国清博士在森林生态、植被生物量和碳循环颇有建树, 目前在 NASA 主要从事激光雷达的研究工作。施建成博士主要从事积雪、土壤水分等水文模型与应用工作。通过本专栏的出版, 我们的初衷是希望把会上海峡两岸最新的进展跟遥感同行们分享, 以期达到沟通和交流的目的。

下一次研讨会计划于 2007 年春天在中国台湾举办, 欢迎大家踊跃参加。

the passive microwave satellite measurements from the Advanced Microwave Scanning Radiometer Earth Observing System (AMSR-E). We first evaluated the capability of the Advanced Integral Equation Model (AIEM) in simulating wide band and high incidence surface emission signals in comparison with the NRA's field experimental data obtained in 1993. The evaluation results showed a very good agreement. With the confirmed confidence, we generated a bare surface emission database for a wide range of surface dielectric and roughness properties under AMSR-E sensor configurations using the AIEM model. Through the evaluations of the commonly used semi-empirical models with both the AIEM simulated and the field experimental data, we developed a parameterized multi-frequency-polarization surface emission model, the  $Q_p$  model. This model relates the effects of the surface roughness on the emission signals through the roughness variable  $Q_p$  at the polarization  $p$ . The  $Q_p$  can be simply described as a single surface roughness property: the ratio of the surface rms height and the correlation length. The comparison of the emissivity simulations by the  $Q_p$  and AIEM models indicated that the absolute error is extremely small at the magnitude of  $10^{-3}$ . The newly developed surface emission model should be very useful in modeling, improving our understanding, analyses, and predictions of the AMSR-E measurements.

**Key words** microwave; modeling; surface emissivity; roughness

1 引言

地表辐射或有效反射率模型是微波遥感用于获取复杂地表的地球物理参数特性的关键要素之一。它可直接用于监测裸露地表<sup>[1-6]</sup>或有植被覆盖地表<sup>[7-11]</sup>的土壤水分。多频率多极化测量更适合于获取地表参数和大气特性参数。比如,利用多频率多极化的测量值,通过迭代算法,可用于获取地表土壤水分或者植被含水量<sup>[9]</sup>或地表粗糙度与植被相结合的参数<sup>[10]</sup>。对于 AMSR-E 传感器获取地表参数,则利用 6.9GHz 到 18GHz 或 10GHz 到 18GHz (取决于无线电干扰状况)的测量值,通过不断迭代计算  $TB_v$  与  $TB_h$  的值,直到观测亮温值与计算值的误差最小来调整要估算的参数值。Paloscia 等人<sup>[11]</sup>发展了极化指数算法来估算土壤水分。该方法认为土壤水分与 6.9GHz 的测量亮温值是线性相关的,可用 10.7GHz 的归一化亮温 (即极化指数)来修正植被效应,即修正 6.9GHz 下线性关系的截距和斜率<sup>[11]</sup>。此外,地表辐射或有效反射率模型可作为研究积雪和大气特性的边界条件。研究表明,积雪层下覆地表信号对利用亮温梯度算法 (18GHz 与 37GHz 的亮温差)反演雪水当量有着很重要的影响<sup>[12]</sup>。

用于描述地表辐射或反射特征的模型主要有两种:物理模型和半经验模型。半经验模型通常很容易应用到图像,不需要做很多复杂计算,而且可以作為直接的地表参数反演模型及反演其他地球物理参

数的边界条件。半经验模型中使用的模型参数经常直接从有限的测量值中得到,因而只在应用相同数据时结果很好。然而,当用于其他数据或者其他应用目的时,这类半经验模型的应用性有待进一步评价。这是因为所有测量误差包括仪器质量、校正误差及仪器测量像元尺度上的地表粗糙度和土壤特性 (水分、质地和温度)在不同试验区影响不同。此外,当前使用的经验模型与半经验模型适合于建立在低频和小观测角测量数据。因而它们不能描述多频率多极化和大角度的地表辐射信号特征。不同频率不同极化下的地表辐射信号对地表粗糙度的敏感性极其不同。若把当前的经验模型应用于类似 AMSR-E 高频率大角度的传感器,则会带来很大不确定性。显而易见,不正确地描述不同频率和极化的地表辐射信号特征,将会大大影响到估算地球物理参数和大气参数的精度。因此,把半经验模型应用于当前的卫星测量数据有待进一步考证。

理论模型中,有效反射率  $R_p^e$  通常由两部分组成:相干项  $R_p^{coh}$  和非相干项  $R_p^{non}$ 。 $R_p^{non}$  可通过对双站反射系数在上半空间的半球积分得到<sup>[13-15]</sup>。

$$R_p^e = R_p^{coh} + R_p^{non} = r_p \cdot \exp[-(2 \cdot k s \cdot \cos \theta)^2] + \frac{1}{4\pi \cos \theta_0} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} [\sigma_{pp}(\theta, \phi_j) + \sigma_{qq}(\theta, \phi_j)] \cdot \sin \theta_j \cdot d\theta_j \cdot d\phi_j \tag{1}$$

式中,下标  $p, q$  描述的是极化状态  $V$  或  $H$ 。下标  $j$  表示散射方向。 $r$  是平面菲涅尔反射率。 $k$  是自由空间传播常数, $s$  是地表均方根高度。

与传统模型如小扰动模型、物理光学模型和几

何光学模型相比较,微波散射理论模型——积分方程模型 ( IEM )已被证实具有更大应用范围,包括更宽粗糙度范围<sup>[15]</sup>。最近,陈锐山等人<sup>[16]</sup>在原始 IEM 模型基础上,发展了比其精度更高且形式更紧凑的 A IEM 模型。模型改进主要表现在去掉了原 IEM 模型中的一些假设,如:

(1)保持格林函数及其梯度的绝对相位项,重新推导了补余场强系数,因而推导出更完整、更精确的多次散射表达式<sup>[17]</sup>和单次散射项<sup>[16]</sup>。

(2)计算随机介电地表的双站散射系数中,菲涅尔反射系数通常被假设在低、高频范围内各自采用入射角近似或零度角近似。然而,这两种近似都只能应用于各自有效范围。A IEM 模型包含了把这两种近似相连接的过渡函数<sup>[18]</sup>。

与三维蒙特卡罗模拟数据<sup>[16]</sup>比较, A IEM 模型比原 IEM 模型在精度上有很大提高。A IEM 能计算和模拟包括更宽范围的介电常数、粗糙度和频率等参数的地表辐射信号。这一模型改进使得模拟高频粗糙地表的辐射信号有了可能。然而,以前用于实验验证 A IEM 模型的粗糙度参数均方根高度、相关长度是在小于 0.41 倍波长至 1.33 倍波长内,适用于低频 (如 L 波段)传感器。对于高频 (C 波段或者更高频率),自然地表的粗糙度要比低频地表的粗糙度大的多。另外, A IEM 模型的复杂性很难直接应用于微波辐射计数据分析和地表参数反演,尽管理论上 A IEM 模型可应用于比早期 IEM 模型更宽的粗糙度范围。因此,有必要发展简单且高精度的能表征多频率多极化的地表辐射信号的地表辐射模型,使被动微波遥感更容易应用于实际问题。

AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer) 搭载在 NASA 新一代对地观测系统 (EOS) 的 PM-1 卫星 AQUA 卫星上,于 2002 年 5 月份发射升空,观测角为 55°,具有多个频率多极化,能获取陆地、海洋和大气的参数。本文的目的是 (1)评价 A IEM 模型对于具有多频率通道大角度观测的传感器 AMSR-E 的应用能力; (2)用 A IEM 模型建立一个针对 AMSR-E 传感器,包含各种地表粗糙度和介电特性的裸露地表辐射数据库。本文的主要研究目标是发展一个微波地表辐射模型,用于获取地表参数如土壤水分、植被和积雪等。文中所使用的 AMSR-E 传感器频率从 C 波段到 Ka 波段,即 6.925 10.65 18.7 23.8 与 36.5GHz

本文首先利用法国 INRA (Institut National de Recherches Agronomiques) 地面实验数据对 A IEM 模

型进行验证。然后用 A IEM 模型建立一个地表辐射模拟数据库,包含大范围的地表粗糙度和土壤水分状况,为后面开发参数化模型建立基础。第三部分,利用模拟数据和实测数据验证地表粗糙度效应对不同频率和极化的地表辐射的影响。第四部分,通过对当前人们使用的半经验模型形式的分析和比较,发展了针对 AMSR-E 传感器的参数化辐射模型。进而表明新发展的模型粗糙度参数,可以简单表示成人们常用粗糙度特性参数——均方根高度 (rms height) 和相关长度 (correlation length) 的比值。最后是本文的结论部分。

## 2 A IEM 模型验证

本文的试验数据取自 1993 年在法国阿维尼翁 NRA 开展的遥感试验, PORTOS 是多频地基辐射计,包括 5.05 10.65 23.8 和 36.5GHz 4 个频率,观测角为 50°,观测视场为 18m×40m 的裸土区域。这些数据主要用来验证 A IEM 模型在高频和大入射角下的应用能力及 A IEM 能否精确描述地表辐射特征。辐射计测量像元大小为 15m×25m。这些地面数据获取时间为 1993 年 4 月 20 日到 7 月 10 日,覆盖了非常粗糙地表到很光滑地表的几块裸土区域。同时该试验涵盖很宽的地表土壤水分范围,从灌溉土壤到自然干透土壤。详细的土壤水分和粗糙度测量信息及其如何测量可参考文献 [5]。

为了得到 PORTOS 辐射计测量的地表辐射值,本文对辐射计数据和地表测量参数做了相应预处理。当 PORTOS 测量值在同一频率和极化下有好多 个测量值,但是只有一个土壤水分数据时,地表发射率  $\epsilon_p^s$  为相同频率相同极化的不同测量值的平均值。

$$\epsilon_p^s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{T_{Bp}(i) - T_{sky}(i)}{T_s(i) - T_{sky}(i)} \quad (2)$$

式中,  $T_{sky}$  是大气下行辐射亮温,根据 Calvet 等人<sup>[19]</sup>的方法计算得到。  $n$  是观测次数,  $T_s$  是地表温度,通过取地表表层底下温度廓线 0.5cm 和 1cm 处的平均值得到。

A IEM 模型的输入参数——介电常数,根据每个试验点的土壤体密度、质地和地表以下 0.5cm 和 1cm 处的平均湿度 (由于高频的穿透深度很小),通过半经验模型<sup>[20]</sup>计算得到。地表粗糙度参数用自动激光廓线仪 (Profilometer) 测量得到。该仪器能记录水平取样间隔 2mm,总水平长度为 2m 的地表高度廓线。每个试验点,都有 3—6 组粗

糙度廓线测量值。根据地表粗糙度廓线测量值, 可得到 A IEM 模型需要的粗糙度输入参数——均方根高度和相关长度。表 1 为该试验区的土壤水分和粗糙度参数。

由于自然地表的复杂性, 应该认识到理论微波模型与地面实验数据比较中会存在很多问题。理论

模型假设地表粗糙度特性各向同性及介电常数空间均匀。然而, 自然地表的地表粗糙度、地表结构和土壤含水量在三维空间上有着很强的非均一性。因而会给比较理论模型与实测数据带来很大难度和不确定性。因此, 本文对实验数据和 A IEM 模拟值进行了两组试验比较, 其实验结果见表 2。

表 1 实测的土壤水分和地表粗糙度参数

Table 1 Summary of the volumetric soil moisture and the surface roughness parameters measured in each field site													
站 点	观 测 次 数	最小 土壤 水分	最大 土壤 水分	粗糙度 剖面测 量次数	最小均 方根高 度 ( s 单 位 cm )	平均均 方根坡 度 ( s 单 位 cm )	最大均 方根高 度 ( s 单 位 cm )	最小相 关长度 ( l 单位 cm )	平均长 度 ( l 单 位 cm )	最大相 关长度 ( l 单位 cm )	最小均 方根坡 度 ( s / l )	平均均 方根坡 度 ( s / l )	最大均 方根坡 度 ( s / l )
OD	69	0.054	0.352	5	0.211	0.618	1.304	4.530	6.526	7.880	0.0466	0.092	0.180
SB	25	0.075	0.231	6	3.742	5.589	7.062	5.630	7.482	12.000	0.553	0.780	1.135
SC	17	0.143	0.308	4	0.211	0.638	0.892	2.300	4.283	6.060	0.046	0.181	0.388
SI	58	0.021	0.457	5	0.232	0.454	0.675	16.370	21.270	29.620	0.014	0.021	0.029
SR	69	0.063	0.355	3	4.043	4.652	5.165	5.560	6.457	7.380	0.643	0.725	0.803
SU	52	0.033	0.308	5	1.139	1.900	2.469	3.180	8.186	15.010	0.164	0.275	0.375

表 2 A IEM 模型与地面测量值在每个频率下的最小方差和所有频率的最小方差

Table 2 Summary of the RMSEs in the direct comparisons between A IEM model calculations from the two surface roughness parameters input tasks and the field experimental data

频率 ( GHz )	观测个数	实验 1-V	实验 2-V	实验 1-H	实验 2-H
5.05	62	0.042	0.031	0.049	0.045
10.65	52	0.024	0.025	0.056	0.036
23.8	61	0.024	0.023	0.051	0.037
36.5	51	0.025	0.022	0.048	0.041
Overall	226	0.030	0.026	0.051	0.039

(1) 每个测点的粗糙度廓线取平均得到的均方根高度和相关长度, 作为 A IEM 模型的地表粗糙度输入参数;

(2) 最小化测量值与 A IEM 模型模拟值的均方根误差 (RMSE) 时所采用的粗糙度参数, 作为 A IEM

模型的地表粗糙度输入参数。做这两组不同试验比较的目的, 是为了评价实验测量的地表粗糙度的敏感性和 A IEM 模型在这些频率的应用能力。

从表 2 中可看出, 当使用平均粗糙度参数, A IEM 模型模拟值与地面测量值时在 V 极化发射率的均方根误差 (RMSE) 为 0.024—0.042, H 极化为 0.036—0.046。另外, 采用最佳粗糙度参数时, V 极化发射率的均方根误差为 0.022—0.031, H 极化为 0.036—0.046。比较这两组结果, 对于所有频率和极化 (除了 10.65GHz 的 V 极化), 使用最佳粗糙度参数要比平均粗糙度参数结果好得多。图 1 是所有 4 个频率的地表测量值 (x 轴) 和根据最佳粗糙度参数计算的 A IEM 模型值 (y 轴) 的比较结果。所有频率的总均方根误差 (RMSE) V 极化为 0.026, H 极化为 0.039。显而易见, 利用最佳粗糙度参数计算的模型值要比平均粗糙度参数计算的模型值和实测数据吻合得好 (V 极化误差为 0.030, H 极化为 0.051)。根据上述两组试验结果, 无论是单个频率或者所有频率, 均表明从有限粗糙度参数中 (廓线长度和廓线个数) 所取的平均值不能代表测量像元中的有效粗糙度。

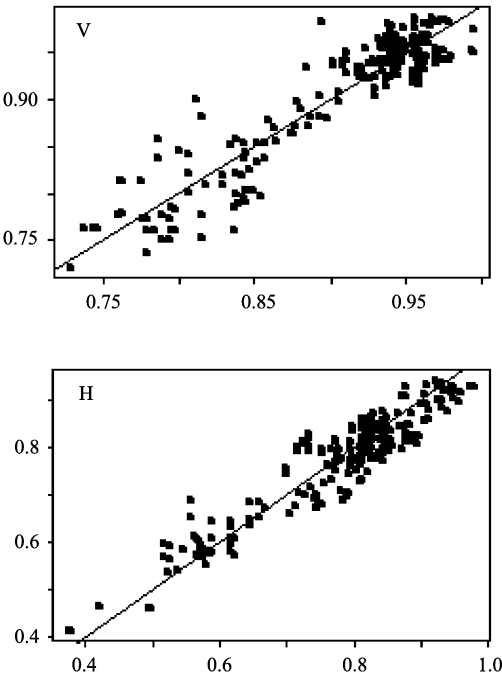


图 1 NRA 的实验测量发射率 (x 轴) 与 A IEM 模型采用最佳粗糙度参数的计算值 (y 轴) 的比较 (包括频率 5.05 10.65 23.8 36.5GHz 入射角 50°)

Fig 1 Comparisons of the surface emissivity from the NRA experimental data (x axis) with A IEM model predictions (y axis) using the “best” roughness parameters from the available roughness profiles at each site at the frequencies of 5.05 10.65 23.8 and 36.5GHz and with incidences of 50°

从图 1 可看出, 在辐射计测量像元范围内, 地表粗糙度特征存在很大不确定性, 尤其是根据有限地表粗糙度廓线中得到的相关长度。Davison 等人<sup>[21]</sup>的研究表明, 均方根高度和相关长度随着测量尺度变化而变化。不像用蒙特卡罗数值模拟与理论模型比较那样, 数值模拟可很好地控制试验条件, 能很好地描述地表粗糙度和介电特性。然而, 自然地表具有很强的三维非均一性。

根据像元范围内的地表粗糙度特性的不确定性, 作为 A IEM 模型的另外一个输入参数——介电常数 (根据有效的土壤水分测量数据) 也存在很大的不确定性。比如对于耕土, 下过雨之后的干燥晴天天气状况时, 大多数凸出来的土块比田里凹进去的土块要干透的快。从土壤水分测量中可发现: 土壤水分在几厘米的水平分布尺度上和垂直分布方向上均呈现出非均一性<sup>[22]</sup>。

认识到从有效测量数据中得到的地表粗糙度参

数和土壤水分作为 A IEM 模型输入存在很大不确定性, 本文认为从测量粗糙度剖面中选取的最佳粗糙度得到结果的不确定性是属于实验数据不确定性范围内的。模型预测值与大量实验观测值及实验数据反映的不同频率和极化下的地表辐射特征相当吻合。表明 A IEM 模型能很好模拟本研究采用频率范围的地表辐射信号特征。

3 AM SR-E 辐射信号特征模拟

为了分析和表征粗糙度效应对 AM SR-E 通道的辐射信号影响, 发展一个简化面辐射模型, 利用 A IEM 模型建立了基于 AM SR-E 传感器参数设置的辐射数据库, 包括频率: 6.925 10.65 18.7 23.8 和 36.5GHz, 两种极化 V 和 H, 55°入射角。该数据库覆盖了尽可能宽的土壤水分 (2%—44%, 间隔 2%) 和地表粗糙度参数 (均方根高度变化范围 0.25—3cm, 间隔 0.25cm; 相关长度变化范围 2.5—30cm, 间隔 2.5cm), 每组频率和极化下共有 2904 个发射率值。由于采用高斯相关函数比采用指数相关函数更接近实验测量值, 因而在模型模拟中使用高斯相关函数。行结构的地表不在本研究讨论范围内, 将在以后的研究中进一步考虑。

地表有效反射率或者发射率的大小与频率有关。对于相同土壤水分与地表粗糙度的有效反射率, V, H 极化信号都随频率增加而下降。这种现象与当前对不同极化的发射率对频率的关系理解完全一致。这种频率的依赖性主要是由液态水的介电特性随频率变化决定。土壤固体物质的介电特性在微波波段与频率无关。然而, 液态水的介电特性与频率高度相关。这可以从图 2 的关系中证实。图 2 的 x 轴是平面反射率随着频率的增加无论是 V 和 H 极化都在减小, 而且平面反射率的动态范围也在减小。另一方面, 粗糙度对有效反射率的影响是增加 V 极化, 减小 H 极化。从实测数据上看, 只有一个频率发射信号对粗糙度响应弱。这表明表面有效反射率或发射率对频率的影响, 主要体现在频率对介电常数的敏感性要比频率对粗糙度强。

图 2 显示地表粗糙度对所有频率的 H 极化有效反射率的影响, 与平面相比, H 极化总是减小反射, 或者说增强发射率。这种现象与当前的理解及当前半经验模型的模拟结果相一致<sup>[1-9]</sup>。然而, 地表粗糙度对 V 极化的影响, 是增加了表面有效反射率或者减小表面发射率 (见图 2 上)。这表明在大

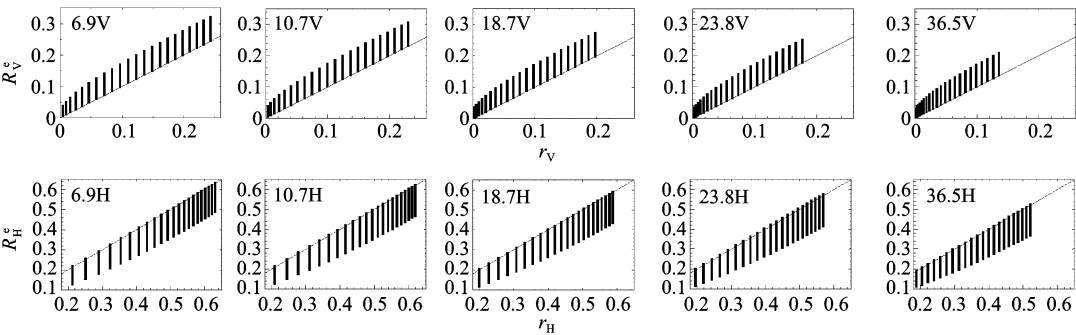


图 2 A IEM 模型模拟有效反射率与平面反射率的关系图。x 轴是平面反射率, y 轴是有效反射率, 上边是 V 极化, 下边是 H 极化。图示从左到右分别是频率为 6.925 10.65 18.7 23.8 and 36.5 GHz 的结果。偏离 1:1 的对角线则反映了地表粗糙度影响

Fig 2 Frequency and polarization characteristics of surface roughness effects on the surface effective reflectivity under AMSR E sensor configurations at 55° with A IEM simulated surface effective reflectivity(y axis) and the corresponding Fresnel reflectivity(x axis) with V polarization on the top row and H polarization at the bottom row

入射角下,粗糙度对表面有效反射率或发射率的影响无论量级上的不同,变化方向相反。在大入射角的 L 波段也发现这个现象<sup>[6]</sup>。因此,这个现象极大地影响描述表面发射信号 V 和 H 极化之间的关系,尤其是 V/H 比值间关系。显然,在大入射角情况下,有效反射率的极化比实际上增强地表粗糙度的作用而非减弱作用。若假设 V 和 H 极化的粗糙度影响相同,则会带来土壤水分估算误差。

为了进一步说明 A IEM 模型模拟的上述关系,在图 3 中用 1993 年 NRA 实验的地基辐射计实验数据(50°入射角,频率 5.05 10.65 23.8 和 36.5GHz)表示类似图 2 的关系。从图 3 上可看出,对于 V 极化,大部分测量值高于相应的平面反射率值;而 H 极化,大部分测量值低于相应的平面反射率值。只有少部分值偏离这个规律。这些点可能是由于地表土壤水分测量的不确定性引起菲涅尔反射系数及辐射计测量数据的不确定性造成的。

利用 A IEM 模型模拟数据和地面实验数据,通过分析上面地表粗糙度效应对微波发射的影响,可总结出大入射角(≥50°)高频的有效反射率的两个重要特征:

- 由于不同频率液态水的不同特性引起土壤介电特性随频率不同而不同,随频率增加有效反射率总是减小;
- 地表粗糙度对表面有效反射率的影响对不同极化无论量级还是变化方向上完全不同, V 极化粗糙度增加有效反射率, H 极化粗糙度减小有效反射率。

这两个重要特征为本文分析和评价当前的半经

验模型,以及发展新的表面辐射模型提供了指导思想。

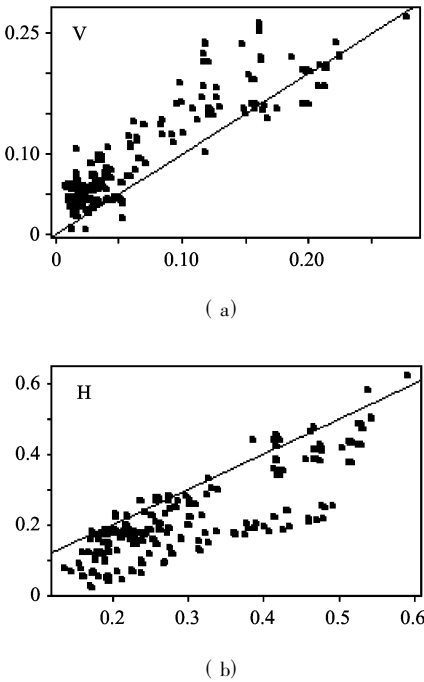


图 3 INRA 实验的地基辐射计测量的有效反射率(50°入射角,频率 5.05 10.65 23.8 和 36.5 GHz)与相应平面反射率的关系图。x 轴是平面反射率, y 轴是有效反射率

(a) V 极化; (b) H 极化

Fig 3 Polarization characteristics of surface roughness effects on the surface effective reflectivity (y axis) from the ground radiometer measurements from NRA experimental data and the corresponding Fresnel reflectivity (x axis) at 50° and the frequencies of 5.05 10.65 23.8 and 36.5 GHz z

4 简单模型形态的选取

为了发展一个简单而准确的表面发射模型,以适合基于图像分析的微波遥感应应用,采用以下几个标准来评价当前存在的半经验模型。即

- 模型形式简单且精度高,容易推广到遥感应用;
- 表面发射率对频率和极化依赖性的相对精度;
- 模型的粗糙度参数与传统表面粗糙度测量参数(如地表均方根高度和相关长度)的关系;
- 表面粗糙度特性在时间序列测量中不变时可以作为常量。换句话说,表面粗糙度参数不随表面介电性质而改变,因而某一时相(某一土壤湿度条件)估算的粗糙度参数可以用于另一时相(另一种湿度条件)。

本研究的任务是对当前的半经验模型进行评价并选择一个合适的模型,能够最大限度地考虑上述因素。

4 1 试验模型形态的选择

在过去的几年里,已开发了若干不同形态的半经验模型<sup>[1-6 23]</sup>,其模拟结果与测量相吻合,具有一定精度。根据试验数据的范围(频率、极化、入射角、地表土壤粗糙度和介电性质)和这些模型的实现方式,在特定条件下模型可以获取相当好的结果。大多数模型来源于低频观测(L波段),需要在高频和大入射角的 AMSR-E 传感器数据的应用中加以检验。

在本研究中,基于上述标准,本文检验了三种可能用于 AMSR-E 数据的模型。第一种模型是  $QH$  模型<sup>[24 25]</sup>,它是描述裸土表面有效反射率最常用的半经验模型,是地表粗糙度和介电性质的函数。

$$R_p^e = 1 - \epsilon_p = [Q \cdot r_q + (1 - Q) \cdot r_p] \cdot H \quad (3)$$

粗糙度参数  $Q$  描述由于地表粗糙度效应产生的正交极化发射的能量,  $H$  描述地表粗糙度造成的由于频率增加产生的地表有效反射率下降。这些在文献[25]已给出:

$$Q = 0.35 \cdot (1 - \exp(-0.6 \cdot s^2 \cdot f))$$
$$H = \exp(-(2 \cdot k_s \cdot \cos\theta)^2) \quad (4)$$

式中,  $f$  为频率,单位 GHz 然而,当  $k_s$  (标准化地表均方根高度)增加时,上面的  $QH$  模型所模拟的表

面发射率迅速下降,因而在大粗糙地表,很难估算地表反射率。从而(4)式中的表面粗糙度参数通常由试验数据经验地决定,称之为“有效粗糙度”<sup>[1-5]</sup>。粗糙度参数  $Q$  和  $H$  的值通常介于 0 和 1 之间,根据给定频率和入射角,则可用于校正反射率的地表粗糙度效应。

其他的半经验模型<sup>[2 3 5]</sup>基本上都是在  $QH$  模型上发展起来的。它们假设  $Q=0$   $H$  参数就有了不同的表示形式。这些模型的主要缺点是不能正确解释地表粗糙度对不同极化发射率信号的影响,因此无法用于大入射角数据,如 AMSR-E 数据。由于这些半经验模型描述的地表粗糙度对发射率的影响与极化无关,即粗糙度对 V, H 极化的发射率相同,但在前面研究中,利用 AIEM 模型模拟数据和实验实测数据均已证实:粗糙度对 V, H 极化的发射率影响不同。然而,这类模型描述粗糙度对极化的关系可以通过选定  $H_p$  参数与极化关系来确定。因此,选取它作为第二种检验模型,简称为  $H_p$  模型:

$$R_p^e = r_p \cdot H_p \quad (5)$$

第三种模型形式就是本文所提出和发展的模型,称之为  $Q_p$  模型。

$$R_p^e = Q_p \cdot r_q + (1 - Q_p) \cdot r_p \quad (6)$$

同样,上述形式还可简化成

$$E_p = Q_p \cdot t_p + (1 - Q_p) \cdot t_b \quad (7)$$

式中,  $t_p = 1 - r_p$ , 菲涅尔透过率。在  $Q_p$  模型中,粗糙度参数  $Q_p$  可以表示成有效反射率形式或发射率形式。本文选取这种形式的原因是:把表面有效反射率表示成类似公式(1)的形式——非相干和相干两部分之和,这种形式很好理解。粗糙度对相干项的影响可用  $H$  参数来描述,  $H$  参数作为  $k_s$  与  $\theta$  的函数,而粗糙度对非相干项的影响则是频率、极化和地表粗糙度参数(均方根高度  $s$  相关长度  $l$ )的函数。对于低频如 L 波段,相干项在总的有效反射率或发射率中起主导作用,对于给定的入射角,  $k_s$  是主要的粗糙度影响因子。随着地表粗糙度  $k_s$  的增加,有效反射率或发射率中的相干项作用随之减弱,同时非相干项散射作用增强,因此,非相干项在高频将起主导作用。因而,在低高频,粗糙度对有效反射率的影响是完全不同的。这表明  $H$  参数不可能在模拟高频反射率信号中起重要作用。由于粗糙度对非相干部分反射率的影响,则公式(6)的第一项和第二项与公式(1)中的非相干项相一致,这两项分别表示了  $p$  极化的总贡献和正交极化辐射贡献。因此,在本文

中选用公式 (6) 的形式。同样, 也可看作该形式是对  $QH$  模型的修正, 设  $H=1$ , 带极化的  $Q_p$  参数用来校正不同极化粗糙度响应不同。

上述所选的三种模型形式, 地表粗糙度效应均用两个粗糙度参数  $Q$  和  $H$  表示, 或者每一极化的  $H_p$  与  $Q_p$ 。因此, 它们在模拟有效反射率或发射率时的复杂程度相同。接下来, 利用 A IEM 模型模拟数据和地面实验数据来比较这三种模型形式, 以便选取一种更好的模型形式。

4.2 利用 A IEM 模型模拟数据和实验数据评价三种模型形式

利用 A IEM 模型建立的模拟数据库, 本文对三种模型形式做了两组试验比较。第一组实验是选用平均粗糙度参数, 分别对所选用的三个模型与 A IEM 模型的拟和情况进行评价; 通过模拟的有效反射率与相应菲涅尔系数进行回归, 来求得给定粗糙度条件下的粗糙度参数  $QH$ ,  $H_p$  与  $Q_p$ 。显而易见,  $H_p$  模型没有截距, 可直接求得  $H_p$ 。  $Q_p$  可通过  $r_q - r_p$  与  $R_p^e - r_p$  的关系得到。至于  $QH$  参数, 可通过公式 (3) 得到  $VH$  极化比, 通过极化比可消掉  $H$  参数, 因而可先得到  $Q$  参数。而  $H$  参数则可以用公式 (3) 得到。用这种方法计算得到的  $QH$  参数都与极化无关。通过对地表均方根高度与相关长度的不同组合的循环迭代, 可得到这三种模型形式的粗糙度参数。理论上讲, 这些粗糙度参数只随粗糙度特性变化而变化。针对 AMSR-E 传感器频率 10.65GHz, 55° 入射角的试验结果见表 3。

从图 4 可看出, 与 A IEM 模型模拟值比较,  $H_p$  模型精度最差,  $V$ ,  $H$  与  $VH$  极化比的绝对误差 (RMSE) 分别是 0.0114 0.0075 和 0.0502。  $VH$  极化比描述了不同极化的地表辐射信号之间的关系。尽管  $H$  极化的结果较好, 然而误差大则表明  $H_p$  模型不能很好估算  $V$  极化的有效反射率和  $VH$  极化比。这主要是由于该模型形式没有考虑交叉极化发射能量引起的辐射。低频如 L 波段, 地表的有效反射率起主导作用项是相干散射项——公式 (1) 中的第一项。公式 (1) 中的非相干项对有效反射率的贡献很小, 几乎没有。因此, 对于低频波段, 地表的有效反射率与菲涅尔反射率更接近于线性关系,  $Q=0$  是合理的。另一方面, 在高频波段, 公式 (1) 中的非相干项, 对表面有效反射率占主导作用, 交叉极化的辐射强烈影响表面辐射。

表 3 A IEM 模型模拟数据与三个模型形式的绝对误差 (RMSE)

Table 3 Summary of the absolute RMSE of anisotropy for the three selected model forms from using A IEM simulated data

(a) 采用平均粗糙度的比较结果

(a) Test results by the average roughness parameters

模型	V	H	VH
$H_p$	0.0708	0.0175	0.1919
$QH$	0.0168	0.0171	0.0219
$Q_p$	0.0042	0.0048	0.0063

(b) 根据 2% 的土壤水分计算的粗糙度的比较结果

(b) Test results by the roughness parameters determined at 2% moisture

模型	V	H	VH
$H_p$	0.0114	0.0075	0.0502
$QH$	0.0052	0.0063	0.0091
$Q_p$	0.0010	0.0011	0.0034

图 4(b) 表示  $QH$  模型形式与 A IEM 模型模拟的比较结果。可以看出,  $QH$  模型形式比  $H_p$  模型好,  $V$ ,  $H$  与  $VH$  极化比的绝对误差 (RMSE) 是 0.0052 0.0063 0.0091。  $V$  极化的误差影响要比  $H$  极化大, 因为  $H$  极化有效反射率的动态范围要比  $V$  极化的有效反射率的动态范围大。  $V$  极化的估计值有系统误差——当有效反射率值很大时它总是低估有效反射率。  $QH$  模型在这三种模型形式中具有中等精度。与  $H_p$  模型形式比较,  $QH$  模型提高了  $V$  极化精度 (2 倍精度) 和  $VH$  比值精度 (5 倍精度)。这是因为  $QH$  模型考虑了正交极化辐射。  $QH$  模型的误差主要是粗糙度对  $V$ ,  $H$  的影响一致这个假设造成的。

图 4(c) 表示  $Q_p$  模型与 A IEM 模型模拟值的比较结果。可看出在这三种模型形式中,  $Q_p$  精度最好。  $Q_p$  模型的  $V$ ,  $H$  与  $VH$  极化比的绝对误差 (RMSE) 是 0.0052 0.0063 0.0091。比  $QH$  模型精度提高 5 倍。这是因为  $Q_p$  模型的第一项和第二项与公式 (1) 中的非相干项相一致, 这两项分别表示了  $p$  极化的总贡献和正交极化辐射贡献。同时与极化相关的  $Q_p$  参数校正了不同极化的地表粗糙度效应。

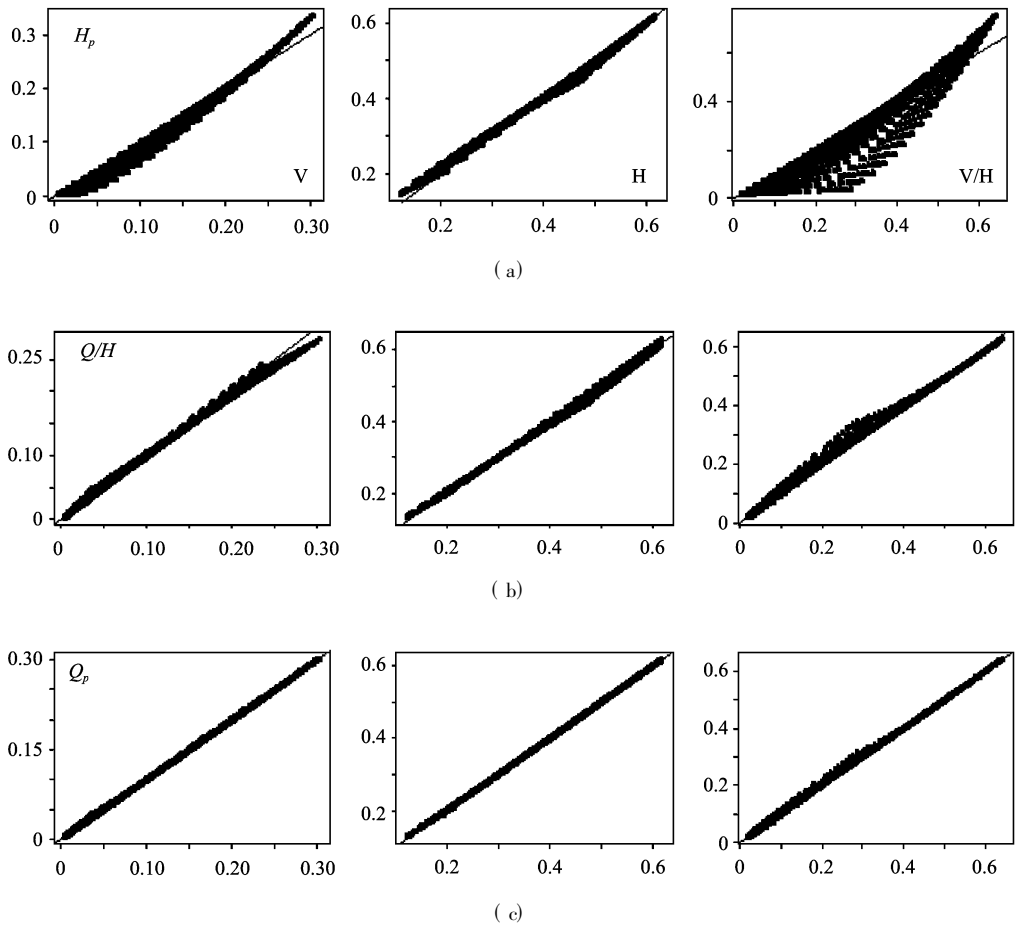


图 4 AEM 模拟的地表有效反射率 (x 轴) 与相应半经验模型 ( $H_p$ ,  $Q/H$ ,  $Q_p$ ) 计算值 (y 轴) 的比较,  
左: V 极化; 中: H 极化; 右: V/H 极化比, AMSR-E 传感器频率 10.65GHz 55° 入射角

Fig 4 The comparison between the AEM simulated surface effective reflectivity (x axis) and the corresponding  $H_p$  (top row),  $Q/H$  (middle row), and  $Q_p$  (bottom row) model calculations for V polarization (left), H polarization (middle), and the V/H ratio (right) for a wide range surface roughness and soil moisture conditions for AMSR-E sensor parameter at 10.6GHz and 55° incidence

对这三个模型比较的第二个试验是应用时间序列数据对它们进行分析比较。好处在于在某一时段内卫星观测像元中的粗糙度认为是常数。也就是说,地表粗糙度参数  $Q/H$ ,  $H_p$  与  $Q_p$  不应随介电特性的变化而变化。本文用 2% 的干土条件来确定粗糙度参数  $Q/H$ ,  $H_p$  与  $Q_p$ , 然而把它们的估算值应用到其他土壤水分条件如 4%—44% 来计算发射率。因此这是必要的粗糙度参数敏感性实验。先估算某一土壤水分条件下的粗糙度值并把其应用于其他土壤水分状况下,若误差大,则表面粗糙度参数对土壤介电常数敏感且相关。同样实验采用了 AMSR-E 的频率 10.65GHz 见表 3。  $H_p$  模型的误差最大, V 极化误差为 0.0708 V/H 极化比误差为 0.1919。这些误差值超出了本文所能应用范围。Mo 和 Schmugge<sup>[2]</sup> 研究表明,不同土壤水分条件下

$H_p$  参数必须经过校正。它表明所得的地表粗糙度参数  $H_p$  受地表介电特性的影响很大。与  $H_p$  模型相比,  $Q/H$  模型所得的地表粗糙度受不同地表介电特性的影响相对小。然而,误差仍达到  $10^{-2}$  量级,在 V, H 和 V/H 上分别为 0.0168 0.0171 和 0.0219。与平均粗糙度条件下获取的测试结果类似,所选的三种实验模型形态的精度由高到低为  $Q_p$ ,  $Q/H$  和  $H_p$  模型。该试验下的  $Q_p$  模型 V, H 与 V/H 极化比的误差分别是 0.0042 0.0048 和 0.0063。这些误差值仍能达到  $10^{-3}$  量级。这表明  $Q_p$  模型的粗糙度参数与土壤水分状况无关。

除了应用 AEM 模型模拟数据进行测试外,还选用了 NRA 实验 (1993) 的地面数据对这三个模型进行比较分析。从测量得到的土壤质地、体密度、0.5cm 及 1cm 处的平均土壤水分和温度计算菲涅尔

反射率。 $QH$ 模型的粗糙度参数由每个频率两个极化的表面发射率所决定。 $H_p$ 与 $Q_p$ 参数由每个频率和极化的表面发射率所决定。表 4 列出每个模型在不同频率和极化的误差及所有频率下的总误差。同样, $Q_p$ 模型在大多数频率和极化下精度最高,除了 $H_p$ 模型 C 波段 H 极化和 $QH$ 模型 X 波段 V 极化除外。这三个模型 $QH$ 、 $H_p$ 与 $Q_p$ 所对应 V 极化所有频率的总误差分别为 0.023 0.029和 0.02 对应 V 极化所有频率的总误差 0.032 0.030 和 0.027。

表 4 三种模型形式的计算的发射率与 INRA 试验观测值的比较

Tab 4 Summary of the absolute RM SE of emissivities for the three selected model forms from using INRA's experimental data

频率 (GHz)	$QH$ -V	$H_p$ -V	$Q_p$ -V	$QH$ -H	$H_p$ -H	$Q_p$ -H
5.05	0.033	0.037	0.029	0.039	0.027	0.028
10.65	0.018	0.026	0.021	0.026	0.025	0.022
23.8	0.019	0.027	0.018	0.029	0.029	0.025
36.5	0.021	0.024	0.019	0.031	0.032	0.029
所有频率	0.023	0.029	0.021	0.032	0.030	0.027

通过上述分析,表明 $Q_p$ 模型在这三种模型中精度最高,模型形式最好。它的粗糙度参数与土壤水分无关。因此,选用 $Q_p$ 模型来描述地表辐射特性,它不仅适合于单次观测,同时适用于有时间序列的多次观测。

5  $Q_p$  模型的粗糙度参数化

根据对 AIEM 模型模拟数据库的分析,比较了 $Q_p$ 参数与常用的粗糙度参数—— $s/l$ (均方根高度), $l$ (相关长度)之间的关系。发现 $Q_p$ 与 $s/l$ 的值高度相关。这与适用于大粗糙度地表的几何光学模型结果一致——高频的散射受地表坡度控制。高斯相关函数定义 $\sigma_s=\sqrt{2}\cdot s/l^{[13-14]}$ 。图 5 表示粗糙度参数 $Q_p$ (y axis)与 $s/l$ (x axis)在 $55^\circ$ 角 10.65GHz 频率的关系。可看出 $Q_p$ 参数随着 $s/l$ 比值增加而增大。 $Q_v$ 与 $Q_h$ 均可表示成 $s/l$ 的非线性函数。通过回归分析,能描述出不同频率和极化间的关系

$$\log[Q_p(f)] = a_p(f) + b_p(f) \cdot \lg(s/l) + c_p(f) \cdot (s/l)$$
(8)

式中, $f$ 是频率,单位:GHz。参数 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 取决于 AMSR-E 的频率和极化,可通过对 AIEM 模型模拟数据库回归得到。表 5 列出了 AMSR-E 10.65GHz 频率下不同极化的 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 值。由 AIEM 模拟数据库得到的 $Q_p$ 与用(8)式和 $s/l$ 值计算的结果相比较,误差值非常小,V 和 H 的误差分别是 0.0012 与 0.0051。

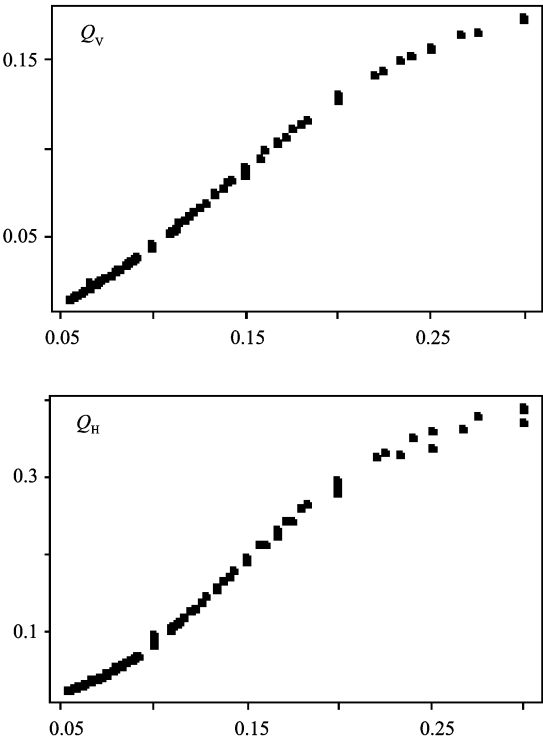


图 5 粗糙度参数  $Q_p$  与  $s/l$  值在 AMSR-E 频率 10.65GHz、 $55^\circ$  入射角时的关系

Fig 5 The relationships of the  $s/l$  ratio to the roughness parameters  $Q_p$  at AMSR-E sensor parameter at 10.6GHz and  $55^\circ$  incidence

通过对不同频率 $Q_p$ 参数的比较,发现在给定 $s/l$ 值时, $Q_p$ 与频率几乎无关。不同频率间 $Q_p$ 差异很小。为了证明这个结论,比较了 10.65GHz 频率

表 5 根据  $s/\lambda$  值计算  $Q_p$  即式 (8) 中的回归系数

Table 5 The parameters for calculation of the surface roughness parameters  $Q_p$  from the  $s/\lambda$  ratio measurement at 10.65GHz in (8)

极化	$a$	$b$	$c$
V	3 216481	2.452773	-6 674134
H	5 603623	3.095002	-9 377554

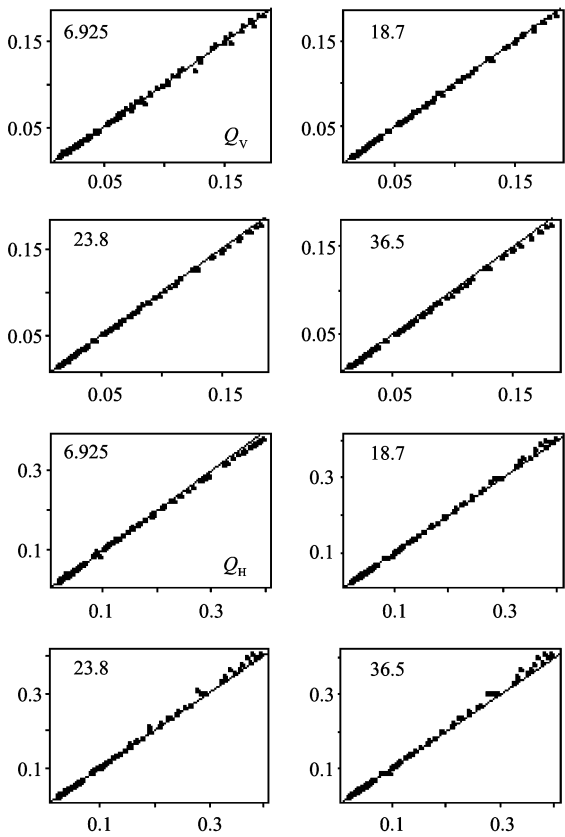


图 6 地表粗糙度参数  $Q_p$  在 10.65GHz 与其他频率下的关系

Fig 6 The relationships of the surface roughness parameters  $Q_p$  at 10.65GHz with its at the other frequencies

( $x$ 轴)与其他频率( $y$ 轴)的  $Q_p$  的关系,结果见图 6。从左到右,依次为 6.925 18.7 23.8 与 36.5GHz。对于  $Q_v$ ,除了 36.5GHz 频率外,其他频率与 10.65GHz 频率几乎无差别。而其他频率的  $Q_h$  与 10.65GHz 频率的  $Q_h$  有微小差异。从总的趋势来看,  $Q_v$  随频率增加略微减小,  $Q_h$  则随频率增加而略微增加。频率对粗糙度响应特征与几何光学模型特点相同。几何光学模型计算的双站散射系数与频率无关。此外,  $Q_p$  随频率的变化是线性的。换句话说,若知道某一频率的  $Q_p$  值,则可推导其他频率的  $Q_p$  值。对于 AMSR-E 传感器 ( $55^\circ$  入射角), 10.65GHz 频率与其他频率的  $Q_p$  参数间的关系为,

$$Q_p(f) = \alpha_p(f) + \beta_p(f) \cdot Q_p(10.65\text{GHz}) \quad (9)$$
式中,参数  $\alpha$  与  $\beta$  只与极化有关,并可求得相应频率的  $Q_p$ 。表 6 列出了针对 AMSR-E 频率的  $\alpha_p$  与  $\beta_p$  值。

表 6 根据式 (8) 和 10.65GHz 频率的  $Q_p$  计算其他频率的粗糙度参数  $Q_p(f)$

Table 6 The parameters for calculation of the surface roughness parameters  $Q_p(f)$  from  $Q_p(10.65\text{GHz})$  in (8)

频率 GHz	6.925	18.7	23.8	36.5
$\alpha_v$	0	0	0	-1.431E-4
$\beta_v$	1	1	1	0.9783
$\alpha_h$	3.866E-3	-9.872E-4	-6.250E-4	-6.094E-4
$\beta_h$	0.9575	1.0131	1.0153	1.0255

本文发展了 AMSR-E 的表面有效反射率参数化模型—— $Q_p$  模型。对于该模型, 10.65GHz 频率的  $Q_p$  由公式 (8) 和  $s/\lambda$  值得到, 根据公式 (9) 进而得到其他频率的粗糙度参数  $Q_p$ 。式 (6) 和式 (7) 中的平面反射率或透射率由地表介电常数计算得到。表 7 列出了  $Q_p$  模型计算的有效反射率与用 AIEM 模型计算值间的误差。 $R_v^e$  与  $R_h^e$  的估算误差非常小, 最小误差为  $10^{-3}$ , 最大误差 0.0023, 出现在 C 波段的 H 极化。很明显式 (8), 式 (9) 引起的误差可忽略。因此, 本文发展的新模型  $Q_p$  模型, 不仅简单而且适合于微波遥感应用。与理论模型 AIEM 模拟结果差异非常小。

表 7 不同频率和极化下  $Q_p$  模型与 AIEM 模型模拟的有效反射率值的比较

Table 7 Summary of the comparisons of the  $Q_p$  model with the AIEM model predictions in the surface effective reflectivities at the different frequency and polarization

频率 GHz	6.925	10.65	18.7	23.8	36.5
V	0.0016	0.0012	0.0011	0.0011	0.0012
H	0.0023	0.0022	0.0017	0.0019	0.0016

6 结 论

面散射模型——AIEM 模型的发展, 使得有能力模拟大范围粗糙度和高频数据的辐射信号, 可以模拟更宽范围的地表介电常数、粗糙度和频率下的发射率。本文用大量的地面测量实验数据, 对

A IEM 模型在高频、大入射角的模拟能力作了相应验证。地面数据来源于 NRA93 实验, 采用每个实验点中的最佳粗糙度廓线作为 A IEM 模型的粗糙度参数输入, 比较结果很好, V 极化的误差 (RMSE) 达 0.026 H 极化误差为 0.039。由于在辐射计测量范围内存在很大不确定性, 尤其是地表相关长度, 只有有限的粗糙度参数测量。当用平均粗糙度测量值时, 模型与观测数据的误差相对较差, V 极化的误差 (RMSE) 可达 0.030 H 极化误差为 0.051。从有限粗糙度参数中 (廓线长度和廓线个数) 所取的平均值不能代表测量像元中的有效粗糙度。如何表征辐射计像元范围内的粗糙度特性有待进一步研究。

在 A IEM 模型基础上, 本文发展了多频率多极化的面辐射模型—— $Q_p$  模型, 可应用于很宽范围的地表介电常数、粗糙度条件的地表。分别应用 A IEM 模拟数据和实验数据与本文新发展的  $Q_p$  模型及  $QH$  模型与  $H_p$  模型做比较, 结果表明,  $Q_p$  模型精度最高, 最适合具有高频、大入射角的 AMSR-E 数据。

与理论模型形式相比较,  $H_p$  模型形式没有考虑影响高频辐射的正交极化辐射, 这是由于方程 (1) 中的非相干项在高频地表有效反射率中起主导作用。因此,  $H_p$  模型估算 V 极化的有效反射率和 V H 极化比结果较差。

$QH$  模型形式的缺点是由于粗糙度效应对 V, H 极化具有相同影响。这会使得低估大有效反射率情况下的有效反射率值。 $Q_p$  模型的式 (6) 中的第一、二项与方程 (1) 中的非相干项相对应。根据 A IEM 模拟数据库, 通过分析  $Q_p$  模型参数及与地表粗糙度的关系, 发现  $Q_p$  模型能简单描述为单粗糙度参数 (均方根高度与相关长度的比值) 的非线性形式。此外,  $Q_p$  参数对频率的依赖性, 在 V 极化相关性小, 而 H 极化不同频率间则有显著改变, 可以表示成线性关系式 (9)。 $Q_p$  模型与 A IEM 模型比较误差非常小, 在  $10^{-3}$  量级。

总的来说, 新发展的  $Q_p$  模型形式简单而且能精确地描述不同频率和极化下的地表辐射特征, 可应用于单次观测或者多次观测的时间序列分析。简化的  $Q_p$  模型可用作模拟地表辐射的前向模型, 如用于估算 AMSR-E 传感器的亮温值, 同时模型的发展有利于提高人们对辐射机制的理解和认识。

## 参 考 文 献 (References)

- [1] Wang J R, O'Neill P E, Jackson T J *et al*. Multifrequency Measurements of the Effects of Soil Moisture, Soil Texture, and Surface Roughness [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1983, **GE-21**(1): 44–51.
- [2] Mo T, Schmugge T J. A Parameterization of the Effect of Surface Roughness on Microwave Emission [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1987, **25**(1): 47–54.
- [3] Wegmüller U, Matzler C. Rough Bare Soil Reflectivity Model [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, **37**(3): 1391–1395.
- [4] Prigent G, Wigneron J R, Rossow W B *et al*. Frequency and Angular Variations of Land Surface Microwave Emissivities: Can we estimate SSM/T and AMSU emissivities from SSM/T emissivities? [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000, **38**: 2373–2386.
- [5] Wigneron J R, Laguerre L, Kerr Y H. A Simple Parameterization of the L-band Microwave Emission from Rough Agricultural Soil [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001, **39**(8): 1697–1707.
- [6] Shi J, Chen K S, Li Q *et al*. A Parameterized Surface Reflectivity Model and Estimation of Bare Surface Soil Moisture with L-band Radiometer [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2002, **40**(12): 2674–2686.
- [7] Jackson T J, Schmugge T J. Vegetation Effects on the Microwave Emission of Soils [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1991, **36**: 203–212.
- [8] Jackson T J, Le Vine D M, Hsu A Y *et al*. Soil Moisture Mapping at Regional Scales Using Microwave Radiometry: the Southern Great Plains Hydrology Experiment [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, **27**: 2136–2151.
- [9] Njoku E G, Li L. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6–18 GHz [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1999, **30**(2): 79–93.
- [10] Njoku E, Jackson T, Lakshmi V *et al*. Soil Moisture Retrieval from AMSR-E [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003, **41**: 215–229.
- [11] Paloscia S, Macelloni G, Santi E *et al*. A Multifrequency Algorithm for the Retrieval of Soil Moisture on a Large Scale Using Microwave Data from SMMR and SSM/T Satellite [J]. *Trans Geosci Remote Sens*, 2001, **39**(8): 1655–1661.
- [12] Jiang L, Shi J, Tjuatja S *et al*. Study of Snow Water Equivalence Inversion Technique with Simulating Model [A]. *Proceedings of SPIE* [C]. 2004, **5654**: 157–166.
- [13] Tsang L, Kong J A, Shin R T. *Theory of Microwave Remote Sensing* [M]. New York, NY: John Wiley and Sons, 1985.
- [14] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. *Microwave Remote Sensing: Active and Passive*. 2. *Radar Remote Sensing and Surface Scattering and Emission Theory* [M]. Reading, MA: Addison-Wesley, 1982.
- [15] Fung A K. In *Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications* [M]. Artech House Inc., Norwood, MA, 1994.
- [16] Chen K S, Wu T D, Tsang L *et al*. The Emission of Rough Surfaces Calculated by the Integral Equation Method with a

- Comparison to a Three Dimensional Moment Method Simulations [ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2003 **41**( 1 ): 90—101
- [ 17 ] Chen K S, Wu T D, Fung A K. A Note on the Multiple Scattering in an IEM model[ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000 **38**( 1 ): 249—256.
- [ 18 ] Wu T D, Chen K S, Shi J *et al*. A Transition Model for the Reflection Coefficient in Surface Scattering[ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2001 **39**( 9 ): 2040—2050
- [ 19 ] Calvet J C, Wigneron J B, Chanzy A, *et al*. Microwave Dielectric Properties of a Silt Loam at High Frequencies[ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1995 **33**( 3 ): 634—642
- [ 20 ] Dobson M G, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al*. Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil. Part II: Dielectric Mixing Models [ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 1985 **GRS-23** 35—46
- [ 21 ] Davidson M W J, Thuy Le Toan, Mattia F, *et al*. On the Characterization of Agricultural Soil Roughness for Radar Remote Sensing Studies[ J ]. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2000 **38**( 2 ): 630—640.
- [ 22 ] Wigneron Jean-Pierre, Shi J. Modeling the Soil Microwave Emission[ A ]. Mätzler C. Radiative Transfer Models for Microwave Radiometry[ C ]. Institution of Electrical Engineers SevenAge, UK, 2005.
- [ 23 ] Saatchi S S, Njoku E G, Wegmüller U. Synergism of Active and Passive Microwave Data for Estimating Bare Soil Surface Moisture [ A ]. Passive Microwave Remote Sensing of Land Atmosphere Interactions[ C ]. ESA/NASA International Workshop, 1995: 205—224
- [ 24 ] Choudhury B J, Schmugge T J, Chang A, *et al*. Effect of Surface Roughness on the Microwave Emission from Soil[ J ]. *J Geophys Res*, 1979 **84**( C9 ): 5699—5706.
- [ 25 ] Wang J R, Choudhury B J. Remote Sensing of Soil Moisture Content Over Bare Fields at 1.4 GHz Frequency [ J ]. *J Geophys Res*, 1981 **86** 5277—5282