

被动微波植被辐射模拟研究综述

付秀丽, 王绍刚

中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

摘要 论述了当前被动微波植被辐射模拟算法的进展和研究趋势。植被辐射的模拟方法主要分为 3 类: 第一类是将植被看作各向同性的单层介质, 光学厚度、单次反照率等设为常数或用经验关系来计算; 另外两类主要差别在于冠层定义的方式不同。其中一种方法将植被冠层看作连续介质, 另一种方法用植被冠层的离散特征 (如茎和叶子的长度、方位) 来定义。

关键词 植被; 被动微波遥感; 辐射模拟

中图分类号 TP721.1

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)12-0098-04

Simulation of Passive Microwave Vegetation

FU Xiuli, WANG Shaogang

Institute of Remote Sensing Application, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

Abstract The effect of microwave radiation on vegetation is important for identification of land parameters. Because of complexity of vegetation, it is a difficult topic for research. This paper reviews the simulation of the vegetation canopy in passive microwaves. Various vegetation canopy models are discussed and compared. They can be grouped into 3 types. In the first type, the vegetation is considered as a uniform layer with constant opacity or albedo and simple formulas or empirical relationships can be used for computation. The other two models differ in the way the canopy is defined. In one of them, the medium is still considered as continuous but with correlation lengths. The other model uses a discrete characterization of the medium (lengths and orientations of the elements such as stalks and leaves).

Keywords vegetation; passive microwave remote sensing; radiation model

0 引言

随着对环境变化、碳循环和沙漠化问题的日益关注, 植被的遥感研究越来越得到关注, 同时植被的微波辐射传输特性对于修正地面参数测量 (如土壤水分) 及提取植被参数 (如

生物量) 有重要意义, 是理解微波遥感信息的一个重要方面。由于自然界植被几何特性及介电特性十分复杂, 因此有必要对植被辐射模拟作进一步的研究。

由于微波遥感具有全天候、全天时的工作能力, 可实时动态地监测, 对物体具有一定的穿透能力, 能获得被测物体的具体参数, 实现了定量测量, 因此微波遥感成为当前世界遥感界研究开发应用的重点。被动微波在监测土壤水分方面已经得到了广泛的应用, 相比而言, 利用被动微波监测植被的方法还不够成熟, 利用微波估计植被信息是复杂的^[1]。

被动微波的植被辐射模拟始于 20 世纪 70 年代, 基于物理方法的半经验模型^[1]。随着主动微波领域植被模拟技术的发展, 被动微波领域也出现了较多复杂的模拟方法。当前主要有以下 3 种方法。第一种是将植被考虑为一层各向同性的介质, 通过植被含水量、冠层结构, 基于物理方法的半经验关系来计算光学厚度和单次散射反照率。这种方法在低频比较有效, 通过光学厚度路径积分也可以应用到高频。优点是模型输入和植被物理特征直接相关, 并且形式简单, 可以直接应用到反演算法中。另外两种方法是基于主动微波算法发展而来, 相对复杂, 考虑植被冠层、树干、茎等的体散射和体吸收, 需要求解辐射传输方程, 用相位矩阵和消光系数、吸收系数计算散射和吸收效果。本文重点介绍当前植被模型进展和发展趋势。

1 植被覆盖地表的微波发射模型

在植被覆盖地表观测的辐射计信号受大气、植被本身、土壤下垫面的影响。在短波波段, 只有无云大气是半透明的, 但是在微波波段, 大气 (包括有云的) 和植被在低频是透明的。粗略地说, 在 85 GHz, 除比较严重的降雨情况外, 大气对于传感器都是透明的。光学传感器提供的是冠层廓线的信息, 但

收稿日期: 2009-03-26

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (2007CB714403)

作者简介: 付秀丽, 博士研究生, 研究方向为微波遥感, 电子信箱: m98105@163.com

是微波提供的是植被整个层的立体信息, 透过率与频率有关。在微波波段观测的信息更为丰富, 但是分析起来也更复杂。一般来说, 频率越高, 穿透深度越浅, 从土壤发出的信号被植被削弱, 削弱程度取决于植被的含水量和信号频率。

辐射计观测到的亮温包括 3 部分: ① 向上的大气辐射 T_{at} ; 被大气削弱 (τ_{at}) 的地表辐射 (T_{lp}); ② 被下行大气削弱 (τ_{ad}) 的背景辐射 (T_{sky}) 和大气下行辐射 (T_{ad}), ③ 被地表反射 (r_{sp}) 后再被上行大气削弱的辐射。辐射传输方程为

$$T_{lp} = T_{at} + T_{lp} \exp(-\tau_{at}) + (T_{ad} + T_{sky} \exp(-\tau_{ad})) \exp(-\tau_{ad}) r_{sp} \quad (1)$$

这里, T_{lp} 由地表特征决定, 严格来讲, 地表对右式第三项也有影响。利用简单的辐射传输方程, T_{lp} 可以表示为^[2]

$$T_{lp} = \varepsilon_{sp} T_e \exp(-\tau_c / \mu) + (1 - \omega_p) T_d [1 - \exp(-\tau_c / \mu)] + (1 - \varepsilon_{sp})(1 - \omega_p) T_d [1 - \exp(-\tau_c / \mu)] \quad (2)$$

其中, ε_{sp} 为土壤发射率, T_e 为土壤有效温度, τ_c 为植被光学厚度, μ 为入射角的余弦值, ω_p 为单次散射反照率, T_d 为植被有效温度, p 为极化状态(水平极化和垂直极化)。

由式(2)可见, 在植被的被动微波遥感中, 所接收的地表信号由 3 部分组成: 植被层的辐射、底层土壤的辐射以及植被层向下的辐射、经地面向上反射和裸露地面产生的辐射经植被散射的交互作用分量。因此要准确描述地表对微波观测信号的作用, 除了准确的裸土参数, 还必须量化植被作用。

为了量化植被的影响, 需要估算植被单次散射反照率和光学厚度。通常, 植被辐射模拟方法分为两大类和两种主要方法^[3]。第一类, 目标是反演土壤水分, 将植被作为干扰因子(和大气一样), 其影响用一个简单的方法来模拟; 第二类, 目标是估计植被参数, 一般采用较为复杂的模型, 这些模型主要把植被作为一个漫反射体, 耦合到发射模型中, 需要尽可能准确地描述植被冠层的几何特征和介电特性。第一种方法把冠层看作均一层, 忽略冠层结构; 第二种方法需要植被的几何形状知识(枝、叶子尺寸等)。

2 半经验模型

大多数半经验模型是为了在反演土壤水分过程中估算植被的影响, 在低频时这种方法很有效。半经验模型把植被看作一个吸收层, 其散射很小或者忽略散射。通常假设植被是具有介电常数 ε 的同质介质, 忽略相位矩阵得到的辐射传输方程解析解。主要计算植被的光学厚度和单次散射反照率。

植被光学厚度可以从植被的介电常数直接得到

$$\tau_c = 4\pi h / \lambda \operatorname{Im}(\sqrt{\varepsilon_v}) \quad (3)$$

其中, h 为冠层高度, ε_v 为介电常数。文献[3-5]描述了多种植被介电常数混合模型的计算方法^[3-5]。通过试验发现式(3)计算结果(<20 GHz)和实际测量符合较好^[6]。

文献[7]测量了 2.7~5.1 GHz 的单次散射反照率, 单次散射反照率 ω 变化范围在 0.05~0.13, 但是通过试验得到了 0.5 的单次散射反照率, 表明单次反照率的确定需要更多试验来验证^[7]。

文献[8-10]表明植被的几何结构对光学厚度有很大的影响^[8-10]。文献[9]发现 ω 总是小于 0.1, τ_c 也可以表示成波长和植被水含量 wc (g/m^2) 的函数。

$$\tau_c = (k / \sqrt{\lambda}) \lg(1 + wc) \quad (0 \sim 37.5 \text{ GHz}) \quad (4)$$

对于特定植被, k 是个常数。

然而, 常用的 τ_c 表达式来自于 Kirdyasher 等^[11]。冠层光学厚度可以直接从植被水含量得到

$$\tau_c = A wc \varepsilon_{sw}'' f \quad (5)$$

A 为与植被结构相关的系数, ε_{sw}'' 为植被盐含量的介电常数虚部, f 为频率(GHz)。对于某一植被, 系数是常数, 可表达为^[11]

$$\tau_c = b wc \quad (6)$$

在低频, 利用上式计算的结果与实际非常相符, 植被可以分为 3 类: 叶子为主, 茎为主和草。相应地, 参数 b 可以通过分类来确定, 和频率有简单的数学关系^[12]。 ω 对频率依赖性不大。

3 物理模型

为了更好地理解植被对被动微波辐射信号的影响, 有必要考虑多次散射, 发展物理模型, 物理模型可以被分为两类: 相干模型和非相干模型。相干模型计算电磁场的相位函数和振幅函数; 非相干模型只考虑振幅函数。植被冠层的模拟分为两种方法: 连续介质或者离散介质。考虑离散介质时, 所有的植被散射体(叶子、茎、枝等)要精确地描述其大小、形状和方位等信息。

3.1 相干模型

相干模型通常用波传播等式来计算双向散射系数, 双向散射系数通过能量守恒法则得到发射率^[13], 图 1^[3]说明相干模型处理的不同方法。介质的平均场基于近似理论计算, 主要是 Born 近似和重整对称近似。在一阶 Born 近似里, 平均场是具有常数介电常数介质中的传递场。该方法忽略散射影响, 常用来研究介质的各向异性对植被微波发射的影响。一阶重整对称近似假设平均场满足 Dyson 等式, 并且考虑散射和吸收。同样对于离散介质, 平均场等式可以基于 Foldy 近似计算。双向散射系数可以通过变形的 Born 近似由散射场的相关函数计算得到。

为求解复杂的波方程, 假设植被层不满足弱介电波动(通过 Born 和重整对称近似), 能量守恒定量计算的发射率也不完全适合层介质, 需要考虑介质里的常数热廓线。因此, 在植被微波发射模拟中, 趋势是尽可能地考虑相干相位和散射辐射的相互作用。

3.2 非相干模型

非相干模型忽略辐射之间的相位相关, 只考虑强度。非相干方法适用于植被散射体之间的位置不固定、平均距离和波长比较大的情况。图 2^[3]表示非相干模型的处理方式。第一步是得到相位矩阵 P (主要基于相干运算), 相位矩阵描述偏离前向方向的能量分配。散射系数 K_s 可以通过相位矩阵 P

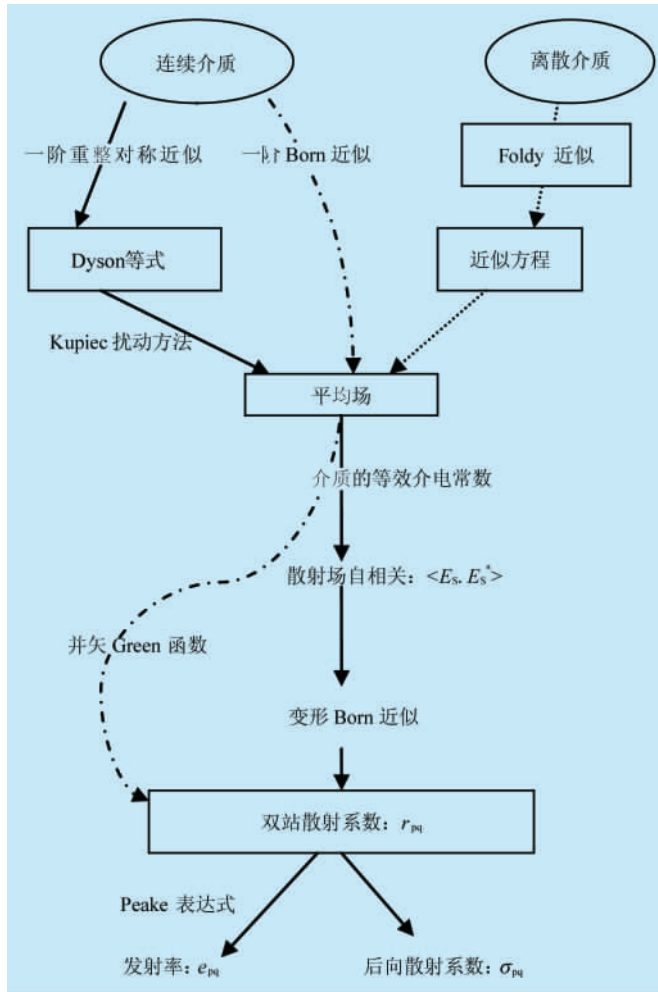


图 1 相干方法
Fig. 1 Coherent method

对散射方向的积分计算出来。

非相干辐射通常用辐射传输方程描述。这个方法可以非常有效地模拟植被散射体之间的多次散射。被动微波理论通常忽略极化影响,用数值方法求解辐射传输方程。为了考虑极化和多次散射影响,主动微波和被动微波采用一阶或二阶迭代算法。除了辐射传输方程,非相干传输可以应用双矩阵理论和 Monte-Carlo 模拟解释植被辐射。

3.3 植被层描述

植被层既可以看作是连续介质也可以看作是离散介质。看作离散介质时,所有不同的植被散射体用介电常数、大小、形状和位置来描述^[14-15]。为了获得散射特性的分析,散射体用简单的几何形状描述,主要是圆盘(如叶子)、圆柱体(如枝和树干)。这些不同的散射体被平行分配在一层或几层,散射体的散射矩阵和 Stokes 矩阵通过亥姆霍兹积分等式求解。相位矩阵和散射系数用斯托克矩阵得到,消光系数利用前向散射理论获得。将植被看作离散介质非常适合植被微波发射的敏感性分析,进而优化微波传感器观测陆地表面的配置^[16-17]。将植被看作连续介质时,散射用植被内部统计介电常数表示,

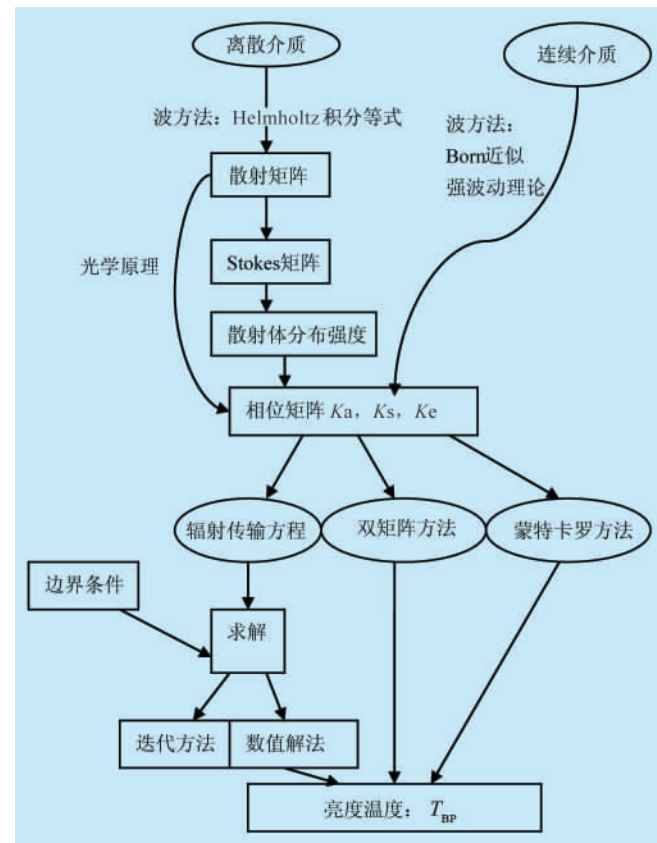


图 2 非相干方法
Fig. 2 Incoherent method

植被介电常数的自相关函数用两个相关长度 L_z 和 L_p 来描述垂直极化和水平极化平面的介电变化。基于这个理论,强波动理论用来解决空气和植被之间的强介电对比。Jin^[18]用辐射传输理论计算了强波动连续介质的相位矩阵,相对于离散介质,连续介质需要较多的参数来描述(2个相关长度,植被体积比例,植被高度)。这种方法适合模拟大尺度卫星观测的植被发射模拟和反演问题。

4 总结

由于植被特征的复杂性,利用被动微波遥感进行植被辐射研究有待进一步发展。本文对被动微波植被模拟方法进行了论述,同时给出了简单模型和物理模型的特点和分类,以及处理方法。目的在于理解微波信号,利用被动微波进行植被的定量分析,同时促进反演算法的发展。

参考文献 (References)

- [1] Shi J C, T Jackson. Microwave vegetation indexes derived from satellite microwave radiometers [J]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 2007: 1412 - 1415.
- [2] Kerr Y H, Njoku E G. A semi-empirical model for interpreting microwave emission from semiarid land surfaces as seen from space[J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1990, 28(3): 384-393.
- [3] Kerr Y H, Wigneron J P. Vegetation models and observations [C]//

- Choudhury B, Kerr Y, Njoku E, *et al.* Passive microwave remote sensing of land - atmosphere interactions. Utrecht, The Netherlands' VSP. 1995: 316-344.
- [4] Ulaby F T, El-Rayes M A. Microwave dielectric spectrum of vegetation part II: Dual-dispersion model [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1987, GE-25(4): 550-557.
- [5] Ulaby F T, Jedlicka R P. Microwave dielectric properties of plant materials [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1987, CE-22: 406-414.
- [6] Matzler C. Microwave (1-100GHz) dielectric model of leaves [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1994, 32(5): 947-949.
- [7] Brunfelt D R, Ulaby F T. Measured microwave emission and scattering in vegetation canopies [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1984, GE-22 (6): 520-524.
- [8] Matzler C, Sume A. Microwave radiometry of leaves [C]// Pampaloni P. Microwave radiometry and remote sensing applications. Utrecht, The Netherlands' VSP, 1989: 133-148.
- [9] Ulaby F T, Wilson E A. Microwave attenuation properties of vegetation canopies [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1985, 23: 746-753.
- [10] Ulaby F T, Tavakoli A, Senior T B. Microwave propagation constant for a vegetation canopy with vertical stalks [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1987, 25: 714-725.
- [11] Kirdyashev K P, Chukhlantsev A A, Shutko A M. Microwave radiation of the Earth's surface in the presence of vegetation cover [J]. *Radio Eng Electron Phy*, 1979, 24: 256-264.
- [12] Schmugge T J, Jackson T J. A dielectric model of the vegetation effects on the microwave emission from soils [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30(4) : 757-760.
- [13] Peake W H. Interaction of electromagnetic waves with some natural surfaces [J]. *IEEE Trans Antennas Propagation*, 1959, AP-7: 423-329.
- [14] 张钟军. 用离散的植被模型分析地物的微波辐射 [J]. *遥感信息*, 2003 (3): 12-14.
Zhang Zhongjun. *Remote Sensing Information*, 2003(3): 12-14.
- [15] 王芳, 张立新, 李丽英. 基于微波离散散射体模型的小麦双站散射和辐射特征研究 [J]. *遥感信息*, 2008(3): 7-14.
Wang Fang, Zhang Lixin, Li Liying. *Remote Sensing Information*, 2008, 3: 7-14.
- [16] Ulaby F T, Sarabandi K, McDonald K, *et al.* Michigan microwave canopy scattering model (MIMICS) [J]. *Int J Rem Sensing*, 1990, 12: 1223-1253.
- [17] Ferrazzoli P, Guerriero L, Paloscia S, *et al.* Modeling polarization properties of emission from soil covered with vegetation [J]. *IEEE Tans Geosci Remote Sensing*, 1992, 30: 157-165.
- [18] Jin Y Q. The radiative transfer equation for strongly -fuctuating continuous randommedia [J]. *J Quatn Spectrosc Radiat Transfer*, 1989, 42: 529-537.

(责任编辑 岳臣)



第8届全国病毒学学术研讨会

时间： 2009年9月21-24日
地点： 北京

主办单位：中国微生物学会病毒学专业委员会
协办单位：病毒基因工程国家重点实验室
传染病预防控制国家重点实验室
病原微生物生物安全国家重点实验室
承办单位：中国医学科学院病原生物学研究所

电子信箱： bdhy2009@163.com
会议网站： <http://csm.im.ac.cn/html/xuehuitongzhi/20090216/200.html>