

文章编号: 1000-0240(2009)02-0214-06

寒区植被对冻土微波辐射影响的研究

郑越^{1,2}, 张立新^{1,2}, 邢伟坡^{1,2}, 张钟军^{1,3}

(1. 北京师范大学 遥感与 GIS 研究中心, 北京 100875; 2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875;
3. 北京师范大学 信息科学与技术学院, 北京 100875)

摘要: 理论和实验表明, 微波辐射可以用来研究冻土的特性. 但当冻土的上层被植被层覆盖时, 植被吸收、发射并散射微波信号, 冻土的微波辐射特征就会被改变. 所以, 研究植被层对冻土微波辐射特征的影响, 对于准确获取下层冻土的微波辐射特性及冻土的变化监测极为重要. 介绍了一种基于光线跟踪原理和耦合矩阵算法的微波辐射模型, 用来计算植被层的发射率, 可以计算得到视场内来自不同观测角度的整体发射率, 以及 V 和 H 极化的相位差. 根据车载双极化微波辐射计在 C, X, K, Ka 等 4 个波段的实测数据与模拟结果的比较, 分别计算出来自植被层和冻土层的辐射, 从而研究寒区植被对冻土的微波辐射影响.

关键词: 寒区; 冻土; 植被; 耦合矩阵; 微波辐射

中图分类号: P407.7:P642.14 **文献标识码:** A

0 引言

冻土是一种对温度极为敏感的土体介质, 含有丰富的地下冰. 冻土层能够阻止大气层与土壤层之间的水气交换, 冻土的冻融过程、厚度和分布等都能反映出气候的变化. 冻土的研究对资源开发利用和工程与环境有着重要实际意义. 理论与实验证明, 微波辐射可以用来研究冻土的特性. 然而, 当冻土的上层被植被层覆盖时, 冻土的微波信号被植被层吸收、发射以及散射, 冻土的微波辐射特征就会被改变. 所以, 研究植被层对冻土微波辐射特征的影响, 对于准确获取下层冻土的微波辐射特性及冻土的变化监测具有重要的意义.

分析植被层对冻土层微波信号的影响主要有两种方法: 连续方法和离散方法^[1]. 其中, 离散方法可以更加真实的描述植被的微波辐射特征. 近年来, 已有许多人通过理论与实验来研究植被层对土壤层的微波辐射影响. Chauhan 等^[2]通过相干叠加的 Born 近似研究了 L 波段下玉米单散射反照率与

土壤水分的关系; Ferrazol 等^[3]通过辐射传输理论和耦合矩阵算法模拟了植被发射率与生物量的关系; Wegmuller 等^[4]通过几何光学模型在高频下(>5GHz)估算出呈水平分布的圆片的单散射反照率. 植被层对土壤层微波信号的影响程度取决于许多因素, 如, 土壤水分、地表粗糙度、植被密度、植被含水量、植被几何参数等. 同时, 微波信号还因频率、极化、观测角的不同而不同.

本文我们采用一种基于光线跟踪原理的耦合矩阵(Matrix-Doubling)模型来模拟覆盖有植被层的冻土的微波辐射. 文章首先介绍了实验概况及数据获取情况, 然后描述了植被层的被动微波辐射模型, 介绍了数值模拟以及模型模拟数据与实测数据的比较结果, 最后对整个研究的总结.

1 实验介绍

黑河流域是我国第二大内陆河, 发源于祁连山北麓中段. 此次实验区域选择在黑河流域上游, 甘肃省张掖市民乐县牛庄与南丰乡之间的农田中. 实

收稿日期: 2009-01-08; 修订日期: 2009-03-07

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2007CB714400; 2007CB714403); 中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感-地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(KZCX2-XB2-09); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060027016)资助

作者简介: 郑越(1983—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 2006 年毕业于北京林业大学, 现为北京师范大学地理学与遥感科学学院硕士研究生, 主要从事微波遥感研究. E-mail: leobon@sina.com

验区域海拔 2 700 m，属于寒区环境。实验时间为 2008 年 3 月 14 日和 16 日。14 日的实验区域为麦茬地，农田下层的土壤为冻土，上层植被是被收割过留在农田里的麦秆，麦秆高度在 8~12 cm 之间，平均直径大约 0.5 cm。16 日在油菜茬地中进行实验，冻土层上的油菜秆的高度在 20~30 cm 之间，平均秆直径约 1 cm。两种植被层都比较均匀的分布于冻土表面，植被较为干燥，含水量接近于 0。实验中，我们用一台车载的微波辐射计对地物的微波辐射特征进行连续观测。微波辐射计的观测频率为 18.7 GHz 和 36.5 GHz，都为双极化通道。实验中微波辐射计被固定于一个可以升降的液压平台上，辐射计观测高度角在 $-20^{\circ}\sim70^{\circ}$ 之间，每 5° 一个间隔。辐射计进行观测前通过天空校准和液氮校准进行定标。微波辐射计测量后获得观测地物的亮度温度数据。

在地基微波辐射计观测地表亮度温度的同时，同步测量实验区域的土壤含水量、土壤剖面温度、地表粗糙度、植被含水量、植被的几何参数以及环境温度等数据。

2 植被层被动微波辐射模型

2.1 模型介绍

为了模拟有植被层覆盖的冻土的微波辐射，我们采用了一种基于光线跟踪原理和耦合矩阵算法的微波辐射模型。该模型计算高频下植被内部，以及植被跟地表之间的多次散射，从而得到不同入射角和不同极化的地表发射率。地表之上的介质被分为 3 层：树冠层、树干层和土壤层。其中，树冠层看作由 N 个薄层组合而成，其间充满了均匀分布的代替小树枝和叶片的小散射体。用适用于电磁计算的简单几何形状代替散射体：用圆盘或针形表示叶片，而圆柱体表示枝条或是农作物的茎秆，用一个无限半空间的粗糙表面描述地表。图 1 中介绍了模型的大致组成。

假设不同种类的散射体均匀的分布于树冠层，当频率 ≤ 5 GHz 时，用瑞利金斯 (Rayleigh-Gans) 近似模拟叶片的电磁特性^[5]。在高频时，采用物理光学 (Physical Optics) 模型计算叶片的电磁辐射^[6]。用无限长近似估算有限长度的圆柱体，来计算圆柱形状的树木的树枝、树干和农作物的茎、秆^[7]。用半经验的植被介电模型模拟植被的介电常数。土壤层则被描述为均一的半无限空间，用适用于粗糙表面的几何光学近似来模拟土壤散射作用。

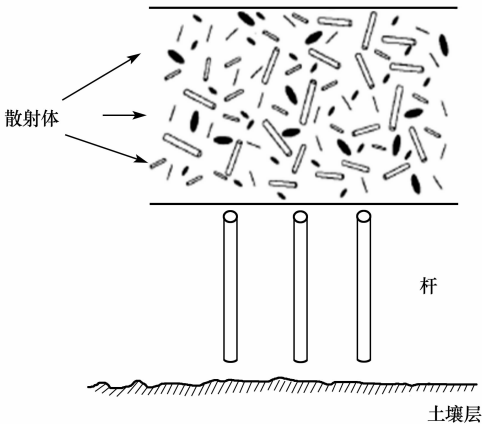


图 1 植被模型草图
Fig. 1 Model of the crop

根据实验地点的实际情况，我们修改了上面的辐射模型。去除掉模型中叶片的影响，并用圆柱体来代替实验中圆柱形状的麦秆和油菜秆。按照实验地中的植被基本垂直于地表，修改了原模型中的角度分布，只计算近似于垂直的秆的辐射。冻土的介电常数用张立新等^[8]发展的冻土介电常数模型计算。为了在高频率下更好的计算来自地表的散射，我们用改进了的积分方程 (IEM) 来模拟土壤发射率。

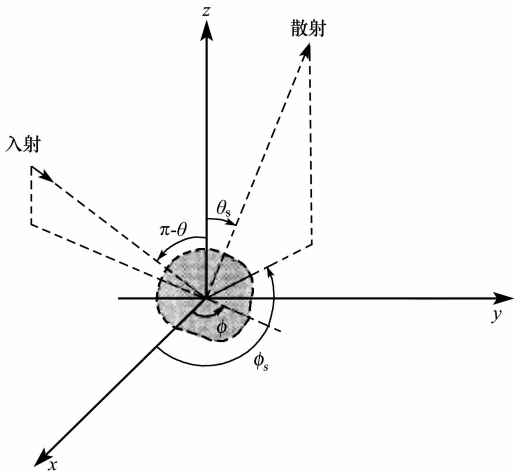


图 2 散射坐标系
Fig. 2 The coordinate of scattering

通过上面计算方法的描述，我们简单介绍一下模型的计算流程。首先根据欧拉角^[9]计算冠层的散射相位函数 α, β, γ 。其中， θ_i 和 θ_s 分别为入射和散射角； φ 和 φ_s 分别是入射和散射的方位角； p 和 q 表示不同的极化，详见图 2。随后，计算欧拉角范

围内的双站散射矩阵 $\sigma(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s) = 4\pi(f_{pq}^2(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s))$, 计算冠层散射体的衰减矩阵 $\sigma_{eq}(\theta, \varphi)$, 树干吸收矩阵 $\sigma_{uq}(\theta, \varphi)$, 以及土壤双站散射系数 $\sigma_{sq}^0(\theta, \varphi; \theta_s, \varphi_s)$. 当上述分量都通过计算得到后, 通过耦合矩阵算法计算散射体的不同贡献, 得到观测视场内的整体发射率.

2.2 输入参数

本文中, 模型用于模拟扁都口炒面庄地区的麦茬地和油菜茬地的发射率. 模型中需要输入的一些参数都来自于试验场中的实地测量. 为了便于模拟, 选取了两天中午 12:00 左右的测量数据. 主要输入参数如表 1.

表 1 试验地参数		
Table 1 Parameters result of observed fields		
观测项目	麦茬地	油菜茬地
观测时间	3 月 14 日	3 月 16 日
观测频率/ GHz	18.7/36.5	18.7/36.5
茬密度/(个·cm ⁻²)	0.005	0.0036
秆平均高度/cm	8.5	25
秆平均半径/cm	0.23	0.7
秆角度分布/(°)	0~5	0~5
秆重量含水量/%	5	4
土壤均方根高度/cm	0.8	1.05
土壤相关长度/cm	57	50
土壤重量含水量/%	5	4
环境温度/°C	8	5

3 数值模拟

3.1 模拟结果

模拟中需要考虑到频率和观测高度角的影响. 将实测数据作为输入参数输入到模型中, 模拟得到寒区冻土层上麦茬地和油菜茬地的发射率. 根据, 辐射亮度温度 (T_B) = 物理温度 (T) × 发射率 (e), 计算有植被层覆盖的冻土的辐射亮度温度.

图 3 和图 4 中分别是在 18.7 GHz 和 36.5 GHz, 不同极化(V/H)下, 模型模拟 3 月 14 日麦茬地和 3 月 16 日油菜茬地得到的整体亮度温度随观测角的变化图. V 极化下, 亮度温度随观测角的增加而升高, H 极化呈相反的趋势. 在 V 和 H 极化下的亮温变化主要由于植被层的不同结构所引起. 对于 H 极化波, 其电场矢量与垂直的柱状散射体由于正交而耦合较少, 所以散射较多, 也相当于

是说茎、秆对 V 极化波的衰减作用比较大^[10]. 从图中也可以看到, 18.5 GHz 的极化差大于 36.5 GHz 下的极化差. 与以往结果比较, 在没有叶子的影响下, 秆的衰减作用较小, 主要是散射作用.

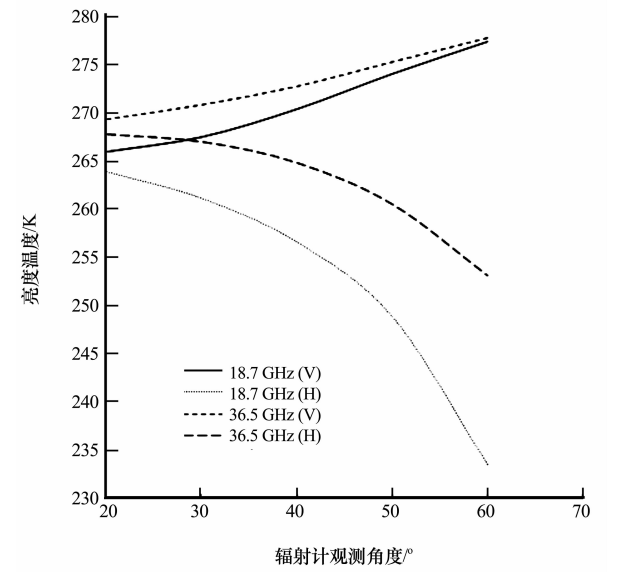


图 3 麦茬地不同频率不同极化下亮温随观测角的变化
Fig. 3 Variations of brightness temperature in wheat field with frequencies and polarization

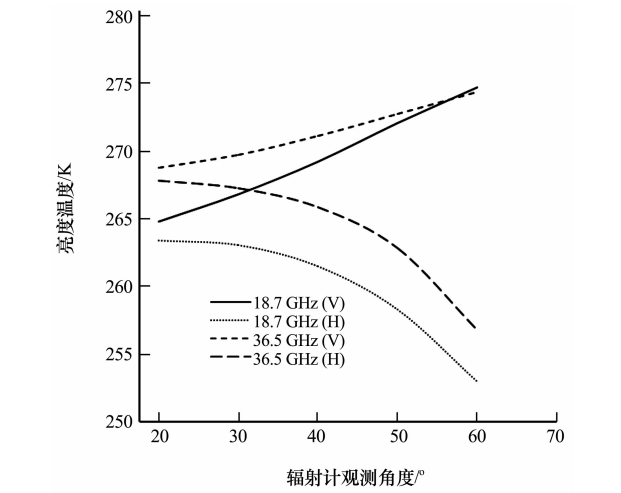


图 4 油菜茬地不同频率不同极化下亮温随观测角的变化
Fig. 4 Variations of brightness temperature in rape field with frequencies and polarization

3.2 模拟数据与实测数据的比较

在观测角 20°~70°范围内通过模型模拟得到不同频率、不同极化下覆盖有植被层的冻土的发射率, 结合实测的环境温度计算得到模拟亮度温度. 实测数据是通过地基微波辐射计测得. 辐射计在观前通过天空和液氮进行定标, 在方位角不变的情况

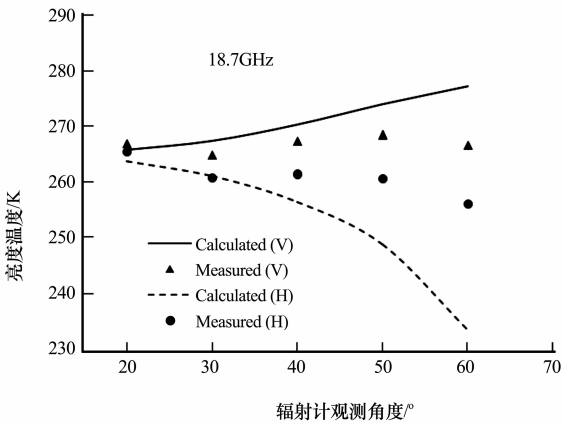


图 5 3 月 14 日麦茬地 18.7 GHz 不同极化下的亮温模拟数据与实测数据的比较

Fig. 5 Calculated and measured brightness temperatures changing with polarization in wheat field at 18.7 GHz on March 14th

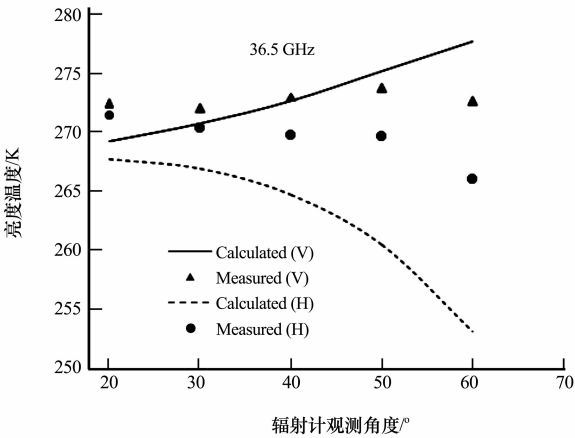


图 6 3 月 14 日麦茬地 36.5 GHz 不同极化下的亮温模拟数据与实测数据的比较

Fig. 6 Calculated and measured brightness temperatures changing with polarization in wheat field at 36.5 GHz on March 14th

下观测角度在 $-20^{\circ}\sim70^{\circ}$ 之间以每 5° 一个间隔变化,获取视场内的亮度温度值.图5~8是模拟数据与实测数据的比较结果,模拟的亮度温度与辐射计实测结果吻合较好.V极化的模拟值与实测值差距较小,绝对差值小于5 K.H极化的模拟值与实测值的绝对差值在10 K左右.模拟数据与实测数据的绝对值相差较小,但是在大角度(60°)时V和H极化下的亮温差值较大,即存在较大的极化差.产生这个问题的主要原因是,地表模型IEM在高频下(大于5 GHz)的计算问题.在观测频率较高、地表粗糙度较大的情况下,IEM的计算结果在观测角

较大时会产生较大的极化差.另外的一个原因是实际试验中,试验场地条件复杂,有些地方植被分布较密,有些地方植被分布较为稀疏,导致微波辐射计在不同方位角观测的视场不完全均一,观测结果与模型模拟结果有所不同.与实测数值比较,在H极化下模拟数值低估了亮度温度值,可能是因为H极化波的电磁特性使其散射作用较大.

另外,地表对整体发射率的影响也比较大.地表发射率受土壤含水量、地表粗糙度以及几何光学

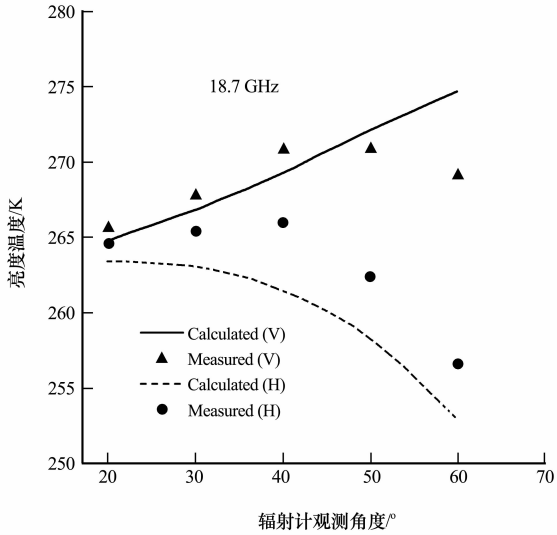


图 7 3 月 16 日油菜茬地 18.7 GHz 不同极化下的亮温模拟数据与实测数据的比较

Fig. 7 Calculated and measured brightness temperatures changing with polarization in rape field at 18.7 GHz on March 16th

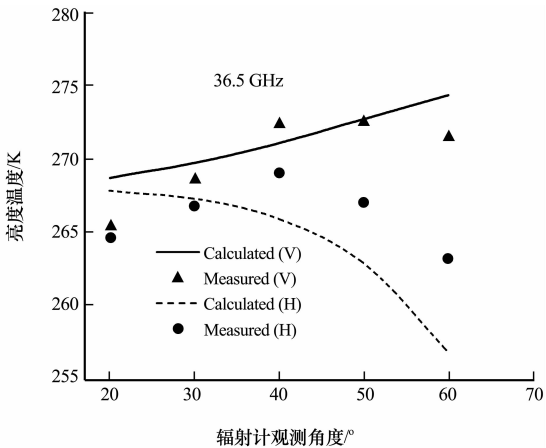


图 8 3 月 16 日油菜茬地 36.5 GHz 不同极化下的亮温模拟数据与实测数据的比较

Fig. 8 Calculated and measured brightness temperatures changing with polarization in rape field at 36.5 GHz on March 16th

的影响较大. 之前的研究表明^[11], 此次所用的地表辐射模型, 在模拟土壤发射率时也存在低估的情况.

上面的结果显示, 通过将模拟数据与实测数据进行比较, 当模拟值与实测值吻合较好时, 说明通过模型模拟可以得到真实情况下地物的亮度温度. 从而就可以通过模型计算得到单独来自植被的辐射作用, 去除植被辐射对下垫面冻土辐射的影响, 分析寒区冻土的微波辐射特征.

4 结论

本文介绍了一个基于光线传输原理和耦合矩阵算法的植被被动微波辐射模型, 该模型用于计算来自有植被覆盖地表的发射率和亮度温度. 主要结论如下:

(1) 通过在理论上对原有模型的合理修改, 可以计算得到来自观测地物的发射率, 以及各个部分的发射率, 结合当时环境温度反演地物亮度温度.

(2) 经验证, 地基微波辐射计经过定标后, 测量的数据较为准确. 但试验场地的复杂性和试验条件的不确定性对实测数据的准确性造成了一些影响. 通过比较实测数据与模拟数值可知, 实测数据与模拟数值的绝对误差在 5~10 K, V 极化下的误差较 H 极化下的小.

(3) 当实测数据与模拟数值较为接近时, 认为通过模型计算得到的地物发射率近似等于来自地物的实际发射率. 同时, 模拟的来自植被、土壤等不同分量的发射率也被认为等于实际情况下的值, 从而可以较好的将植被对下垫面冻土的影响去除.

通过研究表明, 寒区植被对冻土微波辐射的影响可以通过本文中的方法计算得到.

致谢: 感谢北京师范大学遥感中心微波小组赵少杰.

参考文献(References):

- [1] Ferrazoli P, Guerriero L. Modeling microwave emission from vegetation-covered surfaces: a parametric analysis [C]// Choudhury B, Kerr Y, Njoku VE, *et al.* Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions. Utrecht: The Netherlands: VSP, 1995: 389—402.
- [2] Chauhan N S, Le Vine D M, Lang R H. Discrete scatter model for microwave radar and radiometer response to corn: comparison of theory and data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, **32**(2): 416—426.
- [3] Ferrazoli P, Guerriero L. Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1996, **34**(2): 433.
- [4] Wegmuller U, Matzler C, Njoku E G. Canopy opacity models [C]//P Choudhury B, Kerr Y, Njoku VE, *et al.* Passive Microwave Remote Sensing of Land-Atmosphere Interactions. Utrecht: The Netherlands: VSP, 1995: 317—344.
- [5] Schiffer R, Thielheim K O. Light scattering by dielectric needles and disks [J]. Journal of Applied Physics, 1979, **50**: 2476—2483.
- [6] Levine D M, Meneghini R, Lang R H, *et al.* Scattering from arbitrarily oriented dielectric disks in the physical optics regime [J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, **73**: 1255—1262.
- [7] Karam M A, Fung A K. Electromagnetic scattering from a layer of finite length, randomly oriented, dielectric, circular cylinders over a rough interface with application to vegetation [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, **9**: 1109—1134.
- [8] Zhang L, Shi J, Zhang Z, *et al.* The estimation of dielectric constant of frozen soil-water mixture at microwave bands [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2003, **4**: 2903—2905.
- [9] Fung A K. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications [M]. Norwood, MA: Artech House, 1994: 452—454.
- [10] Ulaby F T, Moore R K, Fung A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive [M]. Dedham, MA: Artech House, 1986: 1—3.
- [11] Ferrazoli P, Guerriero L, Paloscia S, *et al.* Modeling X and Ka band emission from leafy vegetation [J]. J. Electromagn. Waves Application, 1995, **9**: 343—406.

Study of the Effects of Vegetation on Microwave
Radiation of Frozen Soil in Cold Regions

ZHENG Yue^{1, 2}, ZHANG Li-xin^{1, 2}, XING Wei-po^{1, 2}, ZHANG Zhong-jun^{1, 3}

(1. Center of Remote Sensing and GIS, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Information Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Study of frozen soil has important significance. Theory and experiment indicate that microwave radiation can be used to study frozen soil characteristics. However, the microwave radiation of frozen soil changes with vegetation coverage. Vegetation in frozen environment absorbs, emits and scatters microwave radiation. Therefore, it is important to study microwave radiation effects of vegetation on frozen soil in cold regions, and this kind of study plays an important role in obtaining frozen soil microwave radiation and monitoring its transformation. In this paper, a complex microwave model is introduced, which is based on ray-

tracing principal and Matrix-Doubling algorithm. The total emissivity may be simulated for any incidence angles. The phase difference between VV and HH channels is also computed. Vegetation emissivity is calculated by this model as well. With the comparison of simulated and measured data at C, X, K, and Ka bands by a dual-polarization channel truck-mounted microwave radiometer, radiation from vegetation and frozen soil can be calculated. Therefore, studying the microwave radiation effects of vegetation in cold regions on frozen soil can be done.

Key words: cold regions; frozen soil; vegetation; Matrix-Doubling; microwave radiation