

引用格式: Liu Ting, Zhao Shaojie, Chen Diyan, *et al.* Simulation and Ground Experiment of Microwave Radiation Characteristics on Undulating Surface[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(6): 1427-1436. [刘婷, 赵少杰, 陈迪言, 等. 起伏地表的微波辐射特征模拟与地面实验[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(6): 1427-1436.] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.6.1427

## 起伏地表的微波辐射特征模拟与地面实验

刘 婷<sup>1,3,4</sup>, 赵少杰<sup>2</sup>, 陈迪言<sup>2</sup>, 刘素红<sup>4</sup>, 柴琳娜<sup>2</sup>

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875;

3. 新疆大学绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

4. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875)

**摘要:** 地形是影响地表微波辐射特征的重要因素之一。通过开展地基微波辐射计观测人工起伏地表的实验, 结合改进的山区地表微波辐射模型, 研究地形起伏与地表异质性对地表微波辐射亮温的影响, 并根据实测数据对微波辐射模型进行了验证。结果表明: 地形遮挡效应对地表微波辐射过程的影响与模型中几何光学的假设是一致的; 模型模拟效果较好, 实测数据与模拟数据随地形的变化趋势一致, 考虑地表粗糙度后, 实测值与模拟值之间的误差更小; 地表异质性与地形起伏耦合使得 H 极化与 V 极化不同方位角观测亮温存在明显差异。这些结果为建立山区地表微波辐射亮温的地形校正模型提供了参考。

**关键词:** 被动微波遥感; 微波辐射模型; 地形效应; 遮挡效应; 地表异质性

**中图分类号:** TP79      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0323(2022)06-1427-10

### 1 引 言

被动微波遥感对土壤水分变化敏感性较强, 对植被层和云层具有一定的穿透能力, 并且时间分辨率较高, 被认为是监测土壤水分的重要手段<sup>[1-3]</sup>。在地表复杂的山区, 地形是影响像元尺度微波辐射特征的重要因素之一<sup>[4-5]</sup>。山地具有复杂的几何结构特征, 同时, 山区地形起伏造成其独特的水热特征和生态系统结构, 使得地表的土壤水分、地表温度以及地表覆被的分布呈现高度的异质性<sup>[6-8]</sup>。地形起伏与地表异质性耦合在一起会导致山区地表的微波辐射过程与平坦地表的微波辐射过程存在较大差异, 对被动微波遥感地表参数的反演有着显著影响<sup>[8-9]</sup>。在 SMOS (Soil Moisture and Ocean Salinity) 土壤水分反演算法中, 对山区的处理是采取质量控制标识的方式回避地形影响较大的区域, 且土壤

水分反演算法本身仍然是基于平坦地表假设的<sup>[10]</sup>。已有研究表明, 地形造成微波辐射 H 极化与 V 极化观测亮温误差可达十几 K, 使垂直极化亮温降低, 水平极化亮温增加, 由于地形导致的土壤水分反演误差超过 4%<sup>[11]</sup>, 因此, 研究地形因素对微波辐射的影响, 对提高被动微波遥感反演土壤水分的精度具有重要意义。

微波辐射计接收的信号主要包括地表辐射与大气辐射两个部分。山区海拔较高引起大气厚度变小, 减少了大气对地表微波辐射的衰减以及大气自身辐射的贡献; 而地表的辐射则受到坡度、坡向、遮挡效应、山体间之间辐射的多次散射的影响, 这些理论为地形效应研究奠定了基础<sup>[12]</sup>。多种模型与方法被用于山区地表微波辐射传输特征的模拟研究, 如通过回归分析和神经网络方法, 建立卫星

收稿日期: 2021-12-13; 修订日期: 2022-10-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41871228, 41801287, 42171319), 第二次青藏高原综合科学考察研究课题(2019QZKK0306)。

作者简介: 刘 婷(1998—), 女, 四川巴中人, 硕士研究生, 主要从事微波土壤水分反演研究。E-mail: lting\_liu@163.com

通讯作者: 赵少杰(1984—), 男, 河北保定人, 工程师, 主要从事微波遥感反演土壤含水量及冻土遥感研究。E-mail: shaojie.zhao@bnu.edu.cn

微波辐射观测误差与海拔以及坡度和入射角的关系,对地形效应进行模拟与校正的 STAMIRA (Simulator of Topographic Artefacts in Microwave Radiometry)方法<sup>[13]</sup>;使用高精度的高程数据 DEM (Digital Elevation Model)与高级积分方程 AIEM (Advanced Integral Equation Model)模拟地表微波辐射并对亮温进行校正的像元尺度的地形校正算法<sup>[14]</sup>;还有一些山区微波辐射模型<sup>[15-17]</sup>是通过引入地形特征量(坡度坡向的均值、方差、概率密度函数等)对已有模型进行了改进。这些研究表明,地形对微波辐射特征的影响是不容忽略的。但是不同研究的研究目标和研究方法不同,对地形效应的认识也有不同,且缺少结合地表异质性的山区地表微波辐射特征研究。

有关地形对被动微波遥感影响的研究如表 1 所示,不同研究者所使用的山区微波辐射模型不同,有的研究为了减少计算量和模型的复杂程度,对模型进行了不同程度的简化。不同研究使用的 DEM 的分辨率(10—1 000 m)也有很大差别。大部分研究没有考虑多方位角及地表异质性地表微波辐射特征的影响。虽然 Flores 等<sup>[18]</sup>的研究中考虑了地表异质性,分析得到不同方位角亮温最大差别为 8K。但其研究使用的地形场景是模拟的,并且所使用的模型中没有考虑大气以及地形的遮挡,其结论的可靠性有待进一步考察。此外,国内研究者在滦

河流域开展了土壤水分试验,设计了包含小滦河流域地形复杂区的地面土壤水分观测网络以及机载飞行观测,其观测结果表明,在不同的地表条件下,机载辐射计观测亮温与地面观测亮温差异近 80 K<sup>[20]</sup>。由此可见,研究山区地表异质性对微波辐射的影响是十分必要的。在地形对被动微波遥感影响的研究中,大部分研究是使用微波辐射模型对山区地表微波辐射特征进行模拟,缺乏真实地形实验的验证。真实的地形实验中有很多难以控制的因素,比如土壤水分、温度、质地的分布以及这些因素随时间的变化、辐射计视场位置的校准等。此前,有研究通过车载微波辐射计观测微缩人工地形的试验<sup>[21]</sup>,分析不同的地表起伏特征对微波辐射的影响,对其所用模型的精度进行了验证,结果显示,在低频波段地形模拟与观测结果的拟合精度较高。但是该研究中一直以实验开始时所测的土壤水分、温度数据作为模型的输入,没有考虑这些参数随时间的变化对模拟亮温的影响。且该研究中的辐射计视场范围并不准确,辐射计视场应为椭圆状<sup>[22]</sup>。

本研究改进了已有的山区微波辐射模型,对地形遮挡效应进行了进一步分析,并通过真实地形实验,对模型的方法进行了验证。同时,开展地形遮挡效应验证实验与地表土壤水分的空间异质性地表微波辐射特征的影响实验,进一步分析了地形对地表微波辐射特征的影响。

表 1 山区微波辐射模拟和辐射特征相关研究对比

Table 1 Comparison of microwave radiation simulation and radiation characteristics in mountain areas

相关研究	研究区域	分辨率	多方位角	多入射角	地形遮挡	大气	异质性
Mätzler 等 <sup>[12]</sup> (2000)	挪威	1 000 m	—	—	+	+	—
Flores 等 <sup>[18]</sup> (2009)	无指定研究区	10 m	+	+	—	—	+
Pierdicca 等 <sup>[19]</sup> (2010)	意大利北部	250 m	—	+	+	+	—
Utku 等 <sup>[17]</sup> (2011)	美国亚利桑那州	30 m	—	+	—	—	—
Guo 等 <sup>[14]</sup> (2011)	青藏高原东南部	90 m	—	—	+	—	—
李欣欣等 <sup>[11]</sup> (2012)	青藏高原	1 000 m	—	—	+	+	—
Camps 等 <sup>[16]</sup> (2016)	无指定研究区	450 m	—	+	—	—	—

注:— 表示研究中没有考虑该因素;+ 表示研究中考虑了该因素

## 2 车载微波辐射计观测实验

山区地表的微波辐射传输过程与平坦地表存在很大差异。其一,地表起伏使得辐射计对地表的实际观测角度(本地入射角)发生了变化,极化平面也发生旋转;其二,地形影响地表植被、温度、土壤水分的空间分布,使山区地表呈现高度的空间异质性,不同坡面的温度水分状况随地形发生变化,

阳面往往温度较高,水分较少,植被覆盖较差,而阴面则相反;其三,地表的高低起伏造成某些坡面或平坦地表被周围山体遮挡(遮挡效应),不同方位角实际观测到的地表有所不同。考虑大气及宇宙背景微波辐射的影响,星载微波辐射计实际观测到的某一起伏地表区的微波辐射包括地表各面元自身的微波辐射经过大气衰减被辐射计观测到的部分;地表各面元对周围辐射的散射经过大气衰减被辐

射计观测到的部分,其中,周围辐射包括大气的下行辐射以及面元周围山体的辐射;大气自身的上行辐射。在本文模型中,主要研究山体坡度、坡向,地表异质性等因素对微波辐射的影响,暂不考虑大气辐射与山体间的多次散射等因素。

模型首先使用地表面元的坡度坡向信息计算每个面元的本地入射角与极化旋转角,并通过介电常数模型计算土壤介电常数,再由菲涅尔公式计算出辐射计观测方向上的地表反射率,由地表反射率与地表温度可计算每个地表面元的辐射亮温;然后通过地面高程数据,计算不同方位角观测时地表面元的遮挡情况;最后根据亮温聚合方法,将辐射计能够观测到的面元的亮温进行聚合计算像元亮温。

## 2.1 像元亮温的计算

一个像元内包含很多面元,天线观测到的能量是天线视场内所有面元贡献的能量的和。假设天线的半功率波束宽度所对应的波束的波束效率为1,也就是辐射计接收的所有能量均来自半功率波束宽度的波束,并且假设在半功率波束宽度内的各个方向的方向性均相同为1。则辐射计观测地表的亮温可以表示为<sup>[13]</sup>:

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^N T_{Bi} D\Omega_i}{\sum_{i=1}^N D\Omega_i} \quad (1)$$

其中: $\Omega_i$ 为每个面元对天线所张的立体角,可以表示为:

$$\Omega_i = \frac{A \cos \theta_{li}}{R^2 \cos \theta_{ei}} \quad (2)$$

综合上面两式像元亮温可表示为:

$$T_A = \frac{\sum_{i=1}^N T_{Bi} \frac{\cos \theta_{li}}{\cos \theta_{ei}}}{\sum_{i=1}^N \frac{\cos \theta_{li}}{\cos \theta_{ei}}} \quad (3)$$

其中: $\theta_{li}$ 与 $\theta_{ei}$ 为第*i*个DEM面元的本地入射角与坡度; $R$ 为辐射计到地面的距离; $A$ 为每个面元对应的水平上的投影面积; $T_{Bi}$ 为第*i*个面元的微波辐射亮温。

## 2.2 山区地表面元微波辐射计算

微波辐射计所观测到的地表亮度温度( $T_b$ )与地表物理温度( $T_{st}$ )成正比<sup>[23]</sup>,并随地表发射率( $1 - \Gamma_p(\theta)$ )变化,亮温可以表示为:

$$T_{bp} = (1 - \Gamma_p(\theta)) * T_{st} \quad (4)$$

其中: $\theta$ 为辐射计观测角; $\Gamma(\theta)$ 表示面元的反射率; $p$

表示极化方式。

山区地表的坡度、坡向改变了微波辐射计实际的观测角度,而坡面面元的实际观测角为辐射计观测方向与面元法向量的夹角,用本地入射角 $\theta_l$ 表示<sup>[17]</sup>:

$$\cos \theta_l = \sin \theta_R \sin \theta_e \cos \varphi_e + \cos \theta_R \cos \theta_e \quad (5)$$

其中: $\theta_R$ 为辐射计在观测方向的全局入射角; $\theta_e$ 为面元的坡度角; $\varphi_e$ 为面元的坡向角。以正北方向为全局坐标系的 $0^\circ$ 方位。上式是在全局方位角为 $0^\circ$ 的情况下定义的,当全局方位角 $\varphi_R$ 不为 $0$ 时,则本地入射角表示为:

$$\cos \theta_l = \sin \theta_R \sin \theta_e \cos(\varphi_R - \varphi_e) + \cos \theta_R \cos \theta_e \quad (6)$$

同时,由于坡面面元相对于水平面的变化导致辐射计观测主平面的变化,定义 $\chi$ 为极化旋转角,则:

$$\sin \chi = \frac{\sin \varphi_e \sin \theta_e}{\sin \theta_l} \quad (7)$$

引入全局方位角后,公式(7)表示为:

$$\sin \chi = \frac{|\sin(\varphi_R - \varphi_e)| \sin \theta_e}{\sin \theta_l} \quad (8)$$

根据本地入射角,可以使用菲涅尔公式算面元在本地坐标系下辐射计观测方向上的反射率:

$$\Gamma_h(\theta_l) = \left| \frac{\cos \theta_l - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_l}}{\cos \theta_l + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_l}} \right|^2 \quad (9)$$

$$\Gamma_v(\theta_l) = \left| \frac{\varepsilon \cos \theta_l - \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_l}}{\varepsilon \cos \theta_l + \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta_l}} \right|^2 \quad (10)$$

其中: $\Gamma_h(\theta_l)$ 是水平极化的反射率; $\Gamma_v(\theta_l)$ 是垂直极化的反射率; $\varepsilon$ 为土壤介电常数;由土壤介电常数模型计算,本文中采用Dobson模型<sup>[24]</sup>。同时,确定了极化旋转角后可以将该反射率转换到全局坐标系中的观测角下的反射率<sup>[12]</sup>,公式为:

$$\Gamma_h(\theta) = \Gamma_v(\theta_l) \sin^2 \chi + \Gamma_h(\theta_l) \cos^2 \chi \quad (11)$$

$$\Gamma_v(\theta) = \Gamma_v(\theta_l) \cos^2 \chi + \Gamma_h(\theta_l) \sin^2 \chi \quad (12)$$

## 2.3 山区地表微波辐射的遮挡效应

微波遥感中所使用波段的波长远小于地表起伏的尺度,像元尺度内,某些面元因为背对辐射计观测方向,或被周围的高大山体所遮挡,导致其地表辐射不能被辐射计观测到。因此,计算像元亮温时,需要判断像元内的面元是否被遮挡。辐射计观测方向确定后,首先对像元内的面元根据其坡度坡向判断是否有可能被辐射计观测到,然后在有可能被观测到的面元中,再进一步筛选出那些被高大山体遮挡的面元。



从图1(a)中可以看出,可根据观测方向与面元法线方向的夹角即本地入射角 $\theta_l$ 来判断面元是否被遮挡。 $\theta_l < 90^\circ$ 时,面元可以被观测到; $\theta_l \geq 90^\circ$ 时,面元不能被观测到,即 $\cos \theta_l \leq 1$ 时,面元被遮挡。通过本地入射角可以根据面元自身的坡度坡向初步判断面元是否能够被观测到。

但一些 $\theta_l < 90^\circ$ 的面元在观测方向上还可能受到周围山体的阻挡,因此需要周围其它面元参与计算。首先,计算研究区内面元的最大高程差 $H_\Delta$ ,根据最大高程差计算最大可能的遮蔽距离( $D_{max}$ ) (图1(b))。

$$D_{max} = H_\Delta \cdot \tan \theta_l \quad (13)$$

在对像元内面元逐个进行判断是否被遮挡的过程中,需要计算在观测方向上,该面元是否被该方向距离 $D_{max}$ 范围内的地形遮挡,距离面元超过

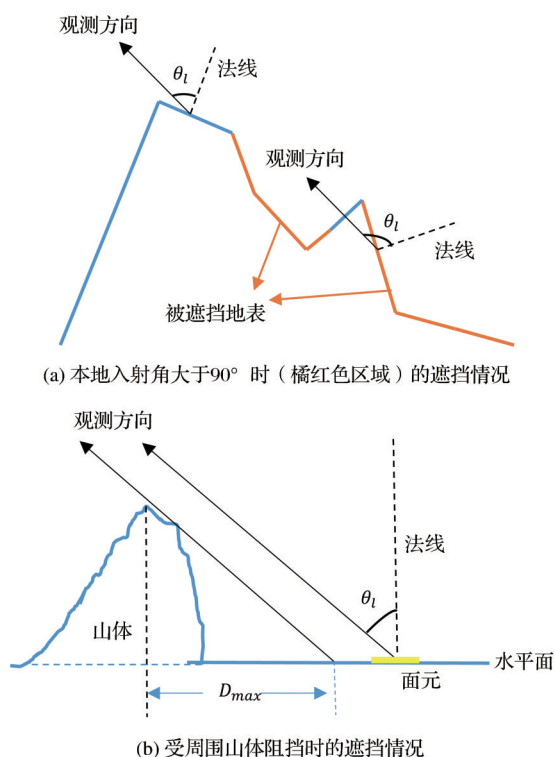


图1 遮挡效应示意图

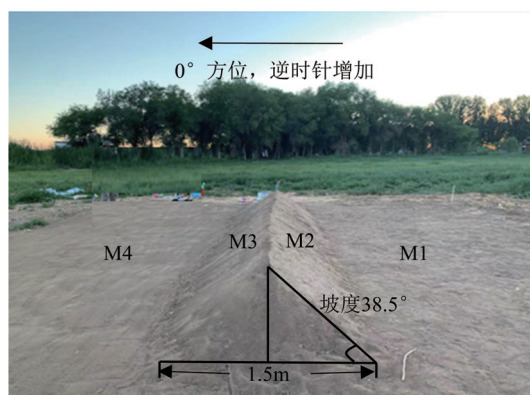
Fig.1 Diagram of occlusion effect

$D_{max}$  的地形则不需要参与计算。

不同方位角观测时,面元的遮挡情况不同。在不同观测方位,某一面元可能被辐射计观测方向上的其他面元遮挡,需要通过所有参与遮挡的面元计算该面元是否被遮挡。随观测方位角的变化,参与遮挡的面元的数量及位置发生变化,在垂直于辐射计观测方向上,若某行或某列存在两个参与遮挡的面元,则取两个面元的平均高程参与计算。

### 3 车载微波辐射计观测实验

实验地点位于阿勒泰地区气象局( $47^\circ 45' 01''$  N,  $88^\circ 04' 54''$  E)。实验区域平坦开阔,附近无高大建筑,周围树木距离实验场地超过50 m,对实验产生的影响可以忽略。观测场地如图2(a)所示,大小为 $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ ,场地内土壤中的草根、碎石等物均被筛除,对场地外围1 m范围内地表植被也进行了清理,避免其影响实验观测,观测场地中,设计倒置的三棱柱状地形,坡度为 $38.5^\circ$ 。根据观测场地平坦地表与起伏地表的空间分布,将实验场地划分为4个区域M1—M4,场地内地表土壤均经过粗筛,平铺,压实处理。实验场地内土壤质地均一,土壤沙粒含



(a) 实验场地



(b) 车载微波辐射计

图2 观测场地示意图

Fig.2 Schematic diagram of observation site

量为35.86%,土壤粘粒含量为7.65%,土壤容重为 $1.10\text{ g/cm}^3$ 。地表土壤水分使用ML3 ThetaProbe便携式土壤水分测量仪测量,4个区域地表温度由铂电阻温度传感器实时监测。

车载多频率微波辐射计TMMR(Truck-mounted Multi-frequency Microwave Radiometer)观测地表微波辐射具有较高精度与稳定性,已多次运用于地表微波辐射特征研究及地表微波辐射特征模型

的验证<sup>[22]</sup>。实验前,通过天空对辐射计进行了绝对定标。车载微波辐射计与实验场地如图2所示,实验中通过调整卡车位置与辐射计的高度观测人工山体。辐射计的视场范围为半功率波束宽度的覆盖区域,TMMR有C(6.925 GHz)、X(10.65 GHz)、K<sub>a</sub>(18.7 GHz)、K<sub>a</sub>(36.5 GHz)4个观测波段,辐射计观测视场大小与观测波段、辐射计观测高度、观测角度、辐射计距观测场地的水平距离有关。

### 3.1 遮挡效应验证

实验通过改变被遮挡地表的地表发射率验证遮挡效应,铝箔材料发射率与土壤发射率相差大,可用于实验验证。将铝箔覆盖实验场地内M3,通过对比铝箔覆盖前后C、X、K<sub>a</sub>、K<sub>a</sub>4个波段观测亮温的变化,验证被遮挡的地形区域微波辐射是否能够被辐射计观测到。辐射计观测方位角为0°、入射角为55°时,根据公式(5)可计算出M3面 $\cos \theta_i > 0$ ,此时,按照模型假设山区地表微波辐射被遮挡时遵循几何光学的原理,M3不能被辐射计观测。因此,观测铝箔覆盖M3面前、后的观测亮温,若亮温无明显变化,则模型假设成立。同理,可通过移动铝箔在M1的位置来观察最大遮蔽距离。实验方法是在辐射计观测方位角为180°、入射角为55°时,将宽度为10 cm的铝箔从M1区域山体底部向远离辐射计的方向移动,移动步长10 cm,观察观测亮温随移动距离的变化。当铝箔位于山体遮挡住的M1中的区域时,如果亮温没有明显的变化,则说明该区域的微波辐射被山体遮挡,对辐射计的观测没有贡献;随着铝箔向远离辐射计的方向运动,当铝箔覆盖能够被辐射计观测到的地面时,亮温将下降,表明铝箔由被遮挡区域移动到观测区域。

### 3.2 平坦地表亮温观测

观测平坦地表微波辐射特征及入射角对平坦地表微波辐射特征的影响,辐射计观测方位为90°,使用辐射计观测不同入射角时M1地表微波辐射亮温。因实验场地大小受限,只能观测入射角为45°—60°之间的数据,观测步长为2°。

### 3.3 起伏地表亮温观测

改变辐射计观测高度,移动观测视场,观察地形起伏对微波辐射特征的影响。逐渐降低辐射计平台的高度,步长0.4 m,使观测视场由远及近移动,观测地形起伏对辐射亮温的影响。实验过程中,辐射计距观测场地的水平距离不变,辐射计视场大小与位置随观测高度变化,表2为不同观测高度时视

场内起伏地表面积与辐射计视场面积的比例。

表2 X波段不同观测高度的辐射计视场大小与起伏地表面积占比

Table 2 The ratio of radiometer field size and undulating surface area at different observation heights in X-band

辐射计观测高度/m	椭圆视场长半轴/m	椭圆视场短半轴/m	起伏地表面积/视场面积
6.32	1.26	0.71	0.51
5.92	1.20	0.68	0.35
5.52	1.13	0.64	0.18
5.12	1.07	0.61	0.00

### 3.4 不同方位角亮温观测

为进一步研究地形起伏与地表异质性对微波辐射特征的影响,模拟山体的阴坡、阳坡,增加坡向为180°的起伏地表土壤水分含量,使山体不同坡向的地表土壤水分含量存在明显差异。对M3进行重复多次浇水,并测量M3区域不同位置的土壤水分含量,通过调节不同位置的浇水量使M3地表土壤水分分布较为均匀,最后测得M3区域与M2区域土壤水分含量相差约15%。微波辐射计观测前后,使用便携式土壤水分测量仪测量不同位置土壤水分,取平均值作为M3的土壤水分含量。微波辐射计的入射角设置为55°,移动辐射计位置,观察方位角分别为0°、90°、120°、180°时的地表辐射亮温。

### 3.5 地表亮温模拟

根据本文微波辐射传输模型模拟地表亮温。考虑到辐射计观测角度、观测方位、观测高度以及遮挡效应,观测视场的大小、位置也不同,可能分布在M1、M2、M3、M4中的任意一个或多个区域。将辐射计视场范围看作一个完整像元,在观测人工山体时,辐射计所观测的微波辐射同时包括起伏地表与平坦地表的辐射(图3)。

辐射计观测亮温包括视场内各区域地表贡献的能量的和,通过辐射计视场内各区域地表的面积可计算各区域地表对天线所张的立体角。实际观测时,辐射计视场内各处地面的本地入射角存在一定差异,实验中起伏地表的本地入射角约在15°—25°之间,而在此范围内亮温随角度的变化极小,同时为了简化计算,因此模拟亮温时暂不考虑视场内入射角的差异。

像元亮温的计算公式可以表示为:

$$T_A = T_{BM1} * P_{M1} + T_{BM2} * P_{M2} + T_{BM3} * P_{M3} + T_{BM4} * P_{M4} \quad (14)$$

其中: $T_B$ 为各区域地表的模拟亮温; $P$ 为每个区域地

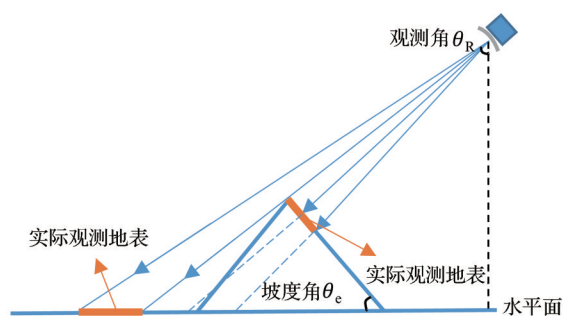


图3 辐射计实际观测地表

Fig.3 Actual surface observation by radiometer

表所张的立体角与各区域地表所张的立体角的和的比值,即各区域地表面积与辐射计视场面积的比值。 $P$ 由蒙特卡罗算法<sup>[25]</sup>计算。在本研究中可将面积求解问题抽象为二项分布问题,利用蒙特卡罗方法模拟在视场范围内随机发射 $N$ 个粒子至地面,用随机数确定发射光子的方向、落在视场范围内的位置,实际上是用到了大数定理的思想:

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x)f(x)dx \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N g(x_j) \quad (15)$$

通过统计落各区域的光子数量来估算各区域面积,则落至某个区域的概率 $P$ 就为该区域面积/视场面积。即可转化为求解参数 $P$ 的概率分布问题:

$$\Pr(X=z|P) = \binom{N}{z} P^z (1-P)^{(N-z)} \quad (16)$$

其中: $N$ 是发射的总粒子数; $z$ 是落在某个区域的光子数量; $\Pr(X=z|P)$ 是指在给定参数 $P$ 值条件下落在某个区域的光子数量为 $z$ 时的概率。

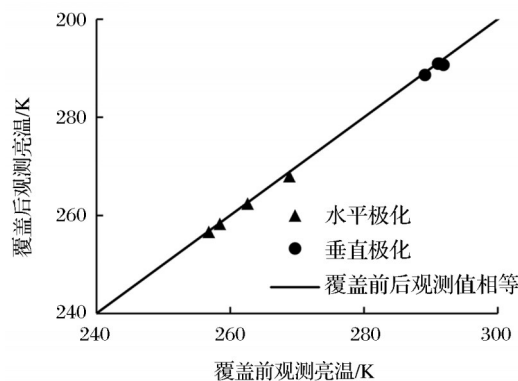
## 4 结果与分析

### 4.1 遮挡效应验证结果

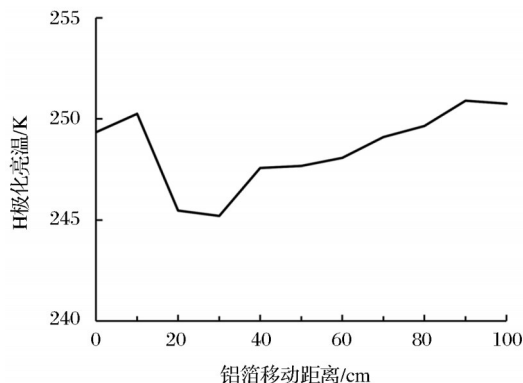
图4(a)为铝箔覆盖M3前后各波段的观测亮温,可以看出,以铝箔覆盖M3后各波段观测亮温几近相等,这说明辐射计并没有观测到铝箔所覆盖的地表,M3地表被遮挡,模型中的假设成立。辐射计观测方位角为 $180^\circ$ 、入射角为 $55^\circ$ 时,山体高0.6 m,根据模型计算的最大遮蔽距离 $D_{max}=86$  cm,其中包括山体自身在水平方向上的距离75 cm,因此M1区域内被遮挡的距离为11 cm。

图4(b)为亮温随铝箔移动距离的变化,横轴为铝箔前端距山体底部的距离。铝箔处于10—20 cm时,观测亮温明显下降,说明铝箔开始出现在辐射计视场中。20—30 cm时亮温再次微降,这是由于铝箔处于10—20 cm之间时,仍有约1 cm宽度的铝箔所被遮挡并未被观测到。随移动距离增加,铝箔

逐渐移向视场边缘直至移出视场,在此过程中铝箔对观测亮温的影响逐渐减弱,观测亮温逐渐上升。实验结果显示,模型中采用几何光学的假设来计算观测山区地表时的遮挡效应是合理的。



(a) 铝箔覆盖M3前后观测亮温比较



(b) 铝箔由被遮挡区域移向辐射计观测区域时的亮温变化

图4 遮挡效应验证结果

Fig.4 Verification results of occlusion effect

### 4.2 平坦地表微波辐射征

考虑到微波辐射计X波段的观测视场最小<sup>[17]</sup>,视场完全落在观测场地内,因此研究选择对X波段的观测数据进行分析。如图5所示,入射角为 $45^\circ$ — $60^\circ$ 之间时,H极化发射率随入射角增大而降低,V极化发射率随入射角增大而增加,实测值与模拟值随发射率的变化趋势一致。使用AIEM模型模拟粗糙地表发射率,对粗糙度参数进行优化(均方根高度1.65 cm,表面相关长度11.20 cm),与非涅尔公式模拟值相比,考虑地表粗糙度后的模拟结果与实测值之间的误差更小,并且H极化发射率增加,V极化发射率下降。

### 4.3 地形起伏对地表微波辐射的影响

图6(a)与图6(b)为随着起伏地表面积占辐射计视场面积的比例增加,X波段实测亮温与模拟亮温的变化。图中数据显示,随起伏地表面积占比增



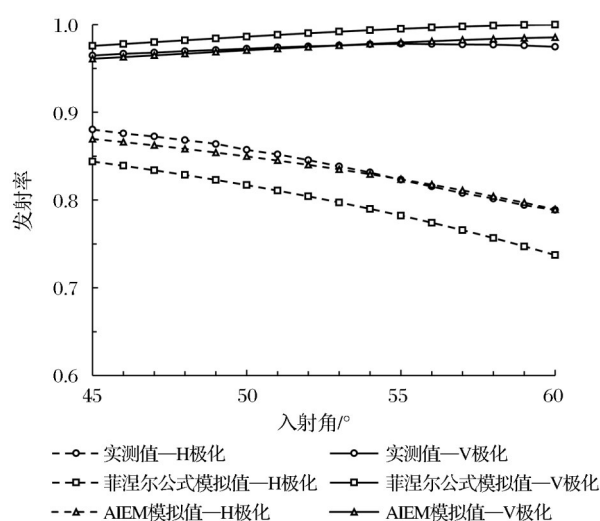


图5 平坦地表不同入射角的X波段地表发射率观测值与模拟值对比

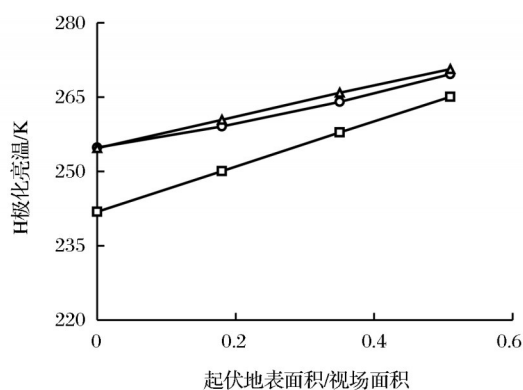
Fig.5 Comparison between observed and simulated surface emissivity values at different incident angles on flat surface

加, H极化亮温增加, V极化亮温降低, 实测亮温与模拟亮温的变化趋势一致; 相对于实测值, 菲涅尔

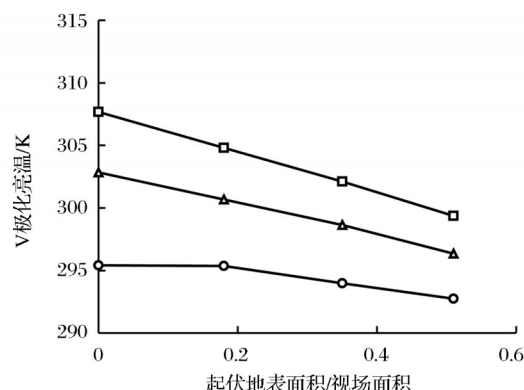
公式模拟值随起伏地表面积占比的增加变化幅度更大, 略微高估了地形起伏对地表微波辐射的影响。与非涅尔公式模拟值相比, AIEM模拟值与实测值的误差更小。同时, 从图中可以看到模拟结果与实测结果不一致的地方, 在起伏地表占视场的比例为0时, 也即视场全部为平坦地表时, V极化的模拟亮温与实测亮温差距较大。由于模型中假设整个实验场地的土壤质地为均一, 且每个区域内土壤水分、温度也均一, 但在实际的观测场地中, 土壤水分、温度以及容重等的非均一分布对实验结果也造成一些误差。另外, 辐射自身的系统误差会导致观测亮温存在微小波动, 产生误差在合理误差范围内。

#### 4.4 地形起伏与土壤水分异质性耦合对微波辐射的影响

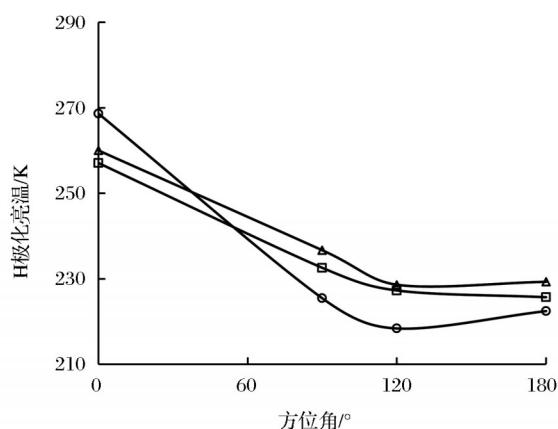
对M3面浇水后, 山体地表土壤水分与地表温度的分布存在明显的异质性, 考虑到遮挡效应, 辐射计在不同方位角所观测的地表的土壤水分、地表温度有很大的差异, 地表微波辐射特征也会不同。图6(c)与图6(d)为不同方位角的观测亮温与模拟



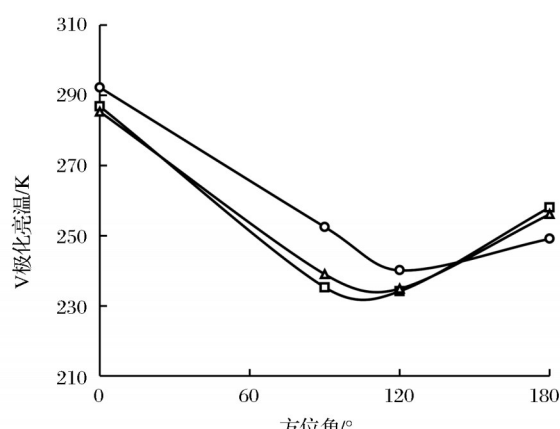
(a) 地形起伏对H极化观测亮温的影响



(b) 地形起伏对V极化观测亮温的影响



(c) H极化亮温随观测方位角的变化



(d) V极化亮温随观测方位角的变化

—○— 实测值 —□— 菲涅尔公式模拟值 —▲— AIEM模拟值

图6 地形起伏与观测方位角对微波辐射亮温的影响

Fig.6 Influence of topography and observation azimuth on brightness temperature of microwave radiation

亮温,可以看出,不同方位角观测时,H极化于V极化观测亮温有明显差异,方位角为 $0^{\circ}$ — $90^{\circ}$ 时辐射计主要观测到的是较为干燥的M2面,亮温较高;方位角为 $90^{\circ}$ — $180^{\circ}$ 时辐射计主要观测到的是较为湿润的M3面,亮温明显降低,观测时不同坡向地表土壤水分差异约15%,观测方位角变化可使观

观测亮温差异达52 K,这表明在山区微波辐射模型中考虑观测方位角的影响对微波辐射亮温的影响是非常有意义的。从图6(c)与图6(d)可以看出,不同方位角的实测亮温与模拟亮温比较吻合,也再次证明了模型的可靠性。另外,测量不同方位角的数据需移动辐射计到指定的方向与位置,在移动过程中,卡车移动距离无法做到完全准确,由此产生的辐射计位置偏差会使观测视场发生明显偏移,导致实测数据与模拟数据存在一定误差。图6(c)中AIEM模型模拟值与实测值之间的误差大于菲涅尔公式模拟值与实测值的误差,导致此结果的原因主要是观测视场发生偏移,视场内湿润地表面积占比增加,使得亮温大幅下降。

## 5 结论与讨论

研究提出了山区地表像元微波辐射模型,并通过开展车载微波辐射计观测人工微缩起伏地形的实验,对模型中计算地形遮挡效应所采用的几何光学假设以及模型的模拟效果进行了验证。对地形起伏与地表异质性地表微波辐射特征的影响展开了研究,并根据X波段实验观测数据对山区微波辐射模型进行了评估。研究结果表明:

(1)采用几何光学的假设考虑地形起伏引起的遮挡效应是可行的。地形遮挡验证实验结果显示,根据本地入射角判断遮挡情况的假设成立;地表受周围山体的遮挡情况与模型假设也基本吻合。

(2)本次实验中,随起伏地表面积占比增加,H极化观测亮温增加,V极化观测亮温下降。假设地表土壤质地、水分、温度为均一分布的情况下,模型模拟结果与观测亮温变化趋势一致。菲涅尔公式模拟结果对地形起伏的影响有所高估,AIEM拟合值更接近于实测亮温。考虑地表粗糙度对起伏地表微波辐射特征的影响是非常必要的。

(3)地表土壤水分分布不均时,地表异质性与地形起伏耦合在一起,使辐射计从不同方位观测同一块地表区域的观测亮温有明显差异,不同坡向土壤水分差异约15%时,不同方位角观测亮温的最大

差异达到52 K。在本次实验的简单场景下,相比地形起伏导致的观测亮温差异,地表异质性与地形起伏耦合在一起后不同方位角观测亮温的差异更大。

本次实验中还存在一些不足。亮温计算时,未考虑辐射计视场内各处地表的土壤质地、温度、水分空间分布的异质性对模型模拟的影响。卡车移动距离的误差不可避免地造成辐射计视场发生偏移,造成辐射计观测误差。另外,由于实验条件有限,堆建的山体较小,因此缺少起伏地表面积占视场面积的比值高于0.51的数据,也未能研究不同形状山体、不同土壤水分空间异质性分布以及不同坡度的起伏地表微波辐射特征。这些实验数据与模拟数据存在的问题,在未来通过实验进一步解决。本次实验中布置的场景较为简单,与真实的地形场景相差较大,因此,下一步将在本次研究的基础上利用模型模拟真实地形的微波辐射特征,研究地形及地表异质性耦合在一起对地表微波辐射特征与被动微波遥感土壤水分反演的影响。

**致谢:**阿勒泰气象局为本次实验提供了试验场地与基础设施,感谢阿勒泰气象局王力福对本研究的支持!

## 参考文献 (References):

- [1] Yang Xinyuan, Bai Xiaojing. Retrieval of farmland surface soil moisture based on Sentinel-1 and MODIS data: A case study in REMEDHUS Region[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2021, 36(5): 973-982. [杨欣源, 白晓静. 基于 Sentinel-1 和 MODIS 数据反演农田地表土壤水分——以 REMEDHUS 地区为例[J]. 遥感技术与应用, 2021, 36(5): 973-982.]
- [2] Karthikeyan L, Pan M, Nagesh Kumar D, *et al.* Effect of structural uncertainty in passive microwave soil moisture retrieval algorithm[J]. Sensors, 2020, 20(4): 1225-1225. DOI: 10.3390/s20041225.
- [3] Sun H, Zhou B, Zhang C, *et al.* DSCALE\_mod16: A Model for disaggregating microwave satellite soil moisture with land surface evapotranspiration products and gridded meteorological data[J]. Remote Sensing, 2020, 12(6): 980. DOI: 10.3390/rs12060980.
- [4] Yang Y, Dou Y, Liu D, *et al.* Spatial pattern and heterogeneity of soil moisture along a transect in a small catchment on the Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology (Amsterdam), 2017, 550: 466-477.
- [5] Moore I D, Burch G J, Mackenzie D H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of



- ephemeral Gullies [J]. Transactions of the ASAE, 1988, 31 (4): 1098-1107.
- [6] Li Ainong, Yin Gaofer, Jin Hua'an, *et al.* Principles and methods for the retrieval of biophysical variables in mountainous areas [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31 (1): 1-11. [李爱农, 尹高飞, 靳华安, 等. 山地地表生态参量遥感反演的理论、方法与问题 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31 (1): 1-11.]
- [7] Guo X, Fu Q, Hang Y, *et al.* Spatial variability of soil moisture in relation to land use types and topographic features on hillslopes in the black soil (Mollisols) area of Northeast China [J]. Sustainability, 2020, 12 (9): 3552. DOI: 10.3390/su12093552.
- [8] Pellarin T, Mialon A, Biron R, *et al.* Three years of L-band brightness temperature measurements in a mountainous area: Topography, vegetation and snowmelt issues [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 180: 85-98.
- [9] Zhao Tianjie. New development and future prospect of L-band soil moisture retrieval by passive microwave [J]. Progress in Geography, 2018, 37 (2): 198-213. [赵天杰. 被动微波反演土壤水分的 L 波段新发展及未来展望 [J]. 地理科学进展, 2018, 37 (2): 198-213.]
- [10] Mialon A, Coret L, Kerr Y. H, *et al.* Flagging the topographic impact on the SMOS signal [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46 (3): 689-694.]
- [11] Li Xinxin, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, *et al.* Effects of topography on microwave radiation characteristics and soil water retrieval in mountainous areas: A case study of The Tibetan Plateau [J]. Journal of Remote Sensing, 2012, 16 (4): 850-867. [李欣欣, 张立新, 蒋玲梅, 等. 山区地形效应对微波辐射特征与土壤水分反演的影响——以青藏高原地区为例 [J]. 遥感学报, 2012, 16 (4): 850-867.]
- [12] Mätzler C, Standley A. Technical note: Relief effects for passive microwave remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, 21 (12): 2403-2412.
- [13] Pulvirenti L, Pierdicca N, Marzano F S. Prediction of the error induced by topography in satellite microwave radiometric observations [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (9): 3180-3188.
- [14] Guo Y, Shi J, Du J, *et al.* Evaluation of terrain effect on microwave radiometer measurement and its correction [J]. International Journal of Remote Sensing, 2011, 32 (24): 8899-8913.
- [15] Sandells M J, Davenport I J, Gurney R J. Passive L-band microwave soil moisture retrieval error arising from topography in otherwise uniform scenes [J]. Advances in Water Resources, 2008, 31 (11): 1433-1443.
- [16] Camps A, Park H, Pablos M, *et al.* Sensitivity of GNSS-R spaceborne observations to soil moisture and vegetation [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2016, 9 (10): 4730-4742.
- [17] Utku C, Le Vine D M. A Model for prediction of the impact of topography on microwave emission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49 (1): 395-405.
- [18] Flores A N, Ivanov V Y, Entekhabi D, *et al.* Impact of hillslope-scale organization of topography, soil moisture, soil temperature, and vegetation on modeling surface microwave radiation emission [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009, 47 (8): 2557-2571.
- [19] Pierdicca N, Pulvirenti L, Bignami C. Soil moisture estimation over vegetated terrains using multitemporal remote sensing data [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114 (2): 440-448.
- [20] Zhao T, Shi J, Lü L, *et al.* Soil moisture experiment in the Luan River supporting new satellite mission opportunities [J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 240: 111680. DOI: org/10.1016/j.rse.2020.111680.
- [21] Li Xinxin, Zhang Lixin, Jiang Lingmei, *et al.* Simulation and experiment of topography effect of passive Microwave radiation [J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15 (1): 100-110. [李欣欣, 张立新, 蒋玲梅, 等. 被动微波辐射特征地形效应模拟与实验 [J]. 遥感学报, 2011, 15 (1): 100-110.]
- [22] Zhang Tao, Zhao Shaojie, Zhang Lixin, *et al.* A truck-mounted multi-frequency microwave radiometer and application of experimental data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30 (5): 1012-1020. [张涛, 赵少杰, 张立新, 等. 车载多频率微波辐射计与观测数据应用 [J]. 遥感技术与应用, 2015, 30 (5): 1012-1020.]
- [23] Kirchhoff G. On the relation between the radiating and absorbing powers of different bodies for light and heat [J]. Philosophical Magazine, 1860, 20 (130): 1-21.
- [24] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave dielectric behavior of wet soil—part II: Dielectric mixing Models [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23 (1): 35-46.
- [25] Naess A, Gaidai O. Monte Carlo methods for estimating the extreme response of dynamical systems [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2008, 134 (8): 628-636.

## Simulation and Ground Experiment of Microwave Radiation Characteristics on Undulating Surface

Liu Ting<sup>1,3,4</sup>, Zhao Shaojie<sup>2</sup>, Chen Diyan<sup>2</sup>, Liu Suhong<sup>4</sup>, Chai Linna<sup>2</sup>

(1.College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2.Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

3.State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

4.Faculty of Geographic Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Topography is one of the important factors affecting the characteristics of surface microwave radiation. Based on the experiment of observing artificial undulating surface with ground-based microwave radiometer, and the improved mountain surface microwave radiation model, the influence of terrain undulating and surface heterogeneity on the brightness temperature of surface microwave radiation was studied, and the microwave radiation model was verified according to the empirical data. The better results show that the effect of terrain occlusion on surface microwave radiation is consistent with the geometric optics hypothesis in the model. The simulation effect of this model is good, the measured data and the simulated data are consistent with the change trend of terrain, the error between the measured value and the simulated value is smaller after considering the surface roughness. The coupling of surface heterogeneity and topographic relief results in obvious difference of brightness temperature observed at different azimuth angles of H polarization and V polarization. These results provide a reference for the topographic correction model of microwave brightness temperature on mountain surface.

**Key words:** Passive microwave remote sensing; Microwave radiation model; Terrain experiment; Shielding effect; Surface heterogeneity