

基于车载微波辐射计的地面观测试验方法

李尚楠^{1,2}, 赵天杰², 施建成², 肖青², 胡路², 王平凯², 赵瑞^{1,2}, 陈德清³,
崔倩³, 薛淑琴⁴, 胡建峰⁵

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026;

2. 中国科学院遥感与数字地球研究所遥感科学国家重点实验室, 北京 100101; 3. 水利部信息中心, 北京 100053;

4. 锡林郭勒盟气象局, 内蒙古 锡林郭勒 026000; 5. 锡林郭勒盟水文勘测局多伦水文局, 内蒙古 锡林郭勒 027300)

摘要:微波遥感具有全天候全时长的优点, 并对云雾、雨雪和植被等有一定的穿透能力。地基微波辐射计以机动灵活的方式接收地表在微波波段的电磁辐射特性, 被广泛用于土壤水分、冻融过程等微波遥感定量试验中。以车载多通道双极化微波辐射计(RPG-6CH-DP)为例, 针对不同植被覆盖地表, 在内蒙古多伦地区开展了为期 3 个月的野外观测试验, 获得了 L(1.4 GHz)、C(6.925 GHz)、X(10.65 GHz)三个频率下的极化亮温观测数据。结果发现, L 波段对植被的穿透能力最强, 对土壤水分变化最敏感。微波辐射计观测地物的方位角、入射角均对观测亮温有直接影响。这为解译地物微波辐射传输过程及其相互作用机理、各种理论模型的发展和验证、地表参数反演算法的改进, 以及相关地球观测卫星计划的载荷方案论证奠定了基础。

关键词:车载微波辐射计; 土壤水分; 极化亮温; 定标; 地面观测试验; 多频率; L 波段; 植被含水量

中图分类号: P412.13

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.02.010

Ground Observation Experimental Method Based on a Vehicle-Mounted Microwave Radiometer

LI Shangnan^{1,2}, ZHAO Tianjie², SHI Jiancheng², XIAO Qing², HU Lu², WANG Pingkai²,
ZHAO Rui^{1,2}, CHEN Deqing³, CUI Qian³, XUE Shuqin⁴, HU Jianfeng⁵

(1. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, Jilin, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Information Center of Ministry of Water Resources, Beijing 100053, China;

4. Xilingol Meteorological Bureau, Xilingol 026000, Inner Mongolia, China;

5. Duolun Hydrology Bureau, Xilingol Hydrographic Survey Bureau, Xilingol 027300, Inner Mongolia, China)

Abstract: Microwave remote sensing can work at all-time and all-weather conditions, and can penetrate through cloud, fog, rain, snow and vegetation. The ground-based microwave radiometer is used to measure the electromagnetic radiation properties of the ground objects in a flexible way, and is widely used in microwave remote sensing quantitative experiments such as soil moisture and freeze-thaw process. In this paper, a vehicle-mounted multi-channel dual-polarization microwave radiometer (RPG-6CH-DP) is used as a tool in the field experiment for 3 months. The experiment is carried out to obtain the polarized brightness temperature data under three frequencies of L(1.4 GHz), C(6.925 GHz), X(10.65 GHz) of different vegetation types in Duolun of Inner Mongolia, China. The results illuminate that the L-band has a strong ability to penetrate vegetation, and is extremely sensitive to soil moisture variation. The observed microwave brightness temperature is affected by both azimuth and incidence angle

收稿日期: 2017-11-22; 修回日期: 2018-02-23

基金项目: 陆地水资源卫星系统技术项目(Y7D0070038); 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2016YFE0117300); 国家自然科学基金(41671355, 41601401); 中国科学院青年创新促进会项目(2016061)

作者简介: 李尚楠(1990—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤水分反演。

通信作者: 赵天杰(1985—), 男, 副研究员, 主要研究方向为微波遥感。

directly. The dataset can be used for understanding the microwave radiative transfer process and its interaction mechanism with ground objects, development and verification of various theoretical models, improvement of surface parameter retrieval algorithm, and implementation of the related Earth observation mission.

Keywords: vehicle-mounted microwave radiometer; soil moisture; polarization brightness temperature; calibration; ground observation experiment; multiple frequencies; L band; vegetation water content

0 引言

自遥感技术发展以来,微波遥感技术得到迅速发展。微波辐射计因受天气条件限制少,可全天候工作,对地表具有一定的穿透能力,可多频道、多极化、多角度观测目标等^[1],在大气微波遥感、海洋微波遥感、植被微波遥感和土壤微波遥感等方面有广泛的应用^[1-4]。微波辐射计根据搭载平台的不同,可分为星载微波辐射计、空基微波辐射计和地基微波辐射计。其中地基微波辐射计具有成本低和灵活机动的特点,可用于开展长时间序列和高空间分辨率的地面观测试验^[5],为微波遥感理论、反演算法开发等提供基础数据,也为星载载荷的论证提供数据支撑。

为获取研究所需地表参数,国际上利用不同型号的微波辐射计开展了诸多野外地表观测实验,其中具有代表性的研究包括:文献[6]中在美国亨茨维尔开展土壤水分观测实验,利用双波段单极化微波辐射计(SLMR)、六波段微波辐射计和单波段微波辐射计联合观测数据,改进反演算法,提高了反演精度;文献[7]中在奥克拉荷马,同样使用 SLMR 观测实验区,通过对比观测数据与星载 L 波段亮温数据,分析了像元异质性和空间尺度对土壤水分反演的影响。21 世纪针对地基微波辐射计的地面观测的研究与日俱增,其中较大型的观测实验有:文献[8]中利用 L 波段双极化地基微波辐射计(ELBARA),研究了土壤水分变化时土壤的水力性质;为改进 SMOS 模型和反演算法,文献[9]中用 L 波段双极化多角度微波辐射计(LEWIS)获取地表亮温数据;文献[10-11]中利用 L 波段全极化微波辐射计(LAURA),研究了葡萄对土壤发射率和土壤水分的影响;考虑阴影可能对地表辐射有一定影响,文献[12]中利用多通道地基微波辐射计(GBMR)开展地面观测实验,研究发现,阴影与土壤湿度呈正相关,可作为模型输入参数;为验证新添加到 $\omega\tau$ 模型中的散射项是否能很好地解释植被冠层与亮温间的关系,文献[13]中利用车载微波辐射计系统(ComRad)的观测数据对其验证,结果模型预测与数据吻

合得较好;文献[14]中利用多频率、多角度、双极化的地基微波辐射计(L-W 波段)观测致密的麦田,用以评估亮温对土壤水分和植被含水量的敏感度;文献[15]中利用 L 波段双极化地基微波辐射计(CREST-SMART),收集不同时间和不同位置的土壤数据, $\omega\tau$ 模型的评估结果显示,下午观测的土壤温度作为模型输入值最理想,12 cm 深度的土壤水分实测值可有效替代 L 波段观测值。

面对国际上地基微波辐射计的快速发展,我国也积极开展地表土壤水分野外观测研究,如:文献[16]中利用自行研制的双频段微波辐射计开展地基遥感土壤湿度试验,回归分析试验数据,得到 L、C 波段反演土壤水分湿度经验回归模型;文献[17]中利用 S 波段、双频段和多频段地基微波辐射计对试验区进行长时序观测,为遥感反演模型和算法的发展、改进及验证提供了数据支持。

从地基微波辐射计的发展和研究可见,地基微波辐射计因其本身固有的性能和结构上的优势,为开展地表土壤水分反演、反演算法改进、反演模型构建等研究工作提供了海量的数据支持,为构建区域尺度的土壤水分观测网络和为卫星提供了可靠的参数数据。本文以揭示被动微波测量的物理机制、发展和优化卫星土壤湿度反演算法、验证卫星土壤水分产品精度为目的,介绍了 RPG-6CH-DP 车载微波辐射计系统、野外地面试验方法,并简要分析了内蒙古多伦县的野外观测数据结果。

1 车载微波辐射计系统

为满足实际观测的需要,将 RPG-6CH-DP 改装至移动车载平台上,改装后的微波辐射计不仅方便保养和维护,也为野外实验的选址和观测提供了便利。本节详细介绍改装后的微波辐射计系统。

1.1 车载微波辐射计结构组成

车载微波辐射计整体结构主要分为 6 部分(见图 1),分别为微波辐射计组件、升降平台、载运移动平台、车载电脑、连接线路和供电系统。为不影

响野外恶劣环境下微波辐射计的正常观测,并能起到维护和保养辐射计的效果,采用福建奔驰凌特作为载运移动平台。经改装,车体的后部能承载固定式升降平台以及相应装置,并将微波辐射计组件固定到升降平台上方。实际观测时,可根据需要升降平台、调整高度;控制微波辐射计的计算机位于车体中部的操作室,辐射计的观测参数和观测数据均可存储其中;辐射计的额定工作电压为 220 V,实际工作中存在诸多不确定因素,导致电压不稳定,为避免电路问题给辐射计带来不必要的麻烦,在改装车内装有一个既能起到稳压,又可实现断电保护的供电系统 UPS。即便如此,因微波辐射计是精密仪器,需在车厢中增添可短时供电的发电机,为微波辐射计在野外观测提供保障。



图 1 车载微波辐射计结构示意图

Fig.1 Structure of vehicle-mounted microwave radiometer

微波辐射计组件作为试验观测的核心部分,主要包括接收器和天线两部分。接收器按功能可分为:光学接收器、正交模式转化器(OMT)、定标系统(双迪克开关和噪音入射剖面)、信号处理组件(隔离器、低噪声放大器、带通滤波器和探测器)、仪器电线部分和数据采集系统。不同于 C 波段(6.925 GHz)和 X 波段(10.65 GHz),L 波段(1.4 GHz)天线是一个固定在平板上的合成阵列天线,具有效率高、性能稳定、结构简单紧凑、质量轻、体积小等优点。而 C 波段和 X 波段天线为满足反射损耗小和结构紧凑的需要,选定抛物面天线,该天线与阵列天线相比,频带较宽且轴对称,可用于接收对称辐射波束^[18]。

1.2 车载微波辐射计的工作原理

L 波段与 C 波段和 X 波段的的天线结构上虽然

有区别,但在接收机工作原理上的设计是一致的。观测视场的微波辐射能量被光学接收器(阵列天线和抛物面天线)接收^[18],经过正交模式转换器,将信号分成垂直和水平两个极化通道,两通道信号同时进入到接收机内部;信号传送到内部的第 1 个元件迪克开关,它可阶段性地探测接收机内部黑体的亮温,连续测定辐射计的系统噪声温度;通过迪克开关将信号传送到定向耦合器,迪克开关通过调节开关校准噪声源,为辐射能量增加稳定噪声,增加该噪声信号的目的是确定系统的非线性和系统在测量过程中的增益偏移;输入信号从定向耦合器出来被过滤之前,经 40 dB 的低噪声放大器放大,再通过带通滤波器滤波,不同波段的带通滤波器中心频率有一些区别,L 波段的带通滤波器中心频率为 20 MHz,而 C 波段和 X 波段的带通滤波器的中心频率为 400 MHz;信号出来再由另一个 20 dB 的低噪声放大器增强信号,将输入信号传送到平方律检波器,对信号进行检测和集成处理;整流的直流信号进入具有内部模拟积分器的超稳定运算放大器电路,为避免连接电缆线的卡扣上有噪声,信号复用到 16 位模数(AD)转换器处理后,由数字信号控制器处理信号,将辐射能量转换为电压信号,并转换为亮温数据传送至计算机(见图 2),获得观测亮温数据。

2 车载微波辐射计的定标及准确性检验

2.1 车载微波辐射计的定标

测量误差是辐射计不精确的主要来源,为消除误差,辐射计定标是行之有效的方式。根据定标方式的不同,可将定标分为绝对定标和天空扫描定标两种方式。

2.1.1 绝对定标

理想状态下,对于绝对定标而言,一个简单的两点定标足以确定系统噪声的等效温度(接收机内部的迪克开关吸收内部黑体的物理温度作为热点,外部的沸点温度的液氮作为冷点),而实际精确的噪声注入测量显示,本文假设的线性关系一般情况难以实现,两个校准目标温度间的亮温误差约为 1~2 K。该系统的非线性关系主要由总功率检测的探测二极管引起,即使是在很好的运行工作状态下(输入功率小于 -30 dBm),探测二极管也不是非常完美的线性元件。故噪声注入定标算法是在非线性影

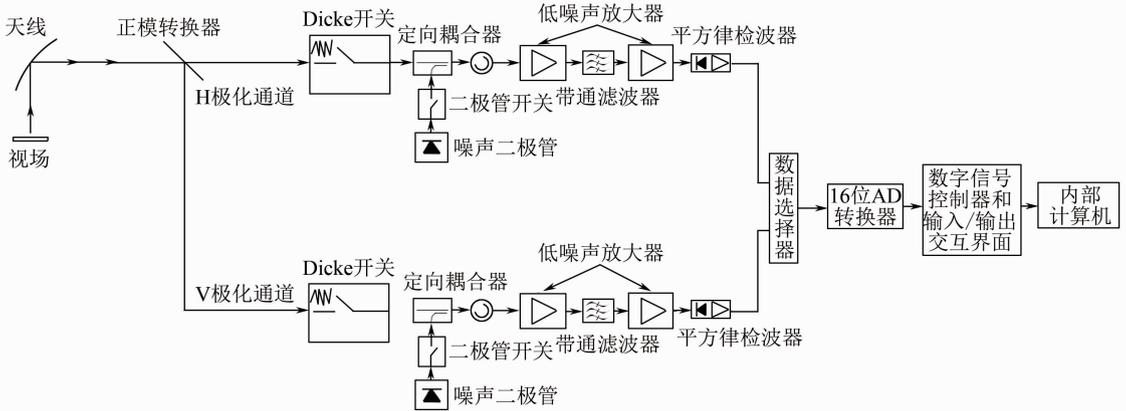


图 2 车载微波辐射计工作原理示意图

Fig.2 Working principle diagram of vehicle-mounted microwave radiometer

响被矫正的情况下实现的。对于系统的非线性模型可表示为

$$U = GP^\alpha \quad (1)$$

式中: U 为探测电压; G 为接收机的增益系数; α 为非线性因子, $0.9 \leq \alpha < 1$; P 为总辐射功率。由普朗克辐射定律公式可知, 总辐射功率与辐射亮温 T_R 有关, 比例因子融入到 G 中, 有

$$P(T_R) = \left[\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T_R}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (2)$$

式中: h 为普朗克常量; ν 为频率; k_B 为玻尔兹曼常量; T_R 为系统噪声温度 T_{sys} 和视场温度 T_{sc} 的总和。

通过温度 T_n 的附加噪声注入生成 4 个温度点, 从而可推导出含有 4 个未知量 (G, α, T_{sys} 和 T_n) 的独立方程, 即

$$\begin{cases} U_1 = G \cdot (T_c + T_{sys})\alpha \\ U_2 = G \cdot (T_c + T_{sys} + T_n)\alpha \\ U_3 = G \cdot (T_h + T_{sys})\alpha \\ U_4 = G \cdot (T_h + T_{sys} + T_n)\alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中: T_n 为注入噪声温度; T_c 为总的噪声温度; T_h 为额外的环境温度载荷相对应的噪声温度。

2.1.2 天空扫描定标

天空扫描定标通常应用于无云或没有水汽变化的均匀分层大气中, 适用于所有频率, 但不代表天空的辐射亮温等于零, 通过微波辐射计扫描天空推断, 亮温受宇宙背景辐射的影响约为 2.7 K。不同波段的天空扫描定标角度不完全相同, 其中 C 波段和 X 波段通过设置一组角度完成线性拟合定标, 而 L 波段仅需要一个角度即可完成定标。尽管方式不同,

但获取亮温的原理相同。给定高度角 α , 则路径长度等于 $1/\sin \alpha$ 乘以天顶角路径长度 (空气质量)。当考虑大气分层时, 相应的光学厚度也应该乘以该因子, 光学厚度与亮温的关系可表示为

$$\tau_\nu = \ln\left(\frac{T_{mr} - T_{B0}}{T_{mr} - T_B}\right) \cdot \frac{1}{\sin \alpha} \quad (4)$$

式中: T_{B0} 为大气背景辐射温度, 2.7 K; T_B 为频率通道亮温, 通道亮温可通过辐射计自带的温度传感器测量得到; T_{mr} 为 α 方向上大气的平均温度。假设强度为 I_ν 的辐射穿过无限稀薄气体时,

$$dI_\nu = -I_\nu k_\nu ds \quad (5)$$

式中: k_ν 为吸收系数, 包括到达辐射计过程中所有过程损失的光子的总和。在有限的气体层上的积分有

$$\begin{aligned} -\int \frac{dI_\nu}{I_\nu} &= -\int d(\ln I_\nu) = \\ \int k_\nu ds &\Rightarrow I_\nu = I_{\nu_0} \cdot \exp\left(-\int k_\nu ds\right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: I_{ν_0} 为进入到大气层前的强度。光学厚度可定义为

$$\tau_\nu = \int k_\nu ds \Rightarrow I_\nu = I_{\nu_0} \cdot \exp(-\tau_\nu) \quad (7)$$

大气的自发辐射增加了辐射强度。

大气分子在辐射场中进行旋转和振动跃迁时,

$$dI_\nu = \epsilon_\nu ds \quad (8)$$

式中: ϵ_ν 为频率为 ν 时的辐射系数。

无限稀薄气体层的强度总变化表示为

$$dI_\nu = \epsilon_\nu ds - I_\nu k_\nu ds \Rightarrow \frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = \frac{\tau_\nu}{k_\nu} - I_\nu \quad (9)$$

定义 ϵ/k 的比值为源函数 S , 则

$$\left(\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} + I_\nu\right) \cdot \exp \tau_\nu = S_\nu \exp \tau_\nu \Rightarrow \frac{d}{d\tau_\nu}(I_\nu \cdot \exp \tau_\nu) = S_\nu \exp \tau_\nu \quad (10)$$

整合有

$$I_\nu(\tau_\nu) \cdot \exp \tau_\nu - I_{\nu,0} = \int_0^{\tau_\nu} S_\nu \cdot \exp \tau'_\nu d\tau'_\nu \quad (11)$$

式中: $I_{\nu,0} = I(\tau'_\nu = 0)$,这与辐射传输方程的一般形式相同。

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_{\nu,0} \cdot \exp(-\tau_\nu) + \int_0^{\tau_\nu} S_\nu \cdot \exp[-(\tau_\nu - \tau'_\nu)] d\tau'_\nu \quad (12)$$

整理得到

$$T_{mr} = \frac{\int_0^{\tau_\nu} S_\nu \cdot \exp[-(\tau_\nu - \tau'_\nu)] d\tau'_\nu}{1 - \exp(-\tau_\nu)} \quad (13)$$

在天气晴朗时, τ_ν 与 $1/\sin \alpha$ 呈近似线性关系。通过多角度观测,拟合出一条直线(见图 3),光学厚度作为空气质量的函数,呈现为一条直线,反向延长可外推出零空气质量时自由空间的响应温度为 2.7 K,对于定标成功的典型线性相关因子阈值大于 0.999 5,离散程度小于 0.4,图 3 中线性相关因子为 0.999 962,离散程度为 0.013 477。

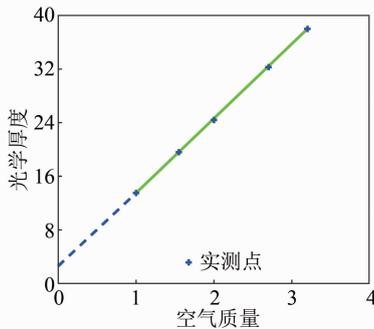


图 3 天空扫描定标图

Fig.3 Sky scanning calibration

L 波段定标仅使用一个简单的扫描点替代一组扫描角度定标。其原因在于 L 波段的波长较长,相比较其他波段大气非常透明,即使空气质量发生变化,天空辐射亮温也不会发生较大的改变。对于 L 波段扫描点的选择(见图 4),在北半球,L 波段的亮温为 6.5 K,有恒定的观测方向,指向球北极,辐射计在扫描天空时,保证指向北方,设置高度角为辐射计所在的纬度值。如果辐射计的方位角为零,与方位北不一致,则需要调整辐射计的方位角指向北方,这样即便方位角不是方位零点,

软件依然能找到天空北。C、X、L 波段的天空扫描定标,都应保证在天气晴朗状态下,定期定标辐射计。

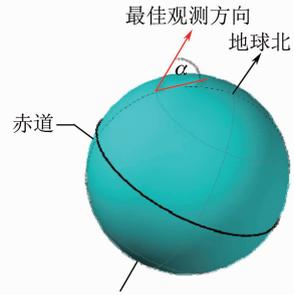


图 4 L 波段指点法示意图

Fig.4 L band pointing method

2.2 车载微波辐射计的准确性检验

微波辐射计定标是保证数据精确的前提,需验证定标结果。检验测量准确性的方法如下:设置微波辐射计所在的纬度值为观测的高度角,观测天空,检查 L、C、X 波段各通道的亮温值是否在理论值附近波动,各波段的 2 个通道的极化差应接近于零,此时说明 3 个波段定标较理想,满足对地观测的定标要求。但由于不可见的水汽非均匀分布,即使在晴朗的天空条件下,分层大气的假设也常常被人质疑(如经常观察到接近海岸线)。为进一步证明微波辐射计的准确性,可利用已知亮温的目标物检验微波辐射计,最理想的是平静的水面,因平静的水面可看成光滑的平面,可用菲涅耳公式^[18]计算水面的反射率,根据发射率与反射率之间的关系求解发射率得到微波辐射亮温。

在理论分析的基础上,中国科学院遥感与数字地球研究所天津宝坻区的潮白河堤岸,定标车载微波辐射计,并观测潮白河的水域天空,观测结果如图 5(a)所示。观测数据很平滑,可见水域周围无明显射频干扰(RFI),可开展水面观测。由水面观测数据可看出,3 个波段的 6 个通道的观测值与模拟值基本一致,但由于测量过程中诸多不确定因素的影响,如水面温度测量误差、水体盐度测量误差、水面风速等,导致各波段实测值和模拟值有偏差,如图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)所示,但误差在允许范围内,满足微波辐射计对地物辐射亮温的观测条件。

3 基于车载微波辐射计的地面观测试验为获取不同类型植被覆盖下地表的微波辐射特

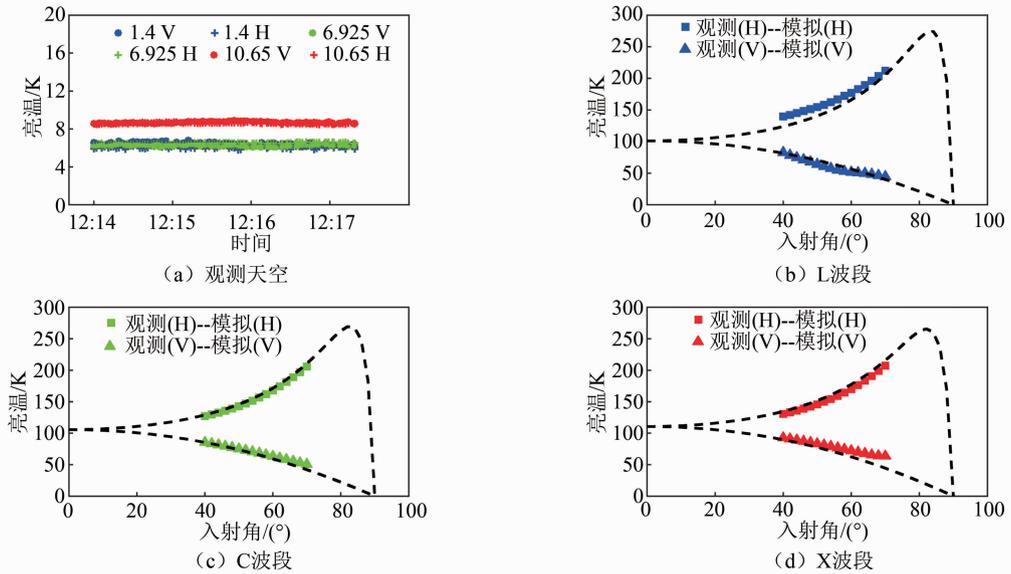


图 5 定标后扫描天空的测量值和水面微波辐射亮温的测量值与模拟值

Fig.5 Brightness temperatures of the scanning sky after calibration, and water-surface microwave radiation brightness temperatures and the simulated values

性,探究微波辐射传输模型和地表参数反演算法等问题,在内蒙古开展车载微波辐射计土壤水分地面观测试验。研究生长季不同类型植被覆盖的土壤水分的微波辐射特性,以及不同植被类型对土壤水分反演的影响,验证和改进土壤水分反演算法,为开展长期地面观测提供参考。

3.1 试验选址和场地布置

由于车载微波辐射计的频率相对较低,日常生活中的很多电磁信号可能会对其造成影响,为避免电磁信号 RFI 带来的影响,利用 SMOS 数据分析全国的 RFI 分布情况。结果发现:中国人口聚集区域受 RFI 影响较强,人口稀疏的内蒙古、新疆、青海和西藏等地区受 RFI 影响较弱;但在地理位置上,新疆、青海和西藏距离北京较远,同时海拔相对较高,开展试验难度较大。而内蒙古距离北京较近,便于运输车载辐射计,地势也较平坦开阔,另结合地形图和实地考查知,内蒙古多伦县海拔 1 150~1 800 m,人口稀疏,RFI 干扰较弱,年降水量为 380 mm 左右,是开展试验较理想的场地。故最终选定内蒙古锡林浩特多伦县前王家营子为车载微波辐射计土壤水分观测的试验场地。

为能研究不同类型植被之间的亮温和土壤水分,车载微波辐射计同时观测 3 种植被,并根

据车载微波辐射计的工作原理,推算出其实际观测视场范围。在不影响观测的前提下,埋设 TM5 土壤温湿度传感器,以保证实测区和观测区域的土质和植被生长状态一致,降低不确定因素带来的测量误差,其视场布局 and 接收辐射范围如图 6 所示。

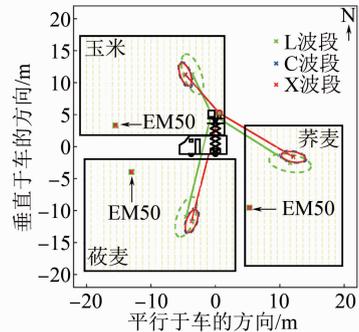


图 6 观测视场布局和微波辐射计接收辐射范围设计图

Fig.6 Observation field layout and design of microwave radiometer receiving radiation range

车载微波辐射计位于试验场中心位置,玉米(22.5 m×15.5 m)、莜麦(23.5 m×17.5 m)和荞麦(15 m×21 m)3 种农作物分别位于四周,微波辐射计可观测 3 种不同地物的亮温特征,每块试验观测样地中均埋有土壤温湿度传感器,测量不同植被在生长期的土壤温度和水分变化情况。

3.2 试验方案

试验区域正处于植被生长季节,降雨频繁,每日除微波辐射计连续观测外,土壤温湿度传感器测量、雨量筒降雨观测和蒸发皿的蒸发量观测应同步进行。其他辅助环境参数测量,包括叶面积指数、气象参数、土壤容重、土壤质地、地表粗糙度等也应该在观测期间完成。

为避免天气恶劣影响微波辐射计的正常观测,用绳索固定微波辐射计的升降平台;遇到降雨和雷暴时,及时停止观测,微波辐射计属于精密仪器,每次开关均会影响其稳定性,故进行下次观测之前,应定标微波辐射计。倘若天气不能满足定标条件,预热完成后仍可继续观测,系统会自动将上次定标成功的参数作为本次观测的参数。多角度观测时,受视场范围大小限制,调整微波辐射计高度角在视场允许范围内,同时观测时间应与温湿度传感器的采集时间一致,避免产生不必要的观测误差。

土壤温湿度传感器埋设在不影响微波辐射计观测的视场范围内,埋设深度依次为 0~5,10,20,30,50 cm,并采集土壤样品,测量土壤含水量和土壤质地,埋设好仪器后需将地表恢复平整,使用粗糙度板在采样点附近量测地表粗糙度,最大程度保证观测的准确性。

3.3 微波辐射计观测方法

天气炎热、入射角和方位角均影响微波辐射计观测,保证观测视场范围允许时,可将微波辐射计观测分为昼夜观测模式,夜间观测的入射角以 2.5°为

间隔在 30°~60°变化,方位角根据植被所处位置依次设置一个最佳角度(荞麦 100°、苜蓿 200°、玉米 340°),白天观测的方位角均以 2.5°为间隔,分别在 90°~110°,190°~210°和 330°~350°变化,入射角设置为 55°。

土壤水分实验观测是植被整个生长周期的长期动态观测,数据质量对整体的数据分析有很大影响,仪器的定标显得尤为重要,故天气条件良好以及不影响数据观测时,多频次定标微波辐射计。

4 微波辐射计测量结果

利用车载微波辐射计,对内蒙古锡林浩特市多伦县前王家营子的 3 种植物开展土壤水分观测试验,获取了时间序列的亮温和土壤水分数据,其观测结果如图 7 所示。

由图 7(a)、图 7(c)和图 7(e)可见,3 种农作物的极化亮温在观测期间,各通道亮温整体变化趋势较一致;L 波段的 V 极化与 H 极化的亮温极化差比 C 波段和 X 波段大,原因是 L 波段对植被具有较强的穿透性。图 7(e)中玉米的 3 个通道的亮温极化差比苜蓿和荞麦的大,这是由于玉米生长初期肥力不足,玉米不能正常生长,为此,在玉米样地二次补种,导致玉米生长较缓慢,此时的地物以裸露地表为主;另一方面是因为玉米的植株密度较稀疏,叶倾角较小,也促使了极化差较大。在 3 幅亮温图中,土壤水分数据有间断性缺失,这是由于观测期间频繁降雨(见表 1),迫使微波辐射计停止对植被的观测,影响了数据的采集。

表 1 2017 年观测期间的降雨、蒸发和灌溉一览表

Tab.1 Rainfall, evaporation and irrigation time during observation period in 2017

日期(MM/DD)	7/19	7/20	7/21	7/22	7/23	7/24	7/25	7/26	7/27	7/28	7/29	7/30	7/31
降雨/mm	0.5	0	19.9	3.3	3.3	2.8	12.5	4.2	0	0	0	0	0
灌溉	√	×	×	×	×	×	×	×	×	×	√	×	×
日期(MM/DD)	8/1	8/2	8/3	8/4	8/5	8/6	8/7	8/8	8/9	8/10	8/11	8/12	8/13
降雨/mm	0	1	0	1.2	0	0	0	0	1.2	0	28.2	0	0
灌溉	×	×	×	√	×	×	√	√	×	√	×	×	×
日期(MM/DD)	8/14	8/15	8/16	8/17	8/18	8/19	8/20	8/21	8/22	8/23	8/24	8/25	8/26
降雨/mm	0	0	0	0	0.4	0	0	0	27.7	0	0	0	0
灌溉	×	×	√	√	√	×	×	×	×	×	×	×	×

从图 7(b)、图 7(d)和图 7(f)可见,土壤含水量在观测期间曾出现跳跃式变化,这是因为观测期间出现了降雨(见表 1),土壤含水量发生明显变化。但图 7(d)的土壤水分在某几日没有发生跳跃式变

化,而图 7(b)和图 7(f)却发生了跳跃式变化,这是因为这几日没有对荞麦实施人工灌溉(见表 1),土壤水分发生显著变化。

对比每种作物的亮温图和土壤水分图可发现,

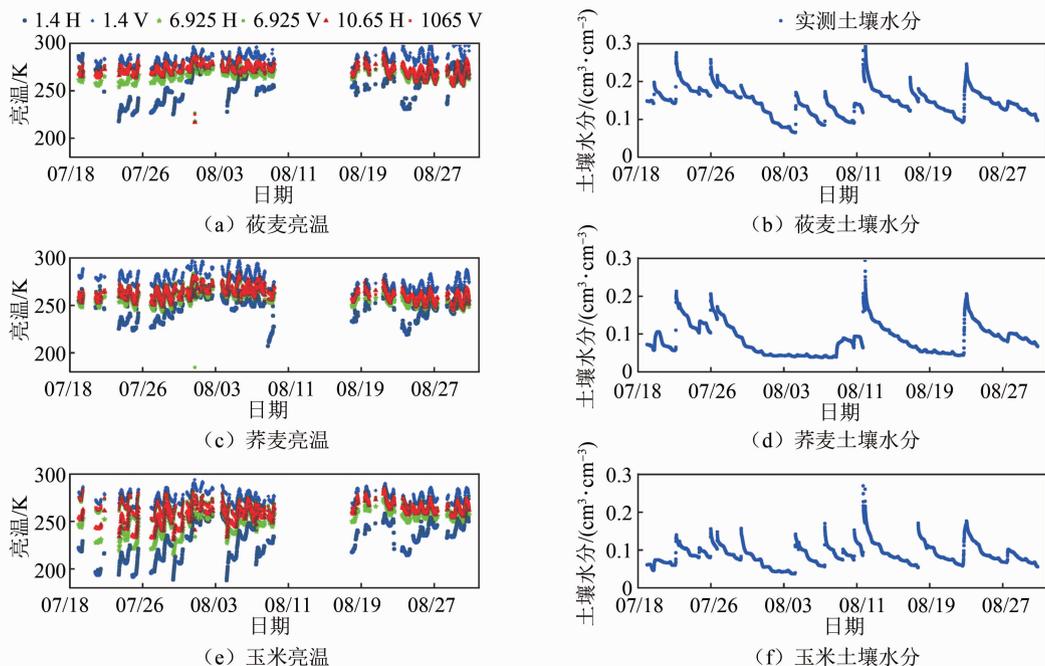


图 7 3 种农作物不同波段的时间序列微波极化辐射亮温和土壤水分

Fig.7 Time series of microwave polarization radiation brightness temperature and soil moisture of three kinds of crops in different bands

土壤水分的变化与亮温的变化总体呈反比趋势,尽管 L 波段、C 波段和 X 波段均呈现这样的趋势,但 L 波段亮温对土壤水分变化最为敏感,这也说明 L 波

段对植被的穿透性最强,较强地感知土壤水分变化。由图 8(a)、图 8(c)和图 8(e)可见,随方位角的增大,苜蓿的 L 波段的 H 极化亮温逐渐降低,荞麦

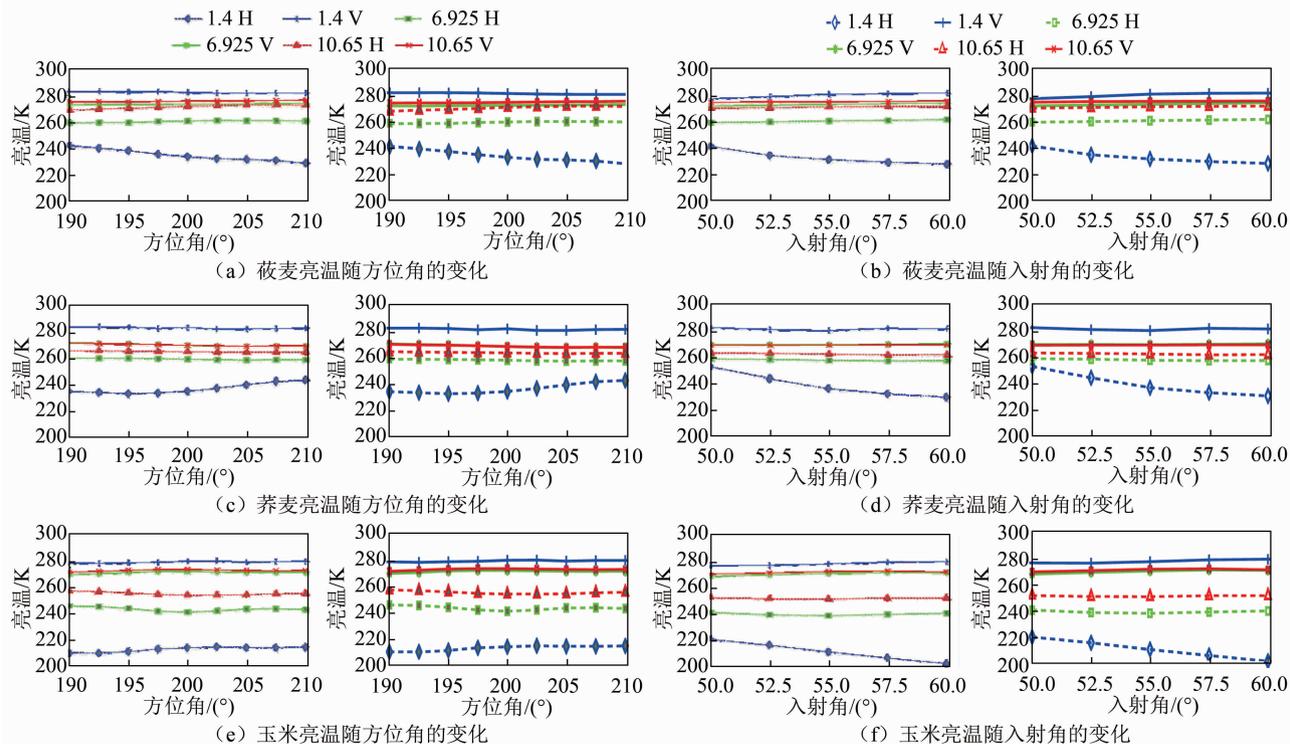


图 8 不同波段极化辐射亮温随入射角和高度角的变化情况

Fig.8 Variation of polarization radiation brightness temperature with incident angle and elevation angle in different bands

和玉米的则逐渐升高,这是由于 3 种农作物垄的耕种方向均为南北走向。车载微波辐射计以不同方位角观测 3 种作物时,微波辐射计的观测方向与荞麦和玉米的垄间夹角越来越小,而与苜蓿的垄间夹角越来越大。说明观测方向与垄间的夹角越小,被探测到的裸露地表越多,而地表的温度高于植被表面温度,故 L 波段 H 极化亮温越大。

由图 8(b)、图 8(d)和图 8(f)可见,随入射角的增大,3 种农作物的 L 波段 H 极化亮温均呈降低趋势,而在其他波段极化亮温表现并不明显,主要原因是电磁波在媒质中传播时,不可避免地发生能量损失,而 L 波段 H 极化越来越低,说明入射角度增加,传输路径变长,地表辐射能量衰减越来越多,辐射计接收的地表微波辐射亮温减少。

5 结束语

车载微波辐射计因其在性能和结构上特有的优势,近年来被广泛应用于地表土壤、积雪和植被等地物的微波辐射观测,为科研人员提供了大量的地物微波辐射观测数据。通过介绍车载微波辐射计结构和工作原理发现:车载微波辐射计的定标及准确性检验对测量精度有重要影响,实际观测时需根据理论推导和实际求解,保证观测精度能满足地面观测试验的要求。通过多伦野外地基微波辐射计观测试验,获取了多种微波辐射观测数据,为不同类型的微波辐射模型和各项参数的反演及验证提供了大量的数据支持,为 WCOM 卫星传感器的载荷方案提供有效的数据支撑,同时也为了解微波辐射机制和原理提供了有效途径。

车载微波辐射计为野外试验提供了诸多方便,但也存在诸多不足,如在观测选址时,受 RFI 和交通等因素限制,只能在特定区域开展工作,而无法保证特定区域的地表类型全部满足多样性;另外,车载微波辐射计观测时受天气环境影响较明显,保护措施不够完善,需进一步改进。未来车载微波辐射计将会全面提高,为微波遥感数据的获取提供更加便利的平台。

参考文献

[1] 王晓海,李浩. 国外星载微波辐射计应用现状及未来发展趋势[J]. 中国航天, 2005(4): 16-20.
[2] 陆登柏,邱家稳,蒋炳军. 星载微波辐射计的应用与发展[J]. 真空与低温, 2009, 15(2): 70-75.

[3] 郑兴明. 东北地区土壤湿度被动微波遥感高精度反演方法研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2012.
[4] 张升伟,姜景山,王振占,等. 神舟 4 号飞船多频段微波辐射计及其应用[J]. 遥感技术与应用, 2005, 2(1): 68-73.
[5] 刘红燕,王迎春,王京丽,等. 由地基微波辐射计测量得到的北京地区水汽特性的初步分析[J]. 大气科学, 2009, 33(2): 388-396.
[6] LAYMONC A. Huntsville' 96: an experiment in ground-based microwave remote sensing of soil moisture[J]. International Journal of Remote Sensing, 1999, 20(4): 823-828.
[7] O'NEILL P E, HSU A Y, JACKSON T J. Comparison between SLMR and ESTAR soil moisture retrieval in SGP97[C]//1999 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Hamburg, Germany, 1999, 4: 1908-1910.
[8] MATZLER C, WEBER D, WUTHRICH M, et al. ELBARA, the ETH L-band radiometer for soil-moisture research[C]// 2003 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 2003, 5: 3058-3060.
[9] LEMAITRE F, POUSSIÈRE J C, KERR Y H, et al. Design and test of the ground-based L-band Radiometer for Estimating Water In Soils (LEWIS)[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2004, 42(8): 1666-1676.
[10] VILLARINO R, FERNANDEZ J, CAMPS A, et al. Design and test of the L-band automatic radiometer (LAURA) temperature control[C]// 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Korea (South), 2005: 4902-4905.
[11] VALL-LLOSSERA M, CAMPS A, CORBELLA I, et al. SMOS REFLEX 2003: L-band emissivity characterization of vineyards[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2005, 43(5): 973-982.
[12] KURIAD N, KOIKE T, LU H, et al. Field-supported verification and improvement of a passive microwave surface emission model for rough, bare, and wet soil surfaces by incorporating shadowing effects [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(5): 1207-1216.
[13] KURUM M, LANG R H, O'NEILL P E, et al. A first-order radiative transfer model for microwave radiometry of forest canopies at L-band [J]. IEEE

- Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2011, 49(9): 3167-3179.
- [14] CALVET J C, WIGNERON J P, WALKER J, et al. Sensitivity of passive microwave observations to soil moisture and vegetation water content: L-band to W-band[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2016, 49(4): 1190-1199.
- [15] TEMIMI M, LAKHANKAR T, ZHAN X, et al. Soil moisture retrieval using ground-based L-band passive microwave observations in northeastern USA [J]. Vadose Zone Journal, 2014, 13(3): 349-368.
- [16] 宋冬生, 赵凯. 利用地基双频段微波辐射计测量土壤湿度[J]. 吉林农业大学学报, 2007, 29(1): 70-73.
- [17] LI X, LI X, LI Z, et al. Watershed allied telemetry experimental research[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2009, 14(D22): 2191-2196.
- [18] ULABYF T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave remote sensing: active and passive I: microwave remote sensing fundamentals and radiometry [M]. USA: Artech House, 1981.