

FM-CW 制式陆基微波散射计与 IEM 模型 联合反演地表土壤湿度研究

王丽巍¹, 吴季¹, 张玮², A K Fung³, 孙波¹, 朱素云¹, 吴连喜², 刘浩¹, 黄永辉¹, 任建华¹

(1. 中科院空间中心, 北京 8701 信箱, 北京 100080; 2. 中国农业大学遥感中心, 北京 100094; 3. 美国德克萨斯州立大学阿灵顿分校)

摘要: 本文利用 FM-CW 制式的陆基微波散射计对裸土进行了后向散射系数的测量, 利用 IEM 模型对土壤的湿度及表面粗糙度进行了反演, 并将反演结果与实地测量结果进行了比较研究。研究表明, 通过多角度微波后向散射测量可以较为准确的确定表层土壤的湿度, 而用光学方法进行的地表粗糙度的实地测量结果与反演结果相差较大, 反映了微波频段的电磁波对地表具有的穿透作用。文中还对测量中存在的误差进行了较为详细的分析。

关键词: 反演; 后向散射系数; IEM 模型; 土壤湿度

中图分类号: TN011 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 03-0404-03

Study on Soil Moisture with Ground-Based Scatterometer and IEM Model

WANG Li-wei¹, WU Ji¹, ZHANG Wei², A K Fung³, SUN Bo¹, ZHU Su-yun¹, WU Lian-xi², LIU Hao¹, HUANG Yong-hui¹, REN Jian-hua¹

(1. Center for Space Science and Applied Research, CAS, P. O. Box 8701, Beijing 100080, China;

2. Center for Remote Sensing in Agriculture University of China, Beijing 100094, China; 3. Texas University, Arlington, U. S. A)

Abstract: A FM-CW ground base C-band scatterometer is used to measure the bare soil surface. The measurement was conducted at different incident angles and for two soil moisture conditions. In-situ measurement is also arranged simultaneously in order to verify the retrieved moisture. During the moisture retrieval, the integration equation method (IEM) is used. The results show that the method could be used to build up the soil moisture database and could then be used for satellite data applications.

Key words: retrieval; backscattering coefficient; IEM model; soil moisture

1 引言

利用微波遥感手段监测土壤湿度的变化具有重要意义, 它不但可以监视农作物的生长情况和估计产量, 也可根据土壤湿度状况跟踪和预测全球水量循环, 并分析其对气候变化的重要影响^[1]。由于雷达的后向散射信号对土壤湿度的变化敏感, 因此近年来随着星载合成孔径雷达应用的开展, 世界各国已经利用雷达后向散射测量开展了很多反演土壤湿度的研究^[2,3]。然而, 由于雷达的后向散射系数不但受土壤湿度的影响, 还受到地表粗糙度的影响。如果不正确估计地表的粗糙度, 就无法正确反演土壤湿度。

粗糙度有两个参数表征: 均方根高度和相关长度。很多研究中反演的粗糙度参数只有一个, 或者经验模型适用的范围有限^[3]。为深入了解地表粗糙度和土壤湿度对雷达后向散射系数的影响, 本研究应用 C 波段 FM-CW 制式的陆基微波散射计测量了干土和湿土的后向散射系数, 并采用 A K Fung 的 IEM 模型对测量数据进行拟合, 同时反演出了土壤湿度和粗糙度, 得到了粗糙度的两个参数。反演得到的上述参数与实地

取样测量的土壤湿度和通过照相得到的地表粗糙度结果虽有不同, 但趋势一致。经分析表明其差别是合理的。

2 IEM 模型分析和野外实验

根据雷达后向散射系数的 IEM 模型^[4], 后向散射系数 σ^0 仅与入射角 θ 、微波频率 f 、土壤介电常数 ϵ 、土壤粗糙度有关, 其中土壤介电常数由土壤类型和土壤湿度决定。计算表明, 介电常数和粗糙度的两个参数: 均方根高度和相关长度对 σ^0 随入射角变化曲线的影响不同, 因此通过多角度的后向散射测量, 得到一定的分布曲线, 由曲线幅度、走向以及 VV 和 HH 之间的关系, 可以基本确定被测地物的物理状态, 也即其粗糙度参数和介电常数, 从而确定土壤湿度。这就是通过多角度微波遥感进行土壤湿度反演的理论基础。

为了通过实验研究土壤湿度和粗糙度与雷达后向散射系数的关系, 我们于 2000 年 10 月 10 - 11 日在北京大兴县魏善庄北进行了野外试验。由于当地在 10 月的季节裸地较少, 我们选择了一块刚刚收割玉米后经过深耕的田地, 有清楚可见

的垄向,且有少量玉米杆和土壤混在一起.但由于数量比例较少,可以认为该地块为裸土类型.但这与粗糙度分布均匀的裸土不同.因此在测量时特别给予了处理.该地块的土壤类型属于沙土类型,沙土约占 60%,粘土 5%,其它 35%.

进行雷达后向散射测量的仪器为中科院空间中心研制的 C 波段 FM-CW 制式的陆基微波散射计.该仪器在测量之前已经在微波暗室中进行过绝对标定^[5].实验时,将其固定在一个吊车臂上,如图 1 所示.使吊车停在田边的道路上,然后将吊臂向田地一侧斜上方升起至距地面 10 米以上高度.散射计具有程序控制自动变换入射角度的能力.



图 1 测量用吊车与散射计安装

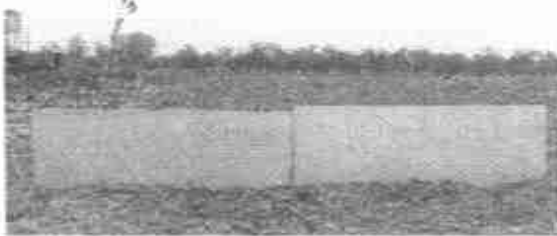


图 2 地表粗糙度实地测量

首先进行垂直极化测量,分三个方向,即南北、东西和东南方向,测量完成后,将天线极化方向变成水平极化,在南北和东西方向重复测量过程.自然湿度的田地测量完成后,将田地人工洒水,直至表面湿透.两个小时后,对洒水后的湿土地重复了同样的测量.

实地取样测量包括两个部分:土壤湿度的取样是用样品盒在干湿两种情况下各取 5 个样品;地表粗糙度的实地测量方法为:用两块木板,各长 1.2 米,宽 0.6 米,将其相连插入到田地中.用数码相机拍下木板与田地的分界线,如图 2 所示.将图像下载到计算机中,即可读出每幅图像中地表的起伏高度,计算它们的均方根高度和相关长度.

3 数据结果与分析

将每 5~6 次重复测量的同一位置的数据进行平均.对平均后的数据用 IEM 模型进行拟合.拟合的过程是通过不断修改模型中的 σ^0 和两个粗糙度参数得到的.拟合结果如下图所示.其中 rms 为土壤表面的均方根高度, L 为相关长度, ϵ 为土壤介电常数.三个参数均为拟合后模型给出的参数.

图 3 (a) 和 (b) 分别为自然湿度状态下南北方向和东西方向测量时的拟合结果. (c) 和 (d) 是同样地块洒水后对南北方向测量结果的拟合,这两个图中的测量值相同,但有两种拟合

结果.从 (a) 中可以看出,南北方向测量的结果是水平极化的后向散射系数大于垂直极化后向散射系数.这是因为水平极化波方向与垄平行,垄对水平极化的后向散射有加强效果.而东西方向测量结果 (b) 则反之.从 (a) 和 (b) 的拟合结果得到的土壤介电常数可以算出土壤湿度分别为 3% 和 4%;而实地取样测得的湿度为 20%,二者相差较大.根据 (c) 和 (d) 的拟合给出的介电常数得到的土壤湿度,分别为 30% 和 37%;实地取样测得的湿度为 30%,二者比较接近.

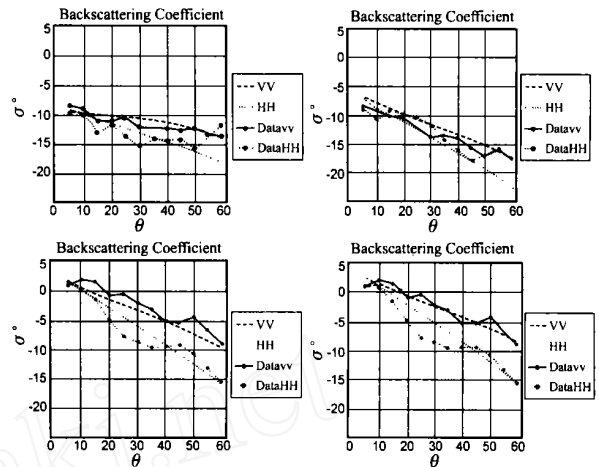


图 3 实地散射测量与 IEM 模型拟合结果

(a) rms = 0.6, $L = 1.2$, $\epsilon = 3.3$ (b) rms = 0.4, $L = 1.7$, $\epsilon = 3.5$
(c) rms = 0.6, $L = 2.5$, $\epsilon = 14.6$ (d) rms = 0.6, $L = 2.5$, $\epsilon = 20.6$

因此被测地块在自然状态下和人工洒水后,散射计测量值经模型反演的土壤湿度与实地取样测量的湿度的差别不一致.这种呈非线性的误差说明不是仪器本身标定产生的误差.而试验地块中垄的存在,给测量结果和模型的适用性都带来了一些误差,但误差应该在可以容忍的限度之内.据此,我们认为实地测量的取样深度可能是产生误差的主要因素.在实验中取样盒取样深度为 5cm,土壤湿度是 5cm 深度内土壤湿度的平均值.但是由于试验地块在人工洒水前已经自然干燥条件一定时间,表层 1 - 2 厘米深度区域内湿度较小,湿度剖面呈正分布.由于 C 波段微波散射计即使在土质较干时,穿透深度仅为表层^[6].因此可以认为,在自然状态下散射计测量的仅是表层土壤,反演得到土壤湿度为 3%~4% 是可能的,文献 [6] 中的土壤湿度剖面图有类似的表面湿度.

被测地块洒水后,表面很湿,湿度剖面呈逆分布,因此散射计的穿透深度更浅,只测量了土壤的浅表层.实地取样时,发现水没有渗透进土壤表层以下,但为了统一取样深度仍然为 5cm.因此表面湿度应大于取样测量的土壤湿度.但在这样较大的湿度情况下,后向散射系数对湿度的变化已经不很敏感. (c) 和 (d) 表明,模型对试验数据的拟合变得比较模糊,其中 (d) 似乎更好,而且得到的湿度也比较合理,其对应的土壤湿度为 37% 大于取样测量的湿度 30%.

图 3 (a) 和 (b) 中模型反演的南北方向和东西方向的粗糙度参数分别为:均方根高度 0.6, 0.4cm, 相关长度 1.2, 1.7cm.用数码相机对实地拍照并处理后的结果是:南北方向 rms =

3.025, $L = 22.5\text{cm}$, 东西方向 $\text{rms} = 2.51$, $L = 30\text{cm}$. 因此散射计测量数据通过模型反演得到的粗糙度参数比实地拍照计算的结果小很多. 这是因为两种方法测量所用的频率不同. 微波散射计是在微波频率对土壤进行观测, 而数码相机是在可见光频率摄取测量地点的图像, 所以二者得到的结果理应不同. 从两种方法对南北方向和东西方向测量结果的比较可以算出: 光学测量的均方根高度是微波测量结果的 6 倍, 相关长度是微波测量的 18 倍. 两个方向的测量均呈现这个比例. 这说明测量结果的一致性较好.

4 结论

本研究探讨了利用多角度雷达后向散射测量与 IEM 模型联合反演土壤表面粗糙度和湿度的方法. 利用 C 波段陆基散射计进行了野外测量, 并进行了实地的取样测量. 通过数据处理和试验结果的分析可以得出如下结论:

(1) 通过多角度雷达后向散射系数的测量以及用理论模型与其拟合, 可以同时反演土壤湿度和地面粗糙度.

(2) 上述反演得到的地面粗糙度, 也即雷达观测的地面粗糙度与人肉眼看到或用光学方法 (如激光器, 照像等) 得到的地面粗糙度显著不同, 因此不应该用光学方法得到的地面粗糙度参数去反演土壤湿度.

(3) 当实际土壤湿度呈现正分布 (上面干, 下面湿) 时, 雷达测量并通过模型反演得到的土壤湿度通常比实际情况偏低; 而当实际土壤湿度呈现逆正分布时, 雷达测量并通过模型反演得到土壤湿度通常比实际情况偏高.

上述结论是由一次地面试验, 一种土壤种类的结果分析得到的. 尽管其符合物理机理的分析, 但不排除个性化带来的影响. 因此, 类似的试验工作应该继续进行, 以增加统计置信度. 为了深入研究并彻底实现通过星载雷达遥感对地球大面积土壤湿度普查测量的目标, 必须彻底解决相关的散射机理与实测和模型联合反演的问题. 而较为容易的研究手段就是通过陆基散射计, 在地面上反复开展这项研究. 本研究工作可视为沿着这一方向的一个初步的探索.

参考文献:

- [1] C Schmullius, R Furrer. Frequency dependence of radar backscattering under different moisture conditions of vegetation-covered soil [J]. Int. J. Rem. Sens., 1992, 13(12): 2233 - 2245.
- [2] Y Oh, K Sarabandi, F T Ulaby. An empirical model and an inversion technique for radar scattering from bare soil surfaces [J]. IEEE Trans. on Geos. and Rem. Sens., 1992, 30(2): 370 - 381.
- [3] M S Dawson, A K Fung, et al. A robust statistical-based estimator for soil moisture retrieval from radar measurements [J]. IEEE Trans. on GRS, 1997, 35(1).
- [4] A K Fung. Microwave Scattering and Emission Models and Their Applications [M]. Norwood, MA: Artech House, 1994.
- [5] 董晓龙, 吴季等. 近场条件下散射计的绝对定标 [J]. 电子学报, 1999, 27(6): 5 - 8.
- [6] Ysok Oh. Retrieval of the effective soil moisture contents as a ground truth from natural soil surfaces [A]. IGARSS 2000 [C].

作者简介:



王丽巍 女. 1970 年生于吉林省. 1991 年毕业于吉林大学电子工程系. 1995 年获中科院长春地理所微波遥感专业硕士学位. 主要从事主动式微波遥感的定标技术, 及粗糙面散射理论和测量技术的研究工作.



吴季 男. 1958 年 4 月生于北京市. 丹麦技术大学博士, 中科院空间中心研究员. 主要从事微波遥感机理与技术, 微波测量土壤湿度, 综合孔径微波辐射计, 电磁场与天线方面的研究工作.