

文章编号: 1007-4619 (2002)06-0481-04

综合主动和被动微波数据监测土壤水分变化

李震, 郭华东, 施建成

(中国科学院遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101)

摘要: 微波遥感测量土壤水分的方法主要分主动和被动两种, 它们都是基于干燥土壤和水体之间介电常数的巨大差异。估算植被覆盖土壤表面土壤水分必须要考虑地表粗糙度和植被覆盖影响的问题。植被覆盖土壤表面的后向散射包括来自植被的体散射、来自地表的面散射和植被与地表间的交互作用散射项。本研究建立了一个半经验公式模型, 用来计算体散射项, 综合时间序列的主动和被动微波数据, 消除植被覆盖的影响, 估算地表土壤水分的变化状况。并应用1997年美国SGP'97综合实验中的机载800m分辨率辐射计ESTAR数据计算表面反射系数, 综合Radarsat的SCAN-SAR数据得到体散射项, 然后, 由NOAA/AVHRR和TM计算得到的NDVI值加权分配50m分辨率的体散射项, 最后计算50m分辨率的表面反射系数的变化值, 从而得到土壤水分的变化情况, 验证数据表明该计算结果与实测值一致。

关键词: 后向散射; 反射系数; 土壤水分; 植被

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

土壤水分是地表水存贮的组成部分, 在水文、气象和农业环境研究中重要的参数, 在地表与大气传输中扮演着重要的角色, 基于GCM(General Circulation Model)的活动地表参数化实验表明土壤水分异常与气候变化存在强烈的反馈^[1]。由于土壤水分是一个很难在大范围、高效率 and 全过程进行常规测量的参数, 它在水文学、生物化学过程和生态系统动力学研究中并未广泛应用。微波遥感提供了提取土壤水分空间分布的技术, 大量的理论模型和野外实验证明主动和被动微波传感器对土壤介电特性、表面粗糙度和植被覆盖特别敏感^[2-4]。

目前二种基本的微波遥感测量方法, 一个是基于微波辐射计的被动微波方法, 一个是采用成像雷达的主动微波方法。二者都是利用干燥土壤和水分之间在介电特性上的巨大差异这一特性来反演土壤水分。这二种方法具有互补性, 被动微波系统重复观测频率高、数据量低、数据处理简单, 但分辨率低。主动微波系统数据分辨率高, 但数据量大, 处理数据复杂。本研究将综合二者的优势, 计算植被覆

盖状态下, 土壤含水量的变化。

2 植被覆盖土壤的后向散射模型

植被覆盖表面的后向散射量包括体散射项、面散射项和面-体相互作用散射项。直接体后向散射项可认为主要由植被控制, 面后向散射主要由土壤的介电特性和粗糙度控制, 面-体相互作用后向散射是植被与地表之间的多重散射造成。

植被覆盖表面的后向散射模型可表示为:

$$\sigma_{pp}^{pp}(\theta) = \sigma_{t, v, s}^{pp}(\theta) + \sigma_s^{pp}(\theta) L_{pp}^2 \quad (1)$$

其中 $L_{pp}^2 = \exp(-2\kappa_e(pp) d \sec(\theta))$ 是双程衰减因子, 体衰减系数 κ_e 主要受极化状态的影响。 d 是植被层的厚度, θ 是雷达的入射角, 上下标 pp 表示极化状态(VV或HH), 下标 t, v, s 和 sv 分别表示总散射项、体散射、面散射和面-体相互作用散射项。裸露表面土壤后向散射系数可表示为与介电特性和表面粗糙度状态有关的公式:

$$\sigma_{pp}(\theta) = a(\theta) \times \Gamma^0 \quad (2)$$

这里, Γ^0 是表示通常入射条件下的反射系数, 它仅与介电常数有关, 而与极化状态、入射角无关。

收稿日期: 2002-05-01; 修订日期: 2002-06-01

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 49989001, 40001015)和中科院知识创新工程项目(批准号: KZCX2-312, CX000019)资助。

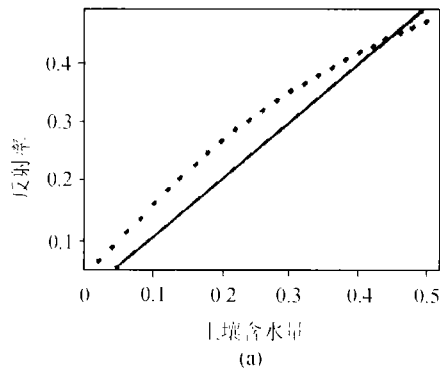
作者简介: 李震(1966—), 男, 博士, 副研究员, 毕业于武汉测绘科技大学, 航测系摄影测量与遥感专业, 现主要从事微波遥感研究, 已发表文章 39 篇。

系数 a 与粗糙度参数 S_R 有关,且 $S_R = (ks)^2 W$, ks 是归一化表面 rms 高, W 为功率谱,系数 b 与 rms 高相关而与 W 无关。由于 rms 高独立于地表的各向同性特征,雷达侧视方向对系数 b 没有大的影响。

主要微波遥感估算土壤水分主要受表面粗糙度和植被覆盖的影响。对一个重要轨道观测条件下的数据,我们假设短期内粗糙度和植被覆盖条件不变。又由于体一面交互作用散射项仅仅在地表十分光滑并且湿度较大时才起作用,本研究的后向散射模型假设面一体相互作用项忽略不计。那么对二次观测数据,综合公式(1)和(2),有:

$$\begin{aligned}\sigma'_1 &\approx \sigma' + \Gamma_1^0 f(\theta) \\ \sigma'_2 &\approx \sigma' + \Gamma_2^0 f(\theta)\end{aligned}\quad (3)$$

反演表面介电特性的主要问题就是要从总量中



去除体散射项。由公式(3)可导出,体散射项 σ' :

$$\sigma' = \left(\sigma'_1 - \frac{\Gamma_1^0}{\Gamma_2^0} \sigma'_2 \right) / \left(1 + \frac{\Gamma_1^0}{\Gamma_2^0} \right) \quad (4)$$

根据文献[5],我们先计算不同条件下土壤含水量的变化与介电常数的关系。模拟土壤密度为 1.1g/cm^3 、组分为 17% 粘土, 25% 沙, 在 5.3GHz(L 波段), 温度在 250K 条件下土壤水分含量间隔 2%, 从 2% 到 46% 情况下介电常数的变化, 然后根据下式:

$$\Gamma^0 = \left| \frac{1 - \sqrt{\epsilon_r}}{1 + \sqrt{\epsilon_r}} \right|^2 \quad (5)$$

建立土壤水分反射系数的关系(见图 1)。

通过回归统计分析,反射系数 Γ^0 与土壤水分 m_v 可用下列来表示:

$$\Gamma^0 = -0.2312 m_v^{0.6874} \quad (6)$$

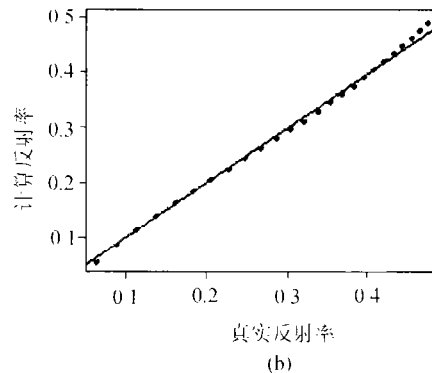


图 1 土壤水分与反射系数的关系(a)及计算值与原反射系数的比较(b)

Fig. 1 The relationship between volumetric soil moisture contents and the reflectivity (a), and the comparison of real reflectivity and calculated reflectivity from empirical function (b)

图 1 中(a)显示土壤水分与反射系数的关系,(b)显示反射系数与式(6)计算结果的比较,可以看出计算值与原反射系数一致。

3 实验区高分辨率 SAR 土壤水分反演

1997 年 6 月 18 日至 7 月 17 日在美国俄克拉荷马进行的 SGP'97(Southern Great Plains 1997)实验的目的是利用车载、机载和星载传感器来建立土壤水分反演的方法。实验区包括 1 万平方公里的南部平原,该区在 6 月末到七月初是典型的草原与收割后冬小麦的混交地^[6]。这次实验期间,6 月 7 日和 7 月 25 日的 Landsat-TM 数据被收集,用来划分土地覆盖类别和计算 $NDVI$ 值。同时 6 月 10 日至 7 月 25 日之间每天的 NOAA/AVHRR 用来计算低分辨率的 $NDVI$ 值。

作为 SGP'97 实验的一部分,地面分辨率为 800m 的机载电扫描阵列辐射计 ESTAR(Electronically Scanned Thinned Array Radiometer)用于土壤水分制图,这种 L 波段的被动微波数据在一个月内在 $1 \times 10^4 \text{km}^2$ 的实验区内重复飞行获取,该数据用来建立了被动微波反演土壤水分的算法,该算法用不同尺度的实测地面数据验证,误差小于 3%^[7,8]。

时间系列的 Radarsat-SAR 用来计算植被覆盖地表的后向散射总量。用于该区研究的数据包括 7 幅定标后的 Scan-SAR,4 幅入射角 20—40° 的窄模式 1 数据(6 月 11 日、6 月 28 日、7 月 5 日和 7 月 12 日);3 幅入射角 31—46° 的窄模式 2 数据(6 月 25 日、7 月 2 日和 7 月 19 日)。

采用 ESTAR 数据反演的 1997 年南方平原区时间系列土壤水分分布图,由公式(6),可计算出 800m 分辨率的该区地表反射系数图(图版 I 图 2(a))。图版 I 图 2(b)显示了由定标后的 Radarsat-Scan

SAR 计算出后向散射总量图经重采样后获得 800m 分辨率的后向散射总量图和由公式(4)计算得到体散射项的分布图(图版 I 图 2(c))。

用 NOAA/AVHRR 计算该时间段内每天的 *NDVI* 值,重采样为 800m 分辨率,然后用同日的 TM 计算并重采样得到的 50m 分辨率的 *NDVI*,加权分析得到 50m 分辨率的体散射项。据公式(3)可推导得到公式:

$$\frac{\Gamma_1^0}{\Gamma_2^0} = \frac{\sigma_1' - \sigma''}{\sigma_2' - \sigma''} \quad (7)$$

利用 6 月 28 日和 7 月 5 日 Radarsat—SAR 计算出 50m 分辨率的地表后向散射总量,再用体散射项,依据公式(7)计算得到 50m 分辨率的土壤水分变化状况(图版 I 图 3),变化图中,大于 1 表示土壤变干,小于 1 表示变湿。实测的土壤水分变化状态(图版 I 图 4)表明实验场土壤水分呈下降状态(<http://hydrolab.arsusda.gov/sgp97/gsm.html>),比较本方法计算的结果显示出相同的变化趋势。

4 讨论

(1) 研究表明,裸露表面土壤含水量与土壤表面反射总数存在很好的相关关系,可用简单的统计公式表明二者的关系。

(2) 综合主动和被动微波数据,能够分离开与植被相关的体散射项,通过 *NDVI* 值加权分配,能够用于高分辨率 SAR 图像估算植被覆盖下的土壤水分变化。

(3) 从粗分辨率的体散射项根据植被分布,精确加权分配到高分辨率图像上是消除植被影响的关

键,如何更合理地分配权重,还需进一步的研究。

(4) 植被与地面相互作用项在后向散射总量中所占的大小在下一步的研究应进行定量分析,并评价该项的影响权重,以及如何消除该项的影响。

参考文献 (References)

- [1] Wood E. F. Global scale hydrology: advances in land surface modeling [J]. *Rev. Geophysics*, 1991, supplement, 193—201.
- [2] Mo T, Schmugge T. J. and Wang J. R. Calculation of the microwave brightness temperature of rough soil surface: bare field [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1987, GE-25(1):47—54.
- [3] Jackson T. J. Le Vine D. E. Mapping surface soil moisture using an aircraft-based passive microwave instrument: algorithm and example [J]. *Journal of hydrology*, 1996, 184:85—99.
- [4] Shi J, Wang J. R., Hsu A. Y. et al. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254—1266.
- [5] Neil R. Peplinski, F. T. Ulaby and M. C. Dobson. Dielectric properties of soil in the 0.3—1.3 GHz range [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1995, 33(3):803—807.
- [6] Wickel A. J. and Jackson T. J. Multitemporal monitoring of soil moisture with RADARSAT SAR during the 1997 Southern Great Plains hydrology experiment [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 2001, 22(8):1571—1583.
- [7] Jackson T. J., Le Vine D. M., Swift C. T., Schmugge T. J. and Schiebe, F. R. Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita 92 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 53:27—37.
- [8] Jackson T. J., D. M. Le Vine, A. Y. Hsu, et al. Soil moisture mapping at regional scales using microwave radiometry: the southern great plains hydrology experiment [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 1999, 37: 2136—2151.

Measuring the Change of Soil Moisture with Vegetation Cover Integration Passive and Active Microwave Data

LI Zhen, Guo Hua-dong, SHI Jian-cheng

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 10010, China)

Abstract: Soil moisture is a highly variable component in land surface hydrology and plays a critical role in agriculture and hydrometeorology. It also plays an important role in the interactions between the land surface and the atmosphere, as well as the partitioning of precipitation into runoff and ground water storage. Two basic microwave approaches are used to measure soil moisture, one is passive which is based on radiometry and the other is active and uses radar. Both approaches utilize the large contrast between the dielectric constant of dry soil and water. Two systems are complementary. The passive microwave systems include frequent coverage, low data rates, and simpler data processing, but with poor resolution. In the case of the active microwave systems, the advantages include high resolution, but this comes at the expense of higher data rates and more complex processing. In this study, we showed the estimation of soil moisture with vegetation cover integrated passive and active microwave data.

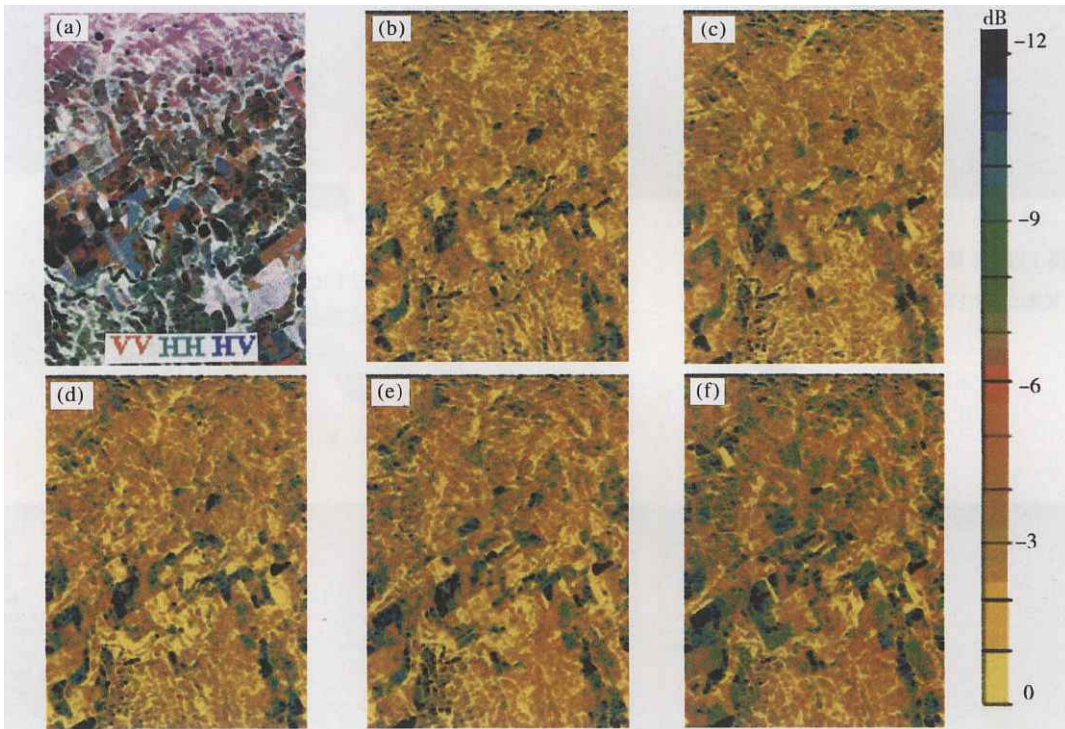
A total backscattering amount for a vegetated surface include volume, surface, and surface-volume interaction scattering terms. The direct volume scattering is considered to be controlled mainly by vegetation; surface scattering term is controlled by soil dielectric component and roughness. The backscattering model here is based on without surface-volume interaction scattering terms. In attempt to use active microwave remote sensors in estimation of soil moisture, we are mainly facing two major problems: effects of surface roughness and vegetation cover. For a given sensor, we assume the roughness under the condition of no change during data acquisitions. The main problem for retrieval surface dielectric properties is separate the volume scattering item from total backscattering.

With the time-serial soil moisture map from L band passive microwave radiometry, the Electronically Scanned Thinned Array Radiometer (*ESTAR*) at Southern Great Plains 1997(SGP'97), we calculated the surface reflectivity with 800m resolution. The volume scattering items at 800m resolution can be derived using multi-temporal resample calibration Radarsat SAR and surface reflectivity data. Weighting the ratio of *NDVI* at different resolution from NOAA/ANHRR and TM, the surface reflectivity with 50m resolution can be estimated according to the total backscattering and volume scattering, then soil moisture be mapped at 50m resolution. The deriving results showed the same trend of soil moisture change comparing with the field measurement.

Key words: backscattering; reflectivity; soil moisture; vegetation



图 1 实验区的雷达图像功率图、VV 极化和 HH 极化数据目标分解后单向、双向和交叉散射分量的彩色合成图



(a) 6月10日 VV, HH, HV 合成图 (b) 6月12日 VV 极化与6月10日 VV 极化差值图
(c) 6月13日 VV 极化与6月10日 VV 极化差值图 (d) 6月15日 VV 极化与6月10日 VV 极化差值图
(e) 6月16日 VV 极化与6月10日 VV 极化差值图 (f) 6月18日 VV 极化与6月10日 VV 极化差值图

图 3 实验区 1992 年 6 月 10—18 日时间序列的雷达图像



图 4 分解的双向反射分量归一化叉积和从野外测量数据计算的反射系数归一化叉积的比较