

冬小麦后向散射特性的测量分析与模拟研究

陈彦, 徐春亮, 贾明权, 芦海平, 刘增灿, 童玲

(电子科技大学自动化工程学院 成都 610054)

【摘要】利用L、S、C、X等4波段陆基微波散射计对冬小麦后向散射系数进行了测量,并采集了生物量、叶面积指数和土壤含水量等相关参数。介绍了冬小麦后向散射系数测量方法及相关实验装置,对不同时间、不同种植方向、不同极化状态下获得的数据进行分析比较,重点讨论了生物量、高度以及生长周期对地物后向散射系数的影响。基于水云模型和IEM模型对冬小麦后向散射特性进行模拟,并反演了土壤含水量,反演结果与实测结果相符。

关键词 后向散射系数; 微波遥感; 散射计; 土壤含水量; 冬小麦

中图分类号 TP7

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2009.05.032

Measurement Analysis and Simulation of Backscattering Properties of Winter Wheat

CHEN Yan, XU Chun-liang, JIA Ming-quan, LU Hai-ping, LIU Zeng-can, and TONG Ling

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract The introduction of inversion of soil moisture content, Simulating backscattering coefficients of winter wheat based on Water Cloud and IEM model and methods to measuring backscattering coefficients of winter wheat is proposed. In order to test the inversion result and the measure result, the backscattering coefficients of winter wheat were measured by FM-CW Ground-based Scattermeter at L-band, S-band, C-band, and X-band, the LAI, biomass, soil moisture contents and so on relevant coefficients were gathered, the date on condition that the different time and different wave band and different polarized were compared, the different factors, such as incidence angle, polarization and wave length, that affect backscattering coefficients are discussed. The inversion of soil moisture content is indential the experiment results .

Key words backscattering coefficient; microwave remote sensing; scatterometer; soil moisture contents; winter wheat

目标后向散射系数 σ^0 集中反映地物目标对电磁波的散射能力,并能反演其他相关参数。对目标后向散射系数 σ^0 的测量分析与模拟研究是微波遥感领域关注的重点。所谓微波遥感是利用某种传感器接受地面各种地物发射和反射的微波信号,借以识别和分析地物,提取所需的信息,达到探测地球环境、勘探地球资源、检测海洋和大气污染以及侦查(监视)军事目标等。微波遥感与可见光和红外遥感相比较,具有全天时、穿透性强和信息丰富等显著特点^[1],应用前景广阔。

相关科研机构利用陆基散射计^[1-3]或SAR^[4]在不同波段、不同极化和不同入射角的情况下对典型地物进行测量,采集了相关数据,并建立模型对其进行分析研究。常用的模型有水云模型^[5]、MIMICS模型^[6]和AIEM模型^[7]等,这些模型与测量数据对比均

取得了较好的结果。

冬小麦是我国的主要农作物之一,对其生长进程进行监测非常必要。2008年10月至2009年5月,本文利用L、S、C、X共4波段陆基散射计对冬小麦整个生长周期的后向散射系数进行了测量,同时采集了生物量、叶面积指数、土壤含水量和粗糙度、环境温度等参数。本文对实验数据进行分析,并将实测数据与模拟数据比较,得出相关结论。

1 测量系统及野外实验

主要实验设备为FM-CW制式陆基微波(L、S、C、X共4波段)散射计、液压升降机、粗糙度板以及土壤水分测量仪等。

散射计是一种有源微波遥感器,是经过绝对定标的雷达,专门用来测量各种地物目标的散射系数。

收稿日期: 2009-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(40871160)

作者简介: 陈彦(1961-),女,教授,主要从事微小测量和微小遥感方向的研究。

散射计基于一般有源雷达的工作原理，根据雷达方程^[8]可推出散射系数表达式：

$$\sigma^0 = \frac{(4\pi)^3 P_r R^4}{P_t G_t \lambda^2 A} \quad (1)$$

式中 P_r 为接收天线输出的功率； P_t 为雷达发射机馈给发射天线的功率； R 为雷达天线到目标的距离； G_t 为发射天线增益； λ 为微波波长； A 为天线波束照射面积。测量时在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内进行扫描，并手动改变收发天线，构成HH、VV、HV和VH共4种极化方式。

实测的地物目标散射系数是个复杂函数，不仅与照射电磁波的特性(频率、入射角和极化)有关，也与地物目标的几何形状(相对于波长的表面粗糙度)以及复介电常数有关。

地物目标的表面几何性质——粗糙度是影响地表微波散射的重要因素，对其进行分析和测量极为重要。本文课题组获取土壤粗糙度的方法是将粗糙度板立于地面，调整后采用高级数码相机拍摄，然后对土壤表面轮廓图像进行校准和数据提取，最终获得土壤的粗糙度信息。拍摄过程中应尽量保证照相机水平，且拍摄距离保持5m以上，避免图像失真。

2 影响冬小麦后向散射系数的因素

植被的后向散射系数受多种因素影响，包括散射计的系统参数以及植被土壤的参数。下面对冬小麦的生物量和生长时间等参数对散射系数的影响进行分析。

2.1 后向散射系数与生物量的关系

文献[1]指出：散射计后向散射系数按指数关系随着被观测植被的生物量的增加而增加，并可以依次建立相应的经验模型。文献[9]和[10]指出：当地表植被的生物量到达一定的阈值后，散射系数将不随植被生物量的增加而增加，即对植被失去敏感性。但上述说法过于笼统，文献[11]指出：讨论生物量对后向散射的影响应考虑叶子的宽度，通常在土壤含水量及植被结构没有太大变化情况下，宽叶植被(玉米、大豆等)的后向散射系数随生物量增加而增加；窄叶(小麦等)则曾平缓或下降趋势。S波段在入射角为 30° 、 40° 和 60° 时的后向散射系数与生物量的关系在抽穗前(生长天数140之前)均服从窄叶植被这一规律，即随着生物量的增加散射系数减小，达到某一阈值后散射系数就开始增大，如图1a~1c所示。原因是抽穗期小麦冠层结构变化，影响其主要光合作

用的旗叶开始出现。

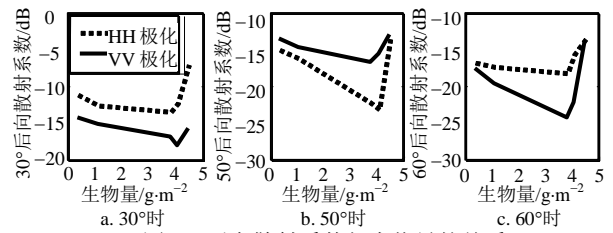


图1 后向散射系数与生物量的关系

2.2 后向散射系数与高度及生长周期的关系

植被对微波信号的散射和吸收主要取决于植被的含水量、形状以及植被结构^[12-13]，随着冬小麦的生长，其后向散射系数也会出现相应的规律性的变化。文献[1]结合对冬小麦大量的实测数据指出，抽穗前后冠层对微波的衰减有显著的差别，即抽穗后对微波的衰减变小。在高度70 cm(抽穗)之后，后向散射系数明显变大，即麦穗使得整个冠层对微波信号的吸收和衰减变小，尤其是入射角为 60° 时，体散射占主导地位的后向散射系数增大近10 dB，如图2a~2c所示。高度一般随着生长天数的增加而增加，就冬小麦而言，高度和生长天数对后向散射系数的影响在成熟期之前相同，如图3a~3c所示。但是在成熟后期，高度几乎不再变化，对后向散射系数的影响也随之减弱。而此时急剧减小的含水量及冠层的结构将会对后向散射起主导作用。

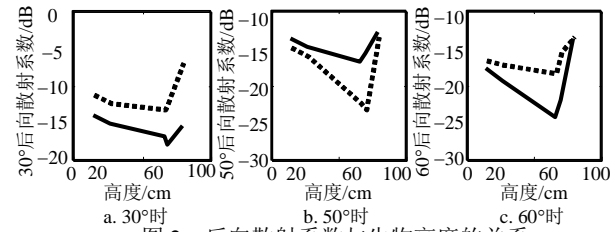


图2 后向散射系数与生物高度的关系

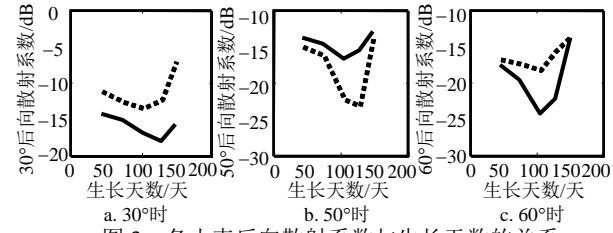


图3 冬小麦后向散射系数与生长天数的关系

3 水云模型对冬小麦后向散射系数的模拟

基于辐射传输理论建立起的水云模型，因其将后向散射系数直接用植被含水量和土壤含水量等易获取的参数来描述，显得简约而实用，得到了广泛的应用^[12-19]。文献[5]提出的该模型将植被处理为一层浮于土壤表面上的、大小和形状相同的散射体，

并构成具有一定厚度的消光介质,其常用表达式为:

$$\sigma_{pp}^0 = \sigma_{ppv}^0 + L_{pp}^2 \sigma_{pps}^0 \quad (1)$$

式中 σ_{pp}^0 为总的后向散射; σ_{ppv}^0 为体散射部分; σ_{pps}^0 为地表散射部分; L_{pp}^2 为双层衰减系数。体散射和双层系数的表达式为:

$$\sigma_{ppv}^0 = 0.75\omega \cos(1 - L_{pp}^2) \quad (2)$$

$$L_{pp} = \exp(-2\tau \sec \theta) \quad (3)$$

式中 ω 为植被单散射反照率; τ 是植被光学厚度。研究表明, τ 与植被水的关系:

$$\tau = bW_c \quad (4)$$

式中 b 为植被结构参数; W_c 为植被水; σ_{pps}^0 部分采用IEM^[7](积分方程)模型模拟。

基于水云模型对冬小麦的后向散射系数随入射角的变化进行模拟,冬小麦的参数如表1所示。

表1 冬小麦参数

生长期	株高	生物量	植被重量含水量	土壤重量含水量
70天	35 cm	1.23 kg/m ²	0.86	0.37

在文献[17]和本文大量实验的基础上,可依据经验确定 ω 和 b 的值。由图4~图6的模拟结果可知,S、C、X共3个波段模拟的总体情况与实测结果吻合较好:(1) S、C波段在入射角大于40°时,误差小于2 dB;(2) X波段在入射角为20°~40°时,误差较大,可达5 dB,原因是大角度及X波段体散射所占比重较大,产生去极化效应;(3) 水云模型将植被假设为水平均匀的云层,并忽略了植被地表之间的多次散射,可引起一定的误差。图中分别给出了冬小麦和土壤在总后向散射中占的比重,S波段由于穿透性比较强,所以土壤的影响较大,随着频率的增加,微波穿透性逐渐减弱,C和X波段冬小麦散射部分在总后向散射中比重较大,土壤的影响减小。另外,在小角度(如小于10°)时,实测结果偏大,这是因为水云模型没有考虑相干散射对后向散射的影响,而相干散射的影响在入射角较小时应占一定的比重;植被层与地面间的相互作用及植被层内的二次散射作用也会增大,从而引起实测后向散射系数比模拟结果大^[20]。

从3个波段实测结果分析,随频率的提高,后向散射系数变化逐渐趋于平缓,尤其是在X波段,这是因为X波段对冬小麦的穿透性较差,因此土壤的信息如粗糙度和含水量对其影响很小,发生在冠层的体散射起着主导作用,此时的小麦冠层可假设为均匀分布介质。

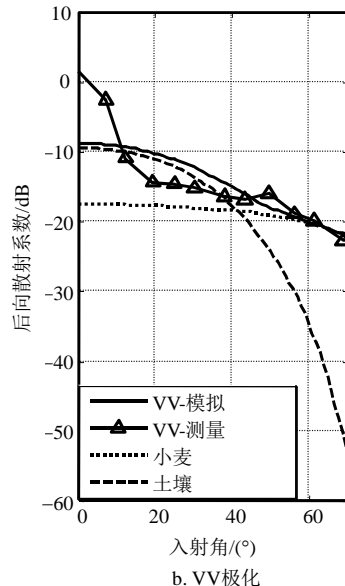
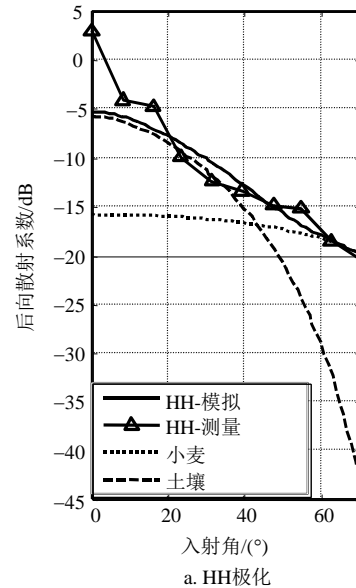
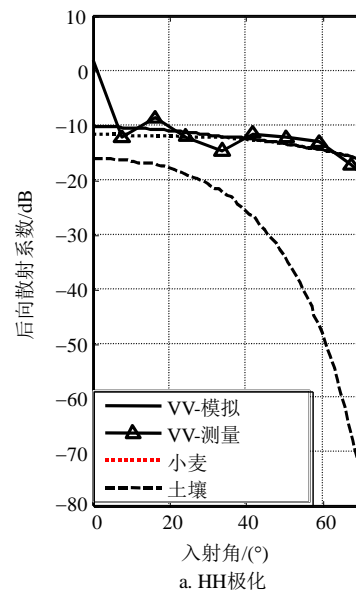


图4 S波段测量与模拟结果对比



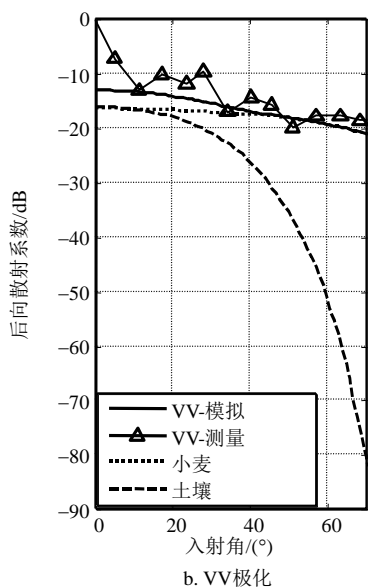


图5 C波段测量与模拟结果对比

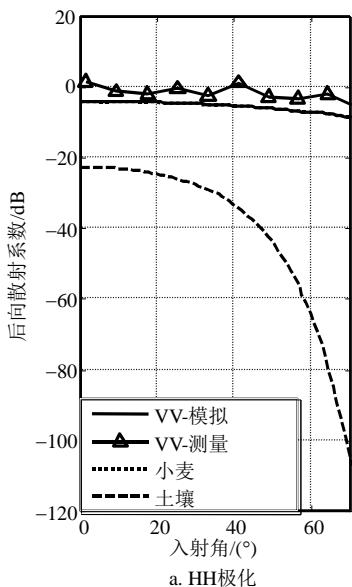


图6 X波段测量与模拟结果对比

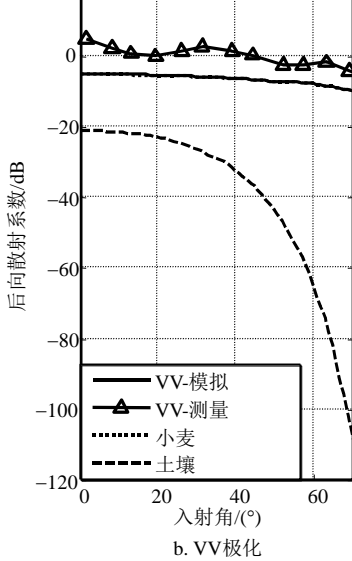


图6 X波段测量与模拟结果对比

4 反演冬小麦地表土壤的含水量

散射计的后向散射系数中蕴含着丰富的信息，包括植被含水量、LAI(叶面积指数)、地表粗糙度和土壤含水量等。如何准确地提取这些信息并用于监测植被的生长，是目前遥感领域研究的热点。国内外科研单位基于水云模型对植被地表的含水量进行了提取，在一定范围内取得了很好的效果^[12, 17-19]。本文采用文献[19]利用水云模型提取小麦土壤湿度所建立的经验公式，对C波段VV极化下所测量的生长期为45天、高度为15 cm的冬小麦的地表含水量进行了反演，如图7所示。

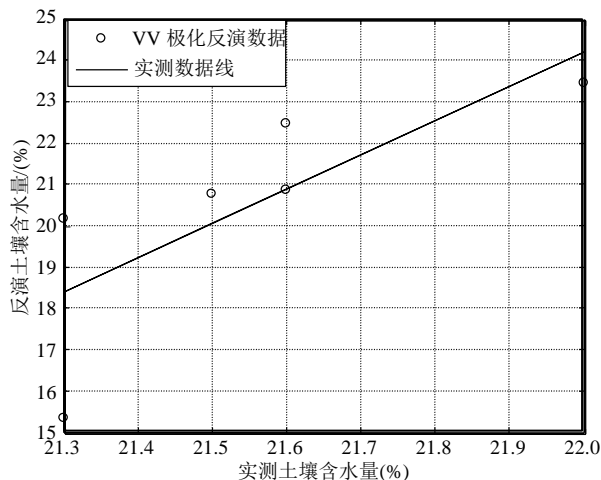


图7 反演冬小麦土壤含水量

由反演结果可知，反演数据的精度不是很高，这是因为冬小麦的存在使得湿度信息和微波信号之间的关系呈非线性关系，从冬小麦覆盖的土壤中提取湿度信息非常复杂。因而建立合理的冬小麦散射模型,并使散射模型具有准确反演土壤湿度的能力,是以后工作的重点。

在小麦整个生长季节土壤粗糙度几乎不变，后向散射主要受土壤含水量和植被的影响。用C波段小入射角反演植被覆盖地表含水量比较适合，原因是能有效降低粗糙度的影响，并且能降低植被对土壤散射回波信号的衰减，从而提取较大的土壤含水量信息。

5 结束语

本文对整个生长周期的冬小麦的后向散射特性进行了讨论，重点分析了生物量、高度以及生长时间对散射系数的影响。水云模型与IEM模型联合模拟了S, C, X共3个波段的后向散射系数并与实测数据进行了比对，吻合较好。利用C波段VV极化小角度范围内对地表含水量进行了反演，得出了有重要参考价值的结果。

参 考 文 献

- [1] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive [M]. Dedham, MA: Artech House, 1986.
- [2] TOAN T L, LOPES A, HUET M. On the relationships between radar backscattering coefficient and vegetation canopy characteristics[C]//Proc IGARSS. Strasbourg, France: Scientific & Technical Publ Branch, 1984: 155-160.
- [3] MATTIA F, TOAN T L, PICARD G, et al. Multi-temporal C-band radar measurement on wheat fields[J]. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(7): 1551-1560.
- [4] FERRAZZOLI P, GUERRIERO L. Interpretation and model analysis of Maestro-1 Flevo land data[J] Int Journal Remote Sens, 1994, 15(14): 2901-2915.
- [5] ATTEMA E, ULABY F T. Vegetation modeled as a water cloud[J]. Radio Sci, 1978, 13(2): 357-364.
- [6] FAWWAZ T, ULABY F T, SARABANDI K, et al. Michigan microwave canopy scattering model[J]. Int Journal Remote Sensing, 1990, 11(7): 1223-1253.
- [7] TZONG-DAR WU AND KUN-SHAN CHEN. A reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces[J]. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2004, 42(4): 753-753.
- [8] 丁鸞飞, 耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2002.
DING Lu-fei, GENG Fu-lu. The principle of radar[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002.
- [9] IMHOFF M L. Radar backscattering and biomass saturation: ramification for global biomass inventory[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1995, 33(2): 511-518.
- [10] DOBSON M C, ULABY F T, PIERCE L E. Estimation of forest biophysical characteristics in northern Michigan with SIR-C/X-SAR[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 1995, 33(4): 877-895.
- [11] Giovanni Macelloni, Simonetta Paloscia, Paolo Pampaloni, et al. The Relationship Between the Backscattering Coefficient and the Biomass of Narrow and Broad Leaf Crops[J]. IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, 2001, 39(4): 873-885.
- [12] 刘万侠, 王娟, 刘凯, 等. 植被覆盖地表主动微波遥感反演土壤水分算法研究[J]. 热带地理, 2007, 27(5): 411-415.
LIU Wan-xia, WANG Juan, LIU Kai, et al. Soil moisture data retrieval by active microwave remote sensing on vegetative land[J]. Tropical Geography, 2007, 27(5): 411-415.
- [13] 戈建军, 王超, 张卫国. 土壤湿度微波遥感中的植被散射模型进展[J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(4): 209-214
GE Jian-jun, WANG Chao, ZHANG Wei-guo. Review of vegetation scattering model in soil moisture microwave remote sensing[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(4): 209-214.
- [14] 杨虎. 植被覆盖地表土壤水分变化雷达探测模型与应用研究[D]. 北京: 中科院遥感所, 2003.
YANG Hu. On the modeling of canopy surface soil moisture change detection using multi-temporal radar images[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing of Chinese Academy of Science, 2003.
- [15] 刘伟. 植被覆盖地表极化雷达土壤水分反演与应用研究[D]. 北京: 中科院遥感所, 2005.
LIU Wei. Study on canopy surface soil moisture inversion and application with polarization radar in vegetated area[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing of Chinese Academy of Science, 2005.
- [16] 武胜利. 基于TRMM的主被动微波遥感结合反演土壤水分算法研究[D]. 北京: 中科院遥感所, 2006.
WU Sheng-li. Study on combined active/passive microwave remote sensing approach for soil moisture inversion retrieval with TRMM data[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing of Chinese Academy of Science, 2006.
- [17] BINDLISH R, BARROS A P. Parameterization of vegetation backscattering in radar-based, soil moisture estimation[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76(1): 130-137.
- [18] TACONET O, BENALLEGUE M, VIDAL M D. Estimation of soil and crop parameters for wheat from air borne radar backscattering data in C and X bands[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 50(3): 287-294.
- [19] TACONET O, VIDAL M D. Taking into account vegetation effects to estimate soil moisture from C-band radar measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 56(1): 52-56.
- [20] 李淑青, 方静, 汪文秉. 应用辐射传输理论对农作物电磁散射的研究[J]. 西安交通大学学报, 1997, 37(2): 32-38.
LI Shu-qing, FANG Jing, WANG Wen-bin. Study of electromagnetic backscattering from the agriculture context using the radiative transfer theory[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 37(2): 32-38.

编辑 熊思亮



陈彦, 教授。2007年毕业于核工业部西南物理研究院, 获博士学位, 2005年到英国伦敦大学玛丽皇后学院电子工程系做访问研究员, 参与微波管的理论及超宽带天线研究与设计。现为电子科技大学自动化学院教授, 主要从事微波管设计、微波测量、电磁辐射与散射、微波遥感、测量数据处理等方面的研究。先后参与国家“973”重大安全基础研究项目和国防科工委“S波段典型地物微波遥感机理实验及理论”研究项目; 主持国家“985”学科建设项目“微波遥感实验基地建设”等多项研究项目; 组织研发“大功率微波等离子体点火系统”并申请了相应专利。近几年, 在国内外学术刊物上发表论文20余篇。