

文章编号:1001-8166(2009)07-0810-07

典型地物后向散射特性的测量与分析^{*}

徐春亮,陈彦^{*},贾明权,刘增灿,卢海平,童玲
(成都电子科技大学,四川 成都 610054)

摘要:利用 S 和 C 波段 FM-CW 制式陆基微波散射计测量了不同极化、不同入射角以及不同方位向和不同时间的典型地物后向散射系数,包括裸土、冻土、草地和玉米等。首先介绍了实验装置和测量方法,根据不同的散射机制,将地物分为以面散射为主和以体散射为主两大类并进行了详细的分析:包括各种地物在不同入射角、不同极化状态和不同时间的散射特性,以及产生这些差异的原因;同时还结合相应的地物散射模型,定量研究了后向散射系数随地表参数的函数关系,反演得到了不同地物的地表参数,并对比实测数据分析了各种影响因素。

关键词:陆基散射计;后向散射系数;AIEM;水云模型;微波遥感

中图分类号:TP79;P407

文献标志码:A

1 引言

地物微波散射特性的研究是微波遥感进行目标分类、识别和数据判读等图像解译的基础。随着我国微波遥感应用研究的进展,特别是各种机载和星载微波遥感数据源的飞速发展和数据质量的不断提高,不仅需要定性分析雷达参数(频率、极化、入射角)和地表参数(如湿度、粗糙度、生物量等)对地物微波散射特性的影响,更要求定量研究雷达后向散射系数与各种参数之间的复杂函数关系,以及如何从各种有效数据源之中提取和反演感兴趣的地物参数。

地物目标后向散射特性的测量对于目标微波散射机理研究和微波遥感资料的积累及其应用具有十分重要的意义。国外在这方面已作了大量的理论和实验的工作^[1,2],其中微波遥感应用的奠基人之一乌拉比(F. T. Ulaby)早在 1989 年就推出了雷达散射测量手册,获得了大量地物的实测后向散射系数。文献[3]用一条多通道狄克式辐射计和散射计组合

的 RASAM 于 1987—1989 年间在瑞典伯恩附近的农场实验基地测量多种农作物的主动微波散射数据及相应的地物生物量参数,对农作物散射特性作了较为详细的分析。同时,越来越多的学者利用雷达后向散射测量开展各种地物参数反演的研究^[4,5]。

国内的一些单位也跟踪开展了散射理论和测量的工作,中国电波传播研究所是较早开展这方面工作的单位之一,他们主要采用 L 波段和 X 波段极化散射计^[6],对大量地物进行了多年的实验研究。为了更好地反映地物的散射特性,又研究出了基于矢量网络分析仪的多波段极化散射计系统,并于 1997 年秋季对中国中原地带典型农作物的散射特性进行了测试,获得了一些定性的结论^[7,8]。中国科学院空间中心王丽巍等^[9]于 2000 年利用 C 波段陆基散射计测量了干土和湿土的同极化后向散射系数,并利用积分方程模型(IEM)对测量数据进行拟合,初步反演了土壤湿度和粗糙度参数,但测量和反演精度都不高,而且最后也只是简要分析了散射系数与地表参数的关系。

^{*} 收稿日期:2008-12-08;修回日期:2009-04-28.

^{*} 基金项目:国家重点基础研究发展计划项目“陆表生态环境要素主被动遥感协同反演理论与方法”(编号:2007CB714400);中国科学院西部行动计划(二期)项目“黑河流域遥感—地面观测同步试验与综合模拟平台建设”(编号:KZCX2-XB2-09)资助。

作者简介:徐春亮(1983-),男,河南开封人,硕士研究生,主要从事微波遥感方面的研究. E-mail: xuchunliang523@163.com

^{*} 通讯作者:陈彦(1962-),女,四川成都人,教授,主要从事微波遥感方面的研究. E-mail: yanchen@uestc.edu.cn

我们于 2008 年 3 月和 7 月间应“973”项目组之邀参与了“黑河综合遥感联合试验”,主要负责地面散射测量。实验中以车载的方式,分别利用 S 和 C 波段散射计测量大量黑河地区典型地物的后向散射系数,包括积裸土、冻土、芦苇和玉米。本文根据该实验中陆基散射计测量系统获取的大量典型地物实测数据,定性分析了各地物的散射特性,同时结合相应的地物散射模型,定量研究了后向散射系数随地表参数的函数关系。

2 测量实验

FM-CW 制式陆基雷达散射计 (Land-based Radar Scatterometer, LS) 系统采用调频连续波体制,其主要性能参数如表 1 所示。

表 1 S 和 C 波段散射计主要参数

Table 1 The main parameters of S and C-band scatterometer

主要性能参数	S 波段	C 波段
中心频率 (GHz)	3.1	5.3
带宽 (GHz)	0.8	0.8
测量精度 (dB)	0.32	0.34
动态范围 (dB)	65	65
发射功率 (dB)	21	20
最大作用距离 (m)	> 100	> 100
俯仰角范围 (°)	0 ~ 90°	0 ~ 90°

实验测量现场如图 1 所示。实验中将散射计主机和收发天线均安置在吊车臂上,吊车臂升起至距地面大于 10 m 的高度,确保天线离地面的高度需要满足远场条件。此外,为了保证天线入射角控制的准确性,在其顶端还安装了水平仪。测量之前所有波段散射计不仅在实验室中完成了绝对定标^[10],而

且在室外测量标准金属球的散射,结果与球的理论散射系数较为一致,确保了散射计的测量精度。

散射计天线角度控制和散射系数测量均通过计算机完成,其控制界面如图 2 所示。下位数控计算机的启动,然后从主控计算机界面输入测量模式(连续、单次、步进扫描、角度范围等,我们每次测量从 0°开始,角度步进为 1°,在 0 ~ 90°范围内扫描,并手动改变极化,即 HH, VV, HV, VH 四种极化方式),下达工作指令,下位数控计算机模块即执行主控计算机命令,控制发射机、接收机、探测校准开关等系统工作,将微波信号进行谱分析计算,锁定目标距离,接受目标回波信号和当前角度等全部信息,信息可以全部显示在主控计算机界面上,同时在主控计算机硬盘上建立数据库存储。

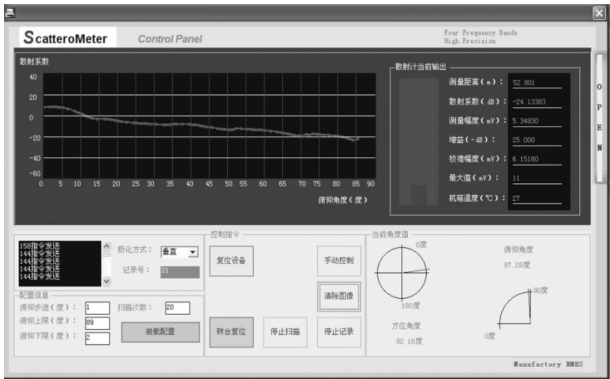


图 2 计算机显示界面

Fig. 2 Operation contact surface of computer

实验中我们分别对试验区的各种典型地物进行了全面的后向散射系数测量,实验地点包括黑河实验阿柔乡、扁都口和临泽草地等加密观测区,测量对象有裸地、冻土、芦苇和玉米地等,并同步记录相应的地物参数。

3 面散射特性分析

依照惯例,我们将被测地物划分为以面散射为主和以体散射为主的两类散射机制,并分别采用不同的散射模型对其分析。其中,本小节首先分析以面散射为主的地物,包括裸土和草地(图 3)。

积分方程模型 (IEM) 提供了一个在很宽地表粗糙度范围内再现地表后向散射情况的方案。该模型近年来经过不断改进和完善,模型模拟结果和精度得到不断提高,使其理论计算值与大量实验数据有较好的一致性。下面我们以改进后的 AIEM 模型为基础,定性和定量分析上述 3 种地物的散射特性,模



图 1 测量现场

Fig. 1 Surveys scene

型表达式见公式 1。

$$\sigma_{pq}^s(h) = \frac{k^2}{2} \exp(-2(k \cos \theta)^2 s^2) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} s^{2n} |I_{pq}^n|^2 \frac{W(-2k \sin \theta, 0)}{2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{pq}^s(h)$ 表示雷达后向散射系数,下标 pq 分别代表极化方式, θ 为入射角, $k=2\pi/\lambda$ 为波数, s 为粗糙度的均方根高度, W^n 为表面自相关函数的 n 阶粗糙度谱, I_{pq}^n 为菲聂尔反射系数和粗糙度谱的函数,这里的菲聂尔反射系数为修正后的反射系数^[11]。



图 3 裸土和冻土实验现场

Fig. 3 Experimental sites of bare soil and frozen earth

3.1 裸地

影响裸地散射系数的地面参数主要是表面粗糙度和土壤介电常数,而且对应随机粗糙面的散射建模已经发展得较为成熟。为此,我们利用 S 波段陆基散射计在民乐县扁都口测量了刚收割后的油菜裸地,获得了该裸地 HH、VV、HV 极化的后向散射系数,以及相应的地表参数。裸地表面参数见表 2 所示,其中的介电常数是利用土壤体积含水量由 Dobson 模型^[12]计算得到。图 4 给出了裸地散射系数与 AIEM 模拟结果的比较曲线,考虑到西北地区沙土土壤粗糙度较小的特性,模拟计算时选用了指数相关函数。

表 2 裸地和草地参数

Table 2 Bare land and grassland parameters

	含水量 (%)	介电常数	均方根高度 (mm)	相关长度 (mm)
裸地	18.3	7.72	10.02	213.4
冻土	47.4	30.6	10.72	120.8

图 4 中模拟曲线与实测数据之间的最小标准差

为 $Sd=1.75$ 。反演得到裸地介电常数 $\epsilon_r=7.69$,均方根高度 $s=9.35$ mm,相关长度 $l=168.91$ mm,与表 2 中测量的结果吻合较好,说明利用陆基雷达散射计实验测量研究地物散射机理,并从中发现该地物机理在遥感应用中的价值是可行的。

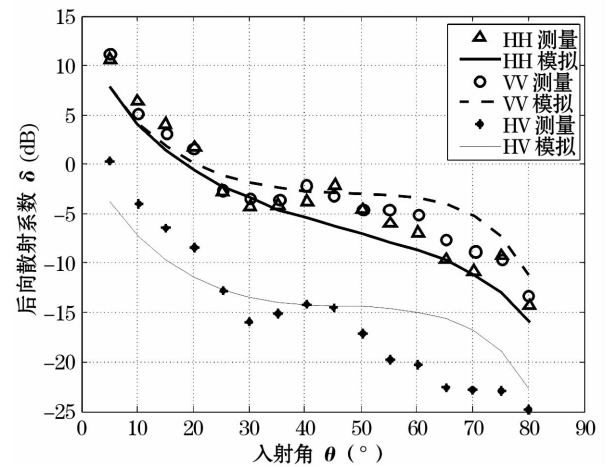


图 4 裸地不同极化散射系数测量与模拟比较

Fig. 4 Scattering coefficient comparison of bare land between different polarization measurement and simulation

此外,我们还测量裸地不同方位向后向散射系数,由于油菜地垄的存在导致了不同方位后向散射系数的较大差异,图 5 给出了 HH 极化东西和南北向散射系数测量值与相应模拟结果的比较曲线。

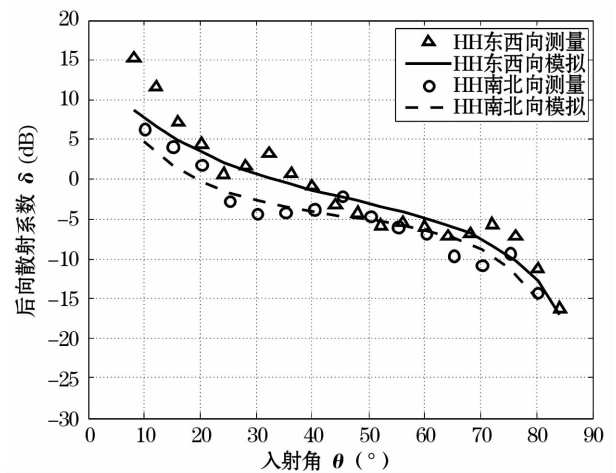


图 5 裸地不同方位散射系数测量与模拟比较

Fig. 5 Scattering coefficient comparison of bare land between different orientations measurement and simulation

3.2 冻土

阿柔乡冻土为季节性冻土,实验期间,冻土上有部分小草,但已基本处于干燥状态;因此可以作为一

种面散射特性来分析,其散射系数主要受冻土表面散射的影响。图 6 给出了冻土 HH 极化散射系数测量与模拟比较曲线。

图 6 中模拟曲线与实测数据之间的最小标准差为 $Sd = 1.27$ 。反演得到冻土介电常数 $\epsilon_r = 43.63$, 均方根高度 $s = 11.75\text{ mm}$, 相关长度 $l = 235.0\text{ mm}$ 。与表 2 中测量所得的结果比较,发现均方根高度基本一致,但介电参数偏大,这主要是由于冻土下层面的含水量相当高的缘故。当土壤处于冻结状态时,由于冰的介电常数远比水的小,微波可以穿透到冻土下层的高含水量面,故反演得到较高的介电常数。

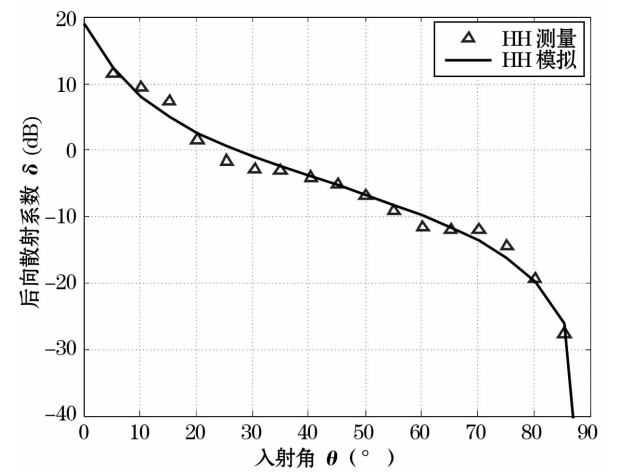


图 6 冻土 HH 极化散射系数测量与模拟比较

Fig. 6 Scattering coefficient comparison of frozen soil between HH polarization measurement and simulation

此外,为了考察冻土从冻结到融化过程的散射系数变化,我们还测量了不同时间的冻土后向散射系数,如图 7 所示。比较发现,随着冻土的融解,后向散射系数逐渐增大,最大可达 5 dB。这主要是由于随着气温的升高,冻土中冰的不断融化为水,导致其介电常数迅速增大;根据土壤微波散射机理,介电常数越大,其不同入射角的后向散射系数也越大。然而图 7 中的后向散射系数只是在小于 60° 时逐渐增大, 60° 后出现交叉现象,这是因为冻土存在体散射效应导致的。

4 体散射特性分析

利用模型描述植被散射特性是非常困难的,而且过于复杂的模型由于需要较大无法准确测量的参数而不能应用于实际中。Attna 等^[13]于 1978 年提出的“水—云”模型由于其简单有效性而被广泛应用于微波遥感中;该模型建立在辐射传输模型基础

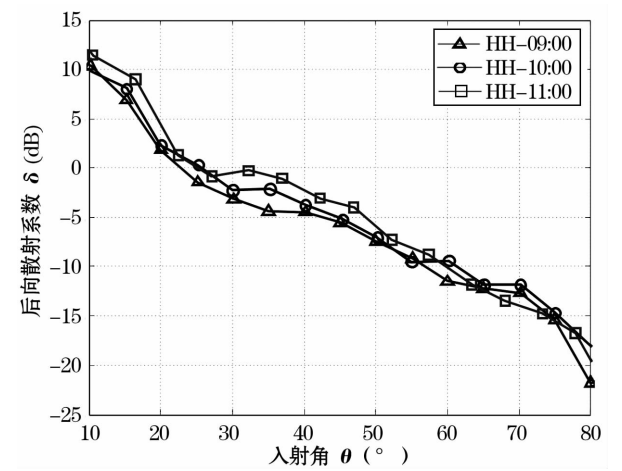


图 7 冻土融解过程中散射系数曲线比较

Fig. 7 Scattering coefficient curve comparison of the frozen soil thawing process

之上,通常使用很少的参数,但这些参数具有一定机理性的意义。结合陆基雷达散射计,我们可以通过实测数据估算出模型的参数。模型表示如公式(2)所示:

$$\sigma^0 = \sigma_v^0 + \tau^2 \sigma_s^0$$
$$\sigma_v^0 = A \cdot \cos\theta \cdot (1 - \tau^2)$$
$$\tau^2 = \exp(-2B\sec\theta)$$

(2)

式中: σ_s^0 土壤表面散射系数,这里利用前面介绍的 AIEM 模拟获得, σ_v^0 为直接植被后向散射系数, σ^0 为总的散射系数, τ^2 为雷达波穿透农作物层的双层衰减因子,A、B 是经验常数,这里假定 $A = \frac{\eta}{2\alpha} = \frac{N\sigma}{2\alpha}$, $B = \alpha h$,其中 h 为植被的高度, α 为衰减因子, η 为反射因子, σ 为单个水滴的散射截面, N 为水滴数。

下面我们利用“水—云”模型分析芦苇和玉米地的后向散射特性,图 8 给出了散射计测量的芦苇和玉米地照片。散射测量是同步测量的芦苇和玉米地相关参数由表 3 给出。

表 3 芦苇和玉米地参数					
Table 3 Reed and maize parameters					
	介电常数	均方根高度 (mm)	相关长度 (mm)	植被高度 (cm)	叶面积指数
芦苇	17.74	12.1	139.9	39	1.76
玉米	12.29	14.0	69.2	165	3.51

4.1 芦苇

为了研究植被的体散射特性,我们于 2008 年 7 月间,测量了 S 波段不同极化、不同入射角芦苇草地

和玉米的后向散射系数,并利用公式(2)给出的水云模型拟合得到图 9 所示的曲线,同时给出相同极化条件下不同时间段的散射系数差异。



图 8 芦苇、玉米地实验现场

Fig. 8 Reed and maize experimental site

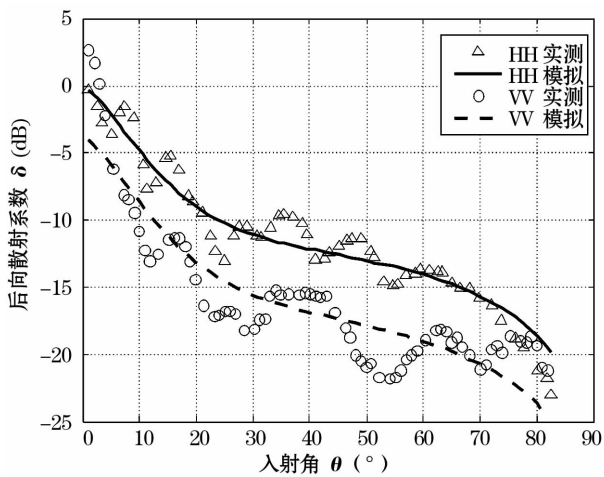


图 9 芦苇地不同极化散射系数测量与模拟曲线

Fig.9 Scattering coefficient comparison of reed between different polarization measurement and simulation

从图 9 可以看出,水平极化 HH 在不同入射角都远大于垂直极化 VV,而且相差基本为 5dB 左右。首先要从电磁波的角度理解不同极化在地物中的散射特性,在 VV 极化下,电磁电场振动方向与地面垂直,当电磁波穿透到电介质中时,垂直振动进入介质的电场会使介质内部微粒产生极化,介质内部微粒因极化发射(散射)出的电磁波必然因为在介质中还有有一定的传输路径而衰减,从而导致电磁波能量大量损耗在电介质内部,因此散射的能量必然较小。对于 HH 极化,电磁电场振动方向与地面平行,是电磁波引起的介质极化主要发生在表面,表面微粒极化后发射的电磁波直接散射到自由空间中,故散射

的能量必然较大。具体到这里的两种植被散射,芦苇的长势笔直,正好与垂直极化电场的振动方向一致,故电磁波在植被层中因极化的衰减较大,而下一节介绍的玉米枝叶茂密,叶倾角较大,HH 和 VV 极化的衰减相当,这正是图 8 中 HH 与 VV 的差异远大于图 11 中两者差异的原因。这种极化差异是分类和识别不同生长形态地物的重要基础之一。

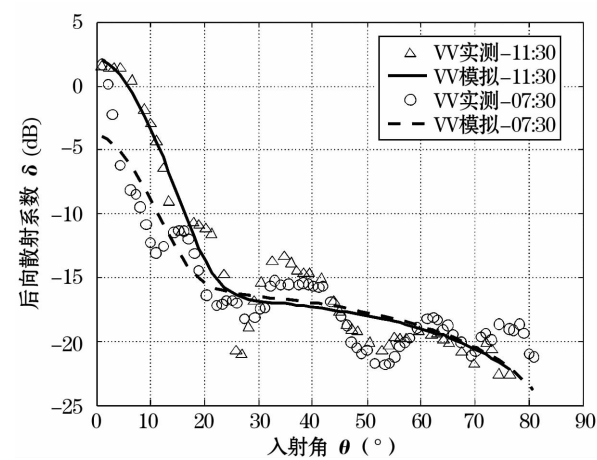


图 10 芦苇地不同时间散射系数测量与模拟曲线

Fig.10 Scattering coefficient comparison of reed between different time measurement and simulation

比较图 10 中 VV 极化在上午 07:30 和上午 11:30相隔 3 个多小时的测量结果,发现随着时间的推移,不同入射角的散射系数都有一定的增加,最大增加幅度甚至超过了 5 dB。分析其原由,主要是由于两者测量的时间段不同,VV 极化测量时,正处于植被露水蒸发最快的时期,露水存在的时候,植被湿度较大,介电常数也较大,因而植被衰减系数也就较大,削弱了占主导作用的植被—土壤散射项,导致总的后向散射系数减小。这种变化趋势与前面介绍的冻土后向散射系数随含水量的变化趋势恰恰相反,因为冻土散射的主导项是整个冻结层的体散射,以及土壤表面散射,而非植被的植被—土壤散射项。

4.2 玉米

实验时玉米处于拔节期,叶身宽而长。玉米冠层可以看做是由随机分布的玉米叶和玉米秆组成^[6]。图 11 给出了列向玉米不同极化散射系数测量与模拟结果的曲线比较。

从图 11 中可以看出,HH 极化略大于 VV 极化,玉米虽然是竖直生长,但其叶片较大,形状呈现类似抛物线弧形,浓密的玉米叶片对散射系数影响较大,根据前面芦苇地极化差异的分析,叶片的生长状态

会同时对 VV 极化和 HH 极化产生影响,导致两者的极化差较小。而 HH 极化仍然略大于 VV 极化的原因是竖直生长的玉米杆对 VV 极化的衰减更大。

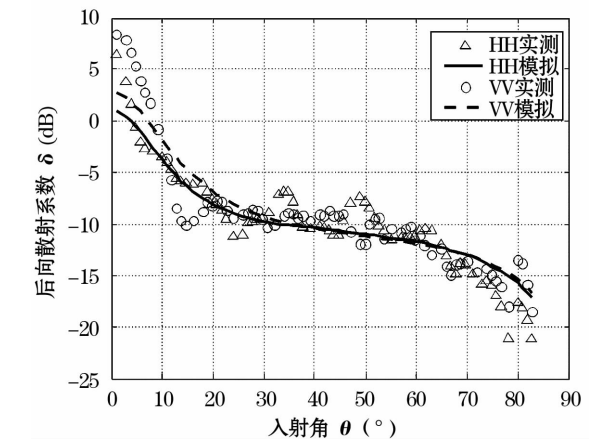


图 11 玉米地不同极化散射系数测量与模拟曲线
Fig. 11 Scattering coefficient comparison of maize between different polarization measurement and simulation

为了进一步定量分析植被的衰减和散射作用,表 4 列出了芦苇和玉米地散射系数的“水—云”模型拟合参数,表中 A_h 、 B_h 表示水平极化的拟合结果, A_v 、 B_v 表示垂直极化的拟合结果。

根据公式 2,参数 A 同时与反射因子成正比,与衰减因子成反比,而且与水滴数,即生物量等参数相关,而参数 B 是衰减因子和植被高度之积。由表 3 和表 4 的参数,可以求得不同极化芦苇和玉米植被层的反射因子 η 和衰减因子 α ,结果见表 5。

表 4 “水—云”模型拟合参数				
Table 4	“Water-Cloud” model fitting parameters			
	A_h	B_h	A_v	B_v
芦苇	0.1430	1.0832	0.0466	1.8516
玉米	0.2328	0.8375	0.2648	0.4672

表 5 不同极化植被反射因子和衰减因子				
Table 5	Vegetation reflectance factor and attenuation factor at different polarization			
	α_h	η_h	α_v	η_v
芦苇	3.0949	0.8851	5.2903	1.5130
玉米	0.5076	0.2363	0.2831	0.1318

比较芦苇不同极化的反射因子 η 和衰减因子 α ,水平极化均小于垂直极化,定量给出了垂直极化大于水平极化之间的差异。而玉米反而是水平极化

反射和衰减因子大于垂直极化,正是这样,才导致玉米地不同极化的散射系数大小相当。

5 结 论

本文根据该实验中陆基散射计测量系统获取的大量典型地物实测数据,定性分析了各地物的散射特性。特别是冻土和植被的散射特性分析,获得了具有一定参考意义的结论;比如发现冻土融解过程的后向散射系数会逐渐增大,并利用冻土与非冻土的介电常数差异合理解释了这一变化的原因;而对于植被,不仅发现了植被露珠的存在对其后向散射的影响作用,更找到了通过极化之间的差异性识别不同植被的方法。同时,我们还结合相应的地物散射模型,定量研究了后向散射系数随地表参数的函数关系。利用现有较为成熟的随机粗糙面散射模型,从实测散射系数的角度出发,通过最小均方误差的形式,同时反演土壤介电常数和粗糙度参数,再与实际测量数据对比,发现更多有用的信息。同样对于植被,通过半经验模型反演获得了植被层的散射和衰减因子,为研究植被层对微波散射过程的影响提供了新的更为直观的分析方式。这种有别与散射模型建立过程的逆向思维模式,更有利于发现微波遥感对地观测的有效应用前景。在今后微波遥感散射机理的研究工作中,以这种如何充分有效地应用遥感数据实现更加精确的对地观测作为指导思想,也定会获得更有价值的研究成果。

参考文献 (Reference) :

[1] Long M W. Land and Sea Radar Scattering[M]. Beijing: Science Press, 1981. [薛德镛译. 陆地和海面的雷达波散射特性[M]. 北京: 科学出版社, 1981].

[2] Ulaby F T, Dobson M C. Handbook of Radar Scattering Statistics from Terrain[M]. Artech House, 1989.

[3] Hwang J N, Chan C H. Iterative constrained inversion of neural networks and its applications [C] // Proceeding of 24th Annual Conference on Information Systems and Sciences. March; Princeton University, NJ, 1990: 754-759.

[4] Oh Y, Sarabadi K, Ulaby F T. An empirical model and inversion technique for radar scattering from bare soil surface [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1992, 30 (2): 223-224.

[5] Dawson M S, Fung A K, Manry M T, et al. A robust statistical-based estimator for soil moisture retrieval from radar measurement [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1997, 35(1): 57-67.

[6] Luo Xianyun, Sun Fang, Yin Zhiying. Radar ground clutter measurement and analysis [J]. Modern Radar, 1994, 16(4): 10-23.

- [罗贤云,孙芳,尹志盈,等. 雷达地杂波的测试与分析[J]. 现代雷达,1994,16(4):10-23.]
- [7] Wen Fangru, Yin Zhiying, Sun Fang, *et al.* The experimental study on system performance of multiple-band scatter meter[J]. *Modern Radar*, 1996, 18(4):51-66, 94. [温芳茹, 尹志盈, 孙芳, 等. 多波段散射计系统性能的实验研究[J]. 现代雷达, 1996, 18(4):51-66, 94.]
- [8] Sun Fang, Luo Xianyun, Yin Zhiying, *et al.* Measurement of back-scattering properties on crops [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1995, 3(2):128-133. [孙芳, 罗贤云, 尹志盈, 等. 农作物后向散射特性的测量[J]. 遥感学报, 1995, 3(2):128-133.]
- [9] Wang Liwei, Wu Ji, Zhang Wei, *et al.* Study on soil moisture with ground-based scatterometer and IEM model[J]. *Journal of Electronics*, 2002, 30(3):404-406. [王丽巍, 吴季, 张伟, 等. 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[J]. 电子学报, 2002, 30(3):404-406.]
- [10] Dong Xiaolong, Wu Ji, Sun Bo, *et al.* Absolute calibration of Scatter meter in near field region [J]. *Journal of Electronics*, 1999, 6(6):5-8. [董晓龙, 吴季, 孙波, 等. 近场条件下散射计的绝对定标[J]. 电子学报, 1999, 6(6):5-8.]
- [11] Wu Tzongdar, Chen Kunshan. Reappraisal of the validity of the IEM model for backscattering from rough surfaces[J]. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2004, 42(4):743-753.
- [12] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, *et al.* Microwave dielectric behaviour of wet soil part II: Dielectric mixing models [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(1):35-46.
- [13] Attema E P W, *et al.* Vegetation modeled as a water cloud[J]. *Radio Science*, 1978, 3(2):357-364.

Measurement and Analysis of Backscattering Properties on Typical Surface Features

XU Chunliang, CHEN Yan, JIA Mingquan, LIU Zengcan,

LU Haiping, TONG Ling

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

Abstract: The backscattering coefficient on typical surface features such as, frozen soil, maize, etc. was measured by S and C bands FM-CW standard ground-based microwave scatterometer under the different time and different wave band and different polarized condition. The experiment and the measuring technique in detail are introduced. According to different scattering mechanisms, features are divided into two categories: Surface scattering and volume scattering. Scattering characteristics under the different time and different wave band and different polarized condition and the reasons for these differences are analyzed. Combining with the corresponding features scattering model, a quantitative study of a function between the backscattering coefficient and surface parameters is made. Different surface parameters of features by inversion are obtained. A variety of Influencing factors by comparing the measured dates.

Key words: Ground-based scatterometer; Backscattering coefficient; Advanced Integral Equation Model (AI-EM); Water-cloud model; Microwave remote sensing.