

农作物后向散射特性的测量*

孙 芳 罗贤云 尹志盈 王显德 余运超 赵 敬

(中国电波传播研究所 河南新乡 453003)

张 玮

(中国农业大学 北京 100094)

摘 要 利用多波段极化散射计对中原地区常见的几种农作物(水稻、棉花、玉米、花生)的后向散射特性进行了测量,并从散射系数的测量结果得出了其在不同频率及不同地物参数下的散射特点。

关键词 多波段极化散射计,后向散射系数,农作物

1 引 言

地物目标后向散射特性的测量对于雷达目标环境特性和微波遥感资料的研究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工作^[1,2],国内的一些单位也开展了该方面的工作。中国电波传播研究所是较早开展这方面工作的单位之一,在以往的工作中采用 L 波段和 X 波段极化散射计^[3],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,最近又新研制出多波段极化散射计系统,能够对散射系数实现精确测量。1997 年秋季,利用该多波段散射计对中国中原地带典型农作物的散射特性进行了测试,得出了一些直观结论。

2 测试设备

测试设备选用多波段全极化微波散射计,它是以先进的矢量网络分析仪为核心,能够精确测量收发通道信号的比值,利用它的时域加门功能,合理选择设置参数,可实现地物散射系数的精确测量。整个散射计系统由矢量网络分析仪(用作发射和接收机)、天馈部分、伺服部分和计算机控制部分组成(图 1)。收发天线配置完全相同,天线口面在水平方向是对称的,垂直方向是偏置的,两天线并列放置。伺服系统由步进电机组成,可以自锁在任意位置上。计算机通过 HP-IB 总线、扩展器和 IEEE-488 卡对网络分析仪进行遥控,同时与天线伺服系统通过数

字 I/O 卡相连,对天线的方位和俯仰进行控制。在架设高度为 15 米左右时,可在 $-90^{\circ}-+90^{\circ}$ 方位, $0^{\circ}-80^{\circ}$ 俯仰范围内测量 4 种极化(HH、VV、VH、HV)在 2-18GHz 频带内的后向散射系数,其主要性能指标如表 1。

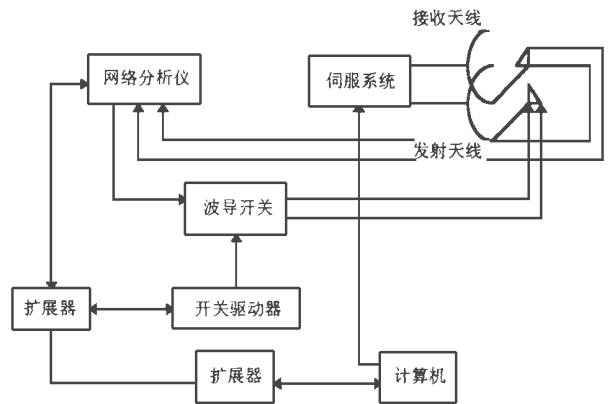


图 1 多波段散射计系统框图

Fig. 1 The block diagram of multi-band polarimetric scatterometer system

表 1 散射计主要指标参数

Table 1 The primary parameter of scatterometer

工作方式	跳频连续波
频率范围	2-18GHz
发射功率	10dBmW
接收机灵敏度	-100dBmW
σ° 的动态范围	>60dB
天线口径	1.2m
天线波束宽度	<5°
天线极化状态	HH, VV, VH, HV
天线方位调节范围	$\pm 90^{\circ}$
天线俯仰调节范围	$0^{\circ}-90^{\circ}$

3 测试原理

地物的雷达后向散射特性是用散射系数 σ° (单位面积的散射截面) 来描述的。而散射系数的计算公式可由雷达方程推导出来^[1]。雷达方程由下式给出：

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L} A \sigma^\circ$$

导出散射系数：

$$\sigma^\circ = \frac{(4\pi)^3 R^4 L}{G_t G_r \lambda^2 A} \times \frac{P_r}{P_t}$$

其中： R 为散射计天线至目标的距离； P_r 为散射计接收到的回波功率； P_t 为散射计的发射功率； A 为等效照射面积； G_t 为发射天线的增益； G_r 为接收天线的增益； L 为系统损耗。

上式中收发天线的增益及通道特性(如 L) 可由绝对校准实验而得出，距离可根据天线架设高度及俯仰角度求出，等效照射面积^[4] 可由天线方向图与天线具体几何关系计算得出，其余的量均为常数。因此，只要测得回波功率与发射功率的比值 P_r/P_t ，即可求出散射系数 σ° ，而网络分析仪恰恰能够精确测出 P_r/P_t ^[4-6]。

4 实验测试

实际测试时，散射计系统放置在地物的一侧，天线及收发部分均用吊车架设在距离地物 15 米左右的高度上，与计算机控制部分通过电缆相连，所有操作全部通过计算机控制，具体架设位置如图 2。每次测量从 0° 入射角开始，每 10° 步进，在每个角度上测量 3 个频率和 4 种极化状态。

本次测试的农作物包括水稻、棉花、玉米和花生，

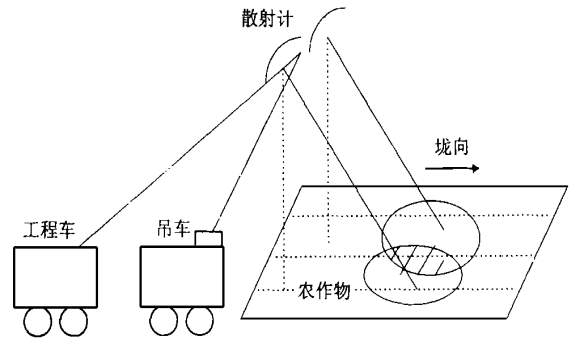


图 2 测量场地示意图

Fig. 2 Sketch of measurement site

各种作物的面积较大，均能保证所测范围内为同一种作物。同时还对 4 种作物的植被参数以及所在土壤的参数进行了测量。棉花分别在顺坑向、垂直坑向和与坑向成 45° 的方位上进行了测量，玉米和花生在顺坑方向上进行了测量，水稻除了顺坑向上测量外，还在与坑向成 45° 的方向上进行了灌水与未灌水的测量。每种作物分别在 2.5GHz、5GHz 和 8.5GHz 3 个频率点测量，跳频带宽均为 200MHz，点数为 201。每次测试入射角都是从 0° 开始至 80° (或 70°)，以 10° 步进，这样就得到了一系列不同作物、不同频率、不同方位下散射系数随入射角变化的数据。

5 测量结果

本次测试数据包括水稻、棉花、花生、玉米等农作物在 2.5、5、8.5GHz 频率，不同方位下的测量结果。每组数据是在不同入射角下得到的地物散射系数，按照不同频率将其分别画于图 3 至图 5。表 2 和表 3 给出了两种作物的典型散射系数测量数据。表 4 给出了由地物粗糙度数据算出的地物相关长度与均方根高度，同时给出了土壤的重量和体积含水量。表 5 列出了农作物叶面积和含水量。

表 2 水稻顺坑向测量结果

Table 2 Measurement result of paddy parallel to ridge

入射角度/ $^\circ$	2.5GHz			5GHz			8.5GHz		
	HH	VV	HV	HH	VV	HV	HH	VV	HV
0	24.142	25.882	8.532	19.959	24.249	11.779	16.564	13.124	10.694
10	9.140	8.080	-5.980	7.214	3.204	0.764	13.161	-2.309	2.616
20	5.128	-0.472	-8.387	-3.124	-3.504	-4.629	7.241	3.011	-8.444
30	0.598	1.908	-6.332	-0.010	-8.75	-3.995	0.973	-1.137	0.133
40	-4.849	-0.589	-13.984	0.403	-7.987	-9.147	-5.405	-3.595	-7.000
50	-2.373	-1.483	-15.778	-3.478	-10.218	-10.523	-4.851	-6.821	-9.551
60	-7.512	-13.842	-16.707	-7.436	-13.036	-17.711	-14.275	-9.335	-17.260
70	-13.491	-13.421	-19.806	-10.116	-15.566	-20.431	-12.056	-12.536	-18.446
80	-10.423	-15.603	-21.818	-12.993	-13.93	-21.455	-17.310	-17.65	-21.675

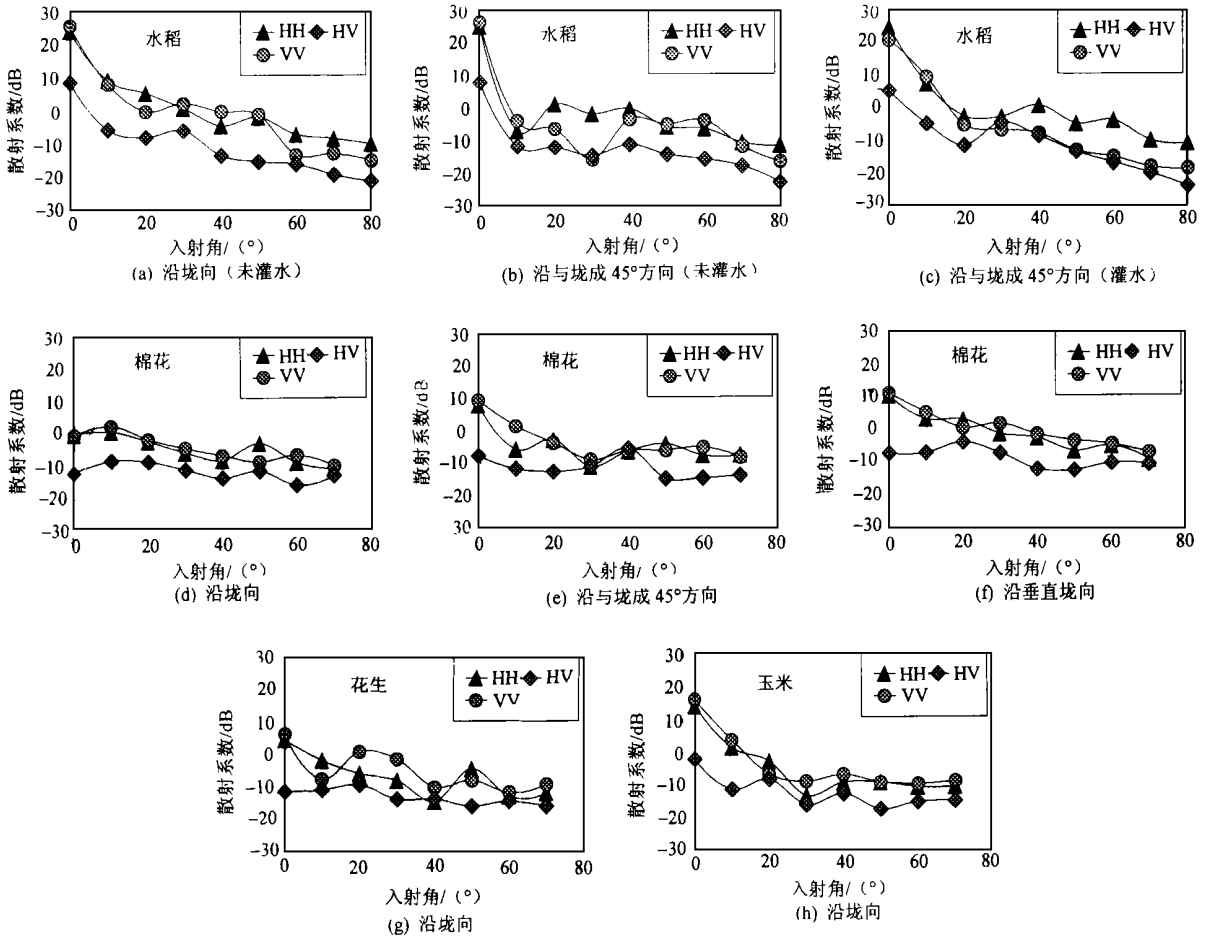


图3 频率为2.5GHz时散射系数随入射角的变化

Fig. 3 Change with incidence angle for scatter coefficient at 2.5GHz frequency

表3 玉米顺垅向测量结果

Table 3 Measurement result of maize parallel to ridge

入射角度/(°)	2.5GHz			5GHz			8.5GHz		
	HH	VV	HV	HH	VV	HV	HH	VV	HV
0	14.212	16.112	-2.398	11.199	11.439	-3.191	14.964	16.314	2.894
10	1.190	3.500	-11.685	4.284	0.944	-7.121	11.431	17.041	2.491
20	-3.122	-7.172	-8.812	-0.254	3.576	-8.019	1.471	3.411	-3.394
30	-13.802	-9.472	-16.807	-6.650	-1.330	-4.695	-4.847	-1.207	-5.207
40	-9.889	-7.359	-13.319	-11.507	-11.377	-15.137	-5.655	-14.655	-11.695
50	-9.913	-9.863	-18.238	-7.558	-12.188	-14.153	-12.121	-12.701	-16.541
60	-11.302	-10.432	-15.897	-13.976	-11.086	-18.381	-19.785	-11.105	-20.905
70	-11.061	-9.401	-15.611	-12.686	-6.826	-17.486	-18.836	-13.406	-23.541

表4 土壤参数

Table 4 Soil parameters

作物种类	水稻	棉花	玉米	花生	
相关长度/cm	顺垅向	6	13.5	18	6
	垂直垅向	12	12	9	9
均方根高度	顺垅向	1.626	3.254	2.337	1.267
	垂直垅向	2.026	1.107	1.281	2.002
土壤容积含水量/%	40.76	16.24	16.24	19.59	
土壤重量含水量/%	30.82	12.40	13.04	14.09	

6 测量精度

由于在散射计系统设计中,对信道的衰减、接头的损耗、天线的增益等参数的估计存在误差,为了消除它们对散射系数引入的测量误差,在本次测量前,对该系统进行了绝对校准实验。校准目标采用的是直径为45cm与60cm的金属球,由于球的各向同性,其后向散射特性的幅度和相位不随入射波的极化而

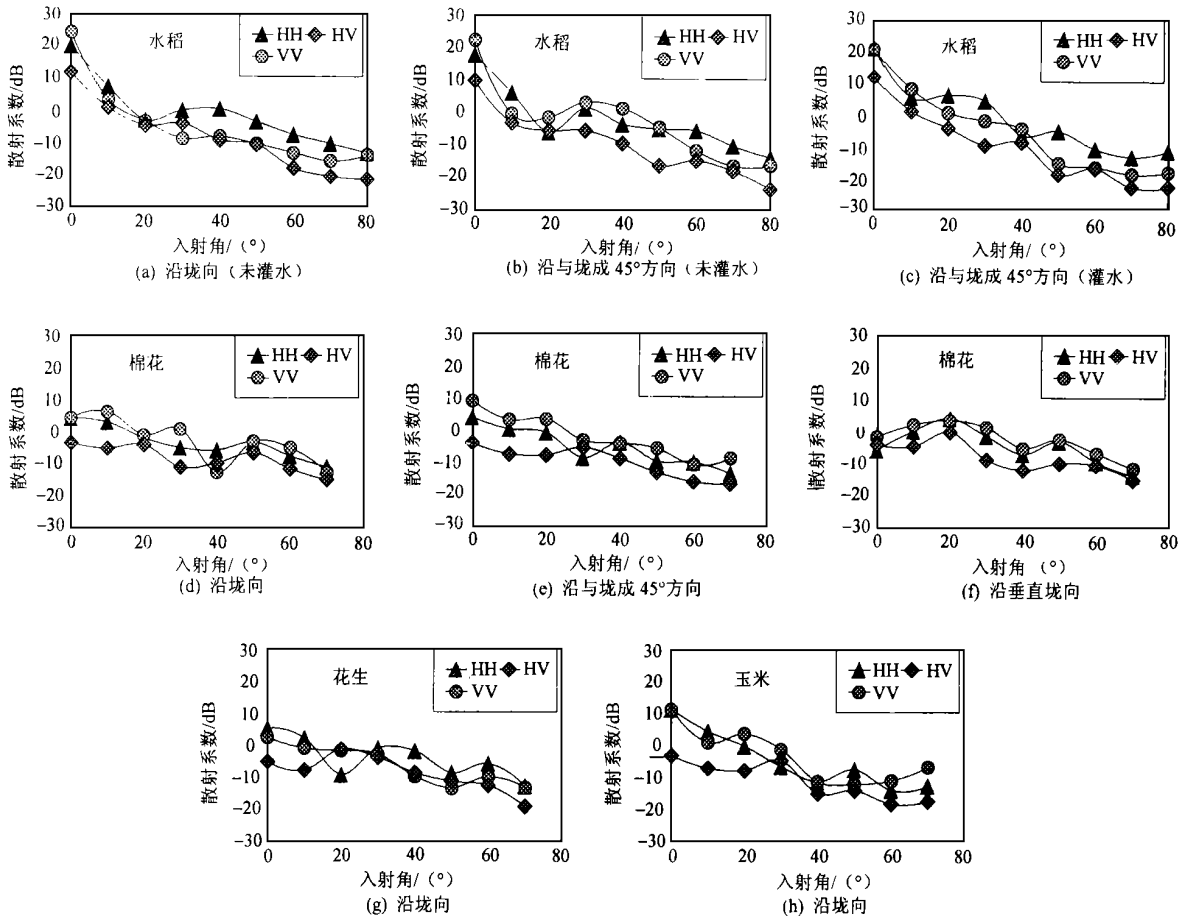


图 4 频率为 5GHz 时散射系数随入射角的变化

Fig. 4 Change with incidence angle for scatter coefficient at 5GHz frequency

改变,在球半径 a 与入射波长 λ 满足 $2\pi a \geq 10\lambda$ 时,球的雷达散射截面基本不随频率而变,近似等于球的截面积。表 6 为金属球 RCS 的计算值与实验测量值的比较。

表 5 农作物参数

Table 5 Crop parameters

作物种类	水稻	棉花	玉米	花生
株高/cm	78.35	85.62	227.8	36.6
密度(长 * 宽)/cm	30	70	70	40
每径(株)叶片数	15	16.7	22	20
叶片长度/cm	3	19.35	9.2	84.57
单叶面积/cm ²	27.1	9.06	63.2	4.64
单茎(株)叶面积/cm ²	0.95	8.99	9.17	1.97
LAI	19.39	65.95	434.1	5.84
每穴茎/株	58.16	1275.91	3993.38	493.79
鲜重每穴/株	1.23	1.09	2.59	1.24
干重每穴/株	9.5	1	1	2
含水量/%	82.15	491.56	581.27	199.57
	34.85	128.8	138.1	44.6
	57.59	73.53	75.87	77.61

表 6 金属球 RCS 计算值与实测值的比较

Table 6 Comparison between computed and measured of metal sphere RCS

		2.5GHz	5GHz	8.5GHz
金属球 1	理论值		-7.99dB	
直径 45cm	测量值	-6.27dB	-6.49dB	-9.15dB
金属球 2	理论值		-5.49dB	
直径 60cm	测量值	-3.5dB	-5.1dB	-5.6dB

由表 6 可知,本系统的散射系数测量精度为 2dB。

7 数据分析

从散射系数随入射角的测量结果可以看出,随着入射角的增大,散射系数明显变小,而且交叉极化比同极化要小,但水平极化与垂直极化没有太大的区别。这些特点对于不同的作物表现的成度是不一样的。但对于 4 种作物来说,干涉区的变化都未能很好地体现出来。

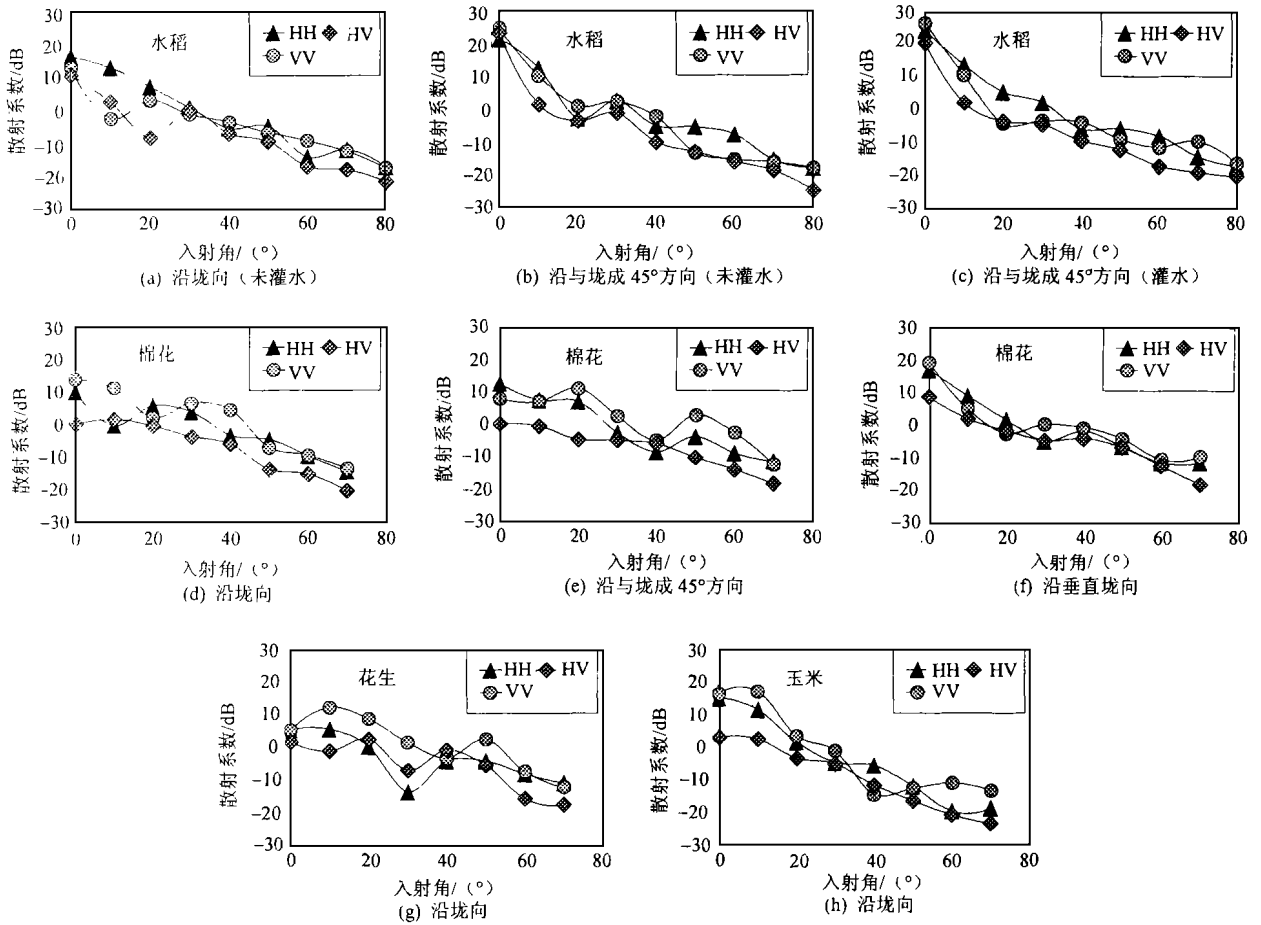


图5 频率为8.5GHz时散射系数随入射角的变化

Fig. 5 Change with incidence angle for scatter coefficient at 8.5GHz frequency

水稻

水稻的散射系数在小入射角时明显较大,这是由于水稻的株高、密度及单茎叶面积较其他几种作物都小,散射系数主要取决于植被、土壤及其相互作用的影响,加之经常灌水,土壤表面较平且含水量较大,所以散射系数随入射角变化的镜反射区和平直区表现较为明显,尤其是在频率低时更明显,这与频率越低穿透力越强是相吻合的。交叉极化明显低于同极化。由于水稻的垅向不十分明显,所以散射系数与垅向的关系不太大。如图3-5的(a),(b),(c)。

棉花

棉花的散射系数随入射角的变化不向水稻那样明显,这是由于它们的植株都较高,密度较大,单茎叶面积亦较大,电磁波未能穿透植被照射在土壤上,因此主要表现为植被的体散射作用,所以小入射角下无明显的镜反射区。棉花地的垅向较为清楚,所以散射系数与垅向有明显关系,如图3-5的(e),(f)。

花生

花生虽然株高较小但土壤完全被花生叶子覆盖,电磁散射主要体现为随机取向的叶子的体散射,因此镜反射区亦表现得不明显,随着入射角的变化散射系数较为平缓。并且由于枝叶的杂乱性,使得去极化现象较为严重。如图3-5的(g)。

玉米

玉米的散射特性与棉花相类似,它们的植株也都较高,单茎叶面积较大,但由于该玉米地的植株较稀疏,所以土壤亦对散射产生贡献,使得在小入射角时的散射系数比棉花的略高,镜反射区已明显表现出来,随着入射角的增大,散射主要表现为植被的体散射作用,散射系数变化缓慢,去极化现象亦明显表现出来。如图3-5的(h)。

8 结束语

通过对实验数据的分析,证实了该散射计系统在测量地物后向散射系数方面的先进性和准确性。

由于农作物的几何结构与电磁特性十分复杂,要得到规律性的认识需要不断在理论与实践方面进一步探索,特别是大量的高精度实验测试。进行精心准备的控制实验以研究散射系数与实况参数以及电波参数的关系是我们正在开展的工作之一。

致谢

本文的实验工作是中国电波传播研究所与中国农业大学联合进行的,对参加实验的中国电波传播研究所的温芳茹、岳小平、王来部、陈伟、张小强以及中国农业大学的郭玉海等同志表示感谢。

参 考 文 献 (References)

- 1 M. W. Long. Radar Reflectivity of Land and Sae. D. C. Heath and Company. 1975. (In Chinese) [M. W. Long. 陆地和海面的雷达波散射特性. 北京: 科学出版社, 1981.]
- 2 F. T. Ulaby, M. C. Dobson. Handbook of Radar Scattering Statistics from Terrain. Artech House. 1989.
- 3 Luo Xianyun, Sun fang, Yin Zhiying, et al. Measurement and Analysis for Radar Land Clutter. *Modern Radar*, 1994, **16**(4). (In Chinese)

[罗贤云, 孙芳, 尹志盈等. 雷达地杂波的测试与分析. 现代雷达, 1994, **16**(4).]

- 4 Wen Fangru, Yin Zhiying, Sun fang et al. The Experimental Study of System Performance of Multiple-band Scatterometer. *Modern Radar*. 1996, **18**(4). (In Chinese) [温芳茹, 尹志盈, 孙芳等. 多波段散射计系统性能的实验研究. 现代雷达, 1996, **18**(4).]
- 5 Wen Fangru, Luo Xianyun, Yin Zhiying et al. Measurement of the Backscattering Coefficient Matrix from the Terrain with Multiple-Band Scatterometer. *Modern Radar*. 1996, **18**(2). (In Chinese) [温芳茹, 罗贤云, 尹志盈等. 用多波段极化散射计测量地物后向散射系数矩阵. 现代雷达, 1996, **18**(2).]
- 6 Kang Shifeng, Luo Xianyun, Wen Fangru et al. Design and Analysis of Multifrequency Polarimetric Microwave Scatterometer System. *Chinese Journal of Radio Science*, 1997, **12**(3). (In Chinese) [康士峰, 罗贤云, 温芳茹等. 多波段全极化微波散射计系统的设计与分析. 电波科学学报, 1997, **12**(3).]

作 者 简 介

孙芳, 女, 工程师, 1970年5月出生。1992年毕业于西安电子科技大学电磁场与微波技术专业, 主要研究方向为地、海散射特性的测试, 微波设备的研制, 微波测试系统的建立及测量, 测试数据的分析。

Measurement of Backscattering Properties on Crops

SUN Fang LUO Xian-Yun YIN Zhi-Ying

WANG Xian-De YU Yun-Chao ZHAO Jing

(China Research Institute of Radiowave Propagation, Xinxiang, Henan 453003)

ZHANG Wei

(China Agricultural University, Beijing 100094)

Abstract The backscattering properties of some crops (including paddy, cotton, maize and peanut) from terrain of central plains of China were measured by using multi-band polarimetric scatterometer. Backscattering characteristics in different frequencies and terrain parameters were obtained based on measurement results of backscattering coefficient.

Key words Multi-band polarimetric scatterometer, Backscattering coefficient, Crops