

南方典型湿地植被微波暗室测量与散射特性分析

魏秋方^{1,2,3}, 邵芸^{1,2,3*}, 李坤^{1,2,3}, 刘致曲³, 张凤丽^{1,2,3}, 国贤玉³

¹中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094;

²中国科学院大学, 北京 100049;

³中科卫星应用德清研究院浙江省微波目标特性测量与遥感重点实验室, 浙江 湖州 313200

摘要 利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台, 测量芦苇和茭白在 2~17 GHz 频率范围内的雷达散射截面 (RCS), 分析其在连续频率下的散射特性和极化特性, 探讨芦苇和茭白遥感探测的最优模式。结果表明: Ku 波段, 芦苇和茭白的 RCS 值最大、X 波段次之、C 波段最小; 不同波段上同极化 RCS 值远大于交叉极化, 当入射角为 35° 时, 无论是芦苇还是茭白, 他们在低频部分同极化与交叉极化的 RCS 差异明显; 当入射角为 55° 时芦苇在高频部分而茭白在整个测量频段, 其水平发射水平接收 (HH) 和垂直发射垂直接收 (VV) 极化的 RCS 值差异明显。通过对分析二者的 RCS 值特征发现, 当入射角为 25° 时, 在 7.8~17 GHz 波段, 利用 VV 极化和 VH 极化基本可以区分芦苇和茭白, 当入射角为 55° 时, 在 7~17 GHz 波段, 通过分析 HH 极化和 VV 极化可以明显区分二者。本研究丰富了湿地地物散射波谱库, 并对后续芦苇和茭白的监测具有重要指示意义。

关键词 遥感; 散射; 极化; 全要素; 芦苇; 茭白

中图分类号 TP701 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0228001

Microwave Anechoic Chamber Measurement and Scatter Characteristics Analysis of Typical Wetland Vegetation in South China

Wei Qiufang^{1,2,3}, Shao Yun^{1,2,3*}, Li Kun^{1,2,3}, Liu Zhiqu³, Zhang Fengli^{1,2,3}, Guo Xianyu³

¹Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³Zhejiang Key Laboratory of Microwave Target Characteristic Measurement and Remote Sensing, Deqing Academy of Satellite Applications, Huzhou, Zhejiang 313200, China

Abstract The radar cross section (RCS) of reed and zizania in the frequency range of 2–17 GHz were measured in the anechoic chamber of the microwave characteristic measurement and simulation imaging platform. The scattering and polarization characteristics of reed and zizania under continuous frequency were analyzed, and the optimal mode of measuring reed and zizania was discussed. The results showed that all polarization RCS values of reed and zizania were the largest in Ku band, followed by X-band and C-band, and the RCS in copolarization is much larger than the RCS in the cross polarization especially in low frequency when the incident angle is 35°. The RCS difference between HH and VV polarization of reed in high frequency while zizania in total frequency is obviously when the incidence angle is 55°. Through the comparative analysis of the RCS characteristics of reed and zizania, we found

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-03-02; 录用日期: 2021-03-10

基金项目: 国家自然科学基金重点基金(41431174)

通信作者: *shaoyun@aircas.ac.cn

that reed and zizania can be basically distinguished by VV polarization and VH polarization at 7.8–17 GHz when the incident angle is 25°. And they also can be easily identified through HH polarization and VV polarization at 7–17 GHz when the incident angle is 55°. This study enriches the scattering spectral library of wetland features, and has an important significance for the follow-up monitoring of reed and zizania.

Key words remote sensing; scattering; polarization; full parameters; reed; zizania

1 引言

芦苇和茭白是南方比较常见的两种湿地植被,二者都具有重要的生态功能和经济价值。由于南方天气多云多雨,可见光影像难以满足生长环境复杂、种类多样的湿地植被的识别需求。而合成孔径雷达(SAR)能穿云透雾,具有全天时和全天候的工作能力,并且具有一定的穿透能力,对水分反应敏感,故在湿地监测中具有独特的优势^[1-2]。不同于光学遥感成像原理,SAR是基于测距原理通过主动发射与接收微波电磁波而成像的。SAR图像实质上是地面目标对雷达发射信号的回波强度分布图。因此,地物目标微波散射特性研究是微波遥感应用的基础,其对传感器波段的选择、遥感图像解译和处理以及新遥感领域的开拓等具有重要意义^[3]。由于湿地植被类型众多,错综复杂,分布广泛,现有研究对湿地地物的散射特性认知还不清楚,需要借助大量实验测量和先验知识才能完整认知典型湿地地物目标微波散射机理和SAR影像的成像特征。

目前各国研究学者利用各种平台开展了大量测量地物后向散射特性的实验。早在1975年到1988年间,以Ulaby等^[4]为代表的团队就基于雷达散射计开展了大量的测量植被微波散射特性研究,并分析了植被的信号特征和统计分布特征。le Toan等^[5]1989年利用X波段SAR影像分析了水稻的后向散射特征,发现水稻的后向散射系数的时相变化要远大于其他作物。20世纪90年代后,随着机载SAR的兴起,很多学者^[6-7]利用各种机载平台开展了植被多波段散射特性的测量。2000年以后,众多学者开始利用散射计测量植被后向散射系数随时间和入射角的变化^[8-12],分析了散射系数与频率和入射角的关系^[13-15]。

上述实验积累了大量的测量数据,丰富了地物的散射波谱库,分析了典型地物的频率、入射角和时域响应等微波散射特性。但由于各自平台搭载能力和传感器工作模式的影响,我们只能获得部分频率、部分入射角下湿地地物的后向散射特性,缺

乏对连续波段、连续入射角、连续方位角下湿地地物后向散射特征的分析,而这些对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。通过分析连续波段、连续入射角和方位角下的地物后向散射特征,可以得出监测湿地植被的最优探测模式,这对后续湿地地物监测具有借鉴意义。

本文选择自然生长的处于花期的芦苇和人工种植即将收割的茭白为典型湿地植被代表,利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台,通过构建可控环境下目标场景,测量芦苇和茭白在2~17 GHz频率范围内、0°~360°全方位角、0°~90°入射角、全极化方式[水平发射水平接收(HH)、水平发射垂直接收(HV)、垂直发射水平接收(VH)、垂直发射垂直接收(VV)]下的雷达散射截面(RCS,依次为RCS_HH、RCS_HV、RCS_VH、RCS_VV)值,分析其连续频率下的散射特性和极化特性,探讨测量芦苇和茭白的最优模式。

2 全波段全极化芦苇和茭白 SAR 成像仿真实验

2.1 实验平台

利用中国科学院空天信息创新研究院研建的微波特性测量与仿真成像科学实验平台(LAMP)完成全波段全极化SAR仿真成像及散射特性测量。该平台位于浙江省德清县,是目前亚洲唯一、性能先进、功能高度集成的大型微波遥感基础科学实验装置。平台提供了穹顶状纯净无干扰的微波暗室测试环境,可以发射0.8~20 GHz频率范围内连续的微波波谱,能够进行0°~360°全方位、0°~90°入射角范围的全极化方式目标散射特性测量、介电特性测量以及SAR模拟成像。整个测量装置的内部结构尺寸为24 m(长)×24 m(宽)×17 m(高),穹顶内部、转台外部以及地面部分均铺设了高性能吸波材料。平台内部照片及各项测量指标和精度分别如图1和表1所示。目前,该实验室已开展了关于水稻、土壤、水体、无人机等地物目标特性测量^[16-17]。

表 1 实验平台各项测量精度指标

Table 1 Measurement index and accuracy of experiment platform

Parameter	Measuring range and accuracy
Range of incidence angle / (°)	0~90
Accuracy of incident angle / (°)	0.01
Rotation range of turntable / (°)	0~360
Accuracy of turntable rotation / (°)	0.01
Linear displacement range of turntable / m	4
Accuracy of linear displacement of turntable / mm	0.01
Frequency range / GHz	0.8~20
Signal-to-noise ratio / dB	-60
Imaging mode	SpotLight/StripMap/ISAR/Dual antenna InSAR imaging mode

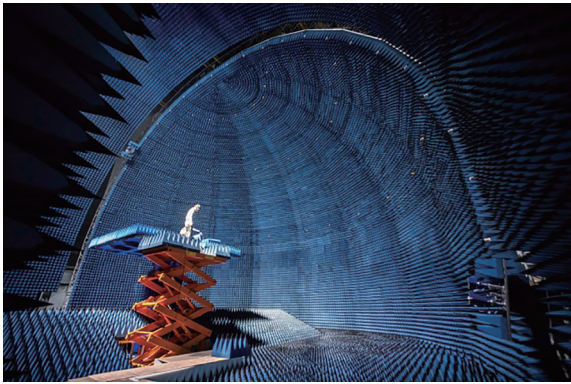


图 1 微波特性测量与仿真科学实验平台内景

Fig. 1 Interior view of microwave characteristic measurement and simulation imaging science experiment platform

2.2 实验设计

实验设计包括目标采集、场景布设、测量参数设置、平台定标、目标测量、数据处理等,具体测量流程如图 2 所示。

1) 采集样本,进行场景布设。浙江省湖州市德清县野生芦苇较多,多生长在江河湖泽、池塘沟渠沿岸和低湿地地带。德清县也种植了大量茭白,是当地主要的经济作物。确定好采集地点后,本课题组连根带土采集了 500 余株芦苇,20 余株茭白。为了尽可能地让样本接近自然场景,并使其长时间存活,我们准备了一个长为 60 cm、宽为 40 cm、高为 38 cm 的塑料筐,并将芦苇和茭白分株分装在塑料筐里。芦苇生长较为密集,以簇状种植于每个塑料筐,以尽可能接近自然场景下的样本(参数如表 2 所示),形成 1.8 m × 1.6 m 的场景,最后将其吊装到平台上(如图 3 所示)。茭白植株粗大,按照种植间隔每个塑料筐里放置一株。

2) 在参数设计方面,主要测量了 2~17 GHz 范围内不同入射角、不同方位角下芦苇和茭白的散射特性。其中仿真成像实验的入射角测量范围为

15°~55°,步长为 10°,方位角测量范围为 -180°~135°,测量步长为 45°;散射特性测量实验的入射角测量范围为 10°~60°,步长为 5°,方位角固定为 0°。频率分成低频(2~7 GHz)和高频(7~17 GHz),其中低频 C 波段中心频率为 5.3 GHz,高频 X 波段和 Ku 波段中心频率分别为 9.6 GHz 和 15 GHz,测量步长均为 25 MHz。

2.3 实验室定标

实际的测量中由于雷达天线或者测量环境的影响,存在误差。实验室测量中需要定标去除相关误差。本实验平台采用了一种针对微波暗室的三目标极化定标算法^[18-19],该算法通过 3 种参考目标对复极化散射矩阵的 12 个误差系数进行标定,其中包括 4 个隔离误差系数、4 个发射误差系数与 4 个接收误差系数^[16]。测量的散射矩阵 $\underline{\mathbf{S}}^m$ 与校正以后目标散射矩阵 $\underline{\mathbf{S}}^c$ 的关系可表示为

$$[\underline{\mathbf{S}}^m] = [\underline{\mathbf{I}}] + [\underline{\mathbf{R}}] * [\underline{\mathbf{S}}^c] * [\underline{\mathbf{T}}], \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{\mathbf{S}}_{HH}^m & \underline{\mathbf{S}}_{HV}^m \\ \underline{\mathbf{S}}_{VH}^m & \underline{\mathbf{S}}_{VV}^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{I}}_{HH} & \underline{\mathbf{I}}_{HV} \\ \underline{\mathbf{I}}_{VH} & \underline{\mathbf{I}}_{VV} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{R}}_{HH} & \underline{\mathbf{R}}_{HV} \\ \underline{\mathbf{R}}_{VH} & \underline{\mathbf{R}}_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{S}}_{HH}^c & \underline{\mathbf{S}}_{HV}^c \\ \underline{\mathbf{S}}_{VH}^c & \underline{\mathbf{S}}_{VV}^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{T}}_{HH} & \underline{\mathbf{T}}_{HV} \\ \underline{\mathbf{T}}_{VH} & \underline{\mathbf{T}}_{VV} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中,下划线表示复数, $\underline{\mathbf{S}}^m$ 表示测量的散射矩阵, $\underline{\mathbf{S}}^c$ 表示校正后的目标散射矩阵, $\underline{\mathbf{R}}$ 矩阵和 $\underline{\mathbf{T}}$ 矩阵表示共极化和交叉极化下发射和接收的转换矩阵, $\underline{\mathbf{I}}$ 表示隔离误差。由(2)式可得,测量的散射矩阵 $\underline{\mathbf{S}}^m$ 包含了 12 个误差项:4 个隔离误差 $\underline{\mathbf{I}}_{\xi\eta}$,4 个发射误差 $\underline{\mathbf{T}}_{\xi\eta}$,4 个接收误差 $\underline{\mathbf{R}}_{\xi\eta}$,其中 ξ, η 表示极化状态。4 个 $\underline{\mathbf{I}}_{\xi\eta}$ 误差项可以通过测量空屋计算得到,剩余 8 个误差项 $\underline{\mathbf{T}}_{\xi\eta}$ 和 $\underline{\mathbf{R}}_{\xi\eta}$ 可以通过测量额外的两个定标目标获得,每一个定标目标都可以计算 4 个误差项。

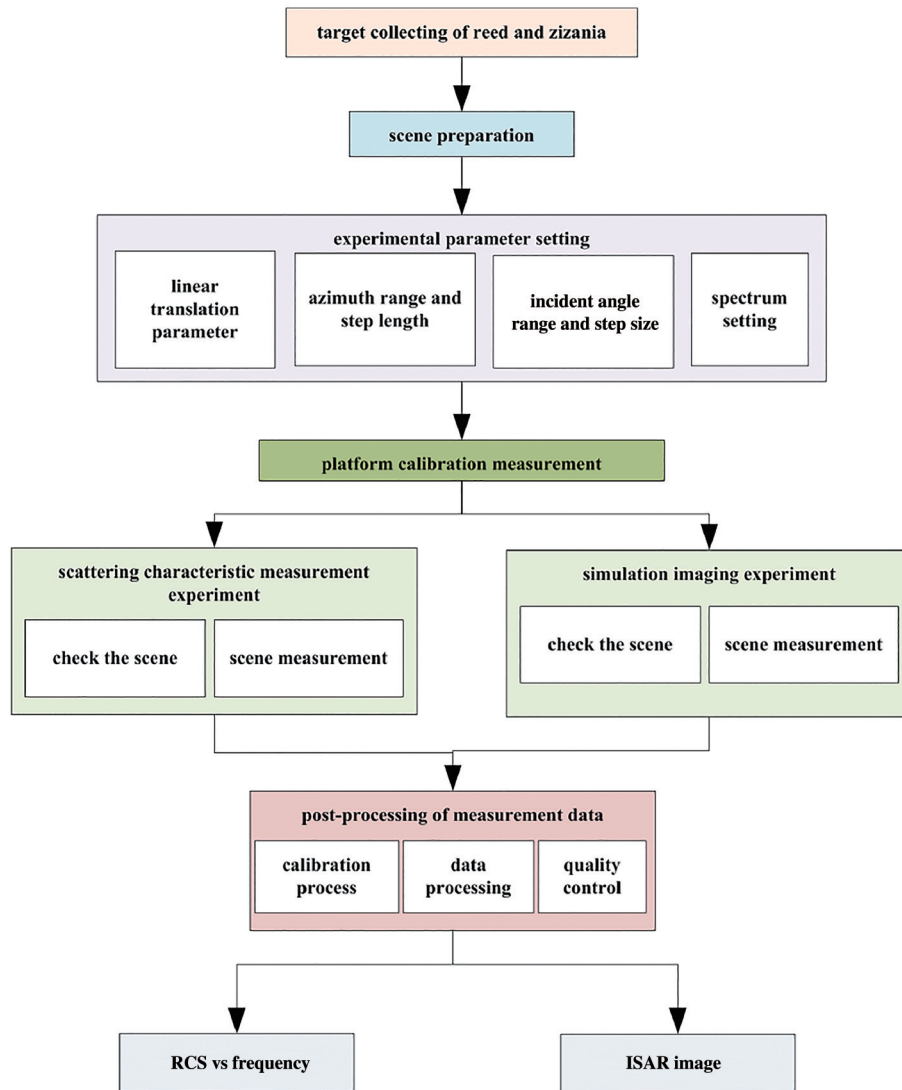


图 2 测量流程示意图

Fig. 2 Diagram of measurement flow

表 2 芦苇和茭白场景样本参数

Table 2 Parameters of reed and zizania

Parameter	Reed	Zizania
Average plant height /cm	274.5	183.5
Moisture /%	60	90
Density /m ⁻²	About 100	About 4

一般来说,用来计算误差系数矩阵的参考目标必须符合以下要求:1)散射矢量线性独立;2)整个频率范围都可以准确计算且稳定;3)硬件可复制。在本实验室的定标过程中,主要采用以下三类^[16]:

1) 已知半径的金属圆盘,其圆盘平面垂直于雷达天线入射方向;

2) 90°二面角金属反射器,其二面角的棱平行于雷达天线的垂直极化方向;

3) 45°二面角金属反射器,它是沿垂直于天线的平面旋转45°的二面角反射器。

因此,在测量前我们会选择标准的定标器件,如角反射器、金属球、圆盘等进行测量,然后测量空屋,根据定标器和空屋的测量数据计算出定标系数,然后进行定标系数自验证,确定定标系数是否合理,符合精度的定标系数即可用于后续的实验数据定标,否则重新进行定标系数计算。

目标场景数据中去除空屋影响后生成的数据为校正数据,将前面计算的定标系数用于定标校正数据。只有定标后的数据才可以用于各种成像和分析。如图4和图5所示,分别为定标处理后的芦苇场景和茭白场景后向散射RCS成像图,图中单位dBsm表示对平方米取对数,即 $\sigma \text{ dBsm} = 10 \lg \sigma$,下同。

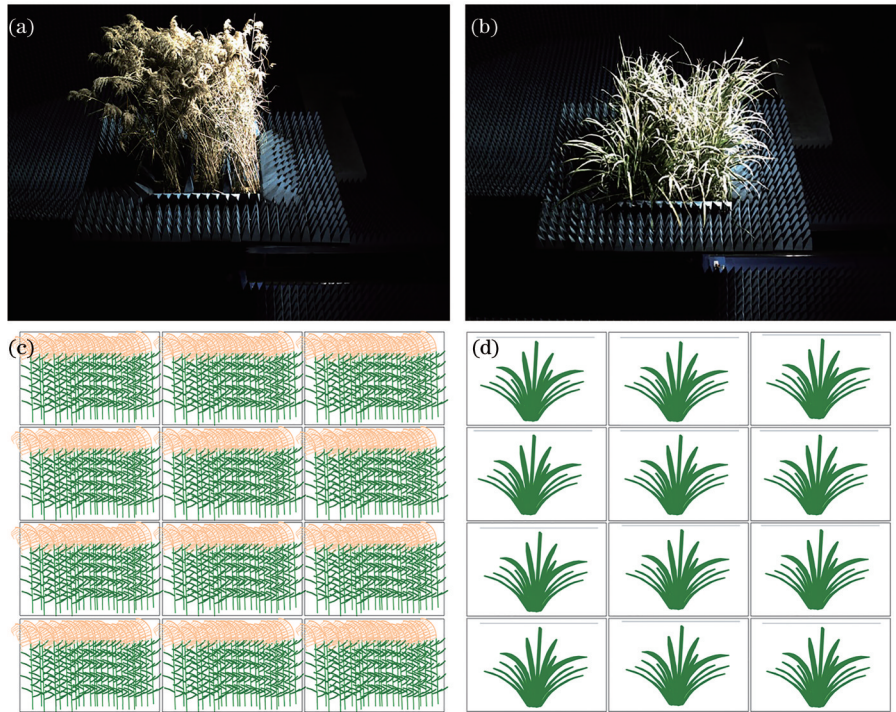


图 3 芦苇和茭白测量场景示意图。(a) 芦苇场景图; (b) 茭白场景图; (c) 芦苇场景结构示意图; (d) 茭白场景结构示意图
 Fig. 3 Measuring schematic diagrams of reed and zizania. (a) Reed scene; (b) zizania scene; (c) structure diagram of reed scene; (d) structure diagram of zizania scene

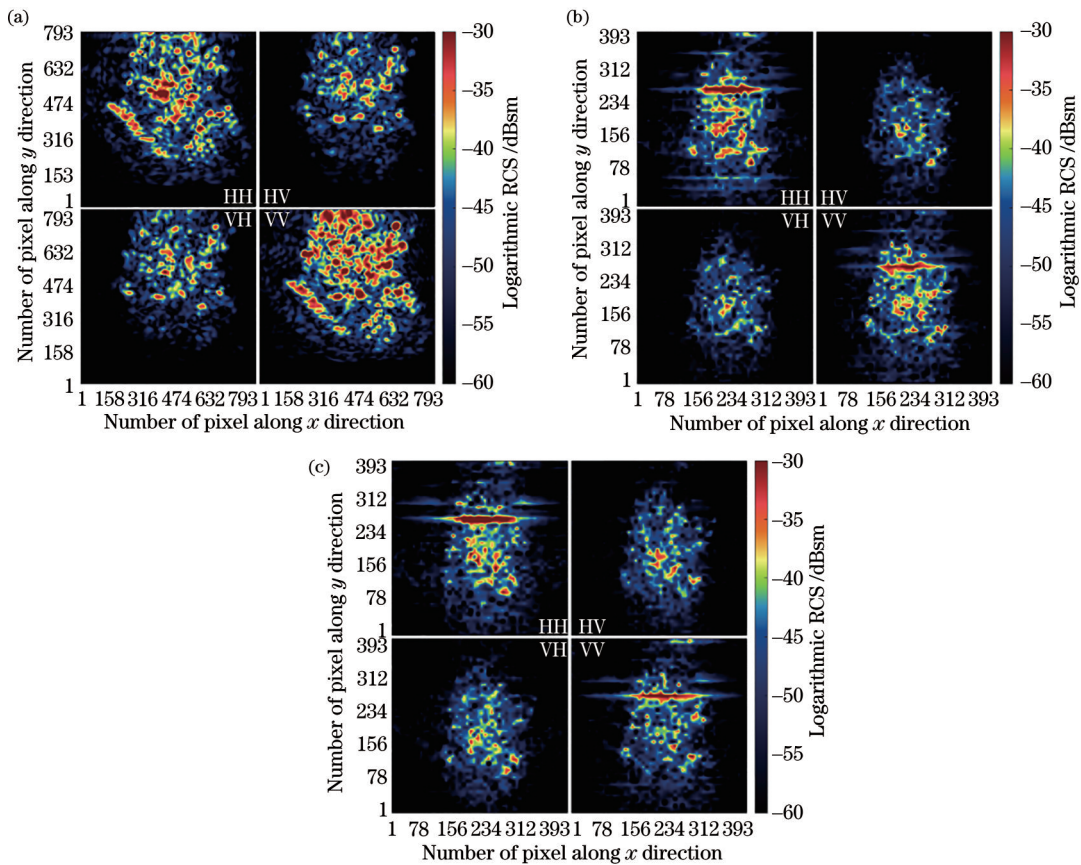


图 4 45°入射角、-135°方位角芦苇成像图。(a) C 波段; (b) X 波段; (c) Ku 波段
 Fig. 4 Imaging of reed at 45° incidence angle and -135° azimuth. (a) C band; (b) X band; (c) Ku band

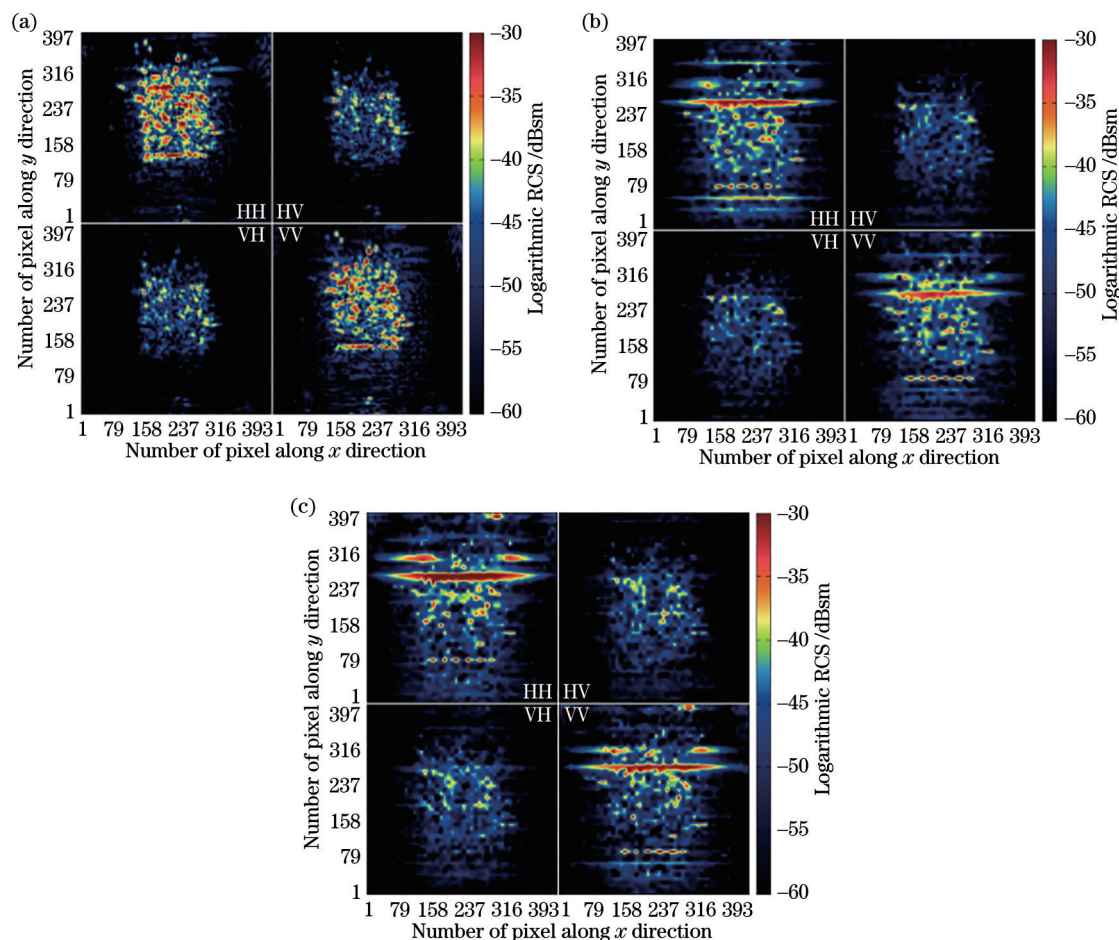


图 5 45°入射角、0°方位角茭白成像图。(a) C波段;(b) X波段;(c) Ku波段

Fig. 5 Imaging of zizania at 45° incidence angle and 0° azimuth. (a) C band; (b) X band; (c) Ku band

3 结果与讨论

3.1 实验室测量精度评价

利用实验室中半径为 32 cm 的定标金属球,以 45°入射角、0°方位角为例,基于 LAMP 测量了不同频率下金属球的 RCS,并与 FEKO 模型仿真得到的 RCS 结果进行了对比。如图 6 所示,金属球的同极

化 RCS 测量值在 2.5~18 GHz 的范围内精度较高,与 Mie 级数解的均方根误差分别为 1.09 dBsm(HH 极化)和 1.00 dBsm(VV 极化)^[16]。这主要是因为边界频段天线性能有所下降,故在后续芦苇和茭白散射分析中,本研究采用 2~17 GHz 频率范围内精度较高的测量数据。

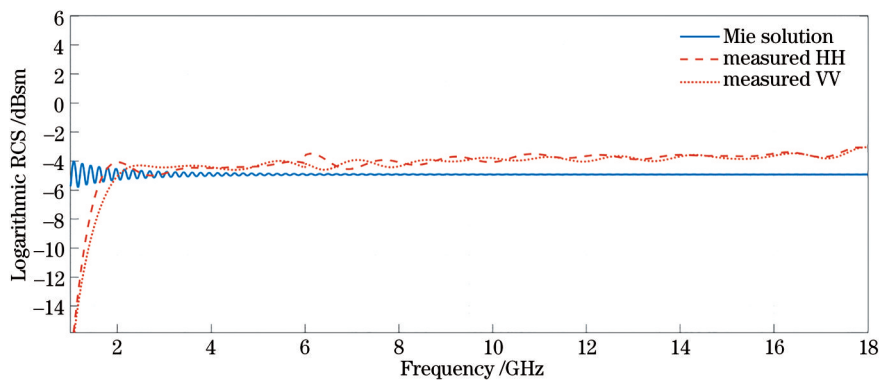


图 6 半径为 32 cm 的金属球的 RCS 测量值与 Mie 级数解^[16]

Fig. 6 Comparison of RCS of the medal ball between the measurement result by LAMP and the prediction by Mie series^[16]

3.2 全要素连续波谱芦苇、茭白散射特性分析

3.2.1 芦苇散射特性

从散射数据中挑选了间隔为 10° 的入射角,选用 5.3 GHz、9.6 GHz、15 GHz 三个频点附近的数据作平均处理,处理后的结果如图 7 所示,从中可以看出,不同波段不同入射角的芦苇 RCS 值各不相同。C 波段上,HH 和 VV 极化的 RCS 值明显大于 HV 极化,HH 和 VV 极化 RCS 值特别接近,相差不超过 2 dBsm,并且不同极化的 RCS 值随入射角的变化比较平缓。当入射角为 30° 时,不同极化的 RCS 的差

异相对较大,此时,入射的微波电磁波与芦苇冠层的作用路程最长,能最佳探测芦苇的变化。X 波段上,HH 和 VV 极化的 RCS 值大于 HV 极化,并且差值随着入射角的增加先减小后增大,HH 极化的 RCS 值比 VV 极化大 2 dBsm~5 dBsm, HV 极化的 RCS 值随入射角增加缓慢减少。Ku 波段上,除了 30° 入射角处 3 个极化的 RCS 值比较接近,其他入射角下极化方式按照 RCS 从大到小的排序为 HH、VV、HV,并且当入射角超过 30° 时,同极化的 RCS 值与交叉极化的 RCS 值差异明显。

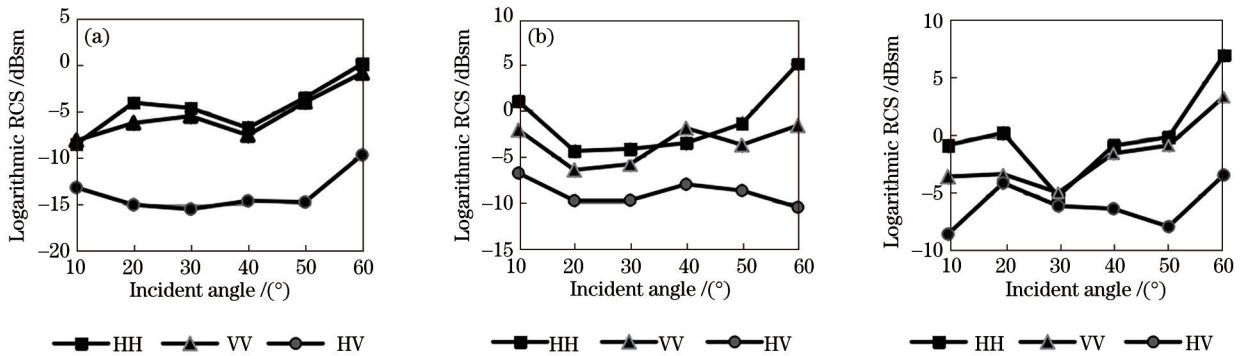


图 7 不同波段不同入射角 0° 方位角芦苇的 RCS 测量值。(a) C 波段(5.3 GHz);(b) X 波段(9.6 GHz);(c) Ku 波段(15 GHz)
Fig. 7 Measurement results of reed RCS at different incident angles and 0° azimuth angle in different bands. (a) C band (5.3 GHz); (b) X band (9.6 GHz); (c) Ku band (15 GHz)

从不同频率的 RCS 值可以看出,C 波段所有极化 RCS 值稍小于 X 波段,X 波段又稍小于 Ku 波段,这是因为 C 波段波长较长,穿透能力强于 X 波段和 Ku 波段,穿透冠层后经下垫面的散射增加,能量衰减增多,并且下垫面为水面,比较光滑,后向散射能量小,回波能量弱一些^[9]。从不同极化方式进行比较,可以看出无论哪个波段,极化方式按照 RCS 从大到小的排序都为 HH、VV、HV,HH 极化的 RCS 值比 VV 极化大 1 dBsm~5 dBsm,这是因为:芦苇细高,垂直结构较好,具有较强的水平极化后向散射,VV 极化的 RCS 值比 HV 极化大 5 dBsm~10 dBsm;并且 C 波段上同极化与交叉极化的 RCS 值差异要明显大于 X 波段和 Ku 波段。Zhang 等^[20]从 Envisat ASAR 卫星观测了辽河三角洲芦苇沼泽后向散射系数,从中可以看出 HH 极化的后向散射系数大于 HV 极化。

25° 入射角情况下,不同频率对应的各种极化 RCS 值有差异(图 8),低频时极化方式按照 RCS 从大到小的排序为 HH、VV、HV(VH),超过 13 GHz 时 4 种极化的 RCS 值比较接近。HH 极化的 RCS 值保持在 -5 dBsm 左右, HV(VH)极化的 RCS 值随

频率增加呈先减小后增加的趋势。 35° 入射角情况下,测量的频率范围内,HH 极化和 VV 极化的 RCS 值特别接近,二者变化趋势比较一致,RCS 值在低频波段保持为 -5 dBsm~ 0 dBsm,部分高频波段的 RCS 值大于 0 dBsm,并且 HH 和 VV 极化的 RCS 值始终明显大于 HV(VH)极化。 45° 入射角情况下,不同极化的 RCS 值随频率增加先减小后缓慢增加,在约 6.4 GHz 时 RCS 值最小。低频部分同极化和交叉极化的差异比高频部分明显。 55° 入射角情况下,HH 和 VV 极化的 RCS 值在低频时比较接近,高频时 HH 略大于 VV, HV 和 VH 极化在 3~6 GHz 的散射曲线变化幅度明显。

相比较而言,当入射角为 35° 和 45° 时,HH 和 VV 的 RCS 值比较接近,而入射角为 55° 时 HH 和 VV 极化 RCS 值的差异在高频部分比较明显。同极化的 RCS 值基本都比交叉极化的要大,并且在低频(4~7 GHz)部分比高频(7~18 GHz)部分大出的差值更明显。四种极化中 HV(VH)极化 RCS 值在低频部分(3~7 GHz)较小,高频部分随入射角增加 RCS 值有所增加。对比几种不同入射角散射曲线可以看出,如果利用同极化和交叉极化之间的差异

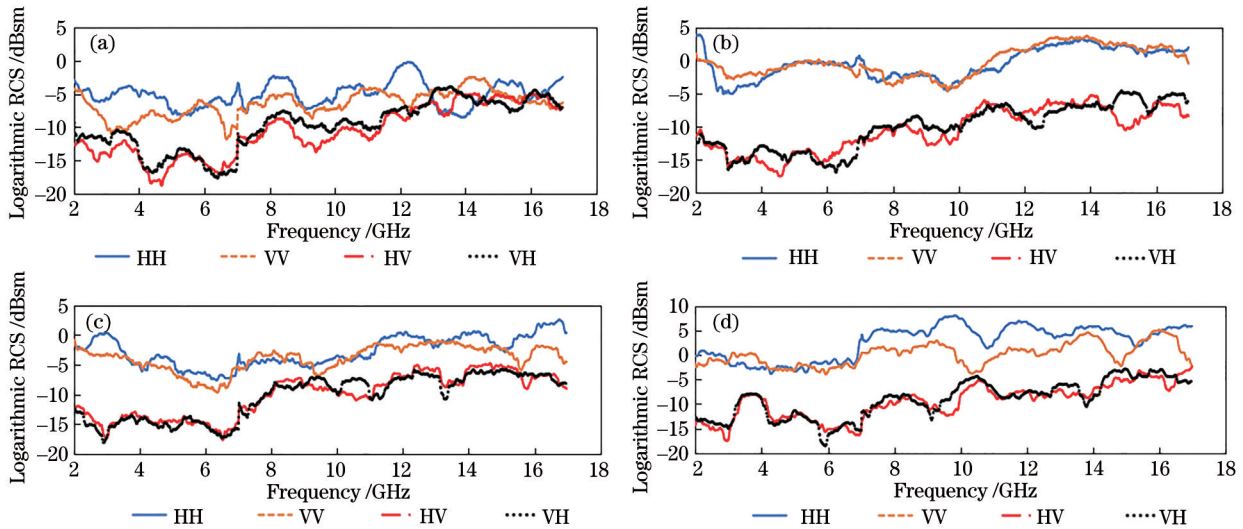


图 8 芦苇 25°~55°入射角、0°方位角 RCS 散射曲线。(a) 25°入射角; (b) 35°入射角; (c) 45°入射角; (d) 55°入射角
 Fig. 8 RCS scattering curves of reed at 25°-55° incident angle and 0° azimuth angle. (a) 25° incident angle; (b) 35° incident angle; (c) 45° incident angle; (d) 55° incident angle

进行芦苇监测, 低频部分比高频部分更适合并且当入射角为 35° 时效果最佳。

3.2.2 茭白散射特性

与芦苇分析方法一致, 从散射数据中挑选了间隔为 10° 的入射角, 分析了不同频率不同入射角茭白的散射特征, 如图 9 所示。C 波段, HH 极化和 VV 极化的 RCS 值比较接近, 在 30°、40° 和 50° 入射角 HH 极化的 RCS 值略大于 VV 极化, 并且随入射

角增加 HH 和 VV 极化的 RCS 值呈增大的趋势, HV 极化的 RCS 值随入射角增加而减小; X 波段, HH 和 VV 极化的 RCS 值比 HV 极化大, HH 和 VV 极化在入射角为 20° 和 60° 时的 RCS 值较大, HV 极化在入射角为 30° 时的 RCS 值最大; Ku 波段, 总体上不同极化的 RCS 值随入射角增加而增大, HH 和 VV 极化的 RCS 值随入射角变化幅度比 HV 极化的要大。

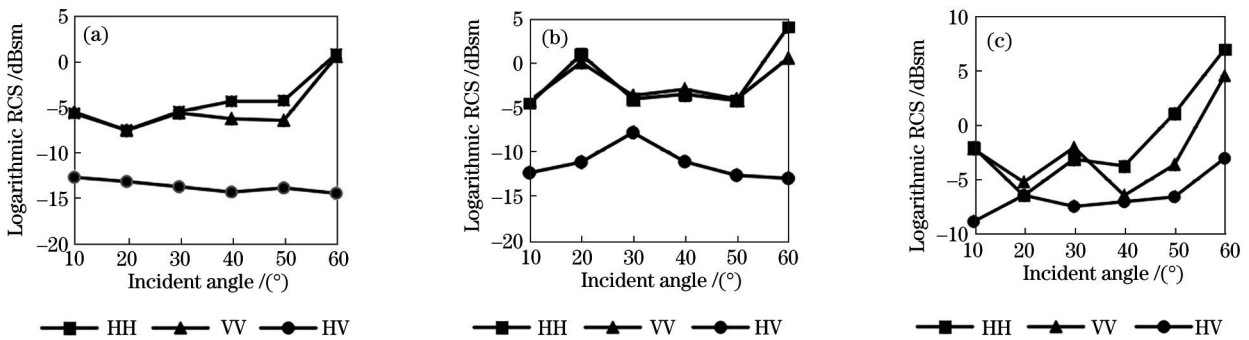


图 9 不同波段不同入射角 0° 方位角茭白的 RCS 测量值。(a) C 波段 (5.3 GHz); (b) X 波段 (9.6 GHz); (c) Ku 波段 (15 GHz)
 Fig. 9 Measurement results of zizania RCS at different incident angles and 0° azimuth angle in different bands. (a) C band (5.3 GHz); (b) X band (9.6 GHz); (c) Ku band (15 GHz)

与芦苇一致, C、X、Ku 三种波段中, 茭白 HH 和 VV 极化的 RCS 值均大于 HV 极化, 并且 HH、VV 极化与 HV 极化下 RCS 的差值在 C 波段最大, X 波段次之, Ku 波段最小。Ku 波段下, RCS 随入射角变化幅度最大, X 波段次之, C 波段最小。与芦苇不同的是, 茭白 HH 和 VV 极化的 RCS 差值特别小, 这是

因为茭白浓密叶片宽而长并且倾角大, 形状呈现类抛物线弧形 (图 3), HH 和 VV 极化的 RCS 衰减相当, 而芦苇细高, 叶片窄而短 (图 3), 垂直结构较好, HH 极化的 RCS 衰减比 VV 极化的 RCS 衰减小。这种极化差异可以用来分类并识别不同形态的湿地地物。

不同入射角茭白散射曲线经光滑处理后如图 10 所示, 25°入射角时, 2~10 GHz 频段 4 个极化的 RCS 值随频率增加缓慢增加, 并且交叉极化增加的幅度比同极化的要大, 6.5 GHz 处同极化的 RCS 值与交叉极化的 RCS 值的差值最大。35°入射角下同极化与交叉极化的 RCS 值相差比较明显, 高频部分的 RCS 值略大于低频部分。45°入射

角下同极化和交叉极化的 RCS 曲线值先缓慢减小再慢慢增加, 在 7 GHz 时二者差异最小, 低频部分同极化和交叉极化的 RCS 差值比高频部分要明显。55°入射角下 8.4~9.2 GHz 时 HH 极化的 RCS 值小于 VV 极化, 其他频段 HH 极化的 RCS 值明显大于 VV 极化, 4 种极化的 RCS 值随频率增加均缓慢增大。

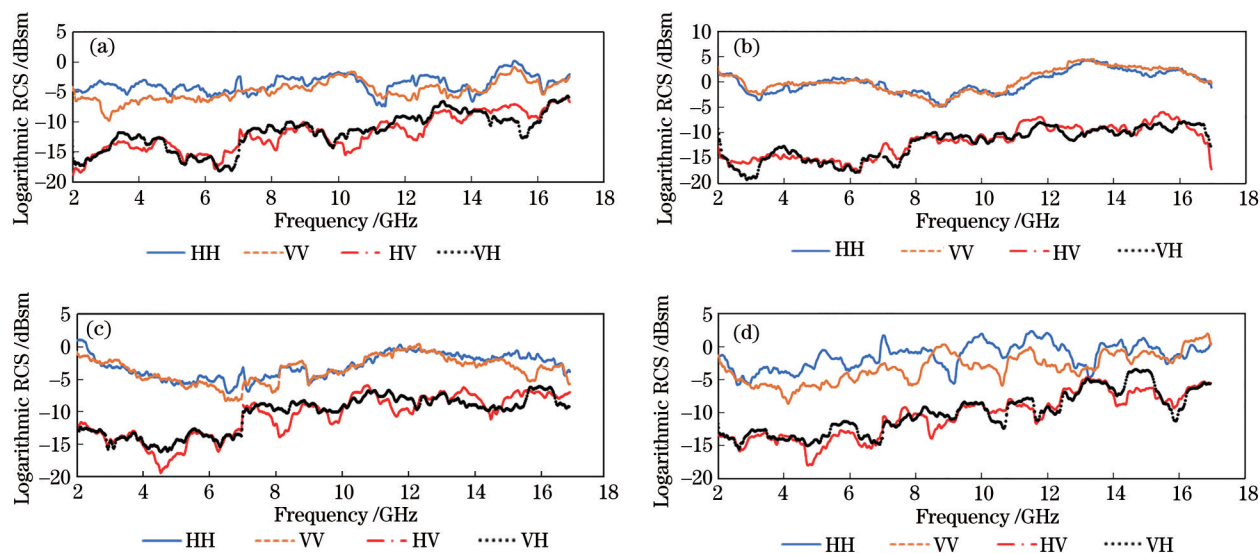


图 10 茭白 25°~55°入射角 0°方位角 RCS 散射曲线。(a) 25°入射角;(b) 35°入射角;(c) 45°入射角;(d) 55°入射角

Fig. 10 RCS scattering curves of zizania at 25°~55° incident angle and 0° azimuth angle. (a) 25° incident angle; (b) 35° incident angle; (c) 45° incident angle; (d) 55° incident angle

无论哪种入射角, 不同频率下的茭白 RCS 基本保持在 -20 dBsm 到 5 dBsm 左右, 同极化 RCS 值大于交叉极化, 并且当入射角为 35°和 45°时, 茭白在低频(4~7 GHz)部分比高频(7~18 GHz)部分的差值更明显。当入射角为 35°和 45°时, HH 和 VV 极化的 RCS 值比较接近, 入射角为 55°时, HH 与 VV 极化的 RCS 值差异明显。对比几种不同入射角散射曲线可以看出, 如果利用同极化和交叉极化之间 RCS 值的差异进行茭白监测, 低频部分比高频部分更适合并且当入射角为 35°时效果最佳, 如果利用 HH 和 VV 极化之间的差异监测茭白, 55°入射角更适合。

3.3 芦苇和茭白散射特性对比与最优探测模式分析

通过分析芦苇、茭白散射曲线特性发现, 当 35°入射角时, 芦苇和茭白低频部分同极化与交叉极化差异都比较明显。为了更好地分析芦苇和茭白散射特性, 进一步对比分析了 35°入射角不同频点 HH 极化、VV 极化和 HV 极化的 RCS 值, 如表 3 所示。

低频部分, HH 极化和 VV 极化茭白 RCS 值比芦苇的要大, 但基本没超过 3 dBsm, HV 极化上部分频点处芦苇 RCS 值大于茭白 RCS 值, 二者差值比较小。这是由于茭白叶片密集, 含水量大, 当入射角为 35°时大量波束被散射回去, 而芦苇细高, 波束穿透冠层后衰减得多, 散射能量要弱一些。

为了能进一步区分芦苇和茭白, 对比分析了不同入射角不同频段芦苇和茭白的 HH 极化的 RCS 值、VV 极化的 RCS 值、两种极化下 RCS 比值曲线图和散点图。结果发现, 当入射角为 20°时, 在 9~17 GHz 频率内芦苇 VH 极化的 RCS 明显大于茭白 [图 11(a)], 利用 VH 极化可以直接区分芦苇和茭白。同时在 VH 的 RCS 值和 HH 与 VV 极化的 RCS 比值散点图上也能区分出二者。茭白的 VH 极化的 RCS 值小, HH 和 VV 极化的 RCS 比值比芦苇略大, 所以在散点图上位于芦苇的左侧。

当入射角为 25°时, 芦苇和茭白 VV 极化和 VH 极化的 RCS 值散点图 [图 12(a)] 在 7.8~17 GHz 频率范围内分布较好, 芦苇 VV 和 VH 极化 RCS 值的

表 3 芦苇和茭白 35°入射角 0°方位角部分低频频点 RCS 值对比表

Table 3 RCS comparison table of reed and zizania at 35° incident angle and 0° azimuth angle in low frequency points

Frequency / GHz	Logarithmic RCS_HH / dBsm			Logarithmic RCS_VV / dBsm			Logarithmic RCS_HV / dBsm		
	Reed	Ziaznia	Difference	Reed	Ziaznia	Difference	Reed	Ziaznia	Difference
2.0	3.80	1.24	2.56	1.18	2.94	-1.76	-11.39	-12.83	1.44
2.5	-0.82	1.00	-1.82	-0.23	1.20	-1.43	-13.31	-15.80	2.49
3.0	-4.54	-2.58	-1.96	-2.36	-1.86	-0.50	-16.49	-15.62	-0.87
3.5	-3.69	-2.32	-1.37	-2.03	-1.10	-0.93	-15.15	-14.38	-0.76
4.0	-3.02	-1.17	-1.85	-1.91	-0.52	-1.39	-15.40	-14.38	-1.03
4.5	-1.56	-1.32	-0.25	-1.29	-0.53	-0.76	-17.13	-14.82	-2.31
5.0	-0.26	-0.13	-0.13	-0.66	-0.22	-0.45	-13.86	-15.21	1.35
5.5	-0.39	0.80	-1.18	-0.01	-0.10	0.09	-13.73	-15.43	1.69
6.0	-0.47	0.52	-0.99	-0.35	0.29	-0.65	-15.22	-16.29	1.07
6.5	-0.36	-0.20	-0.16	-0.83	0.43	-1.26	-12.41	-15.41	3.01
7.0	0.49	0.81	-0.32	-0.56	-1.85	1.29	-11.61	-12.15	0.54

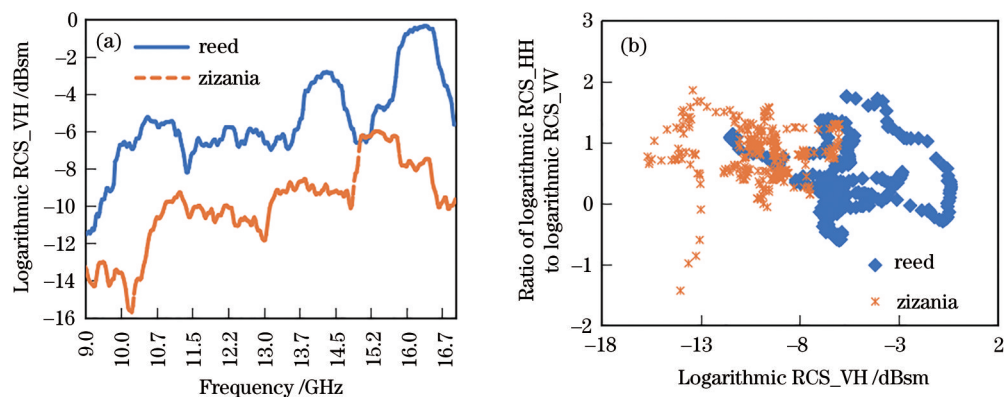


图 11 20°入射角 0°方位角 9~17 GHz 芦苇和茭白 RCS 图。(a) VH 极化 RCS 曲线图；(b) HH 与 VV 极化的 RCS 比值随 VH 极化 RCS 变化的散点图

Fig. 11 RCS images of reed and zizania at 20° incident angle and 0° azimuth angle from 9 to 17 GHz. (a) Logarithmic RCS_VH; (b) scatter plots of ratio of logarithmic RCS_HH to logarithmic RCS_VV with logarithmic RCS_VH

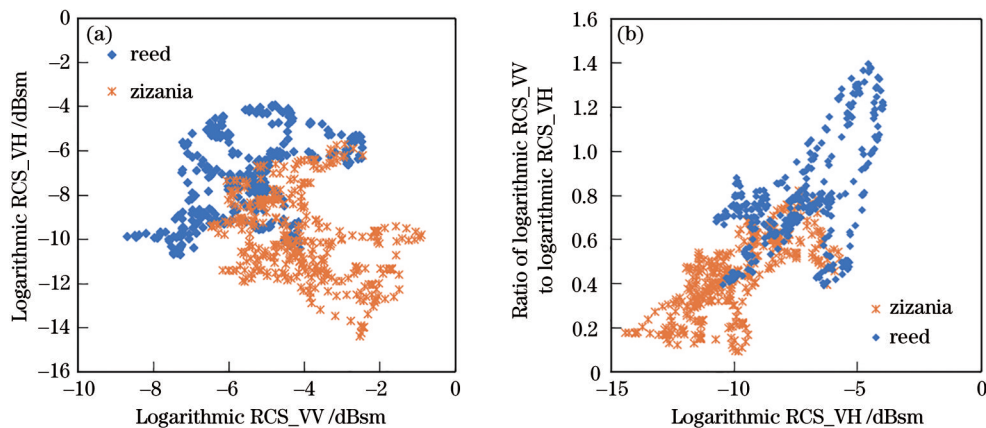


图 12 25°入射角 0°方位角 7.8~17 GHz 芦苇和茭白 RCS 二维散点图。(a) VV 和 VH 极化下 RCS 的散点图；(b) VV 与 VH 极化的 RCS 比值随 VH 极化 RCS 变化的散点图

Fig. 12 Two dimensional RCS scatter plots of reed and zizania at 25° incident angle and 0° azimuth angle from 7.8 to 17 GHz. (a) RCS scatter plots under VV and VH; (b) scatter plots of ratio of logarithmic RCS_VV to logarithmic RCS_VH with logarithmic RCS_VH

散点分布位于茭白的左上方,基于此我们基本能区分二者。图 12(b)为芦苇和茭白 VH 极化 RCS 值和 VV 与 VH 极化的 RCS 比值散点图,茭白的 VH 极化 RCS 值小于芦苇, VV 与 VH 极化的 RCS 比值也小于芦苇,在散点图上表现为茭白位于芦苇的左下方,基于此我们基本能区分二者。

当入射角为 55° 时,高频部分(7~17 GHz)通过 HH 极化和 VV 极化 RCS 值的散点图可以明显区分

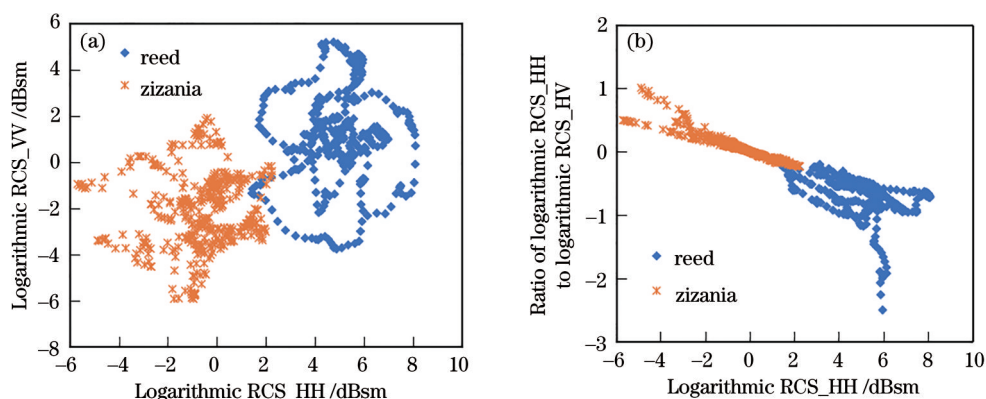


图 13 55° 入射角 0° 方位角 7~17 GHz 芦苇和茭白 RCS 二维散点图。(a) HH 和 VV 散点图; (b) HH 与 HV 极化的 RCS 比值随 HH 极化 RCS 变化的散点图

Fig. 13 Two dimensional RCS scatter plots of reed and zizania with incident angle of 55° and azimuth angle of 0° in frequency of 7~17 GHz. (a) RCS scatter plots under HH and VV; (b) scatter plots of ratio of logarithmic RCS_HH to logarithmic RCS_HV with logarithmic RCS_HH

根据上述分析,可以看出:当入射角为 20° 时,利用 9~17 GHz 内芦苇和茭白 VH 极化 RCS 值的差异基本可以直接区分二者;当入射角为 25° 时,利用 7.8~17 GHz 内 VV 极化和 VH 极化 RCS 散射特征值基本可以区分二者;当入射角为 55° 时,利用 7~17 GHz 内 HH 极化和 VV 极化 RCS 散射特征值可以很好地区分二者。

4 结 论

利用微波特性测量与仿真成像科学实验平台,获取了芦苇和茭白两种湿地植被全要素 2~17 GHz 的连续波谱散射曲线和二维仿真图像,分析了二者的极化散射特性及最优探测模式。

结果表明:对于不同波段,芦苇和茭白所有极化的 RCS 值 Ku 波段最大、X 波段次之、C 波段最小, C 波段上同极化与交叉极化 RCS 值差异要明显大于 X 波段和 Ku 波段,利用同极化和交叉极化差异监测芦苇或茭白时 C 波段最适宜;对于不同极化方式,3 个波段 HH 极化和 VV 极化的 RCS 值都比较接近,并且同极化的 RCS 值远大于交叉极化;对于不

芦苇和茭白。从图 13(a)中可以看出,茭白的 HH 极化和 VV 极化 RCS 值小于芦苇,在散点图上位于芦苇的左下侧。同时,还发现同样入射角同样频率下,如图 13(b)所示,芦苇和茭白的 HH 极化 RCS 值和 HH 与 HV 极化的 RCS 比值的散点图分布比较规整,茭白的 HH 极化 RCS 值小于芦苇,但茭白的 HH 与 HV 极化的 RCS 比值大于芦苇,所以在散点图上位于芦苇的左上侧,二者能明显区分开来。

同入射角,当入射角为 35° 时,芦苇、茭白同极化和交叉极化之间的 RCS 差异比较明显,并且低频部分差异比高频部分更明显,当入射角为 55° 时芦苇在高频部分而茭白在整个测量频段时 HH 和 VV 极化 RCS 值差异明显,当入射角为 35° 和 45° 时 HH 和 VV 极化 RCS 值比较接近。探测模式方面:当入射角为 20° 时,在 9~17 GHz 内利用芦苇和茭白 VH 极化 RCS 值的差异可以直接区分二者;当入射角为 25° 时,在 7.8~17 GHz 内利用 VV 极化和 VH 极化 RCS 值基本可以区分二者;当入射角为 55° 时,在 7~17 GHz 通过 HH 极化和 VV 极化 RCS 值特征可以明显区分二者。

本研究分析了芦苇和茭白两种典型湿地植物分别处于花期和收割期的散射特性,缺乏对时域散射特性的分析,后续我们将采集不同生长期的样本,用于分析时域散射特性。受室内条件制约,实验测量中场景布设与自然状态还存在一定的差异,这也会对测量结果造成一定的影响。

参 考 文 献

- [1] Wei Z Q. Synthetic aperture radar satellite[M]. Beijing: Science Press, 2001: 7-8.
魏钟铨. 合成孔径雷达卫星[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 7-8.
- [2] Henderson F M, Lewis A J. Radar detection of wetland ecosystems: a review[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(20): 5809-5835.
- [3] Zhao L P. The scattering characteristics of the ground objects-introduced in the “imaging radar microwave remote sensing knowledge” [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 1991, 3(4): 60-63.
赵立平. 地物的散射特性: “成像雷达微波遥感知识”介绍之四[J]. 国土资源遥感, 1991, 3(4): 60-63.
- [4] Ulaby F T, Dobson M C. Handbook of radar scattering statistics for terrain[M]. Canada: Artech House, 1989.
- [5] le Toan T, Laur H, Mougin E, et al. Multitemporal and dual-polarization observations of agricultural vegetation covers by X-band SAR images[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1989, 27(6): 709-718.
- [6] Lacomme P, Hardange J P, Marchais J C, et al. Air and spaceborne radar systems: an introduction[M]. New York: William Andrew Publishing, 2001.
- [7] Rao K S, Rao Y S, Wang J R. Frequency dependence of polarization phase difference[J]. International Journal of Remote Sensing, 1995, 16(18): 3605-3617.
- [8] Kim S, Kim B, Kong Y, et al. Radar backscattering measurements of rice crop using X-band scatterometer [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(3): 1467-1471.
- [9] Inoue Y, Kurosu T, Maeno H, et al. Season-long daily measurements of multifrequency (Ka, Ku, X, C, and L) and full-polarization backscatter signatures over paddy rice field and their relationship with biological variables[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 81(2/3): 194-204.
- [10] Lim K S, Koo V C, Ewe H T. Multi-angular scatterometer measurements for various stages of rice growth[J]. Progress in Electromagnetics Research, 2008, 83: 385-396.
- [11] Lim K S, Koay J Y, Koo V C, et al. High angular resolution measurements of the monostatic backscattering coefficient of rice fields[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2009, 23(1): 1-10.
- [12] Jia M Q. Research on rice microwave scattering mechanism and parameter inversion[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013: 55-60.
贾明权. 水稻微波散射特性研究及参数反演[D]. 成都: 电子科技大学, 2013: 55-60.
- [13] Wen F R. An experimental study on backscattering characteristics from rice and wheat[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1994, 9(1): 36-47.
温芳茹. 水稻、小麦后向散射特性的实验研究[J]. 电波科学学报, 1994, 9(1): 36-47.
- [14] Tang M, Ji J K, Ren K, et al. An analysis of backscattering characteristics with experimental results for vegetation[J]. Chinese Journal of Radio Science, 1996, 11(1): 89-95.
汤明, 吉健康, 任康, 等. 植被散射实验数据的特性分析[J]. 电波科学学报, 1996, 11(1): 89-95.
- [15] Xu C L, Chen Y, Jia M Q, et al. Measurement and analysis of backscattering properties on typical surface features[J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(7): 810-816.
徐春亮, 陈彦, 贾明权, 等. 典型地物后向散射特性的测量与分析[J]. 地球科学进展, 2009, 24(7): 810-816.
- [16] Shao Y, Gong H Z, Tian W, et al. Experiment of measuring targets' full-parameters microwave properties [J]. Journal of Remote Sensing, 2021, 25(1): 323-331.
邵芸, 宫华泽, 田维, 等. 微波目标散射特性全要素测量试验[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 323-331.
- [17] Wang X C. Microwave scattering measurement analysis and modeling for sea surface simulation scene under controllable environment[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 29-45.
王晓晨. 可控环境下海面仿真场景微波散射测量分析与建模[D]. 北京: 中国科学院大学, 2019: 29-45.
- [18] Wiesbeck W, Kahny D. Single reference, three target calibration and error correction for monostatic, polarimetric free space measurements[J]. Proceedings of the IEEE, 1991, 79(10): 1551-1558.
- [19] Wiesbeck W, Riegger S. A complete error model for free space polarimetric measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1991, 39(8): 1105-1111.
- [20] Zhang M M, Li Z, Tian B S, et al. The backscattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: a case study [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2016, 45: 1-13.