doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.05.027

冬笋-土壤电磁耦合模型构建与微波探测频率规律研究

叶大鹏[1,2]　刘永强[1,2]　赵　杰[1,2]　彭世龙[1]　余锦旭[1]　谢立敏[1,2]
(1. 福建农林大学机电工程学院, 福州 350002; 2. 福建省农业信息感知技术重点实验室, 福州 350002)

摘要: 微波探测技术因高效、非侵入、成本低等特性,在冬笋探测领域具有适用性。为了明确冬笋探测过程中微波信号的最佳中心频率,构建了冬笋-土壤电磁耦合模型,对微波探测频率变化规律开展研究。首先,采用 E5080B ENA 型矢量网络分析仪进行冬笋、土壤介电特性试验,剖析信号频率对冬笋以及不同含水率土壤介电特性的影响。同时,运用 ANSYS HFSS 15.0 仿真软件设计出工作频率在 1.5 ~ 2.0 GHz 范围的背腔式蝶形天线。根据在该频率范围内不同含水率土壤对应的介电常数,建立冬笋-土壤电磁耦合模型。基于该模型,对冬笋含水率为 86.82%,土壤含水率分别为 17%、20%、23%、26%、29%时进行了仿真对比试验,探究 S_{21} 随介质变化的响应特性。研究结果显示:随着土壤含水率变大,S_{21} 变小、信号损耗变大,即冬笋对天线发射的能量信号吸收能力变强,能更有效地区分有笋、无笋的回波信号;同时,由于天线在 1.6 GHz 频率下的传输损耗最高,因此最佳中心频率为 1.6 GHz。

关键词: 冬笋; 土壤; 介电特性; 信号频率; 耦合模型
中图分类号: S23; TN82　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)05-0294-09　　**OSID**:

Construction of Winter Bamboo Shoots – Soil Electromagnetism Coupling Model and Rules of Microwave Detection Frequencies

YE Dapeng[1,2]　LIU Yongqiang[1,2]　ZHAO Jie[1,2]　PENG Shilong[1]　YU Jinxu[1]　XIE Limin[1,2]
(1. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Fujian Agriculture and Forestry University*, *Fuzhou* 350002, *China*
2. *Fujian Key Laboratory of Agricultural Information Sensing Technology*, *Fuzhou* 350002, *China*)

Abstract: Microwave detection technology is applicable in the field of winter bamboo shoots detection because of its high efficiency, non-invasiveness, low cost and other characteristics. In order to clarify the optimal center frequency of microwave signals in the process of winter bamboo shoots detection, an electromagnetism coupling model of winter bamboo shoots-soil was constructed, and the change rule of microwave detection frequency was researched. Firstly, the E5080B ENA vector network analyzer was used to test the dielectric properties of winter bamboo shoots and soil, and analyze the influence of signal frequency on the dielectric properties of winter bamboo shoots and soil with different water content. At the same time, ANSYS HFSS 15.0 simulation software was used to design a back-cavity dish antenna with an operating frequency in the range of 1.5 ~ 2.0 GHz. The winter bamboo shoots-soil electromagnetism coupling model was established based on the data of dielectric constants corresponding to soils with different water contents in this frequency range. Based on this model, simulation and comparison tests were carried out for winter bamboo shoots with a water content of 86.82% and soil with water contents of 17%, 20%, 23%, 26%, and 29%, respectively, to investigate the response characteristics of the S_{21} parameter with the variation of dielectric. The results showed that as the soil water content became larger, the S_{21} parameter became smaller and the signal loss became larger, the winter bamboo shoots became more capable of absorbing the energy signals transmitted by the antenna, and it can distinguish the return signals with and without the winter bamboo shoots more efficiently; at the same time, since the antenna had the highest transmission loss at the frequency of 1.6 GHz, the optimal center frequency was 1.6 GHz.

Key words: winter bamboo shoots; soil; dielectric properties; signal frequency; coupling model

收稿日期: 2024-12-10　修回日期: 2025-02-20
基金项目: 福建省林业科技项目(2023FKJ01)、竹全产业链数智化福建省高校工程研究中心开放基金项目(DIWBI202501)和福建农林大学竹产业科技专项(KHP25001A07)
作者简介: 叶大鹏(1971—),男,教授,博士,主要从事农业生物环境监测与控制等研究,E-mail: ydp@fafu.edu.cn
通信作者: 谢立敏(1985—),女,讲师,博士,主要从事非线性系统动力学和机器人运动控制研究,E-mail: lucy_min@163.com

0　引言

冬笋作为一种重要的食用植物，其生长状况与竹林的经济效益[1]和生态环境健康紧密相连。目前冬笋的采收主要依靠有经验的农民进行人工挖取，这种人工采收的方式效率低下，大大限制冬笋产量。并且，未被挖掘的冬笋烂在土里会影响来年竹子的生长发育；同时，盲目地挖掘会破坏植物的根茎，对竹林生态造成破坏[2]。此外，传统的冬笋探测[3]方法存在操作复杂、效率低下等局限性，难以满足实际需求。随着现代技术的发展，微波信号因其非破坏性、穿透能力强、探测精度高[4]等优点，在冬笋探测方面展现出巨大潜力。

微波信号进行地下物质探测时，物质的介电特性对其能量吸收、传递起着重要作用。目前，关于植物和土壤介电特性的研究已取得了一定的进展[5]。然而，现有研究主要集中于蔬菜、水果、小麦和水稻等粮食作物，针对冬笋和竹林地土壤等林业相关物质的介电特性研究还不足。

此外，微波信号在地下传播时，会受到介质的反射折射、散射以及吸收等效应的影响[11]，导致微波信号的衰减和失真。因此，微波信号在不同介质之间的能量传播衰减也值得重视。陈承申等[12]对非衰减和衰减介质的脉冲源模型进行了模拟研究，揭示了地层环境中电磁波传播特点。郑学召等[13]基于麦克斯韦的电磁波理论[14]，提出电磁波在介质中的穿透距离与介质的相对介电常数及电导率有关。由此可见在微波探测冬笋的过程中，冬笋、土壤之间耦合效应与两者的物理特性也将对微波信号产生直接影响[15]。因此，构建精确的冬笋-土壤耦合模型，来反映能量衰减与耦合模型物理特性之间的关系尤为重要。然而，目前针对冬笋和土壤耦合系统中能量衰减问题的研究仍然较少。

综上，本研究通过开口同轴探头法[16]明确冬笋和不同含水率条件下土壤的介电特性，依据冬笋、土壤的介电常数构建冬笋-土壤耦合模型。以此为基础，设计一款背腔式蝶形天线，进而研究能量衰减与耦合模型之间的关系。根据不同耦合模型下的能量衰减情况，确定天线最佳的微波信号探测频率，以实现对地下冬笋的精准识别。

1　冬笋与土壤介电特性试验

1.1　研究目标

在利用微波信号进行地下冬笋探测时，介电特性对冬笋和土壤吸收微波信号能量程度具有重要影响。首先通过研究冬笋和土壤在不同频率范围内的介电常数大小，分析含水率对介电常数的影响，并基于介电常数数据构建冬笋与土壤的耦合模型。随后，利用该耦合模型进行电磁仿真，结合冬笋与土壤在不同频率范围内介电损耗大小的差异，确定区分回波信号能量衰减程度的最佳微波信号中心频率。此外，通过分析回波信号能量的衰减程度，判断地下是否存在冬笋。

1.2　研究方案

首先，通过实际竹林环境获取冬笋与土壤样品，烘干得到冬笋与土壤的自然含水率后，进一步确定冬笋、土壤的试验含水率。其次，通过开口同轴探头法进行冬笋以及土壤的介电特性试验。接着，基于冬笋和不同含水率土壤介电常数的试验数据，利用 ANSYS HFSS 15.0 仿真软件建立冬笋与土壤的耦合模型，同时设计一款背腔式蝶形天线，将天线反射系数 S_{11}、传输系数 S_{21} 与冬笋、土壤的介电损耗大小相结合，最终确定适合冬笋探测器的微波信号中心频率。

1.3　试验材料与仪器

HSP－350B 型电热鼓风干燥箱（安晟能源有限公司）；YH－M6002 型电子天平（上海英衡电子秤有限公司）；304 不锈钢 10 目筛（绍兴英华五金仪器有限公司）；WTS－20A 型卤素水分测定仪（水分范围 0～100%，加温范围 50～180℃，郑州万特电气股份有限公司）；E5080B ENA 型网络分析仪（频率范围 9 kHz～6.5 GHz，N1501A 介电探头套件，是德科技（中国）有限公司）。

1.4　试验样品

1.4.1　冬笋试验样品

冬笋样品来自于福建省福州市永泰县葛岭林场，该地区气候温和湿润，土壤肥沃，适宜冬笋生长。样品采集时间为 12 月至次年 1 月，正值冬笋的最佳采收季节。

所用试验样品于试验前 1 天自竹林地中采收，挖取得到的冬笋数量约为 50 颗，用电子天平（准确至 0.01 g）分别称取每颗冬笋的质量，并置于已知质量的干燥皿中，将干燥皿置于（105 ± 2）℃ 干燥箱内。加热 48 h，加盖取出，于干燥器内冷却至室温，称量。重复加热 1 h 并冷却，直至连续 2 次称量差值不超过 0.05 g，即为恒质量，取最小值。得到所测量的冬笋样品含水率在 85.8% ～88.2% 之间，采摘后的冬笋样品存放在室温（（23 ± 2）℃）实验室，测试前将样品擦拭干净晾干并编号。

1.4.2　土壤试验样品

土壤试验样品同样取自福建省福州市永泰县葛岭林场，取土深度介于 10～15 cm，呈棕红色和硬塑状态，去除表面扰动土后，将土样自然风干、碾碎后

过 2 mm 筛,然后将土样放入(105 ±2)℃烘箱中烘干 24 h,将烘干后的土样装入密封塑料盒保存备用。本文所取得的土壤试验样品基本物理参数为:干密度 1.14 ~1.27 g/cm^3,体积密度 1.57 ~1.72 g/cm^3,自然含水率 25.96% ~27.88%。

1.5 试验方法

1.5.1 冬笋介电特性测量方案

首先预热 E5080B ENA 型矢量网络分析仪,然后按步骤分别校准仪器并设定测量范围[17]。将矢量网络分析仪的采样点数设置为 200,测量信号频率范围设置为 0.001 ~3 GHz。为保证准确性,更换测试样品前对仪器进行重新校准。考虑到环境温度对介电特性影响[18],试验在室温下进行冬笋介电测量。本研究是在冬笋样品赤道位置附近相隔大约 90°均匀选取 4 个测量点,将样品横放在小型支架上,提升支架使样品测量点表皮与垂直向下的探头紧密接触,顺序测量 4 个测点的介电频谱数据,以 4 点处的平均值作为该冬笋样品的最终测量结果。

1.5.2 土壤介电特性测量方案

采用含水率为 17%、20%、23%、26%、29% 的土样各 3 份,将配置好的试验土样装入圆柱管中(配置的试验土样高 50 mm,直径 50.46 mm),并在室内常温下静置 8 h。测量前对 E5080B ENA 型矢量网络分析仪进行校准,并将其采样点数设置为 200,测量信号频率范围设置为 0.001 ~3 GHz,试验在室内常温下进行。

2 试验结果与分析

2.1 冬笋介电特性

经前文试验测量,实际竹林环境中采摘的冬笋含水率相差不大,故本文不进行冬笋含水率对其介电特性影响的相关试验。选取的冬笋试验样品经烘干后测量其含水率为 86.82%。测量冬笋在不同频率下的介电特性变化曲线。图 1 为相对介电常数 ε' 随频率变化曲线,图 2 为介电损耗正切函数 tanδ 随频率变化曲线,且有

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \tag{1}$$

式中 ε''——复介电常数的虚部

δ——介电损耗系数

由图 1 可看出,冬笋的相对介电常数 ε' 均随频率增大而减小,且在低频段减小迅速,在 0.3 GHz 以后减小明显缓慢,在高频段趋于稳定;由图 2 可看出,介电损耗正切函数 tanδ 随频率的增大先减小,而在 1.5 GHz 以后稍有增大。在 0 ~1.0 GHz 频率范围内,离子迁移和电极极化效应[19]较为显著。这

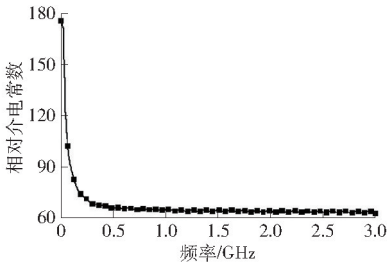


图 1 相对介电常数 ε' 随频率变化曲线

Fig. 1 Curve of the relative permittivity ε' versus frequency

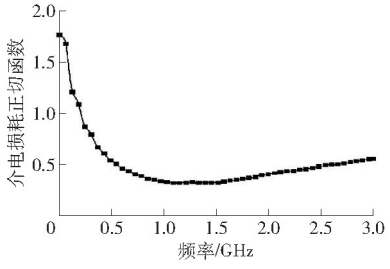


图 2 介电损耗正切函数 tanδ 随频率变化曲线

Fig. 2 Curve of the dielectric loss tangent tanδ versus frequency

说明冬笋内部的离子和水分子在低频电场中能产生较大的响应,导致 tanδ 较大,随着频率的增大,水分的极化反应逐渐稳定,极化速度跟不上频率的变化,tanδ 逐渐减小,tanδ 从 1.75 下降到 0.28;在 1.0 ~1.5 GHz 频率范围内,tanδ 趋于平稳,此时极化效应开始主导,离子迁移效应减弱;在 1.5 ~3.0 GHz 频率范围内,分子极化效应和介电弛豫过程占主导地位,tanδ 再次增加,从 0.28 增加到 0.58。根据试验结果可得,当试验冬笋的含水率为 86.82% 时,其对应的介电常数为 62。

2.2 不同含水率下土壤介电特性

含水率分别为 17%、20%、23%、26%、29% 时土样在不同频率下的介电特性变化曲线如图 3、4 所示。其中,图 3 为相对介电常数 ε' 随频率变化曲线,图 4 为介电损耗正切函数 tanδ 随频率变化曲线。

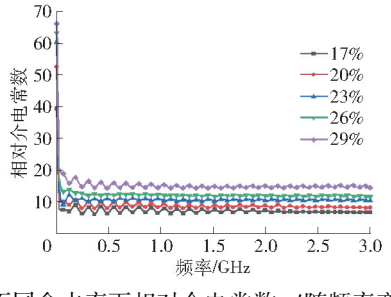


图 3 不同含水率下相对介电常数 ε' 随频率变化曲线

Fig. 3 Curve of the relative permittirity ε' versus frequency under different moisture contents

由图 3 可看出,不同含水率的土样介电常数随着频率变化的规律相似;在相同测定频率下,ε' 随含水率增大而增大;ε' 均随频率呈现先减小后不变的

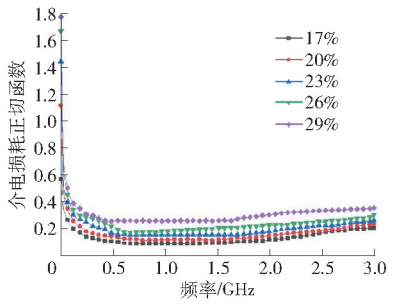


图 4　不同含水率下介电损耗正切函数 tanδ 随频率变化曲线

Fig. 4　Curve of the dielectric loss tangent tanδ versus frequency under different moisture contents

趋势，且在 0 ~ 0.2 GHz 的低频段减小迅速，在 0.2 GHz 以后基本保持不变。由图 4 可看出，在频率为 0 ~ 0.25 GHz 时，tanδ 迅速减小；在 0.25 ~ 1.5 GHz 范围内，基本保持不变；在 1.5 GHz 以后，tanδ 逐渐增大。上述变化的原因为：在 0 ~ 0.25 GHz 范围内，土壤中的离子对电场的响应较慢，因此在低频下 tanδ 较大；而在 0.25 ~ 1.5 GHz 范围内，电极极化效应和介电弛豫过程开始显现，导致 tanδ 趋于平稳，含水率为 17%、20%、23%、26%、29% 的试验土样 tanδ 分别下降了 0.5、1、1.25、1.5、1.5；在 1.5 ~ 3.0 GHz 范围内，分子极化和介电弛豫过程主导介质损耗，水分子的极化对高频电场有较好的响应，因此 tanδ 增加，含水率为 17%、20%、23%、26%、29% 的试验土样 tanδ 分别增加了 0.1、0.12、0.13、0.14、0.17。同时，土壤中含水率越高，tanδ 增加越显著。根据试验结果可得，当试验土样的含水率分别为 17%、20%、23%、26%、29% 时，其对应的土壤介电常数分别为 5、10、15、20、30。

2.3　冬笋–土壤电磁耦合模型构建

基于上述得到冬笋相对介电常数为 62，试验土样的含水率为 17%、20%、23%、26%、29% 的土壤介电常数为 5、10、15、20、30，已知冬笋电导率 0.05 S/m，密度 1.1 g/cm^3，土壤电导率 0.045 S/m，密度取前文测量结果范围的中间值 1.20 g/cm^3，在 ANSYSHFSS 15.0 仿真软件和 Solidworks 2020 中构建冬笋–土壤电磁耦合模型，如图 5 所示。

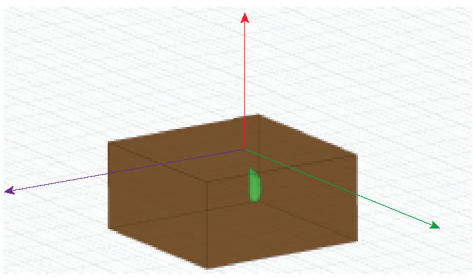


图 5　冬笋–土壤电磁耦合模型

Fig. 5　Electromagnetism coupling model of winter bamboo shoot and soil

3　微波探测频段确定

进行地下冬笋探测时，微波信号频段尤为关键。本文采用超宽带蝶形天线作为冬笋探测收发微波信号的传输媒介，进一步确定冬笋探测信号发射的中心频率。

3.1　超宽带天线设计

根据本文对不同含水率试验土样的介电特性测量结果可知，微波在地下传播的过程中，能量的损耗与介电损耗正切函数 tanδ 呈现正相关，且在 1.5 ~ 2.0 GHz 频率范围内冬笋 tanδ 逐渐变大，土壤则基本保持不变，因此初步设定探测天线的工作频率为 1.5 ~ 2.0 GHz。

冬笋生长环境复杂，且地下环境复杂，因此考虑具有宽频带特性、辐射方向性、结构简单且易于调整的蝶形天线[20]作为探测系统的收发天线。蝶形天线特性阻抗 Z_C 为

$$Z_C = 120\ln\left(\cot\frac{\theta}{4}\right) \tag{2}$$

式中　θ——蝶形天线每边的张角

一般张角越大，带宽越大，但天线所占空间也会越大。综合尺寸与带宽等因素，选取蝶形天线张角为 120°。

蝶形天线的长度决定了天线的低频特性。蝶形天线的板长 L 为

$$L = \frac{\lambda_0}{2\sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}}} \tag{3}$$

其中　$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2}\left(1 + 10\frac{d_1}{W}\right)^{-0.555}$$

式中　λ_0——与天线最低工作频率所对应的空气中的波长

ε_{eff}——等效介电常数

ε_r——蝶形天线基底板的介电常数

d_1——基底板厚度

W——蝶形天线金属臂宽度

在天线设计的过程中发现蝶形天线存在全向性发射的问题，可为蝶形天线设计金属背腔[21]，与天线辐射单元产生耦合，产生新的谐振频点，达到提高阻抗带宽的作用；同时其与天线辐射单元之间的反射作用可使天线进行定向辐射，并显著地提高天线的增益。天线的背腔式结构如图 6 所示。天线的臂长 L、L_1、L_2 以及臂宽 W 分别为 128、12、100.6、176 mm。

3.2　背腔结构作用分析

为了便于观察天线背腔结构对蝶形天线信号发射的影响，将设计完成的蝶形收发天线放置于冬笋

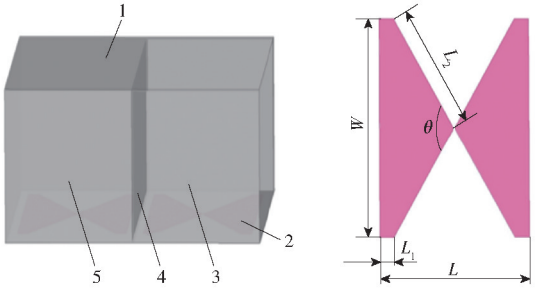
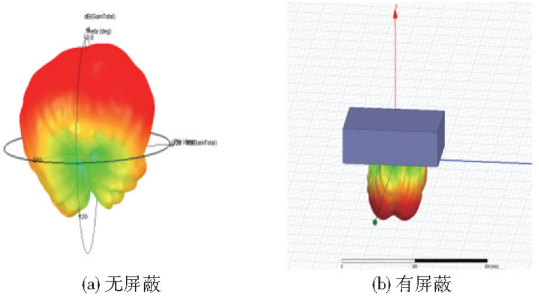


图 6 背腔式蝶形天线

Fig. 6 Back-cavity butterfly antenna

1. 腔顶 2. 蝶形天线 3、5. 吸波材料填充空间 4. 隔板

正上方,对天线在三维空间中的辐射强度进行仿真分析,得到三维辐射方向如图 7 所示。从图 7a 可以看出,没有背腔结构的蝶形天线信号发射是全向的,对于图 7b 来说,拥有背腔结构的蝶形天线信号发射更加集中于地面,表明了背腔结构对于蝶形天线的定向发射是有一定作用的。



(a) 无屏蔽 (b) 有屏蔽

图 7 蝶形天线中心频率下三维辐射方向图

Fig. 7 Three-dimensional radiation pattern of butterfly antenna at center frequency

3.3 天线测试

采用 Libre VNA 矢量网络分析仪对蝶形天线进行谐振点测试分析,设定起始频率与截止频率分别为 0.01、2.0 GHz,得到结果如图 8 所示。可看出,所设计的蝶形天线在 1.5 ~ 2.0 GHz 频段范围内,仿真和实测的 S_{11} 曲线基本重合,说明在此频段内信号匹配较好。

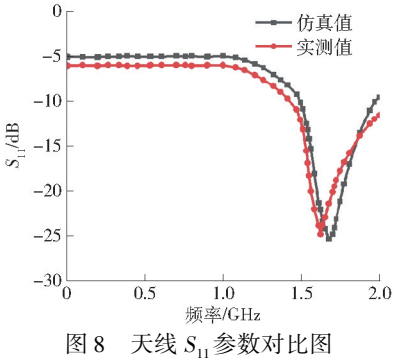


图 8 天线 S_{11} 参数对比图

Fig. 8 Antenna S_{11} parameter comparison chart of butterfly antenna

3.4 天线辐射强度分析

天线辐射方向图作为天线性能的重要参数,是天线远场特性的具体体现。天线在中心频率 1.5 ~ 2.0 GHz 处的方向如图 9 所示。由结果可知,辐射主瓣宽度大,且可见角度都大于 100°,表明天线方向性能好。另外,由图 9 可知,各频带范围内主瓣突出,表明天线的辐射特性效果优越。如图 9b 所示,当发射频率为 1.6 GHz 时,最大增益为 7.27 dB,并且天线具有良好的定向性,主瓣集中,副瓣较少,增益高,辐射效率较好,可以很好地应用在地下冬笋探测中。

3.5 最佳工作频段与中心频率

在射频和微波工程中,S_{21} 是其中一个重要的散射参数,用以表征增益损耗[22],通常用分贝(dB)来表示。在本文应用的微波探测冬笋领域,表示从发射天线发射出去的信号经过地下传播后进入接收天线,故通过此参数来判断能量在地下传播过程中的衰减情况。微波信号在发射过程中对传播介质比较敏感[23],在复杂环境中微波信号能量会被多次吸收、反射以及折射[24],这对于后续区分有笋、无笋的回波信号有着重要意义。

针对土壤含水率分别为 17%、20%、23%、26%、29% 的 5 种冬笋-土壤电磁耦合模型,进行土壤含水率对 S_{21} 影响的探究。在 ANSYSHFSS 15.0 仿真软件中分别构建 5 种含水率下的冬笋土壤模型,得到 S_{21} 随频率变化曲线如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,由于含水率越大,土壤对微波能量的吸收越多,因此含水率越大的土壤中回波信号越弱,损耗越大,S_{21} 参数越小。同时,土壤的 S_{21} 在信号频率为 1.5 ~ 2.0 GHz 范围内呈现低谷,且在 1.6 GHz 左右达到最低值,表明 1.5 ~ 2.0 GHz 范围内传输损耗大,且 1.6 GHz 频率下的传输损耗最高。这与前文介电特性试验中该频率范围内得到的冬笋介电损耗正切函数 tanδ 较大相一致,说明冬笋在该频率范围内下对微波信号能量吸收较多。因此,可将 1.6 GHz 频率作为冬笋探测系统的信号发射中心频率,用于后续探测的不同种信号分类。

综上,冬笋探测天线的最佳工作频率为 1.5 ~ 2.0 GHz,中心频率在 1.6 GHz 左右。

4 冬笋探测器设计

4.1 冬笋探测器样机

基于土壤和冬笋在微波信号下不同的介电特性,设计了一款如图 11 所示的冬笋探测器。该冬笋探测器由发射链路、连续波接收链路、天线和回波检测模型系统组成,通过主控器控制发射链路中信号源部分产生基带信号,将其变频到所需的高频信号,

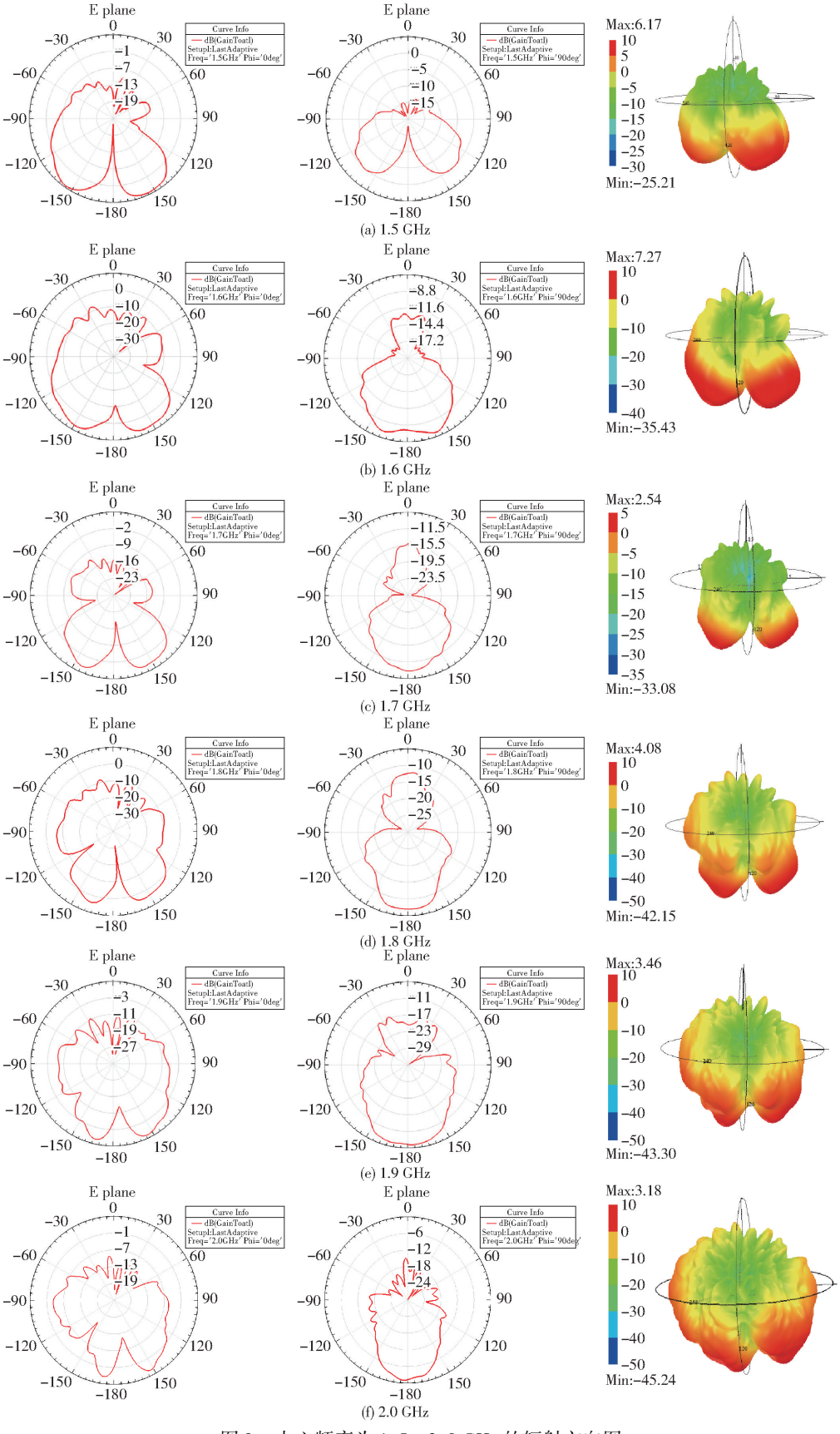


图 9　中心频率为 1.5 ~ 2.0 GHz 的辐射方向图

Fig. 9　Radiation pattern at center frequency of 1.5 ~ 2.0 GHz

由发射天线将高频电流转化为无线电波向指定方向辐射，反射的信号由接收天线接收并转化为高频电流信号并送入接收设备中，利用发射波与接收的回波差异来判断地下是否有冬笋存在。

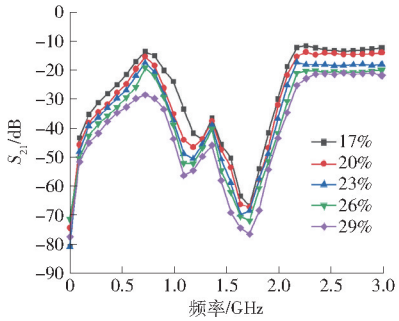


图 10 含水率不同时 S_{21} 变化曲线

Fig. 10 Variation curves of S_{21} with different moisture contents

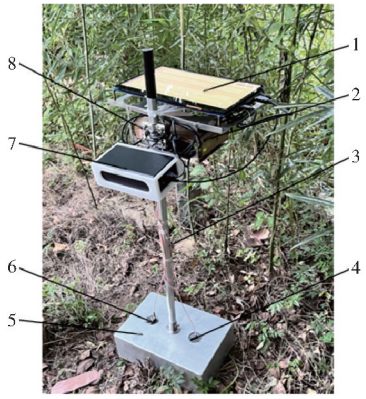


图 11 冬笋探测器实物图

Fig. 11 Physical picture of winter bamboo shoot detector

1. 触摸显示屏 2. JetsonNano(信息处理模块) 3. 连接杆 4. 接收天线 5. 金属背腔 6. 发射天线 7. 电源 8. 信号收发装置

4.2 信号调试与分析

根据确定的天线工作频段在 1.5 ~ 2.0 GHz 范围内,分别选用 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9、2.0 GHz 作为冬笋探测器信号发射的中心频率,以此来探究信号发射中心频率对回波信号的幅度的影响。如图 12 所示,用冬笋探测器分别对纯土壤和含有冬笋的土壤进行探测,以探究回波信号的接收情况,重复试验 6 次,得到的试验结果如图 13 所示。

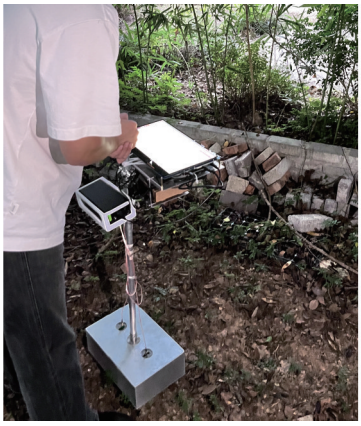


图 12 冬笋探测器实地试验

Fig. 12 Field test of winter bamboo shoot detector

由结果可看出,由于冬笋的含水率高于土壤,对信号的吸收能力更强,因此在有笋时,功率谱图的能量值变低。在图 13 中表现为回波信号最大幅值下降。具体数值见表 1。于是可根据探测器所显示的

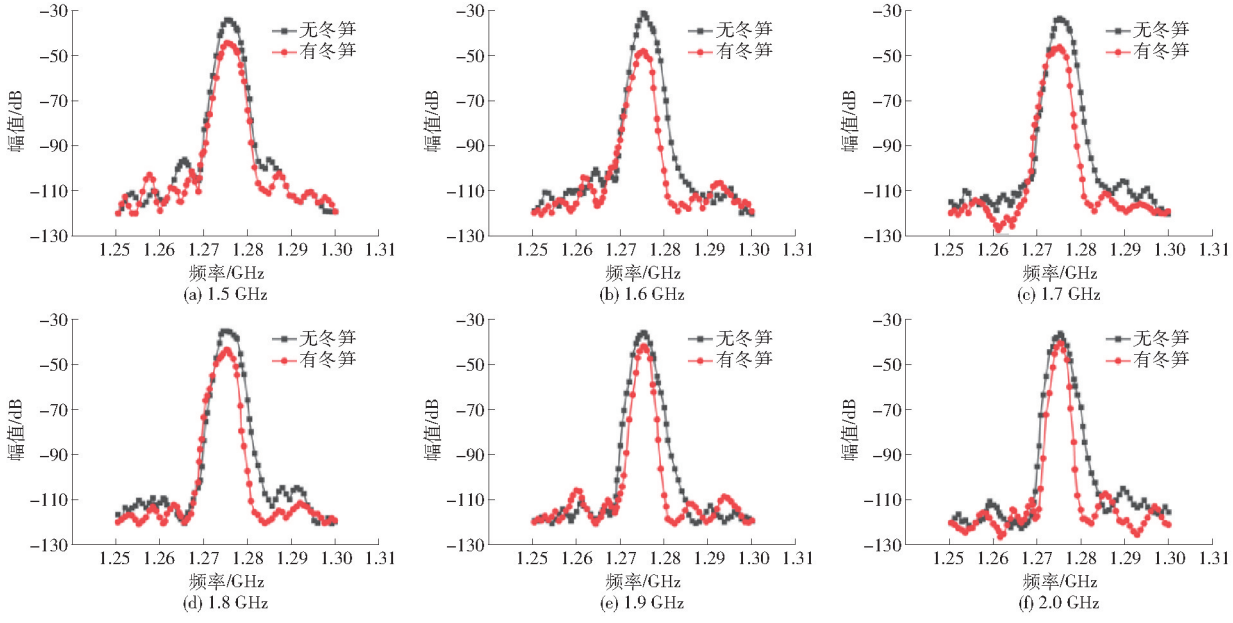


图 13 不同中心频率下回波信号对比图

Fig. 13 Comparison of echo signals at different centre frequencies

幅值变化来判断地下是否有冬笋。

由表 1 可看出,当冬笋探测器的信号发射中心频段在 1.6 GHz 时,有冬笋的测量结果相较于纯土壤的幅度值降低最明显,下降了 17.01 dB。说明采用 1.6 GHz 的频率进行探测能够得到最优的测量效果。

5 结论

(1)分别通过试验明确冬笋和土壤的介电特性:

表 1　有无冬笋情况下幅值对比

Tab. 1　Comparison of amplitude values in presence and absence of winter bamboo shoots　dB

类别	频率/GHz					
	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
有冬笋	-44.21	-48.12	-46.23	-43.23	-41.81	-40.43
无冬笋	-34.01	-31.11	-33.53	-34.93	-35.58	-36.17
幅值差	10.20	17.01	12.70	8.30	6.23	4.26

在低频段范围内，冬笋以及土壤的介电损耗正切函数 tanδ 较大，随着频率增加趋于稳定，到高频段范围，tanδ 又进一步增大，并且构建了冬笋-土壤耦合模型。

(2)设计了一种工作频段在 1.5 ~ 2.0 GHz 范围且带有背腔的蝶形天线，该天线能够集中向地下发射能量并显著提高增益，避免不必要的能量损失。对天线的辐射情况进行了仿真分析，得到天线具有良好的定向性，主瓣集中，副瓣较少，增益高，辐射效率较好的结论；结合不同中心频率下 S_{21} 变化的关系，进一步明确了该天线的最佳工作中心频率为 1.6 GHz。

(3)搭建冬笋探测器，通过对比试验证明了冬笋探测器探笋的有效性。

参　考　文　献

[1] 贾晓晖. 毛竹林冬笋高产培育技术研究[J]. 福建林业, 2020(5): 33-35.
JIA Xiaohui. Research on technology of high yield and eficiency for winter shoot of Phyllostachys edulis forest[J]. Fujian Forestry, 2020(5): 33-35. (in Chinese)

[2] 林为政. 冬笋探测器的设计[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
LIN Weizheng. Design of winter bamboo shoot detector[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2020. (in Chinese)

[3] 章德友,张建华,李春霞,等. 冬笋探测设备开发构想[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 74-77.
ZHANG Deyou, ZHANG Jianhua, LI Chunxia, et al. Winter bamboo shoot detection equipment: development conception[J]. World Bamboo and Rattan, 2022, 20(4): 74-77. (in Chinese)

[4] 潘时龙,张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 36-52.
PAN Shilong, ZHANG Yamei. Microwave photonic radar and key technologies[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(20): 36-52. (in Chinese)

[5] ABDULRAHEEM M I, CHEN H, LI L, et al. Recent advances in dielectric properties-based soil water content measurements [J]. Remote Sensing, 2024, 16(8): 1328.

[6] KABIR H, KHAN M J, BRODIE G, et al. Measurement and modelling of soil dielectric properties as a function of soil class and moisture content[J]. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, 2020, 54(1): 3-18.

[7] 钟汝能,郑勤红,姚斌,等. 微波频段下颗粒状农产品的介电特性测量与分析[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(12): 68-75.
ZHONG Runeng, ZHENG Qinhong, YAO Bin, et al. Measurement and analysis of dielectric property of granular agricultural products in the microwave frequency band[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(12): 68-75. (in Chinese)

[8] 钟汝能,姚斌,李琳,等. 微波波段下澳洲坚果的介电特性测量及分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(2): 39-44.
ZHONG Runeng, YAO Bin, LI Lin, et al. Measurement and analysis of dielectrie properties of macadamia nuts under microwave band[J]. Journal of Yunnan Normal University(Natural Sciences Edition), 2023, 43(2): 39-44. (in Chinese)

[9] 郭文川,王婧,朱新华. 基于介电特性的燕麦含水率预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(24): 272-279.
GUO Wenchuan, WANG Jing, ZHU Xinhua. Moisture content prediction of oat seeds based on dielectric property[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(24): 272-279. (in Chinese)

[10] 刘芳宏,刘静,刘梅英,等. 颗粒饲料介电特性研究及含水率模型建立[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5): 85-94.
LIU Fanghong, LIU Jing, LIU Meiying, et al. Study on dielectrie properties of pellet feed and establishment of moisture content model[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(5): 85-94. (in Chinese)

[11] MISHCHENKO M I. Maxwell's equations, radiative transfer, and coherent backscattering: a general perspective[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2006, 101(3): 540-555.

[12] 陈承申,冯德山. 探地雷达有限元数值模拟及衰减特性探讨[J]. 物探化探计算技术, 2014, 36(2): 152-157.
CHEN Chengshen, FENG Deshan. Finite element method GPR forward simulation and attenuation characteristics[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(2): 152-157. (in Chinese)

[13] 郑学召,黄渊,孙梓峪,等. 不同煤岩及混合介质中 UWB 电磁波传播衰减特性试验研究[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(增刊 1): 66-75.
ZHENG Xuezhao, HUANG Yuan, SUN Ziyu, et al. Experimental study on propagation attenuation characteristics of UWB electromagnetic wave in different coal and mixed media[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(Supp. 1): 66-75. (in Chinese)

[14] 郭辉萍,刘学观 编著. 电磁场与电磁波[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2015.

[15] BALLESTA-GARCIA M, ROYO S. Modelling polarized pulsed LiDAR signals in scattering media: an approach for optimizing systems in real-world scenarios[J]. Optics Express, 2024, 32(13): 22837.
[16] STUCHLY M A, STUCHLY S S. Coaxial line reflection methods for measuring dielectric properties of biological substances at radio and microwave frequencies-a review[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1980, 29(3): 176 - 183.
[17] 王转卫,赵春江,商亮,等. 基于介电频谱技术的甜瓜品种无损检测[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 290 - 295.
WANG Zhuanwei, ZHAO Chunjiang, SHANG Liang, et al. Nondestructive testing of muskmelons varieties based on dielectric spectrum technology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(9): 290 - 295. (in Chinese)
[18] 许景辉,赵钟声,王一琛,等. 基于双线性理论的土壤介电测量研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 322 - 331.
XU Jinghui, ZHAO Zhongsheng, WANG Yichen, et al. Soil dielectric measurement based on bilinear theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 322 - 331. (in Chinese)
[19] 席翔,储洪强,冉千平,等. 通用硅酸盐水泥基材料低频介电性能的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 2074 - 2089.
XI Xiang, CHU Hongqiang, RAN Qianping, et al. Low-frequency dielectric behavior of common portland cement-based materials: a review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8): 2074 - 2089. (in Chinese)
[20] 李雪萍,闫静,周永一,等. 电阻加载半椭圆偶极子天线的设计与研究[J]. 强激光与粒子束, 2017, 29(2): 51 - 55.
LI Xueping, YAN Jing, ZHOU Yongyi, et al. Design and study of resistor-loaded half-ellipse antenna[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29(2): 51 - 55. (in Chinese)
[21] SHANG X, YUAN B, GU Y, et al. A new method for improving isolation of GPR antenna[C]// 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS): IEEE, 2022: 1165 - 1170.
[22] 王尚,马竟轩,杨东升,等. 射频器件超细引线键合射频性能仿真[J]. 焊接学报, 2021, 42(10): 1 - 7, 97.
WANG Shang, MA Jingxuan, YANG Dongsheng, et al. Research on the RF performance simulation of ultra-fine wire bonding of RF devices[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(10): 1 - 7, 97. (in Chinese)
[23] 刘沛江,何骁,陈泽坚,等. 介质材料的介电性能测试方法综述[J]. 广东电力, 2022, 35(8): 1 - 12.
LIU Peijiang, HE Xiao, CHEN Zejian, et al. Review of dielectric property test methods for dielectric materials[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(8): 1 - 12. (in Chinese)
[24] ULLOA R Z, SANTIAGO M G H. The interaction of microwaves with materials of different[J]. Electromagnetic Fields and Waves, 2019: 93.

(上接第 293 页)

[21] 王锦江,陈志,杨学军,等. 3QXZ-6 型制种玉米去雄机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 112 - 118.
WANG Jinjiang, CHEN Zhi, YANG Xuejun, et al. Design and experiment of 3QXZ - 6 seed corn detasseling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016, 47(7): 112 - 118. (in Chinese)
[22] 赵淑红,蒋恩臣,闫以勋,等. 小麦播种机开沟器双向平行四杆仿形机构的设计及运动仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(14): 26 - 32.
ZHAO Shuhong, JIANG Enchen, YAN Yixun, et al. Design and motion simulation of opener with bidirectional parallelogram linkage profiling mechanism on wheat seeder[J]. Transactions of the CSAE,2013, 29(14): 26 - 32. (in Chinese)
[23] 耿端阳,何珂,印祥,等. 玉米花生间作播种施肥一体机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 34 - 41.
GENG Duanyang, HE Ke, YIN Xiang, et al. Design and test of corn-peanut intercropping seeding-fertilizing machine [J]. Transactions of the CSAE,2017, 33(17): 34 - 41. (in Chinese)
[24] 蒋连琼. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的圆锯片锯切过程仿真研究[D]. 南宁:广西大学, 2013.
JIANG Lianqiong. Simulation study of circular saw cutting process based on ANSYS/LS - DYNA[D]. Nanning: Guangxi University, 2013. (in Chinese)
[25] ZHANG Jing, WANG Jun, DU Dongdong, et al. Optimization and validation of root-cutting device for Chinese cabbage harvester based on discrete element method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 214: 108314.
[26] 赵统森. 白菜收获机设计与关键技术研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2020.
ZHAO Tongsen. Design and key technology research of Chinese cabbage harvester[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2020. (in Chinese)