

基于土壤 LF – UHF 频段介电特性的 FDR 测量频率研究\*

许景辉<sup>1</sup> 马孝义<sup>1</sup> Sally D Logsdon<sup>2</sup> Robert Horton<sup>3</sup>

- (1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;  
2. 美国农业部农业研究局国家农业与环境实验室, 埃姆斯, 爱荷华州 IA 50011 – 3120;  
3. 爱荷华州立大学农学系, 埃姆斯, 爱荷华州 IA 50011 )

**摘要:** 土壤介电特性是影响 FDR 传感器测量土壤含水量精度和适应性的重要物理参数。为了确定 28 mm 长、10 mm 间距的 7 探针 FDR 传感器理想频率,通过矢量网络分析仪对 4 种不同土壤的 LF – UHF 频段(1 MHz ~ 3 GHz) 散射参数进行了测量,通过 Logsdon 和 Laird 模型变换,使用 Matlab 进行了 4 种土壤表观介电常数的计算和绘制。通过土壤介电频谱分析,研究了土壤极化机理,分析了土壤介电特性与频率的关系,确定了 FDR 传感器的工作频段为 44 ~ 398 MHz,考虑到温度对极化的影响,其最佳工作频段为 62 ~ 110 MHz,其中 75 MHz 是其工作的最佳频率。此频率下土壤介电值仅对土壤含水量敏感,是消除温度等因素对 FDR 传感器影响的理想频率。

**关键词:** 土壤含水量 介电特性 FDR 测量频率

**中图分类号:** S24      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2013)07-0067-06

Frequency Measurement of FDR Based on Soil Dielectric Spectrum in LF – UHF

Xu Jinghui<sup>1</sup> Ma Xiaoyi<sup>1</sup> Sally D Logsdon<sup>2</sup> Robert Horton<sup>3</sup>

- (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China  
2. National Laboratory for Agriculture and the Environment, USDA – ARS, Ames IA 50011 – 3120, USA  
3. Department of Agronomy, Iowa State University, Ames IA 50011, USA)

**Abstract:** Soil dielectric property is an important physical parameter affecting the measuring accuracy and adaptation of moisture content by using FDR sensor. In order to obtain the best frequency of 7-probes FDR with length of 28 mm and needle-to-needle spacing of 10 mm, scattering parameters of LF – UHF wave bands (1 MHz ~ 3 GHz) in four kinds of soil were measured by using VNA. Though transformation based on Logsdon model and Laird model, four soil apparent dielectric permittivities were calculated and figured in Matlab. The mechanism of soil polarization was analyzed by soil dielectric spectrum analysis. The relationship between soil dielectric property and frequency was discussed. The working frequency of 44 ~ 398 MHz for FDR sensor was confirmed. Taking temperature into consideration, the ideal working frequency band was 62 ~ 110 MHz in which 75 MHz was the best. The soil dielectric value was only sensitive to soil moisture content under the best frequency. It was the ideal frequency for eliminating the effect of temperature and other factors on FDR sensor.

**Key words:** Soil moisture content Dielectric property FDR Frequency measurement

引言

土壤含水量是土壤物理、植物生理和节水灌溉

等研究的重要数据,是土壤水平衡、植物营养运移等研究的重要参数。快速而准确的土壤含水量测量,对于植物生长、节水灌溉、地下水分运移等研究都有

收稿日期: 2013 – 02 – 03    修回日期: 2013 – 02 – 24

\* 国家自然科学基金资助项目(51279167)、“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD29B08)和陕西省农业攻关资助项目(2012K02 – 15)

作者简介: 许景辉,博士生,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: xjhw@163.com

通讯作者: 马孝义,教授,博士生导师,主要从事农业水土工程研究,E-mail: x36936@gmail.com

着重要意义<sup>[1]</sup>。科研和生产中,确定土壤含水量方法有十几种<sup>[1~2]</sup>,其中介电测量传感器因其测量速度快、自动化程度高、便于操作、维护和无辐射等优点,已经成为目前科研和生产的主要测量方式<sup>[2]</sup>。介电特性是物质的本质特性,研究土壤介电机理,不仅能分析土壤水的介电测量特征值,提高土壤水分介电传感器的测量精度和适应性,而且还能研究土壤混合物的综合介电表现,了解土壤不同成分的测定方法<sup>[3]</sup>。土壤水分介电传感器包括 TDR (Time domain reflectometry)、TDT (Time domain transmissometry) 和 FDR (Frequency domain reflectometry) 等技术,这些技术分别以时域和频域的方法进行土壤介电测量。TDR、TDT 等由于使用昂贵的高频电子器件,其价格一直居高不下,限制了它的使用和推广<sup>[2~4]</sup>。FDR 传感器具有 TDR 的所有优点<sup>[4]</sup>,且其价格便宜<sup>[5]</sup>,而且能根据特殊测量要求,进行传感器形状的不同设计<sup>[6]</sup>,故其应用越来越广泛。

文献[5~11]虽从土壤介电机理入手,分析了 FDR 测量精度的影响因素和提高方法,但未通过最新测试手段,在较宽频域内研究土壤频谱,未能从探头结构角度提出 FDR 最优测量频率的解决方案。本文在已有成果的基础上,通过矢量网络分析仪,研究土壤 LF-UHF(1 MHz~3 GHz)频段的土壤介电特性,进而确定 FDR 传感器的理想测量频段,以提高 FDR 传感器的精度和适应性。

1 材料和方法

1.1 土壤样品制备

试验在美国农业部农业研究局国家农业和环境实验室进行。因土壤介电特性受土壤粘粒含量和土壤颗粒间界面极化影响较大<sup>[12]</sup>,为了分析土壤结构、土壤质地等对土壤介电极化的影响,试验选用了 4 种土壤(见表 1),4 种土壤的粘粒含量和砂粒含量各有不同,在一定程度上代表了农田典型土壤。土样自然风干后,用 18 目筛子(孔径 1 mm)过筛,然后放入 105℃烘箱干燥 24 h,干燥后的土样装入密封塑料袋中保存备用。根据 4 类土壤各自密度,计算并配比 5%、10%、15%、20%、25% 体积分水量的土样各 5 份。试样装入 PVC 管(管子高 80 mm,直径为 60 mm)中进行试验。每个土样实际含水量通过干燥法进行实测获得。

1.2 试验方法及步骤

土壤介电谱通过矢量网络分析仪(VNA- Vector Network Analyzer, HP 8753ES)进行测量。矢量网络分析仪设定测试频率为 1 MHz~3 GHz,采样点数为

表 1 实验用土的质地和密度  
Tab.1 Particle sizes and densities of soils used in experiment

| 土壤名      | 质量分数/% |       |        | 填装密度/<br>g·cm <sup>-3</sup> |
|----------|--------|-------|--------|-----------------------------|
|          | 粘粒     | 粉粒    | 砂粒     |                             |
| Hanlon   | 9.76   | 16.29 | 73.942 | 1.36                        |
| Till     | 20.34  | 30.26 | 49.408 | 1.30                        |
| Loess    | 27.15  | 69.79 | 3.062  | 1.30                        |
| Clarinda | 54.31  | 36.88 | 8.808  | 1.28                        |

1 601 点,矢量网络分析仪采用端口 1 进行测量,使用 BNC 连接头将矢量网络分析仪延长线和 FDR 传感器相连,矢量网络分析仪开机 2 h 后用开路、短路和 50 Ω 负载校准件(Maury Microwave 85050B)校准。采用末端开路的反射法进行测量:首先由矢量网络分析仪测出 FDR 传感器的散射参数 S<sub>11</sub>,然后用 Logsdon 和 Laird 模型将其换算成介电常数的实部和虚部,通过介电常数实部和虚部再计算出土壤介电的表观介电常数<sup>[13~14]</sup>:首先,将 S<sub>11</sub>转换为复电导

σ∗=ZpεvcLZ∗=Zpεvc1−S∗111+S∗11(1)

式中 Z<sub>p</sub>——FDR 传感器的特性阻抗,由同轴电缆的特性阻抗公式计算求得<sup>[15]</sup>  
Z<sub>0</sub>——电缆延长线的特性阻抗,取 50 Ω  
ε<sub>v</sub>——真空介电常数,8.854×10<sup>-12</sup> F/m  
c——真空中电磁波速度,3×10<sup>8</sup> m/s  
L——FDR 传感器的电测量长度  
Z<sup>\*</sup>——FDR 传感器探头及土的复阻抗  
S<sub>11</sub><sup>\*</sup>——矢量网络分析仪测得的复散射参数  
然后将电导转换为复介电常数

ε∗(f)=σ∗πfεv arctan(2σ′/σ′′)(2)

式中 f——矢网测量频率,Hz  
σ′——电导的实部  
σ′′——电导的虚部

根据 Logsdon 理论,复介电常数转为表观介电常数的公式为<sup>[15~16]</sup>

εa1/2=√(1+√(1+tan2(ε′′/ε′))ε′/2(3)

式中 ε<sub>a</sub>——FDR 表观介电常数  
ε′——复介电常数实部  
ε′′——复介电常数虚部

以上计算步骤用 Matlab 进行编程,通过其强大的图形处理功能,可绘制土壤 1 MHz~3 GHz 频段的介电谱,进而通过介电谱研究 FDR 传感器的理想测量频段。

试验前先制备不同含水量的土样,然后将土样按比例填入 PVC 管中,用塑料膜密封后静置于密闭

箱内 24 h, 以达到土壤水分分布的均匀性。试验中, 将矢量网络分析仪开机 2 h 后校准, 然后对土样进行测量, 每个土样测量 3 次, 取平均值进行表观介电常数计算。测量后的土柱, 在探针插入部位取土, 用 XB-224 型电子天平称量并记录, 然后用烘干法测量土壤试样的体积含水量。最后, 用介电谱与相应土壤体积含水量进行数值分析, 探讨土壤介电谱与土壤含水量之间的各种关系。

1.3 传感器结构尺寸设计

传感器探针结构设计对于 FDR 传感器测量精度至关重要, 探针的长度和间距将影响土壤介电常数测量值, 改变 FDR 传感器测量敏感频率。本次试验采用一种 7 探针结构, 如图 1 所示, 这种结构可近似为同轴器, 易于精确地测量土壤介电特性<sup>[17]</sup>。探针为直径 1.2 mm 不锈钢针, 由电路板固定成同轴结构, 探针长度为 28 mm, 探针间距为 10 mm。测量前, 探针的电长度由甲醇、水、乙醚进行标定。

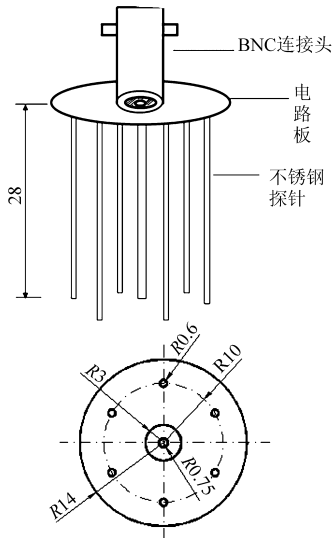


图 1 FDR 传感器探针结构图  
Fig. 1 Schematic of FDR probe

2 结果与分析

土壤是水、矿物质和空气的混合物, 其综合介电特性受组成物质的自身介电特性和物质混合介电机理影响。同时, 土壤颗粒之间的大小、形状、有机质、团聚后的颗粒之间接触面积等, 都会在不同电磁频率下影响土壤中电粒子的偏转和位移, 如土壤颗粒间的界面极化在一定程度上是低频段土壤介电特性的重要影响因素<sup>[18]</sup>。因此, 需要对不同含水量的 4 种代表性土壤样本进行测量, 找出其介电特性的影响规律。图 2 是 4 种土壤的表观介电常数频谱图。

2.1 土壤介电极化过程分析

从图 2 的介电谱可以看到, 4 种土壤表观介电常数均随频率增高而下降, 在 1 GHz 附近, 土壤介电

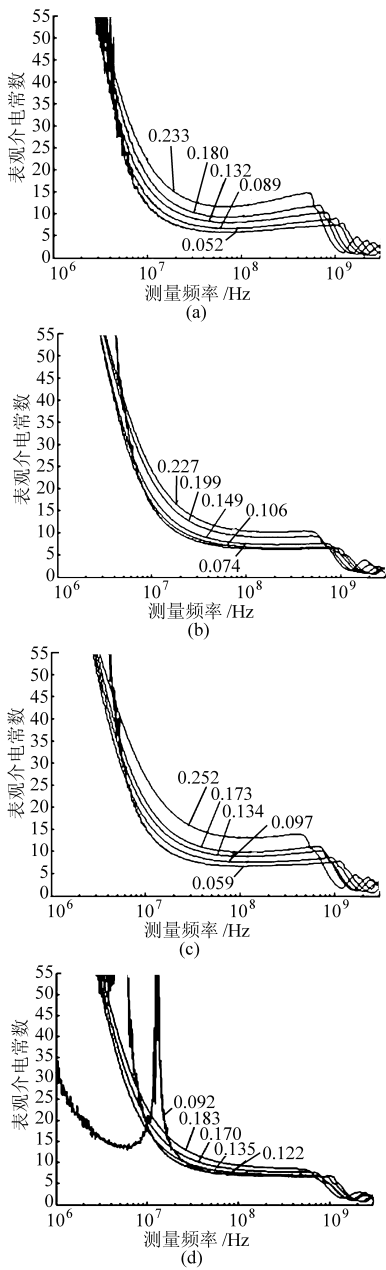


图 2 4 种土壤的表观介电常数频谱  
Fig. 2 Apparent permittivity spectrum of four kinds of soil  
(a) Hanlon 土 (b) Loess 土 (c) Till 土 (d) Clarinda 土

常数陡然下降, 之后又有一个小的跃起, 然后又陡然下降, 测量结果符合无机材料的介电理论模型<sup>[19]</sup>。从土壤电极化微观机理来看, 介质极化主要有电子位移极化、离子位移极化、取向极化 (偶极子极化)、空间电荷极化 4 类。在外电场作用下, 介质表观介电常数  $\epsilon$  是综合反映这 4 种微观过程的宏观物理量, 它是频率  $\omega (2\pi f)$  的函数。在频率较低时, 4 种微观过程虽然都参与作用, 但主要还是空间电荷极化和取向极化起主导作用, 同时, 表观介电常数还因土壤中两种不同介质界面上的电荷积累而呈现很大的数值, 这种现象叫做界面极化<sup>[12]</sup>。从图 2 可以看出, 在频率小于 30 MHz 时, 土壤表观介电常数呈现

较大数值,大于 30 MHz 以后,土壤表观介电常数随频率增加而趋于平缓,其表观介电常数变化平缓频段是介电传感器的特征频率。FDR 在特征频率段测量时,传感器输出值稳定,不会因电路频率的温漂而产生很大的测量误差。随着频率的增加,偶极子随电场频率转向的速度逐渐落后于外施电场的改变速度,土壤介电损耗加大,这时其表观介电常数值先降低,然后有一定程度的升高,其升高主要是由于介电损耗增加而引起的。当频率到达某一值时,介电常数陡然下降,此频率值被称为弛豫频率<sup>[12,20]</sup>。弛豫频率之后,土壤介电机理主要由离子极化和电子极化表现,此时土壤表观介电常数随频率增加而有小范围的增加。弛豫频率之后,由于土壤表观介电常数随土壤含水量变化的差异较小,其电路的测量识别误差较大,故不适于低成本电路的介电测量。从 4 种不同土壤的介电谱分析可知,土壤表观介电常数是测量频率的函数,适当的测试频率利于介电传感器的精确测量,而对于非特征频率段的介电测量,土壤传感器的稳定性和精度将大大降低。

## 2.2 FDR 传感器介电测量特征频率选择

FDR 传感器是一种比较经济的基于频域的介电型传感器,其工作频率是影响其测量精度和测量适应性的重要指标。FDR 一般工作在 5 ~ 150 MHz<sup>[21]</sup>,如 Delta-T 公司的 ML2X probe 工作频率是 100 MHz,EC-10 是 5 MHz,EC-5 是 70 MHz,Hydra probe II 是 50 MHz,ECH<sub>2</sub>O-5TE 是 70 MHz。传感器工作频率的具体值和 FDR 探针结构有着密切关系,其工作频率的确定需根据此种传感器结构的介电谱进行确定。分析图 2 可知,Hanlon 土属于砂质壤土,大于 6.87 MHz 时,其介电谱曲线随土壤含水量变化有明显区分,且频率越高,其介电常数变化越缓慢,测量效果越好。35.5 ~ 506 MHz 频段内,其介电常数仅随土壤含水量变化,而受频率影响较小,是介电测量的特征频段,55.3 ~ 130 MHz 频段为介电常数变化平坦区,其介电常数仅受土壤含水量影响,频率变化对其影响很小,利于功能电路的实现和测量精度的提高,是 FDR 传感器的理想测量频率范围。Till 土属于壤土,其介电谱曲线随土壤含水量变化也比较明显,在 36 ~ 398 MHz 范围内,FDR 测量具有一定的可行性,60 ~ 225 MHz 范围内其介电值随频率变化较小,是 FDR 传感器的理想测量频段。Loess 土属于粉粘土,其粘粒含量增大,吸附水含量较多,同样体积的人工施水所引起的土壤含水量测量值变化相对较小。26 ~ 453 MHz 是 FDR 可以工作的频率范围,62 ~ 413 MHz 是 FDR 工作的理想频段。Clarinda 土属于粘土,其粘粒含量最大,大

量水分被粘粒吸附于颗粒表面形成吸附水。44 ~ 515 MHz 频率是 FDR 可以工作的频段,56 ~ 436 MHz 是 FDR 传感器的理想测量频段。

通过以上土壤表观介电的频谱分析可知,本文所述探针结构的 FDR 传感器,其工作频段为 44 ~ 398 MHz,其最佳工作频段为 62 ~ 130 MHz,在这个频段范围内,其所测介电常数仅与土壤含水量有关,频率变化对其影响很小。此频段范围内,FDR 传感器适应性较强,可适用于不同土壤的含水量测量。

## 2.3 温度对土壤介电极化的影响

根据无机材料极化理论可知,温度会影响无机材料的极化特性<sup>[19]</sup>。当温度升高时,土壤离子的热运动增强,离子间易发生运移,其内部电场会发生改变,土壤的介电常数也将发生变化。在不同频率下,温度改变介电常数的规律稍有不同,低频下,土壤离子能随外电场变化进行自由偏转,离子热运动会增强偏转强度,其介电常数会增大;但频率较高时,离子随外电场偏转速度与离子热运动强度增强发生冲突,离子偏转受热运动影响会减弱,其介电常数会适当减小。因此可根据土壤介电谱选择恰当频率,在此频段下,土壤介电常数受环境温度变化不大。图 3 给出了 4 种土壤配制体积含水量 0.30 时,在 5℃、15℃、25℃、35℃、45℃ 时的介电谱,从图中可看到 Hanlon 土在 21.2 ~ 116 MHz 频段内,Loess 土在 41.9 ~ 296 MHz 频段内,Till 土在 49.5 ~ 413 MHz 频段内,Clarinda 土在 14.6 ~ 356 MHz 频段内,其介电常数基本不受土壤温度影响。对其他含水量土样进行测试,最终发现 50 ~ 110 MHz 频段内,土壤表观介电常数受环境温度影响很小。结合不同含水量的土壤介电谱理想测量频段,62 ~ 110 MHz 为 FDR 传感器不受温度影响的理想含水量测量频段。

## 2.4 FDR 传感器介电测量理论模型

在确定最佳工作频段的基础上,对其最优工作频段做进一步的分析和处理。在 62 ~ 110 MHz 范围内,选取 65 MHz、75 MHz、85 MHz、95 MHz、105 MHz 共 5 个频率,进行 4 种土壤的测试频率和土壤含水量的相关性数值综合分析,如图 4 所示。图 4 中分别对不同频率下的介电测量值和土壤含水量进行 3 阶多项式拟合,从曲线拟合的决定系数可知,75 MHz 的决定系数为 0.922 3,是本文所述 FDR 传感器的最优工作频率。在这个频率下工作,FDR 传感器适应性最强,能适用于沙壤土至粘土的不同土壤含水量测量。

重新对 75 MHz 下表观介电常数和土壤含水量进行拟合,并分析 4 种土壤含水量与表观介电常数的关系,如图 5 所示。图 5 中可以看到,75 MHz 下,

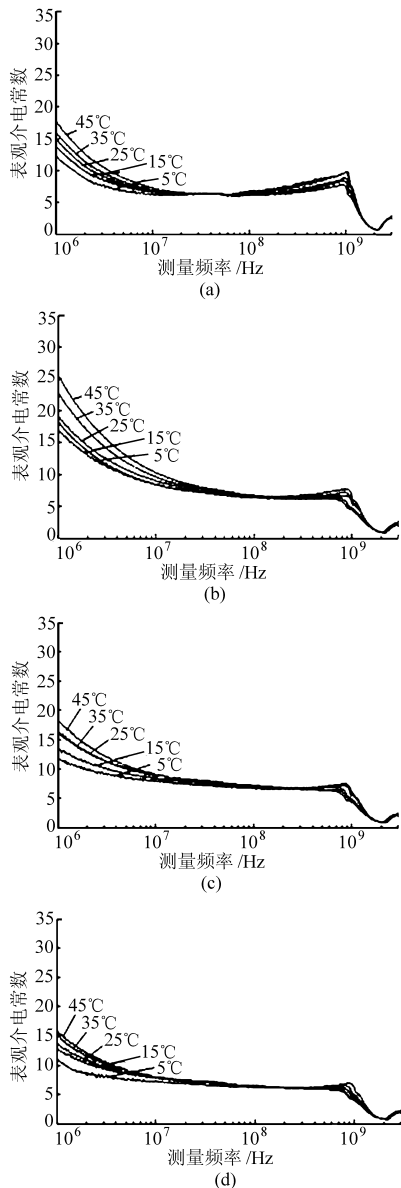


图 3 4 种土壤不同温度时的表观介电常数频谱

Fig. 3 Apparent permittivity spectrum of four kinds of soil under different temperatures

(a) Hanlon 土 (b) Loess 土 (c) Till 土 (d) Clarinda 土

4 种土的体积含水量与表观介电常数均有很好的拟合关系,其中 Hanlon 土的拟合程度最好,Till 土的数值虽然和综合拟合线稍有偏离,但 Till 土表现的数值线性最好,在对其进行单独二阶拟合时,其决定系数达到 0.998。综上所述,75 MHz 是本文所述结构 FDR 传感器的最优测量频段,其测量模型为

$$\theta = -0.0001\varepsilon_a^3 + 0.0011\varepsilon_a^2 + 0.0405\varepsilon_a - 0.2036$$

式中  $\theta$ ——土壤体积含水量

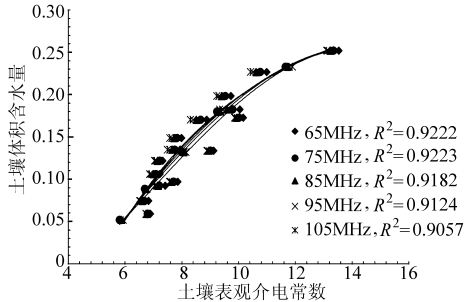


图 4 不同频率下土壤表观介电常数与土壤含水量间相关系数分析图

Fig. 4 Relationship between apparent permittivity and soil moisture content under different frequencies

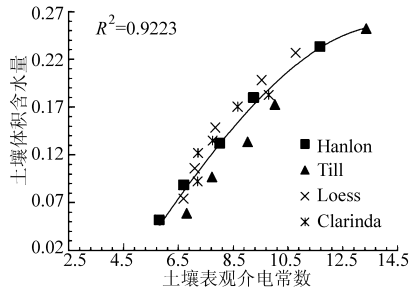


图 5 75 MHz 频率下土壤表观介电常数与各土壤体积含水量间数值拟合曲线

Fig. 5 Relationship between apparent permittivity and soil moisture content at 75 MHz

3 结论

(1)通过矢量网络分析仪,在 LF - UHF(1 MHz ~ 3 GHz)频段内进行了土壤介电特性研究。土壤表观介电常数随频率的增加而减小,在弛豫频率处,其介电常数陡然下降,弛豫频率之前的介电变化平稳段是 FDR 传感器的理想频段。

(2)文中所述 4 种土样代表了不同粘粒含量的土壤,在检验 FDR 传感器适用性方面具有一定的代表性,本文所述 FDR 传感器结构为:探针长 28 mm,间距 10 mm,此结构 FDR 传感器的工作频段为 44 ~ 398 MHz,考虑温度对土壤极化的影响,其最佳工作频段为 62 ~ 110 MHz,其中 75 MHz 是其工作的最佳频率。

(3)在研究土壤介电机理的基础上,提出了一种 FDR 传感器适应性的分析方法,通过矢量网络分析仪进行 FDR 传感器最优工作频率研究,对土壤物理研究及传感器开发具有一定的参考价值。

参 考 文 献

1 邵明安,王全九,黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2011.  
2 王克栋,陈岩. 土壤水分测量技术与墒情监测系统研究[M]. 北京:机械工业出版社,2011.  
3 Chighladze G, Kaleita A, Birrell S. Sensitivity of capacitance soil moisture sensors to nitrate ions in soil solution[J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6):1 987 ~ 1 995.

- 4 Tsheko R, Savage M J. Calibration of a frequency-domain reflectometer for determining soil-water content in a clay loam soil[J]. Water SA, 2005, 32(1): 37 ~ 42.
- 5 Robinson D A, Campbell C S, Hopmans J W, et al. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories; a review[J]. Vadose Zone Journal, 2008, 7(2): 358 ~ 389.
- 6 Skierucha W, Wilczek A. A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10 ~ 500 MHz frequency range[J]. Sensors, 2010, 10(4): 3 314 ~ 3 329.
- 7 Mironov V L, Dobson M C, Kaupp V H, et al. Generalized refractive mixing dielectric model for moist soils[J]. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 2004, 42(4): 773 ~ 785.
- 8 Blonquist J M Jr, Jones S B, Robinson D A. Standardizing characterization of electromagnetic water content sensors; part 2. Evaluation of seven sensing systems[J]. Vadose Zone Journal, 2005, 4(4): 1 059 ~ 1 069.
- 9 Lasne Y, Ph Paillou, Ruffié G, et al. Effect of salinity on the dielectric properties of geological materials; implication for soil moisture detection by means of radar remote sensing[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(6): 1 674 ~ 1 688.
- 10 高磊, 施斌, 唐朝生, 等. 温度对 FDR 测量土壤体积分水量的影响[J]. 冰川冻土, 2010, 32(5): 964 ~ 969.
- 11 Kizito F, Campbell G S, Cobos D R, et al. Frequency, electrical conductivity and temperature analysis of a low-cost capacitance soil moisture sensor[J]. Journal of Hydrology, 2008, 352(5): 367 ~ 378.
- 12 Shang J Q, Rowe R K, Umana J A, et al. A complex permittivity measurement system for undisturbed/compacted soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 1999, 22(2): 159 ~ 168.
- 13 Logsdon S D, Laird D A. Dielectric spectra of bound water in hydrated Ca-smectite[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2002, 305(7): 243 ~ 246.
- 14 Logsdon S D. Soil dielectric spectra from vector network analyzer data[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2005, 69(11): 983 ~ 989.
- 15 冯慈章, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- 16 Logsdon S D. Electrical spectra of undisturbed soil from a crop rotation study[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2008, 72(2): 11 ~ 15.
- 17 Campbell J E. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1990, 54(2): 332 ~ 341.
- 18 Thevanayagam S. Dielectric dispersion of porous media as a fractal phenomenon[J]. J. Appl. Phys., 1997, 82(5): 2 538 ~ 2 547.
- 19 关振铎, 张中太, 焦金生. 无机材料物理性能[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2011.
- 20 Xu J, Ma X, Logsdon S D, et al. Multi-needle FDR sensor suitable for measuring soil water content[J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 2012, 76(12): 1 929 ~ 1 937.
- 21 Robinson D A, Jones S B, Wraith J M, et al. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry[J]. Vadose Zone Journal, 2003, 2(4): 444 ~ 475.

~~~~~  
(上接第 77 页)

- 10 Odlare M, Svensson K, Pell M. Near infrared reflectance spectroscopy for assessment of spatial soil variation in an agricultural field[J]. Geoderma, 2005, 126(3 ~ 4): 193 ~ 202.
- 11 Cozzolin D, Moron A. Potential of near infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1 ~ 2): 78 ~ 85.
- 12 Skidmore E L, Dickerson J D, Schimelpennig H. Evaluating surface soil water content by measuring reflectance[J]. Soil Science Society of American Journal, 1975, 39(2): 238 ~ 242.
- 13 Kano Y, McClure W F, Skaggs R W. A near infrared reflectance soil moisture meter[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(6): 1 852 ~ 1 855.
- 14 Belisle W R, Sharma A, Coleman T L. An optical reflectance technique for soil moisture measurement—part 1: theory, description and application[C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1996, 2: 1 315 ~ 1 319.
- 15 李民赞, 郑立华, 安晓飞, 等. 土壤成分与特性参数光谱快速检测方法 & 传感技术[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 73 ~ 87.  
Li Minzan, Zheng Lihua, An Xiaofei, et al. Fast measurement and advanced sensors of soil parameters with NIR spectroscopy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(3): 73 ~ 87. (in Chinese)