

基于 LVDS 传输线延时检测技术的土壤含水率传感器

蔡坤^{1,2} 徐兴^{1,2} 俞龙^{1,2} 岳学军^{1,2}

(1. 华南农业大学电子工程学院, 广州 510642; 2. 华南农业大学广东省农情信息监测工程技术研究中心, 广州 510642)

摘要: 为实现土壤含水率的快速准确监测,设计了一种基于 LVDS 差分传输线延时检测技术的土壤含水率传感器。该传感器将高频振荡信号分路为两通道 LVDS 差分信号,一个通道用于测试土壤含水率,另一个通道用于提供参考信号。由于土壤中水分的变化改变土壤介电常数,从而导致测试通道 LVDS 差分总线上信号传输延时的变化,则传感器检测该通道信号的传输延时就可以确定土壤含水率。为了获得 LVDS 总线设计线宽和线间距的最优值,以 LVDS 总线阻抗值均方误差最小化为目标,构建了线宽和线间距的最优化计算模型,并通过遗传算法求解出了最优线宽为 0.178 9 mm 和最优线间距为 0.223 8 mm。试验表明,根据该参数设计的传感器在 50 MHz 频率时,对体积含水率 8.31% 以上的砖红壤土和黄壤土的预测模型为线性模型,决定系数 R^2 为 0.964 2,绝对预测误差在 2.45% 以内。

关键词: 土壤含水率; LVDS 差分传输线; 传输延时; 传感器

中图分类号: S274.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)12-0315-08

Design of Soil Moisture Sensor Based on Detection of Propagation Delay in LVDS Differential Transmission Lines

Cai Kun^{1,2} Xu Xing^{1,2} Yu Long^{1,2} Yue Xuejun^{1,2}

(1. College of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

2. Guangdong Engineering Research Center for Agricultural Information Monitoring, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Water in soil is vital for plants. Plants utilize the water absorbed from the soil for transpiration and producing necessary carbohydrates for plant growth. Soil moisture measurement is important to agriculture and gardening. Numerous soil moisture testing methods were researched and developed. These methods can approximately be categorized as dielectric-based methods and non-dielectric methods. The dielectric-based methods are widely used due to their non-destruction, efficiency and accuracy. The proposed method belongs to the dielectric-based methods. Since the dielectric permittivity of water is far larger than that of dehydrated soil, the permittivity of the mixture of water and soil is mainly determined by the quantities of water in soil. Moreover, the permittivity of dielectric material affects propagation speed of electromagnetic waves. The velocity of electromagnetic wave will be decreased when it travels in dielectric material with large permittivity value. The decrease of velocity of electromagnetic waves is highly related to the soil moisture. The proposed sensor provides a method for measuring the deceases of electromagnetic speed. The sensor consists of eight parts, which are a HF oscillator, two high-speed comparators, two LVDS transmitters, a LVDS differential transmission line for test, a LVDS differential transmission line for reference, two LVDS receivers, a phase detection circuit, and a mean-responding power detector. HF oscillator gives a signal to the inputs of two high-speed comparators simultaneously.

收稿日期: 2016-05-09 修回日期: 2016-06-27
基金项目: 广东省科技计划项目(2014A020208110,2016A020210091)
作者简介: 蔡坤(1977—),男,讲师,博士,主要从事农业领域智能信息处理方法理论与应用研究,E-mail: caikun@scau.edu.cn
通信作者: 徐兴(1978—),男,副教授,博士,主要从事农情信息感知技术研究,E-mail: xuzhexing@163.com

High-speed comparators convert the HF signal into two TTL logic level signals. These TTL logic level signals are sent to drive two LVDS transmitters, and convert the TTL signal to LVDS differential signal. LVDS signals are leaded into two differential transmission lines. One is for soil moisture test, the other is for reference. The test transmission line is fully contacted with the soil when it is used in applications. The reference transmission line is waterproofed, which provides a reference signal channel for phase detection. Water in soil decreases the speed of electromagnetic wave guided by the test transmission line. LVDS receivers convert the differential signals back into TTL logic level signals. The TTL signals from the LVDS receivers contain the information about decrease of the speed caused by water in soil. Since the speed of electromagnetic wave guided by the test transmission line is slower than that of the electromagnetic wave guided by the reference transmission line, there is a propagation delay between the signals. The phase detector is utilized to extract the delay, which is converted into a voltage signal by the mean-responding power detector. Latosol and yellow earth samples are utilized in the experiments to calibrate the sensor. A gravimetric soil moisture prediction model is built with determination coefficient R^2 of 0.964 2 and the maximum absolute prediction error is 2.45% when the HF oscillator works at 50 MHz.

Key words: soil moisture; LVDS differential transmission line; propagation delay; sensor

引言

土壤水是作物吸收水分的主要来源,是土壤内部化学、生物和物理过程不可缺少的介质,是土壤肥力的重要因素。因此,实时监测土壤含水率可以动态掌握土壤墒情,对于农业生产中的节水灌溉具有重要意义^[1-5]。

目前国内外对土壤含水率检测的常用方法可大致划分为基于土壤质量的测试方法、基于土壤力学特性的测试方法和基于土壤电磁学特性的测试方法。

基于土壤质量的测试方法是称重法^[6-7],也称干燥法。该方法是国内外测量土壤含水率的标准方法。称重法只能在实验室环境下进行,无法在野外对土壤含水率进行实时监测^[8]。基于土壤力学特性的测试方法主要有张力计法^[9],也称负压计法,它测量的是土壤水吸力。但张力计法测量时间长,且仅对含水率较大的土壤样本有效,否则该方法误差较大^[10]。

基于土壤电磁学特性的方法比较多,常用的有时域反射法^[11-12]、频域反射法^[13-14]、驻波比法^[15]、电容传感法^[16]、石膏块电阻法^[17]、探地雷达法^[18-21]和微波遥感法^[22-24]。时域反射法土壤含水率传感器对被测土壤环境比较敏感,如电极与土壤的缝隙会导致测量结果存在误差^[25],含盐量高的土壤不适合使用该方法^[26]。频域反射法则将电极电容接入高频振荡器的振荡回路,将土壤含水率变化引起的电极电容变化转变为高频振荡器输出信号频率的变化,根据事先建立的输出信号频率与土壤含水率的对应关系获得土壤样本的含水率。驻波比法

是通过测量电极信号的驻波比间接估算土壤的含水率。电容传感器法则直接测量土壤中传感器电极间的电容,进而根据事先标定的电容-含水率曲线获得被测土壤的土壤含水率。石膏块电阻法是将石膏块制成电阻埋入土壤中,通过测量土壤中石膏块的电阻确定土壤含水率。石膏块电阻的滞后效应明显,不能实现快速测量,另外,该方法对土壤类型有要求。探地雷达法和微波遥感法都属于遥感类方法。探地雷达运行于地表,电磁波经雷达天线射入土壤中,土壤不同土层会反射电磁波,雷达接收机接收反射波,经过一系列处理过程后获得准确的土壤含水率信息。探地雷达法是一种高效的土壤含水率检测方法,日作业面积可达 25 hm²^[26]。微波遥感法主要用于大面积土壤墒情监测,机载和星载系统比较常见。

近年来不少学者都尝试对传统土壤含水率传感器进行改进,如李加念等^[27]对传统电容传感法进行了改进,设计了一种基于真有效值的高频电容式土壤水分传感器。傅文渊等^[28]研究了基于差分信号控制的土壤含水率传感器,以测量土壤阻抗,进而估算土壤含水率。

本文从电磁波在差分传输线上传播特性出发,设计一种基于 LVDS 差分传输线延时检测技术的土壤含水率传感器。该传感器设有 2 条 LVDS 差分传输线,1 条位于传感器表面与土壤接触,另 1 条布置在传感器内部。将信号源信号同时导入这 2 条传输线。与土壤接触的传输线因土壤水的影响使得电磁信号速度与另 1 条传输线上电磁信号的速度不一致。通过检测的传输线上电磁信号的延时来确定土壤的含水率。此外,在设计过程中,根据 LVDS 差分

传输线阻抗的数学模型,以阻抗匹配为目标对传输线的相关参数进行优化设计。

1 传感器设计

1.1 LVDS 总线接口

LVDS(low-voltage differential signaling)接口又称 RS-644 总线接口,是 1994 年由美国国家半导体公司提出的一种信号传输模式,是一种电平标准。它采用极低的电压摆幅高速差动传输数据,可以实现点对点或一点对多点的连接,具有低功耗、低误码率、低串扰和低辐射等特点,其传输介质可以是铜质的 PCB 连线,也可以是平衡电缆。LVDS 在信号完整性、低抖动及共模特性要求较高的系统中得到了越来越广泛的应用,为高带宽数据传输应用提供毫瓦每千兆位的方案。

LVDS 总线具有 350 mV 的低压差分信号以及快速的过渡时间,可实现 100 Mb/s ~ 1 Gb/s 的高速数据传输。此外,低电压摆幅可以降低功耗和噪声至最小化。

图 1 是 LVDS 总线的基本结构,包括 LVDS 驱动器、差分传输线对和 LVDS 接收器 3 部分。LVDS 驱动器是由 4 个高速 MOS 管组成的电流开关电路。差分传输线对上传送差分电流信号。在接收端,差分传输线对上需要并联 100 Ω 电阻以便将电流信号转换为电压信号供 LVDS 接收器检测传输信号电平。

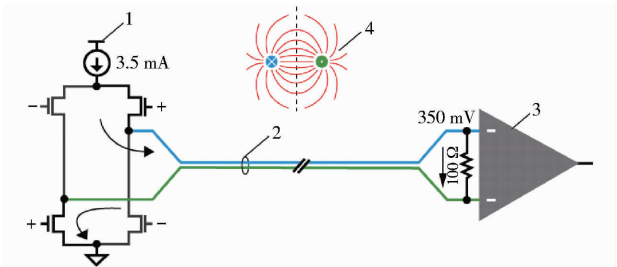


图 1 LVDS 总线的基本结构

Fig. 1 Basic structure of LVDS circuit

1. 驱动器 2. 差分对截面 3. 接收器 4. 耦合场

1.2 传感器结构

本传感器的总体结构如图 2 所示。传感器包括高频振荡器、高速比较器、TTL (transistor-transistor logic)-LVDS 信号转换器、LVDS 差分传输线 A、LVDS 差分传输线 B、LVDS-TTL 信号转换器、相位检波器、电压有效值检测器 8 部分。差分传输线 A 位于电路板的表面直接与土壤接触,是检测传输线。传输线 A 上信号的延时与土壤含水率有关。差分传输线 B 被密封于传感器内部不与外界接触。差分传输线 B 用于传输参考信号,参考信号用于检测

传输线 A 上信号的延时。电路板的基底材料是玻璃纤维 FR4。

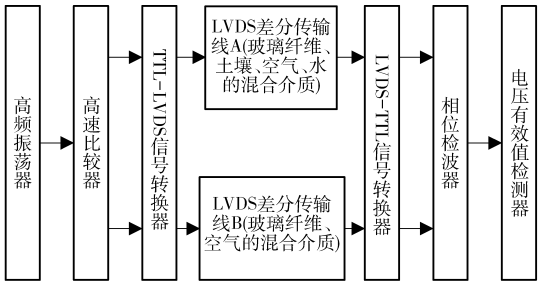


图 2 传感器的总体结构

Fig. 2 Block diagram of sensor

传感器的工作原理是高频振荡器产生高频信号,经过高速比较器将高频信号电平提升至 TTL 电平,以驱动 TTL-LVDS 信号转换器。TTL-LVDS 信号转换器的作用是把单通道 TTL 数字信号转换为双通道 LVDS 差分数字信号。差分传输线 A 用于检测土壤含水率,其介质是玻璃纤维、空气、土壤和水的混合介质。差分传输线 B 用于传输参考信号,由于该传输线被封装在传感器内部,该传输线的介质是玻璃纤维和空气的混合介质。不同含水率土壤的相对介电常数不同,进而影响电磁信号在传输线 A 上的传播速度,从而导致传输线 A 信号与传输线 B 信号出现相位不同步。2 个传输线通道的 LVDS 信号经过 LVDS-TTL 信号转换器,将 LVDS 信号还原为 TTL 电平信号。相位检波器可以检测传输线信号 A 和传输线信号 B 之间的相位差,送往电压有效值检测器变成相位差信号的有效值,以便后续电子系统进行采集和处理。

1.3 传感器电路设计

图 3 是传感器的总体电路图。TX1 为高频振荡器。高频信号经 C3 耦合至高速比较器 U4。高速比较器 TLV3502 为双通道比较器,最大工作频率为 50 MHz。U4 将高频信号电平直接提升至 TTL 电平,以驱动 TTL-LVDS 转换器 U2 FIN1049。FIN1049 集成了 LVDS 总线的驱动器和接收器,是二通道 LVDS 总线收发器。图 3 中 DIFFBUS1 和 DIFFBUS2 分别是 LVDS 差分通道 1 和 LVDS 差分通道 2。U4 的 OUTA 输出端与 U2 的 DIN1 端相连,DIN1 是第 1 差分通道的输入端。U4 的 OUTB 输出端与 U2 的 DIN2 端相连,DIN2 是第 2 差分通道的输入端。本传感器中,U4 的第 1 通道是土壤含水率的测量通道,第 2 通道是参考信号通道。U2 的 DOUT1+ 和 DOUT1- 是第 1 差分通道的输出端,DOUT2+ 和 DOUT2V- 是第 2 差分通道的输出端。U2 的 RIN1+ 和 RIN1- 是第 1 通道 LVDS 信号接收器输入端,RIN2+ 和 RIN2- 是第 1 通道 LVDS 信号接收

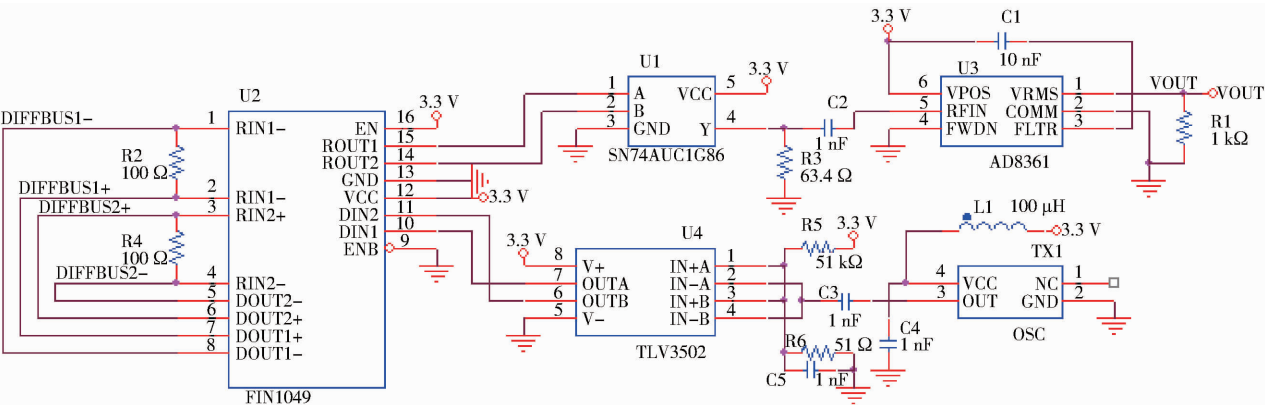


图3 传感器的电路原理图

Fig.3 Schematic of circuit for sensor

器输入端。2个通道的LVDS信号在接收器中被识别并转换为TTL电平的单极性数字信号。U1 SN74AUC1G86是单异或门电路当作相位检波器,用于比较2个通道信号的延迟,获得二者的相位差信息。U3 AD8361是电压有效值检测器,用于提取相位检波器的信号输出,并将其转换为电压有效值。传感器的信号输出端为VOUT端口。

1.4 差分传输线设计

如图4所示,本传感器的差分传输线由2层PCB板加工而成,其中黑色矩形框代表铜箔,白色矩形框代表玻璃纤维(FR4)基底材料,其相对介电常数为 ϵ_r 。从传输线的类型看,本传感器PCB板布置的差分传输线部分是边沿耦合表面微带线。

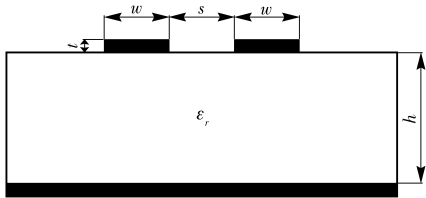


图4 边沿耦合表面微带线剖面图

Fig.4 Cross-section diagram of edge-coupled surface microstrip

边沿耦合表面微带线是一种布置于PCB板表面的传输线。微带线有2种传输模式:奇模传输和偶模传输。由于LVDS总线采用差分形式,因此,本传感器涉及的边沿耦合表面微带线采用奇模传输方法。图4为边沿耦合表面微带线的剖面图,其中 w 表示微带线的宽度, s 表示微带线的间距, t 表示微带线铜箔的厚度, h 表示微带线基底材料玻璃纤维FR4的厚度。

根据美国国家半导体公司公司LVDS总线用户手册的规定,奇模传输边沿耦合表面微带线的近似设计公式为

$$Z_{DIFF,m} \approx 2Z_{0,m} (1 - 0.48e^{-0.96\frac{t}{h}}) \quad (1)$$

其中
$$Z_{0,m} \approx \frac{60}{\sqrt{0.475\epsilon_r + 0.67}} \ln \frac{4h}{0.67(0.8w + t)} \quad (2)$$

式中 $Z_{DIFF,m}$ ——边沿耦合表面微带线的差分阻抗
 $Z_{0,m}$ ——边沿耦合表面微带线的特征阻抗

鉴于LVDS总线的标准阻抗为 100Ω ,而式(1)、(2)中除传输线宽度 w 、传输线间距 s 未知外,其余参数均已知。可以通过最优化方法求解最佳的传输线宽度 w 和间距 s 。构建目标函数求解边沿耦合表面微带线的宽度和间距,即

$$\begin{cases} \min J(s, w) = (Z_{DIFF,m}(s, w) - 100)^2 \\ \text{s. t. } s, w \geq 0.1 \end{cases} \quad (3)$$

式中的约束条件表明差分传输线的线宽和间距的最小值为 0.1mm ,这主要是由电路板加工厂的加工能力决定的。将式(1)、(2)代入式(3)得到

$$\begin{cases} \min J(s, w) = \left[\frac{120 \ln \frac{4h}{0.67(0.8w + t)} \left(1 - 0.48e^{-0.96\frac{t}{h}} \right)}{\sqrt{0.475\epsilon_r + 0.67}} - 100 \right]^2 \\ \text{s. t. } s, w \geq 0.1 \end{cases} \quad (4)$$

显然式(4)是一个带约束条件的非线性最小二乘优化问题。由于式(4)形式复杂,为方便起见,将有关常数(按照厚度 1.6mm 的2层PCB的常规工艺 $t = 0.018\text{mm}$ 、 $h = 1.55\text{mm}$ 、 $\epsilon_r = 4.3$)代入其中再用遗传算法^[29]求解最优的线宽 w^* 和间距 s^* 。

图5为目标函数式(4)的等高线和遗传算法求解的结果,其中“+”位置为边沿耦合表面微带线最优的宽度 w^* 和间距 s^* ,分别为 0.1789mm 和 0.2238mm 。与该最优解对应的目标函数值为 1.36×10^{-6} ,即按照最优解和相关常数设计的边沿耦合表面微带线的差分阻抗与理想阻抗值 100Ω 的绝对误差约为 $1.2 \times 10^{-3}\Omega$ 。实际上,图5等高线图中部白色条状区域都基本满足工程设计要求,为

了降低加工难度,降低加工成本,本文选择了“+”标注的解。

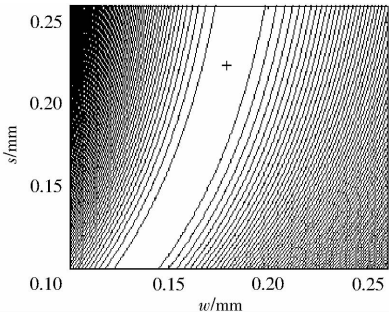


图 5 目标函数与边沿耦合表面微带线宽度 w 和间距 s 的等高线图及其数值解

Fig. 5 Contour of objective function varying with width and space of edge-coupled surface microstrip and one of its numerical solutions

1.5 传感器电极设计

根据式(4)求解得到边沿耦合表面微带线最优线宽和间距,传感器电极的设计图如图 6 所示。DIFFBUS1 用于测量土壤含水率,而 DIFFBUS2 用于传输参考信号。DIFFBUS1 的总长度为 192.44 mm,DIFFBUS2 的长度为 3.64 mm。



图 6 传感器电极

Fig. 6 Electrodes of sensor

2 试验材料与方法

2.1 试验材料与仪器

试验材料包括水、砖红壤土和黄壤土、滴管、量筒、试管和水杯(上口圆形直径 63 mm,下底圆形直径 50 mm,高度 75 mm)、长柄铁勺、筛网、研钵、托盘、塑料保鲜袋。试验仪器为深圳安普特电子科技有限公司 APTB-475A 型电子台秤、上海一恒科学仪器有限公司 DHG-9620A 型电热鼓风恒温干燥箱、美国安捷伦公司 Agilent 33520B 型函数信号发生器、美国安捷伦公司 Agilent 34401A 型台式万用表、美国安捷伦公司 Agilent E3633A 型数控直流稳压电源。

2.2 试验方法

2.2.1 试验前准备

- (1)将砖红壤土和黄壤土去除石块杂草等杂质后分别用研钵碾碎并用筛网过筛。
- (2)将处理后的 2 种土壤样本进行 12 h、105℃干燥处理,并将干燥后的土壤样本分别用塑料保鲜袋密封包装备用。

(3)测定砖红壤土和黄壤土的容重分别为 1.16 g/cm³和 1.27 g/cm³。

(4)取 16 个水杯,平均分为 2 组,每组 8 个水杯。其中 1 组标记为“红 0”至“红 7”,另 1 组标记为“黄 0”至“黄 7”。标记为“红”的水杯将用于盛放砖红壤土土样。标记为“黄”的水杯将用于盛放黄壤土土样。杯中土样的含水率将按照水杯标记中的编号从小到大排列。

(5)取 14 支试管,也分为 2 组,每组 7 支试管。用量筒分别量清水注入各组试管中,水量分别为 5、10、15、20、25、30、35 mL。

2.2.2 试验步骤

(1)取砖红壤土样 135 g 放入“红 0”至“红 7”的 8 个水杯,各水杯土样质量的误差为 1 g。

(2)取 1 组 7 支试管,按照试管中水的体积升序将试管中的水分别注入标记为“红 1”至“红 7”的杯中。

(3)由于注水时,水主要被杯中表层土壤吸收而结块,向下渗透的时间较长。因此,当注水完毕后,用长柄铁勺将结块的湿润土块搅碎,使之与其他干燥土壤混合均匀。然后,将水杯放入塑料袋中并扎紧封闭,静置 12 h,确保整杯土样水分均匀分布。

(4)设置函数信号发生器的输出信号频率,在不同信号频率下分别对不同质量含水率的土样进行数据采集,获得传感器输出的信号电压。

(5)将用过的土壤样本再次用称量法,核算试验用土壤样本的质量含水率。

(6)根据样本质量含水率和土壤容重计算体积含水率。

黄壤土也按照同样的步骤进行试验,得到不同信号频率下黄壤土的质量含水率与传感器输出信号电压的数据。

3 试验数据分析

砖红壤土和黄壤土的试验数据分别列于表 1、2 中。传感器输出电压平均增加值是指传感器输出信号电压减去干燥土壤中传感器的输出信号电压。表 1、2 的数据是经过 10 次测量的平均值,以减小传感器与土壤样本空隙对测量结果的影响。由于传感器中高速比较器 TLV3502 的最大开关频率为 80 MHz,因此,试验中输入信号频率的最大值也定为 80 MHz。

表 1、2 的数据表明,当输入传感器的信号频率为 1 MHz 时,传感器输出信号电压对砖红壤土和黄壤土体积含水率的变化不敏感。此时,对于砖红壤土而言,当土壤体积含水率在 0~29.10% 之间变化

表 1 砖红壤土样本不同体积含水率和输入信号频率下传感器输出电压平均增加值

Tab.1 Average voltage increases of sensor outputs under different signal frequencies and volumetric water content in latosol samples										V
土壤体积 含水率/%	输入信号频率/MHz									
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.16	0	0.01	0	-0.01	0.02	0.04	0.05	0.04	0.05	
8.31	0	0.01	-0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.05	0.06	
12.47	0.01	0.01	-0.01	0.05	0.07	0.12	0.18	0.61	0.80	
16.62	0.01	0.05	0.07	0.12	0.18	0.91	1.96	2.08	2.74	
20.78	0.02	0.09	0.16	0.26	0.30	1.39	3.06	3.20	3.20	
24.93	0.03	0.28	0.56	0.70	0.95	1.57	3.20	3.20	3.20	
29.10	0.03	0.31	0.62	0.86	1.44	2.25	3.20	3.20	3.20	
标准差	0.012 8	0.127 2	0.263 8	0.342 1	0.533 7	0.871 2	1.540 5	1.524 3	1.555 1	

表 2 黄壤土样本不同体积含水率和输入信号频率下传感器输出电压平均增加值

Tab.2 Average voltage increases of sensor outputs under different signal frequencies and volumetric water content in yellow earth samples										V
土壤体积 含水率/%	输入信号频率/MHz									
	1	10	20	30	40	50	60	70	80	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
4.55	0	0.01	0	-0.01	0.01	0.03	0.06	0.08	0.08	
9.09	0	0.01	-0.01	0.01	0.02	0.04	0.05	0.07	0.07	
13.64	0.01	0.01	-0.01	0.05	0.05	0.13	0.30	0.71	0.90	
18.18	0.01	0.05	0.07	0.12	0.15	0.78	1.92	2.71	3.20	
22.73	0.02	0.09	0.16	0.26	0.30	1.49	2.55	3.20	3.20	
27.27	0.03	0.28	0.56	0.70	0.88	2.11	3.20	3.20	3.20	
31.82	0.03	0.31	0.62	0.86	1.29	2.36	3.20	3.20	3.20	
标准差	0.012 8	0.127 2	0.263 8	0.342 1	0.484 4	0.989 2	1.457 0	1.553 7	1.594 8	

时,传感器输出信号电压平均增加值仅为 0.03 V。当土壤样本变为黄壤土时,也得到类似的结果,当土壤体积含水率在 0 ~ 31.82% 之间变化时,传感器输出信号电压平均增加值仅为 0.03 V。

当输入信号频率逐渐升高,从 1 MHz 升至80 MHz,传感器输出信号的电压变化愈加明显。这可从各测试信号频率条件下,与不同体积含水率的传感器输出信号电压的标准差可看出,如图 7 所示。对于砖红壤土样本,当测试信号频率从 1 MHz 变化至 80 MHz 时,传感器输出信号电压平均增加值的标准差从 0.012 8 升至 1.450 8。对于黄壤土也有类似的情形,传感器输出信号电压的标准差从 0.012 8 V 升至 1.537 0 V。这表明在 1 ~ 80 MHz 频率范围内,输入信号频率越高,传感器对土壤含水率的变化越敏感。

表 1、2 中,不论是砖红壤土还是黄壤土,当土壤体积含水率低于 8.31% 时,传感器输出信号电压变化并不显著,电压变化最大值的绝对值仅为 80 mV。这主要是由于土壤含水率低,土壤接近干燥状态,传感器上的传输线无法感知土壤中的水分造成的。即,本文提出的传感器对体积含水率低于 8.31% 的砖红壤土和黄壤土含水率的测量误差较大。而

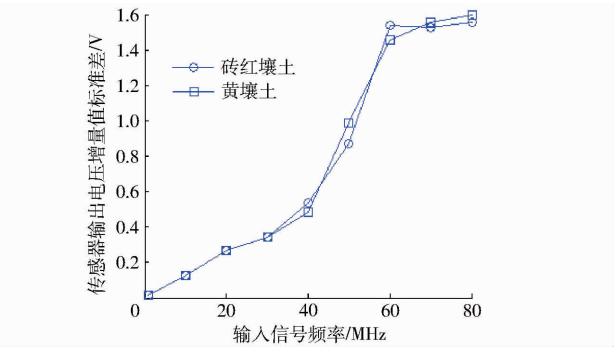


图 7 传感器输出信号电压平均增加值标准差与输入信号频率的关系

Fig.7 Relationship of standard deviation of average voltage increases of sensor outputs and input signal frequencies

8.31% 土壤体积含水率已处于壤土萎蔫系数附近^[30],此时作物会产生永久萎蔫,从而导致减产甚至绝收,正常的农业生产中一般不会出现这种情况。因此,本文以 8.31% 作为传感器测量砖红壤土和黄壤土体积含水率的下限值。

另外,表 1、2 中当输入信号频率升至 60 MHz 时,传感器的输出出现饱和,达到 3.20 V。此时,传感器无法正常工作。导致饱和出现的原因是,此时传

输线上电磁信号的波长变短,信号对土壤中的水分非常敏感。土壤含水率微小的变化使得传输线上信号的延时出现显著变化。

根据表 1、2 数据,当输入信号频率为 50 MHz 时,传感器的输出电压增加值最大,且没有出现饱和现象。以 50 MHz 频率时的数据建立土壤体积含水率(大于等于 8.31%)的预测模型,预测模型的数据和曲线如图 8 所示。该拟合曲线为

$$y = 8.65x + 10.07 \tag{5}$$

式中 x ——传感器输出信号电压
 y ——土壤体积含水率

该模型的决定系数 $R^2 = 0.964\ 2$ 。表 3 列出了用式(5)进行土壤含水率测量得到的误差。对于砖红壤土和黄壤土而言,式(5)模型的最大绝对预测误差为 2.45%。

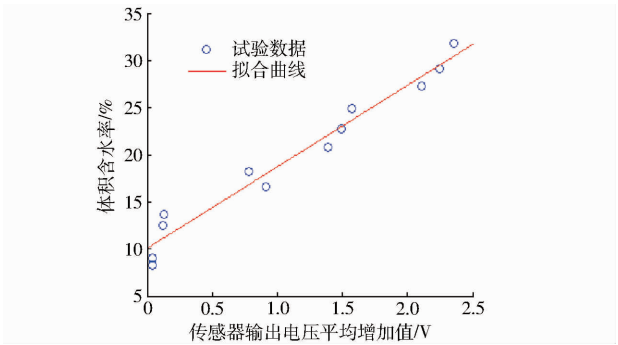


图 8 信号频率为 50 MHz 时传感器对砖红壤土和黄壤土体积含水率的预测模型

Fig.8 Prediction model of sensor in latosol and yellow earth samples when input signal frequency was 50 MHz

4 结束语

设计了一种基于 LVDS 差分传输线延时检测技

表 3 传感器的预测误差		
Tab.3 Prediction errors of sensor		
土壤体积含水率	土壤含水率预测值	绝对预测误差 %
8.31	10.42	2.11
9.09	10.42	1.33
12.47	11.11	1.36
13.64	11.19	2.45
16.62	17.94	1.32
18.18	16.82	1.36
20.78	22.09	1.31
22.73	22.96	0.23
24.93	23.65	1.28
27.27	28.32	1.05
29.10	29.53	0.43
31.82	30.48	1.34

术的土壤含水率传感器。该传感器将 1 路单极性高频信号分路为 2 路 LVDS 差分信号,这 2 路差分信号通过不同的路径传输至 LVDS 总线接收端。1 路用于测量土壤含水率,另 1 路作为参考信号直接送往 LVDS 总线接收端。通过比较 2 路信号的延时估算土壤中的含水率。为了对 LVDS 总线在 PCB 板的布置进行优化计算,构建了 LVDS 总线线宽和间距与传输线阻抗的最优化计算数学模型,并利用遗传算法对该问题进行了求解,确定了 LVDS 总线在 1.6 mm 厚的玻璃纤维 PCB 板上的最优线宽和线间距。依据该参数设计的传感器在砖红壤土和黄壤土样本试验表明,当土壤体积含水率大于等于 8.31%、高频信号工作频率为 50 MHz 时,传感器输出电压与土壤体积含水率预测模型为 $y = 8.65x + 10.07$,预测模型的决定系数 R^2 为 0.964 2,绝对预测误差小于等于 2.45%。

参 考 文 献

1 李元,牛文全,张明智,等. 加气灌溉对大棚甜瓜土壤酶活性与微生物数量的影响[J]. 农业机械学报,2015,46(8):121-129.
LI Yuan, NIU Wenquan, ZHANG Mingzhi, et al. Effects of aeration on rhizosphere soil enzyme activities and soil microbes for muskmelon in plastic greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):121-129. (in Chinese)

2 孙三民,安巧霞,蔡焕杰,等. 枣树间接地下滴灌根区土壤盐分运移规律研究[J]. 农业机械学报,2015,46(1):160-169.
SUN Sanmin, AN Qiaoxia, CAI Huanjie, et al. Research on salt movement law in jujube root zone under indirect subsurface drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(1):160-169. (in Chinese)

3 邢旭光,赵文刚,柳烨,等. 猕猴桃果园不同采样密度下土壤含水率空间变异性研究[J]. 农业机械学报,2015,46(8):138-145.
XING Xuguang, ZHAO Wen'gang, LIU Ye, et al. Spatial variability of soil moisture in kiwi field under different sampling density conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(8):138-145. (in Chinese)

4 卫新东,汪星,汪有科,等. 黄土丘陵区红枣经济林根系分布与土壤水分关系研究[J]. 农业机械学报,2015,46(4):88-97.
WEI Xindong, WANG Xing, WANG Youke, et al. Root distribution and soil water dynamics of jujube plantations in loess hilly regions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(4):88-97. (in Chinese)

5 秦雯,衣淑娟,赵斌,等. 基于烘干法的 SS2802M 土壤水分传感器电阻校准[J]. 齐齐哈尔大学学报:自然科学版,2013,29(6):35-37.
QIN Wen, YI Shujuan, ZHAO Bin, et al. Based on the drying method SS2802M soil moisture sensor resistance calibration[J]. Journal of Qiqihar University: Natural Science Edition,2013,29(6):35-37. (in Chinese)

- 6 马玉莹,雷廷武,张心平,等. 体积置换法直接测量土壤质量含水率及土壤容重[J]. 农业工程学报, 2013,29(9):86-93.
MA Yuying, LEI Tingwu, ZHANG Xinping, et al. Volume replacement method for direct measurement of soil moisture and bulk density[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(9): 86-93. (in Chinese)
- 7 STAFFORD J V. Remote, non-contact and in situ measurement of soil moisture content: a review [J]. Agricultural Engineering Research, 1988, 41(3):151-172.
- 8 SCHMUGGE T, JACKSON T J, MCKIM H L. Survey of methods for soil moisture determination [J]. Water Resource Research, 1980, 16(6): 961-979.
- 9 BITTELLI K, FLURY M. Errors in water retention curves determined with pressure plates [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(5):1453-1460.
- 10 TOPP G C, DAVIS J L, AUNNAN A P. Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines [J]. Water Resource Research, 1980, 16(3): 574-582.
- 11 TOPP G C, WATT M, HAYHOE H N. Point specific measurement and monitoring of soil water content with an emphasis on TDR [J]. Canadian Journal of Soil Science, 1996, 76(3): 307-316.
- 12 许景辉,马孝义, Logsdon Sally D,等. FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析[J]. 农业机械学报, 2014,45(1):102-107.
XU Jinghui, MA Xiaoyi, LOGSDON Sally D, et al. FDR probe structure influence on the soil dielectric spectrum measurement [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 102-107. (in Chinese)
- 13 ROBOCK A, VINNIKOV K Y, SRINIVASAN G, et al. The global soil moisture data bank [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81(6):1281-1299.
- 14 赵燕东,王一鸣. 基于驻波率原理的土壤含水率测量方法[J]. 农业机械学报, 2002, 33(7):109-110,121.
ZHAO Yandong, WANG Yiming. Study on the measurement of soil water content based on the principle of standing-wave ratio [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(7):109-110,121. (in Chinese)
- 15 DUKES M D, ZOTARELLI L, MORGAN K T. Use of irrigation technologies for vegetable crops in Florida [J]. Hort Technology, 2010, 20(1):133-142.
- 16 BULUT R, LEONG E C. Indirect measurement of suction [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(6): 633-644.
- 17 LUNT I A, HUBBARD S S, RUBIN Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data [J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1-4): 254-269.
- 18 CHANZY A, TARUSSOV A, JUDGE A, et al. Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar [J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(5): 1318-1326.
- 19 雷少刚,卞正富. 探地雷达测定土壤含水率研究综述[J]. 土壤通报, 2008, 39(5):1179-1183.
LEI Shaogang, BIAN Zhengfu. Review on soil water content measurement with ground penetrating radar [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1179-1183. (in Chinese)
- 20 STOFFREGEN H, ZENKER T, WESSOLEK G. Accuracy of soil water content measurements using ground penetrating radar: comparison of ground penetrating radar and lysimeter data [J]. Journal of Hydrology, 2002, 267(3-4): 201-206.
- 21 PUMA M J, CELIA M A, RODRIGUEZ I R, et al. Functional relationship to describe temporal statistics of soil moisture averaged over different depths [J]. Advances in Water Resources, 2005, 28(6):553-566.
- 22 WANG L, QU J J. Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: a review[J]. Front of Earth Science, 2009, 3(2):237-247.
- 23 FAMIGLIETTE J S, DEVEREAUX J A, LAYMON C A, et al. Ground based investigation of soil moisture variability within remote sensing footprints during the southern great plains 1997 (SGP97) hydrology experiment [J]. Water Resource Research, 1999, 35(6):1839-1851.
- 24 SAKAKI T, SUGIHARA K, ADACHI T, et al. Application of time domain reflectometry for determination of volumetric water content in rock [J]. Water Resource Research, 1998, 24(10): 2623-2631.
- 25 FERRARA G, FLORE J A. Comparison between different methods for measuring transpiration in potted apple trees [J]. Biologia Plantarum, 2003, 46(1):41-47.
- 26 HUISMAN J A, SPERL C, BOUTEN W, et al. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar [J]. Journal of Hydrology, 2001, 245(1-4): 48-58.
- 27 李加念,洪添胜,冯瑞珏,等. 基于真有效值检测的高频电容式土壤水分传感器[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 216-221.
LI Jianian, HONG Tiansheng, FENG Ruijue, et al. High-frequency capacitive soil water content sensor based on detecting of true root mean square[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 216-221. (in Chinese)
- 28 傅文渊,凌朝东,刘一平,等. 基于差分信号控制的土壤含水率传感器设计[J]. 农业工程学报, 2015, 31(19):76-83.
FU Wenyan, LING Chaodong, LIU Yiping, et al. Design of soil moisture sensor based on differential signal[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(19): 76-83. (in Chinese)
- 29 阎凡平,张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[M]. 北京:清华大学出版社, 2000:396-415.
- 30 耿增超,戴伟. 土壤学[M]. 北京:科学出版社, 2011: 93-94.