

黄飞龙,李昕娣,黄宏智,等. 基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用[J]. 气象,2012,38(6):764-768.

基于 FDR 的土壤水分探测系统与应用^{*}

黄飞龙 李昕娣 黄宏智 刘艳中

广东省大气探测技术中心,广州 510080

提 要: 根据中国气象局对农业气象观测的要求,采用频域反射技术(Frequency Domain Reflectometry,FDR)设计开发了一套土壤水分探测系统。系统共包括传感器测量、数据采集和远程数据管理等几个部分。FDR 测量原理建立在传输线理论和谐振电路的基础上。数据采集部分充分考虑了信号的抗干扰能力以及纠错措施。系统采用无线通信模式将测量数据传送到中心数据库,并使用互联网将数据发送到各个用户。运行结果表明该系统能够连续稳定地测量,经过订正之后的数据与烘干法测量结果接近,误差小于 2%,满足农业气象观测的需要。

关键词: 农业气象, 数据采集, 土壤水分, 频域反射技术(FDR)

Soil Moisture Detection System Based on FDR and Its Application

HUANG Feilong LI Xindi HUANG Hongzhi LIU Yanzhong

Guangdong Atmospheric Sounding Technology Centre, Guangzhou 510080

Abstract: In order to satisfy the needs of agrometeorological observation, a soil moisture detection system using frequency domain reflectometry (FDR) was designed. It includes FDR sensors, data acquisition and remote data management. The FDR measurement is based on transmission theory and resonance circuit, and data acquisition part takes full account of signal's anti-interference ability and error correction methods. Data measured are transferred to central database in wireless communication mode first, and then are sent back to local stations through Internet. Results show that this system can run continuously and stably. Data revised are close to that from drying method. Errors less than 2% tell that this system can totally meet the needs of agrometeorological observation.

Key words: agrometeorology, data acquisition, soil moisture, FDR (frequency domain reflectometry)

引 言

土壤水分的贮存量以及它的变化规律,对农业生产、生态环境的监测调节甚至是气候的变迁都具有重要的研究价值,是最基础的数据^[1]。为了满足干旱气象服务的需求,自 2009 年始中国气象局在多个省份增加了土壤水分自动观测站点,开展土壤墒情观测业务。

土壤水分的探测方法有多种,其中烘干称重法是最传统的,由于对设备的要求不高,操作简单,结

果可靠,不但被使用得最多,而且在国际上也被作为对比的标准方法。但是烘干法也有缺点:每次测量需要取土、烘干、称重、输入、计算等多个步骤,工作量大,时间长,尤其是测量不同深度的土壤水分含量的时候,工作量成倍增加。张力计法也是应用广泛的一种方法,它是一种低设备成本的直接测量方法,缺点是反应时间太慢。射线法是利用各种射线进入土壤的衰减来计算土壤含水率,唯一的缺点是设备维护成本高而且有辐射危险。传统方法还有电阻法、热扩散法等^[2]。探针式电容测量法^[3]和时域反射技术(Time Domain Reflectometry, TDR)测量法

* 广东省科技厅项目(2010B060100055)资助

2011 年 7 月 22 日收稿; 2012 年 2 月 28 日收修定稿

第一作者:黄飞龙,从事大气自动探测与控制研究. Email: chasellong@126.com

则是出现得比较晚的新方法,都能实现实时快速测量工作,但探针电容需要加强弱信号处理环节,而且容易损坏,而 TDR 测量具有非线性缺陷^[4]。本设计所介绍的频域反射技术是近年才兴起的一种土壤水分测量方法,与其他测量方法相比,具有几个优点:频域反射技术分辨率高,线性度好;仪器主要是电路模块,维护简单;无污染,测量的时候不需要破坏土层,方便连续测量。

1 FDR 技术

频域反射技术(Frequency Domain Reflectometry, FDR)是通过发送特定频带的扫频测试信号,在导体阻抗不匹配处会产生较强的和发射信号同样频率但不同时间段的反射信号,通过傅里叶转换方式分析这些信号,并且通过测量反射信号峰值的频率换算出到线路障碍点的距离。目前 FDR 技术开始替代 TDR 时域反射技术,应用到通信测试领域。

和传统的时域反射技术(Time Domain Reflectometry, TDR)比较,FDR 技术主要有两点优势。首先是对事件点插入损耗和频率的正确计算,FDR 不但能判断开路 and 碰线点,还能够判断更多的线路障碍类型如接触不良、桥接抽头等。其次,FDR 在线路承载业务相匹配的频带内进行测试,而 TDR 是一种 DC 直流测量方式。所以 FDR 更适合宽带线路测试。

目前 FDR 技术在大型网络的故障监测,例如电力电缆线路网络中已经得到应用^[5],光频域的 FDR 在传感器领域的研究也越来越多^[6]。

在传输效应^[7]的基础上,使用 FDR 技术的土壤水分传感器工作原理如图 1 所示。振荡器的频率使用 100 MHz,设传输线的等效电阻为 R ,传感器端设计为 RLC 谐振电路,被测量的土壤分布在电容两极之间,土壤的含水率影响着电容的大小。

记 RLC 等效阻抗为 $z_L = r + i(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ 。

式中, r 为阻抗的实部,为等效内阻, $i(\omega L - \frac{1}{\omega C})$ 为等效阻抗的虚部, ω 为角频率, L 为等效电路电感, C 为电容。

使用高频振荡器在传输线开始端提供信号电压

$$U = a \sin 2\pi f t \tag{1}$$

式中, a 是振幅, f 是振荡频率, t 是时间,则在开始端的叠加电压是

$$U_0 = a \sin 2\pi f t + a \rho \sin 2\pi f (t - \frac{2l}{v_p}) \tag{2}$$

式中, ρ 是反射率, l 是传输线的长度, v_p 是信号在沿传输线的传播速度。如果传输线设计成 $v_p/4f$ 的长度,则变成

$$U_0 = a(1 - \rho) \sin 2\pi f t \tag{3}$$

当电路的谐振条件 $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ 成立,传输线上出现频率相同而传播方向相反的两列相干波叠加,呈行驻波状态,此时, U_0 的最大值

$$\hat{U}_0 = a(1 - \rho) \tag{4}$$

相似地在传输线和传感器结合部的峰值电压

$$\hat{U}_s = a(1 + \rho) \tag{5}$$

两个峰值电压的差值

$$\Delta U = \hat{U}_s - \hat{U}_0 = 2a\rho \tag{6}$$

则由于谐振电路中电容的电介质为土壤,这样土壤的水分变化反映在电容 C 的变化值上。使用频率扫描的办法,不断调整信号电源的频率,使得上述电路的谐振条件成立,测得的电压差最大,此时的信号频率即为谐振电路的固有频率。由于谐振发生的条件成立,谐振电路的固有频率 F 为

$$F = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} \tag{7}$$

通过电容与介电常数的关系

$$\epsilon = C/C_0 \tag{8}$$

可以求得土壤的相对介电常数,其中 C_0 是介质为空气时候的电容。

许多文章研究证实土壤介电常数 ϵ 与土壤水分含量 ω 之间具有线性关系^[8-10]:

$$\omega = a\sqrt{\epsilon} + b \tag{9}$$

式中 a, b 是两个常数,由土壤的类型决定,可以通过查询相关的文献获取典型测量值^[11-12]。

因此,选择合适参数的传输线以及设计相匹配的谐振电路,使用频率扫描的办法,可以找出使电路

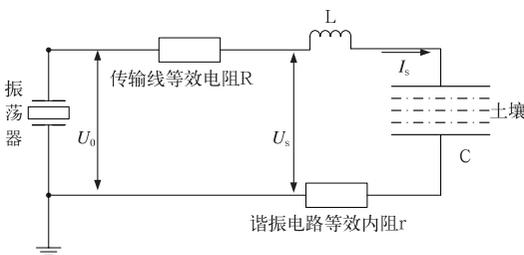


图 1 高频下的谐振电路

Fig. 1 Resonance circuit in high frequency

达到谐振条件的信号电源频率,进一步计算谐振电路的电阻抗值,从而计算土壤电介质容量的变化和土壤水分含量的变化。

2 多层 FDR 采集系统结构

一组多层次的土壤水分含量数据对农业生产和

作物生长研究具有较大的价值,因此基于 FDR 的土壤水分采集系统具有多个安装在不同深度的传感器。采集系统的结构如图 2 所示。

S1 到 S5 代表 5 个传感器,传感器通过均匀传输线与单片机相连,单片机轮询式控制各个传感器谐振电路并且获得检测数据。考虑到仪器安装现场情况比较复杂,对信号干扰和雷电干扰均有较高的

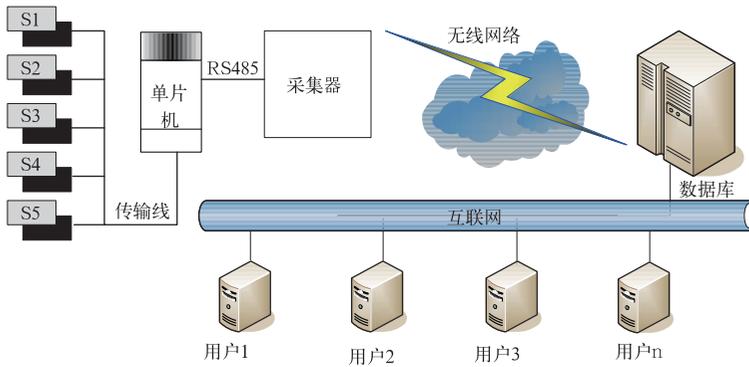


图 2 采集系统结构

Fig. 2 Structure of FDR detection system

要求,单片机模块通过抗干扰能力很强的 RS485 总线与采集器通信。采集器对检测数据进一步进行处理。为了使测量仪器便于野外安装以及数据能够准时传送到服务器,系统采用了无线通信方式,形成标准格式的数据包通过公众的移动通信网络发送到中心数据库服务器。无论是监测台站还是农业气候研究人员均通过互联网获得探测数据。

图 3 详细介绍了单片机和采集器的功能以及数

据测量过程。单片机在接收到测量的命令之后,进行电压差检测,然后计算土壤介电常数以及水分含量。对所有的传感器都测量完毕之后,形成一份汇总数据通过串口发送到采集器。单片机和采集器之间硬件使用带屏蔽层的信号线进行 RS485 远程通信,软件上使用 LRC 纵向冗余校验对接收到的数据进行查错,一旦发现校验不对马上重复上一个命令,重新接收数据。

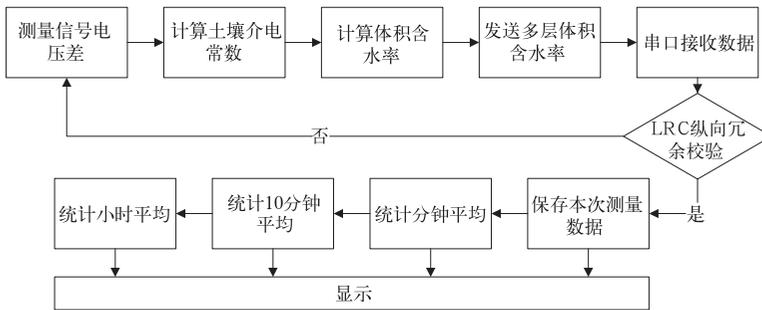


图 3 数据采集流程

Fig. 3 Flow chart of data acquisition

通过 LRC 校验的数据被采集器准确读取并保存在内存中。每分钟进行多次测量并且计算分钟的平均数据,根据气象行业的规范^[13],进行 10 分钟平

均和小时正点平均计算,所有的这些数据都可以在采集器的液晶面板显示出来,方便安装现场调试或者观测人员现场读取数据。

3 远程管理软件

远程管理软件安装在中心服务器上,对土壤水分探测采集器进行远程控制与数据后台处理,并且可以管理多个土壤水分探测采集器,形成土壤水分探测网络。

该软件主要的功能有四个,分别是参数设置、数据转换、数据显示以及数据传输。由于采集器控制多层 FDR 传感器,每一个传感器所在的深度以及接触土壤的成分不同,参数设置可以将每一个传感器的安装深度,以及它所接触土壤的土壤物理常数保存起来。农业气象研究所需要的土壤水分数据不仅仅是传感器所测量的体积含水量,还需要在此基础上,利用土壤物理常数计算出来的相对湿度、重量含水量和有效水分存储量等,这些数据转换都在远程管理软件处理。参数设置还包括数据订正系数的设置,由于测量结果是以人工观测数据为基准,使用对比观测数据对自动测量数据作数据订正,可以使得自动测量数据接近人工观测数据,其误差小于要求值。为了直观显示测量数据,软件提供了表格以及曲线两种方式显示当天测量值。表格可以观察数据的准确性,曲线主要反映了数据的连续性以及变化趋势。远程管理软件还具备将测量以及转换的数据以规范的格式传输到国家级中心服务器上的功能。

4 运行效果

广东省农业土壤水分探测系统网络已经于 2010 年 9 月基本建设完毕,各地共建设 26 个 5 层的自动土壤水分观测站(图 4)。系统运行半年,期间共发生 3 次传感器损坏,1 次传感器控制电路损坏,远程服务软件更新 1 次,无故障。传感器月故障率约为 2.5%。

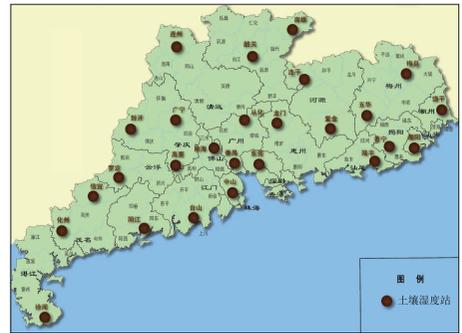


图 4 广东省土壤水分探测站点分布
Fig. 4 Soil moisture detection stations in Guangdong Province

半年期间共进行了 30 次人工观测与自动观测对比,取广东罗定的体积含水量数据做分析,部分对比数据如表 1。

表 1 广东罗定土壤水分对比数据

Table 1 Data of soil moisture at Luoding, Guangdong

样本	10 cm/%		20 cm/%		30 cm/%		50 cm/%		100 cm/%	
	人工	自动	人工	自动	人工	自动	人工	自动	人工	自动
1	20.1	15.6	24.7	14.1	25.5	17.3	28.2	22.5	14.5	9.1
2	21.7	17.6	26.2	15.9	28.6	18.0	28.5	23.5	16.5	9.3
3	22.6	16.6	25.3	14.8	27.3	17.6	27.4	22.8	17.8	9.3
4	23.7	19.3	28.5	18.6	27.9	18.7	31.5	24.5	27.6	9.4
5	24.1	19.1	27.6	16.7	28.1	18.2	30.5	23.4	21.4	8.9
6	25.1	19.2	26.3	18.1	28.2	18.6	27.7	24.3	19.8	9.3
7	26.5	22.7	28.9	19.5	29.0	18.4	29.9	23.4	21.9	8.8
8	27.8	23.7	28.7	21.3	29.1	18.7	30.4	28.7	15.5	9.1
9	28.8	26.4	30.5	23.9	31.6	20.1	32.1	24.5	24.9	9.0
10	29.0	25.3	30.6	21.5	31.6	19.8	29.7	25.0	22.8	9.2
11	30.3	26.0	29.2	24.4	32.2	20.9	34.0	25.9	21.7	9.4

文献[3]探讨了最小二乘法作一次线性函数拟合对 TDR 土壤水分探测传感器数据标定具有良好效果。文献[14]采用线性函数拟合对 6 种基于 TDR 和 FDR 的土壤水分测量仪器做了标定,标定的相关系数均大于 0.97,结果是可信的。因此,数

据订正采用线性公式:

$$Y = A_0 + A_1 X$$

式中:Y 为订正值,X 为仪器测量值,A₀ 是线性方程的常数项,A₁ 是线性方程的一次方系数,通过数据拟合的方法确定订正方程以及 A₀,A₁。订正前后仪

器测量与烘干法测定的体积含水量的绝对误差平均值 $\bar{\sigma}$ 如表2所示。

表2 数据订正公式及前后误差对比
Table 2 Correction formulas and errors
before and after data correction

仪器测量值与人工测定体积含水量的绝对误差平均值			
	订正公式	订正前	订正后
10 cm	$Y=13.3+0.5518X$	4.2%	1.2%
20 cm	$Y=19.579+0.4291X$	8.6%	1.1%
30 cm	$Y=3.7218+1.3189X$	9.3%	0.8%
50 cm	$Y=16.084+0.5641X$	5.5%	1.1%
100 cm	$Y=-16.566+4.0699X$	11.4%	3.1%
平均		7.8%	1.4%

从表2数据来看,5层数据中前4层仪器测量与烘干法测量的变化趋势比较一致,数据订正效果也比较好。第5层由于仪器观测值变化不大,数据订正效果相对不好。据了解,该观测站仪器安装在观测场地势较高,与烘干法取土地点有一定的地势差,第5层仪器测量值比较稳定。但是从长期观测对比来分析,经历过雨季和旱季两个阶段之后,第5层的数据能够有一个比较大的变化范围,使得数据订正参数更为准确。

封开地区属于广东西部山区,广州从化属于珠江三角洲,两个站点的土壤结构成分都有很大差异,由于10 cm深度和20 cm深度的土壤水分变化比较大,取这两层的数据做对比分析更能够反映数据订正的效果。

如图5、图6所示,封开地区取2011年6月3日到7月18日的两组对比数据,数据分析显示10 cm订正后数据平均误差为1.88%,20 cm订正后数据平均误差为1.90%,两层的人工以及自动观测对比

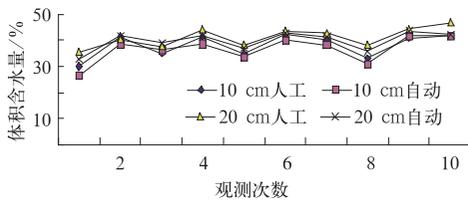


图5 封开地区数据订正效果

Fig. 5 Correction result in Fengkai Area

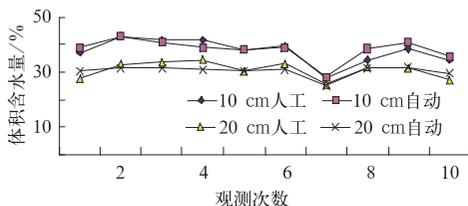


图6 从化地区数据订正效果

Fig. 6 Correction result in Conghua Area

数据的趋势走向非常吻合。从化地区取2011年6月8日到7月23日两组对比数据,数据分析显示10 cm订正后数据平均误差为1.40%,20 cm订正后数据平均误差为1.56%。两层深度的含水量明显不相接近,但是两层深度的对比数据趋势走向同样非常吻合。线性拟合对于土壤水分观测数据订正的效果非常好。

5 结论

本文介绍的基于频域反射技术的土壤水分探测系统是一个成熟、稳定的系统。该系统采用了FDR探测技术,从数据采集到数据传输管理等方面均能够达到业务运行的要求。经过数据订正之后,仪器测量值能够与标准的人工观测方法接近,平均误差不大于2%,均远低于 $\pm 5\%$ 的规范要求,满足国家气象农业观测的需要。

参考文献

- [1] 王仰仁,李松敏,王文龙,等.基于概念模型的麦田土壤水分动态模拟研究[J].气象,2010,36(12):102-108.
- [2] 陈家宙,陈明亮,何圆球.各具特色的当代土壤水分测量技术[J].湖北农业科学,2001,(3):25-28.
- [3] 胡建东,赵向阳,李振峰,等.参数调制探针式电容土壤水分传感器技术研究[J].传感技术学报,2007,20(5):1057-1060.
- [4] 卢启福,吴慕春,胡月明,等.基于TDR-3的土壤水分传感器标定模型研究[J].传感技术学报,2009,22(7):1066-1070.
- [5] 罗俊华,周洪春,李华春,等.电力电缆线路运行温度在线检测技术应用研究[J].高压技术,2007,33(1):169-172.
- [6] 吴飞,蔡璐璐,李志全.分布式光纤应变传感器的研究[J].仪器仪表学报,2005,26(8):1039-1041.
- [7] 黄振兴.微波传输及其电路[M].成都:电子科技大学出版社,2010:120-150.
- [8] Cosenza A T. Electromagnetic determination of clay water content:role of the microporosity[J]. Applied Clay Science, 2004,26:21-36.
- [9] Gaskin G J, Miller J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique[J]. Journal of Agricultural Engineering Research,1996,63:153-160.
- [10] Miller J D, Gaskin G J, Anderson H A. From drought to flood; Catchment responses revealed using novel soil water probes[J]. Hydrological Processes,1997,11:533-541.
- [11] 李秀春,刘洪禄,杨培岭. SMP-o1土壤水分传感器研制[J].中国农村水利水电,2002(1):38-39.
- [12] 冶林茂,吴志刚,牛素军,等. GStar-I型电容式土壤水分检测仪设计与应用[J].气象与环境科学,2008(3):82-85.
- [13] 中国气象局监测网络司.自动土壤水分观测仪功能需求书[S].2008:6-7.
- [14] 杨直毅,樊军. TDR和FDR测定黄绵土土壤含水量的标定[J].土壤通报,2009,40(4):740-742.