

万雪芬, 崔剑, 杨义, 等. 地下 LoRa 无线传感器网络的传输测试系统研究[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39(3): 118-124.

地下 LoRa 无线传感器网络的传输测试系统研究

万雪芬¹, 崔 剑², 杨 义³, 蒋学芹³, Sardar Muhammad SOHAIL³

(1 华北科技学院 计算机学院/河北省物联网数据采集与处理工程技术研究中心, 河北 廊坊, 065201;

2 北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083; 3 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要:【目的】以智能手机为核心, 研制成本低、使用简单的面向 LoRa 地下无线数据传输的测试系统。【方法】该测试系统由安装了测试用的 App 智能手机和与之匹配的地下测试节点组成。利用该系统进行场景测试, 测定影响土壤中 LoRa 无线数据传输效果的因素并讨论对应的数据传输方法。【结果】测试结果表明, 该系统运行可靠、使用方便灵活, LoRa 低功耗广域网技术亦可以较为可靠地满足土壤介质中的无线传感器网络数据传输需求。【结论】本系统可为未来地下 LoRa 无线传感器网络的工程应用提供相应的测试手段。

关键词: 无线传感器; LoRa; 智能手机; 无线数据传输; 低功耗; 广域网
中图分类号: S29; TN709 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)03-0118-07

Research on transmission measurement system for LoRa wireless underground sensor network

WAN Xuefen¹, CUI Jian², YANG Yi³, JIANG Xueqin³, Sardar Muhammad SOHAIL³

(1 College of Computer, North China Institute of Science and Technology/Hebei Engineering Technology Research Center for IOT Data Acquisition & Processing, Langfang 065201, China; 2 School of Electronics and Information Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China; 3 College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

Abstract: 【Objective】To develop a low-cost and simple operational system based on a smartphone for measuring the transmission of LoRa wireless underground data. 【Method】The measurement system consisted of a smartphone with test App installed and its matching underground test nodes. Scene measurements were carried out with this system. The factors affecting the LoRa wireless data transmission in soil were determined, and the corresponding data transmission methods were discussed. 【Result】The test results showed that the system was reliable and easy to operate, and LoRa low-power wide-area network technology could meet the data transmission requirements of wireless underground sensor networks in soil. 【Conclusion】The system is expected to provide the appropriate testing method for the engineering application of LoRa wireless underground sensor networks in the future.

Key words: wireless sensor; LoRa; smartphone; wireless data transmission; low-power consumption; wide-area network

收稿日期: 2017-10-14 优先出版日期: 2018-04-16
优先出版网址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20180416.1032.018.html>
作者简介: 万雪芬 (1979—), 女, 讲师, 硕士, E-mail: calmerd@ncist.edu.cn; 通信作者: 杨 义 (1978—), 男, 副教授, 博士, E-mail: yyiyang@dhu.edu.cn
基金项目: 国家自然科学基金 (11572084, 71371046); 国家安全生产监督管理总局安全生产重大事故防治关键技术科技项目 (zhishu-0016-2017AQ); 中国煤炭工业协会 2017 年度科学技术研究指导性计划资助项目 (MTKJ2017-311); 廊坊市科学技术研究与发展计划资助项目 (2016011034)

无线传感器网络已在农业、工业、安监及环境领域得到了广泛应用^[1-3]。地下无线传感器网络可多层次、多维度地精细观测得到地下土壤环境中的各项参数,并可避免土壤表层农业耕作、车辆行驶、采矿作业等带来的不便^[4-5]。但是与常规无线传感器网络相比,地下无线传感器网络的信道条件较差,且尚未形成领域内普遍认可的商用传输协议标准^[6-8],这制约了其大规模的工程应用与商业推广。

近年来低功耗广域网的 LoRa 无线传输技术有望为地下无线传感器网络的传输组网提供新的技术手段^[9-10]。Silva 等^[11]研究表明,扩频技术可以较大程度增强无线电磁信号在土壤中的传输效果。LoRa 在调制中采用的啁啾扩频技术(Chirp spread spectrum, CSS)可有效降低无线信号在地下土壤环境中传输的多普勒效应^[12]。LoRa 无线传输的灵敏度高达-140 dBm,在相同功率下的传输距离远大于 ZigBee、蓝牙和 Wifi 传输模式,同样也优于基于传统调制方式采用 433、868 MHz 频段的传输协议。1 个 LoRa 广域网(Wide area network, WAN)可以容纳数百万个节点,LoRa 低功耗、低成本、单跳组网、易配置、高可靠性等特点也适用于地下无线传感器数据传输领域。

土壤类型、土壤密度、土壤含水量及植物根系等都会对地下无线信号的传输造成影响,土壤含水量会随降水、灌溉等因素的变化而发生改变,是影响地下无线传感器网络工作效能的主要因素。此外土壤中的给排水管道、堤坝、地基、挡土墙及随机分布的碎石等也会恶化无线信号的传输质量。这些影响无线传输的因素在不同的应用场合具有较大的随机差异,往往难以仅借助理论模型来推定实际的传输效能,所以在地下无线传感器网络的实际工程使用中,通常会借助测试设备测量节点间的传输效能,并作为系统设计、安装及维护的依据^[13-15]。本文提出了一种基于智能手机的地下 LoRa 无线传感器网络传输测试系统,以期满足本领域低成本、高灵活性、高可靠性的节点通信效能测试需求,为未来基于 LoRa 的地下无线传感器网络的推广提供相应的技术支持。

1 LoRa 无线信号在土壤中的传输

根据无线信号传输的 Friis 公式,并根据多径传输理论将 LoRa 传输路径离散化,可以得到:

$$P_r = \sum_{n=1}^K [P_{t,n} + G_{t,n} + G_{r,n} - L_{p,n}], \quad (1)$$

式中, $P_{t,n}$ 、 $G_{t,n}$ 、 $G_{r,n}$ 及 $L_{p,n}$ 分别为第 n 条路径上的发射功率、发射端增益、接收端增益及路径损耗,公式中 t 及 r 分别代表发射(transmit)与接收(receive),发射功率的单位为 dBm,增益及损耗的单位为 dB; P_r 为接收功率。路径损耗可表示为:

$$L_{p,n} = L_{0,n} + L_{c,n} + L_{a,n}, \quad (2)$$

式中, $L_{0,n}$ 、 $L_{c,n}$ 与 $L_{a,n}$ 分别为第 n 条路径上的自由传播损耗及在界面处与在介质中的传输损耗,单位为 dB。

如果 LoRa 无线传感器网络的所有节点都布设于地下,其传输路径可分为地下-地下(Underground-underground, UU)路径与地下-地上-地下(Underground-aboveground-underground, UAU)路径 2 类。UU 路径与 UAU 路径上的路径损耗主要受界面处与在土壤介质中传输损耗的影响。随着节点埋深、降雨及灌溉引起的土壤电导率变化等, UU 路径与 UAU 路径上的传输能量分配及损耗特性也会发生改变。随着节点埋深增加, UAU 路径上的能量占比会减少,而 UU 路径上的能量占比会增加。降水引起的土壤水分增加及形成的地表积水与径流等会大幅度地增大土壤中及土壤表层界面上的损耗。在大多数情况下,由于 UAU 路径部分处于空气中,其路径损耗要显著低于 UU 路径。

LoRa 技术在组网时采用星型网络拓扑结构,所以在测试其传输效能时可基于点对点的传输效能。现有主流商所用的 LoRa 通信模块基本基于 Semtech 公司的专利设计,而该设计的细节尚未完全公开。另外从工程实用的角度出发,地下无线传感器网络最为核心的功能是数据的可靠传输。所以在测试中选择数据包传输成功率(Packet success rate, PSR)作为传输效果的衡量依据。PSR 定义为:

$$PSR = N_s/N_t \times 100\%, \quad (3)$$

式中, N_s 与 N_t 分别为通过 LoRa 节点间通信成功接收到的数据包数与发送的数据包数。

2 系统结构与功能

2.1 系统结构

基于智能手机的地下 LoRa 无线传感器网络传输测试系统结构如图 1 所示。系统由安装了测试用 App 的智能手机和与之配套的地下测试节点组成。当使用智能手机靠近布置于地表的 NFC 标签后,测试用 App 启动,并建立与地下测试节点之间的蓝牙低功耗(Bluetooth low energy consumption, BLE)连接。之后用户通过手机设定测试参数并开

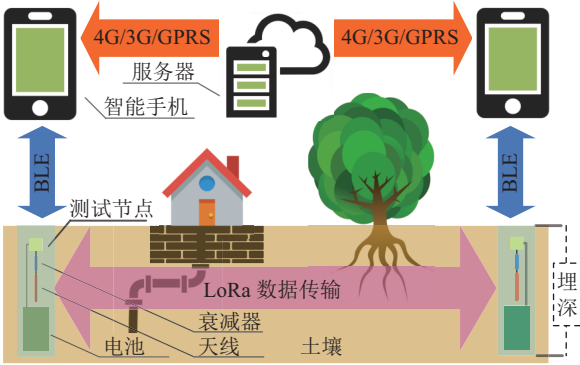


图 1 系统结构图

Fig. 1 Configuration of measurement system

始测试。发送端与接收端的测试参数传递、控制信号发送等皆由双方智能手机通过 4G 网络完成，如所在区域无 4G 网络，亦可依靠 3G、GPRS、EDGE 等移动数据网络工作。发送端智能手机产生一组伪随机码序列 (Pseudo-random binary sequence, PRBS) 并通过蓝牙发送到地下测试节点形成带顺序标签的 LoRa 负载 (Payload)，同时将该伪随机码序列信息发送到接收端手机。接收端地下测试节点将成功接收的 LoRa 数据包负载通过蓝牙上传到接收端智能手机中，并跟踪传输过程中的各项主要参数。完成所有数据包发送后，发送端手机经短暂延时后发出测试截止信号。接收端手机收到该信号后从接收端地下测试节点中提取测试参数并比较 LoRa 负载中的伪随机序列，最终得到对应测试过程的 PSR 取值等供用户参考。在测试过程中用户可以自由设定发送端与接收端的关系，从而进行

双向测试。该系统使用十分方便。地下测试节点可以灵活地长期或短期布设在土壤中。智能手机的引入较大程度地降低了系统成本、简化了系统架构，用户通过智能手机即可直观有效地控制测试过程。智能手机的 4G 网络功能还可为测试过程中发送端与接收端之间数据的传送和触发信号、同步信号等测试控制信号提供稳定可靠的交互手段。

2.2 地下测试节点设计

由于智能手机承担了系统主要的检测及追踪功能，地下测试节点可具有高度精简的硬件结构。系统中的地下测试节点由微控制器、BLE 模块、NFC 标签、隔离型电源模块、铅酸电池、LoRa 通信模块、衰减器及 433 MHz 天线组成 (图 2)。

微控制器负责节点的管理调度工作，设计中采用外覆不锈钢铠装、具有 nanoWatt XLP 功能的 PIC16F1947 低功耗微控制器。BLE 模块用于连接节点与智能手机，在设计中采用的 RN4020 蓝牙模块发送功率可达 7 dBm，接收灵敏度为-92.5 dBm，可以有效保障节点在地表以下数米范围内与智能手机间的可靠通信。NFC 标签、隔离型电源模块与铅酸电池分别选用 NXP NTAG216、广州致远 ZY-WRDS-2W 及赛特 12V12AH 铅酸电池。系统中 LoRa 模块采用基于 SX1278 的 AS62-T20 型 LoRa 通信模块。通过设置该模块内部寄存器并匹配调整外部衰减器与天线组合，可以获得[0, 20] dBm 区间上的任意 LoRa 发射功率。

为防止节点浸水，节点在工作中被分别密封于内径 10 cm、长度约 75 cm 的管状 PVC 防水容器

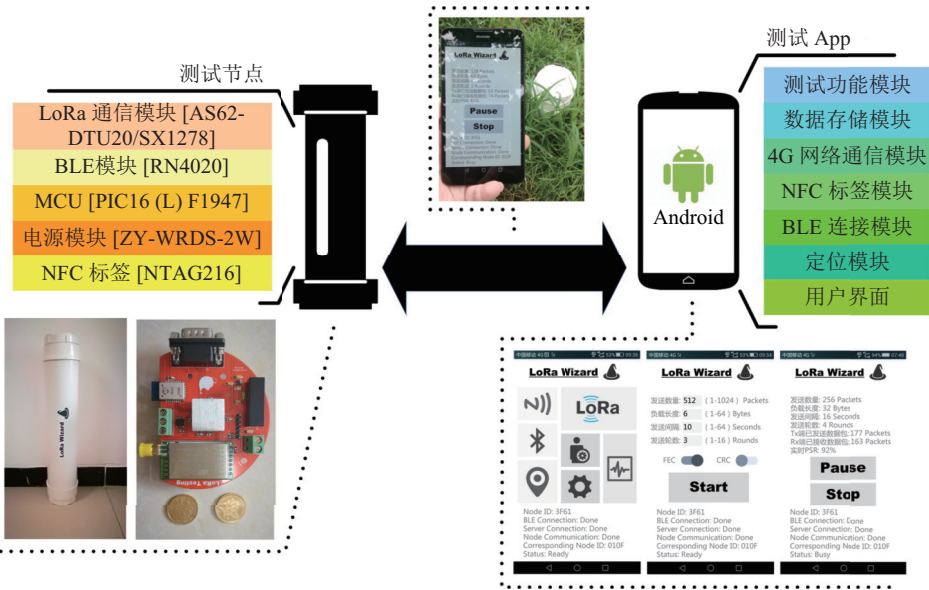


图 2 测试节点与 App 的功能结构

Fig. 2 Functional structure of test node and App

中。铅酸电池布设于防水容器底部, 天线与节点主板位于容器顶部, 天线可在距离顶部 $[0, -45]$ cm 区间上灵活调整。使用者可以通过防水容器顶部可旋下的封盖对节点进行日常维护、升级等操作。

2.3 Android 智能手机 App 设计

传输测试系统使用由华北科技学院、东华大学及北京航空航天大学组成的 LoRa 低功耗广域网课题组自行研发的 App, 该测试 App 基于 Android 4.4.2 开发。App 中的测试功能模块具有生成测试数据、记录测试参数、时间同步信标、触发测试等测试所需的功能 (图 2)。NFC 标签功能用于触发程序启动并读取标签中的节点 ID、蓝牙配对标识等信息。BLE 连接模块用于建立并维护智能手机与节点之间的蓝牙通信。4G 网络通信模块通过 Socket 方式与远端进行数据与控制命令的交互。数据存储模块将每次测得的数据输出到智能手机 SD 卡中的测试结果文件。App 中的定位模块在测试中借助手机中百度地图或高德地图接口获得节点的位置信息。用户通过用户界面实现对测试过程的控制与测试结果的查看。

3 测试结果与分析

系统完成后先后在东华大学松江校区及松江农田保护区进行了测试, 前者属于典型的城市园林区域, 后者则是华东地区较为常见的农田种植环境。在上述 2 个测试区域中, 土壤类型为壤土。在东华大学松江校区中, 草坪根系主要分布于 0~10 cm 深度的区域内, 树木根系主要分布于 0~1.3 m 深度的区域内。在松江校区的测试区域内, 在深度为 0.5~3.0 m 的区间内还纵横分布有铸铁市政排水管道与通信管路, 此外还存在路基、挡土墙及碎石等障碍物。在松江农田保护区中, 实测作物根系主要分布于深度范围为 20~55 cm 的区域。在测试中节点都布设于地下土壤环境中, 埋设深度相同, 通过金属反射面约束天线主瓣方向, 使收发天线方向一致。LoRa 无线传输模块的发射功率设为 20 dBm, 天线增益 3 dBi, 节点间距 300 m。

在大多数工程应用环境中, 当地下无线传感器网络节点布置在土壤中后, 节点间的土壤类型、土壤密度、碎石、路基等障碍物及土壤内部环境通常不会发生较大变化。其在 LoRa 无线数据传输时仅引入 1 个偏静态固定参量, 对地下无线传感器网络造成的影响较小。而降雨及灌溉等引起的土壤含水量改变及地表积水等是造成通信过程中无线信道

传输特性发生变化的最主要因素, 造成了传输效能较大范围内的动态起伏, 因此需要进行有针对性的测量, 这也是本系统设计的核心测量目标。以往在该方向的研究中, 对传输路径上土壤含水量的标定仅仅采用路径上的 1 个或数个参考值点^[11, 16]。但是在实际应用场合中由于传输路径的复杂性、土壤渗透过程、植物根系及地表地下设施情况等因素的变化, 各传输路径上土壤含水量分布取值存在一定的差异^[17]。而同时刻完整准确地测量所有传输路径上的土壤含水量的连续分布曲线有较大难度。所以在类似的测试中可考虑采用降雨量作为无线传输测试的参考。测试中降雨量可由雨量计或气象服务数据得到, 获取方式简单便捷; 灌溉水量可以通过有效灌溉面积的计算折合成降雨量值, 统一参考依据。尤其是在地下无线传输系统设计、安装与维护中, 有可供查阅的以往气象数据用以参考, 这将会带来较大的工程便利。

能耗有效是无线传感器网络设计的核心宗旨。当较强程度的降雨或灌溉发生后, 土壤中的水分增加, 会在地表形成对无线信号有较大衰减与屏蔽效果的地面积水与径流, UAU 信道中空气传输部分在降雨过程中的雨衰也不可避免。此时进行无线传输不仅效率低下, 而且会由于无法完成操作等原因而较大程度地空耗能量。在基于 LoRa 等单跳星型拓扑的无线网络结构中, 通常会采用中心节点轮询或终端节点发送后确认的方式来进行数据传输。当上位机在数个轮询周期无法接收数据, 或终端节点在数次数据发送后无法收到确认信息时, 会暂停传输过程、关闭无线收发模块、暂存监测数据, 待信道传输条件恢复之后再开启进入下一次的轮询或终端节点发送, 由此可减少无效数据的传输并节约能耗。即在实际工程使用中, 地下无线传感器网络通常会避免在降雨过程中进行数据传输。为了适应这一情况, LoRa 低功耗广域网课题组对 LoRa 无线传输的测试中选择在雨后无表面积水, 降水已经完全沁入土壤后的时段进行多次测量。

在测试中, 智能手机与地下测试节点的蓝牙连接稳定可靠, 未出现数据丢失的现象。智能手机之间的数据通信流畅, 节点布设于土壤中后工作稳定可靠, 且未出现因进水等意外造成的节点失效情况。测试系统操作简单, 无需相关背景知识。

节点在东华大学松江校区约 0.5 和 1.5 m 埋深 (防水容器垂直安放时底部距离地面的距离, 天线前端距离地面约 0.1 和 0.7 m) 处获得的测试结果如图 3 所示。

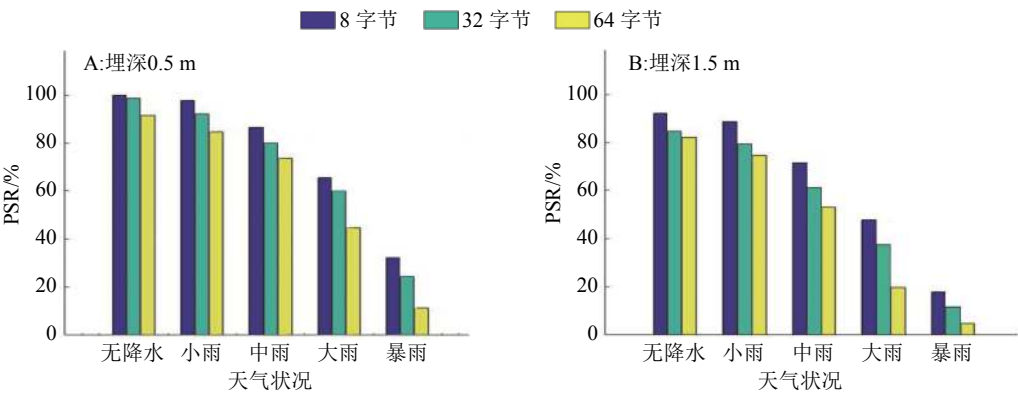


图 3 东华大学松江校区的数据包传输成功率 (PSR)

Fig. 3 Data packet transmission success rate in Songjiang campus of Donghua University

由图 3 可以看出, 在无降水或降水较少时, LoRa 啁啾扩频信号体现出了优异的传输效能, 在节点埋深为 0.5 m 时, 300 m 传输距离上其 8 字节长度用户数据负载的 PSR 接近 100%。这一结果远优于 802.15.4、ZigBee 等常用无线传感器网络协议, 传输效果也比大多数载波在 433 MHz 频段、相同发射功率的商用通信模块好。降雨引起的土壤水分增加造成的电导率改变及土壤表面积水等可对 LoRa 啁啾扩频信号在土壤中的传输特性产生一定程度的影响。由图 3 不难看出, 随着降雨量的增加, LoRa 的传输效能有所降低。此外较长的 LoRa 数据包在传输中出错的概率及应用层执行前向纠错码 (Forward error correction, FEC) 造成的前后数据包的顺序冲突要高于短包, 其传输效能随降水量增加而降低的程度也高于短包。通过比较图 3 中埋深为 0.5 与 1.5 m 的测量结果也可以看出, 当节点布设深度较深时, 较多的能量分布于损耗较大的 UU 路径中, 传输效能有所降低。而节点埋深变浅, 能增加分布在传输损耗较小的 UAU 路径中的能量, 从而提高传输效能。此外测试中还发现, LoRa 具有极高的接收灵敏度, 即使 UU 路径中的能量损耗殆

尽, 但是只要有部分 UAU 路径能量能够通过反射、折射等到达接收端, 就可实现数据传输。如果将节点容器顶部覆土或存在其他遮挡, 将大大降低 UAU 路径能量, 10 cm 厚度的覆土都会令传输距离下降 1 个数量级以上。实际工程应用中应尽可能依靠 UAU 信道进行传输, 所以应尽可能合理安置设备或采用在地表增设反射器等方法, 利于 UAU 路径能量分布。此外 LoRa 的单跳传输模式也有利于使用定向天线等适用于 UAU 能量分布的方式。此外 UAU 路径上的能量不仅与 LoRa 信号透过土壤进入空气的能量有关, 也与地表植被等对 LoRa 信号的反射与折射有关。这也是在部分无植被环境中 LoRa 地下无线传感器节点间信号的传输效果劣于有植被环境的重要原因之一。测试中还发现, 较为连续的植物冠层也在很大程度上有助于 LoRa 无线传输中 UAU 路径的形成。

地下无线传感器网络在不同应用环境中的传输效果存在一定差异。在松江农田保护区中获得的测试结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, 由于该处土壤中没有给排水管路、路基等障碍物, 在无雨或小雨时, LoRa 无线传输的效果要略好于在东华大

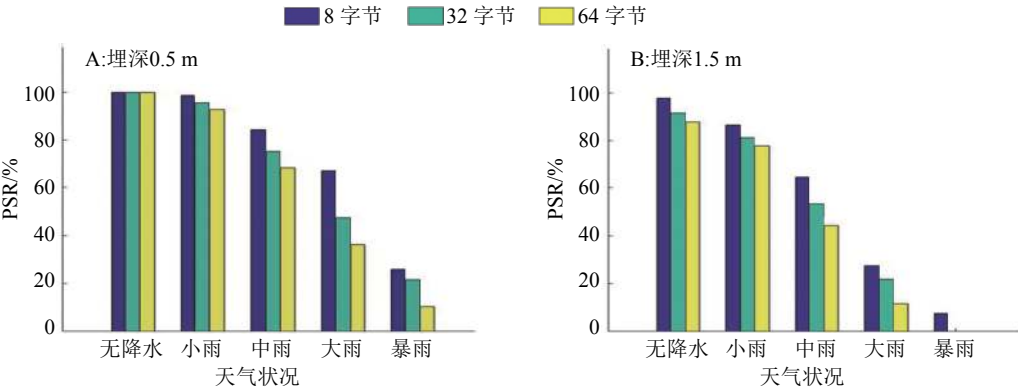


图 4 松江农田保护区的数据包传输成功率

Fig. 4 Data packet transmission success rate in Songjiang basic farmland reserve

学松江校区的传输效果。但是农田中不具有与城市园林类似的良好排水设施, 在有较大降雨的情况下, 土壤中的水分比城市园林高, 尤其是深埋节点的含水量明显高于同一深度的城市园林。从图 4 可以看出, 在有较大降雨出现, 土壤饱含水分时, 松江农田保护区中深埋节点的通信效能降低十分严重, 几乎无法进行有效通信。另外需要指出的是, 为了验证系统功能及各项因素对 LoRa 无线传输的影响, 在上述测试中天线增益为 3 dBi。如果将其替换为增益为 17 dBi 的天线, 在上述 2 个测试场地大雨天气后仍可取得浅埋节点间 PSR>50% 的传输效果。

4 讨论与结论

由本研究测试结果可以看出, LoRa 无线传输可为地下传感器网络提供有效的组网手段, 但在不同的工程应用环境中其传输效果存在差异。不同的埋深、数据包长度等都会对其传输效果造成影响, 尤其是降水等会改变土壤水分含量的过程, 对其传输性能有关键性的影响。较大的埋深可避免机耕等活动对节点的损坏, 隐蔽性更高; 较长的数据包有助于在一次发送操作中承载更多的信息量; 但是浅埋和短数据包则有助于提高传输效能。试验中采用的 AS62-T20 型 LoRa 模块加入了 FEC 纠错机制, 但是在传输较长数据包时, 如果数据间隔过小, 就会出现数据包顺序冲突, 引起数据包丢失; 而如果关闭 FEC, 仅依赖 LoRa 底层原生的纠错机制, 虽然一定程度上可以降低上述冲突, 但是会付出纠错能力降低的代价, 加大轮询周期或延长节点数据发送周期则是降低长包顺序冲突的有效手段。所以 LoRa 地下无线传感器网络的工程设计者与使用者应尽可能从实际测量出发, 并通过积累的数据对系统进行有针对性地具体工程应用的折中优化。针对土壤含水量上升过程对 LoRa 传输的影响, 可以实施相应的策略加以应对^[18-19], 如在中心数据节点安装雨量监测装置并采用轮询方式, 感知降水过程参数并结合以往对 LoRa 传输的监测结果设定轮询与否及等待周期; 此时节点也对应设定为多次无轮询命令则进入休眠状态, 或者节点有土壤水分监测传感器的情况下, 其感知到周围水分超过阈值后即缓存数据、关闭无线收发模块, 待周围土壤含水量降低后再发送数据的模式设定; 缓存阈值亦可通过以往对 LoRa 传输的实际测量结果设定。LoRa 简洁的单跳组网传输结构易于针对土壤含水量变化的策略实现, 这也是其相对于多跳网络传输结构在地

下无线传感器网络领域的应用优势之一。

LoRa 无线传输技术是未来物联网中低功耗广域网方向上的主干支撑技术之一, 并将会为地下无线传感器运用领域提供新的信息传输手段。为从实际工程需求出发, 研究 LoRa 无线传输技术在地下无线传感器网络组网应用中的具体传输效能, 本文提出了一种基于智能手机的低成本地下 LoRa 无线传感器网络测试系统, 该系统仅由地下测试节点及与其匹配的智能智能手机组成, 结构简单、操作方便, 农民日常生活间隙借助智能手机就可进行测试。系统采用具有较强通信信号及良好用户界面的智能手机作为核心, 成本非常低廉。该系统有望改善现有地下无线传感器网络 LoRa 无线传输测试手段缺乏的情况。系统完成后在东华大学松江校区及松江农田保护区中进行了实际场景测试, 浅埋节点在无降水条件下可在约 300 m 的传输距离上取得近 100% 的 PSR。即使埋深增加, 由于 LoRa-CSS 方式较好的土壤穿透性及相应 UAU 信道的存在, 在无降水条件下 PSR 仍可达 90% 以上。降水会对 LoRa-CSS 的无线传输效果造成影响。但是在测试中发现, 在测试场地中出现小雨及中雨之后, 节点间 PSR 仍可维持在 50% 以上。测试结果还表明, 较浅的埋深及较短的 FEC 数据包也在一定程度上有助于提高节点间的通信效能。测试结果表明, LoRa 在地下土壤环境中具有较好的传输性能, 可作为地下无线传感器网络的可靠传输手段。LoRa 无线传输的效能受埋深、数据包长度及降水等过程影响, 在不同的应用环境下影响因素还会有较大不同, 所以在基于 LoRa 无线传输的地下无线传感器网络的设计、布设及维护中, 需参照实际测试结果加以匹配应对。本研究提出的测试系统具有结构简单、成本低廉、运行可靠及易于操作的优点, 有望为未来基于 LoRa 的地下无线传感器网络的推广应用提供相应的技术支持。

参考文献:

[1] YU X, WU P, HAN W, et al. A survey on wireless sensor network infrastructure for agriculture[J]. Comput Stand Inter, 2013, 35(1): 59-64.

[2] 许培培, 万雪芬, 杨义, 等. 用于观光农业的混合型无线传感器网络节点设计[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(2): 118-124.

[3] VIJAYALAKSHMI S R, MURUGANAND S. Different soft computing algorithms used in fire sensor node of wireless sensor network integrated with IoT[J]. Int J Embedded Syst, 2017, 9(4): 310-320.

[4] ZHANG Z, WU P, HAN W, et al. An advanced wireless

- sensor networks for soil property monitoring[J]. *J Inf Comput Sci*, 2012, 9(14): 4141-4147.
- [5] TIUSANEN M J. Soil scouts: Description and performance of single hop wireless underground sensor nodes[J]. *Ad Hoc Netw*, 2013, 11(5): 1610-1618.
- [6] AKYILDIZ I F, STUNTEBECK E P. Wireless underground sensor networks: Research challenges[J]. *Ad Hoc Netw*, 2006, 4(6): 669-686.
- [7] LI L, DONG N, CHEN J. EM wave propagation in non-uniform soil[J]. *Inf Technol J*, 2013, 12(19): 5011-5016.
- [8] 郁晓庆, 韩文霆, 吴普特, 等. 土壤不同频率无线地下传感器网络信号传播特性试验[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(4): 252-260.
- [9] ALOÿS A, YI J, THOMAS C, et al. A study of LoRa: Long range & low power networks for the Internet of things[J]. *Sensors*, 2016, 16(9): 1466.
- [10] SCHMIDT N. LoRa: A radio approach towards IoT geo localization[J]. *Microwave J*, 2016, 11: 28-32.
- [11] SILVA A R, VURAN M C. Communication with above-ground devices in wireless underground sensor networks: An empirical study[C]// *IEEE International Conference on Communications*. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1-6.
- [12] PETAJAJARVI J, MIKHAYLOV K, PETTISSALO M, et al. Performance of a low-power wide-area network based on LoRa technology: Doppler robustness, scalability, and coverage[J]. *Int J Distrib Sens Netw*, 2017, 13(3): 1-16.
- [13] TJELTA T, BACON D. Predicting combined rain and wet snow attenuation on terrestrial links[J]. *IEEE Trans Antennas Propag*, 2010, 58(5): 1677-1682.
- [14] NDZI D L, HARUN A, RAMLI F M, et al. Wireless sensor network coverage measurement and planning in mixed crop farming[J]. *Comput Electron Agric*, 2014, 105: 83-94.
- [15] SILVA B, FISHER R M, KUMAR A, et al. Experimental link quality characterization of wireless sensor networks for underground monitoring[J]. *IEEE Trans Ind Inf*, 2015, 11(5): 1099-1110.
- [16] ZEMMOUR H, BAUDOIN G, DIET A. Soil effects on the underground to aboveground communication link in ultra wideband wireless underground sensor networks [J]. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett*, 2016, 16: 218-222. doi: 10.1109/LAWP.2016.2570298
- [17] SUSHA L S U, SINGH D N, BAGHINI M S. A critical review of soil moisture measurement[J]. *Measurement*, 2014, 54(8): 92-105.
- [18] SHI G, NAN G, KOU J, et al. Comprehensive review of sleep/wake scheduling in wireless sensor networks[C]// *High performance networking, computing, and communication systems. 2011 Second International Conference*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011, 16: 492-499.
- [19] SIDDIQUI S, GHANI S. Towards dynamic polling: Survey and analysis of channel polling mechanisms for wireless sensor networks[C]// *Intelligent Systems Engineering (ICISE), 2016 International Conference on*. Islamabad, Pakistan: IEEE, 2016: 356-363.

【责任编辑 霍 欢】