

基于 LoRaWAN 自适应数据速率的地下无线 传感网络性能评估

郝彤^{1,2}, 赵国政^{1,2}

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 同济大学 空间信息科学与可持续发展应用中心, 上海 200092)

摘要: 随着城镇化进程的不断加快和物联网技术的迅速进步, 地下复杂土壤介质中的无线传感网络正成为新的研究热点。在此背景下, 首先概述了基于 LoRaWAN 的地下无线传感网络基本架构和研究现状, 接着搭建了网络仿真器并实现了自适应数据速率(ADR)调节机制在传感器节点端和网络服务端的 2 个优化算法, 最后依据网络整体数据接收率和网络能耗等性能指标, 分别从传感器节点的地下部署环境(土壤含水量和传感器埋藏深度)和 LoRa 物理层参数两方面进行了网络性能定量评估。结果表明, 针对土壤这一复杂介质, ADR 调节机制对 LoRaWAN 中的物理层参数具有较好的调节能力, 该机制可为地下无线网络性能优化提供有利手段, 有望大幅降低网络能耗。

关键词: 地下无线传感网络; 物理层参数; 自适应数据速率(ADR)调节机制; 地下空间

中图分类号: P23; TN92

文献标志码: A

Adaptive Data Rate Mechanism for Network Efficiency Evaluation in LoRaWAN-based Wireless Underground Sensor Networks

HAO Tong^{1,2}, ZHAO Guozheng^{1,2}

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Center for Spatial Information Science and Sustainable Development Applications, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the continuous acceleration of urbanization and the rapid advancement of the Internet of Things technology, the study of wireless sensor networks within complex underground soils has become a new hot spot. In this paper, we first summarize the basic architecture and research status of LoRaWAN-based wireless underground sensor networks and build a

network simulator to implement two optimization algorithms of adaptive data rate (ADR) mechanism at the sensor node and the network server, respectively. Furthermore, we conduct a quantitative evaluation of network performance from the aspects of the underground deployment environment (soil's moisture content and sensor's burial depth) and physical layer parameters of LoRa, according to the performance indicators of the overall data extraction rate and network energy consumption. The results show that for the complex soil, the ADR mechanism has a good ability to adjust the physical layer parameters of nodes in LoRaWAN-based wireless underground sensor networks, which can provide a favorable means for the performance optimization of wireless underground sensor networks, and is expected to greatly reduce the network energy consumption.

Keywords: wireless underground sensor networks; physical layer parameters; adaptive data rate (ADR) mechanism; underground space

随着我国城镇化进程的不断加快, 对地下空间的利用也逐步迈向更高水平。为了更好地实现对地下基础设施和地下环境的持续性监测, 人们将目光凝聚到了地下无线传感网络。地下无线传感网络是一类将传感器节点埋藏在地下、网关置于地上的无线通信网络, 可实现地下基础设施监测^[1-2]、地下环境监测^[3]和农业精准化监测^[4-5]等应用。然而, 传统的地下无线传感网络尚无法满足长期远程通信的需求, 其节点电池的能耗问题是制约网络整体性能的重要瓶颈。为了改善传统地下无线传感网络的缺陷, 学者们引入低功率广域网技术, 从而实现可持续

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家自然科学基金(42211530077, 42074179); 中央高校基本科研业务费专项资金

第一作者: 郝彤, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为地下无线传感网络。

E-mail: tonghao@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

的大规模地下监测^[6-7]。

针对地下无线传感网络,众多学者探究了地下与地下、地下到地上以及地上与地下的信道模型。Ferrari^[8]提出了地下到地下的信道模型,描述了电磁波在土壤中的传播形式并探讨了多径效应、土壤特性、土壤含水量和节点埋藏深度等对地下通信的影响。结果表明,地下通信受土壤含水量的强烈影响。此外,Sun等^[9]进一步探究了地下与地下、地下到地上以及地上与地下等3种通信方式的信道模型,为后期研究地下无线传感网络提供了强有力的信道模型支撑。除了对信道模型的研究,Silva等^[10]和Zemmour等^[11]借助实地实验探究了上述3类通信信道的链路质量特性。结果表明,传统的地下无线通信技术无法实现地下无线传感网络的大规模部署,而且不适合于传感器节点埋藏深度在50 cm左右、土壤含水量为20%~50%的众多农业应用。

上述研究结果表明,传统的地下无线传感网络无法满足较大埋藏深度、较大土壤含水量的大规模地下监测需求。近年来,众多学者寄希望于低功耗广域网技术来解决上述问题。Wan等^[12]和Lin等^[13]通过实地实验初步评估了LoRa技术在土壤中的传播特性,发现土壤含水量、传感器节点和LoRa的有效载荷显著影响LoRa在土壤中的传播特性,并进一步验证了不同地下土壤环境中LoRa的物理层参数对数据传输链路质量的影响。结果表明,LoRa技术可以有效扩展地下无线传感网络的覆盖范围。Lin等^[14]研究了基于LoRa技术的地下到地上以及地上到地下的信道模型。该研究结果成功证明了LoRa技术在地下管线监测方面的优势,并为基于LoRa的地下无线传感网络研究提供了理论支撑。

尽管基于LoRaWAN的地下无线传感网络能够实现大范围的地下监测,但是监测过程中的数据传输质量和能源消耗是不容忽视的重要问题。为了实现数据传输质量和能源消耗的有效调节,LoRa官方提供了一种自适应数据速率(ADR)调节机制,通过调节传输功率(TP)和扩频因子(SF)对LoRaWAN中各节点的数据传输速率进行自适应调节,从而提高数据的传输质量,减少能量损耗。虽然ADR调节机制在空气介质网络中的性能验证已在文献[15]中实现,并在地下隧道环境中开展了实地应用与推广,如Worldsensing^[16]、Senceive^[17]等,但该调节机制在复杂地下直埋环境中对无线传感网络的调节能力尚未可知;同时,地下土壤环境处于动态变化中,ADR调节机制对动态变化的LoRaWAN的调

节能力也需要评估。

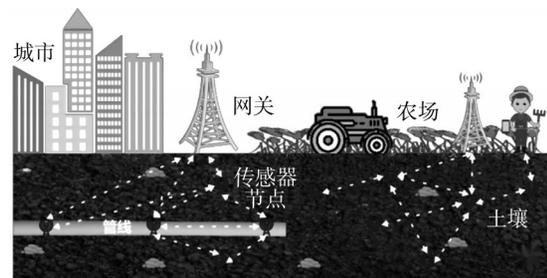
为此,将ADR调节机制从地上拓展到地下纯土壤介质环境,通过搭建基于LoRaWAN的地下无线传感网络仿真器,实现了地下传感器ADR调节机制在节点端和网络服务端的2个优化算法及调节功能;同时,考虑到由地下纯土壤介质环境动态变化引发的链路改变以及不同级别的网络规模,依据网络整体数据接收率(DER)和网络能耗(NEC)等性能指标,定量评估了ADR调节机制对地下无线传感网络性能的调节能力。

1 基于LoRa和LoRaWAN的地下无线传感网络概述

1.1 地下无线传感网络

地下无线传感网络是由地下传感器节点自组织形成的网络,目的是采集无线传输被监测区域的传感信息^[18]。不同于现有的地下空间监测方法,地下无线传感网络将传感器节点完全埋藏于地下土壤介质中。同时,将网关安置在地面或地上一定高度,接收和存储由地下传感器获取到的数据,实现地下与地上节点间的双向无线通信,结构示意图如图1所示。地下无线传感网络的结构特性催生了众多新兴应用,如地下基础设施监测^[1,19]、自动化精准农业^[5,20]、地下环境监测^[21]和边境巡逻^[22]等。

本文主要探讨的地下基础设施监测技术是面向



a 在地下基础设施及智慧农业中的应用



b 在水坝、桥梁等大型基础设施中的应用

图1 地下无线传感网络应用场景

Fig.1 Application scenarios for wireless underground sensor networks

地下直埋基础设施的无线传感网络,如图1a所示。此外,面向我国自动化精准农业发展的重大需求,地下无线传感技术也能够实现对土壤的实时动态监测,为农作物科学耕种提供数据支撑,有效促进农业的集约化发展。地下无线传感网络不仅可以进行地下基础设施和土壤环境监测,还可用于人造介质内的监测应用场景,如由以钢筋混凝土为代表的人造介质所构建的大型基础设施(如大坝、桥梁)结构健康监测^[23-24],如图1b所示。

总体而言,尽管地下无线传感技术能够实现对地下数据的动态获取,但是仍受限于地下复杂的环境因素(如土壤特性、土壤密度和土壤含水量等)。传统的无线传感技术覆盖范围较小,尚无法实现远距离的信息传输与通信^[25-26]。同时,传感器节点被埋藏于地下,节点电池定期更换较为困难,因此电池的能量损耗也是重要的制约因素^[27]。面对上述挑战,近年来出现的低功耗广域网技术以其低功耗和远距离传输特性受到越来越多的关注。相对于其他低功耗技术,LoRa提供了更好的安全性和更高的数据传输量^[6],同时具有低速率、低功耗的特性,有望弥补传统无线传感技术传播范围小的缺点,满足地下无线传感网络的应用需求。国内一些机构也正积极开展介质内无线充电技术的研究^[28-30]。

1.2 LoRa技术与LoRaWAN网络

LoRa是由Semtech公司开发的一种线性调制扩频技术^[31]。鉴于LoRa技术的远距离和低功耗特性,其主要受传输功率、扩频因子、编码速率(CR)和带宽(BW)等参数的影响。LoRaWAN是由LoRa联盟组织定义的一种通信协议和系统构架^[32],其网络结构如图2所示。

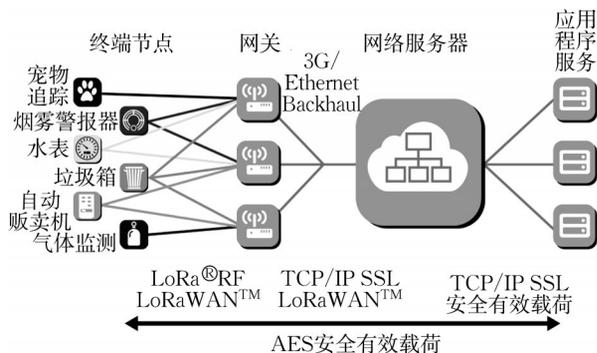


图2 LoRaWAN网络结构示意图^[32]

Fig.2 Schematic diagram of of LoRaWAN network architecture^[32]

1.3 基于LoRaWAN的地下无线传感网络性能分析

通过设计网络仿真器进行基于LoRaWAN的

地下无线传感网络性能研究。尽管网络性能包含多个方面,但是数据接收率和能量损耗是地下无线传感网络的重要性能指标。因此,依据数据接收率和能量损耗2个指标分别从传感器节点的地下部署环境(土壤含水量和节点埋藏深度)和LoRa的物理层参数对基于LoRaWAN的地下无线传感网络性能进行定量评估。

为了对网络性能进行评估,采用网络整体数据接收率和网络能耗评估指标。 α_{DER} 是指网关接收到的数据包数量与网络内节点总体发送的数据包数量的比值,计算式为

$$\alpha_{\text{DER}} = \frac{N_{\text{rc}}}{N_{\text{tr}}} \quad (1)$$

式中: N_{rc} 为网关接收到的数据包数量; N_{tr} 为网络所有节点发送的总体数据包数量。

β_{NEC} 是指网络中所有节点传输数据包所消耗的总能量,计算式为

$$\beta_{\text{NEC}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{tr}}} V_{\text{sup}} I_{\text{tr}} t_{i,\text{tr}} \quad (2)$$

式中: V_{sup} 为节点电池电压,设为3V; I_{tr} 为节点传输数据包时使用的电流; $t_{i,\text{tr}}$ 为第*i*个节点传输单个数据包所需时间。

γ_{EPP} 是指网络中成功传输的数据包所消耗的能量,计算式为

$$\gamma_{\text{EPP}} = \frac{\beta_{\text{NEC}}}{\alpha_{\text{DER}}} \quad (3)$$

为了实现提高数据接受率和能量利用率的目标,进行了物理层参数的优化选取。LoRa联盟提出的ADR调节机制是通过调节扩频因子和传输功率来优化数据传输速率和网络节点的传输能耗^[33]。Li等^[15]对LoRaWAN中的ADR调节机制进行了实验验证。结果表明,现有的ADR调节机制对静态网络性能优化具有较好的效果。然而,现存关于ADR调节机制的研究都是基于地上无线传感网络,对于该机制能否在地下无线传感网络中具有良好的调节效果尚未可知。结合地下传感器节点静态布置的特性,研究ADR调节机制对基于LoRaWAN的地下无线传感网络的性能优化效果具有重要意义。

2 ADR调节机制对网络的性能优化

2.1 ADR调节机制

ADR调节机制通过调整静态节点的扩频因子和传输功率来提高网络的整体容量,减少网络的能

量损耗,最大程度地提升节点的电池寿命。ADR调节机制由传感器节点和网关间无线链路中的链路质量指标实现,具体而言,靠近网关的节点可以使用较低的扩频因子传输数据,从而减少消息传输时间,达到降低能耗的目的。

ADR调节机制在LoRaWAN中包含两部分:节点处的调节机制(ADR-node)与网络服务端处的调节机制(ADR-net),具体算法分别如图3、4所示。图3、4表明,ADR调节机制通过调节扩频因子和传输功率,能够自适应地优化无线传感网络的数据传输速率和传输过程中的能量消耗,从而最大限度地提高终端节点的电池寿命和网络容量。在地下无线传感网络中,传感器节点被固定埋藏在地下,同时地下监测实际应用场景对网络容量的要求较小,这使得ADR调节机制在大规模网络调节中的限制对基于LoRaWAN的地下无线传感网络的影响较低。因此,ADR调节机制能够在地下无线传感网络中发挥较大作用。

算法1 ADR-node

```

ADR_ACK_LIMIT ← 32
ADR_ACK_DELAY ← 32
ADR_ACK_CNT ← 0
if Uplink transmission then
  ADR_ACK_CNT ← ADR_ACK_CNT + 1
if ADR_ACK_CNT == ADR_ACK_LIMIT then
  Request response from server
if ADR_ACK_CNT ≥ ADR_ACK_LIMIT + ADR_ACK_DELAY then
  TP ← TP + 3
  ADR_ACK_CNT ← ADR_ACK_LIMIT
  if TP ← TPmax then
    SF ← SF + 1
if Downlink transmission received then
  ADR_ACK_CNT ← 0

```

图3 ADR-node算法

Fig.3 ADR-node algorithm

2.2 仿真实验与结果分析

2.2.1 仿真参数

在仿真实验中,将ADR调节机制运用到笔者开发的基于LoRaWAN的地下无线传感网络仿真器中,该仿真器支持下行、重传等信道功能要求。为了验证ADR调节机制在地下无线传感网络中的调节性能,同时考虑到地下监控的实际需求(以智慧农业为例),地下节点的部署密度无须过大,同时节点数据发送的频率也无须过于频繁,因此以单个网关为圆心、50 m

算法2 ADR-net

```

输入: DR, TP, SNR, offset
SNRmax ← SNR - threshold [DR] - offset
steps ← round(SNRmargin/3)
for steps > 0 and SF > SFmin do
  SF ← SF - 1
  steps ← steps - 1
for steps > 0 and TP > TPmin do
  TP ← TP - 3
  steps ← steps - 1
for steps < 0 and TP < TPmin do
  TP ← TP + 3
  steps ← steps + 1
输出: SFADR, TPADR

```

图4 ADR-net算法

Fig.4 ADR-net algorithm

的通信距离为半径,随机部署100个节点,并且每个节点间隔30 min向网关发送一个大小为20 bytes的数据包。具体的仿真实验参数如表1所示。

表1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	数值
通信范围/m	50
平均传输速率/(byte·min ⁻¹)	20/30
上行信道中心频率/MHz	486.3~487.7
下行信道中心频率/MHz	506.7~508.1
扩频因子	7~12
传输功率/dBm	{2,5,8,11,14,17,20}
带宽/kHz	125
编码速率	4/5
节点个数	100
仿真时间/d	30
占空比/%	1

需要注意的是,理论上认为最适合植物生长的土壤类型为壤土^[34],其土壤成分比例为40%沙土、40%黏土和20%淤泥,因此设定土壤类型为壤土,其平均颗粒密度为2.66 g·cm⁻³,土壤容积密度为1.5 g·cm⁻³^[35]。

2.2.2 地下土壤环境下ADR调节机制物理层参数的优化选取

设计ADR调节机制的最初目的是为了提升网络传输性能、节省网络能耗并扩大有效网络规模。在ADR调节机制中可调的2个物理层参数为扩频因子和传输功率,因此首先讨论ADR调节机制下不同扩频因子和传输功率的调节效果。为了更直观地体现各节点对扩频因子和传输功率的优化使用情况,统计了仿真过程中使用不同扩频因子和传输功

率来传输的数据包数量在总传输数据包数量中的占比。当传感器节点被埋藏在地下时,能耗问题显得尤为重要,必须考虑不同地下土壤环境中ADR调节机制的调节情况。不同地下环境最直接的体现为不

同的土壤含水量和不同的传感器埋藏深度。因此,进一步分析了不同土壤含水量和传感器埋藏深度下使用不同扩频因子 f_{SF} 和传输功率 f_{TP} 传输的数据包占比,具体实验结果如图5和图6所示。

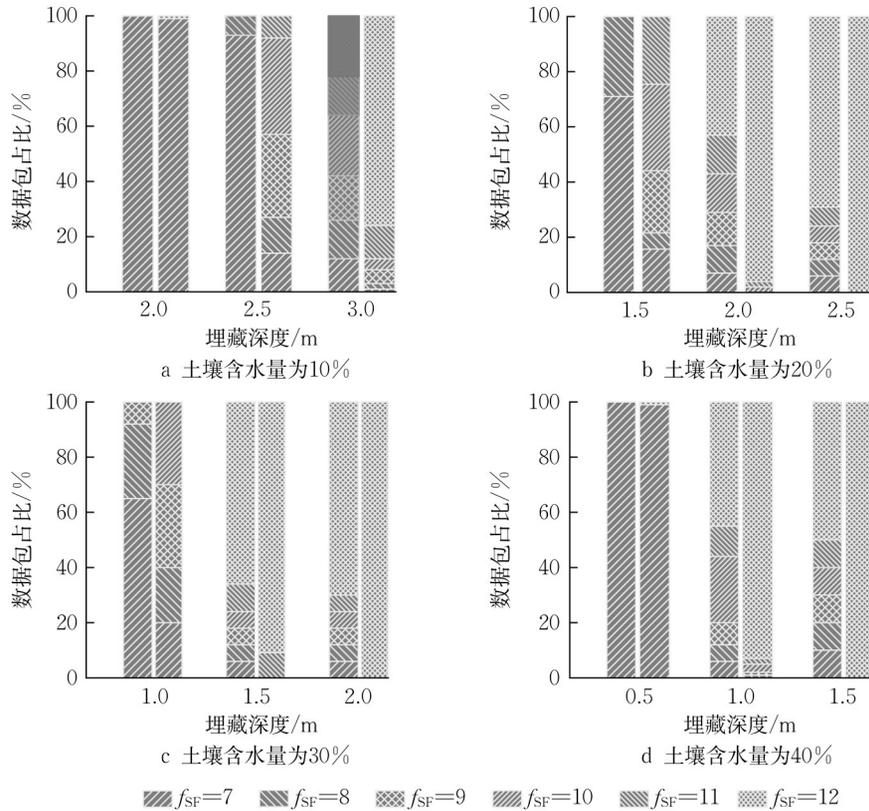


图5 不同土壤含水量和传感器埋藏深度下ADR调节机制中采用不同扩频因子传输的数据包占比

Fig.5 Percentage of packets transmitted with different spreading factors in ADR mechanism at different soil's moisture contents and burial depths

图5为在不同地下环境(不同土壤含水量和不同传感器埋藏深度)下ADR调节机制运行过程中节点利用不同扩频因子来传输的数据包占比。需注意的是,扩频因子为7~12时进行传输的数据包占比之和为100%。ADR调节机制的前提是上行数据包能被网关接收,基本机制是通过调减扩频因子来减少传播时间,因此在ADR-net端扩频因子只能减少不能增加。同时,为了防止因扩频因子和传输功率过小而导致上行数据包不能被网关接收,ADR调节机制在ADR-node端通过增加扩频因子和传输功率来确保数据包能够被顺利接收。由ADR-node算法可知,若预设初始条件下网关并没有接收到数据包,ADR-node端的每次上行传输需要至少ADR_ACK_LIMIT次、至多ADR_ACK_LIMIT+ADR_ACK_DELAY次才能增加一次传输功率或扩频因子,这样使得ADR调节机制的调节时间过长,不利于在信

道状态不稳定的地下土壤环境中使用。因此,初始参数的合理设定至关重要。在本次仿真实验中,初始传输功率均设为20 dBm,初始扩频因子分别设置为7和12。图5中每个深度处显示左右2个柱状图,左侧为初始扩频因子7、右侧为初始扩频因子12的情况下数据包占比。为了设置对照实验,在土壤含水量依次递增10%的情况下,使节点的起始埋藏深度依次递减0.5 m,即图5a以2.0 m为起始埋藏深度、图5b以1.5 m为起始埋藏深度,以此类推,全面考察良好地下环境、一般地下环境和恶劣地下环境中ADR调节机制的调节情况。

从图5可以看出,在地下环境良好(土壤含水量较低或节点埋藏深度较浅)的情况下,无论初始扩频因子设为7还是12,接近100%的数据包都能够在扩频因子为7的情况下进行传输,如图5a中土壤含水量为10%、埋藏深度为2.0 m的情况。在恶劣地下

环境(土壤含水量较高或埋藏深度较深)中,无论初始扩频因子设置为7还是12,使用扩频因子为12进行传输的数据包最多,说明节点最终都会将扩频因子调节为12。不同于初始扩频因子设为12的情况,当初始扩频因子设为7时,需要在ADR-node端不断递增发送扩频因子为7~11的数据包,以此逐步增加扩频因子的取值,从而使数据包能被接收到。在初始扩频因子设为7的情况下,尽管节点最终将扩频因子调节为12,但是会增加调节时间,造

成不必要的时间消耗,如图5b~d中埋藏深度为2.0、1.5、1.0 m的情况。在地下环境一般(土壤含水量较低但节点埋藏深度较深,或土壤含水量较高但节点埋藏深度较浅)的情况下,无论初始扩频因子设为7还是12,各自都会调节到较小的扩频因子。当初始扩频因子设为7时,选择最大的传输功率配合较小的扩频因子;当初始扩频因子设为12时,在逐步减小传输功率的情况下选用较小的扩频因子。

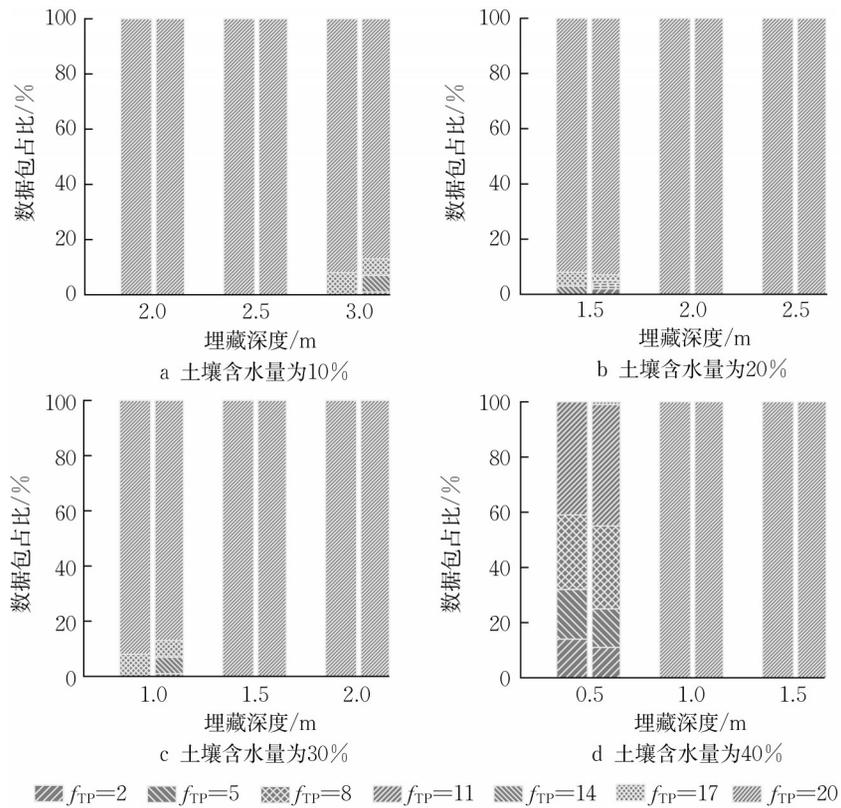


图6 不同土壤含水量和传感器埋藏深度下ADR调节机制中采用不同传输功率传输的数据包占比

Fig.6 Percentage of packets transmitted with different transmission powers in ADR mechanism at different soil's moisture contents and burial depths

图6为在不同地下环境(不同土壤含水量和不同埋藏深度)下ADR调节机制运行过程中节点利用不同传输功率来传输的数据包占比。在地下环境良好的情况下(如土壤含水量为40%,埋藏深度为0.5 m),传输功率会被调节为较小的值,如图6d所示。由于本实验中初始传输功率为最大的可设定值20 dBm,无论一般还是恶劣地下环境下,数据包传输过程中使用的传输功率大部分都保持在该最大值附近,以确保传感器节点发送的数据包能够被网关顺利接收到。

上述实验结果表明,无论初始扩频因子为7还是12,ADR调节机制对静态环境下的网络都具有较好

的调节能力。从调节时间来看,在地下环境良好的情况下,初始扩频因子设为7或12皆可;在地下环境一般或恶劣的情况下,初始扩频因子设为12较为合适。

衡量无线传感网络通信质量的2个重要指标分别为网络整体数据接收率和网络能耗。为了考察ADR调节机制在地下土壤环境中的节能效果,同时为了给埋藏在不同地下土壤环境中的传感器选取合适的初始扩频因子,从数据接收率和网络能耗角度对ADR调节机制进行讨论。图7描述了在不同地下环境中的网络能耗。当地下无线传感网络不使用ADR调节机制进行调节,所有传感器都设为 $f_{SF}=12, f_{TP}=20$ dBm时,整体网络能耗约为128 kJ。从图7可以看

出,除了地下环境恶劣的情况下,即土壤含水量较低或传感器埋藏深度较浅,采用本文提出的ADR调节机制均能有效降低网络能耗。例如,在地下环境良好的情况下,无论初始扩频因子设为7还是12,网络能耗都很小,与不使用ADR调节机制的网络相比,网络能耗减少90%以上,如图7a中传感器埋藏深度小于2.5 m,或图7d中传感器埋藏深度小于0.8 m。当地

下环境恶劣时,无论初始扩频因子设为7还是12,网络能耗都接近于非ADR调节机制下的网络能耗,此时ADR调节机制无法有效降低网络能耗,如图7c中传感器埋藏深度大于1.5 m,或图7d中传感器埋藏深度大于1.2 m。当地下环境一般并采用ADR调节机制的情况下,初始扩频因子设为7时的网络能耗低于初始扩频因子设为12时的网络能耗。

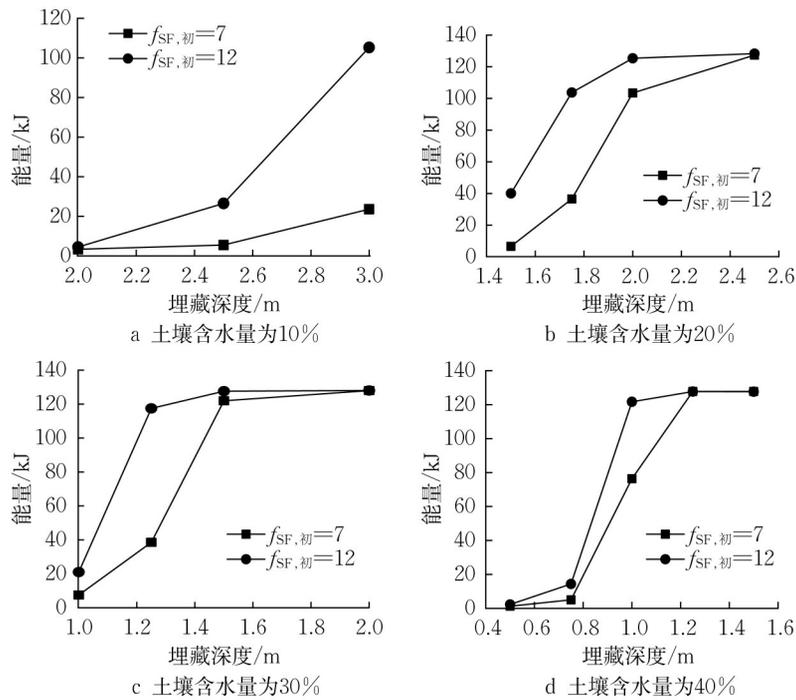


图7 不同土壤含水量和传感器埋藏深度下ADR调节机制运行过程中的网络能耗

Fig.7 Energy consumption in ADR mechanism at different soil's moisture contents and burial depths

2.2.3 ADR调节机制在动态地下土壤环境中的调节性能

地下环境中土壤含水量持续变化,基于LoRaWAN的地下无线传感网络中链路也随之动态改变,这对ADR调节机制的调节能力提出更大挑战。为了探究ADR调节机制在动态地下土壤环境中的调节性能,选择了2套不同网络规模的实地土壤含水量日变化数据^[28]进行定量评估。在此次实验中,埋藏深度统一设置为0.2 m,扩频因子和传输功率初始值设置为12和20 dBm。传感器节点的布设密度是影响无线传感网络通信性能的重要因素之一。最新研究表明,解决大规模网络中数据包碰撞问题的最有效方式是采用LR-FHSS(long range-frequency hopping spread spectrum)调节机制^[36],这种机制适用于节点布设密度超过每平方公里一百万个传感器的无线传感网络。本研究聚焦于常规LoRa调制机制下节点密度对网络能效(EPP)的影

响。因此,设计了2种场景,分别是:场景1,500 m的通信距离为半径,随机部署100个节点(即每平方公里127个节点);场景2,1 500 m的通信距离为半径,随机部署6 000个节点(即每平方公里848个节点)。从低功耗广域网节能的实际应用角度出发,设定24 h作为原位土壤含水量数据的平均值。相应地,以网络能效和数据接收率的平均值来展现ADR调节机制在动态地下土壤环境中的调节性能,实验结果如图8、9所示。对应的网络能耗可通过式(3)计算获得,但限于篇幅不做展示。

图8a、b分别展示了场景1和场景2的网络能效随土壤含水量动态变化的调节情况。实验结果表明,当网络规模较小时,ADR调节机制能够及时地调节扩频因子和传输功率,使其适应动态变化的地下土壤环境。然而,当网络规模较大时,尽管ADR调节机制在尽力改善网络性能,但是由于数据包之间的碰撞,使得其对动态地下土壤环境的适应性差,

无法及时调节网络性能。数据接收率随土壤含水量动态变化的调节情况进一步证实了上述观点,如图9所示。从图9可以看出,网络规模较小时,ADR调节机制能快速地将数据接收率调节至100%,并保持稳定;网络规模较大时,数据接收率能够达到的调节速率较低,最终只能调节至50%左右。值得注意的是,上述2个场景仅在传感器布设密度为每平方公里百级范围内,就已经显示出较大的网络性能差异,这表明ADR调节机制在大规模网络中的调节能力仍差强人意。

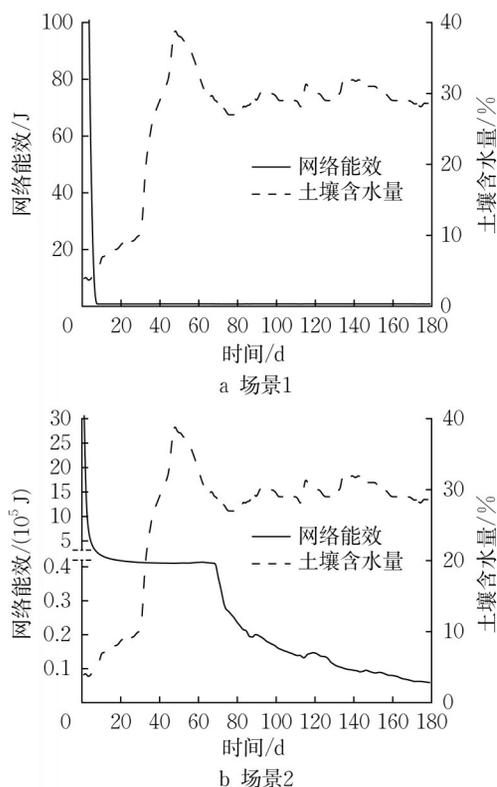


图8 ADR调节机制调节过程中的网络能效

Fig.8 EPP in ADR mechanism for two scenarios

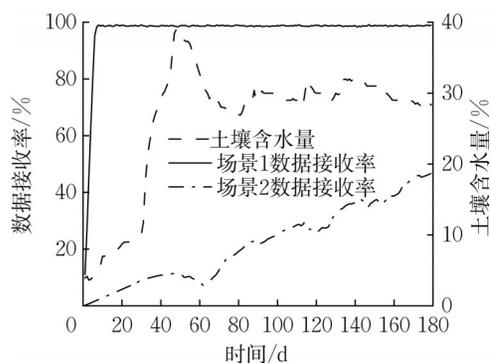


图9 ADR调节机制调节过程中的数据接收率

Fig.9 Data extraction rate in ADR mechanism for two scenarios

3 结语

随着对地下空间的不断开发与利用,加强对地下空间环境和地下基础设施的监测与管理已成为城镇化高质量发展的重要内容之一。本文提出了利用基于LoRaWAN的地下无线传感网络实现对地下土壤环境和基础设施的长期、远距离、实时动态监测思路,并在此前提下评估了ADR调节机制对基于LoRaWAN的地下无线传感网络性能的调节能力,以进一步提升数据传输质量,降低网络能耗。

作者贡献声明:

郝 彤:总体指导,论文撰写与修改。

赵国政:实验仿真,论文撰写与修改。

参考文献:

- [1] EBI C, SCHALTEGGER F, RÜST A, *et al.* Synchronous LoRa mesh network to monitor processes in underground infrastructure[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 57663.
- [2] LIN K, HAO T. Link quality analysis of wireless sensor networks for underground infrastructure monitoring: a non-backfilled scenario[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 21(5): 7006.
- [3] LEVINTAL E, GANOT Y, TAYLOR G, *et al.* An underground, wireless, open-source, low-cost system for monitoring oxygen, temperature, and soil moisture[J]. *Soil*, 2022, 8(1): 85.
- [4] SAMBO D W. Design of a wireless underground sensor network for precision agriculture[D]. Cameroun: Université de Ngaoundéré, 2021.
- [5] VURAN M C, SALAM A, WONG R, *et al.* Internet of underground things in precision agriculture: architecture and technology aspects[J]. *Ad Hoc Networks*, 2018, 81: 160.
- [6] WU S, AUSTIN A C M, IVOGHILIAN A, *et al.* Long range wide area network for agricultural wireless underground sensor networks[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2023, 14(5): 4903.
- [7] MOIROUX-ARVIS L, CARIOU C, CHANET J P. Evaluation of LoRa technology in 433-MHz and 868-MHz for underground to aboveground data transmission[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 194: 106770.
- [8] FERRARI G. Sensor networks: where theory meets practice[M]. Berlin: Springer, 2009.
- [9] SUN Z, AKYILDIZ I F, HANCKE G P. Dynamic connectivity in wireless underground sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2011, 10(12): 4334.
- [10] SILVA B, FISHER R M, KUMAR A, *et al.* Experimental link quality characterization of wireless sensor networks for underground monitoring[J]. *IEEE Transactions on Industrial*

- Informatics, 2015, 11(5): 1099.
- [11] ZEMMOUR H, BAUDOIN G, DIET A. Soil effects on the underground-to-aboveground communication link in ultrawideband wireless underground sensor networks [J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2016, 16: 218.
- [12] WAN X, YANG Y, CUI J, *et al.* LoRa propagation testing in soil for wireless underground sensor networks [C]//2017 6th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). Piscataway: IEEE, 2017: 1-3.
- [13] LIN K, HAO T, YU Z, *et al.* A preliminary study of UG2AG link quality in LoRa-based wireless underground sensor networks [C]//2019 IEEE 44th Conference on Local Computer Networks (LCN). Piscataway: IEEE, 2019: 51-59.
- [14] LIN K, HAO T. Experimental link quality analysis for LoRa-based wireless underground sensor networks [J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020, 8(8): 6565.
- [15] LI S, RAZA U, KHAN A. How agile is the adaptive data rate mechanism of LoRaWAN? [C]//2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE, 2018: 206-212.
- [16] Worldsensing [EB/OL]. [2022-09-18]. <https://www.worldsensing.com/>.
- [17] Senceive Limited [EB/OL]. [2022-09-18]. <https://www.senceive.com/>.
- [18] SILVA A R, VURAN M C. Empirical evaluation of wireless underground to underground communication in wireless underground sensor networks [C]//International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. Berlin: Springer, 2009: 231-244.
- [19] SALAM A, SHAH S. Urban underground infrastructure monitoring IoT: the path loss analysis [C]//2019 IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). Piscataway: IEEE, 2019: 398-401.
- [20] DONG X, VURAN M C, IRMAK S. Autonomous precision agriculture through integration of wireless underground sensor networks with center pivot irrigation systems [J]. *Ad Hoc Networks*, 2013, 11(7): 1975.
- [21] ZHANG X, ANDREYEV A, ZUMPF C, *et al.* Thoreau: a fully-buried wireless underground sensor network in an urban environment [C]//2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS). Piscataway: IEEE, 2019: 239-250.
- [22] SUN Z, WANG P, VURAN M C, *et al.* BorderSense: border patrol through advanced wireless sensor networks [J]. *Ad Hoc Networks*, 2011, 9(3): 468.
- [23] LOUBET G, TAKACS A, GARDNER E, *et al.* LoRaWAN battery-free wireless sensors network designed for structural health monitoring in the construction domain [J]. *Sensors*, 2019, 19(7): 1510.
- [24] LOUBET G, TAKACS A, DRAGOMIRESCU D. Implementation of a wireless sensor network designed to be embedded in reinforced concrete [C]// The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Piscataway: IEEE, 2020: 2195-2200.
- [25] ABDORAHIMI D, SADEGHIOON A M. Comparison of radio frequency path loss models in soil for wireless underground sensor networks [J]. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 2019, 8(2): 35.
- [26] BANASEKA F K, KATSRIKU F, ABDULAI J D, *et al.* Signal propagation models in soil medium for the study of wireless underground sensor networks: a review of current trends [J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 2021: 1.
- [27] AKYILDIZ I F, STUNTEBECK E P. Wireless underground sensor networks: research challenges [J]. *Ad Hoc Networks*, 2006, 4(6): 669.
- [28] LIU G, WANG Z, JIANG T. QoS-aware throughput maximization in wireless powered underground sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2016, 64(11): 4776.
- [29] LIU G, SUN Z, JIANG T. Joint time and energy allocation for QoS-aware throughput maximization in MIMO-based wireless powered underground sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 67(2): 1400.
- [30] 刘光华. 无线地下传感器网络中数据传输协议研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- LIU Guanghua. Research on data transmission protocols in wireless underground sensor networks [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [31] ALIPIO M, BURES M. Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT applications: classification, issues, and future directives [J]. *Internet of Things*, 2024, 25: 101053.
- [32] BOLBOLI J, SALMAN M, NAIK R P, *et al.* Experimental and simulation study of a LoRaWAN-assisted relay for IoT communication [J]. *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, 2024, 8(1): 2473.
- [33] HAXHIBEQIRI J, DE POORTER E, MOERMAN I, *et al.* A survey of LoRaWAN for IoT: from technology to application [J]. *Sensors*, 2018, 18(11): 3995.
- [34] ZHAO G, LIN K, HAO T. A feasibility study of LoRaWAN-based wireless underground sensor networks for underground monitoring [J]. *Computer Networks*, 2023, 232: 109851.
- [35] MUKHOPADHYAY S, MASTO R E, TRIPATHI R C, *et al.* Phytomanagement of polluted sites [M]. New York: Elsevier, 2019.
- [36] LIN K, ULLAH A M, ALVES H, *et al.* Subterranean mMTC in remote areas: underground-to-satellite connectivity approach [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2020, 61(5): 136.