

文章编号:1671-251X(2017)03-0065-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.03.015

王晴晴,汪正东,左羽,等.煤矿无线传感器网络可靠数据传输协议[J].工矿自动化,2017,43(3):65-70.

煤矿无线传感器网络可靠数据传输协议

王晴晴^{1,2,3}, 汪正东⁴, 左羽^{1,2,3}, 崔忠伟^{1,2,3}, 郭龙^{1,2,3}

(1. 贵州师范学院 数学与计算机科学学院, 贵州 贵阳 550018; 2. 贵州师范学院 贵州省高校工业物联网工程技术研究中心, 贵州 贵阳 550018; 3. 贵州师范学院 大学生互联网+创新创业训练中心, 贵州 贵阳 550018; 4. 江南机电设计研究所, 贵州 贵阳 550009)

摘要:针对煤矿无线传感器网络数据流特点,设计了一种基于节点地理位置信息、集成 MAC 和路由的无线传感器网络可靠数据传输协议。该协议采用概率性唤醒工作方式,根据本地节点的连通度、节点自身的剩余能量信息和区域事件发生概率选择转发节点,同时引入备用节点,在主节点发生故障时自动转换为主节点进行数据转发,保证数据可靠传输。仿真结果表明,该协议能够降低无线传感器网络节点能量消耗,保证数据传输的实时性,提高数据传输的可靠性。

关键词:煤炭开采;工作面;采空区;无线传感器网络;数据路由;可靠数据传输

中图分类号:TD67

文献标志码:A

网络出版时间:2017-02-28 17:06

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170301.1515.015.html>

A reliable data transmission protocol of coal mine wireless sensor network

WANG Qingqing^{1,2,3}, WANG Zhengdong⁴, ZUO Yu^{1,2,3}, CUI Zhongwei^{1,2,3}, GUO Long^{1,2,3}

(1. Department of Mathematics and Computer Science, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 2. Industrial Internet of Things Engineering Research Center of the Higher Education Institutions of Guizhou Province, Guiyang 550018, China; 3. Internet+Innovation and Entrepreneurship Center, Guizhou Education University, Guiyang 550018, China; 4. Jiangnan Design Institute of Machinery and Electricity, Guiyang 550009, China)

Abstract: A reliable data transmission protocol of wireless sensor network was proposed according to characteristics of data flow of coal mine wireless sensor network, which was based on position information of sensor nodes and integrated MAC and routing. The protocol uses probabilistic awakening work mode, and selects forwarding node according to connectivity of local node, dump energy of the node and occurrence probability of regional event. Meanwhile, the protocol introduces standby node to forward data when main node is invalid, so as to ensure reliable data transmission. The simulation results show that the protocol reduces energy consumption of node in wireless sensor network and improves real-time performance of data transmission as well as reliability.

Key words: coal mining; working face; goaf; wireless sensor network; data routing; reliable data transmission

收稿日期:2016-11-30;修回日期:2017-01-18;责任编辑:李明。

基金项目:贵州省省级重点支持学科资助项目(黔学位合字 ZDXK[2016]20 号);贵州省科技平台及人才团队专项资金资助项目(黔科合平台人才[2016]5609);贵州省科学技术基金计划资助项目(黔科合基础[2016]1115);贵州省教育厅青年科技人才成长项目(黔教合 KY 字[2016]220);贵州师范学院科研项目(2016YB010)。

作者简介:王晴晴(1986—),女,江苏徐州人,讲师,硕士,研究方向为无线传感器网络,E-mail:446437595@qq.com。

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)应用于煤矿工作面和采空区监测系统时,由于节点分布广、密度大,数据流不均匀,使得现有的WSN路由算法难以满足煤矿工作面和采空区数据传输的应用需求^[1-4]。本文设计了一种基于节点地理位置信息、集成MAC和路由的可靠数据传输协议(Reliable Data Transmission Protocol, RDTP)。该协议具有寻路和协调共享信道访问的能力,实现了路由层和MAC层信息共享,节省了节点能量消耗,提高了网络数据传输的可靠性。

1 问题描述

本文根据煤矿工作面和采空区WSN工作的特点,针对以下问题进行关键性技术的研究和设计工作。

(1) 长距离传输数据流量均衡问题。采煤工作面WSN节点呈长距离带状分布,数据信息从工作面巷道的Sink节点流出,若采用传统的层次路由算法,在数据传输过程中会出现不均匀“棒椎式”数据流量特点^[5-6]。

(2) 工作面液压支架和变介质对节点通信的影响。在煤矿工作面和采空区,有很多无法预知的事件对无线通信产生干扰,如顶板冒落、密集排列的液压支架的移动、设备电磁干扰等^[7-8]。

(3) 采空区新加入节点动态组网的特性。采煤工作面在不断开采煤炭时,采空区逐渐扩大,新的采空区会部署新的节点,完善网络监测功能。这就要求WSN路由算法具有很好的扩展性,当有新节点布置在新的采空区时,能够快速加入网络,进行数据路由。

(4) 节点能量消耗问题。煤矿工作面WSN的主要任务是监测工作面和采空区发生突发事件时的环境信息和设备的一般工况信息,在安全环境和安全生产情况下,网络传输的监测数据较少,全网络长时间工作会造成不必要的能量浪费^[9-13]。因此,在没有发生网络监测事件或者节点没有进行数据转发时,网络节点可以进入睡眠状态,节省节点能量;一旦监测到事件发生,或者节点需要转发数据,要求节点能够及时从睡眠状态唤醒,以保证网络具有较低的数据传输延时。

(5) 对3类监测数据的传输问题。根据煤矿工作面监测业务的要求和特点,将传输数据按照实时

性分为3个优先级:灾难性监测数据的级别最高,设定为发送请求级别一(H_1);工况周期性监测数据的发送优先级次之,设定为发送请求级别二(H_2);一般监测数据的发送级别最低,设定为发送请求级别三(H_3)。在MAC层设定3个不同级别的数据发送队列,分别存储3个级别的数据。

2 WSN模型

由于煤矿工作面和采空区中WSN节点的通信环境存在很大差异,且存在液压支架影响无线电波传输,所以将工作面和采空区节点的路由算法分开考虑,2个区域的WSN节点可工作在不同状态,监测数据在同一个Sink节点汇聚后上传至监控中心。本文中,设计采空区和工作面WSN均采用RDTP算法进行数据传输,监测数据汇聚至工作面巷道的Sink节点,避免了工作面和采空区WSN因采用不同路由算法带来的协议转换难题。

根据煤矿工作面和采空区环境特点,将该环境抽象为一个长方形区域A,布置在采空区和工作面的WSN节点以均匀随机方式分布在区域A内^[14],如图1所示。

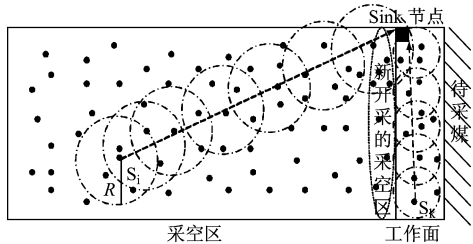


图1 煤矿工作面和采空区WSN节点分布

图1中, S_i 为采空区的数据源节点, S_k 为工作面的数据源节点。节点的通信半径为 R ,Sink节点在工作面巷道处,虚线表示节点数据传输方向。采空区数据源节点 S_i 产生数据,以多跳方式向Sink节点传递数据。 S_i 和Sink节点间虚线圆内的节点为转发节点。新的采空区中布置的节点对数据转发和路由没有影响。工作面数据源节点 S_k 采用与采空区相同的方式将数据传送至Sink节点。

3 RDTP协议设计

WSN节点采用单信道通信方式,其工作过程按周期 T_w 来执行。RDTP协议工作模式如图2所示。

RDTP协议中,每个工作周期 T_w 包括3个阶段:网络维护更新阶段 T_{syn} 、节点睡眠调度阶段 T_h 、基于节点位置的可靠数据转发阶段 T_s 。其中,节点

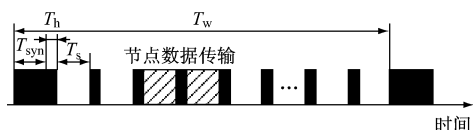


图2 RDTP 协议工作模式

睡眠调度阶段 T_h 、基于节点位置的可靠数据转发阶段 T_s 在 1 个工作周期内要重复执行多次。

(1) 网络维护更新阶段。该阶段主要用于更新 WSN 节点的同步时钟、剩余能量和连通度,为基于节点位置的可靠数据转发阶段的计算工作做准备。

(2) 节点睡眠调度阶段。在事件没有发生或没有数据转发时,节点可以进入睡眠状态,节省能量;一旦有事件发生或者需要转发数据,节点需要及时被唤醒工作。为了在节省节点能量的同时,保证数据实时可靠传输,需要在节点睡眠调度阶段执行节点睡眠调度算法。节点在睡眠调度阶段开始时的侦听概率,充分考虑本地节点的连通度、节点自身的剩余能量信息和区域事件发生概率,其计算公式为

$$P_i = \alpha \frac{C_{ei}}{C_i} + \beta \frac{E_i - E_{ni}}{E_{ni}} + \gamma \frac{N_i}{M_i} \quad (1)$$

式中: α, β, γ 为加权系数, $\alpha + \beta + \gamma = 1$; C_{ei} 为节点 i 通信时的期望连通度; C_i 为节点 i 在布置后的节点连通度; E_i 为节点 i 当前时刻的剩余能量信息; E_{ni} 为节点 i 所有邻居节点的平均能量信息; N_i 为节点 i 在当前工作周期 T_w 内已完成数据传输的次数; M_i 为当前时刻节点 i 在当前工作周期 T_w 内经历数据转发阶段 T_s 的总次数。

(3) 基于节点位置的可靠数据转发阶段。该阶段可分为节点发送竞争、节点转发竞争和数据可靠传输 3 个过程。

在节点发送竞争过程中,考虑到煤矿工作面和采空区传输数据的优先级不同,在 MAC 层分别设定 3 个发送队列,分别存储并转发 H_1, H_2, H_3 级别的数据。

节点转发竞争过程紧跟在节点发送竞争之后。一旦节点 A 在发送竞争过程中获得信道使用权,则发送请求帧。转发区域的节点 B 接收到节点 A 的请求帧后,提取节点 A 的位置信息,然后分别计算出节点 A 、节点 B 与 Sink 节点的欧式距离,并根据节点 B 自身的剩余能量信息计算转发价值,参与节点转发竞争。节点 A 选择具有最大转发价值的节点作为数据转发节点。节点 B 的转发价值为

$$W_B = \frac{l_A - l_B}{R} + \frac{E_B - E_{nB}}{E_{nB}} \quad (2)$$

式中: l_A 为节点 A 与 Sink 节点的欧式距离; l_B 为节

点 B 与 Sink 节点的欧式距离; E_B 为节点 B 当前时刻的剩余能量信息; E_{nB} 为节点 B 所有邻居节点的平均能量信息。

数据可靠传输主要通过选择备用节点 X 进行数据的备份转发来实现。备用节点选择规则为

$$(x_B - x_X)^2 + (y_B - y_X)^2 \leq d \quad (3)$$

式中: (x_B, y_B) 为当前竞选成功的转发节点 B (称为数据转发的主节点) 坐标; (x_X, y_X) 为当前参与节点转发竞争的节点坐标; d 为备用节点区域半径,为常数,根据备用节点数量来确定。

满足式(3)的节点 X 即为备用节点,不满足式(3)的节点在经过节点接收竞争后,马上进入睡眠状态。

数据转发的主节点 B 负责完成节点 A 数据的接收及转发。备用节点 X 完成节点 A 数据的接收和存储,只在数据转发的主节点 B 发送数据出现错误时,才进行数据重传。

引入备用节点后,数据可靠传输过程如图 3 所示。A、B、C、D 为数据传输时的主节点。虚线圆内区域为备用节点区域,该区域内的黑色实心圆点为备用节点,如节点 E。节点 F 因在睡眠调度阶段 T_h 没有被唤醒,未参与节点转发竞争,因此其不作为备用节点。

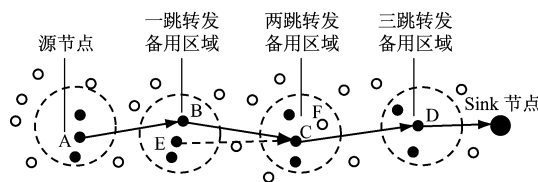


图3 数据可靠传输过程

4 仿真分析

为了能够准确地验证 RDTP 协议的性能,采用 NS2 软件对 RDTP 协议和 GeRaf 协议^[2]进行算法设计,然后采用 Matlab 软件对实验数据进行对比分析。主要从以下 3 个方面对 2 种协议进行对比:

(1) WSN 数据传输可靠性。煤矿工作面液压支架等设备及采空区通信介质的变介质特性会对 WSN 通信产生影响,因此对采用不同数据传输协议的 WSN 数据传输可靠性进行了仿真实验。数据传输可靠性定义为在每一轮工作中, Sink 节点接收到的报文总数与 WSN 所有数据源节点产生的报文总数的比值。

(2) 数据传输延时。主要考察煤矿工作面 3 类

数据的传输时延,即数据报文从产生到被 Sink 节点接收所经历的时间。

(3) 节点平均能量消耗。主要衡量网络中节点能量消耗的平均值,即 Sink 节点接收 1 个数据包后,整个网络中每个节点消耗能量的平均值^[15]。

4.1 仿真场景与仿真参数

由于工作面和采空区的 WSN 路由算法是独立工作的,所以将工作面和采空区作为 2 个场景分别进行仿真分析。根据煤矿工作面为长距离带状区域的特点,仿真场景设置为 200 m(长)×4 m(宽),节点为 200 个,如图 4(a)所示;采空区是很大的无人工作空间,将其设置为一个 600 m(长)×200 m(宽)的长方形区域,节点为 1 000 个,如图 4(b)所示。Sink 节点在工作面巷道处接收数据。表 1 为仿真参数设置。

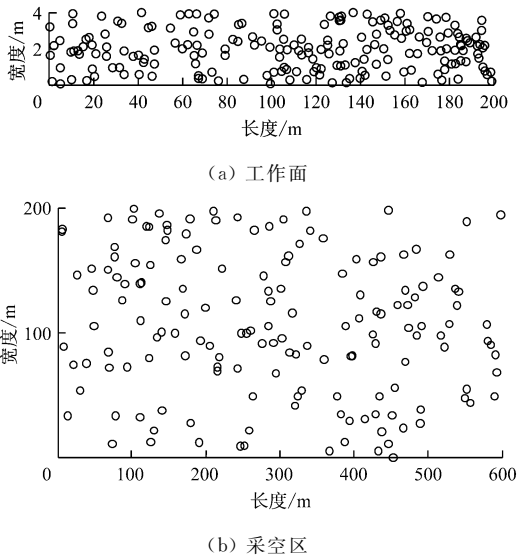


图 4 仿真场景

表 1 仿真参数设置

参数	取值
节点周期侦听与睡眠时间比值	0.038 4
网络节点带宽/(kbit · s ⁻¹)	500
节点连通度	30
节点期望连通度	10
节点通信距离/m	10
节点在干扰下的通信距离/m	5~10
睡眠能耗/mW	0.01

工作面和采空区场景内的数据源节点均为 10 个,在 10 m 通信半径内随机分布,并在与 Sink 节点相距最远的位置,每次产生相互独立的 2 个 H₁ 级别数据、4 个 H₂ 级别数据和 2 个 H₃ 级别数据。

4.2 WSN 通信可靠性

采用 RDTP 协议与 GeRaf 协议时,WSN 数据传输可靠性仿真对比如图 5 所示。

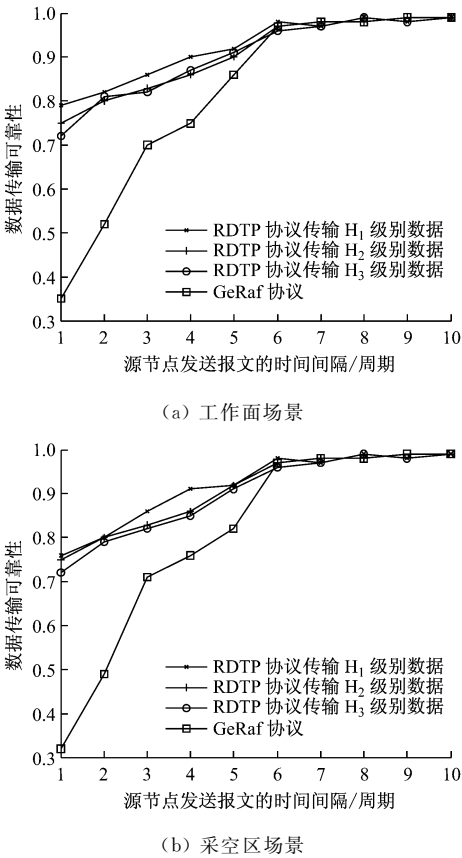


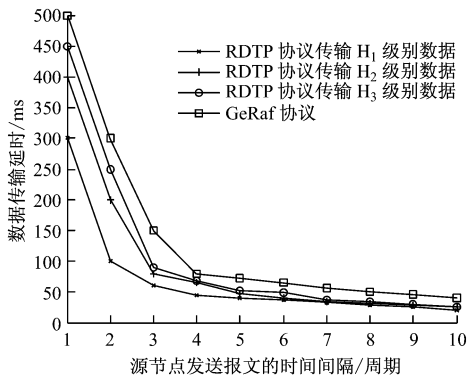
图 5 2 种场景下 WSN 数据传输可靠性仿真对比

(1) 采用 RDTP 协议与 GeRaf 协议时,WSN 数据传输可靠性在 2 个仿真场景中变化趋势基本相同,与网络大小无关。源节点发送报文的时间间隔越小,数据传输可靠性越低,反之可靠性越高。这是因为源节点发送报文的时间间隔小时,网络在短时间内需要传输的报文较多,造成数据拥塞,从而导致报文丢失;发送报文的时间间隔大时,发送报文少,不会产生数据拥塞及报文碰撞事件。

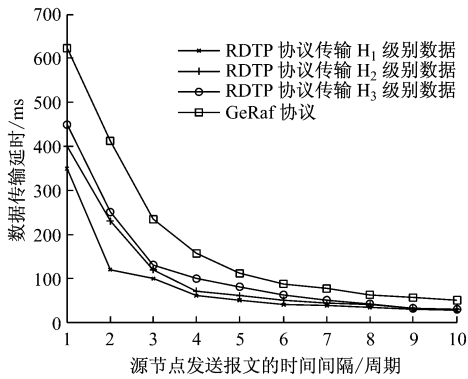
(2) 在 2 种场景中,数据传输可靠性按照 RDTP 协议传输 H₁ 级别数据、RDTP 协议传输 H₂ 级别数据、RDTP 协议传输 H₃ 级别数据、GeRaf 协议的顺序依次降低。在数据发送时间间隔较大时, RDTP 协议与 GeRaf 协议的可靠性都很高,且几乎相同,但在数据发送时间间隔较小时, RDTP 协议传输数据的可靠性明显高于 GeRaf 协议,基本能够保证网络数据可靠传输。这是因为 RDTP 协议引入备用节点,其可在主节点数据传输失效时,马上转换为主节点进行数据传输,避免了数据包丢失。

4.3 数据传输延时

采用 RDTP 协议与 GeRaf 协议时,WSN 数据传输延时仿真对比如图 6 所示。



(a) 工作面场景



(b) 采空区场景

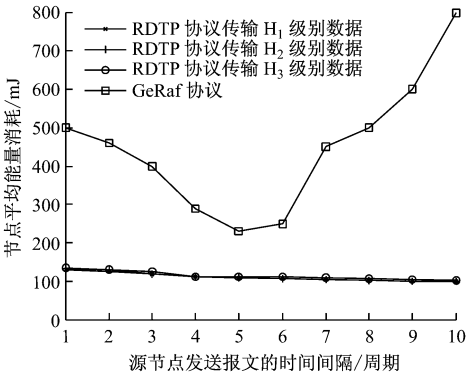
图 6 2 种场景下数据传输延时仿真对比

(1) 采用 RDTP 协议与 GeRaf 协议时,WSN 数据传输延时在 2 种场景下变化趋势基本相同,都是源节点发送报文的时间间隔越小,数据传输延时越大,反之数据传输延时越小。造成该现象的主要原因是发送报文的时间间隔越小,越容易导致网络拥塞,增大数据延时。

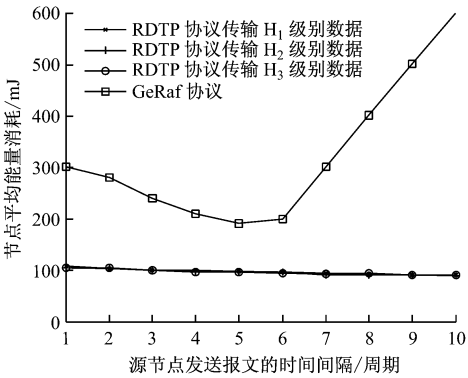
(2) 在 2 种场景中,数据延时按照 RDTP 协议传输 H₁ 级别数据、RDTP 协议传输 H₂ 级别数据、RDTP 协议传输 H₃ 级别数据、GeRaf 协议的顺序依次增大。在数据发送时间间隔较大时,RDTP 协议传输 3 种级别数据时的延时基本相同,在数据发送时间间隔较小时有明显差别。这主要是因为 RDTP 协议的节点发送竞争阶段设定了 3 个不同级别的数据发送队列,保证了高优先级数据传输的实时性。

4.4 节点平均能量消耗

采用 RDTP 协议与 GeRaf 协议时,WSN 节点平均能量消耗仿真对比如图 7 所示。



(a) 工作面场景



(b) 采空区场景

图 7 2 种场景下 WSN 节点平均能量消耗

(1) 采用 RDTP 协议与 GeRaf 协议时,WSN 节点平均能量消耗在 2 种场景下变化趋势基本相同,与网络大小无关。

(2) 采用 RDTP 协议发送 3 种级别的数据时,WSN 节点平均能量消耗较为稳定,随着网络负载的增加,能量消耗稍有增大。这主要是因为 RDTP 协议采用概率性唤醒侦听机制,大幅减少了网络中进行侦听的节点数量,从而降低了节点能量消耗。在网络负载增加时,节点传输数据时会频繁地建立链路,但每次唤醒的节点较少,且节点工作也是按周期来执行的,假如链路建立不成功,在下一个工作周期内,会有另外的节点被唤醒,来完成链路建立工作,从而均衡了网络中节点的能量消耗。

5 结语

针对煤矿工作面和采空区 WSN 路由算法的特点,设计了一种基于节点地理位置信息、集成 MAC 和路由的可靠数据传输协议——RDTP 协议。仿真结果表明,该协议能够降低 WSN 节点能量消耗,保证 WSN 数据传输的实时性,提高数据传输的可靠性。

参考文献:

- [1] 郑国强,李建东,李红艳,等. 多跳无线传感器网络的高效中继节点快速选择算法[J]. 通信学报, 2010,31(11):159-170.
- [2] ZORZI M, RAO R R. Geographic random forwarding (GeRaF) for ad hoc and sensor networks: multihop performance [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2003,2(4):337-348.
- [3] 王泉夫. 基于 WSN 的工作面监控及瓦斯浓度预测关键技术研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
- [4] 童敏明,杨礼现,刘晓文,等. 矿井无线传感器监测网络路由改进算法的研究[J]. 传感技术学报,2008,21(11):1892-1895.
- [5] 阳媛. 煤矿巷道无线传感器网络模型及路由研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2010.
- [6] 王艳芬. 矿井超宽带无线通信信道模型研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2009.
- [7] 张申. 帐篷定律与隧道无线数字通信信道建模[J]. 通信学报,2002,23(11):41-50.
- [8] 张申. 隧道无线电射线传输规律的研究[J]. 电波科学学报,2002,17(2):114-118.
- [9] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks [C] // Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, 2002:1567-1576.
- [10] MILLER M J, VAIDYA N H. A MAC protocol to reduce sensor network energy consumption using a wakeup radio [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2005,4(3):228-242.
- [11] 温俊,蒋杰,方力,等. 异构无线传感器网络的转发连通覆盖方法[J]. 软件学报,2010,21(9):2304-2319.
- [12] 靳淑娟. 无线传感器网络中的能量均衡路由协议研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
- [13] 赵宁. 基于 NS2 的无线传感器网络联合路由协议研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
- [14] 郑国强,李建东,周志立. 多跳无线传感器网络的高能效数据收集协议[J]. 软件学报,2010,21(9):2320-2337.
- [15] 马礼,高洪磊,马东超,等. 一种由接收端发起的无线传感器网络 MAC 协议[J]. 数据采集与处理,2016,31(4):719-727.