



基于能量预警和分簇的 ZigBee 网络路由协议研究

刘青^{1,2}, 李兰兰¹, 宫强¹

(1. 滁州职业技术学院 信息工程学院, 安徽 滁州 239000;

2. 南京航空航天大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210016)

摘要:针对传统 ZigBee 路由算法存在 RREQ 分组洪泛、能耗过高和通信效率低等问题, 本文引入能量预警机制, 设计一种优化的分簇路由算法。算法吸取 Cluster-Tree 和 AODVjr 的优点, 设置节点能量预警等级, 优化路由选择机制, 适时启动备用节点, 有效避免关键节点过早死亡, 降低网络分割风险。仿真结果表明, 该算法可提高网络通信效率, 均衡网络能量, 延长网络运行周期。

关键词: ZigBee; 能量预警; 分簇路由算法; AODVjr; Cluster-Tree

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1674-4942(2022)02-0179-07

A Study of ZigBee Network Routing Protocol Based on Energy Early Warning and Clustering

LIU Qing^{1,2}, LI Lanlan¹, GONG Qiang¹

(1. Department of Information Engineering, Chuzhou Polytechnic, Chuzhou 239000, China;

2. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at RREQ packet flooding, excessive energy consumption and low communication efficiency in traditional ZigBee routing algorithm, this paper introduces energy early warning mechanism and clustering idea, and designs an optimized ZigBee routing algorithm. The algorithm combines the advantages of Cluster-Tree and AODVjr to set the node energy warning level, optimizes the routing mechanism and starts the standby node timely, thus effectively avoiding the premature death of key nodes and reduces the risk of network segmentation. The simulation results show that the algorithm helps to improve the network communication efficiency, balance the network energy and prolong the network operation cycle.

Keywords: ZigBee; energy warning; Clustering routing algorithm; AODVjr; Cluster-Tree

ZigBee 技术作为物联网关键技术之一, 已经被广泛应用在农业、医疗、家居、环境监测等多个领域。它具有低功耗、短距离、自组网和低成本等优势, 适合多种环境下大规模快速组网。由于使用场景的限制, ZigBee 节点大多使用电池供电, 如何限制能耗, 均衡网络性能, 延长网络生存周期, 是当前 ZigBee 技术研究的热点之一。虽然 ZigBee 技术也采用了一些措施, 如节点定时休眠、周期唤醒、简化协议、规避冲突等, 但网络通信能耗大、节点失效快等问题仍然存在。

ZigBee 技术的能耗控制问题主要涉及 PHY 层、MAC 层和网络层的研究^[1], 网络层主要是路由算法优化研

收稿日期: 2022-02-19

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2019ZD74, KJ2021ZD0154); 安徽省高校优秀青年骨干教师国内访学研究项目(gxgnfx2021200); 安徽省高等学校质量工程重点教学研究项目(2020jyxm1354); 滁州职业技术学院自然科学研究重点项目(YJZ-2020-01, YJZ-2020-08)。

第一作者: 刘青(1982—), 安徽怀远人, 副教授, 研究方向为无线传感网。E-mail: 58448308@qq.com

究,可分为网状路由、混合路由和分簇路由等。现有的分簇与能量控制路由算法,如阈值敏感分簇能量控制算法、低能量自适应分簇算法、能量优化分簇路由算法等,都是根据能量阈值、响应时间、网络深度等条件将网络划分成若干逻辑簇,由簇首管理簇内节点,簇首转发簇间通信,并按一定算法调整网络结构,优化网络负载^[2-4]。本文设计一种能量预警和分簇的 ZigBee 路由算法,依据簇树路由算法,引入簇首等节点能量监测机制,实现动态预警,适时启动备用节点,均衡节点能耗,延长网络生命周期。

1 ZigBee 路由协议

ZigBee 网络使用的是静态路由协议,节点组成树形结构。网络依据 IEEE802.15.4 标准定义了协调器 (Coordinator)、路由器 (Router) 和终端节点 (End Device) 三类设备,分为精简功能型 (RFD) 和完全功能型 (FFD)^[5-6]。ZigBee 网络中的每个节点都拥有一个 64 位的 IEEE 地址和一个 16 位网络地址,采用 DAAM 地址分配机制,协调器分配给父节点一定长度的地址段,父节点为新加入的子节点分配一个唯一网络地址,形成逻辑的父子关系^[7]。其地址分配算法基于式(1)~(3)。

$$C_{\text{skip}}(d) = \begin{cases} 1 + C_m(L_m - d - 1), R_m = 1 \\ \frac{1 + C_m - R_m - C_m R_m^{L_m - d - 1}}{1 - R_m}, \text{otherwise} \end{cases}, \quad (1)$$

$$A_i = A_f + C_{\text{skip}}(d)R_m + i \quad (1 \leq i \leq C_m - R_m), \quad (2)$$

$$A_j = A_f + C_{\text{skip}}(d)(j - 1) + 1 \quad (1 \leq j \leq R_m), \quad (3)$$

公式(1)中 $C_{\text{skip}}(d)$ 是地址偏移量, L_m 是网络最大深度, R_m 是父节点可连接的最多路由数, C_m 是父节点可连接最多子节点数, d 是父节点深度^[8]。终端节点 i 加入 f 网络,父节点 f 依据公式(2)为其分配地址。路由节点 j 加入 f 网络,依据公式(3)为其分配地址。

1.1 Cluster-Tree 路由算法

Cluster-Tree 即簇树路由算法,协议中无路由表,依据父子关系的邻接表转发数据,无路由维护开销^[9]。使用式(4)来判断目标节点是否为源节点的后代节点,按照式(5)来计算下一跳地址。Cluster-Tree 适用于简单网络拓扑,具有通信效率高,网络开销小等特点。Cluster-Tree 不足之处,一是相邻节点间无逻辑父子关系,数据转发需多跳完成,通信效率低,节点能耗高;二是传输路径不一定最优,临近根的节点容易因能耗高而过早脱离网络,形成网络孤岛。

$$A \leq D \leq A + C_{\text{skip}}(d - 1), \quad (4)$$

$$N = \begin{cases} D, \text{ RFD设备} \\ A + 1 + \left\lceil \frac{D - (A + 1)}{C_{\text{skip}}(d)} \right\rceil C_{\text{skip}}(d), \text{ FFD设备} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 AODVjr 路由算法

AODVjr 路由算法是 AODV (Ad hoc On-Demand Distance Vector routing) 按需距离矢量路由算法的简化版^[10]。AODVjr 取消了 AODV 协议中的目标节点序号,只允许目标节点 RREP 响应;删除了 AODV 路由协议中 RREQ、RREP、RERR 中的跳数、序列号等信息;舍弃了前驱列表和 HELLO 信息,使用周期性发送 KEEP_ALIVE 给源节点来维护路由表,如 RREP 分组报文,格式如表 1 所示。它弥补了 Cluster-Tree 算法路由发现的不足,具有收敛速度快、拓朴学习能力强、有效节省能耗等特点。AODVjr 的不足之处,一是周期性发送路由维护信息,堵塞网络;二是新路由发现过程能耗大,增加开销。

2 分簇路由算法

分簇路由算法可将一个 ZigBee 网络分成若干个逻辑簇,簇中节点一般分为簇首 (Cluster Head Node)、网关 (Gateway Node)、簇内节点 (Within The Cluster Node) 等^[11]。根据网络拓朴复杂性,有单层和多层分簇路由

算法;依据转发跳数情况,又分为簇内单跳、簇内多跳、簇首多跳、簇内簇首多跳几种算法。单层分簇路由算法具有结构简单、收敛速度快、容易实现等特点,是本文研究的基础。与平面路由等算法相比,分簇路由算法在能量控制、网络扩展、负载均衡等方面具有优越性。

表1 RREP分组报文格式
Table 1 RREP packet message format

域名	大小/bits	描述
Frame Identifier	8	报文类型,帧标识符为0X02
Route Request ID	16	路由分组的ID
Command Options	8	标记路由发现过程中的RREQ
Destination Address	16	目标节点地址
Origination Address	16	源节点地址
Path Cost	8	路由开销

ZiCL(Cluster Label-based ZigBee Routing Protocol)是一种依据网络深度分簇路由算法^[12]。协调器是第一个簇头,网络深度是偶数的FFD节点为簇首,RFD节点和奇数FFD节点为其父节点的簇员。依据簇标签算法分配簇的唯一标识,簇首广播更新路由,簇内共享路由信息。源节点A与目标节点D通信时,首先计算目标节点所在簇的标签,根据簇标签选择路由,同簇使用簇内路由转发,簇间使用外部路由转发,具体流程如图1所示。ZB-CESRP是一种静态分簇路由算法^[13],要求所有节点均匀分布,节点类型只能是FFD设备。与协调器直接连接的节点定为簇首,并分配簇ID,簇首依据算法为子节点分配节点ID。节点加入网络后,簇首进行簇内广播,通过设置TTL值避免泛洪,簇内节点记录邻节点报文,优化节点路由,节省能耗,ZB-CESRP算法的建簇流程如图2所示。ME-AODV(Multipath Energy Aware AODV)分簇路由算法^[14]有效融合了AOM-DV和MBCR算法的思想,网络通信分创建簇和数据转发两个阶段,建簇的同时建立Mesh链路,每个簇有唯一ID,分协调器、簇首、网关、簇内节点等角色,簇间与簇内均单跳通信,簇内路由信息共享^[15]。

3 基于能量预警和分簇的ZigBee网络路由算法

本文提出的改进路由算法是融合了Cluster-Tree和AODVjr算法的优点,结合ME-AODV算法的建簇思想,提出的一种基于能量预警机制的ZigBee网络单层分簇路由算法。改进算法将网络划分为若干逻辑簇,簇首有唯一ID。FFD设备可以成为簇首,RFD设备只能成为簇员。建簇过程如图3所示。①ZigBee协调器通过广播方式,在其通信范围内建立第一个簇,并与非子节点建立通信链路,例如节点A与节点K。②以簇0所有子节点为当前节点,继续广播发现新节点,如发现的节点是簇0簇内节点则建立兄弟链路关系,如果新发现节点已经是簇首,以父节点为簇首;如果发现节点与当前节点无父子关系,连通度较大、网络地址较小者为簇首,如D节点的连通性高于J节点,D点为簇首。重复步骤①和②,直到建簇完成,形成以A、E、D、R节点为簇首,J、N、L节点为网关的分簇网络。

3.1 能量监测与预警

ZigBee网络中除协调器外均使用电池供电,对各节点实施能量分级预警监测。节点剩余能量达到初始能量一半时,进入“偏低”状态;剩余能量是初始能量的四分之一时,进入“预警”状态。网关和簇首节点位置特殊,耗电较快,簇首能量“偏低”时,开启簇首延长响应功能。簇首或网关能量“预警”时,簇首丢弃非路由表中的信息,启动备用网关遴选机制,如节点F因可收到簇首A和D的信息,可成为网关L的备用网关,同时广播修改路由表。使用公式(6)计算节点剩余能量,实现实时动态监测。 E_i 是节点的最初能量; d_i 表示节点所在网络深度, $d_i \leq 4$; ε 是固定系数, $0 < \varepsilon < 1$; α 是网络深度的幂,取值为1到4的整数; N 初始值为1,随着预警节点的增加而加大。使用公式(7)计算节点网络节点平均剩余能量, n 是节点数, $E_r(i)$ 是第*i*节点剩余能

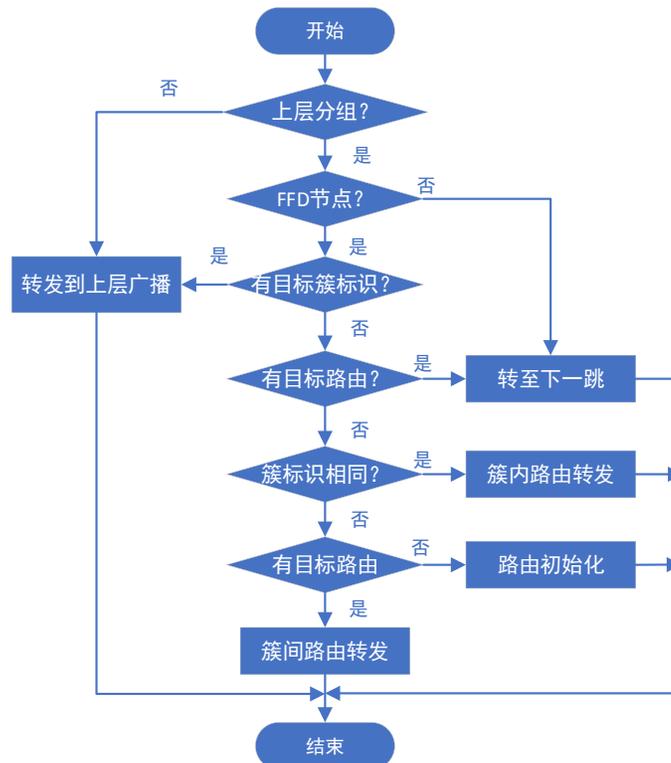


图1 ZiCL算法的路由流程图

Figure 1 Routing flow chart of ZiCL algorithm

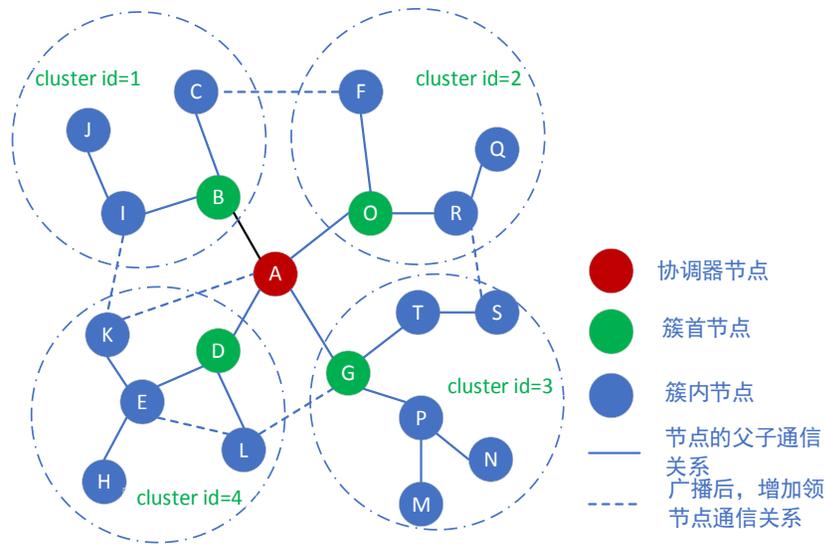


图2 ZB-CESRP算法的建簇过程图

Figure 2 Cluster building process of ZB-CESRP algorithm

量。使用公式(8)计算节点延迟响应时间。 E_i 是簇首节点的剩余能量, β 是延迟因子,根据节点的角色,将协调器、簇首、网关和簇内节点的 β 值分别设置为8、4、2、1。

$$E_{Ewarning} = \varepsilon^N E_i \frac{1}{(d_i + 1)^\alpha}, \tag{6}$$

$$E_{avg}(N) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n E_i(i), \tag{7}$$

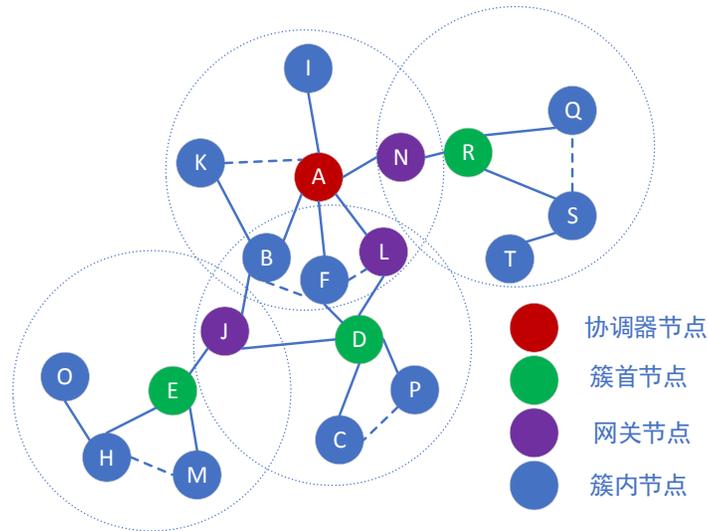


图3 改进路由算法的建簇过程
Figure 3 Cluster building process of improved routing algorithm

$$T_d = \frac{\beta}{E_r} \quad (8)$$

3.2 路由维护过程

当簇首能量充足时,簇内节点使用虚拟链路通信,簇间使用AODVjr算法路由发现目的节点,并广播剩余能量值。当簇首能量偏低时,簇内节点使用Cluster-Tree算法,使用公式(4)、(5)计算目标节点与源节点之间是否为父子关系并转发。簇间采用AODVjr算法,具体路由流程如图4所示。当簇首能量预警时,只转发现存路由条目的目的地址,发送预警信号给协调器,开始网络初始化。当节点能量枯竭时,链路断开,将源数据报缓存并开启路由修护。

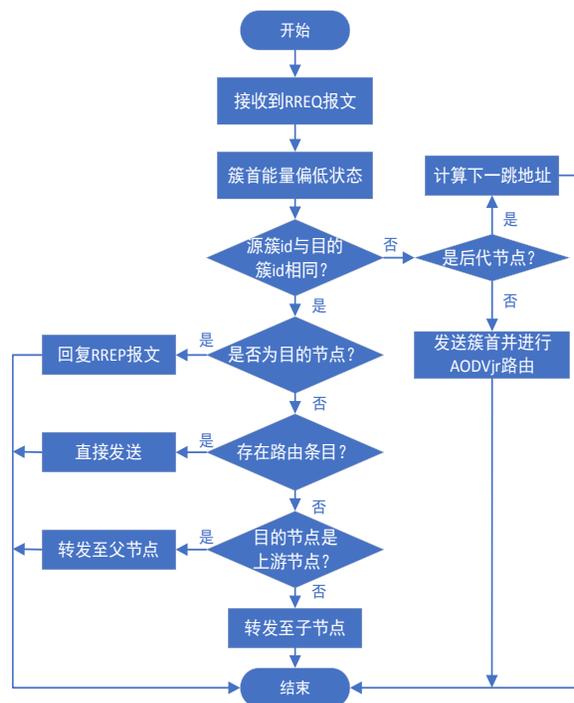


图4 簇首能量偏低时的路由流程图
Figure 4 Routing flow chart when cluster head energy is low

4 仿真结果与分析

为分析改进路由算法的性能,使用NS2软件进行了仿真实验。本文从网络主要节点剩余能量、节点失效率和数据延迟时间3个方面与AODVjr算法做了对比。具体实验场景如表2所示。

表2 仿真参数
Table 2 Simulation parameters

参数	值	单位
网络场景大小	110*110	m*m
网络节点数	30、90、120、150、180	个
数据流数	10	个
初始化能量	50	J
仿真时间	500	S
节点分布	静态随机(相距8)	M
数据发送速率	250	kbits/s
参数设置	$C_m = 4, L_m = 6, R_m = 4, \alpha = 2, \varepsilon = 0.4$	

4.1 节点剩余能量

节点剩余能量是指网络主要节点的剩余能量。AODVjr算法选取协调器一跳的节点为主要节点,改进的算法以簇首节点为主要节点。如图5所示,随着节点数和时间的增加,两种算法的主要节点剩余能量都逐渐降低,特别是300 s以后,AODVjr算法持续陡降,而改进的算法采用预警机制,在主要节点剩余能量过半后开启延迟转发,选择备用节点,使得剩余能量曲线趋于缓慢。

4.2 节点失效率

节点失效率是指节点“死亡”个数占总节点数的百分比。节点剩余能量到初始能量的5%时,认为节点死亡。相同时间内数值越低,说明节点存活得越多,网络生命周期越长。如图6所示,随着运行时间的增加,两种算法都开始有节点失效,但改进的算法延迟到250 s,明显优于AODVjr算法。特别在350 s以后,两种算法失效率差达到10个百分点,说明改进的算法更能均衡网络能耗。

4.3 数据延迟时间

数据延长时间是指数据从源节点发送至目标节点的端到端时间的平均值,即数据的总发送和总接收的时间差与分组个数的比值。数值越低,说明网络延迟越短,通信效率越高。如图7所示,在网络节点较少时,两种算法的延迟都较低。随着节点数的增加,数据分组加剧,两种算法延长都有明显增加。但改进的算法优化了分簇策略,簇间使用AODVjr路由,簇内采用Cluster-Tree路由,且虚拟链路共享,有效减少了转发跳数,降低了端到端的延迟。

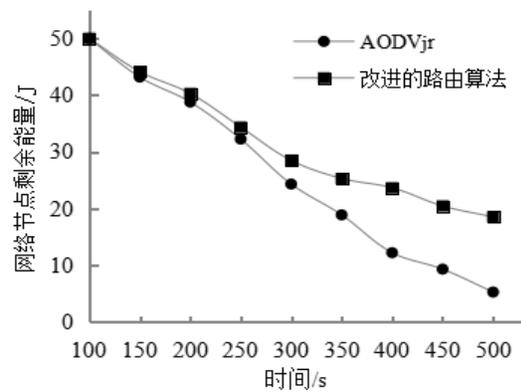


图5 网络主要节点剩余能量对比图
Figure 5 Comparison of residual energy of main nodes of the network

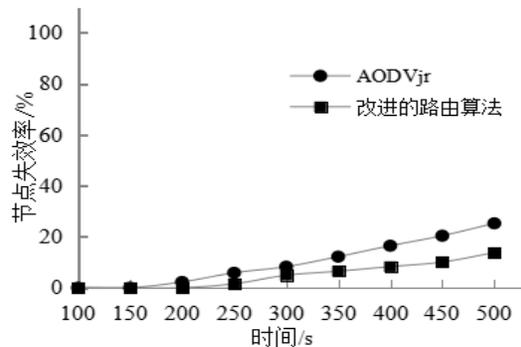


图6 网络节点失效率对比图
Figure 6 Comparison of network node failure rate

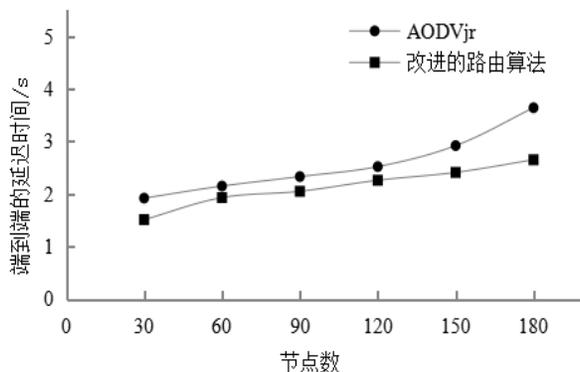


图7 网络通信端到端延长对比图

Figure 7 Comparison diagram of end-to-end extension of network communication

5 结论

本文提出一种基于能量预警的分簇ZigBee路由算法,针对现有算法的不足,融合了AODVjr和Cluster-Tree算法的优点,参考ME-AODV算法的建簇思想,设置节点能量动态监测,依据簇首能量等级启用备用节点,选择合适路由转发机制。使用NS2仿真软件,从主要节点能量消耗、节点失效率和端到端平均时延三个方面与AODVjr算法做了对比,结果表明,本算法均衡了网络能量,提高了网络通信效率,降低了网络延迟,延长了网络生命周期。在智能家居、智慧农业等领域中监测节点相对固定,本算法将有一定应用。

参考文献:

- [1] 何智勇. 基于全局能量均衡的ZigBee网络路由算法优化[J]. 计算机应用研究, 2018, 35(2): 579-581.
- [2] 林盛鑫, 钟惠球, 黄丁香, 等. 面向智能家居的WSN网络路由能量优化算法研究[J]. 东莞理工学院学报, 2018, 25(5): 1-5.
- [3] 周艳平, 马维军. 一种改进ZigBee算法及在温室监控无线网络中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2020, 28(10): 91-95.
- [4] 余成豪. ZigBee能量控制技术的研究和实现[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.
- [5] 尹湘源. 无线传感器网络低能耗分簇路由算法关键技术研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2014.
- [6] 常赞杰, 张位勇, 李桂香. 一种基于邻居表的ZigBee树路由综合加权改进算法[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(3): 528-532.
- [7] 万维祥. 基于ZigBee网络的节能调度机制研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- [8] 李清木. 基于分簇策略的ZigBee网络路由能量优化方法研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2017.
- [9] 钱志鸿, 朱爽, 王雪. 基于分簇机制的ZigBee混合路由能量优化算法[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 485-493.
- [10] 张明儒. 基于能量感知的ZigBee网络树路由算法研究及应用[D]. 吉林: 东北电力大学, 2017.
- [11] 李倩文. 基于能量优化ZigBee路由算法的研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [12] WANG F, CHAI Q L, BAN Y L. Improved ZiCL algorithm based on ZigBee network[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(2): 496-499.
- [13] CHAMAM A, PIERRE S. A distributed energy-efficient clustering protocol for wireless sensor networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2010, 36(2): 303-312.
- [14] BAO X A, LI Q M, ZHANG N, et al. An improved ME-AODV energy-balanced algorithm[J]. International Journal of Control and Automation, 2016, 9(7): 113-124.
- [15] 陈晓琴, 张怡. 能量均衡的船用通信ZigBee网络动态路由算法[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(4): 124-126.

(责任编辑: 刘 炜)