

文章编号: 2095-4980(2022)05-0486-06

基于多级能量阈值的簇头更新策略

刘彦宇, 包东辉

(北海职业学院 电子信息工程系, 广西 北海 536000)

摘要: 簇路由是节省无线传感网络(WSNs)能量的有效策略。簇头的选择是簇路由的关键。然而, 传统的簇路由是采用固定周期更新簇头, 并没有考虑到簇头的剩余能量。为此, 针对稳定簇头选择协议(SEP)进行改进, 提出基于多级能量阈值的簇头更新策略, 记为 I-SEP。I-SEP 路由考虑三类节点, 这三类节点的初始能量不同。并针对三类节点的能量以及比例, 计算它们成为簇头的概率和阈值。同时, 每轮计算簇头的剩余能量, 只有簇头剩余能量小于预定的阈值, 才进行簇头更新, 否则原来的簇头仍作为簇头, 进而减少了更换簇头所带来的能耗。仿真结果表明, 相比于 SEP, 提出的 I-SEP 路由有效地降低了能耗, 延长了网络寿命。

关键词: 无线传感网络; 簇路由; 稳定簇头选择协议; 簇头更新; 能量阈值

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020045

Multi-level energy threshold-based cluster head update strategy

LIU Yanyu, BAO Donghui

(Department of Electronic Information Engineering, Beihai Vocational College, Beihai Guangxi 536000, China)

Abstract: Cluster routing is an effective strategy to save energy of Wireless Sensor Networks (WSNs). The selection of cluster head is the key of cluster routing. However, the traditional cluster routing is to update the cluster-head in a fixed period without considering the residual energy of the cluster-head. Therefore, the Stable Election Protocol(SEP) is improved to propose a cluster-head update strategy based on multi-level energy threshold, denoted as I-SEP. The I-SEP route considers three types of nodes with different initial energies. According to the energy and proportion of the three types of nodes, the probability and threshold of them becoming cluster heads are calculated. At the same time, the energy of the cluster head is calculated in each round. Only when the energy of the cluster head is less than the energy threshold, the cluster head is updated; otherwise, the original cluster head remains, thus reducing the energy consumption caused by the replacement of the cluster head. Simulation results show that compared with SEP, the proposed I-SEP route effectively reduces the energy consumption and prolongs the network life.

Keywords: Wireless Sensor Networks(WSNs); Clustering Routing; Stable Election Protocol; cluster head update; energy threshold

随着通信技术的发展, 基于无线传感网络(WSNs)的物联网得到广泛应用^[1-2]。WSNs 中的节点感知环境数据, 再将数据传输至控制中心。典型的基于 WSNs 的物联网应用中将传感节点部署于土壤、空气和水中, 再由这些节点感测湿度、温度、pH 值等数据。WSNs 中的节点属微型节点, 一般由电池供电。一旦节点能量消耗殆尽^[3], 节点就无法工作。但是, 这些传感节点常部署于野外环境, 即使能量消耗殆尽, 也不便于更换电池或补充能量。因此, 能效成为基于 WSNs 的物联网应用发展的关键。传输数据消耗了节点的大部分能量。因此, 减少节点传输的数据量, 可以缓解节点能耗。簇路由是缓解能耗的有效策略^[4-6]。而低能量自适应的层次簇路由(Low Energy Adaptive Clustering Hierarchy, LEACH)就是典型的簇路由策略^[7]。文献[7]是针对同构网络, 将节点划分为多个簇, 每个簇产生一个簇头。该同构网络是指网络内节点的初始能量相同。

收稿日期: 2020-02-07; 修回日期: 2020-08-14

基金项目: 2018 年度广西高校中青年基础能力提升资助项目(2018KY1190); 2017 年度北海职业学院“十三五”规划科研课题资助项目(2017YJZ10)

文献[8]基于LEACH, 提出稳定的簇头选举协议(SEP)。SEP协议考虑网络内节点的初始能量并不相同, 部分节点的初始能量较高。此外, 文献[9]提出分布式的能效簇路由(Distributed Energy-Efficient Clustering, DEEC)协议。该协议也考虑了初始能量不同的节点, 并参考节点的剩余能量信息, 选择簇头。

文献[10]提出基于低功耗自适应簇分层的修正簇间路由, 其从节点密度和节点剩余能量信息对阈值进行修正, 提高了节点间能耗平衡。

文献[11]为了平衡节点间能耗, 提出基于博弈化能耗均衡的分簇路由(Game theory based on energy Density Clustering Routing, GDCR)。GDCR引用博弈论, 簇头扮演博弈参与者, 再利用纳什均衡寻优能耗平衡的最优路径。文献[12]基于高斯网络的连接模型, 提出了能效优化的簇路由。其将网络划分为虚拟的方形格, 每个格作为高斯网络内的节点, 并结合最短路径策略构建能效优化的路由。

然而, 上述协议均采用固定周期更新簇头, 并且本轮担任簇头的节点, 不再参与下一轮簇头的竞争。这种固定的簇头更新策略, 未能考虑到簇头能量信息。实质上, 有些簇头可能剩余能量仍较高, 完全可以继续担任簇头, 无需更换簇头。此外, 更换簇头需传输一些控制消息, 这增加了网络能耗。

为此, 对SEP路由进行改进(Improved-SEP, I-SEP)。主要的研究工作如下: 1) 考虑不同初始能量的网络节点, 每类节点被选择成簇头的概率阈值并不相同; 2) 采用动态簇头更新机制, 不采用传统的固定周期更新簇头。利用簇头的能量阈值判断是否更换簇头。如果簇头剩余能量低于阈值, 就更新, 否则继续担任簇头。

论文组织结构如下: 先阐述网络模型, 包括节点的分类和LEACH概述以及能耗模型; 然后, 再详细分析提出的I-SEP路由; 在第3节对I-SEP路由进行了性能分析; 最后, 对本文的研究工作进行了总结。

1 网络模型

1.1 节点分类

从能量角度考虑三类节点: 普通节点(Normal Node, NN)、次能节点(Sub-advanced Node, SN)和超能节点(Advanced Node, AN)。ANs的初始能量大于SNs, NNs的初始能量最低。令 E_0 表示普通节点NNs的初始能量, 则SNs和ANs的初始能量分别表示为:

$$E_0^{\text{SN}} = E_0(1 + \beta) \quad (1)$$

$$E_0^{\text{AN}} = E_0(1 + \alpha) \quad (2)$$

式中 α, β 为正数, 且 $\alpha > \beta$, $\beta = \alpha/2$ 。

在 $\ell \times \ell$ 的方形区域内部署 n 个节点, 其中ANs的比例为 a ; SNs的比例为 b 。因此, NNs的节点数为 $n(1 - a - b)$ 。

采用与LEACH路由类似的簇头选举策略。针对NN、SN和AN这三类节点, 考虑三类概率和阈值。令 G_{NN} 、 G_{SN} 和 G_{AN} 分别表示在上一轮未成为簇头的NN、SN和AN节点集。令 r 为执行的当前轮。

对于普通节点, 它的概率和阈值如式(3)和式(4)所示:

$$p_{\text{NN}} = \frac{p}{1 + a\alpha + b\beta} \quad (3)$$

$$T_i^{\text{NN}} = \begin{cases} \frac{p_{\text{NN}}}{1 - p_{\text{NN}}(r \bmod 1/p_{\text{NN}})}, & \text{if } s_i \in G_{\text{NN}} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中 s_i 表示第 i 个节点。

类似地, 对于次能节点, 它的概率和阈值如式(5)和式(6)所示:

$$p_{\text{SN}} = \frac{p(1 + \beta)}{1 + a\alpha + b\beta} \quad (5)$$

$$T_i^{\text{SN}} = \begin{cases} \frac{p_{\text{SN}}}{1 - p_{\text{SN}}(r \bmod 1/p_{\text{SN}})}, & \text{if } s_i \in G_{\text{SN}} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

式(7)和式(8)给出超能节点被选举为簇头的概率和阈值:

$$p_{AN} = \frac{p(1+\alpha)}{1+\alpha\alpha+b\beta} \quad (7)$$

$$T_i^{AN} = \begin{cases} \frac{p_{AN}}{1-p_{AN}(r \bmod 1/p_{AN})}, & \text{if } s_i \in G_{AN} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

依据式(3), (5), (7), 可得平均每轮的簇头数:

$$n(1-a-b)p_{NN} + nap_{AN} + nbp_{SN} = np \quad (9)$$

1.2 能耗模型

引用文献[13]的能耗模型, 如图 1 所示。如果传输距离 d 小于或者等于参考距离 $d_0 = \sqrt{\epsilon_{fs}/\epsilon_{amp}}$, 就利用多径衰落计算能耗; 否则, 就采用自由模型, 如式(10):

$$E_{sd}(m, d) = \begin{cases} mE_{elec} + m\epsilon_{fs}d^2, & \text{if } d \leq d_0 \\ mE_{elec} + m\epsilon_{amp}d^4, & \text{if } d > d_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: ϵ_{fs} 、 ϵ_{amp} 分别表示多径衰落模型和自由空间模型传输的功放参数^[10]; m 为比特数。

接收 m 比特的数据包所消耗的能量 $E_{rv}(m, d)$:

$$E_{rv}(m, d) = mE_{elec} \quad (11)$$

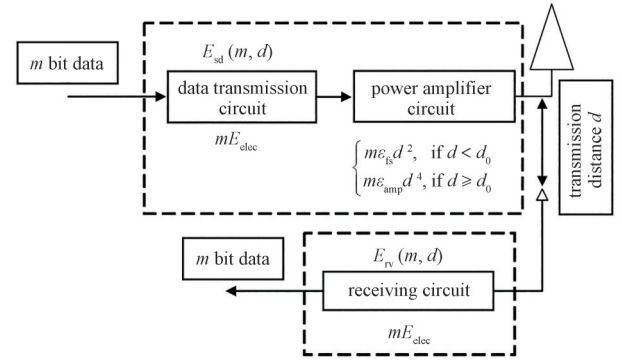


Fig.1 Energy consumption model

图 1 能耗模型

2 I-SEP 路由

2.1 需解决的问题

产生了簇头 CH 后, 簇头 CH 就向邻居节点广播通告消息 ADV。接收后, 传感节点就采用就近原则, 选择一个离自己最近的簇头作为自己的簇头, 并成为该簇的成员。因此, 在每一轮内, 就需进行簇头选择和成员形成。然而, 一些簇头可能离基站较近, 其向基站传输数据时所消耗的能量较少。这些簇头的能量较充足, 因此, 它们仍可以在下一轮继续担任簇头, 并且其簇成员也无需变化。但是依据传统的 SEP 路由, 本轮担任的簇头在下一轮不再竞选簇头, 需重新选举簇头, 并组建簇成员。

而选举簇头和组建簇成员需传输一些控制消息, 加大了能量消耗^[14-15]。为此, I-SEP 路由评估簇头的能量, 并采用动态能量阈值。如果簇头剩余能量低于阈值, 就更新簇头, 否则原簇头仍保留。

2.2 动态能量阈值

更新簇需消耗网络能量。由于每个簇内簇成员数(簇尺寸)可能不同, 从平均值角度估算簇尺寸。利用式(12)计算平均每个簇内的簇成员数 \bar{m} :

$$\bar{m} = \frac{n - np}{np} = \frac{1-p}{p} \quad (12)$$

更新簇头和组建新的簇, 簇头所消耗的能量 E_{CH} :

$$E_{CH} = P_{Tx}\kappa + P_{Rx}\kappa\bar{m} \quad (13)$$

式中: P_{Tx} 、 P_{Rx} 分别表示传输、接收一个比特数据所消耗的能量; κ 为数据包的比特数。

I-SEP 路由考虑了 ANs、NNs 和 SNs 三类节点, 并且这三类节点的初始能量不同, 因此, 分别给这三类节点设置能量阈值。首先, 利用式(14)、式(15)和式(16)计算由 NNs、SNs 和 ANs 组建簇的初始能量:

$$E_{NNs} = E_0\bar{m} \quad (14)$$

$$E_{SNs} = E_0(1+\beta)\bar{m} \quad (15)$$

$$E_{ANs} = E_0(1+\alpha)\bar{m} \quad (16)$$

再结合式(13)，可计算每个簇的可执行的轮数：

$$C_{NNs} = E_{NNs}/E_{CH}, C_{SNs} = E_{SNs}/E_{CH}, C_{ANs} = E_{ANs}/E_{CH} \quad (17)$$

式中 C_{NNs} 、 C_{SNs} 和 C_{ANs} 分别表示由 NNs、SNs 和 ANs 组建的簇可执行的轮数。

令 E_{NN-CH}^{res} 、 E_{SN-CH}^{res} 和 E_{AN-CH}^{res} 分别表示由 NNs、SNs 和 ANs 担任簇头的三类簇头的平均剩余能量。将剩余能量与余下可执行的轮数进行相除，可计算这三类节点的能量阈值：

$$\begin{cases} E_{NN-CH}^{th} = E_{NN-CH}^{res} / (C_{NNs} - r) \\ E_{SN-CH}^{th} = E_{SN-CH}^{res} / (C_{SNs} - r) \\ E_{AN-CH}^{th} = E_{AN-CH}^{res} / (C_{ANs} - r) \end{cases} \quad (18)$$

式中 r 表示当前执行的轮数。

最后，各类簇头将自己的剩余能量与其对应的能量阈值进行比较，如果小于能量阈值，就进行簇头更新，并组建新的簇；否则，就不更新簇头。

3 性能仿真

3.1 仿真参数

利用 Matlab 建立仿真平台，在 100 m×100 m 区域内部署 100 个节点。一个信宿位于区域中心，具体的仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数
Table1 Simulation parameters

simulation area/m ²	number of nodes	$\epsilon_{p}/(\text{pJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$	$\epsilon_{amp}/(\text{pJ}\cdot\text{bit}^{-1}\cdot\text{m}^{-4})$	d_0/m	κ/bit
100×100	100	10	0.001 3	87	4 000

同时，选择文献[8]提出的 SEP、文献[9]提出的 DEEC 和文献[4]提出的基于剩余能量的簇头选择算法 (Residual Energy based Cluster Head Selection, RECH) 作为参照，并比较它们的吞吐量、网络寿命性能。此外，在仿真过程中，维持 b 值不变，且 $b=0.3$ ，并且 $\beta=\alpha/2$ 。考虑四类场景，这四类场景约束了次能节点和超能节点所占的节点比例以及初始能量值，如表 2 所示。

表 2 场景参数
Table2 Scene options

scene	initial energy ratio	node proportion
scene 1	$\alpha=1$	$\alpha=0.1$
scene 2	$\alpha=2$	$\alpha=0.1$
scene 3	$\alpha=1$	$\alpha=0.2$
scene 4	$\alpha=2$	$\alpha=0.2$

3.2 实验一

本次实验分析在 $\alpha=0.1$ 以及 $\alpha=1, \alpha=2$ 环境下的吞吐量和网络寿命，如图 2、图 3 所示。

从图 2 可知，相比于 SEP，提出的改进路由 I-SEP 的吞吐量得到提升。原因在于：I-SEP 路由平衡了网络能耗，减少了失效节点数，进而提高了吞吐量。但相比于 RECH，I-SEP 路由的吞吐量略有下降。即使在 $\alpha=2$ 时，I-SEP 路由的吞吐量仍低于 RECH。此外， α 值的增加也提升了吞吐量。这符合预期。在 $\alpha=0.1$ 不变的情况下， α 值的增加意味着超能节点和次能节点的初始能量增加，这就增加了网络能量，使更多节点具有充足能量传输数据，这有利于数据包的传输。

图 3 显示了 SEP、RECH 和 I-SEP 路由的网络寿命。从图 2 可知，I-SEP 路由的吞吐量优于 SEP 和 RECH 路由。这说明：I-SEP 路由通过减少数据包的传输，缓解了节点能量消耗，进而延长了网络寿命。从图 3 数据情况看， α 值的增加有利于网络寿命的延长。

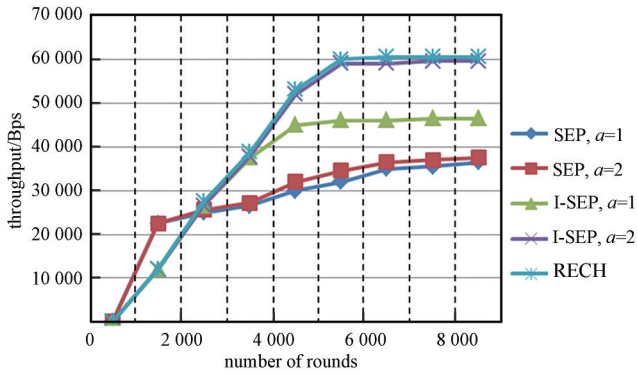


Fig.2 Throughput (first-experiment)

图 2 吞吐量(实验一)

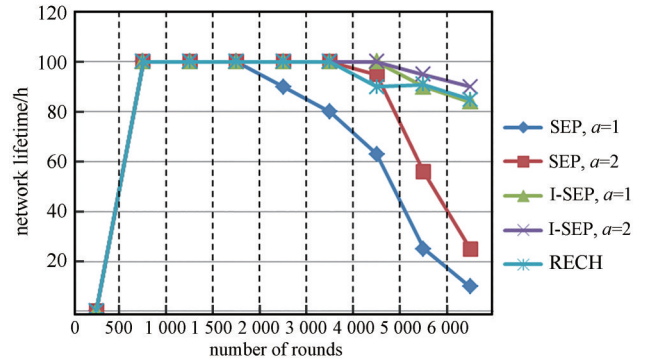


Fig.3 Network lifetime (first-experiment)

图 3 网络寿命(实验一)

3.3 实验二

本次实验分析在 $a=0.2$ 以及 $\alpha=1, \alpha=2$ 环境下的吞吐量和网络寿命, 如图 4、图 5 所示。相比于实验一, 实验二中 a 值增加了约 20%。超能节点数的增加, 使 CHs 也随之增加。而 CHs 的增加, 提高了数据包的传输, 最终, 增加了吞吐量。相比于 SEP, 提出的 I-SEP 路由的吞吐量约提高了约 53%。图 5 显示了 I-SEP、SEP 和 RECH 路由的网络寿命。对比图 3 数据不难发现, a 值的增加也提升网络寿命。原因在于: a 值增加, 增加了超能节点的比例, 提高了网络能量, 进而延长了网络寿命。

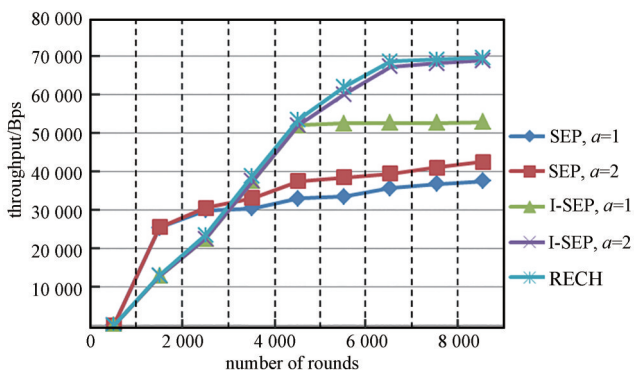


Fig.4 Throughput (second-experiment)

图 4 吞吐量(实验二)

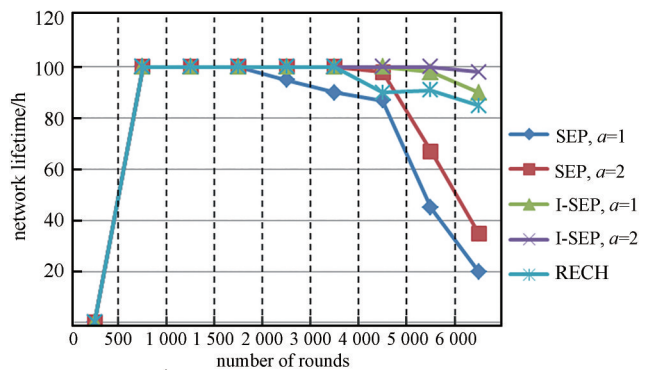


Fig.5 Network lifetime (second-experiment)

图 5 网络寿命(实验二)

3.4 实验三

本次实验分析 I-SEP、SEP 和 RECH 路由的最后一个失效节点 (Last Node Dead, LND) 和第一个失效节点 (First Node Dead, FND) 出现的轮数, 如表 3 所示。

表 3 FND 和 LND
Table 3 FND and LND

a	routing protocol	α	FND	LND
0.1	SEP	1	1 028	2 023
		2	1 125	3 348
	I-SEP	1	2 846	5 287
		2	2 876	7 600
0.2	SEP	1	1 141	3 289
		2	1 259	4 161
	I-SEP	1	2 997	6 258
		2	3 268	8 690
	RECH		2 976	7 865

从表 3 数据可知, 通过增加超能节点数, LND 和 FND 出现的轮数推迟, 网络寿命得到提升。此外, 相比于 SEP 和 RECH 路由, 提出的 I-SEP 路由有效地延缓了 LND 和 FND 出现的时间, 这有利于网络寿命的延长。

4 结论

为了降低能耗,对SEP路由进行改进。针对超能节点、次能节点和普通节点,设置不同的概率和阈值。同时,不采用固定周期更新簇头,而是依据簇头的能量进行判断,只有簇头能量低于能量阈值,才进行簇头更新。通过这种方式,减少控制消息的传输,进而降低能耗。仿真结果表明,提出的I-SEP路由有效地降低了能耗,并延长了网络寿命。

参考文献:

- [1] 董发志,丁洪伟,杨志军. 基于遗传算法和模糊C均值聚类的WSN分簇路由算法[J]. 计算机应用, 2019,39(8):2359–2365. (DONG Fazhi, DING Hongwei, YANG Zhijun. WSN clustering routing algorithm based on genetic algorithm and fuzzy C-means clustering[J]. Journal of Computer Applications, 2019,39(8):2359–2365.)
- [2] 李英磊,吴韶波,黄茂源. 基于ECDH算法的WSN密钥研究[J]. 科技通报, 2018(7):119–123. (LI Yinglei, WU Shaobo, HUANG Maoyuan. Research on key of WSN based on ECDH algorithm[J]. Bulletin of Science and Technology, 2018(7):119–123.)
- [3] 胡长俊,袁树杰. 矿井WSN自适应能量有效及能耗均衡的数据收集方法[J]. 北京邮电大学学报, 2018(2):67–74. (HU Changjun, YUAN Shujie. An adaptive data collection method of energy efficiency and energy consumption balance in WSN for coal mines[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018(2):67–74.)
- [4] BEHERA T M, MOHAPATRA S K, SAMAL U C. Residual energy based cluster head selection in WSNs for IoT application[J]. IEEE Internet Things Journal, 2019,6(3):5132–5139.
- [5] NARANJO P G, SHOJAFAR M, MOSTAFAEI H. P-SEP: a prolong stable election routing algorithm for energy-limited heterogeneous fog-supported wireless sensor networks[J]. Journal Supercomputing, 2017,73(2):733–755.
- [6] BEHERA T M, SAMAL U C, MOHAPATRA S K. Energy efficient modified LEACH protocol for IoT application[J]. IET Wireless Sensor System, 2018,8(5):223–228.
- [7] HANDY M J, HAASE M, TIMMERMANN D. Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection[C]// Proceedings 4th International Workshop Mobile Wireless Communication Network. Stockholm: IEEE Communications Society, 2002:368–372.
- [8] SMARAGDAKIS G, MATTA I, BESTAVROS A. SEP: a stable election protocol for clustered heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computing Science, 2004,4(8):32–36.
- [9] QING L, ZHU Q, WANG M. Design of a distributed energy-efficient clustering algorithm for heterogeneous wireless sensor networks[J]. Computing Communication, 2006,29(12):2230–2237.
- [10] 刘卫,李跃飞,谢英辉. 基于簇头阈值优化的LEACH的分簇路由[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019(5):537–542. (LIU Wei, LI Yuefei, XIE Yinghui. Correction threshold-based improved LEACH clustering protocol for wireless sensor networks[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2019(5):537–542.)
- [11] 杨怀卿,姚杰鹏,杨华. 基于博弈论能耗均衡的分簇路由协议[J]. 中国科技论文, 2019,14(3):291–295. (YANG Huaiqing, YAO Jiepeng, YANG Hua. A clustering routing protocol of a game theory based on energy density clustering routing[J]. China Science Paper, 2019,14(3):291–295.)
- [12] DUNG Nguyen Quoc, BI Lvqing, WU Yangbing, et al. Energy efficiency clustering based on Gaussian network for wireless sensor network[J]. IET Communications, 2019,13(6):741–747.
- [13] KUMAR D, PATEL R B. Multi-hop data communication algorithm for clustered wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2011,7(1):45–52.
- [14] DUTT S, AGRAWAL S, VIG R. Cluster-head Restricted Energy Efficient Protocol(CREEP) for routing in heterogeneous wireless sensor networks[J]. Wireless Person Communication, 2018,100(4):1477–1497.
- [15] WANG S, YU J, ATIQUZZAMAN M, et al. CRPD: a novel clustering routing protocol for dynamic wireless sensor networks[J]. Person Ubiquitous Computing, 2018,22(3):545–549.

作者简介:

刘彦宇(1984-),男,哈尔滨市人,硕士,副教授,主要研究领域为软件过程、软件逆向工程。email: HUSG_PI82@21cn.com.

包东辉(1971-),男,广西壮族自治区北海市人,硕士,副教授,主要研究领域为软件过程、软件演化。