

# 基于能量感知的无线传感器网络路由算法

李 响 孙华志

(天津师范大学计算机与信息工程学院 天津 300387)

**摘 要** 针对 LEPS(Link Estimation and Parent Selection)在路由选择维护阶段数据收集成功率较低、节点间负载不均衡、链路质量评估复杂等问题,提出了基于能量感知的路由算法 Energy-Aware and Load-Balance(EALB)。在路由选择时,EALB引入了能量感知和同层节点数据转发机制。通过仿真实验将该算法与 LEPS 路由协议进行比较,结果表明在相同的实验环境下,该路由协议能够提高收集成功率,有效均衡负载,延长网络生存时间。

**关键词** 无线传感器网络,路由协议,能量感知,负载均衡

中图法分类号 TP393.0 文献标识码 A

## Algorithm of Wireless Sensor Network Routing Based on Energy Aware

LI Xiang SUN Hua-zhi

(College of Computer and Information Engineering, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

**Abstract** Confronted with the problems of low success rate of data collection, load imbalance between nodes and link estimate complexity, an energy-aware routing protocol (EARP) was proposed. EALB adopts energy-aware mechanism as well as data transmission between brother nodes, and uses RSSI to estimate link quality instead of success rate of data transmission. The results show that, in the same simulation environment, compared with LEPS routing protocol, the proposed routing protocol performs more effectively on balancing the traffic load, protecting low energy nodes and prolonging the network lifetime.

**Keywords** Wireless sensor network, Routing protocol, Energy-aware, Load-balance

## 1 引言

无线通信技术、系统 SOC 芯片设计技术、传感器以及机电系统等技术的出现,推动了低成本、低功耗、多功能的无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)技术的应用与发展。无线传感器网络是集数据采集、数据处理、数据传输于一体的复杂系统,能够通过各类集成化的微型传感器协作地实时监测、感知和采集各种环境和对象的相关信息,这些信息通过无线方式发送,并以自组多跳的无线传播方式传送到用户终端,从而实现物理世界、计算世界以及人类社会三元世界的连通[1]。

在实际应用中,电源能量以及监测环境对节点的影响是不容忽视的,如何做到节点对自身能量变化以及外界环境因素的自适应性,使得多个节点之间互相协作,提高网络系统性能,是无线传感器网络领域重点研究的问题[2]。

## 2 EALB 无线传感器算法网络路由算法

无线传感器网络路由协议中 Link Estimation and Parent Selection(LEPS)算法比较普及,但 LEPS 存在着层次性较弱、链路质量评估复杂、忽略节点能量因素等弊端[3]。针对以上不足,本文提出以能量感知为基础并结合相应节能机制的新

型路由算法 EALB。EALB 引入能量感知机制,在选择父节点进行数据转发时不仅根据路径距离和链路质量因素,还根据节点剩余能量,保证在数据传输质量的前提下实现了节点间的负载均衡,结合扩散延时方法,在拓扑建立过程中减少了冗余数据的发送,达到了节能的目的,延长了网络生存期[4]。

### 2.1 加入扩散延时

EALB 路由算法用扩散延时代替了 LEPS 中的广播周期,避免了 LEPS 中出现的重新广播、反复迭代问题。每个节点在更新了自己的跳数信息后立即启动一个扩散延时定时器,定时器的时间根据节点当前跳数而定,如式(1):

$$BackOffTime = \alpha \times \gamma \times hop \quad (1)$$

其中,  $hop$  为节点当前距离汇聚节点的跳数,  $\lambda$  为扩散速率常数,其值代表在当前网络环境中数据传输一跳的平均延时,  $\alpha$  为干扰系数,其值代表由于环境干扰使得数据传输一跳的平均时间误差,  $\alpha$  的大小代表当前网络环境质量的好坏[5]。

### 2.2 父节点选择机制

EALB 规定所有父节点都有被子节点选为目标节点进行数据转发的可能性,并根据父节点的链路质量值、剩余能量、优先级系数、接收子节点转发数据包数目这 4 个参数对最优父节点的选择进行调度,在保证传输质量的基础上,使多个父节点的能量消耗得到均衡。式(2)给出了 EALB 的父节点选

本文受国家自然科学基金(61103074)资助。

李 响(1985—),男,硕士,实验师,主要研究方向为数据安全与计算机安全、计算机网络, E-mail:lxindaxyz@hotmail.com;孙华志(1961—),男,博士,教授,主要研究方向为操作系统、网格计算。

择算法。

$$SelectParent = \text{Max}_{i=1,2,\dots,a} \left( \frac{P_k \times E_k \times Lq_{ik}}{N_k + 1} \right) \quad (2)$$

其中,  $n$  为父节点的个数, 其值最大为 MAX-PARENT-NUMBER;  $Lq_i$  代表从父节点与本节点之间的链路质量;  $E$  代表父节点剩余能量, 初始时所有节点的剩余能量赋值即为自己的初始能量;  $P$  为优先级系数, 初始时所有父节点优先级系数赋值为相同的常量;  $N$  代表向该父节点发送数据包数目, 初值为 0。

### 2.3 EALB 路由维护算法

在 EALB 拓扑网络中, 节点需要进行数据转发时, 根据式(2)从父节点列表中选择出最优父节点作为转发目的节点, 在转发的数据包中注明需要父节点在收到数据后返回 ACK 加以确认, 并在发送数据后将向此父节点发送数据包数目值加 1。

父节点在收到子节点发送的数据后, 先向子节点发送 ACK 确认, 然后再将数据根据式(2)继续向上进行转发, 直到汇聚节点为止<sup>[6]</sup>。ACK 的格式如图 1 所示, ACK 中包含的信息有: 包类型字段、父节点本身剩余能量、接收本次子节点发送数据的 RSSI、能量警告标志位<sup>[7]</sup>。



图 1 ACK 包格式

如图 2 所示, 父节点接收到子节点的数据包, 从中提取传感数据信息, 获取接收此数据包的 RSSI 和节点自身的剩余能量值。父节点根据式(3)判断当前的剩余能量是否低于能量报警阈值, 低于报警阈值则将 ACK 中的能量警告标志位置 1, 否则置 0。

$$Threshold = \frac{\gamma \times E_0}{d^h} \quad (3)$$

其中,  $\gamma$  为负载系数,  $E_0$  为节点的初始能量值,  $d$  为网络中节点的平均度数。

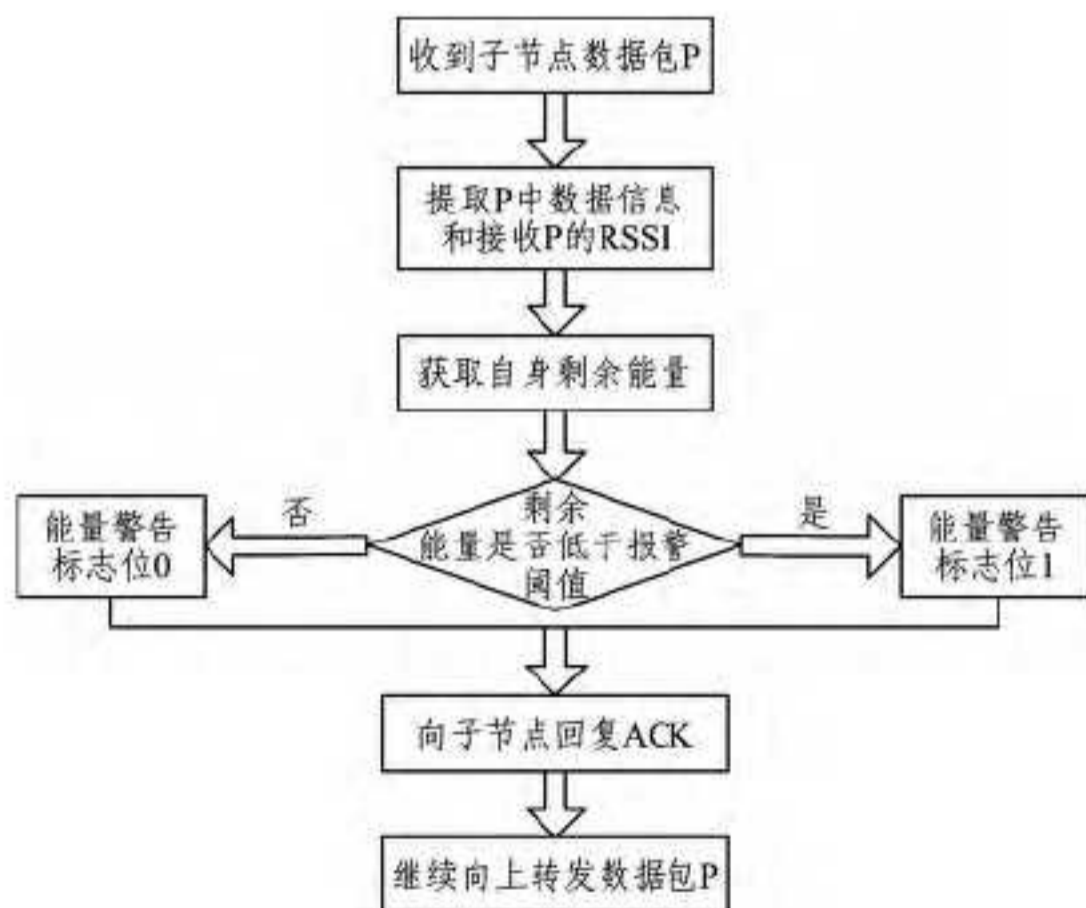


图 2 父节点数据转发流程图

### 2.4 节点加入与退出

EALB 一旦拓扑建立完成, 在短时间内就不会再进行路由信息的交换, 因此 EALB 必须引入节点加入与退出机制保证及时地更新路由表信息。EALB 中新节点加入到网络中需要广播节点加入请求, 包格式如图 3 所示。网络中其它节点

在收到节点加入请求广播后会向新加入节点发送节点加入应答数据包, 格式如图 4 所示。

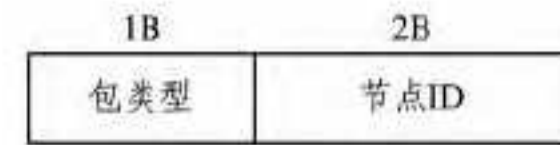


图 3 节点加入请求广播包格式

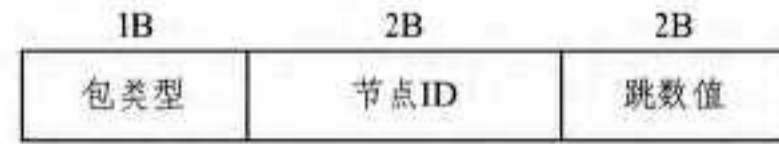


图 4 节点加入应答包格式

新加入节点在收到加入应答数据包后会选择跳数值最小的应答节点作为自己的父节点, 并将其信息加入到父节点列表。

节点能量过低将要退出网络时, 需要向网络中广播节点退出声明数据包, 格式如图 5 所示。节点判断自身能量过低的标准可以参考式(3)中的能量报警阈值  $Threshold$ , 设定节点退出能量阈值为  $Threshold$  的  $1/2$ 。



图 5 节点退出广播包格式

### 2.5 同层节点数据转发

EALB 中部分节点因剩余能量过低而退出网络, 某些节点的父节点列表可能为空, 此时当节点有数据需要向上转发时便没有父节点可以选择。为了避免这种情况, EALB 引入了同层节点数据转发机制: 节点发现父节点列表为空时便发送同层传递数据包, 格式如图 6 所示<sup>[8]</sup>。

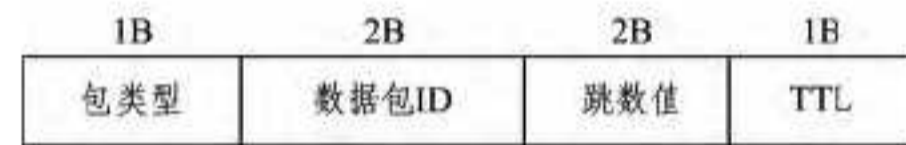


图 6 同层节点转发数据包格式

该机制的思想是当发现父节点路径不可达时将数据项和本节点跳数相同的同层节点进行转发, 由同层兄弟节点负责将数据继续向上传递。图 7 给出了同层节点数据转发的数据流向图。

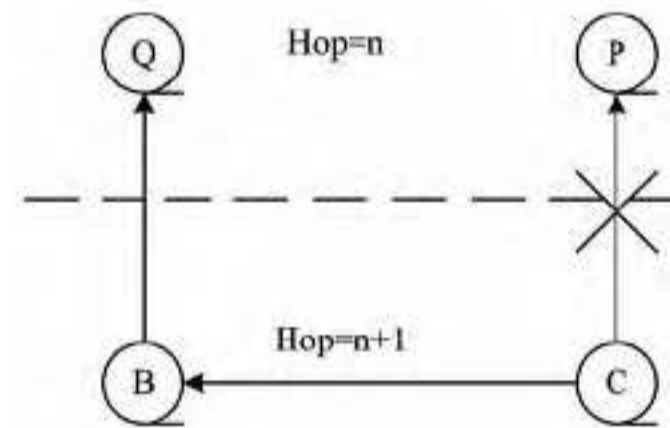


图 7 同层节点转发数据流向图

## 3 模拟实验和性能评价

本文在 OPNET 14.5 平台上对 LEPS 和 EALB 两种路由算法分别进行模拟仿真, 其中网络协议栈中的物理层和 MAC 层通信机制采用 IEEE 802.15.4 标准, 并在其上搭建以 LEPS 和 EALB 路由算法为核心的网络层。

### 3.1 参数设置

本文实验选择的拓扑结构是以汇聚节点为中心的网格型结构。图 8 显示了由 1 个中心汇聚节点和 121 个传感节点组成的放射性树形拓扑结构, 节点发送拓扑建立广播包采用

Traffic Source 模块的 UNACK 方式进行传输。

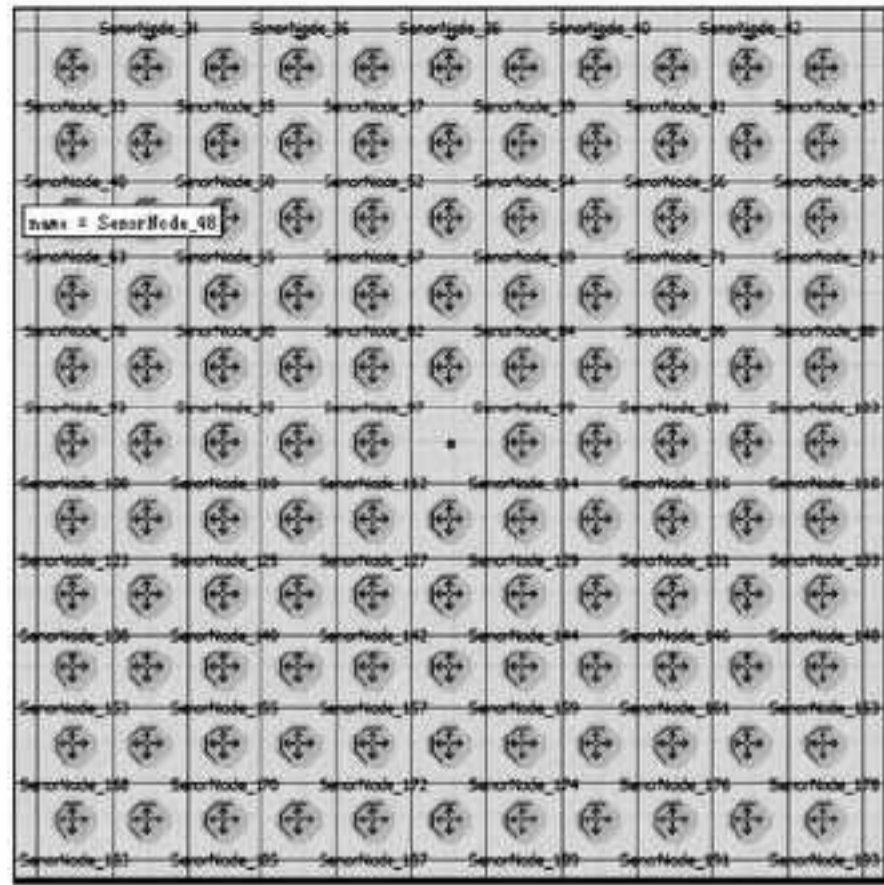


图 8 网格型节点布局

表 1 列举了相关参数设置,在路由转发与维护实验中,除了特别指出的参数更改以外,其它参数设置不变。

表 1 实验环境参数设置

实验参数	说明
节点布局	以汇聚节点为中心的网格型
相邻节点距离	20m
节点有效通信距离	30m
节点移动性	静止
节点平均度数	3
扩散速率常数 $\lambda$	2ms
节点初始电量	2AA(1.5v,1600mAh)

### 3.2 路由转发与维护阶段模拟

#### 3.2.1 冗余数据包对比

图 9 为 LEPS 和 EALB 在拓扑建立过程中发送的跳数广播包个数对比图,横坐标为网络节点总数,纵坐标为跳数广播包个数,建立树形拓扑需要广播的数据包数目随着网络中节点数目的增加而增长。图中 5 条曲线分别代表了 LEPS 算法和在 EALB 算法中干扰系数  $\alpha$  分别取 0.1、0.4、0.6、1 的 4 种情况。从图中可以明显看出,EALB 比 LEPS 节省了冗余跳数广播包的发送,而且随着网络节点数目的增加,EALB 相对 LEPS 节能效果越加明显。

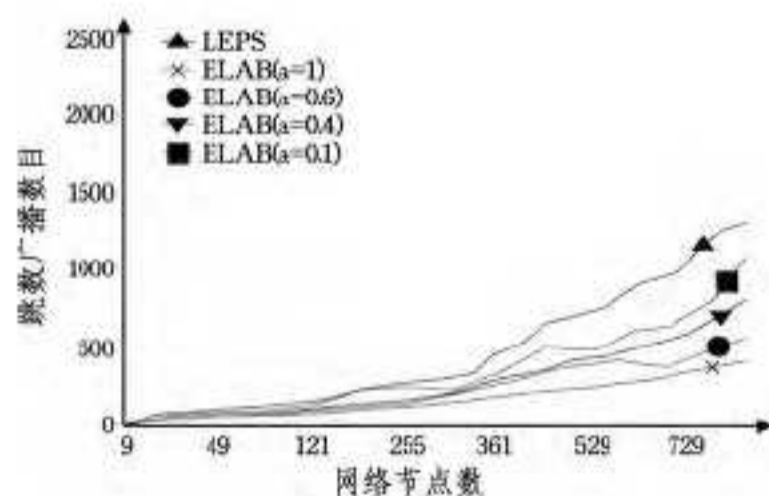


图 9 跳数广播包数目对比图

#### 3.2.2 数据收集速率对比

实验中将传感数据包从发送开始到汇聚节点接收到该数据包的时间间隔作为该传感数据包的收集时间,并用所有最外层节点在一段时间内发送的传感数据包的平均收集时间代表该网络状态下的数据收集速率。从图 10 中可以看出,网络节点数目相同时,EALB 的数据收集消耗时间要略少于 LEPS,在节点数目为 841 时,EALB 数据收集速率要比 LEPS 快 7%。

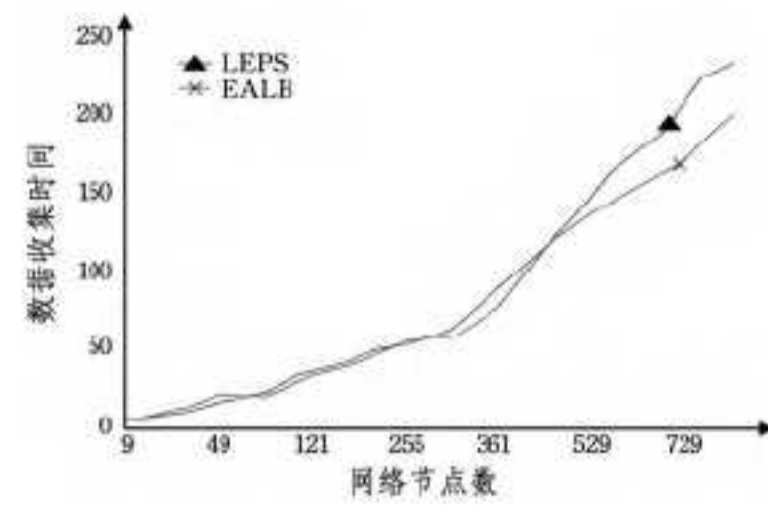


图 10 数据收集速率对比图

#### 3.2.3 数据收集成功率对比

实验中定义一段时间内汇聚节点接收到的传感数据包数目与所有传感节点发送的传感数据包总数的比值作为该时间段的收集成功率。图 11 显示了 LEPS 和 EALB 在数据收集成功率上的对比结果,随着时间变长,EALB 数据收集成功率要优于 LEPS。

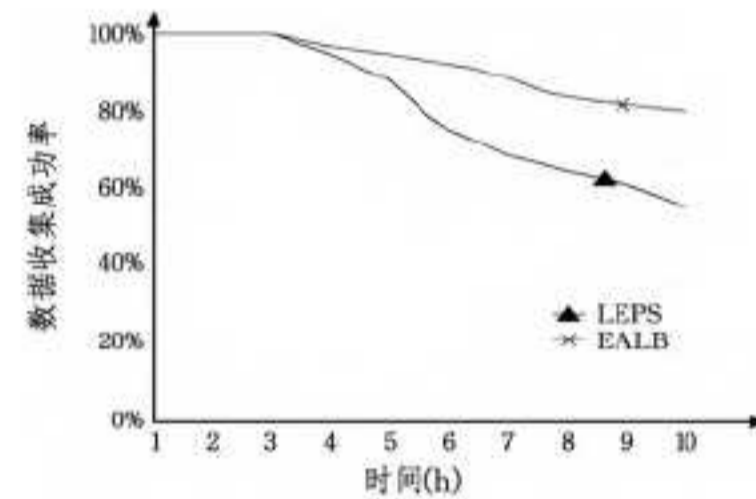


图 11 数据收集成功率对比图

#### 3.2.4 负载平衡度对比

本节在树形拓扑中同层节点的网络负载平衡度方面对 EALB 和 LEPS 进行实验对比,本组实验设定 225 个网络节点,它们仍然分布在  $300\text{m} \times 300\text{m}$  的矩形网格区域内。图 12 为 EALB 和 LEPS 两种算法下跳数为 4 的同层节点负载量标准差的对比图,可以看出,EALB 的负载均衡性要优于 LEPS。分析该实验结果不难得出原因:LEPS 在父节点选择机制中只考虑跳数最小和链路质量最好两个因素,而 EALB 在父节点选择机制中将父节点电量和父节点被选为最优父节点次数作为下一轮选择调度的考虑因素。

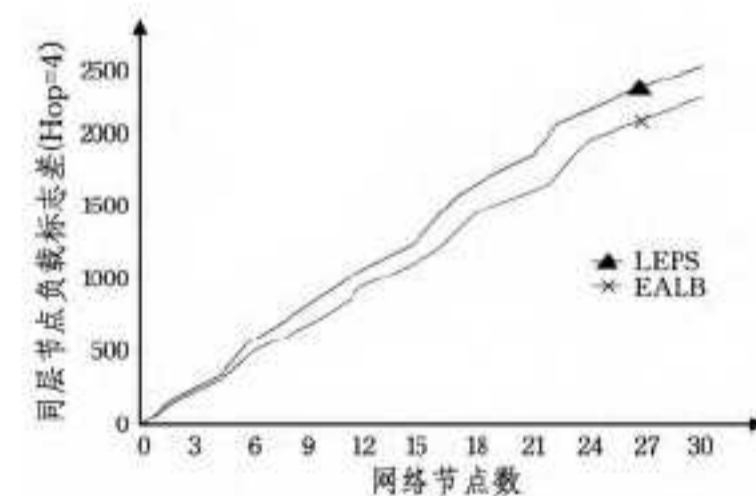


图 12 同层节点负载平衡度对比图

#### 3.2.5 网络生存期对比

本小节对 LEPS 和 EALB 两种算法下的网络节点生存期进行对比实验,选取 250 个节点分布在  $300\text{m} \times 300\text{m}$  的矩形网格区域内,在距离网格中心越近的地方布撒节点越多,最外层节点定期向汇聚节点发送传感数据包,分别在 LEPS 和 EALB 下让系统运行 20 个小时,并记录下随着系统运行网络中电量耗尽而死亡的节点数目。

如图 13 所示,LEPS 节点死亡速率明显快于 EALB。经过分析可以解释此种情况发生的原因,由于 LEPS 在短时间内只会选择跳数最小、链路质量最好的节点作为最优父节点,而 EALB 在多个父节点之间均衡调度使得节点之间能量消耗的速率达到平衡,避免出现部分节点迅速死亡的情况。

总体上看,EALB通过平衡节点之间的负载延缓了节点死亡的速率,有效地延长了网络生存期。

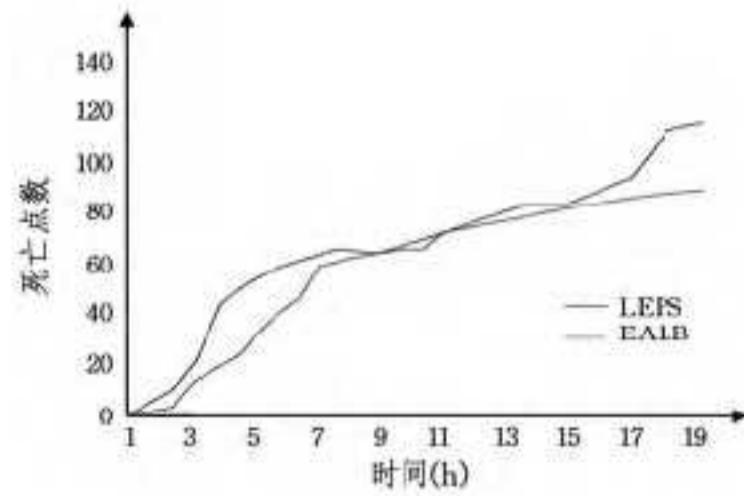


图 13 网络生存期对比图

**结束语** 本文从冗余数据包发送、数据收集速率和成功率、节点负载平衡度以及网络生存期 5 个性能指标入手,对 EALB、LEPS 进行对比和分析。实验数据显示,在拓扑建立阶段,EALB 减少了无效冗余广播包的发送,节省了节点能量;在路由选择维护阶段,EALB 比 LEPS 具有更高的数据收集速率和成功率,并且有效地平衡了同层节点之间的数据转发数量,保证了同层节点间的负载均衡。相对 LEPS 有了节能和负载均衡的优势,EALB 也自然降低了节点能量消耗的速率,有效地延长了网络生存期。

### 参考文献

[1] Gedik B, Liu Ling. Protecting Location Privacy with Personalized k-Anonymity: Architecture and Algorithms [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2008, 7(1): 1-18

[2] Gruteser M, Grunwald D. Anonymous usage of location based services through spatial and temporal cloaking [C] // ACM/USENIX MobiSys. 2003

[3] Culler D, Estrin D, Srivastava M. Overview of Sensor Networks [J]. IEEE Computer Society, 2004, 37(8): 41-49

[4] Tan H P, Lee W K G, Zhi A E. Impact of Power Control in Wireless Sensor Networks Powered by Ambient Energy Harvesting (WSN-HEAP) for Railroad Health Monitoring [C] // Advanced Information Networking and Applications Workshops. 2009

[5] Wei Cao, Ge Xu, Gao Yan-qing. Using Wireless Sensor Networking (WSN) to Manage Micro-Climate in Greenhouse [J]. Manufacturing Enterprise Solutions Association, 2008, 17(3): 6360641

[6] Matusik J, Scholtzova E, Tunega D. Influence of Synthesis Conditions on the Formation of a Icaolinite-Methand Complex and Simulations of ITS Uibrational Spectra [J]. Clays and Clay Minerals, 2012, 60(3): 227

[7] Campo Y, Llibre E, J F. WSNHM: Energy-efficient Wireless Sensor Network for home monitoring [C] // 2009 5th International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP). 2009

[8] Tang Ming, Wu Qian-hong, Zhang Guo-ping. A New Scheme of LBS Privacy Protection [C] // Proceedings of the 5th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. 2009: 1-6

(上接第 275 页)

明,算法收敛时间很短,算法性能接近于系统上限。本文算法能够适用于其他类型效用函数,也适用于信道总数与信道需求总量不同的场景中,且能够保证系统的总效用并兼顾个别用户的优先级,具有良好的实用性。但对于时效性要求较强,对总效用没有严苛要求的系统,收敛速度依旧不理想,对于此种场景的信道分配算法需要进一步的研究。

### 参考文献

[1] Roth A, Sotomayor M A O. Two-Sided Matching: A Study in Game-Theoretic Modeling and Analysis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992: 125-129

[2] Manlove D F. Algorithmics of Matching Under Preferences [M]. Singapore: World Scientific, 2013

[3] Irving R W, Leather P, Gusfield D. An efficient algorithm for the optimal stable marriage [J]. Journal of the ACM, 1987, 34(3): 532-543

[4] Jorswieck E A. Stable matchings for resource allocation in wireless networks [C] // Proc. of the 17th International Conference on Digital Signal Processing (DSP). Corfu, Greece, IEEE, 2011: 1-8

[5] Naparstek O, Leshem A, Jorswieck E A. Distributed medium access control for energy efficient transmission in cognitive radios [DB/OL]. (2014-06-01) [2015-11-15]. <http://arXiv preprint arXiv:1401.1671>

[6] Pantisano F, Bennis M, Saad W, et al. Matching with externalities for context-aware user-cell association in small cell networks [C] // Global Communications Conference (GLOBECOM). Atlanta, GA, Dec. 2013: 4483-4488

[7] Semiari O, Saad W, Valentin S, et al. Matching theory for priority-based cell association in the downlink of wireless small cell networks [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, 2014: 444-448

[8] El-Hajj A M, Dawy Z, Saad W. A stable matching game for joint uplink/downlink resource allocation in OFDMA wireless networks [C] // 2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2012: 5354-5359

[9] Semiari O, Saad W, Valentin S, et al. Matching theory for priority-based cell association in the downlink of wireless small cell networks [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). Florence, 2014: 444-448

[10] Yaffe Y, Leshem A, Zehavi E. Stable matching for channel access control in cognitive radio systems [C] // Cognitive Information Processing (CIP 2010). Elba, 2010: 470-475

[11] 李湘洋, 赵杭生, 曹龙. 混合共享认知无线网络信道分配算法 [J/OL]. 计算机工程与应用, (2015-11-09) [2015-12-09]. <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20151109.0905.008.html>

[12] Zhao Q, Sadler B. A survey of dynamic spectrum access [J]. IEEE Signal Processing Mag., 2007, 24(3): 79-89

[13] Roth A E, Sotomayor M. The college admissions problem revisited [J]. Econometrica, 1989, 57(3): 559-570

[14] Gale D, Shapley L. College admissions and the stability of marriage [J]. American Mathematical Monthly, 1962, 69(1): 9-15

[15] 柳毅, 佟明安. 匈牙利算法在多目标分配中的应用 [J]. 火力与指挥控制, 2002, 27(4): 34-37

[16] Papadimitriou C, Steiglitz K. Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity [M]. USA: Dover, 1998: 133-137