

基于负载均衡的 ZigBee 动态路由优化算法

张 晶, 邬春学, 陈凯明

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘 要: ZigBee 网络中的路由路径单一, 使得网络能量不能充分利用, 产生过早出现死亡节点、网络效率低, 甚至分割死亡的问题。为此, 提出一种均衡负载的 ZigBee 动态路由算法。通过发送定向 RREQ 分组减少网络风暴, 基于节点及其邻居节点能量、网络平均能量、路由路径能耗设定平衡代价, 采用多目标寻优选择最优路径, 以此构建网络动态路由, 实现网络负载的均衡。同时, 建立簇树保护机制延长网络寿命。仿真实验结果表明, 与经典 ZigBee 路由算法和改进算法相比, 该算法可降低死亡节点数和能耗, 延长网络生存时间。

关键词: ZigBee 协议; 负载均衡; 均衡代价; 多目标寻优; 动态路由

中文引用格式: 张 晶, 邬春学, 陈凯明. 基于负载均衡的 ZigBee 动态路由优化算法[J]. 计算机工程, 2016, 42(3): 138-142.

英文引用格式: Zhang Xiao, Wu Chunxue, Chen Kaiming. ZigBee Dynamic Routing Optimization Algorithm Based on Load Balance[J]. Computer Engineering, 2016, 42(3): 138-142.

ZigBee Dynamic Routing Optimization Algorithm Based on Load Balance

ZHANG Xiao, WU Chunxue, CHEN Kaiming

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

[Abstract] In ZigBee network, the routing path is single, causing the energy consumption is not uniform, and network energy cannot be effectively used. The ZigBee routing algorithm for load balance is proposed by sending directed RREQ packet, and the network storm is reduced. Based on the node and its neighbor nodes' energy, the average energy of the whole network, consumption of the routing path, and the balance cost are set. The optimal path is selected and network dynamic routing is constructed, balancing the network load. At the same time, a cluster tree protection mechanism is established to prolong the network lifetime. Through the simulation, optimization algorithm in node deaths, energy consumption are reduced, and survival time is increased, compared with classic ZigBee routing algorithm and improved algorithm.

[Key words] ZigBee protocol; load balance; balance cost; multi-objective optimization; dynamic routing

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.03.025

1 概述

ZigBee 无线传感器网络具有低成本、低功耗、自组网、高安全性的特点, 使得 ZigBee 网络在物联网领域有着广泛的应用^[1]。由于 ZigBee 具有的生活应用和发展空间, 因此成为很多专家的研究重点^[2]。

ZigBee 网络中的传感器采取电池供电, 而电池电量有限^[3], 因此 ZigBee 路由协议优化的关键是充分合理地利用网络中的能量, 使其发挥最大作用。

文献[4]提出基于节点剩余能量和转发能耗来确定通信代价最小节点转发数据, 用于平衡节点能耗, 但只是基于单个节点, 无法从网络整体来均衡能耗, 延长网络生存时间。文献[5]通过设定合理的分簇机制, 减少了路由请求(Routing Request, RREQ), 同时设置备用节点保护父亲节点。文献[6]提出基于节点一段时间的能量消耗率、链路质量、跳数构建权值然后选择路由, 但频繁的能量侦听就要损耗大量能量, 而且以上两者都未考虑节点剩余能量。如果存在剩余能量少但能量消耗速

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202376); 上海市教育基金会晨光计划基金资助项目(10CG49); 上海市教委科研创新基金资助项目(13YZ075)。

作者简介: 张 晶(1990-), 女, 硕士, 主研方向为网络架构; 邬春学, 教授、博士; 陈凯明, 硕士。

收稿日期: 2015-02-02 **修回日期:** 2015-04-14 **E-mail:** echolla@163.com

率低的节点, 该节点会过早死亡, 造成网络分割。文献[7]通过引入邻接表和节点剩余能量, 可以保护剩余能量较少的节点。文献[8]提出设置能量阈值来选择代理父节点。文献[9]将节点的剩余能量分为充足、不充足、能量即将耗尽, 然后确定 RREQ 报文发送方向, 可以减少网络风暴, 但以上三者对节点能量划分绝对化, 因为网络中的能量是动态不断减少的, 通过节点固定的初始能量设定阈值, 无法确定节点能量在整个网络中的水平, 也无法保证选取能耗相对较少的路径。

本文在总结前人研究成果时发现, 现阶段都是从各种角度来设置参数选择能耗最优或平衡网络能量的路由路径, 缺少能充分利用网络中能量的方法。因为, 只选择能耗最优路径, 该路径上会出现节点死亡, 网络被分割时, 其他路径上节点能量仍很充足的现象。同时, 现有学者在平衡网络能量时, 都提出节点剩余能量的概念, 但对其定义过于绝对化, 应依据网络实际情况确定其能量水平。因此, 本文提出基于负载均衡的动态路由优化算法。

2 ZigBee 所存在的问题

由文献[4]可知, 经典的 ZigBee 网络路由算法结合了 AODVjr 算法和 Cluster-Tree 算法, 但这 2 种算法都存在不足^[10]。

2.1 AODVjr 路由算法

AODVjr 算法是简化后的 AODV 算法, 相比 AODVjr 降低了网络能耗^[11], 但在发起路由请求时, 仍会盲目广播产生大量 RREQ 分组, 造成网络风暴, 浪费大量能量。同时, 所选取的路由路径^[12]过于单一固定, 无法依照网络情况动态变化, 不能充分利用网络资源, 易导致网络分割^[13]。

2.2 Cluster-Tree 路由算法

Cluster-Tree 路由算法应用在 ZigBee 网络中簇树节点间, 它根据簇树中父子节点关系, 严格按照节点地址进行路由选择, 路由方式过于简单, 簇树建立时, 单一的路由路径就被确定, 效率低, 易出现绕远路情况, 无法保证能耗最优^[14]。

3 改进算法的提出

本文算法对运行 AODVjr 的簇间 RREQ 广播风暴进行了定向限制, 对 AODVjr 和 Cluster-Tree 的路由算法分别进行改进, 以达到优化的目的。

3.1 路由算法思想

网络组建运行后, 收发数据任务的不同会导致网络中节点能量的不均匀, 常出现部分节点死亡, 网

络被分割。网络效率极低时, 仍有部分节点能量是充足的, 这些节点若能得到有效利用可以保护其他能量较少的节点, 延长网络寿命。

在图 1 中, 节点 A 给节点 B 发送数据, 广播后选择最短路径 3, 6, 11, 但长时间工作后, 路径上的节点 C 或者节点 D 能量消耗严重, 若节点 C 死亡会影响链路 3, 5, 6, D 死亡会影响链路 6, 10, 11, 将大幅降低网络质量, 能耗急剧上升。若在节点 C 能量相对其他节点较低时, 选择路径 1, 4, 8, 10, 11; 当节点 D 能量相对其他节点较少时, 选择路径 1, 3, 5, 9, 12; 当 C, D 能量都偏低时, 选择路径 1, 2, 7, 12。那么节点 C 和节点 D 就得到了保护, A 到 B 的数据传输压力就得到分担。等到其他节点能量相对较低, 节点 C, D 能量相对较高时, 让其重新参与工作。让单条路由路径的能耗压力合理地分摊给整个网络, 使网络中参与工作的节点, 是网络中能量相对充足的节点, 保护能量相对较少的节点, 网络的整体能量得到充分利用。并且, 节点的剩余能量水平应依据网络整体剩余能量水平动态变化, 确保路由路径选择的实时性、可靠性。

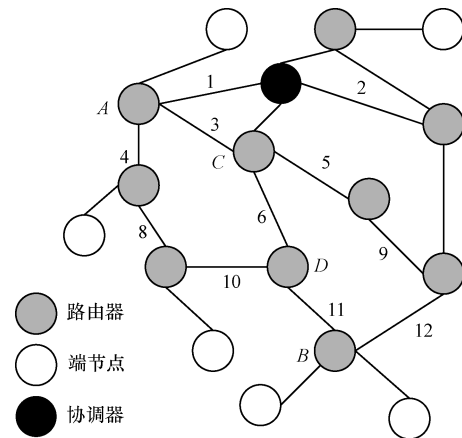


图 1 改进算法路由策略

同时, 因为协调器是室电供电的, 能量充足, 可以起到能量感知、网络整体能量评估的作用, 确定节点剩余能量水平的作用, 从而更好地管理整个网络。

跟据以上分析, 在 ZigBee 路由算法中, AODVjr 算法部分采用多路径寻优算法改进, Cluster-Tree 算法部分采用规避等待算法改进, 从而将改进思想融入整个 ZigBee 路由算法中。

3.2 AODVjr 多路径寻优路由算法

根据 2.1 节路由算法思想, 在运行 AODVjr 算法的簇间, 节点剩余能量和整个网络剩余能量比可以实时反映节点在整个网络中的能量水平, 同时节点的邻居节点是其转发数据的对象, 邻居节点能量水平也应作为能量平衡的考虑因素, 在节点的邻居

表中添加邻居节点能量条目。设 E_n 为节点的剩余能量, E_{nb} 为邻居节点平均能量, 网络中所有节点的平均剩余能量 E_{ave} 反映了网络的能量水平。对于路由路径中的单个节点能量平衡函数, 有:

$$f = \alpha \frac{E_n}{E_{ave}} + \beta \left(\frac{E_{nb}}{E_{ave}} \right)^2 \quad (1)$$

其中, α, β 是影响因子, 因节点剩余能量水平应优先考虑, 故有 $0 < \beta < \alpha$, 本文实验中取 α 为 10, β 为 5。取其倒数为平衡代价, 一条路径的平衡能量代价为:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i} \quad (2)$$

其中, f_1, f_2, \dots, f_n 分别为路径中第 1, 2, \dots, n 个节点的能量平衡函数值; $\frac{1}{f_i}$ 为其能量平衡代价; f 越小平衡代价越大。同时, 已有 E_1, E_2, \dots, E_n 分别为路径中第 1, 2, \dots, n 个节点的剩余能量, 取其倒数 $\frac{1}{E_i}$ 作为路径能耗代价, 能量越低代价越大, 对于路径中的能耗代价, 有:

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \quad (3)$$

同时, 设置节点的能量平衡比:

$$V = \frac{E_n}{E_{ave}} \quad (4)$$

节点能量安全平衡比 $V_{safe} = \varepsilon, 0 < \varepsilon < 0.3$ 。 V_{safe} 是节点能量相对整个网络的安全值, 当 $V < V_{safe}$ 时, 该节点能量相对整个网络处于较低水平, 应得到保护。其中, ε 在节点初始能量较多, 数据转发耗能较少时取小值, 否则取大值 (本文实验中取 $\varepsilon = 0.2$)。所选取的路由路径在满足路径中 $V < V_{safe}$ 节点数目最少前提下, 应满足下式:

$$\min \left(\mu \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i} + \lambda \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \right), \mu > \lambda > 0 \quad (5)$$

当节点初始能量较小、网络节点较少时, μ 相对 λ 差值取大; 否则, μ 相对 λ 差值取小, 本文实验中取 $\mu = 2, \lambda = 1$ 。因为 E_n, E_{nb}, E_{ave} 是随着网络运行动态变化的, 所以式 (1) ~ 式 (5) 也是依据网络实时情况动态变化的。

不同于其他研究者对于 AODV 算法舍弃跳数和目标序号, 或者根据深度直接设置能量区, 计算平均能量剩余, 关注于减少深度, 本文关注节点的剩余能量, 能实时反映出网络中路径的能耗代价与节点的能量平衡。现在对路由路径中节点能量平衡代价和能耗代价加权寻优, 取得代价最小的路由路径, 做到动态选取利用网络能量的最优路由路径, 保护能量相对较少的节点, 充分利用能量相对较多的节点。

3.3 广播风暴的限制

在协调器进行广播组网时, 按组网的先后顺序, 对节点依次分层, 设定层数为 L 。同时加入网络的节点, 为同一层。后入网的为子层, L 递增。先入网的为父层, L 递减。在邻居表中添加邻居 L 值和路由发现请求报文 RREQ 中标记发送 RREQ 分组节点 L 值, 根据 L 进行定向选择转发。算法具体流程如下:

(1) 当源节点发起路由请求时, 直接广播 RREQ 分组, 然后进入步骤 (2)。

(2) 当其他节点收到 RREQ 分组时, 若自己是目的节点, 发送 RREP 分组进行回复并且丢弃已收到的 RREQ, 建立路由; 否则, 转向步骤 (3)。

(3) 若 RREQ 分组中 L 和该节点 L 值相同, 表示发送节点来自同一层, 广播转发 RREQ 分组; 否则, 进入步骤 (4)。

(4) 若 RREQ 分组中 L 比该节点 L 值小, 直接转发 RREQ 分组给 L 相等和较大的节点; 否则, 进入步骤 (5)。

(5) 若 RREQ 分组中的 L 比该节点 L 值大, 直接转发 RREQ 分组给 L 相等和较小的节点; 否则进入步骤 (2)。

如图 2 限制广播风暴, 算法可以减少相当部分无用的 RREQ 分组。

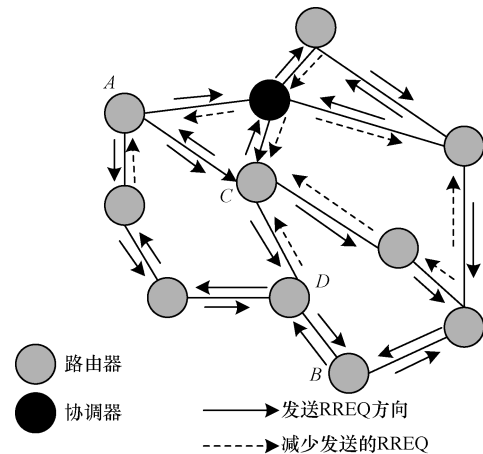


图 2 广播风暴的限制

在发起路由请求时, 源节点会广播把 RREQ 分组发给周围所有邻居节点, 邻居节点收到 RREQ 分组后会继续广播。若收到 RREQ 分组的节点再把请求发回给已收到过 RREQ 分组的节点, 会造成大量能量浪费。确定子层或父层来的 RREQ 分组的发送方向, 不发回给已收到 RREQ 分组的方向, 能减少发送 RREQ 分组的数量。在确定可能路由路径后, 根据 2.2 节中多路径寻优算法确定最优路由。

对于 AODVjr 动态多路径寻优路由算法的流程如图 3 所示。

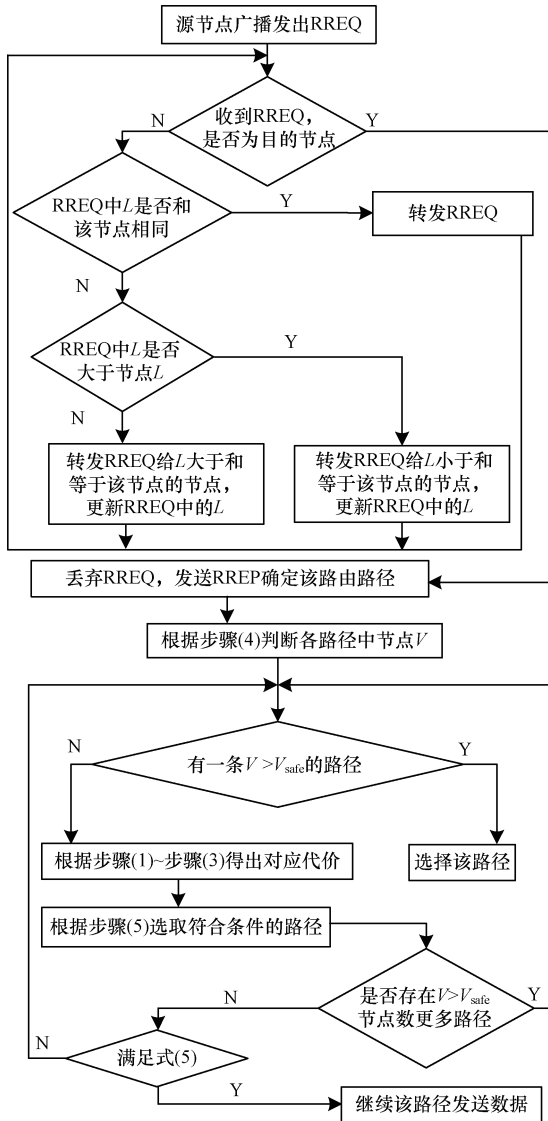


图 3 AODVjr 动态多路径寻优算法流程

3.4 Cluster-Tree 规避算法

在传统 ZigBee 网络树结构中,只通过父子关系和节点地址进行路由选择,建立路由路径单一。很多学者引入邻居表,当目的节点在自己邻居表中时,直接通过邻居表发送给该节点,避免绕路的情况。在此基础上,根据 2.1 节算法思想,如果邻居表中没有目的节点,同时要转发的下一跳节点 V_1 有 $V_1 < V_{safe}$ 时,说明该节点能量已处于相对较低水平,能量将很快耗尽,可能导致整个子树脱离网络,通过侦听获取下一条节点能量随时间消耗率 ρ ,设置规避时间 t :

$$t = \frac{E_n}{\rho} \quad (6)$$

按照这样的能耗速率, t 后节点能量将耗尽。节点等待 t 后,若下一条节点此时 $V_2 > V_1$,说明节点相对能量得到改善,建立到该节点路由。若 t 之后 $V_2 < V_1$,则转发给邻居表中节点,建立其他能量相对较高的路由路径。这样保护了簇树中即将死亡的节

点,簇树网络生存时间得到延长。簇树规避算法的流程如图 4 所示。

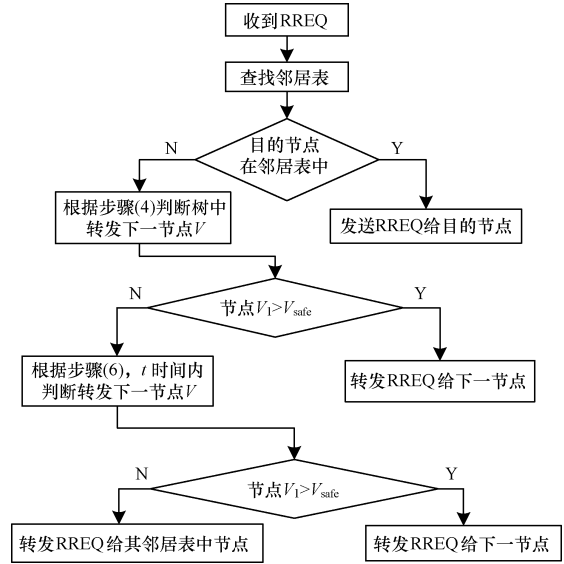


图 4 簇树规避算法流程

4 仿真与结果分析

为了有效评估本文路由算法性能,应用 NS2.33,分别对 ZigBee 经典路由算法、有代表意义的文献 [15] 中的改进算法、本文算法进行网络仿真比较。在网络覆盖面积为 $200\text{ m} \times 200\text{ m}$ 的仿真场景中,设定 100 个随机位置的固定节点,设置 50 个 CBR 数据信息源,数据包长度为 80 Byte,网络中簇树参数 $L_m = 3, C_m = R_m = 4$,所有的节点起始能量为 5 J,发送数据功率 0.6 W,节点接收数据功率 0.3 W,仿真时间 1 200 s,设置本文算法参数 $\varepsilon = 0.2, \alpha = 10, \beta = 5, \mu = 2, \lambda = 1$,参考文献改进算法设定其因子 $\alpha = 0.5, \beta = 0.25, \gamma = 0.1, \mu = 10, n = 2, K = 0.2$,网络运行完后,对各项数据提取分析得到以下结果 [15]。网络场景图如图 5 所示,其中,0 号节点是协调器节点。

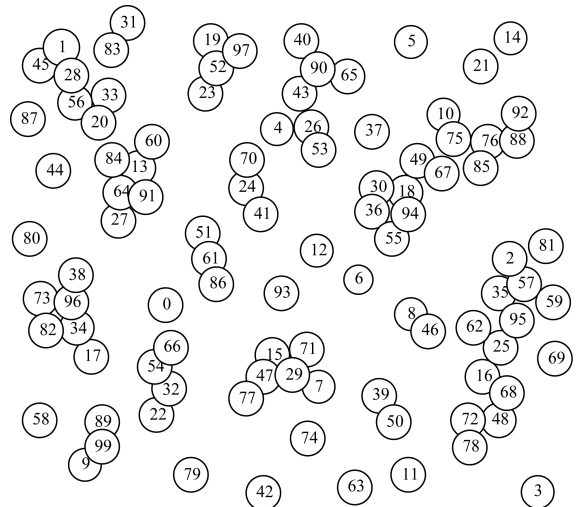


图 5 网络场景

如图6所示,可以看出,随着网络中数据传输,出现能量耗尽的死亡节点,改进算法和本文算法都优于经典算法。改进算法减少了RREQ,保护了能量偏低的节点,但选择最优路由路径单一,导致一些节点死亡。本文算法在减少RREQ的前提下,动态选择能量相对较高的节点,以分担能量相对较低节点的任务。负载均衡地分担给了整个网络,节点死亡时间得到推迟,网络生存时间得到延长。

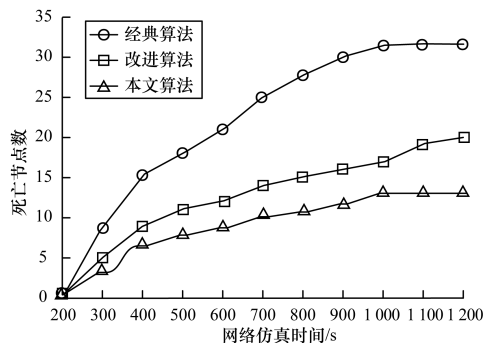


图6 死亡节点数目随仿真时间的变化

如图7所示,经典算法网络能耗在前400s快速增长,到后期网络死亡,趋于平稳。改进算法减少RREQ的泛洪,对路由路径进行选择,能耗趋于平缓。但从图6知,本文算法死亡节点数目最少,有更多节点保持工作,网络效率较高,总体能耗处于较理想状态。

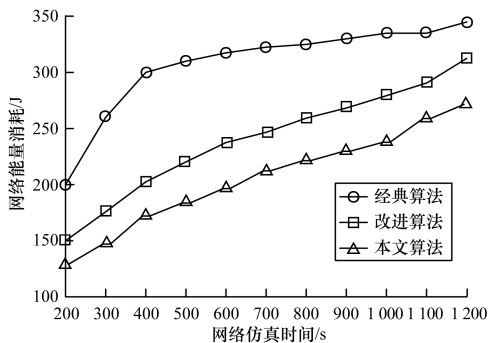


图7 网络能量消耗随仿真时间的变化

如图8所示,经典算法网络没有设置优化机制,前400s端到端时延较小,但随着网络运行,网络中死亡节点增多,时延大大超过其他2个算法。

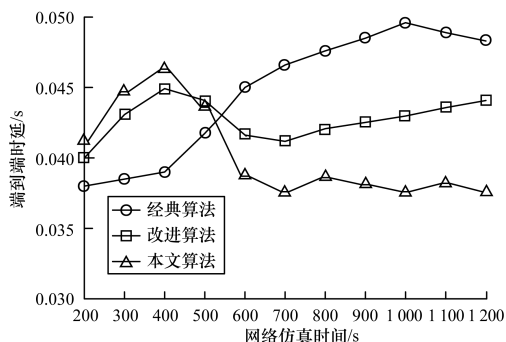


图8 网络时延随仿真时间的变化

本文算法的路由是根据网络中的能量动态调整的,前期略大,但均衡了负载,死亡节点数目及能耗最少,后期大部分时间和总的平均延迟最小。

5 结束语

目前 ZigBee 技术已广泛应用于物联网中。本文在对 ZigBee 路由及目前研究成果的基础上,提出负载均衡的动态路由算法,通过确定 RREQ 发送方向,并设定平衡代价,建立簇树保护机制,降低均衡能耗,延长网络寿命。虽然会产生一些额外的控制和管理开销,但整体上提升了网络效率,减少了消耗。下一步工作会在本文的基础上,减小算法时延,提升网络吞吐量并结合具体的硬件平台进行实现。

参考文献

- [1] Lee Jin-shyan, Su Yuwei, Shen Chung-chou. A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi [C]//Proceedings of International Conference on Information Networking. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2007: 46-50.
- [2] Medagliani P, Martalo M, Ferrari G. Clustered ZigBee Networks with Data Fusion: Characterization and Performance Analysis[J]. Ad Hoc Networks, 2011, 7(9): 1083-1103.
- [3] Tian Qianqian, Wang Jinhai. Analysis and Improvement of ZigBee Wireless Networks Route [J]. Advanced Materials Research, 2012, 468-471: 324-327.
- [4] 李新春, 杨洪, 李元诚. 基于通信代价的 ZigBee 网状网络路由选择算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(7): 2354-2357.
- [5] 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.
- [6] 蒋陪成, 陈鸣, 李兵. 一种优化 ZigBee 性能的综合加权路由算法[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(9): 2014-2017.
- [7] 班艳丽, 柴乔林, 王琛. 基于能量均衡的 ZigBee 网络路由算法[J]. 计算机应用, 2008, 28(11): 2791-2794.
- [8] 尚海芹. 一种基于能量平衡的 ZigBee 路由算法[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(8): 93-97.
- [9] 徐艳, 王茜, 武剑. ZigBee 路由协议优化仿真研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(6): 292-295.
- [10] Zahia B, Hafid H, Moufida M. Node Disjoint Multi-path Routing for ZigBee Cluster Tree Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of International Conference on Multimedia Computing and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011: 1-6.
- [11] 鲍凤卿. 基于 Ns2 的 ZigBee 网络节点接入的研究[J]. 信息技术, 2008, 11(5): 95-98.
- [12] 徐沛成, 胡国荣. 改进的 ZigBee 网络路由算法[J]. 计算机工程与设计, 2013, 34(9): 3019-3023.
- [13] Li X H, Hong S H, Fang K L. WSNHA GAHR: A Greedy and A Heuristic Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks in Home Automation[J]. IET Communications, 2011, 21(5): 1797-1805.
- [14] Bhatia A, Kaushik P. A Cluster Based Minimum Battery Cost AODV Routing Using Mutilate Route for ZigBee[C]//Proceedings of the 16th International Conference on Networks. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2008: 1-7.
- [15] 刘兆孟. ZigBee 无线传感网路由协议研究与设计[D]. 无锡: 江南大学, 2013.