

基于节点特性的 LR-WPAN 网络能量优化路由算法

钱志鸿, 张晓帆, 王义君, 关婷艳
(吉林大学 通信工程学院, 吉林 长春 130025)

摘 要: 针对 ZigBee 网络混合路由算法的不足, 考虑低速无线个域网(LR-WPAN)网络的能耗问题, 提出了一种基于 ZBR 路由协议的改进算法(F-ZBR)。本算法通过定义最小路由能量值和控制路由请求分组(RREQ)的传输方向、跳数以及在 RREQ 分组中加入能量标志位等措施, 降低网络的整体能耗。仿真结果表明, F-ZBR 算法的分组投递率、网络可用节点比率和网络剩余能量都较 ZBR 有明显提高, 从而可以延缓 ZigBee 网络中大量数据传输造成的 RN+节点能量过度损耗而导致的网络瘫痪等问题的发生, 延长网络生命周期。

关键词: LR-WPAN; ZigBee; 能量优化; RN+节点; AODVjr; RREQ 分组

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2010)10-0238-06

Node characteristics based LR-WPAN routing algorithm research for network energy optimization

QIAN Zhi-hong, ZHANG Xiao-fan, WANG Yi-jun, GUAN Ting-yan
(School of Communication Engineering, University of Jilin, Changchun 130025, China)

Abstract: An enhanced algorithm named F-ZBR was proposed considering the weakness of ZigBee hybrid routing algorithms and the energy consumption in LR-WPAN network. The proposed scheme reduced overall energy consumption of network by the definition of minimum routing energy and controlling the direction of RREQ packet as well as the number of hop, besides the introduction of energy flag in RREQ packet. The analysis on simulation result indicated that F-ZBR performs significantly better than ZBR in packet delivery ratio, available nodes ratio as well as remaining energy ratio. By the algorithm, therefore, it may be depleted that huge data transmission gives rise to over-consuming energy of RN+ nodes or even collapse in ZigBee network. And the algorithm also prolongs the life span of network.

Key words: LR-WPAN; ZigBee; energy optimization; RN+ node; AODVjr; RREQ packet

1 引言

低速无线个域网(LR-WPAN)技术在无线传感器领域飞速地发展着, 而作为 LR-WPAN 承载方式的 ZigBee^[1,2]技术成为了 21 世纪最受瞩目的技术发明之一。ZigBee 技术以其自身独特的低功耗、低速

率、低成本和高效率、高可靠性的特性将在工业、医疗、军事、智能家居等各个领域扮演着不可或缺的角色, 它的发展也吸引了越来越多人的关注。曾有研究者提出基于 ZigBee 规范构建大规模无线传感器网络的构想^[3]。未来若能实现该构想, 将使无线网络应用范围更加广阔。

收稿日期: 2010-06-28; 修回日期: 2010-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60940010); 教育部高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090061110043); 吉林省科技发展计划项目基础研究基金资助项目(20080524)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60940010); The Doctoral Fund of Ministry of Education of China (20090061110043); The Basic Research of Science and Technology Development Program of Jilin Province (20080524)

ZigBee 技术的发展带动了低速率、低功耗、低成本的无线技术的发展, 各项以 ZigBee 为基础的应用^[4, 5]也相应地发展起来。ZigBee 技术广泛应用的主要原因就是在于其自身低功耗的特点。但是, ZigBee 技术在路由协议方面却没有特殊建树, 而路由的选取对于传输信息的能量消耗有着直接的关联。因此, 很多研究者都将 ZigBee 技术的研究集中在其路由节能方面。RanPeng^[6]曾提出了基于数据服务和能量平衡的 ZigBee 协议网络层路由选择策略, 该方法可以有效地平衡网络中节点的能量, 避免有些节点过早耗尽能源, 但是该方法只是根据数据流的不同, 对 ZigBee 协议中路由发现域做了相关的参数设置, 并没有从路由本身来减少能量的损耗; Kwang Koog Lee, Seong Hoon Kim^[7]提出利用外循环和内循环的程序迭代法, 能够计算出目的节点的深度, 而源节点的深度是已知的, 可以计算出从源节点到目的节点的跳数和本次路由的沿树路径, 这样就减少了多余的路由消耗, 但是这种算法忽略了节点的邻居关系, 选择的路径可能不是最优的。Liudan, Qian Zhihong^[8]提出了基于节点异质性的 ZigBee 路由算法; Jae Yeol Ha, Hong Seong Park^[9]提出了基于分层的 ZigBee mesh 路由算法。

本文针对 ZigBee 网络低速率、低功耗、网络容量大等特点以及目前 ZigBee 网络协议所存在的问题, 优化改进 ZigBee 路由算法, 从而达到降低网络功耗、提高路由效率、提升网络性能的目的, 进而使 ZigBee 技术投入到更广泛的应用中。

2 问题的提出

ZigBee 协议网络层作为协议规范的核心部分, 主要运用 ZigBee 路由协议实现路由查找及节点间传送数据等功能, 而 ZigBee 路由协议是 ZigBee 规范中规定的与路由相关的功能和算法, 主要包括不同网络拓扑结构下 ZigBee 协议数据单元的路由方式、路由发现和路由维护等内容。因此网络层的参数配置和选择哪种路由算法进行数据传输对于整个 ZigBee 网络性能和能量配置有着至关重要的影响。虽然 ZigBee 规范中提出了 ZigBee 网络采用 Cluster-Tree^[10]与 AODVjr^[11]2 种路由方案, 但在规范中并没有说明如何配置相关参数来选择路由策略, 没有使两者平衡的设计方法。

经典的 ZigBee Routing (ZBR) 中提出将可以参与路由发现、消息转发的 ZigBee Router (ZR)

节点分成两类: RN+节点和 RN-节点。其中 RN+节点是可以启动 AODVjr 路由算法广播路由请求分组 (RREQ) 进行路由发现寻找最佳路由路径的节点, RN-节点则只能采用 Cluster-Tree 算法, 判断本节点与目的节点之间的父子关系, 来决定将收到的数据分组发给父节点还是自己的某个子节点, 即看目的节点地址是否满足式(1)。

$$A < D < A + Cskip(d-1) \quad (1)$$

其中, A 为本节点地址, D 为目的节点地址, $Cskip(d-1)$ 为地址偏移量。

但是, AODVjr 路由算法和 Cluster-Tree 算法都存在各自的缺点。AODVjr 路由算法虽然能够找到最短路径, 但是在路由发现过程中它是以广播的形式发送 RREQ 分组, 那么在传输时一定会产生很多冗余的 RREQ 分组。这些 RREQ 分组虽然也参与路由发现过程, 但是它们不但对于最终找到一条最优的路径起不到什么作用, 而且节点在转发这些分组时, 还要消耗掉很多能量。而 Cluster-Tree 算法建立的路由不一定是最优的, 会导致分组传输时延较高, 并且在 ZBR 中没有考虑到, RN+节点传输数据不受节点父子关系的制约直接将数据传给邻居节点, 而目的节点又会在收到众多的 RREQ 中选择一条路径最短的作为传输路径, 那么在这条最短路径上 RN+节点会占很大的比例, 这样, 网络传输数据消耗的大部分能量就都来自于 RN+节点, 就会使 RN+节点因为进行大量数据传输而导致能量消耗过快, 以至于能量过低成为失效节点。然而中间节点的失效, 就会导致 ZigBee 网络出现部分甚至是整个网络都瘫痪的问题。因此, 解决 RN+节点的节能问题是节省网络能量消耗和延长网络寿命的关键。

针对以上问题, 本文提出了改进算法 F-ZBR 算法, 来弥补 ZBR 中的不足之处。

3 F-ZBR 算法

3.1 冗余 RREQ 分组的处理

AODVjr 路由算法在路由发现过程中可能会产生 2 类冗余的 RREQ 分组。一类是收到 RREQ 的 RN+节点继续广播 RREQ, 但其在其他路径上源节点和目的节点之间已经建立了最短路由路径, 这样该 RN+节点广播的 RREQ 就毫无意义, 还造成网络冗余浪费资源。另一类冗余 RREQ 是因为节点间存在父子关系而产生的。由于 AODVjr 算法用广播的方式进行路由发现, 该方式直接向所有的邻居节

点广播 RREQ，而不考虑节点的父子关系，那么当目的节点是本节点的子节点时，本节点向父节点广播的 RREQ 对本次传输没有贡献，是冗余的 RREQ 分组；例如，图 1 中若目的节点是节点 9，当 RN+节点 7 收到 RREQ 后，若将 RREQ 广播给其父节点 0，则这样的操作对本次传输没有贡献，就会产生冗余的 RREQ 分组；相反地，当目的节点不是本节点的子节点时，本节点向子节点广播的 RREQ 对本次传输没有贡献，也是冗余的 RREQ 分组。即若目的节点是节点 1 或者节点 4 时，当 RN+节点 7 收到 RREQ 后，若将 RREQ 广播给其子节点 8，则这样的操作也对本次传输没有贡献，也会产生冗余的 RREQ 分组。而且当网络规模很大的时候，这种资源的浪费会非常显著。因此，解决该问题势必会节省很大一部分能量。

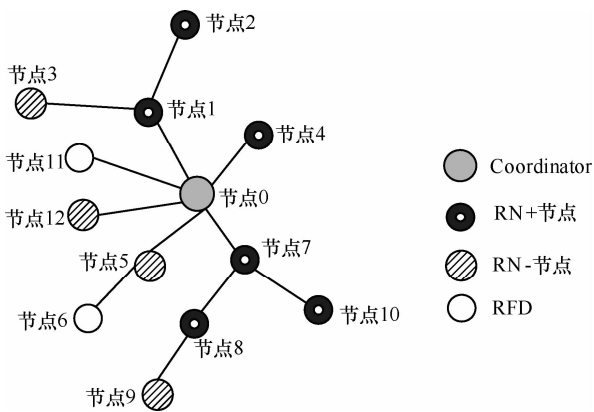


图 1 ZigBee 网络示意图

F-ZBR 算法通过设定允许的最大传输跳数 H_M ，来限制部分第一类冗余。可以根据网络的规模和深度人为地规定 H_M 的值，在网络建立之后该 H_M 应为一个定值。但由于不可能事先知道每次传输的最短路径所需的跳数，因此不可能完全地避免第一类冗余的产生。对于第二类冗余，F-ZBR 算法让准备广播 RREQ 分组的 RN+节点先利用式(1)判断一下目的节点和本节点的关系，若目的节点是本节点的子节点，即目的节点地址 D 满足式(1)，则在广播地址中将本节点的父节点和邻居节点地址屏蔽，只将 RREQ 发送给子节点。若目的节点地址 D 不满足式(1)，则表明目的节点不是本节点的子节点，则在广播地址中将本节点的子节点地址屏蔽，只将 RREQ 发送给父节点和邻居节点。

3.2 最小路由能量

ZigBee 节点与众多无线传感器节点一样，具

有体积小，成本低，便于移动和利用电池供电等特点，而且 ZigBee 节点经常会被应用在比较恶劣的环境中。正是因为这些特点和应用环境的约束，使得不得不将 ZigBee 网络节点的节能问题列为 ZigBee 传感器网络设计优先考虑的问题之内。而 ZigBee 节点的能量消耗一半以上是用于网络路由，如果能在 ZigBee 路由协议中加入专门的节能机制，能够显著地节省节点地能量损耗，延长 ZigBee 整体网络的寿命。而在无线传感网络中，由于网络规模比较大，节点比较多，绝大多数节点都处在即使自己不需要通信，也要频繁的参与到帮助其他节点转发数据分组和控制分组中，而大量消耗自己的能量的情况。

RN+节点可以启动 AODVjr 路由算法进行路由发现，帮助数据分组的传输找到一条最短路径。正是由于 RN+节点有这样的功能，它们就扮演了整个网络路由的主干路线的角色，也就是说多数的数据都要通过 RN+节点路由，这样就会导致 RN+节点的利用率过高，RN+节点就可能会因为大量的转发数据而过早地将能量耗尽，致使整个网络面临瘫痪的危险情况。因此，监控 RN+节点的能耗问题是十分必要的，于是定义了 RN+节点的最小路由能量 E_{MR} 来达到控制能量过低的 RN+节点能耗的目的。当 RN+节点能量低于 E_{MR} 时，RN+节点将退化采用比 AODVjr 能耗小的 Cluster-Tree 算法的 RN-节点。这样，可以有效地降低能量较低 RN+节点的能耗。

各个网络的应用对节点能量的要求各不相同，因此对于 E_{MR} 的定义应该与节点的初始能量 E_i 有关，还要加入适当的控制系数，便于人为地对网络进行控制，并且由于距离中心协调器 (ZigBee coordinator) 越近的 RN+节点通常需要转发的数据量就越大，即树结构中深度越小的 RN+节点参与数据转发就越多，能量消耗也就越大，所以 RN+节点的能耗控制应该与当前节点的深度 (depth) 的幂次成反比。基于以上考虑，定义 E_{MR} 为

$$E_{MRi} = E_i \frac{\lambda}{(Depth_i)^\alpha} \tag{2}$$

其中， λ 为控制系数，可以根据需要人为地控制 E_{MR} 的值，使其不会太大也不会过小。 $Depth_i$ 表示当前 RN+节点 i 的深度， α 是 $Depth_i$ 的幂次数，一般取值在 2 到 4 之间。

在网络建立之初, 对于网络性能的规划就应该是很明确的, 因此, 当网络建立之后, 每个 RN+ 的 E_1 值和 E_{MR} 值就已经确定了, 为一常量。

3.3 能量标志位

对于能量较低的 RN+ 节点, 仅对于它的路由方式进行调整是不够的, 这些 RN+ 节点退化为只采用低能耗的 Cluster-Tree 算法的 RN- 节点还是要参加到消息转发和路由发现的过程当中。因此, 为了使这些 RN+ 节点, 不要因为经常转发数据能量消耗过快而成为废节点, 应该尽量让路由路径避开这些能量较低的 RN+ 节点。

基于以上考虑, 本文提出的 F-ZBR 算法对于路由请求分组 (RREQ) 进行改进, 增加了一个能量标志位 rq_energy_flag 。该标志位为 1 时表示本路由链路已经有 RN+ 节点因为能量不足退化为 RN- 节点, 那么就应该尽量避开这样的路由路径, 选择其他没有能量问题的路径。当 rq_energy_flag 值为 0 时表示该链路没有节点能量过低, 应该列为优先选择的路径。目的节点在收到 RREQ 分组后, 首先查看该 RREQ 分组的能量标志位的值, 若为 0, 则立即沿该 RREQ 的反向路径发送路由应答分组 (RREP), 完成数据传输。若能量标志位的值为 1 则等待其他 RREQ 分组。一般来说, 从源节点到目的节点不只一条链路, 目的节点可以等待其他的 RREQ 分组, 只要收到新的 RREQ 分组的能量标志位的值为 0, 就立即沿其反向路径响应 RREP 分组。若等待一段时间还未收到能量标志位为 0 的 RREQ 分组, 则对跳数最少的 RREQ 分组路径响应 RREP 分组, 该等待时间可以根据网络系统的特征设定, 最多不超过 H_M 跳传输所用的时间。

3.4 F-ZBR 路由算法执行原理

步骤 1 RN+ 节点在收到 RREQ 分组时, 首先检查 RREQ 中的跳数 H_C , 若跳数大于规定的值 H_M , 说明该 RREQ 是冗余的请求分组, 则丢弃该 RREQ 分组。若跳数不大于 H_M 则查找自己的路由表, 看看自己是否有到达目的节点的有效路由。若有则直接将该 RREQ 发送到路由表中到目的节点的下一跳节点; 若无则执行步骤 2。

步骤 2 检查自身剩余能量 E_R 是否大于所定义的最小路由能量 E_{MR} , 若大于该值, 则启用 AODVjr 路由算法进行路由发现, 广播 RREQ 分组。在广播 RREQ 之前, 首先用式(1)判断目的节点和本节点的关系, 若满足式(1), 则只向子节点发送 RREQ 分组;

否则, 屏蔽子节点, 只向父节点和其他邻居节点广播 RREQ 分组。若 E_R 小于 E_{MR} , 则查看 RREQ 分组里能量标志位 rq_energy_flag , 若能量标志位 rq_energy_flag 为 0, 则将其更新为 1; 若该值为 1 则不必更新。然后执行步骤 3。

步骤 3 启用 Cluster-tree 路由, 用式(1)判断目的节点和本节点的关系, 若是子节点之一, 则将 RREQ 发给目的节点所在的那个分支的子节点; 若不满足, 则将该 RREQ 发送到父节点。

步骤 4 目的节点在收到 RREQ 分组后, 首先查看该 RREQ 分组的能量标志位 rq_energy_flag 的值, 若为 0, 则立即沿该 RREQ 的反向路径发送 RREP 分组, 完成数据传输。若为 1, 则等待其他的 RREQ 分组, 只要收到的新的 RREQ 分组能量标志位的值为 0, 就立即响应 RREP 分组。若等待时间超过网络设定的时间后, 还未收到能量标志位为 0 的 RREQ 分组, 则对跳数最少的 RREQ 分组的路径响应 RREP 分组。

4 仿真分析

4.1 仿真环境

为了研究本文提出的 F-ZBR 算法对网络性能的影响, 本文利用 NS2 里 IEEE 802.15.4 的 PHY 层和 MAC 层, 实现了网络层路由协议的仿真。并从以下 3 个方面对 F-ZBR 算法和 ZBR 进行仿真比较: 分组投递率、网络可用节点比率和网络剩余能量百分比。所有数据都是在对网络运行仿真 20 次求得的平均值。仿真采用的仿真环境如表 1 所示, 本次仿真中 2 个参数分别取值为 $\lambda=0.5$, $\alpha=3$ 。

表 1 仿真参数

网络范围	通信半径/m	节点初始能量/J	数据流类型, 大小/byte	数据流个数	仿真时间/s
120m×120m	15	30	CBR,70	8	800

4.2 仿真分析

1) 分组投递率

分组投递率是 ZigBee 网络中目的节点收到的来自 CBR 数据源发送的数据分组数占 CBR 源发送总数据分组的比例。图 2 是对于分组投递率的仿真结果, 当网络只有 50 个节点时 F-ZBR 算法和 ZBR 的投递率都很大, 但是随着网络节点的增多, 传输数据时, 数据分组发生碰撞的几率也明显增加, 因

此投递率有所下降，但是，由于 F-ZBR 算法中减少了对部分冗余 RREQ 分组的传输，也就减少了有效数据传输的碰撞，因此分组的投递率也相应地要好于 ZBR。

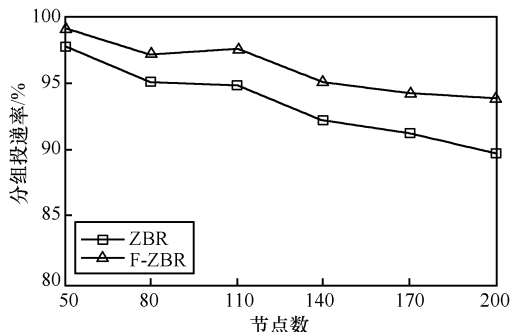


图 2 分组投递率

2) 网络可用节点比率

在仿真结束后，对各个节点的剩余能量进行检测，若节点的剩余能量不足初始能量的 5%，则认为该节点已死亡，是不可用的节点。那么，网络中可用节点的比率 η 通过式(3)来计算。

$$\eta = \frac{N_A}{N_I} \times 100\% \quad (3)$$

其中， N_A 是仿真结束后剩余能量高于 5% 的节点数， N_I 表示初始的节点数仿真中分别取 50、80、110、140、170、200。仿真结果如图 3 所示，从图中可以看出，在节点比较少的时候 2 种算法都有一部分节点因能量不足而成为不可用节点，但是由于 F-ZBR 算法会尽量避免能量低的节点，因此可用的节点的比率比 ZBR 要高，随着节点数的增加，由于数据流大小没有改变，相同的数据由于传递的路径多了，每个节点相对传输的数据量少了，所以在仿真结束时，很多节点还是能量充足，可用节点所占的比率也就会有所提高，而且当节点

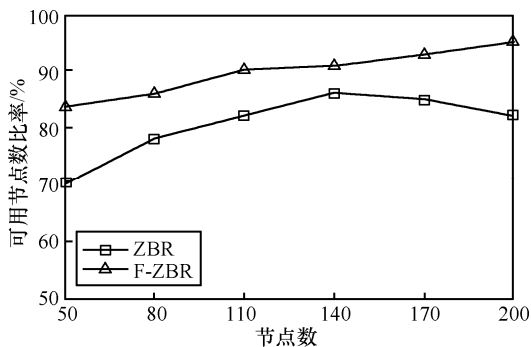


图 3 网络中可用节点数比率

数为 140 左右时可用节点数比率最大。但是随着网络节点数继续增加，由于网络比较复杂，数据传输路径也会比节点数少时要长，网络开销增大，所以 ZBR 中的可用节点数比率开始下降。但是，由于节点数增多，F-ZBR 算法可选的路径也相应地增多了，就更容易避开能量低的节点进行数据传输，减少了节点的死亡几率，因此，在 F-ZBR 算法中，可用节点数的比率会随着节点数的增加而提高。

3) 网络剩余能量百分比

图 4 是对于仿真后网络的剩余能量占初始能量的百分比示意图，图中显示出无论节点数是多少，F-ZBR 算法的网络剩余能量都要比 ZBR 的网络剩余能量大，因为 F-ZBR 算法节省了传输部分网络冗余的 RREQ 分组所需的能量。但是在节点数比较多，网络规模比较大的时候，由于 F-ZBR 算法中的目的节点在回应 RREP 分组时会尽量选择避开能量低的节点的路径，这样选择的路径就不是最短路径，那么在传输数据时就会比选择最短路径多用一部分开销。因此，在节点数从 140 增加到 200 时，网络的剩余能量的百分比会随着节点数增加而降低。

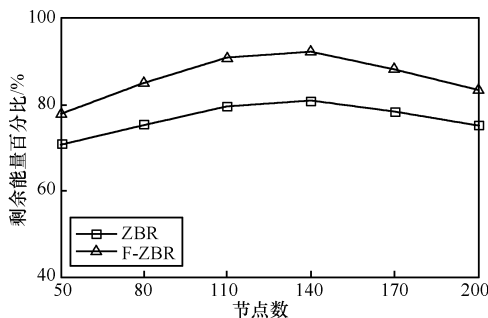


图 4 网络剩余能量百分比

5 结束语

本文提出的 F-ZBR 算法通过控制路由请求分组的走向和设置路由跳数，降低了路由发现中 RN+ 节点路由不必要的 RREQ 分组几率，减少了部分能量损耗；最小路由能量的定义使那些传输大量数据的 RN+ 节点能够保留一些剩余能量，不至于过早耗尽能量成为失效节点而导致网络瘫痪；以及在路由分组中加入能量标志位，帮助目的节点为传输数据选择一条能量充足的路径发送 RREP 分组，尽量避免那些能量较低的 RN+ 节点，使它们尽可能少地消耗能量。F-ZBR 算法有效地降低了 ZigBee 网络由于节点能耗过大而导致网络瘫痪的危险，这样就使

ZigBee 网络的寿命得到了延长,它可以在恶劣的环境中工作更长的时间,发挥更好的功效。

参考文献:

- [1] The ZigBee alliance[EB/OL]. <http://www.zigbee.org>.
- [2] ZigBee Document 053474r06-2004, ZigBee Specification Version 1.0[EB/OL]. <http://www.ZigBee.org>, 2004.
- [3] 成小良,邓志东.基于 ZigBee 规范构建大规模无线传感器网络[J].通信学报,2008,29(11):158-164.
CHENG X L, DENG Z D. Construction of large-scale wireless sensor network using ZigBee specification[J]. Journal on Communications, 2008, 29(11):158-164.
- [4] LEE H J, LEE S H, HA K S. Ubiquitous healthcare service using ZigBee and mobile phone for elderly patients[J]. International Journal of Medical Informatics, 2009, 78(3): 193-198.
- [5] KHUSVINDER G, YANG S H, YAO F. A ZigBee-based home automation system[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2009, 55(2):422-430.
- [6] RAN P, SUN M H, ZOU Y M. ZigBee routing selection strategy based on data services and energy-balanced ZigBee routing[A]. Proceedings of the 2006 IEEE Asia-Pacific Conference on Services Computing[C]. Guangzhou, China, 2006.400-404.
- [7] LEE K K, KIM S H, PARK H S. An effective broadcast strategy for route discovery in the ZigBee network[A]. International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)[C]. Gangwon-Do, South Korea, 2008. 1187-1191.
- [8] LIU D, QIAN Z H. Study on ZigBee routing based on nodal heterogeneity[A]. International conference on communication softwre and networks(ICCSN'09)[C]. Macau, China, 2009.607-609.
- [9] HA J Y, PARK H S, CHOI S, *et al.* Enhanced hierarchical routing protocol for ZigBee mesh networks[J]. Submitted to IEEE Communications Letters, 2007,11(12): 1028-1030.
- [10] IEEE P802.15 Working Group. Cluster tree protocol(Ver.0.6)[EB/OL]. <http://www.ieee802.org/15/pub/2001/Mag01/01189rOP802-15-TG4-Cluster-Tree-Network.pdf>, 2001.

- [11] CHAKERES I, KLEIN B L, AODVjr. AODV simplified[A]. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review[C]. New York, USA, 2002.100-101.

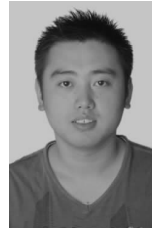
作者简介:



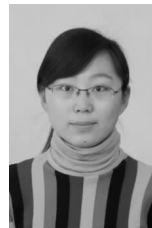
钱志鸿 (1957-), 男, 吉林长春人, 博士, 吉林大学教授、博士生导师, 主要研究方向为基于蓝牙、ZigBee、RFID 等短距离无线通信技术的无线个域网与无线传感器网络。



张晓帆 (1985-), 女, 吉林省吉林市人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为 ZigBee 技术、低速无线个域网网络层路由相关问题。



王义君 (1984-), 男, 内蒙古通辽人, 吉林大学博士生, 主要研究方向为无线传感器网络时间同步技术和网络协议。



关婷艳 (1985-), 女, 满族, 内蒙古赤峰人, 吉林大学硕士生, 主要研究方向为 ZigBee 技术、低速无线个域网 MAC 层及网络层的相关问题。