

基于跨层机制的 ZigBee 网络 PAN 间能耗均衡路由算法

曹建玲 刘文朋 任 智 樊海彬

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘 要 针对现有 ZigBee 网络多 PAN 路由算法在路由构建过程中通信开销、传输时延和能耗较大的问题,提出一种基于跨层机制的能耗均衡路由算法——ERBCD(Energy-balanced Routing algorithm Based on Cross-layer Design)。该算法采用梯度探测反馈方式构建网关至节点的下行多径路由;引入跨层机制更新邻居节点的剩余能量信息;设计包含跳数和节点剩余能量的合成路由度量标准以减轻节点负载,均衡网络节点能耗。理论分析证明了 ERBCD 算法的有效性。仿真结果表明与现有典型算法 IP-AODV 相比,ERBCD 算法大大降低了网络通信开销和数据分组平均能耗,并延长了网络生存期延。

关键词 ZigBee 网络,能耗均衡,跨层机制

中图分类号 TP393.04 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2014.08.032

Energy-balanced Routing Algorithm Based on Cross-layer Design for Inter-PAN Communications in ZigBee Networks

CAO Jian-ling LIU Wen-peng REN Zhi FAN Hai-bin

(Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and
Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract To reduce the redundant overhead and to conserve nodes' energy in energy-constrained and multi-PAN ZigBee networks, this paper proposed an Energy-balanced Routing algorithm Based on Cross-layer Design (ERBCD). The proposed algorithm establishes the multi-path downstream routing by feedback mechanism based on gradient detection, disperses the information of nodes' residual energy with little overhead by introducing cross-layer design, designs a composite routing criterion containing gradient and nodes' residual energy to decrease the node overhead and balance the energy consumption. Theoretical analysis verifies the effectiveness of ERBCD. Simulation results show that ERBCD can significantly reduce communication overhead and the average energy consumption of a data packet. Meanwhile this algorithm dramatically prolongs the network lifetime, as compared to the existing IP-AODV routing algorithm.

Keywords ZigBee networks, Energy-balanced, Cross-layer design

1 引言

ZigBee 是一种针对个人局域网(PAN)的短距离无线通信技术。ZigBee 联盟整合了 IEEE 802.15.4 标准定义的物理层(PHY)和媒体接入控制子层(MAC),并在此基础上定义了网络层、应用层和安全服务,构成了 ZigBee 标准协议^[1]。它主要致力于为低速率的无线网络控制和应用提供一种可靠的、高效的、低能耗的技术标准。大规模无线传感器网络节点个数可达到 10^4 或 10^5 量级,对使用的协议栈本身要求具有低复杂性、分布式计算能力、可扩展性、动态自适应资源调度机制^[2]。ZigBee 协议栈具有简单可靠、节省计算开销、保证安全的通信能力,并支持网络规模扩展,非常适合无线传感器网络的应用。

在实际应用中,经常采用一区多 PAN 的组网策略来部

署大规模无线传感器网络用以感知数据^[3]。各 PAN 以某种机制进行交互,依赖 PAN 间相互协作以获得强大的数据处理能力,有利于提高监测精确度。然而,ZigBee 网络设计之初,并未涉及 PAN 间通信机制,导致路由信息的获取、通信开销、传输时延等环节仍存在不足之处。因此亟需研究和设计一种新的路由机制来应对多 PAN 的网络环境,以保证通信需求。

目前,物联网技术发展迅猛,大规模传感器网络应用进入实例化,而 PAN 间路由算法的设计和研究还处于理论阶段。Chung Hee Lee 等人提出了一种基于功率控制的路由算法^[4],该算法用网关节点的发射功率作为支撑的邻居网关节点及协调器节点的发现机制,并基于对获取的邻居信息的存储、管理和维护来构建协调器→网关→协调器的先验式路径策略。但该算法存在绕路现象,增加了传输时延和节点能耗。

到稿日期:2013-10-09 返修日期:2013-12-28 本文受国家自然科学基金(60972068),重庆市自然科学基金(cstc2012jjA40040),应急通信重庆市重点实验室开放课题(201201),重庆市科委重点实验室专项经费(D2011-24)资助。

曹建玲(1974—),女,讲师,主要研究方向为无线传感器网络路由协议,E-mail:caojl@cqupt.edu.cn;刘文朋(1988—),男,硕士生,主要研究方向为太赫兹超高速无线网络 MAC 协议;任 智(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为宽带无线移动通信网络及网络优化。

Jihyuk Heo 等人提出的 IP-AODV 路由算法,本质上是一种基于按需的距离矢量路由算法^[5]。该算法在数据分组传送时,采用泛洪路由请求分组的策略执行路由发现任务,利用网关的邻居发现机制协助参与转发过程以构建 PAN 间通信路径。该算法能够实现较高的分组传送成功率,但无限制的泛洪方式消耗了巨大的网络带宽,降低了网络吞吐量。钱志鸿等人提出了基于节点特性的 ZigBee 网络能量优化路由算法,该算法并未考虑 PAN 间通信情况^[6]。文献[7]提出了一种 PAN 间路由算法 IPHR,但是该算法并未考虑能量因素。

为了能够设计一种路由算法以满足大规模网络通信业务的需求,本文提出一种基于跨层机制的高效能耗均衡路由算法——ERBCD。该算法通过网关梯度消息的定向扩散,在节点增加冗余路由信息,为上行链路提供替换策略,避免关键节点被过度使用。同时采用了梯度探测反馈方式,为网关构建至节点的下行多径路由,从机制上避免了广播寻路产生能耗多、时延大的现象。该算法使用跨层设计机制,利用 MAC 层 ACK 帧的能量捎带方式,实时掌握处于数据传输链路中邻居节点的剩余能量信息,调整数据发送时路由判决机制,搜索转发节点集并优先选择剩余能量高的节点作为下一跳转发节点,减轻节点负载,均衡网络节点能耗。

本文第 2 节给出数学模型并描述问题;第 3 节详述提出的跨层节能路由算法并对算法性能进行分析;第 4 节对仿真结果进行了分析;最后为结束语。

2 模型和问题描述

2.1 网络模型

ZigBee 网络是由多个 PAN 相互重叠组成,用图 $G=(V, E)$ 表示含有 n 个 PAN 的 ZigBee 网络。其中 $G=\{G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_n\}$, G_n 表示第 n 个 PAN;节点集合 $V=\{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1t}\} \cup \{v_{21}, v_{22}, \dots, v_{2m}\} \cup \dots \cup \{v_{n1}, v_{n2}, \dots, v_{nk}\}$, $t, m, k > 1$ 为网络节点数, v_{nk} 表示第 n 个 PAN 中第 k 个节点;链路集合 $E=\{e_{11}, e_{12}, \dots, e_{1t}\} \cup \{e_{21}, e_{22}, \dots, e_{2j}\} \cup \dots \cup \{e_{n1}, e_{n2}, \dots, e_{np}\}$, e_{nk} 表示第 n 个 PAN 中第 k 条链路, $1 \leq p \leq k(k-1)$ 。

用 $\{e_{np}\}$, $1 \leq p \leq k(k-1)$ 表示第 n 个 PAN 内任意节点到网关节点的 1 条链路。 n 个 PAN 的 ZigBee 网络路由的数学模型为:在 ZigBee 网络中,寻找至少 1 个在逻辑上有序相连的链路组合 $\{e_{ki}\} \cup \{e_{mj}\} \cup \dots \cup \{e_{np}\}$,使得该链路组合的首尾节点分别是数据分组的源和目的节点。

2.2 能量模型

本文采用文献[9]中的能量消耗模型。根据该模型发送 k bit 数据所消耗的能量 E_{Tx} 和接收 k bit 数据消耗的能量 E_{Rx} 分别由式(1)和式(2)计算^[8,9]:

$$\begin{cases} E_{Tx}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{amp}kd^2, & d < d_0 \\ E_{Tx}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{fs}kd^4, & d \geq d_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec}k \quad (2)$$

其中, E_{elec} 为发送和接收单位比特信息的损耗常量, d_0 表示采用自由空间模型与多路径衰减模型的阈值。若传输距离小于阈值 d_0 , 功率放大损耗采用自由空间模型;当传输距离大于等于阈值 d_0 时采用多路径衰减模型。 ϵ_{amp} 和 ϵ_{fs} 分别为这两种模型中发送放大器每发送单位比特信息所需的能量; d 为两节点间通信距离。式(1)与式(2)中所用到的参数具体数值参见表 1^[9]。

表 1 能耗模型参数值

参数	取值
ϵ_{amp}	10pJ/bit/m ²
ϵ_{fs}	0.0013pJ/bit/m ⁴
E_{elec}	50nJ/bit
d_0	87m

2.3 问题描述

无线传感器网络是一个资源有限的网络,特别是网络中节点的能量资源受到很大限制。传输一个比特所消耗的能量远大于运算一个比特所消耗的能量^[10,11]。因此,为了提高节点能量的使用效率,延长无线传感器网络的生存时间,在设计 PAN 间路由算法时,需要充分考虑网络中节点的剩余能量以及数据传输的能耗。所设计的 PAN 间路由算法需要具备以下特点:最大化网络生命期,减小不必要的能量开销;均衡转发节点能量,避免其过早死亡。现有 PAN 间路由算法存在如下一些问题:

(1)现有的 PAN 间路由算法在“节点→网关”的上行路由和“网关→节点”的下行路由,均采用泛洪路由请求消息的方式构建通信链路,控制分组的传输消耗了大量节点能量,影响网络生存期。

(2)邻居节点的剩余能量信息更新不及时,易造成处于多条链路的关键节点被过度利用,现有算法并未提供路由替换策略来避免这些节点能量过早耗尽。

3 ERBCD 算法

本文提出的基于跨层机制的高效能耗均衡路由算法 ERBCD 包含路由创建和数据分组传输两部分;路由创建又由上、下行路由创建两部分组成。

3.1 ERBCD 算法执行过程

3.1.1 上行路由生成阶段

网关以 Flooding 方式在 PAN 内广播梯度扩散分组 (Gradient)。梯度扩散分组中包含梯度层次、前一跳地址、剩余能量、PAN 标识符等。网络内节点收到梯度扩散分组后根据其中的信息获得自己到网关的梯度并建立上行路由。具体步骤如下:

(1)初始化时,网关的梯度层次为 0,节点 i 的梯度层次 $L_i = \infty$ 。

(2)节点 i 维护梯度层次 L_i 和到网关的转发节点集 $S = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$, $k < N$, N 为网络节点数量。节点 D_k 的梯度层次为 L_k , 其中 $L_i - L_k = 1$ 。节点 i 收到来自其它节点 j 的梯度扩散消息,将自身梯度层次 L_i 与 L_j 相比较:

①如果 $L_i > L_j + 1$,清空转发节点集 S 并将节点 j 写入其中,设置梯度层次 $L_i = L_j + 1$ 。更新梯度扩散消息中梯度、剩余能量、前一跳地址等域值为 i 的信息,继续向外广播。

②如果 $L_i = L_j + 1$,仅将节点 j 添加到节点 i 的转发节点集 S 中。

③如果 $L_i < L_j + 1$,丢弃梯度扩散消息,不作任何处理。

3.1.2 下行路由生成阶段

下行路由创建过程中,利用梯度反馈 (Gradient Feedback) 分组,采用梯度探测反馈方式,为网关构建至节点的下行多径路由,具体步骤如下:

(1)梯度层次建立后,梯度层次最大的叶子节点 i 构建梯度反馈消息并组播给转发节点集 $S = \{D_1, D_2, \dots, D_k\}$ 中的 k

个节点。该消息中含有 i 的网络地址、剩余能量。梯度反馈消息的结构如表 2 所列。

表 2 梯度反馈消息格式

剩余能量	跳数 h	地址 d_1	地址 d_2		地址 d_m
------	--------	----------	----------	-------	----------

初始时,跳数 h 设置为 0,地址 d_1 设置为当前节点 i 的地址,地址 d_k 设置为 $-1, 1 < k \leq m$ 。

(2) 节点 j 保存到节点 i 的下行路由转发节点集 $T_i = \{X_1, X_2, \dots, X_k\}$, 其中, $i, j < N$, N 为网络节点数量。节点 j 收到梯度反馈消息后,提取出消息中地址集合 $H = \{d_1, d_2, \dots, d_m, 1 < m \leq h\}$, 构建以 d_i 为目的节点的路由表项,把 d_h 添加到转发节点集 T_i 中。将自身地址写入消息的 d_{h+1} 域中,跳数 h 域值加 1,该消息组播给转发节点集 S ,其它节点重复该操作步骤直至到达网关,之后不再转发该反馈消息。

3.1.3 数据传送阶段

数据分组传输阶段的上、下行路由使用跳数和剩余能量作为标准:在跳数优先的情况下,选择剩余能量大的节点作为下一跳节点,具体步骤如下:

(1) 节点 i 遍历转发节点集 S ,选择能量最大的节点 D_j 作为下一跳转发节点。节点 D_j 收到数据分组后,将当前节点的剩余能量值写入 MAC 层的 ACK 帧中,利用确认回复机制捎带给节点 i 。

(2) 节点 i 收到 ACK 帧后,提取出节点 D_j 的剩余能量值并采用跨层方式告知网络层。节点 i 搜索转发节点集 S ,更新节点 D_j 的剩余能量。

(3) 网关收到数据分组后,遍历指向目的节点的转发节点集 T ,选择能量最大的节点作为下一跳转发节点,下一跳节点剩余能量的获取方式与步骤(2)相同。如此,直至数据分组到达目的节点。

3.2 能量信息的获取、发布和更新

节点剩余能量信息的获取、发布和更新机制是通过使用跨层报告功能和 ACK 帧携带信息的方式来实现的,节约了节点能量和网络带宽。具体如下:

传感器节点在 MAC 层计算当前节点的剩余能量值。IEEE802.15.4 标准中 MAC 层采用了 ACK 确认反馈机制,即节点 MAC 层收到单播数据时,需立刻反馈 ACK 帧告知源节点该数据帧处于成功接收状态^[12]。我们引入 ACK 帧捎带机制,即在 ACK 帧中加入包含当前节点剩余能量的字段。源节点收到 ACK 帧后,提取出剩余能量信息并通过跨层方式告知网络层,更新该节点能量信息。这种方式在不增加额外开销的前提下,保证了实时获取邻居转发节点的剩余能量值,避免关键节点因被过度使用而导致能量耗尽的现象,从而达到均衡网络节点能耗的目的。

3.3 合成跳数机制均衡节点能耗

在数据分组转发阶段,本文提出了一种基于能量和跳数值的路径度量机制——合成跳数 H ,定义如下:合成跳数 $H = \text{转发节点梯度 } L + \text{转发节点的剩余能量 } E_r / \text{节点的初始能量 } E_{init}$,其中, $0 \leq \frac{E_r}{E_{init}} \leq 1$,故 $L \leq H \leq L+1$ 。合成跳数表明在跳数相同的条件下,考虑节点的剩余能量作为衡量标准。节点初始能量相同,剩余能量越大,合成跳数 H 就越大。节点遍历转发节点集选择合成跳数 H 最大的节点作为下一跳转发

节点,可均衡节点负载和能耗,延长网络生存期。

3.4 性能分析

在相同拓扑情况下源节点 i 与目的节点 j 传输一个数据分组时,ERBCD 和 IP-AODV 两种算法在整个网络中能量消耗包括两部分:控制分组能耗 E_{EC} 、 E_{IC} 和数据分组能耗 E_{ED} 、 E_{ID} 。设网络中每个 PAN 所含的节点个数为 N ,并且均匀分布在半径为 R 的圆形区域。网络节点消耗的能量包括接收信号的能量、传输信号的能量。设节点通信半径 $r < d_0$,因此能量损耗遵循自由空间模型。ERBCD 算法消耗的能量为 E_E ,IP-AODV 算法消耗的能量为 E_I ,数据分组长度为 k_D bits。节点 i, j 的梯度层次分别为 L_i 和 L_j ,相邻两个节点之间的平均距离为 d ,则两种算法传输数据分组所消耗的能量分别如下:

$$E_{ED} = (L_i + L_j)(k_D E_{elec} + \epsilon_{amp} k_D d^2)$$

$$E_{ID} = (L_s + L_d)(k_D E_{elec} + \epsilon_{amp} k_D d^2)$$

其中, L_s, L_d 分别表示由 IP-AODV 算法建立的源节点至网关以及网关至目的节点的跳数值。由于两种算法建立的都是最短路径,因此可以得出 $L_i = L_s, L_j = L_d$,进而 $E_{ED} = E_{ID}$ 。这表明两种算法在数据分组转发过程中消耗的能量相同,二者能量消耗的主要差别表现在控制分组的转发能耗。

在 IP-AODV 算法中,设网络所有节点仅接收一次 RREQ 消息,为建立路由控制分组所消耗的能量 E_{IC} 为:

$$E_{IC} = 2N(k_Q E_{elec} + \epsilon_{amp} k_Q d^2) +$$

$$(L_s + L_d)(k_P E_{elec} + \epsilon_{amp} k_P d^2)$$

其中, k_Q 与 k_P 分别为 RREQ、RREP 控制分组的大小。而 ERBCD 算法仅在网络初始时执行梯度定向扩散以及探测反馈机制,以构建“节点→网关”的上行链路和“网关→节点”的下行链路。设在梯度定向扩散过程中,网络所有节点仅接收一次梯度消息,则控制分组的能量消耗 E_{EC} 为:

$$E_{EC} = 2N(k_G E_{elec} + \epsilon_{amp} k_G d^2) + 2N(k_F E_{elec} + \epsilon_{amp} k_F d^2)$$

其中, k_G 与 k_F 分别为梯度扩散分组和探测反馈分组的大小。网络中所有节点进行一次数据传输时两种算法控制分组所消耗的能量分别为 $2NE_{IC}$ 和 E_{EC} 。因为 k_Q, k_P, k_G, k_F 大小相差不大,所以容易得出 $2NE_{IC} > E_{EC}$,即 ERBCD 算法消耗的能量远小于 IP-AODV 算法。

4 算法仿真及结果分析

4.1 统计量定义

(1) 通信开销

通信开销定义为网络中全部控制分组和数据分组转发的比特数总和除以成功接收数据分组的比特数,主要反映路由协议的效率。

(2) 节点能耗均方差

节点能耗均方差定义为节点能耗与其数学期望的差值的平方的期望。计算公式为:

$$u_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i$$

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_i - u_i)^2}$$

其中, C_i 代表节点 i 的能耗, N 代表网络节点数量, u_i 代表节点 i 能耗的数学期望, σ_c 代表节点能耗均方差。

(3) 平均端到端时延

数据分组的平均端到端时延定义为网络中所有数据分组从源节点产生至到达目的节点所消耗的时间除以成功接收数据分组的个数。计算公式为：

$$\bar{T} = \frac{\sum_{i \in V} T_i}{\sum_{i \in V} D_i}$$

其中, T_i 为第 i 个到达目的节点的数据分组时延, D_i 代表已经到达目的节点的数据分组个数。

(4) 网络生存期

网络生存期为网络中死亡节点数量达到节点总数的 20% 的时刻减去网络开始运行的时刻。

(5) 成功接收单位分组能耗

成功接收单位分组能耗 $E_{average}$ 定义为网络所有节点能量消耗总和除以成功接收数据分组的数量, 计算公式为:

$$E_{average} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{ci}}{\sum_{i=1}^N R_i}$$

其中, N 为网络节点数, E_{ci} 为节点 i 消耗的能量, R_i 为节点 i 成功接收数据分组的数量。

4.2 仿真环境

本文采用 OPNET14.5 仿真软件, 网络场景为一个 400m × 400m 的矩形区域, 协调器处于每个 PAN 的中央, 其它节点随机均匀分布在每个 PAN 内部。网络中的节点均处于静止状态, 节点的 MAC 层和物理层采用 IEEE 802.15.4 标准, 我们采用自由空间传播模型。仿真中使用的参数如表 3 所列。

表 3 仿真参数

参数	数值
节点数目	40, 80, 120, 160, 200
节点通信范围(m)	30
数据分组长度(byte)	80
仿真时间(s)	1500
初始能量 E_{init} (J)	1

4.3 仿真结果分析

为了验证 ERBCD 算法的性能, 本文通过仿真建模实现了 ERBCD 和 IP-AODV 算法, 设计出了完整的仿真代码, 并对它们的性能进行了定量比较和分析, 实验结果均是经过多次仿真所取的平均值, 仿真数据验证了 ERBCD 算法的有效性。

(1) 通信开销

从图 1 可以看出, 与 IP-AODV 算法相比, ERBCD 算法能够减少通信开销 48.14% ($N=40$) ~ 74.27% ($N=200$)。通信开销减小的主要原因是 ERBCD 算法引入了两种机制: ① 采用了梯度扩散来构建节点至网关的上行路由, 利用已构建的梯度路由来传输数据分组, 避免了使用泛洪请求控制消息来执行寻路操作; ② 引入探测反馈机制构建网关到 PAN 内节点的下行路由, 直接利用已构建的下行路由传输数据分组。这两种策略都有效避免了采用泛洪操作的方式来执行路由建立任务, 可以显著减少开销。如图 1 所示, 随着网络规模的增大, 两种算法的通信开销均有所增加, IP-AODV 算法变化显著, 主要原因是参与泛洪转发任务的节点增加, 产生了较大的通信开销。相比之下, ERBCD 算法则变化缓慢, 仅需广播一次构建先验式路由就可以维护通信路径。

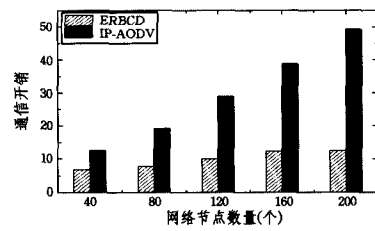


图 1 通信开销

(2) 节点能耗均方差

从图 2 可以看出, 在不同节点数量的网络场景中, ERBCD 算法的节点能耗均方差均明显小于 IP-AODV 算法, 表明 ERBCD 算法具有更好的能耗均衡效果。主要原因是: ERBCD 算法引入跨层机制和构建冗余路由的策略。在网关梯度扩散和探测反馈过程中, 节点构建多径冗余路由。在数据分组发送过程中, 选择能量最大的节点作为下一跳转发节点, 避免剩余能量较低的节点被过度使用。

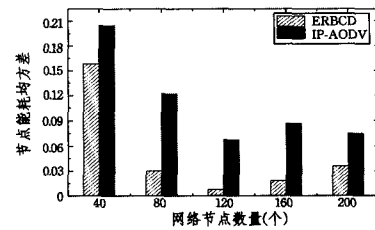


图 2 节点能耗均方差

(3) 平均端到端时延

从图 3 可以看出, 在不同网络环境中, ERBCD 算法的分组平均时延均明显低于 IP-AODV 算法。主要原因是: IP-AODV 算法的时延主要来自路由发现过程中的等待时延, 以及网络节点参与泛洪 RREQ 分组的任务竞争信道而产生的退避时延; 而 ERBCD 算法在网络初始化阶段已经维护了“节点→网关”的上行链路信息以及“网关→节点”的下行链路信息, 这样就减小了转发分组的等待时延和因碰撞而产生的退避时延。

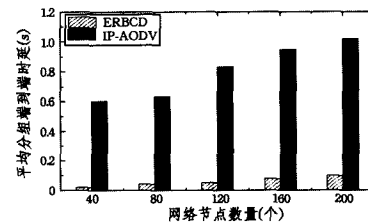


图 3 平均端到端时延

(4) 网络生存时间

从图 4 可以看出, 在每个网络场景中, ERBCD 算法的网络生存期均明显高于 IP-AODV 算法, 网络节点数量为 200 时二者相差最大, ERBCD 算法网络生存期为 528.48s, 而 IP-AODV 算法仅为 97.02s。主要原因是: ERBCD 算法引入了网关至节点先验式下行多径链路和 ACK 能量捎带反馈机制。通过这两种方式, 减轻了网络节点参与转发 RREQ 分组的任务, 减少了控制分组消耗的能量; 同时, 利用跨层机制使节点实时掌握链路中邻居节点剩余能量, 并根据剩余能量阈

(下转第 153 页)

gestion control in Ad Hoc network and simulation test[C]//International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence. Beijing; IEEE, 2009; 143-146

- [12] 陈铎龙, 孟相如, 梁霄, 等. 基于动态流量的多拓扑链路权值优化算法[J]. 计算机科学, 2013, 40(4): 86-90
- [13] Han S, Lee D. An adaptive Hello messaging scheme for neighbor discovery in on-demand MANET routing protocols[J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(5): 1040-1043
- [14] Gomez C, Cuevas A, Paradells J. AHR: a two-state adaptive mechanism for link connectivity maintenance in AODV[C]//International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking & Computing. New York; ACM, 2006; 98-100
- [15] Ingelrest F, Mitton N, Simplot D. A turnover based adaptive

HELLO protocol for mobile Ad Hoc and sensor networks[C]//International Symposium on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunications Systems. Istanbul; IEEE, 2007; 9-14

- [16] Razafindralambo P, Mitton N. Analysis of the impact of Hello protocol parameters over a wireless network self-organization[C]//International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems. New York; IEEE, 2007; 46-53
- [17] Suman S, Balkrishan. Enhanced AODV for wireless networks[C]//Advance Computing Conference. Patiala; IEEE, 2010; 246-249
- [18] 周建存, 郝夏斐. LTE 中基于协作 AODV 协议的拥塞控制机制研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(8): 122-125

(上接第 147 页)

值进行路由替换,一定程度上保护了节点能量,避免了关键节点能耗过大的现象,延长了网络生存期。

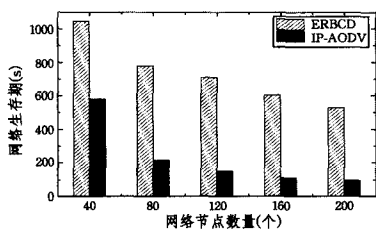


图4 网络生存时间

(5) 平均分组能耗

图5为平均分组能耗,在每个场景中,ERBCD算法平均分组能耗均低于IP-AODV算法,具有更高的能量效率。主要原因是:在ERBCD算法中,仅在网络初始时执行一次梯度扩散和梯度反馈任务,以构建“节点→网关”的上行路由和“网关→节点”的下行路由,节点充分利用先验式路径传输数据分组,无需执行建路操作,因而网络节点能耗主要集中于数据分组的传输;而IP-AODV算法中,节点能量除用于传输数据分组外,还主要消耗在路由建立阶段。随着网络节点数量增加,网络业务量增大,节点参与转发分组任务的比重加大,因此网络平均分组能耗增加,但ERBCD算法中平均分组能耗增长速度比IP-AODV要小很多。

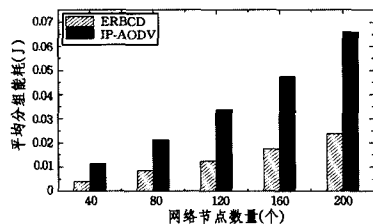


图5 平均分组能耗

结束语 关于 Zigbee 网络多 PAN 组网策略,已经有了一些研究,但现有适用于多 PAN 网络的 IP-AODV 路由算法忽略了能量因素,缺少应对网络节点业务负载不均衡所导致的关键节点能量过早耗尽的机制。本文提出的 ERBCD 算法,采用梯度定向扩散过程中节点维护冗余路由策略,并使用梯度反馈机制构建网关至 PAN 内节点的下行路由,同时采用跨层协作感知方式,利用 MAC 层的 ACK 能量捎带方式实

时获取邻居节点能量信息,降低并均衡网络能耗,延长了网络生存期。

参考文献

- [1] ZigBee Document 053474r06-2004, ZigBee Specification Version 1.0[EB/OL]. <http://www.ZigBee.org>, 2004
- [2] Wu C-H, Liu H-S, Lee Y-F, et al. A gateway-based inter-PAN binding mechanism for ZigBee sensor networks[C]//The 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). 2011; 3808-3813
- [3] 成小良, 邓志东. 基于 ZigBee 技术规范构建大规模无线传感器网络[J]. 通信学报, 2008, 29(11): 158-164
- [4] Lee C H. Inter ZigBee Personal Area Networks (PAN) Communication Mechanism; KR, 10-0587013-0000[P]. 2006
- [5] Heo J, Hong C S. The Optimum Path Selection Mechanism for Inter-PAN Communication Using ZigBee[C]//The 2008 IEEE International Conference on Information Networking (ICOIN 2008). Busan, Korea, 2008; 1-5
- [6] 钱志鸿, 张晓帆, 王义君, 等. 基于节点特性的 LR-WPAN 网络能量优化路由算法[J]. 通信学报, 2010, 31(10): 238-243
- [7] Ren Zhi, Fan Hai-bin, Cao Jian-ling. A Hybrid Routing Protocol for Inter-pan Communication in ZigBee Networks[C]//IEEE International Conference on Oxide Materials for Electronic Engineering (OMEE), 2012. IEEE, 2012; 363-366
- [8] 卿利, 朱清新, 王明文. 异构传感器网络的分布式能量有效成簇算法[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 481-489
- [9] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670
- [10] 赵彤, 郭田德, 杨文国. 无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法[J]. 软件学报, 2009, 20(11): 3023-3033
- [11] Ran P, Sun M-H, Zou Y-M. ZigBee Routing Selection Strategy Based on Data Services and Energy-balanced ZigBee Routing[C]//The 2006 IEEE Asia-Pacific Conference on Services Computing (APSCC'06). 2006; 400-404
- [12] IEEE 802.11 IEEE standard for information technology—telecommunications and information exchange between systems—local and metropolitan area networks specific requirements part 15.4[S]. 2003