

传感器网络基于邻居信息量化的能量平衡路由

陈衡¹, 钱德沛^{1,2}, 伍卫国¹, 王换招¹

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 北京航空航天大学
中德软件技术联合研究所, 100085, 北京)

摘要: 针对地理位置路由中数据包的平均传输能耗随时间推移急剧增加的问题, 设计并实现了一种基于两跳邻居信息量化的能量平衡路由协议(TNEB). 节点通过 Hello 报文获得两跳范围内的邻居节点信息, TNEB 根据两跳邻居信息确定一个贪婪转发候选节点集合. 依据邻居节点的数据流拥塞度和能量平衡度, 从候选节点集合中选择最佳的邻居节点完成数据包的转发. 测试结果表明, 在平均邻居节点数为 15 的网络拓扑上, TNEB 算法的平均能耗比 Greedy-2 和 GPSR 算法分别降低了 26.7% 和 48.8%, 端到端延迟分别减少了 19.9% 和 31.8%.

关键词: 传感器网络; 地理位置路由; 能量平衡

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)04-0001-06

Neighbors Quantification Based Energy Balance Routing in Wireless Sensor Networks

CHEN Heng¹, QIAN Depei^{1,2}, WU Weiguo¹, WANG Huanzhao¹

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Sino-German Joint Software Institute, Beihang University, Beijing 100085, China)

Abstract: To solve the problem that the average energy consumption of delivering a packet with geographic routing increases dramatically with spent time, a two-hop neighbors quantification based energy balance routing (TNEB) is proposed and implemented. Each node obtains the neighbor node information in two hops via Hello messages. In terms of the neighbor information, TNEB chooses a set of candidate nodes based greedy strategy. A packet is relayed to the node in the candidate set with best tradeoff between congestion degree of data flow and balanced degree of remained energy. Compared with Greedy-2 and GPSR in topology of 15 neighbor nodes, the average energy consumption in TNEB decreases by 26.7% and 48.8%. And the average end-to-end delay decreases by 19.9% and 31.8%.

Keywords: wireless sensor networks; geographic routing; energy balance

无线传感器网络(WSNs)是一种分布式自组织的无线网络, 广泛应用于军事领域、环境监测、灾害救援等方面^[1]. 传感器节点对其感知范围内的对象进行监测, 并将采集到的信息通过路由协议传输到基站或汇聚节点. 在通常情况下, 传感器节点仅携带不可再生的有限能量, 为了延长 WSNs 的寿命, 高

效节能的路由协议一直是无线传感器网络的研究热点^[2-9].

分簇路由协议^[3]依据节点的能量以及节点间的距离将 WSNs 划分为若干个簇, 簇中的节点通过簇头与汇聚节点进行通信. 考虑到 WSNs 中链路的共享特性, 研究人员提出了感知路由协议^[4]. 感知路由

协议通过预测链路的信干比、延迟、负载等参数对数据包的传输策略进行控制,并可根据网络性能对参数进行自适应调整.文献[9]对分簇路由协议的簇头选择策略进行了改进,引入了节点的剩余能量,实现了节点间的能量平衡,延长了网络寿命.随着定位技术的发展和运用,地理位置路由协议^[5]以其良好的可扩展性和对无线网络的适应性得到了广泛关注.地理位置路由的核心思想是仅利用节点间的局部拓扑信息,以贪婪转发的策略将数据发送到距离目的节点最近的邻居节点.当数据包抵达路由空洞时,可以采用泛洪、回退或者边缘恢复机制继续数据包的传输.相对于贪婪转发而言,任何恢复机制的开销都比较大.因此,Greedy-2 算法^[6]对传统的贪婪算法进行了改进,基于两跳邻居信息提前预知可能的路由空洞,尽可能地减少路由空洞发生的概率,最终降低数据包传输的平均能耗.

但是,由于 Greedy-2 算法采用的是贪婪转发策略,同一个数据流的数据包始终沿最短的路径传输,当网络中同时存在多个数据流时,这种路由策略会造成局部的链路拥塞.另外,当节点位于多个数据流的最短路径上时,其能量会被迅速耗尽,甚至会造成路由空洞数量的增加,最终使得数据包的平均传输能耗急剧增加,缩短了无线传感器网络的寿命.

鉴于 WSNs 的特性,为了降低数据包的平均传输能耗,最大可能地延长网络寿命,高效节能的路由协议需要综合考虑以下 4 个因素.

(1)基于贪婪转发策略.贪婪转发策略能够减少数据包在源节点和目的节点间的转发跳数,降低数据传输的总能耗.

(2)预测路由空洞.降低数据包在传输中到达路由空洞的概率,可以有效减少数据包的路由跳数.

(3)避开拥塞链路.位于拥塞区域的节点通常需多次重传才能完成数据包的传输,增加了数据包传输的平均能耗和延迟.

(4)平衡节点剩余能量.过度使用某个节点会导致其能量迅速耗尽,增加后续数据包的传输路径长度.

本文在已有研究的基础上,综合考虑影响高效节能路由协议的 4 个因素,提出了一种基于两跳邻居信息量化的能量平衡路由算法.

1 系统模型

1.1 网络模型

假设 m 个传感器节点随机、均匀地分布在一个

长度为 l 、宽度为 w 的矩形区域中,并且该传感器网络具有以下性质:

(1)传感器网络为高密度静态网络,即节点部署后不再移动;

(2)传感器节点可以依靠 GPS 或其他定位算法获知自身的物理位置,且仅在节点初始化阶段获取一次;

(3)节点携带有限的不可再生能量,并能够准确预测剩余能量,能量耗尽会造成节点故障或失效;

(4)允许有多个数据流在网络中进行传输,数据流的源节点和目的节点可以是网络中的任意一对节点;

(5)路由层的控制消息具有高优先级,并且不会因链路拥塞或缓冲区溢出而丢弃.

1.2 问题描述

传感器网络的任务是向基站报告被监测区域内发生的事件信息,考虑到节点仅携带有限的能量,为了降低数据包的传输能耗,传统的地理位置路由协议通常采用贪婪转发的策略进行数据包的传输.这种路由策略在网络中仅有一个数据流,且数据流的源节点和目的节点保持不变时是非常有效的,当网络中同时存在多个数据流时,这种路由策略反而不能充分发挥传感器网络的性能.

用图 1 所示的网络拓扑为例进行说明,节点 A、B、D 和 E 的初始能量为 20,节点 C 和 F 的初始能量为 10.假设发送一个数据包消耗的能量为 1,接收数据包不消耗能量,同时假设网络中存在两个数据流,分别是(A,E)和(B,D),并且各需要传输 10 个数据包.

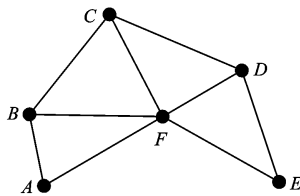


图 1 网络拓扑示意图

当采用贪婪转发策略时,两个目的节点都可以成功接收到相应的数据流信息.数据包的平均能耗与两个数据流所选择的传输路径密切相关,本文将可能的传输路径分为 3 种情况:最优、最差和正常.具体传输方式如下:

(1)最优的传输方式是节点 B 沿 BCD 路径传输,节点 A 沿 AFE 路径传输,则数据包的平均传输能耗为 2;

(2)最差的传输方式是节点 B 沿 BFD 路径传输,节点 A 沿 $ABCDE$ 路径传输,则数据包的平均传输能耗为 3;

(3)正常的传输方式是节点 A 和 B 的前 5 个数据包分别沿 AFE 和 BFD 路径传输,后 5 个数据包分别沿 $ABCDE$ 和 BCD 路径传输,则数据包的平均传输能耗为 2.5.

从上面的分析中可以得到一个结论:当数据流 (A,E) 先于数据流 (B,D) 出现时,数据包的平均传输能耗位于 2 和 2.5 之间;反之,位于 2.5 和 3 之间.

本文的设计目标是:无论数据流按照何种先后顺序出现,都应该使得平均传输能耗位于正常能耗和最优能耗之间,并尽可能接近最优能耗,从而可以向基站传送更多的数据包信息.为了实现这个目标,本文提出了一种基于两跳邻居信息的能量平衡路由算法(TNEB),假设节点可以获得其两跳邻居节点信息,在转发数据包时,除了考虑向目的节点的推进程度,同时还考虑邻居节点的其他信息,如剩余能量、近期转发的数据流、链路的拥塞程度等因素.

2 TNEB 算法设计

TNEB 算法的设计目标是降低数据包的平均传输能耗,最大化传感器网络向基站传输的数据包数量. TNEB 算法包含 4 个主要部分:①邻居信息量化;②基于邻居信息量化的转发策略;③数据流拥塞避免;④节点能耗平衡.

2.1 邻居信息量化

为了描述方便,首先给出一些必要的定义.对于任意节点 i , $N(i)$ 表示能直接与节点 i 进行通信的邻居节点的集合,节点 i 和 j 间的欧式距离用 $d(i,j)$ 表示,数据流的源节点和目的节点分别用 S 和 D 表示,用 R 表示节点的无线传输半径.

在地理位置路由中,节点间可以通过交换 Hello 报文获得邻居节点的特定信息(如节点的 ID、位置、状态等).当节点 i 接收到目的节点为 D 的数据包后,节点 i 计算每个邻居节点将数据包朝目的节点 D 的推进程度为

$$F(i,j,D) = d(i,D) - d(j,D), \quad j \in N(i) \tag{1}$$

并将具有最大正值的 $F(i,j,D)$ 的邻居节点 j 选为下一跳转发节点.

若不存在邻居节点 j 满足 $F(i,j,D) > 0$,则数据包在节点 i 遇到了路由空洞,此时可以通过任意一种恢复机制继续数据包的传输.但是,无论采用哪

一种恢复机制,数据包的传输能耗相对于贪婪转发而言都是相当巨大的.针对这个问题,文献[6]提出了基于两跳邻居节点位置信息的贪婪地理位置路由 Greedy-2 算法,要求每个节点掌握两跳范围内的邻居节点的信息,在选择下一跳转发节点时,可根据两跳邻居信息进行优化的路由选择,减少路由空洞发生的概率,降低了数据包的平均传输能耗.

在节点密度较大的传感器网络中, Greedy-2 算法的控制开销有明显的增加.这是由于 Greedy-2 算法为了让每个节点掌握两跳范围内的邻居节点信息,必须将单跳范围内的邻居节点信息也包含在 Hello 报文中,因此 Hello 报文的长度与传感器网络中的节点密度直接相关.由于节点间需要周期性地交换 Hello 报文, Greedy-2 算法的控制开销会随着节点密度的增加而增大.

为了解决这个问题,可以对 Hello 报文的内容和长度进行控制.在 Greedy-2 算法中,节点 i 的下一跳转发节点只能在 $N(i)$ 中进行选择,节点 i 的第二跳范围内的邻居节点只是起辅助作用.根据以上分析,可以对任意节点的 $N(\cdot)$ 进行预处理,并在 Hello 报文中仅携带 $N(\cdot)$ 的预处理结果,而不是 $N(\cdot)$ 中各个节点的具体信息.本文将这种预处理算法称作邻居信息量化,其基本思想是能够描述邻居节点的大致分布.主要步骤如下.

(1)将节点 i 的无线传输区域(以 i 为圆心、 R 为半径的圆)等分为 m 个扇区,第 k 个扇区的角度区间为 $\left[\frac{2\pi k}{m}, \frac{2\pi(k+1)}{m}\right)$,其中 $0 \leq k < m$.

(2)计算各个扇区中 $N(i)$ 的量化信息,用二元组(邻居节点数量,最大距离)表示,最大距离为

$$\Gamma_a(i,k) = \max d(i,j), \quad j \in \Theta(i,k) \tag{2}$$

式中: $\Theta(i,k)$ 是 $N(i)$ 的子集,表示位于第 k 个扇区中的邻居节点集合.

(3)用图 2 所示的结构表示邻居节点的量化信息.长度字段的值为 $\frac{(m+7)}{8}$,表示标志位字段需要占用的字节数量.标志位字段中的每一个比特对应一个邻居节点扇区的量化信息.当没有邻居节点落入某个扇区时,对应的标志位置为 0.仅当标志位为 1 时,对应扇区的量化信息需要按顺序包含在 Hello 报文中.

长度	标志位	量化信息1	量化信息2	...	量化信息 n
----	-----	-------	-------	-----	----------

图 2 Hello 报文中的量化信息结构

2.2 基于邻居信息量化的转发策略

当节点 i 接收到目的地址为 D 的数据包 p 时, 根据 TNEB 算法的转发策略从 $N(i)$ 中选择一个节点作为下一跳转发节点, 算法的转发策略如下.

(1) 节点 i 正是数据包 p 的目的地址, 数据包传输成功.

(2) 如果 $N(i)$ 中的节点 j 是数据包 p 的目的地址, 则节点 i 直接将数据包 p 转发给节点 j .

(3) 如果 D 位于节点 $j \in N(i)$ 的无线传输范围内, 则节点 i 直接将数据包 p 转发给节点 j . 如果 $N(i)$ 中有多个节点满足该条件, 则根据式 (1) 计算各个节点的 $F(i, j, D)$, 选择 $F(i, j, D)$ 值最大的节点 j 为转发节点.

(4) 若以上条件均不满足, 对 $N(i)$ 中的任意节点, 根据节点对应的邻居信息量化值计算该节点向 D 的可能推进程度为

$$F_m(i, j, D) = d(i, D) - \min \Gamma_t(j, k, D), \quad j \in N(i) \quad (3)$$

式中: $\Gamma_t(j, k, D)$ 表示节点 j 的第 k 个扇区中的节点与 D 的近似距离, 可由下式计算得到

$$\Gamma_t(j, k, D) = \left(\left(\Gamma_a(j, k) \sin \frac{2\pi k}{m} \right)^2 + \left(d(j, D) - \Gamma_a(j, k) \cos \frac{2\pi k}{m} \right)^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

(5) 构造候选转发节点集合 $\Phi_{CS}(i)$. 若 $\Phi_{CS}(i)$ 非空, 则从中选择具有最大 $F_m(i, j, D)$ 的节点 j 为转发节点. 否则, 数据包 p 在节点 i 的任意一个邻居节点处可能会遇到路由空洞, 为了降低不必要的能耗, 可以提前在节点 i 处使用边缘恢复机制. $\Phi_{CS}(i)$ 表达式为

$$\Phi_{CS}(i) = \{j \mid F_m(i, j, D) > F(i, j, D)\}, \quad j \in N(i) \quad (5)$$

与传统的贪婪转发策略相比, 节点在使用 TNEB 路由数据包时, 可以提前绕开路由空洞, 降低了数据包的平均传输能耗.

2.3 数据流拥塞避免

数据包使用贪婪策略转发后沿最短路径向目的节点推进. 在通常情况下, 一个数据流在一段时间内会持续地传输数据包, 若所有的数据包均沿最短路径传输, 则容易造成该路径上的拥塞, 增加数据包的传输时间. 当拥塞程度加大时, 数据包冲突的概率增大, 同时因缓冲区溢出而引起的丢包率也在上升. 若 MAC 层采用重传恢复机制, 数据包的平均传输能耗则会相应增加.

针对这个问题, 可以对贪婪转发策略进行调整, 引入一个贪婪度因子 g , 表明期望的最小推进程度, 其取值范围为 $0 \sim 1$ 之间的任意实数. 若 g 的取值过小, 则必然会增加路径长度, 即增加了数据包的传输能耗. 相反, g 的取值过大, 则候选节点的数量变少, 无法起到拥塞避免的效果. 本文希望候选节点的推进程度至少是最大推进程度的 80% , 所以贪婪度因子 g 的取值为 0.8 . 为了避免数据流拥塞, 可以基于 $\Phi_{CS}(i)$ 构造满足贪婪度因子的候选转发节点集合

$$\Phi_{GCS}(i) =$$

$$\{j \mid F_m(i, j, D) > g \max F_m\}, \quad j \in \Phi_{CS}(i) \quad (6)$$

式中: $\max F_m$ 表示节点 i 的 $\Phi_{CS}(i)$ 集合中最大的 $F_m(i, j, D)$. 若 $\Phi_{GCS}(i)$ 中的节点数量大于 1, 则可以选择数据流拥塞度最低的节点为下一跳转发节点.

考虑到传感器网络节点间无线链路的共享特性, 当节点周围的链路比较空闲时, 节点会获得更多的机会转发数据包, 反之会将数据包缓存在节点队列中. 将节点在 T_{cwin} 时间段内的拥塞度定义为

$$\Psi_{cwin}(i) = P_m(i) / P_{tr}(i) \quad (7)$$

式中: $P_{tr}(i)$ 表示节点 i 在 T_{cwin} 时间段内成功转发的数据包; $P_m(i)$ 表示节点 i 在 T_{cwin} 时间段内的平均队列长度.

$\Psi_{cwin}(i)$ 反映了最近 T_{cwin} 时间段内的节点拥塞程度, 而在数据包的传输过程中, 通常关心数据包抵达节点后(将来)的拥塞程度. 为了能够在一定程度上预测节点将来的拥塞程度, 采用指数加权移动平均法将节点的拥塞度定义为

$$\Psi_c(i) = (1 - \alpha) \Psi_c(i) + \alpha \Psi_{cwin}(i) \quad (8)$$

式中: α 为权重因子, 反映了节点拥塞度的实时变化程度, 经过实验分析, 当 T_{cwin} 时间段内的权重为 0.2 时, 预测值与实际值的均方差最小, 因此在本文中 α 的取值为 0.2 .

考虑到 TNEB 算法采用了基于两跳邻居的贪婪转发策略, 因此在计算节点的拥塞度时也应该考虑其邻居节点的拥塞度, 本文将其称为节点的数据流拥塞度 $\Psi_{dc}(i)$, 定义为

$$\Psi_{dc}(i) = (1 - \beta) \Psi_c(i) + \beta A(j), \quad j \in N(i) \quad (9)$$

式中: $A(j)$ 表示节点 i 的邻居节点的平均拥塞度; β 为邻居节点的权重因子.

为了获得邻居节点的数据流拥塞度, 可以将节点的 $\Psi_{dc}(i)$ 包含在 Hello 报文中, 因此本文中 T_{cwin} 的取值和 Hello 报文的交换周期一致.

2.4 节点能耗平衡

在第 1.2 节中提到,当网络中有多个数据流时,下一跳转发节点的选择在一定程度上影响网络的性能.究其原因,当节点同时位于多个数据流的贪婪转发路径时,节点的能耗会被迅速耗尽.如果该节点是其中一个数据流的唯一一个贪婪转发路径,那么该节点的失效将使这个数据流遇到路由空洞,最终导致该数据流的平均能耗急剧增加.

针对这个问题,在选择下一跳转发节点时,还需要进一步考虑节点的剩余能量和正在转发的数据流的数量.为了统计数据流的数量,需要识别各个数据包所属的数据流,本文使用数据包的源节点和目的节点对数据流进行区分.节点从接收的数据包中提取源节点和目的节点,若该数据流第一次经过该节点,则将其记录在节点的数据流表中,否则对数据流表中的相应记录进行更新.考虑到传感器节点有限的内存容量,节点仅保留最近 T_{dwin} 时间段内的数据流记录.节点数据流的数量为

$$\boldsymbol{\tau}_n(i) = (1 - \alpha)\boldsymbol{\tau}_n(i) + \alpha\boldsymbol{\tau}_{win}(i) \tag{10}$$

式中: $\boldsymbol{\tau}_{win}(i)$ 表示最近 T_{dwin} 时间段内数据流的数量.与节点的数据流拥塞度 $\Psi_{dc}(i)$ 一样, $\boldsymbol{\tau}_n(i)$ 也包含在 Hello 报文中,并有 $T_{dwin} = T_{cwin}$.

$\boldsymbol{\tau}_n(i)$ 反映了节点 i 在网络中对于数据包传输的重要性,为了预防重要性较大的节点失效造成数据包传输能耗的增加,需要为 $\boldsymbol{\tau}_n(i)$ 较大的节点预留较多的能量,本文将之称为节点的能耗平衡.

将节点 i 的能耗平衡度定义为

$$B_e(i) = E(i)/\boldsymbol{\tau}_n(i) \tag{11}$$

式中: $E(i)$ 表示节点 i 的剩余能量. $E(i)$ 越大表明节点 i 希望转发更多的数据流或数据包.在引入节点的能耗平衡度后,节点 i 基于贪婪转发策略选择下一跳转发节点时,可以对 $\Phi_{GCS}(i)$ 集合中的各个节点 j 分别计算其转发节点权重

$$W(j) = B_e(j)/\Psi_{dc}(j), \quad j \in \Phi_{GCS}(i) \tag{12}$$

并选择 $W(j)$ 最大的节点 j 为下一跳转发节点.从 $W(j)$ 的定义可以看出,节点 i 通常选择拥塞度较低、能耗平衡度较高的邻居节点 j 为下一跳转发节点.

利用图 1 对 TNEB 算法的性能进行原理上的分析.根据两个数据流出现的先后顺序,仍然分 3 种情况进行讨论.

(1)数据流 (B,D) 在数据流 (A,E) 之前出现.此时,数据流 (B,D) 有 2 个候选转发节点,分别是 C 和 F ,第 1 个数据包可以选择任意 1 个节点(假定为

F),但是当转发第 2 个数据包时,由于 $W(C) > W(F)$,所以第 2 个数据包选择 C 作为下一跳节点.以此类推,当数据流 (B,D) 的 10 个数据包转发完成后,节点 C 和 F 各转发了 5 个数据包.数据流 (A,E) 的前 5 个数据包通过 F 转发,后 5 个数据包通过 B 转发,平均能耗为 2.5,属于正常传输能耗.

(2)数据流 (A,E) 在数据流 (B,D) 之前传输.由于数据流 (A,E) 只有一条贪婪路径,所以 10 个数据包均由 F 转发,平均能耗为 2,属于最优传输能耗.

(3)两个数据流同时出现.数据流 (B,D) 最多只会有 1 个数据包选择 F 为下一跳节点,这样的话, $\tau_n(F)$ 值为 2,而 $\tau_n(C)$ 值为 1,因此数据流 (B,D) 的其余 9 个数据包将选择 C 为下一跳节点,而数据流 (A,E) 最多有 1 个数据包选择 B 为下一跳转发节点,平均能耗为 2.1,接近最优传输能耗.

从以上的分析可以得出结论:无论两个数据流出现的先后顺序如何,数据流的平均能耗均位于正常能耗和最优能耗之间,并且非常接近最优能耗,实现了 TNEB 算法之前设定的目标.

3 仿真实验

本文在 NS-2^[10](NS2.33 版本)上对 TNEB 算法进行了模拟验证,并与传统的贪婪路由 GPSR 算法^[5]和基于两跳邻居的 Greedy-2 算法^[6]进行了分析比较.评价指标为数据包平均路径跳数、平均能耗和端到端平均延迟.

实验中使用了如表 1 所示的 5 种网络拓扑,在每种拓扑上部署的传感器节点总数都是 200 个,MAC 层采用 802.11 协议,节点队列长度为 50 个数据包,数据包的传输速率为 11 Mb/s,节点的接口设置为混杂模式,通信范围为 250 m.

表 1 网络拓扑特征表

序号	部署区域/m×m	平均邻居节点数
1	3 000×2 600	5
2	3 000×1 300	10
3	3 000×867	15
4	3 000×650	20
5	3 000×520	25

针对每一种网络拓扑,根据随机、均匀分布的原则,生成 12 种节点部署的随机场景,每次实验的运行时间均为 600 s,从节点中随机选取 10 个数据流,当数据包遇到路由空洞时采用直接丢弃的策略,最

终的实验数据是取 12 次实验结果的平均值。

图 3 给出了数据包的平均路径跳数比较. 从图中可以看出, 当邻居节点数小于 15 时, 路径跳数随着邻居节点数的增加而增加, 特别是当邻居节点数为 5 时, GPSR 算法的路径跳数比 TNEB 和 Greedy-2 算法要少. 这是因为邻居节点较少时, 网络中的路由空洞较多, TNEB 和 Greedy-2 算法采用了基于两跳的转发策略, 能提前预测并绕开路由空洞, 当数据流的源节点和目的节点距离较远时也能完成数据传输, 而 GPSR 算法仅在源节点和目的节点较近时才能进行数据通信. 另一方面, 当邻居节点数大于 15 时, 路径跳数随着邻居节点数的增加有减小的趋势. 这是因为随着邻居节点数的增加, 路由的空洞数量变少, 数据流的源节点和目的节点间的平均距离相应变短.

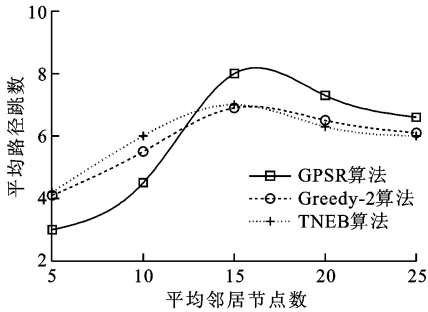


图 3 数据包平均路径跳数比较

图 4 给出了网络中平均邻居节点数为 15 时, 不同时间段内成功传输一个数据包的平均能耗. 随着时间向后推移, 数据包的平均能耗均呈现增加的趋势. 在实验的前 300 s, TNEB 和 Greedy-2 算法的平均能耗比 GPSR 算法高, 这是因为 TNEB 和 Greedy-2 算法需要通过 Hello 报文交换两跳内的邻居信息, 额外开销明显高于 GPSR 算法. 由于 GPSR 和 Greedy-2 算法的贪婪转发策略没有考虑节点的能量平衡, 当最短路径上的节点能量耗尽后, 后续数据包的传输路径会明显增加, 故导致平均能耗急剧增加. TNEB 算法在贪婪转发的同时考虑了节点的剩余能量和承担的数据流情况, 能合理地分配数据包的转发节点, 因此不同阶段的能耗基本接近. 在实验的最后阶段, TNEB 算法的平均能耗比 Greedy-2 和 GPSR 算法分别降低了 26.7% 和 48.8%.

图 5 给出了数据包的端到端平均延迟, 由于端到端延迟在一定程度上由数据包的路径跳数所决定, 因此 3 种转发策略的端到端延迟的曲线和图 3 中的路径跳数曲线有很大的相似之处. 但是, 在邻居

节点数较大时, TNEB 算法的端到端延迟明显低于 GPSR 和 Greedy-2 算法, 这是因为在无线共享链路下, 随着邻居节点数的增加, 每个节点可用带宽显著减少, 成功转发一个数据包需要更长的时间. TNEB 算法在选择下一跳转发节点时, 优先选择链路拥塞度低的节点, 因此随着邻居节点数的增加, 端到端的延迟有所减少. 在邻居节点数为 15 时, TNEB 的端到端延迟比 Greedy-2 和 GPSR 算法分别减少了 19.9% 和 31.8%.

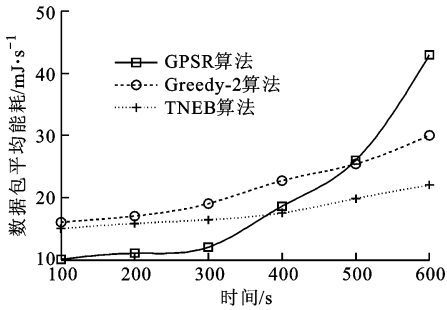


图 4 不同时间段内数据包平均能耗的比较

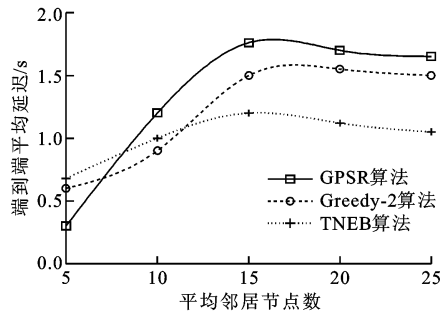


图 5 数据包端到端平均延迟的比较

4 结束语

本文提出了一种基于邻居信息量化的能量平衡路由 TNEB 算法. TNEB 算法采用了基于两跳邻居信息的贪婪转发策略, 为避免数据包被转发到拥塞链路, 考虑了邻居节点的数据流拥塞度, 为防止网络中的重要节点因能量过早耗尽影响数据包的传输, 算法还进一步考虑了节点的能耗平衡度. 本文采用了 5 种网络拓扑对 GPSR、Greedy-2 算法和 TNEB 算法进行了仿真实验, 结果表明: 采用 TNEB 算法的数据包平均能耗和端到端延迟均比 GPSR 和 Greedy-2 算法低.

参考文献:

[1] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
REN Fengyuan, HUANG Haining, LIN Chuang. Wireless

- sensor networks [J]. Journal of Software, 2003, 14(7):1282-1291.
- [2] 唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(3):410-421.
TANG Yong, ZHOU Mingtian, ZHANG Xin. Overview of routing protocols in wireless sensor networks [J]. Journal of Software, 2006, 17(3):410-421.
- [3] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2004, 3(4):366-379.
- [4] XIA Xinsheng, LIANG Qilian. Packets transmission in wireless sensor networks; interference, energy and delay-aware approach [C]//8th IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 2501-2505.
- [5] KARP B, KUNG H T. GPSR: greedy perimeter stateless routing for wireless networks [C]//6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, MA, USA: ACM, 2000: 243-254.
- [6] 王建新,赵湘宁,刘辉宇. 一种基于两跳邻居信息的贪婪地理路由算法[J]. 电子学报, 2008, 36(10):1903-1909.
WANG Jianxin, ZHAO Xiangning, LIU Huiyu. A greedy geographic routing algorithm based on 2-hop neighbors [J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(10):1903-1909.
- [7] 胡宁,张德运. 无线传感器网络的能量平衡路由[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(6):676-680.
HU Ning, ZHANG Deyun. Energy balance routing in wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(6):676-680.
- [8] 赵保华,李培龙,高存皓,等. 延长实时无线传感器网络生命周期的能量平衡路由 [J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(10):1137-1141.
ZHAO Baohua, LI Peilong, GAO Cunhao, et al. Prolonging lifecycle of energy balance routing in real-time wireless sensor networks [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(10):1137-1141.
- [9] 魏剑平,樊勇,李英奇,等. 一种基于能量均衡的无线传感器网络协议[J]. 小型微型计算机系统, 2011, 32(1):133-136.
WEI Jianping, FAN Yong, LI Yingqi, et al. Wireless sensor network protocol based on energy balance [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2011, 32(1):133-136.
- [10] TOM Henderson. The network simulator—NS: version 2. [2011-11-12]. <http://nslam.isi.edu/nslam/index.php/Main-Page>.

(编辑 杜秀杰)