

一种基于负载平衡树的多网关节点数据汇集路由算法*

王潜平¹⁺, 徐琴¹, 王珂¹, 赵彦²

¹(中国矿业大学 计算机科学与技术学院,江苏 徐州 221116)

²(中国移动淮北分公司,安徽 淮北 235000)

Multi-Gateway Nodes Data Collected Routing Algorithm Based on Load Balancing Tree

WANG Qian-Ping¹⁺, XU Qin¹, WANG Ke¹, ZHAO Yan²

¹(School of Computer Science and Technology, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

²(ChinaMobile Huaibei Branch, Huaibei 23500, China)

+ Corresponding author: E-mail: qpwang@cumt.edu.cn

Wang QP, Xu Q, Wang K, Zhao Y. Multi-Gateway nodes data collected routing algorithm based on load balancing tree. *Journal of Software*, 2010,21(Suppl.):330-340. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/10034.htm>

Abstract: Based on the balanced energy consumption, this paper proposes a multi-gateway nodes data collected routing algorithm based on load balancing tree (TBLB algorithm), which combines factors with robustness, data forwarding and anti-interference etc. On condition that multi-gateway, TBLB algorithm forms a kind of load balancing tree with the gateway node for the root node combining node energy and degree, which coordinates load balance between the nodes through the load balancing tree and effectively reduces the node energy consumption. In addition, nodes make path choice and gateway switching according to the path performance evaluation factor W to further reduce the communication overhead of network nodes and to improve the gateway node bottleneck. Simulation results show that TBLB algorithm can effectively equilibrium network load. TBLB also can improve network energy consumption and packets of gateway.

Key words: load balancing; multi-gateway; low power consumption; wireless sensor network

摘要: 以均衡耗能为目标,考虑健壮性、可转发性和抗干扰性等因素,提出一种基于负载平衡树的多网关节点数据汇集路由算法(TBLB算法)。在多网关前提下,TBLB算法结合节点能量和节点度形成以网关节点为根节点的负载平衡树,通过负载平衡树协调节点间的负载均衡,有效地降低节点的能量消耗。此外,节点根据路径性能评价因子 W 进行路径选择和网关切换,进一步降低网络节点的通信开销,改善了网关节点的瓶颈问题。模拟实验结果表明,TBLB算法能够有效均衡网络负载,对网络的能量消耗和网关节点接收到的数据包都有所改善。

关键词: 负载平衡;多网关;低功耗;无线传感器网络

随着微电子技术、计算技术和无线通信等技术的进步,推动了低功耗、多功能传感器节点的快速发展,使其在微小体积内能够集信息采集、数据处理以及无线通信等功能于一体。无线传感器网络具有可靠、准确、灵活、低廉、易于部署等特性,因而具有非常广阔的应用前景,能够广泛应用于军事、环境监测、健康护理、智

* Supported by the National Key Technology R&D Program of China under Grant No.2008BAH37B05095 (国家科技支撑计划)

Received 2010-07-01; Accepted 2010-12-10

能家居、城市交通、大型工业园区的安全监测等领域^[1].

传感器节点需要每隔一定的时间间隔对被监测对象进行数据采集,同时将采集到的数据以多跳的形式发送到网关节点,并由网关节点发送给用户.因此,对网关节点来说,具有周期性数据收集、多跳数据传送、多对一流量模式 3 种特征^[2].这 3 种特征意味着距离网关节点远的节点网络流量小,能量消耗慢;而距离网关节点近的节点,网络流量大,能量消耗快,节点需要转发数据包越多,其流量负载也越重,可能会导致严重的包碰撞、网络拥塞以及包丢失,严重的甚至发生拥塞崩溃,使得网络中的网关节点呈现出漏斗效应.

1 相关工作

针对无线传感器网络中存在的漏斗效应(如图 1 所示),研究者已经提出了一些解决问题的方法,如分布式拥塞控制、层次型拓扑结构设计、数据融合、功率控制^[3]等,这些方法只能在一定程度上缓解漏斗效应.而在传感器网络中,大部分包碰撞、网络拥塞以及包丢失现象都出现在距离网关节点较近的几跳邻居节点,仅仅依靠上述方法并不能彻底改善网关节点的瓶颈问题.



Fig.1 Funnel effect

图 1 漏斗效应

负载均衡作为缓解漏斗效应的关键技术,通过对网关附近的节点进行平衡负载,可以在一定程度上防止上述现象,同时可以平衡节点能耗,延长传感器网络的生存时间.目前,国内外的研究人员已经进行了相关的研究工作.文献[4]提出在中继节点上采用数据聚集的方法,将多个节点的数据聚集融合之后再行传送,从而可减少总流量.但是这种方法由于数据融合的时间相对较长,因此导致网络数据传送的整体延迟增大.文献[5]提出分布式拓扑控制方案,通过计算转发区域和衡量转发代价降低能耗,但其拓扑连通冗余度相对较高,能耗依然较大.文献[6]中提出的 PEDAP 算法是一种基于树的路由协议,其核心思想是把传感器网络的所有节点构造成一棵最小生成树,然而 PEDAP 算法假定网关知道网络中所有节点的位置信息,是一种集中式的算法,不具有较好的可扩展性.

本文以均衡网络能耗为目的,综合考虑健壮性、可转发性和抗干扰性等因素,设计一种能量高效的网关节点数据汇集路由算法,使得负载在全网范围内得到均衡.同时,以节点能耗作为主要考虑因素,通过建立负载均衡数均衡网络流量,降低节点能量消耗,提高网关节点的数据汇集量,从而延长网络的生存时间.算法充分考虑到节点担当数据转发任务时能耗过大的问题,通过调整转发负载来降低节点能耗,从而解决网关节点的漏斗效应.

结合文献[7],可知每发送 n bit 数据包所消耗的能量为

$$E_t(n, d) = n(\alpha_1 + \alpha_2 d^\mu) \quad (1)$$

其中, d 为两节点之间的距离; α_1 是与无线通信距离无关的量,主要包括发射电路所耗能量等; α_2 是与距离有关的量; μ 为路径损耗指数,通常取 2.

每接收 n bit 数据包所消耗的能量为

$$E_r(n) = n\beta \quad (2)$$

其中, β 为接收能量系数.

每汇集两个数据包 n_1 和 n_2 成为数据包 n_3 所消耗的能量为

$$E_a(n_1 + n_2, n_3) = (n_1 + n_2 - n_3)\lambda \quad (3)$$

其中, λ 为数据汇集系数.

从公式(1)~(3)可以看出,如果选择剩余能量较少的节点承担较重的转发任务,很可能导致节点过早死亡,影响网络的连通性以及健壮性.所以,在设计无线传感器网络数据汇集路由时,应尽量选择剩余能量多的节点作为承担数据转发任务的主要节点,而剩余能量较少的节点作为数据源节点,这样可以有效解决节点由于负载过大而过早死亡的问题,从而延长网络的生存时间^[8].

2 层次网络结构生成算法

定义 1(连通无向图). 设图 $G=(V,E)$, G 称为简单连通无向图,当且仅当图 G 需满足以下两个条件:① G 为无自圈的、连通的无向图;② G 中任意两个节点之间最多有 1 条边.无线传感器网络中的节点部署情况如图 2 所示,这里假设传感器网络中的每个节点具有相同的通信半径,也就是说,具有相等的有效通信距离.如果两个节点处于彼此的通信半径之内,则称这两个节点是邻居节点,同时彼此间存在一条通信链路.如图 3 所示,我们把传感器网络拓扑结构可以看作是一个简单连通无向图 $G=(V,E)$,其中 V 为所有传感器节点构成的节点集, E 为所有链路构成的边集.

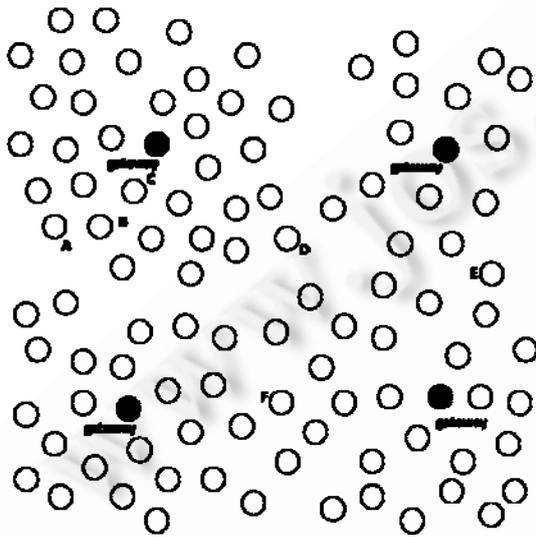


Fig.2 Deployed diagram of network nodes
图 2 网络节点部署图

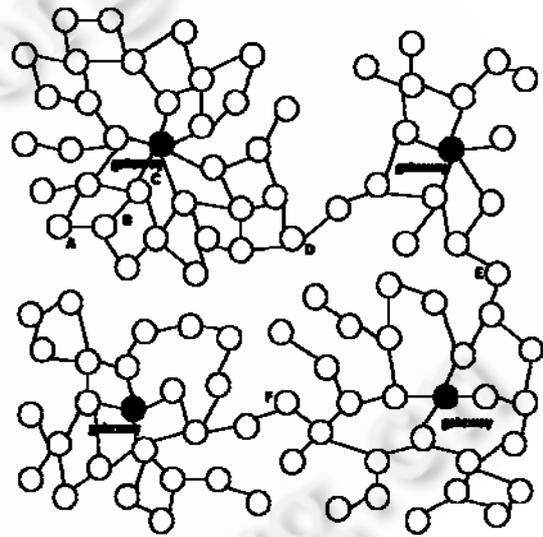


Fig.3 Connected undirected diagram of nodes
图 3 节点连通无向图

定义 2(最小跳数). 如果节点 v 为网关,则节点 v 的最小跳数 $L(v)=0$, 否则节点 v 的最小跳数 $L(v)=\min\{L(w)+1:(v,w)\in E\}$. 考虑利用普通节点到达网关节点所需的最小跳数作为衡量该节点到达网络的距离.

定义 3(上、下层节点集、入度). 若 v 为层次结构中第 i 层集合中的节点,即 $v\in N_i$, 称 v 在第 $i+1$ 层中的邻居节点集合为 v 的上层节点集,记为 $pre(v)$; 称 v 在第 $i-1$ 层中的邻居节点集合为 v 的下层/转发节点集,记为 $next(v)$; 称 v 在第 $i+1$ 层中的邻居节点个数为节点 v 的入度,记为 $D(v)$. 如图 4 所示,将距离网关节点最小跳数相同的节点归属到网络中同一层次的节点集,一般地,把距离网关节点最小跳数为 i 的节点组成的节点集称为第 i 层邻居集;网关节点称为第 0 层,和网关节点直接相邻的节点集称为第 1 层邻居集.

定义 4(层次结构). 传感器网络 $G=(V,E)$ 的层次结构按如下两步定义:① 令 v_0 为网关,第 0 层集合 $N_0=\{v_0\}$. ② 第 i 层集合 $N_i=\{v|L(v)=i,v\in V\}$. 这样,所有节点按照与网关距离的远近组成一个多级的层次网络结构.距离网关节点越近的节点,所处的层次越低;距离网关节点越远的节点,所处的层次就越高.

在网络的拓扑结构建立后,由于节点设定了相同的通信半径,则每个节点的发射功率 F 是一定的,即尽可能利用发射功率传递数据,做到每跳的传送距离最大,其工作过程可以描述为最小跳数的建立过程,分为以下

3 个步骤:

① 网络中的普通节点 v 将其最小跳数 $L(v)$ 设置为无穷大,网关节点以 flooding 方式向传感器网络中的其他节点发送数据查询分组,查询分组包括网关节点的 ID 以及最小跳数值 $L(v) = 0$.

② 网关节点的一跳邻居节点接收到来自网关的查询分组后,将分组中的网关节点最小跳数值 $L(v)$ 加 1 作为新值与自身存储值进行比较,若新的 $L(v)$ 值小于原存储值,则用该值替换原存储值;将查询分组中的存储值换成新最小跳数值、将分组中的节点 ID 换成节点自身 ID,然后将修改后的查询分组继续以 flooding 方式进行转发;若新最小跳数值大于原存储值,则丢弃该查询分组,不再作其他处理.

③ 其他节点接收到查询分组后作与上述步骤②相同的处理.

在此基础上,结合文献[9]对最小跳数算法进行进一步的优化,让它更适于无线传感器网络簇内的路由.其过程可以描述为网络层级结构生成算法的建立,分为以下 4 个步骤:

① 初始化.节点 v 将其最小跳数 $L(v)$ 设置为无穷大,入度 $D(v)$ 置 0.

② 节点计算最小跳数和下层节点集.

各网关节点 v_0 广播一条含有其最小跳数 $L(v) = 0$ 的查询分组,距离网关的一跳邻居节点接收到该查询分组后,就将它的最小跳数设置加 1,下层节点集设置为 v_0 .各网关节点的一跳邻居节点再向网络广播包含自己最小跳数 $L(v) = 1$ 的查询分组.当节点 v 收到某个节点 u 发出的查询分组时,分以下 3 种情况:

I) 如果 $L(v) > L(u) + 1$,令 $L(v) = L(u) + 1$,使 $next(v) = \{u\}$,节点 v 再广播包含自己最小跳数的查询分组;

II) 如果 $L(v) = L(u) + 1$,将 u 加入 $next(v)$;

III) 如果 $L(v) < L(u) + 1$,节点 v 不做处理.

③ 节点 v 向其转发节点集 $next(v)$ 中的所有节点发送回答信息.

④ $next(v)$ 中的节点计算它的入度. $next(v)$ 的节点 u 在每收到一条回答信息后,将其 $D(u) + 1$.这样的过程一直持续下去,网络中的每个节点都获得了它到网关节点的最小跳数和转发节点集,节点再根据其最小跳数确定它在网络中所处的层次,如图 5 所示.

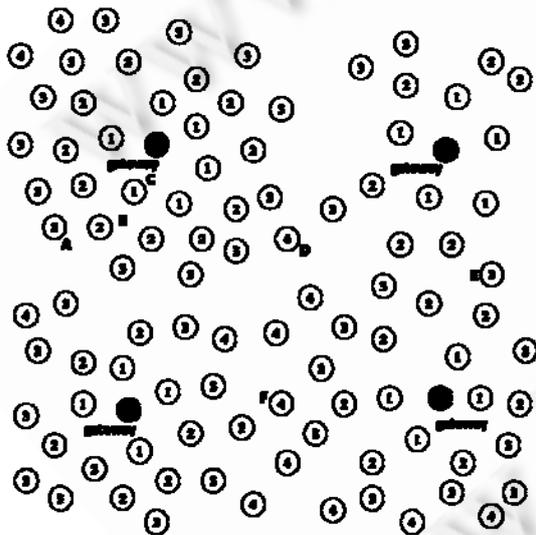


Fig.4 The nodes of the upper/lower set

图 4 上、下层节点集图

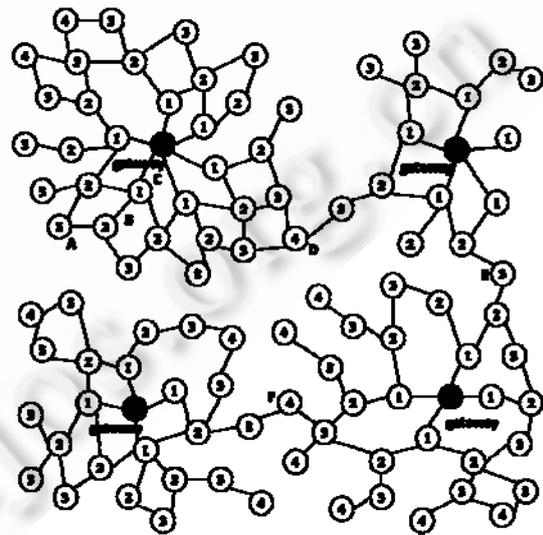


Fig.5 Hierarchical diagram

图 5 层次结构图

3 负载平衡树生成算法

层次网络结构中的每个节点在每次数据汇集开始时需要先执行负载平衡树生成算法来确定它的下一跳节

点.当所有节点都确定了它的下一跳后,就构造出了整个网络的汇集树.

节点在确定它的下一跳时,如果选择入度较小的节点作为下一跳,将增加转发节点的数目,便于平衡节点的能耗,但可能会增加处理冲突的开销.相反,如果选择入度较大的节点作为下一跳,将减少转发节点的个数,可以降低冲突,但不利于平衡节点的能耗.算法步骤如下:

如果节点 $v \in N_1$, 则 v 的下一跳为网关节点 v_0 ; 否则,按下面步骤确定它的下一跳;

① v 向 $next(v)$ 中的节点发送查询信息;

② $next(v)$ 中的每个节点 u 向 v 返回其剩余能量 $E_{current}(u)$ 和入度 $D(v)$;

③ 节点 v 接收到 $next(v)$ 中的每个节点 u 信息后用无线射频芯片中的 RSSI(接收信号强度指示器)估算接收到信号的能量 P_r , 计算公式为

$$P_r = RSSI_VAL + RSSI_OFFSET \quad (4)$$

其中, $RSSI_VAL$ 可以通过 RSSI 寄存器的值读出来, $RSSI_OFFSET$ 是系统所确定的经验值,一般取值 $-45dBm$. 如果从 RSSI 寄存器中读取的数值为 $-25dBm$, 那么通过公式(4)计算出射频芯片的接收能量为 $-70dBm$.

同时,根据电波在自由空间中的传播路径损耗的 Friis 公式计算接收信号的能量 P_r , 计算公式为

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (5)$$

利用公式(5)可以推导出两节点间的距离 d , 推导式为

$$d = \sqrt{\frac{P_t G_t G_r \lambda}{P_r L 4\pi}} \quad (6)$$

其中, P_t 为节点 v 的天线发射功率; G_t, G_r 分别为发射、接收天线增益; λ 为波长; d 为节点 v 与 $next(v)$ 中每个节点 u 的欧式距离; L 为系统损耗因子,通常设置 $L \geq 1$. 由于节点间的实际距离通常不知道,一般情况下,节点间的实际距离越小,则节点间互相通信时,近距离节点间的通信质量会比较好,则节点接收到邻节点的信号强度 (RSSI) 就越大. 因此,可以利用 RSSI 的接收能量来近似计算节点间的距离 d , 距离 d 与 RSSI 的能量可以看成反比例关系.

④ 节点 v 计算 $next(v)$ 中的所有节点的平均剩余能量 $E_{aver}(u)$;

⑤ 节点 v 计算 $next(v)$ 中的每个节点 u 成为下一跳的权值. 计算公式为

$$W(u) = \frac{E_{current}(u)}{E_{init}(u)D(u)d^2} \quad (7)$$

其中 $E_{init}(u)$ 为 u 节点的初始能量.

⑥ 在剩余能量大于等于 $E_{aver}(u)$ 的 $next(v)$ 节点 u 中选择权值 $W(u)$ 最大的节点为 v 的下一跳节点.

上述算法可由图 6 进行说明,设图中 4 个节点的剩余能量分别为 14, 16, 8, 18, 若只采用综合权值参数 $W(u)$ 来构建拓扑,则由图 6(a)可以看出,剩余能量较少的节点担当了数据转发的主要任务,将很快失效,不利于网络生命期的延续. 因此,如图 6(b),需要为剩余能量较少的节点设置诸如上述算法的约束机制,使其不再担当过重的数据转发任务,从而延长节点的生存时间.

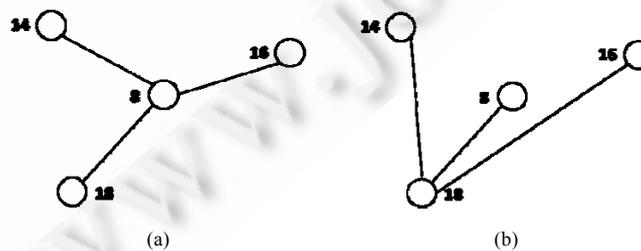


Fig.6 Load-Balancing tree generation algorithm

图 6 负载平衡树生成算法示意图

汇集树算法考虑了邻居节点的剩余能量以及节点所在的层次.由于承担转发和数据汇聚任务的下一跳节点比普通节点需要消耗更多的能量,下一跳应该是剩余能量较高的节点;为了确保数据向网关方向传送,因此,应该从 $next(v)$ 中选择它的下一跳.显然,距离网关较近且剩余能量较多的节点成为下一跳的可能性较大.

4 多网关节点的数据汇集路由设计

无线传感器网络中基于负载均衡树的数据汇集路由算法,在多网关节点的网络环境,数据汇集路由设计主要分成两部分:一部分是建立以各网关节点为中心的层次网络结构;另外一部分是层次网络结构生成后,网络中的传感器节点开始构造各自到其距离最近的网关节点的数据汇集路由.

4.1 基于负载均衡树的汇集路由建立

当传感器网络中的所有节点部署完毕后(如图 2 所示),网关节点开始以 flooding 方式对全网范围执行分组查询.网络中的各节点收到该查询信息后,遵循前面所述的层次网络结构生成算法,按照各自到网关节点的最小跳数组建层次网络结构拓扑图.如图 5 所示,通过前面所述的层次网络结构生成算法,生成以网关节点为中心的层次网络拓扑结构,节点上的数字代表了节点所在的网络层次,网关节点的网络层次为 0(图中直接标注为 gateway).层次结构建立后,在需要收集传感器网络的数据时,网关节点开始启动在一个传感任务.这时,网关节点开始广播一个分组查询给网络内的所有节点,当网络中层次最高的节点收到查询信息后,由于没有下一跳节点能够转发查询信息,因此其为末端节点,并由其开始执行基于负载均衡树的数据汇集路由算法.

如图 5 所示, A 节点为末端节点,它收到查询信息后,发现自己没有下一跳节点能够转发查询信息,就开始建立到网关节点的数据汇集路由.节点 A 向周围的下层邻居节点发出请求信息,要求其返回各自的剩余能量 $E_{current}(u)$ 和入度 $D(v)$.节点 A 收到信息后,利用节点上的所带的 RSSI 装置,并通过公式(4)来计算接收到信号的能量 P_r ,并根据公式(6),计算出两节点之间的距离 d (这里,假设节点 A 知道节点 B 的发射功率).根据所有下层邻居节点的剩余能量,求出剩余能量的平均值 $E_{aver}(u)$,然后利用公式(7)求出所有下层邻居节点的权值 $W(u)$,并在剩余能量大于平均值 $E_{aver}(u)$ 的节点中,选择权值最大的 B 节点作为 A 的数据汇集路由中的下一跳节点.

同理, B 选择 C 作为其下一跳节点. C 节点由于其下层节点是网关节点,因此不需重复 A 和 B 的过程,直接将网关节点作为其下一跳节点.当网络中节点都按照上面的过程建立路由后,网络就最终生成如图 7 所示的基于负载均衡树的数据汇集路由.

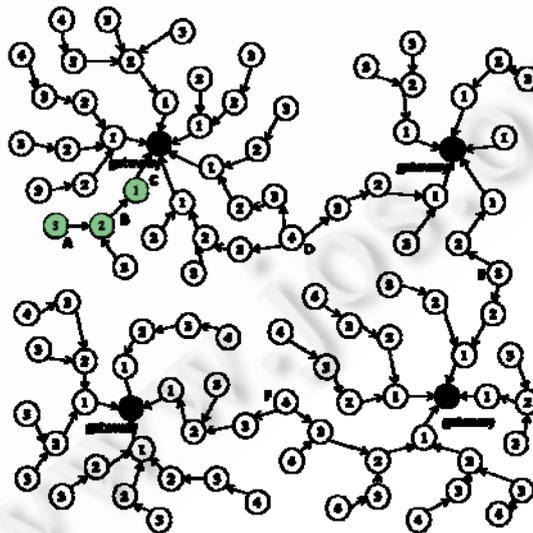


Fig.7 Data collected routing

图 7 数据汇集路由

4.2 网关选择及性能评估

无线传感器网络中采集的信息数据由网关节点发送给观察者,按照路由协议选择的路径,通过节点间的多跳方式转发到达网关节点,并由网关节点将数据通过互联网的形式传送到远程用户终端.在无线传感器网络中,考虑到网关节点流量过于集中的情况,同时为了使网络中的各处节点能量的消耗较为平均,可能会部署不止一个网关节点,用于均衡网络中节点的能量消耗,特别是网关节点以及附近几跳邻居节点的能量消耗.这样,这个无线传感器网络中通常会存在多个连接远程终端的网关节点^[10].

本文所描述的多网关环境中,网络节点收集到的信息并不会传送到多个网关,因为它每次只选择一个跳数相对较少的、离它较近的网关节点作为传送数据的枢纽.单网关路由的缺陷显而易见:路由一旦建立后,一个终端只能连接到一个固定的网关用于数据传送;网关及周围几跳邻居节点能量消耗巨大、负载可能极不平衡;只有当网关出现故障、关闭或者通信质量大幅下降时,用户才会选择利用路由更新机制转换到另外一个性能相对较好的网关节点.为了使得网络流量相对平均,避免网关节点以及周围的几跳邻居节点的网络流量过于集中的情况,我们可以在网络部署阶段在网络中布置多个网关节点,使得网络中各处节点能量的消耗较为平均,同时提高网关节点的数据汇集量,从而延长整个网络的生存时间.

如图 7 所示,节点 D 为末端节点(同时连接多个网关),当它收到查询信息后,发现自己没有下一跳节点能够转发查询信息,就开始建立到网关节点的数据汇集路由.节点 D 分别向周围的下层邻居节点发送请求信息,要求其返回各自的剩余能量 $E_{current}(u)$ 和入度 $D(v)$.节点 D 收到信息后,利用节点上所带的 RSSI 装置,并通过公式(4)来计算出接收到信号的能量 P_r ,并根据公式(6),计算出两节点之间的距离 d (假设节点 D 知道其下层邻居节点的发射功率).根据所有下层邻居节点的剩余能量,求出剩余能量的平均值 $E_{aver}(u)$,然后利用公式(7)求出所有下层邻居节点的权值 $W(u)$,并在剩余能量大于平均值 $E_{aver}(u)$ 的节点中,选择权值最大的节点作为它们数据汇集路由中的下一跳节点,从而确定他们所属的网关.

同理,节点 E, F 通过基于平衡树的数据汇集路由算法确定其下一跳节点,重复上述路由过程,直到将网关节点作为其下一跳节点.当节点 D, E, F 都确定了各自所属的网关节点时,基于多网关节点的网络就最终生成如图 8 所示的数据汇集路由的负载平衡树.

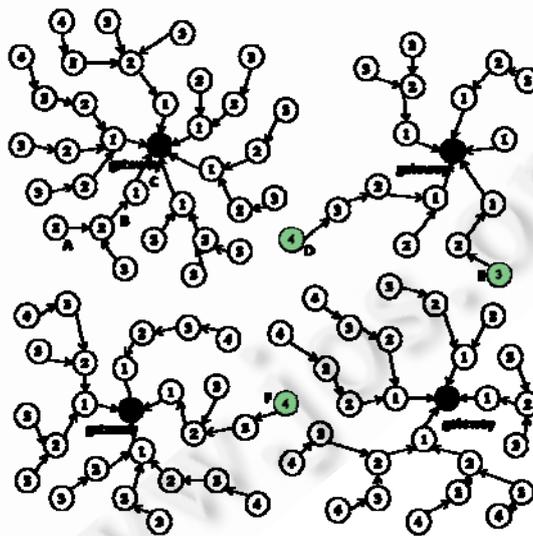


Fig.8 Multi-Gateway nodes collected routing

图 8 多网关节点汇集路由

利用数据汇集路由由性能评估算法,可以计算节点 D, E, F (同时连接多个网关节点的此类节点)的主路径和备用路径,在主路径所属的转发节点集的节点出现故障或者由于能量耗尽使节点失效的情况下,这类节点需要

重新建立链路路径,选择连接其他网关节点的备用路径进行数据传送.数据汇集路由性能评估过程描述如下:

节点 D 在发送的路由请求分组(RREQ)中添加字段 P_{sum} , D_{sum} 和 T ,分别记录 RREQ 从网关节点到节点 D 的传播路径损耗能量代价和、链路度数(入度)和以及从网关节点到节点 D 的时间戳,作为路径性能评估参数.反映路径综合性能评价因子 W ,用于计算候选路径的综合性能:

$$W = \alpha \times P_{sum} + \beta \times D_{sum} + \gamma \times T \tag{8}$$

其中, P_{sum} 为节点 D 的链路路径损耗能量代价和, D_{sum} 为路径上节点的入度和, T 为路径上数据包的传送时延. α, β, γ 分别为链路代价、节点负载以及传送时延的权重,且 $|\alpha| + |\beta| + |\gamma| = 1$.其中,链路损耗越小,说明链路代价越小;节点入度越小,传送时延越短,评价因子 W 越小,说明所选取的路径性能越高.

① P_{sum} 计算表达式:

$$P_{sum} = \sum_{i=1}^{L(D)} P_r(v_i) \tag{9}$$

其中, v 表示路径中的某一节点, $L(D)$ 为节点 v 距离网关节点 v_0 的最小跳数, P_r 为 Friis 公式计算的传播路径损耗能量,见公式(5). P_{sum} 为传播路径上的节点 $\{v_0, \dots, v\}$ 接收来自下层转发节点信号的损耗能量代价和,即从网关节点到节点 v 的链路损耗能量和.

② D_{sum} 计算表达式:

$$D_{sum} = \sum_{i=0}^{L(D)-1} D(v_i) \tag{10}$$

其中, $D(v)$ 表示路径中的某一节点 v 的入度.如果选择入度较小的节点作为下一跳,便于降低节点负载,平衡链路能耗;相反,如果选择入度较大的节点作为下一跳,不利于平衡节点的能耗,但可能降低处理冲突的开销.

③ T 计算表达式:

$$T = T_v - T_0 \tag{11}$$

其中, T_0 为网关节点 v_0 发送路由分组的时间戳, T_v 表示节点 v 收到分组的时间, T 表示查询分组的时间延迟.

将公式(9)~(11)代入公式(8)可以得出:

$$W = \alpha \times \sum_{i=1}^{L(D)} P_r(v_i) + \beta \times \sum_{i=0}^{L(D)-1} D(v_i) + \gamma \times (T_v - T_0) \tag{12}$$

从公式(8)中可以看出路由发现过程中选择路径的链路代价越低(即路径损耗越小)、负载越低、时延越小的路径,即路径综合性能评价因子 W 越小,则该路径的性能越高.节点 v 提取缓冲队列中的 RREQ 分组的携带信息后,根据公式(12)计算比较最小的两条链路路径的性能评价因子 W 值,根据 RREP 消息中的 W 值确定主路径以及备用路径.

如图 9 所示,网关节点发送查询分组,末端节点 D 根据 RREP 消息中的链路路径的性能评价因子 W 值计算出主路径和备用路径,选择 W 值最小的路径,选择图 9(a)为主路径以及图 9(b)作为备选路径,使数据包能够在代价较小、负载较轻、时延较短的路径上传送,从而平衡网络流量负载,提高网络整体性能.

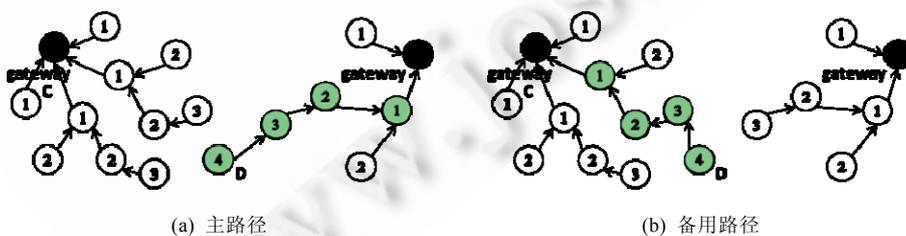


Fig.9 Path performance evaluation
图 9 路径性能评估

当节点 D 根据最小的 W 值选择一条通往某网关的主路径进行数据传送之后,如果所属转发(下层)节点集

中的下一跳节点出现故障或者由于能量耗尽使节点失效的情况下,节点 D 需要重新建立链路路径,选择其他网关节点的备用路径传送数据,利用上述路径性能评价计算出 RREP 消息中的 W 值从小到大,依次作为备用路径进行数据传送,以此确定新的链路路径以及所属的新的网关节点,完成网关切换.同样的方法,节点 E, F 在原先链路出现故障的情况下根据备用路径 W 值的大小,重新选择新的链路路径,完成网关切换.如图 10 所示,节点在原先链路路径出现故障的情况下,重新选择链路路径以及所属网关,建立新的数据汇集路由.

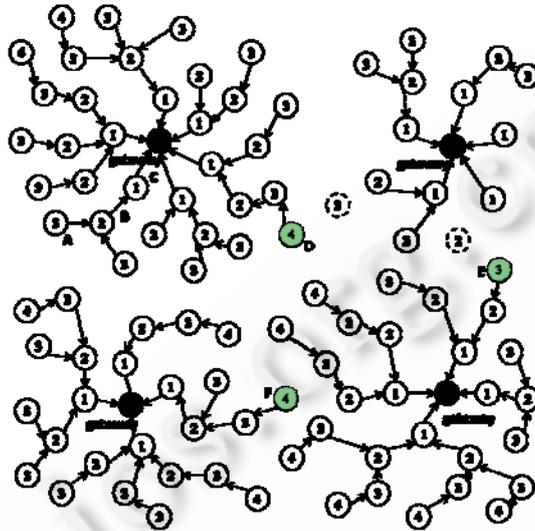


Fig.10 Gateway switched collected routing

图 10 网关切换后的汇集路由

由图 10 可以看出,由于在多网关节点的无线传感器网络环境中,采用基于能量因素的负载平衡树生成算法,使得网络形成了以各网关节点为根节点的负载平衡树.这样,网络中的多负载平衡树的网关节点数据汇集路由能够使得网络流量较为平均,避免了某些普通转发节点及网关节点网络流量过于集中的情况,因此网络中各处节点能量的消耗较为平均,同时提高了网关节点的数据汇集量,从而延长了整体网络的生存时间.

5 系统仿真

本文利用 NS2 仿真软件,对所提出的无线传感器网络负载平衡的数据汇集路由进行仿真实验.仿真实验将 100 个节点放在 $200\text{m} \times 200\text{m}$ 的二维检测区域,4 个网关节点分别放在坐标为 $(20,50), (160,40), (30,165), (170,150)$ 的位置,发射电路能耗 E_{elec} 为 50nJ/bit .系统随机设置 10 个源节点每隔 0.5s 分别向网关节点发送一个包头长度为 25Byte ,数据包长度为 500Byte 的数据包,并且持续发送 600s 后停止.

图 11 是本文提出的基于负载平衡树的多网关节点数据汇集路由 TBLB 协议与 Leach 协议的节点存活个数^[8,10]的比较.由图 11 可以发现,在前 300s 的运行时间里,LEACH 协议与 TBLB 协议的节点的个数都没有减少,均为 100 个.在 320s 左右时,LEACH 协议出现了死亡节点,在 390s 时存活节点的个数不超过 10 个.TBLB 协议在 400s 开始出现死亡节点,协议运行了 540s 时存活节点的个数小于 10 个.因此,不论是以网络中第一个节点死亡时刻或者是网络节点死亡速度作为衡量网络生命周期的标准,本文提出的 TBLB 协议可以更好的平衡了网络的能量,从而有效地延长了网络的生命周期.

图 12 为 TBLB 协议与 Leach 协议的网关节点接收到的数据包统计.可以看出,随着运行时间的增长,网关节点接收到的数据总量会增加.在前 350s 的时间里,TBLB 协议和 LEACH 协议中网关节点所接收的数据量并无太大变化.在随后的时间里,由于节点中的剩余能量会越来越少,直至变成失效节点,这时网络的拓扑变化加快,从而加剧漏斗效应,造成更多的节点死亡.因此,网关节点接收到数据比网络初期减少.由于 TBLB 协议针对漏斗效

应做了相应的网络负载平衡调整,因此,整个网络中的能耗较为平均,使得节点工作时间更长,因此网关节点收到的数据明显超过 Leach 两种协议,从而证明了 TBLB 协议在网络负载平衡上的优势.

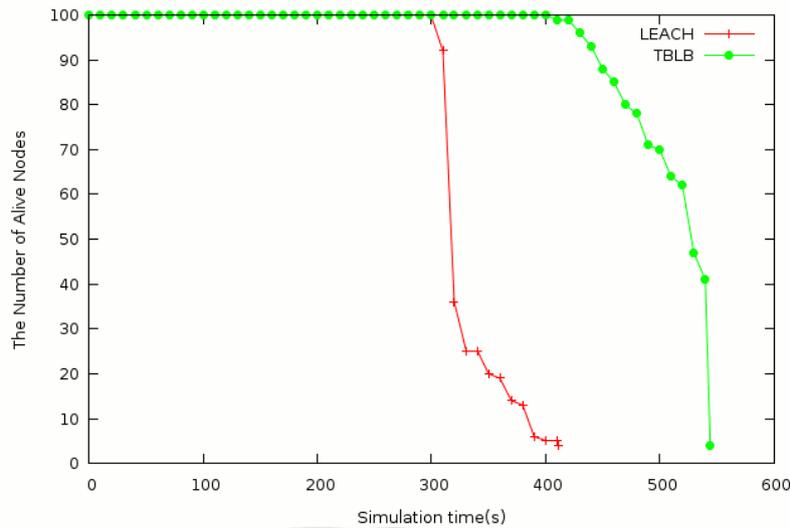


Fig.11 Comparison of survived nodes

图 11 网络存活节点个数对比

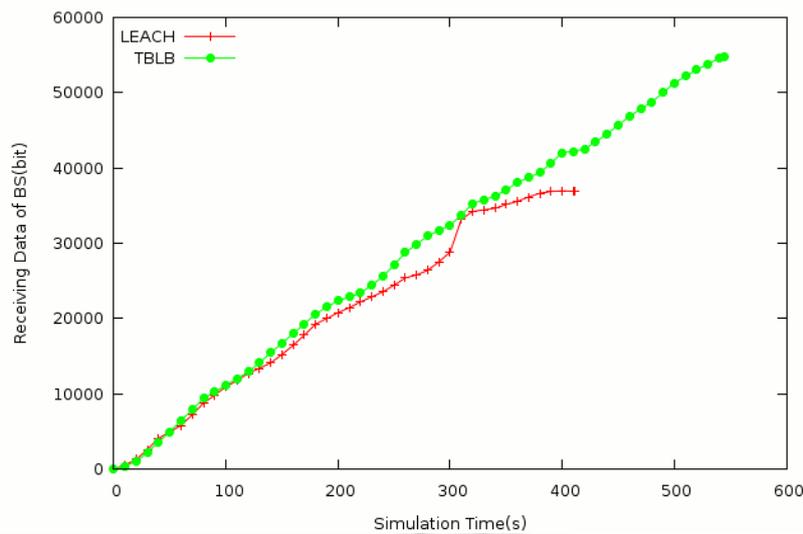


Fig.12 Receiving data packets of gateway

图 12 网关节点接收数据包统计

6 结束语

本文以节点能耗作为主要考虑因素,通过建立负载平衡树的方法降低节点能量消耗;同时,根据网关节点的通信特征,针对漏斗效应,提出了一种能量高效的多网关节点数据汇集路由算法,改进网关节点的数据汇集性能,均衡网络负载,从而延长整个网络的生存时间.仿真结果表明,TBLB 协议可以有效均衡网络负载,通过建立负载平衡树的方法对网络的能量消耗和网关节点接收到的数据包都有了较大改善.

References:

- [1] Yick J, Mukherjee B, Ghosal D. Wireless sensor network survey. *Computer Networks*, 2008,52(12):2292–2330.
- [2] Zeeb E, Behnke R, Hess C, Timmermann D, Golatowski F, Thurow K. Generic sensor network gateway architecture for plug and play data management in smart laboratory environments. In: *Proc. of 2009 IEEE the 14th Int'l Conf. on Emerging Technologies & Factory Automation*. 2009. 88–96.
- [3] Tan HP, Lee PWQ, Seah WKG, Eu ZA. Impact of power control in wireless sensor networks powered by ambient energy harvesting (WSN-HEAP) for railroad health monitoring. In: *Proc. of the Int'l Conf. on Advanced Information Networking and Applications*. 2009. 804–809.
- [4] Shrivastava N, Buragohain C, Agrawat D, Suri S. Medians and beyond: New aggregation techniques for sensor networks. In: *Proc. of the 2nd ACM Conf. on Embedded Networked Sensor System*. Baltimore: ACM Press, 2004. 239–249.
- [5] Liu JL, Li BC. Distributed topology control in wireless sensor networks with asymmetric links. In: *Proc. of the GLOBECOM—IEEE Global Telecommunications Conf.* 2003. 1257–1262.
- [6] Tan HO, Korpeoglu I. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks. *ACM SIGMOD Record*, 2003, 32(4):66–71.
- [7] Gupta S, Sharma M, Sharma S. Simulation for energy expenditure estimation of WSN for comparison of network routing protocols. In: *Proc. of 2009 the 2nd Int'l Conf. on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET 2009*. 2009. 1115–1118.
- [8] Zhao Y, Wang QP, Jiang D, Wu WR, Hao L, Wang K. An agent-based routing protocol with mobile sink for WSN in coal mine. In: *Proc. of 2008 the 3rd Int'l Conf. on Pervasive Computing and Applications, ICPCA08*. 2008. 857–862.
- [9] Gao J, Zhang L. Load balanced short path routing in wireless networks. In: *Proc. of the IEEE INFOCOM 2004*. 2004. 1098–1107.
- [10] Zhao Y. Research on gateway node in wireless sensor networks. China University of Mining and Technology, 2010 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

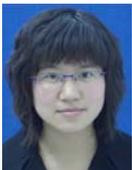
- [10] 赵彦.无线传感器网络网关节点的研究.中国矿业大学,2010.



王潜平(1964—),男,安徽潜山人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为无线传感器网络,数据库技术,计算机支持协同工作(CSCW).



王珂(1979—),男,讲师,主要研究领域为传感器网络,地理信息系统.



徐琴(1986—),女,硕士生,主要研究领域为无线传感器网络.



赵彦(1982—),男,工程师,主要研究领域为传感器网络,无线通信.