

一种无线传感器网络环境下的查询路由与 负载均衡机制*

徐明^{1,2}, 刘广钟¹

(1. 上海海事大学 信息工程学院, 上海 201306; 2. 上海市智能信息处理重点实验室, 上海 200433)

摘要: 针对无线传感器网络节点数量多、通信距离短、能量有限的特点, 提出一种查询增益路由算法以及基于路由的负载均衡机制。查询增益路由算法通过查询增益矩阵维护路由信息, 并依据历史查询成功记录来选取路由节点; 而基于路由的负载均衡机制可以在查询路由过程中记录节点的能量信息, 转移负载, 使得查询路径中各节点的能量消耗得到均衡。仿真实验结果表明, 查询增益路由算法可以在降低节点能量消耗的前提下提高查询成功率, 而基于路由的负载均衡机制可以进一步降低查询增益路由算法的能量消耗。

关键词: 无线传感器网络; 查询路由; 负载均衡; 能量消耗

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)01-0241-05

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.01.062

Query routing and loading balancing mechanism in wireless sensor networks

XU Ming^{1,2}, LIU Guang-zhong¹

(1. College of Information Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Intelligent Information Processing, Shanghai 200433, China)

Abstract: WSNs have many features, such as a majority of nodes, short communication range and limited energy. This paper presented a query gain routing (QGR) algorithm and routing-based load balancing mechanism. QGR algorithm maintained routing information through query gain matrix, and chose routing nodes according to the successful historic query records, while the routing-based load balancing mechanism stored nodes' energy information during the process of query routing. Simulation results show that QGR algorithm achieves relatively high query hit rate with low energy consumption, and routing-based load balancing mechanism further reduces energy consumption in terms of load transfer efficiency of QGR.

Key words: wireless sensor networks (WSNs); query routing; load balancing; energy consumption

0 引言

无线传感器网络是由大量布置在监测区域内具有数据感知、数据存储和通信能力的传感器节点以 Ad hoc 方式构成的无线通信网络, 通过各类传感器近距离对物理世界的目标进行实时监测^[1~3]。作为物联网的感知神经末梢, 无线传感器网络在国防军事、环境监测、农业生产、医疗卫生、反恐救灾等众多领域有着广泛的应用。由于传感器源源不断地产生各种观测数据, 因此可以将无线传感器网络视为一种特殊的数据库, 用户通过向无线传感器网络下发查询获取所需信息。尽管无线传感器网络应用场景和硬件部署不尽相同, 但其最终目的都是对感知数据进行获取、处理和传输。因此, 无线传感器网络是以数据为中心的网络, 并且具有节点数量多、通信距离短、能量有限等特点。针对无线传感器网络设计的查询路由算法必须尽量减小网络节点的能量消耗。此外, 由于某些关键节点可能会因过重的负载而过早将能量耗尽, 最终导致网络被分割成若

干个孤立的区域。因此, 有必要在查询路由的过程中结合节点的能量信息, 使得节点的能量消耗能够均衡, 从而延长网络的生命周期。

1 相关工作

文献[4]提出一种 Rumor 路由算法, 该算法中源节点将数据在网络中随机传递, 并在数据经过的中间节点上保留副本, 用户查询也在网络中随机传递, 一旦两者的传递路径相交, 则用户查询就可以获得结果。实现 Rumor 路由算法最简单的策略是: 源节点沿着水平方向传递数据并在经过的路径上保存副本, 用户查询沿垂直方向传递, 从而保证两条路径相交。Rumor 路由算法在查询效率和数据传输率指标上优于泛洪 (flooding) 算法。文献[5]提出一种基于梳—针模型 (comb-needle model) 的数据存储与查询路由算法。该算法是对 Rumor 路由算法的扩展, 思想类似于用梳子在草堆中寻针。数据 (相当于针) 沿着垂直方向传递一定距离, 并在经过的路径上

收稿日期: 2012-04-28; **修回日期:** 2012-06-08 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61202370); 上海市科学技术委员会浦江人才计划资助项目(11PJ1404300); 上海市教委科研创新重点资助项目(12ZZ151); 上海市智能信息处理重点实验室开放课题(I IPL-2011-008); 上海海事大学科研基金资助项目(20110049)

作者简介: 徐明(1977-), 男, 安徽含山人, 讲师, 博士, 主要研究方向为 P2P 网络、传感器网络、计算智能理论与方法(mingxu@shmtu.edu.cn); 刘广钟(1962-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为计算机网络、水声通信、网格计算、CIMS 技术、分布式数据库。

保留副本;用户查询(相当于梳子)首先沿垂直方向传播,然后沿着水平方向具有一定间隔的多条路径同时传递,该间隔可以保证查询请求的传递路径与数据存储路径相交。该过程也可以相反,即查询请求沿垂直方向传递一定距离,用户数据沿水平方向的多条路径传递,这取决于数据产生与查询发生速率之间的关系。文献[6]提出了一种基于树聚类的查询路由算法,通过对传感器网络中的传感器节点进行聚类形成超节点,减少对传感器节点的访问,从而提高查询效率。文献[7]提出了一种分布式索引算法来处理传感器网络中的多维范围查询。算法首先设计一种对传感器网络分布区域进行划分的方法,并按节点所在区域的地理位置进行编码,从而在地理位置和区域编码之间形成对应关系;然后,将传感器产生的多维数据进行编码,从而在事件编码和区域编码之间形成对应关系;最后,利用基于地理位置的路由协议将事件存储到具体的节点上。查询按照与事件存储类似的方法进行。首先,将查询按多维属性的映射方法得到一组区域编码,再利用基于地理位置的路由协议到指定的索引节点获取结果。该算法的缺点是对偏斜数据分布(skewed data distribution)的处理效果不够理想。文献[8]提出了Scoop索引查询算法。该算法中,汇聚节点定期从无线传感器网络收集传感器节点数据产生速率、查询发生速率、查询分布以及网络拓扑等统计信息,在节点上建立数据存储索引并广播给其他传感器节点。传感器节点依据数据存储索引保存的信息,将查询消息转发到相关的节点获取结果,从而避免了查询消息的泛洪路由。文献[9]提出一种查询路由树(query routing tree)的数据结构将查询结果返回给查询请求节点,该算法可以感知路由负载,降低网络能量消耗并避免数据冲突。文献[10]提出一种以传感器为中心的能量约束查询路由算法,该算法以博弈论为基础构建智能传感器节点,智能传感器节点通过平衡个体资源消耗与网络整体资源消耗来寻找最优路径。文献[11]分析和比较了无线传感器网络中以蚁群和蜂群为代表的群体智能(swarm intelligence, SI)路由算法,并指出了这类算法的缺陷。

2 查询路由机制

2.1 网络模型

假设无线传感器网络的所有节点随机分布在一个二维平面上,每一个节点具有相同的传输半径,则可以使用单位圆盘图(unit disk graph, UDG)建模网络拓扑,并且所有的连接都是双向的。

定义 1 用无向图 $G(V, E)$ 表示一个无线传感器网络,其中 $V \in N \times N$ 表示欧几里德平面上的传感器节点集合, $E \in V \times V$ 表示对应节点间边的集合。假设所有节点具有相同的通信半径 r , 任意两个节点 s_u 和 s_v 之间的距离由函数 $\delta(u, v)$ 给出:

$$\delta: N \times N \rightarrow \Gamma; \delta(u, v)$$

$$\delta(u, v) = \sqrt{(u_x - v_x)^2 + (u_y - v_y)^2} \quad (1)$$

当且仅当节点 s_u 和 s_v 之间的距离 $\delta(u, v)$ 小于 r 时, s_u 和 s_v 成为邻居节点, 并且 s_u 和 s_v 之间存在一条链路。

无线传感器网络的能量消耗采用 LEACH^[12] 模型给出的公式, 其包的发送、接收和事件感知由三个部分组成, 利用 LEACH 模型的能量消耗公式可以计算出节点的剩余能量。

考虑两个最小跳数距离 h 上的节点 s_u 和 s_v , 存在阈值

$u(h)$ 和 $v(h)$, 使得 $u(h) \leq \delta(u, v) \leq v(h)$ 。其中, 阈值的大小依赖于无线传感器网络的节点密度 ρ , 并且对任意 $h > 0$ 存在:

$$\lim_{\rho \rightarrow \infty} (v(h) - u(h)) = r \quad (2)$$

定义 2 给定源节点 s_u 和目标节点 s_v , 则传感器模型定义为

$$s(u, v) = \frac{\lambda}{\delta(u, v)^k + \varepsilon} \quad (3)$$

其中: λ 代表无线信号幅值, $\lambda > 0$; k 是传感器参数; ε 是一个预定义参数, 用来处理源节点和目标节点位置相同的情况, $\varepsilon > 0$ 。

传感器节点发出的数据包用以下的六元组来表示: $\langle \text{SenderID}, \text{SeqNo}, \text{state}, \text{hops}, \text{DestID}, \text{data} \rangle$ 。其中: SenderID 是创建该数据包的传感器节点的标志符; SeqNo 代表数据包的序列号, 由创建该数据包的传感器节点分配; state 表示数据包的当前状态, 包括初始状态、转发状态和终止状态; hops 用来定义数据包的生命周期, 当消息从一个节点传递到另一个节点时, hops 的值增加 1, 为了控制数据包的传递次数, 避免带来过大的带宽消耗, 需要设定数据包生命周期的上限值; DestID 表示目标节点的标志符; data 域包含该数据包中所存储的数据信息。

2.2 查询增益路由算法

查询增益矩阵(query gain matrix, QGM)是查询增益路由算法中用来维护路由信息的关键组件。在构造 QGM 之前, 定义两个辅助的数据结构 QueryTable 和 SensorTable。一个节点的 QueryTable 包含了从该节点发出或者转发并最终查询命中的查询向量集合。而一个节点的 SensorTable 记录了该节点将某查询转发到它的邻居节点并最终查询命中的邻居节点集合。因此, 某节点的 SensorTable 是该节点所有邻居节点集合的子集。当查询命中后, 从源节点到目标节点之间的所有节点(不包括目标节点)将会把该查询记录在本节点的 QueryTable 中, 并把该查询命中路径上相邻节点记录在本节点的 SensorTable 中。

给定一个包含 k 个元素的对象集合 O , 一个包含 n 个元素的查询向量集合 Q 和一个包含 m 个元素的节点集合 S , 对于任意一个对象 $o_a \in O (1 \leq a \leq k)$, 任意一个查询 $q_j \in Q (1 \leq j \leq n)$ 和任意一个节点 $s_i \in S (1 \leq i \leq m)$, 则查询结果对象集合 $o_{qj} \subseteq O (1 \leq j \leq n)$ 。QGM 是一个如下所示的 $m \times n$ 矩阵:

$$\begin{matrix} & q_1 & q_2 & \cdots & q_j & \cdots & q_n \\ \begin{matrix} s_1 \\ \vdots \\ s_i \\ \vdots \\ s_m \end{matrix} & \begin{pmatrix} \text{gain}_{11} & \text{gain}_{12} & \cdots & \text{gain}_{1j} & \cdots & \text{gain}_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \text{gain}_{i1} & \text{gain}_{i2} & \cdots & \text{gain}_{ij} & \cdots & \text{gain}_{in} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \text{gain}_{m1} & \text{gain}_{m2} & \cdots & \text{gain}_{mj} & \cdots & \text{gain}_{mn} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

矩阵中的每一项都由一个复合数据结构组成。一个节点上 QGM 的行数等于对应的 SensorTable 的长度, 列数等于对应的 QueryTable 的长度。

每个节点上维护一个邻居节点列表和一个查询增益矩阵。其中, 邻居节点列表可以通过广播和监听查询请求的方式来更新和维护。任何节点都可以创建一个查询, 然后查询消息经过中间节点的路由转发到目标节点。

在查询处理的初始阶段, 每个节点上的 QueryTable、SensorTable 和对应的 QGM 都为空。

图 1 描绘了查询增益路由算法中增益值的指数衰减传递。

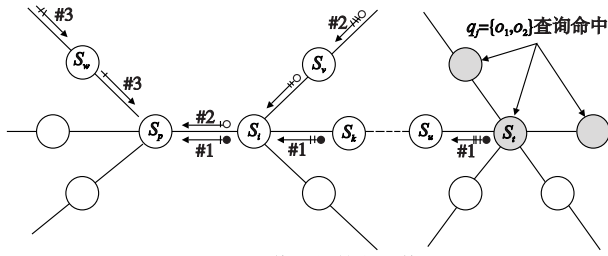


图1 增益值的指数衰减传递

图1中每个圆圈代表一个传感器节点,灰色填充的圆圈代表查询命中节点,每个箭头代表增益值沿着某条查询命中路径传递的路线。在图1中,一共有三条查询命中路径,分别标记为#1、#2和#3;假设节点 s_p 发出一个包含对象 $\{o_1, o_2\}$ 的查询 q_j ,并将该查询发送给邻居节点 s_i ,最后,查询在目标节点 s_t 命中。若该查询消息的当前 hops 值小于 TTL,则继续将查询转发给 s_i 的邻居节点,以便搜索更多满足查询条件的节点。假设 q_j 是 s_p 的 QueryTable 中第 j 个元素, s_i 是 s_p 的 SensorTable 中第 i 个元素,则将 $\langle \{s_i, s_k, \dots, s_u, s_t\}, \text{value} \rangle$ 添加到 gain_{ij} ,而 gain_{ij} 值的计算方法为

$$|\text{gain}_{ij}| = \sum_{s_t \in D} \frac{(1 - \alpha)\omega_{st} + C\alpha}{\text{dist}(s_p, s_t)^\lambda} \quad (4)$$

其中: D 是所有经过 s_i 且查询命中的节点集合; ω_{st} 是查询在目标节点的所有邻居节点上命中的总数; α 是用来调节查询在目标节点与目标节点的邻居节点命中的权值参数, $0 < \alpha < 1$; C 是一个常数,用来表示查询在目标节点命中的权值; $\text{dist}(s_p, s_t)$ 代表从当前节点 s_p 到目标节点 s_t 的路径长度;指数衰减参数 λ 用来表示 $\text{dist}(s_p, s_t)$ 对增益值的影响力,若 $\lambda \rightarrow \infty$,则增益值只能从目标节点沿着查询路径传递给一个节点,若 $\lambda \rightarrow 0$,则增益值会从目标节点沿着查询路径无差别地传递给每一个节点, $0 < \lambda < \infty$ 。假设 s_p 上的 QGM 有 r 行,则 s_p 将查询 q_j 传递给 s_i 的概率为

$$P(q_j, s_i) = \frac{|\text{gain}_{ij}|}{\sum_{i=1}^r |\text{gain}_{ij}|} \quad (5)$$

其中: $|\text{gain}_{ij}|$ 代表从 s_i 传递到 s_p 的总增益值。查询增益路由的具体步骤如算法1所示。

算法1 查询增益路由算法

输入:无线传感器网络大小,TTL,查询节点的数量。

输出:消息 id,消息 hops。

```

1 节点  $s_i$  取出查询消息  $\text{mes} \langle \text{id}, s_p, \text{state}, \text{hops}, q_j, \text{path} \rangle$ ;
2 if  $q_j$  在节点  $s_i$  命中 then
3   将  $\text{mes}$  转发给  $s_i$  的邻居节点并计算总命中数量;
4   for all sensors in  $\text{mes.path}$  do
5     if  $s_p \cdot \text{QueryTable} \neq \emptyset$  AND  $q_j \in s_p \cdot \text{QueryTable}$  then
6       返回  $q_j$  的位置  $j$ ;
7     else  $s_p \cdot \text{QueryTable.add}(q_j)$ ;
8     sensor  $s_i \leftarrow \text{mes.path.next}()$ 
9   if  $s_i \in s_p \cdot \text{SensorTable}$  then
10    返回  $s_i$  的位置  $i$ ;
11  else  $s_p \cdot \text{SensorTable.add}(s_i)$ ;
12  根据式(4)计算从  $s_i$  传递到  $s_p$  的增益值  $v_k$ ;
13   $\text{gain}_{ij} \leftarrow \text{gain}_{ij} + v_k$ ;
14   $s_p \leftarrow s_i$ ;
15  endif
16 endif
17 endfor
```

16 return $\text{mes.id}, \text{mes.hops}$;

17 endif

算法1中,每个节点的空间复杂度为 $O(m \times n)$,当某节点上的 QGM 已满,则最近最少使用的存储项将被替换掉。因为每个节点上的 QueryTable 和 SensorTable 都是线性长度,所以它们的存储代价相对于 QGM 是可以忽略不计的。由于查询增益路由算法中每个节点不需要任何网络中的全局信息,只需记录本节点的邻居节点相关信息,目标节点的查询成功记录只会沿着查询路径在相邻节点之间传递,因此查询代价较低。在查询路由过程中记录节点的能量信息,转移负载,使得查询路径中各节点的能量消耗得到均衡。

3 负载均衡

传感器节点性能的限制导致传感器网络成为一种不稳定的网络,主要表现在节点的失效率较高。无线传感器网络生命周期一般有两种定义方式^[13]:a)全网所有节点全部失效;b)一定比例的节点失效,造成网络分割。不论那种定义方式都希望所有节点能够达到同时工作的时间尽可能地长,即能够满足负载均衡性。现有的研究在设计查询路由协议时,往往考虑的是理论上的最优结果,忽略了现实中的可行性以及节点的负载均衡。

热点对象的分布与节点处理能力的不一致性是导致传感器节点负载不均衡的原因之一。一个好的查询路由策略应该能够平衡所有传感器节点的负载分布。这样可以避免某些节点成为瓶颈从而过早地耗尽能量,对延长整个网络的生命周期非常重要。令节点 s_i 上负载项 k 的大小为 $s_{i,k}$,在一段时间内节点 s_i 上负载项 k 的访问次数为 $v_{i,k}$,节点 s_i 上的负载项 k 的负载为 $L_{i,k}$,则 $L_{i,k} = s_{i,k} \cdot v_{i,k}$ 。节点 s_i 的实际负载 L_i 为该节点上所有负载项的负载总和,即 $L_i = \sum_{k=1}^m L_{i,k}$,其中 m 为节点 s_i 上负载项的数量。令节点 s_i 的处理能力为 C_i ,节点 s_i 的负载阈值为 ρ_i ,节点 s_i 的负载率为 μ_i ,则 $\mu_i = L_i / C_i$ 。当节点的负载率 μ_i 不超过其负载阈值 ρ_i 时,称该节点为欠载节点;反之,则称为过载节点。负载均衡算法的目标就是在负载转移次数尽可能少的情况下,实现全局负载均衡。负载均衡性的衡量标准可以用所有节点负载的方差定义:

$$\varphi(A, G) = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})^2}{n} \quad (6)$$

其中: A 代表查询路由算法; G 代表无线传感器网络; L_i 为节点 s_i 所有负载项的负载总和; $\bar{L}$ 为无线传感器网络负载的平均值。

为了实现基于路由的负载均衡机制,查询消息中的 path 变量存储所有处理该查询的节点标志符和节点负载率的二元向量列表。具体步骤如算法2所示。

算法2 基于路由的负载均衡算法

```

1 节点  $s_i$  取出查询消息  $\text{mes} \langle \text{id}, s_p, \text{state}, \text{hops}, q_j, \text{path} \rangle$ ;
2 if  $q_j$  在节点  $s_i$  命中 then
3   遍历  $\text{path}$  中所有的二元向量并找出过载节点;
4   将过载节点多余的负载转移到欠载的邻居节点上;
5 else if  $\text{mes.hops} = \text{TTL}$  then
6   update routing table;
7 end if
8 将查询消息  $\text{mes}$  转发给  $s_i$  的邻居节点;
9 while  $s_i$  接收到 ERROR 消息 do
```

```

10    update routing table;
11    将查询消息 mes 转发给  $p_i$  的下一个邻居节点;
12 endwhile

```

从算法2可以看出,基于路由的负载均衡机制可以在查询路由过程中记录节点的能量信息,并且将查询路径中过载节点多余的负载转移到欠载的邻居节点上,使得查询路径中各节点的能量消耗得到均衡。此外,由于发生负载转移的过程仅仅在部分负载不均衡的节点之间进行,因此该算法的分布性和可扩展性较好。

4 仿真结果与分析

本文的仿真环境采用 Crossbow 公司生产的 MICA2^[14] 节点为标准,节点的通信距离为 50 m。由于无线传感器网络中节点间的数据传输代价远远超过数据运算处理代价,因此在仿真实验中忽略运算处理代价,仅使用传输代价来衡量总的能量消耗。

通常情况下,节点发送一条长度为 b Byte 的消息需要花费 $\sigma_{tr} + b\delta_{tr}$,其中 $\sigma_{tr} = 0.645$ mJ, $\delta_{tr} = 0.0144$ mJ/Byte。相应地,接收一条长度为 b Byte 的消息需要花费 $\sigma_{re} + b\delta_{re}$,其中 $\sigma_{re} = 0.387$ mJ, $\delta_{re} = 0.00864$ mJ/Byte。

本文在仿真过程中采用随机数据来模拟无线传感器网络节点的感知数据。具体方法如下:首先将每个节点在每维上的数值 v 随机初始化为 $\text{rand}(0,1)$ 。在随后的每一轮实验中,数值 v 较上轮的最大变化幅度为 $f(0 < f < 1)$ 。假设第 r 轮中第 i 维上的数值为 $v(r)[i]$,在第 $r+1$ 轮中数值变化为 $v(r)[i] + \text{rand}(-f, f)$,且始终保证在 $[0, 1]$ 内。

此外,查询增益路由算法中查询增益矩阵的大小设为 20×50 , $\alpha = 0.5$, $\lambda = 2$, $C = 10$,其他实验参数与默认值如表1所示。

表1 实验参数与默认值

实验参数	默认值
网络覆盖区域/m ²	400 × 400
传感器节点数量	500
汇聚节点数量	8
网络节点平均度数	12
副本分布	Zipf($\alpha = 0.82$)
查询分布	Zipf($\alpha = 0.9$)
感知数据消息大小/Byte	40
查询消息大小/Byte	20
平均查询长度	3.145

本文对几种常见查询路由算法的性能进行了比较和分析,包括 Rumor 路由算法(RR)、查询路由树(QRT)算法和查询增益路由(QGR)算法。其中,QGR 算法分为基本 QGR 算法和采用负载均衡机制的 QGR 算法(QGR-LB)。

第1组实验主要研究不同查询请求在不同查询跳步距离(hops)的情况下,采用各种查询路由策略的查询成功率。查询跳步距离主要用于反映数据源节点相对于汇聚节点的远近程度。在该组实验中,传感器节点的总数采用默认值 500,仿真结果如图2所示。在同等情况下,QGR 和 QGR-LB 的查询成功率要高于 QRT 和 RR,当平均跳步距离等于 7 时,QGR 和 QGR-LB 的查询成功率比 QRT 高出 15.1%,比 RR 高出 46.3%。

QGR 和 QGR-LB 的查询成功率相同,说明基于路由的负载均衡机制对提高查询成功率指标没有效果。

第2组实验主要比较不同节点密度情况下,不同查询路由策略的查询成功率。在该组实验中,传感器节点的数量在 200 ~ 800 之间变化,仿真结果如图3所示。在同等情况下,QGR 和 QGR-LB 的查询成功率要高于 QRT 和 RR,并且随着节点数量的增多,QGR 和 QGR-LB 的查询成功率增大的幅度要明显高于 QRT 和 RR,说明节点数量增多时查询增益矩阵中记录的查询路由由历史信息准确度也相应得到提升。

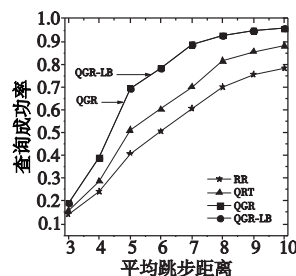


图2 平均跳步距离对查询成功率的影响

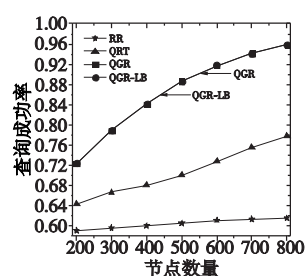


图3 节点密度对查询成功率的影响

第3组实验主要比较不同查询跳步距离情况下采用各种查询路由策略所需的能量消耗。在该组实验中,传感器节点的总数采用默认值 500,仿真结果如图4所示。随着平均跳步距离的增大,各种查询路由策略所需的能量消耗都相应地增大。但是,在同等情况下,QGR 的能量消耗要低于 QRT 和 RR,当平均跳步距离等于 7 时,QGR 的能量消耗比 QRT 低 28.3%,比 RR 低 38.9%。此外,QGR-LB 的能量消耗比 QGR 低 18.3%,说明基于路由的负载均衡机制可以降低能量消耗。

第4组实验比较了不同节点密度情况下,不同查询路由策略的能量消耗。在该组实验中,传感器节点的数量在 200 ~ 800 之间变化,仿真结果如图5所示。在同等情况下,QGR-LB 的能量消耗最低,并且随着节点数量的增多,能量消耗略有下降;QGR 的能量消耗在同等情况下也明显低于 QRT 和 RR 的能量消耗,并随着节点数量的增多,QGR 的能量消耗增大的幅度低于 QRT 和 RR 能量消耗增大的幅度。实验说明随着节点数量的增多,基于路由的负载均衡机制效果更好。

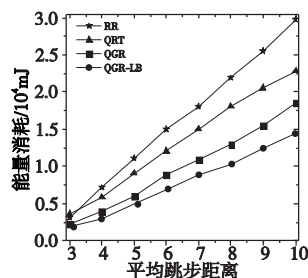


图4 平均跳步距离对能量消耗的影响

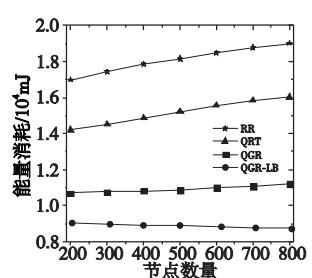


图5 节点密度对能量消耗的影响

5 结束语

查询成功率和能量消耗是影响无线传感器网络查询路由性能的关键指标。现有的无线传感器网络查询路由算法的查询成功率不高并且能量消耗较大,存在一定的局限性。本文提出了一种查询增益路由算法,在路由节点的选取过程中,不依赖于网络的全局拓扑信息,具有很好灵活性与适应性。此外,本文提出的基于路由的负载均衡机制可以在查询路由过程中

记录节点的能量信息,转移负载,使得查询路径中各节点的能量消耗得到均衡。通过仿真实验发现,与其他查询路由策略相比,查询增益路由可以在降低节点能量消耗的前提下提高查询成功率,而基于路由的负载均衡机制可以进一步降低查询增益路由的能量消耗,从而能够更有效地延长网络的生命周期。进一步的研究工作将考虑节点的可移动性和容错性等因素。

参考文献:

- [1] 刘亮,秦小麟,郑桂能,等. 能量高效的无线传感器网络空间范围查询处理算法[J]. 计算机学报,2011,34(5):763-778.
- [2] LIU Min, XU Shi-jun, SUN Si-yi. An agent-assisted QoS-based routing algorithm for wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*,2012,35(1):29-36.
- [3] KALPAKIS K, TANG S. Maximum lifetime continuous query processing in wireless sensor networks[J]. *Ad Hoc Networks*,2010,8(7):723-741.
- [4] BRAGINSKY D, ESTRIN D. Rumor routing algorithm for sensor networks[C]//Proc of the 1st Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. New York: ACM Press, 2002:22-31.
- [5] LIU Xin, HUANG Qing-feng, ZHANG Ying. Combs, Needles, Haystacks: balancing push and pull for discovery in large scale sensor networks[C]//Proc of the 2nd International Conference on Embedded Networked Systems. New York: ACM Press,2004:122-133.
- [6] 胡华,苗媛媛,庄毅. 一种基于超节点和能量优先的无线传感器网络的高效查询算法[J]. 微电子学与计算机,2011,28(3):115-122.
- [7] XIN Li, KIM Y, RAMESH G, et al. Multi-dimensional range queries in sensor networks[C]//Proc of the 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York: ACM Press,2003:509-517.
- [8] GIL T, MADDEN S. Scoop: an adaptive indexing scheme for stored data in sensor networks[C]//Proc of IEEE International Conference on Data Engineering. Washington DC: IEEE Computer Society,2007:89-102.
- [9] ANDREOU P, YAZTI D, PAMBORIS A, et al. Optimized query routing trees for wireless sensor networks[J]. *Information Systems*,2011,36(2):267-291.
- [10] KANNAN R, SARANGI S, IYENGAR S, et al. Sensor-centric energy-constrained reliable query routing for wireless sensor networks[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*,2004,64(7):839-852.
- [11] SALEEM M, CARO G, FAROOQ M. Swarm intelligence based routing protocol for wireless sensor networks: survey and future directions[J]. *Information Sciences*,2011,181(20):4597-4624.
- [12] ABDELLAH E, BENALLA S, HSSANE A, et al. Advanced low energy adaptive clustering hierarchy[J]. *International Journal on Computer Science and Engineering*,2010,2(7):2491-2497.
- [13] RAICU I, SCHWIEBERT L, FOWLER S, et al. Local load balancing for globally efficient routing in wireless sensor networks[J]. *International Journal of Distributed Sensor Networks*,2005,1(2):163-167.
- [14] FARSHCHI S, NUYUJUKIAN P, PESTEREV A. A TinyOS-enabled MICA2-based wireless neural interface[J]. *IEEE Trans on Biomedical Engineering*,2006,53(7):1416-1424.

(上接第233页)线非常接近,验证了理论分析的正确性。

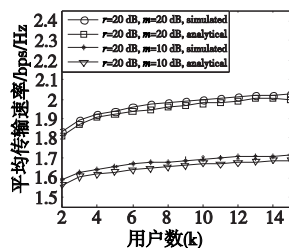


图1 所提方案的平均传输速率

4 结束语

本文提出了3时隙的多用户双向中继系统,基站以系统的平均传输速率最大化为准则选择一个用户,并与这个用户通过中继节点进行信息交换。理论分析得到的平均传输速率与仿真值非常接近,因此本文的理论分析是正确的。

参考文献:

- [1] ROSSETTO F, ZORZI M. Mixing network coding and cooperation for reliable wireless communications[J]. *IEEE Wireless Communications*,2011,18(1):15-21.
- [2] 李春国,仲崇显,杨绿溪,等. 多中继双向协作转发的分布式实现方案设计及其渐进最优性分析[J]. 通信学报,2011,32(6):45-52.
- [3] LANEMAN J N, TSE D N C, WORNELL G W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior[J]. *IEEE Trans on Information Theory*,2004,50(12):3062-3080.
- [4] WANG Hui-ming, YIN Qin-ye, XIA Xiang-gen. Full diversity space-frequency codes for frequency asynchronous cooperative relay networks with linear receivers[J]. *IEEE Trans on Communications*,2011,59(1):236-247.
- [5] WANG Hui-ming, XIA Xiang-gen, YIN Qin-ye. A linear analog network coding for asynchronous two-way relay networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*,2010,9(12):3630-3637.
- [6] ZHOU Qing, LI Yong-hui, LAU F C M, et al. Decode and forward two-way relaying with network coding and opportunistic relay selection[J]. *IEEE Trans on Communications*,2010,58(11):3070-3076.
- [7] ARGYRIOU A, PANDHARIPANDE A. Cooperative protocol for analog network coding in distributed wireless networks[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*,2010,9(10):3112-3119.
- [8] LOUIE R H Y, LI Y, VUCETIC B. Practical physical layer network coding for two-way relay channels: performance analysis and comparison[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*,2010,9(2):764-777.
- [9] HAN Y, TING S H, HO C K. Performance bounds for two-way amplify-and-forward relaying[J]. *IEEE Trans on Wireless Communications*,2009,8(1):432-439.
- [10] JANG Y U, LEE Y H. Performance analysis of user selection for multiuser two-way amplify-and-forward relay[J]. *IEEE Communications Letters*,2010,14(11):1086-1088.
- [11] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. Table of integrals, series, and products[M]. Burlington: Academic Press,2007.