

能量均衡的无线传感器网络 短路径路由算法

孙国栋¹ 廖明宏²

摘要 如何均衡地使用无线传感器网络节点的能量并产生较小的网络延迟是无线传感器网络研究的一个难点. 本文提出了一种能量均衡的无线传感器网络短路径路由算法 EB-SPR (Energy-balanced short path routing). 首先将网络构造成层次结构, 节点根据上一层邻节点能量水平并优先使用剩余能量多的节点作为下一跳来转发数据包, 这种方式有效地平衡了网络能耗, 进而提高了网络生命周期. 另外, EB-SPR 通过在路由中限制数据包在同一层被转发的次数来降低数据到达基站的跳数. 本文证明了 EB-SPR 下源数据包到达基站所经历的跳数最多为最短路径路由算法的 2 倍, 所以本文算法产生的网络延迟具有明确的上界. 模拟实验表明 EB-SPR 有效地延长了网络生命周期并能产生较小的网络延迟.

关键词 无线传感器网络, 能量均衡, 路由算法
中图分类号 TP393

Energy-balanced Short Path Routing in Wireless Sensor Networks

SUN Guo-Dong¹ LIAO Ming-Hong²

Abstract In wireless sensor networks, how to balance the energy consumption while creating small network latency is a challenge. An energy-balanced short routing algorithm, called EB-SPR, is proposed in this paper. With EB-SPR, the network is firstly built into a level structure, and then the node selects its next hop node according to its energy status and uses the hop neighbor node with the highest energy status to relay packets. This algorithm effectively balances the energy consumption among the network and prolongs the network lifetime. In addition, EB-SPR creates routing paths with the hop numbers constrained in order to obtain a short path to the sink. We also prove that the routing path length under EB-SPR is at most twice as many as that of the shortest path routing algorithm, meaning that EB-SPR has network latency with an exact upper bound. Simulation results show that EB-SPR effectively extends the network lifetime and produces a small network latency.

Key words Wireless sensor network, energy-balanced, routing algorithm

无线传感器网络^[1-2] 由具有感知、计算和通信能力的传感器节点组成, 所有节点通过自组织方式组成多到一的通信网络, 把采集到的数据通过多跳的方式发送到基站. 无线传感器网络在军事侦察、环境监测和很多商业领域都有着广阔的应用前景. 由于传感器节点能量、计算资源、通信能力和节点可靠性都是十分有限的, 所以, 有效地使用传感器节点

的有限能量来延长网络生命周期是无线传感器网络设计和应用的重要挑战. 在无线传感器网络应用中, 节点的大部分能量被消耗在数据的无线通信操作上, 设计节能的路由策略是延长网络生命周期的主要手段.

到目前为止已经相继提出了很多节能路由协议^[3-6], 它们大都通过发现单条能耗最小的路径来传输数据包以优化网络生命周期. 最小化传输能量不一定总能优化无线传感器网络生命周期^[7-8], 因为频繁地使用固定的能耗最小的路由路径会使该路径覆盖的节点过早用完它们的能量, 造成网络分解为多个不连通的子网络, 进而影响了网络 QoS 性能. 因此, 如何较均匀地使用每个传感器节点的能量成为设计无线传感器网络路由算法的一个关键. 文献 [8] 提出了一种能量敏感的路由算法, 该算法假设每个节点都知道自己和其他所有节点的位置, 在网络初始化时, 每个节点保存若干可用路由路径, 然后以通信距离为代价选择一条最优的路由路径传输数据, 基站周期性地执行 flooding 操作来为每个节点更新可用路由路径. 文献 [9] 为了降低网络通信延迟和均衡使用节点能量, 提出了一种多路最短路径路由算法 MP (Multi-path routing), 每个节点在可能的最短路由路径中随机地选择一条发送数据.

上述提出的路由算法都是基于固定路径的, 即节点一旦选择了一条路由路径, 就一直使用其进行通信, 至少是在基站发起路由更新前的一段时间内. 由于网络拓扑具有动态性, 使用固定路由路径的算法必须周期地更新路径, 而这会消耗额外的网络带宽和节点能量. MCP (Maximum capacity path routing) 和 MCP-PS (MCP with path switching)^[10] 通过从基站到网络节点逐层地交换消息给每条到达基站的路径标示能耗代价, 每个节点选择路径代价最优的下一跳节点转发数据, 数据包在每个中间节点上都可以动态地选择下一跳, 而不是使用固定的路由路径. MCP 生成最短路径路由并考虑了路径上节点的能耗代价, 但是, MCP 依然容易导致某些节点负载过重; MCP-PS 进一步均衡了网络节点能耗但不保证路由跳数是优化的, 即不能确保满足应用对网络延迟的要求. EBDD^[11] 改善了 DD 协议的网络能耗均衡性. LBMPR^[12] 假定每个传感器节点知道其他所有节点的位置, 然后通过限制转发节点的位置而形成若干能耗优化的路由路径. Singh 等^[13] 对单跳传感器网络的能量均衡使用和优化问题进行了研究. 文献 [14] 改善了传感器网络簇内的最短路径路由的能耗均衡性, 同时考虑了网络延迟.

在路由过程中尽量达到能量平衡意味着尽可能地使用剩余能量多的节点来转发数据包, 这种思想经常导致路由路径过长, 从而无法保证网络具有一个能收敛到常数级别的延迟. 很多无线传感器网络应用, 如军事和交通领域的目标跟踪传感器网络, 对网络延迟要求较高, 所以, 理想的无线传感器网络路由算法应该同时考虑优化能耗的均衡性和优化网络延迟. 上面提到的能量均衡路由算法需要较多的支撑技术或者需要由基站负责周期性地更新节点的路由路径, 另外, 它们一般不能保证得到确定的网络延迟上界. AODV 和 DSR^[15] 是为无线对等网络设计的基于最短路径 (Shortest path routing, SPR) 的路由算法, 但它们不适用于节点能量和计算资源受限、多对一通信的无线传感器网络. 本文提出了一种新的能量均衡的无线传感器网络短路径路由算法 EB-SPR (Energy-balanced short path routing), 它具有如下主要特点: 1) 每个源数据包到达基站前被传输的跳数不超过 SPR 的 2 倍; 2) 每个节点只需了解局部范围内节点的信息, 而不需要知道自身以及其他节点的位置信息; 3) 算法

收稿日期 2007-11-02 修改日期 2008-03-18
Received November 2, 2007; in revised March 18, 2008
国家自然科学基金重点项目 (60533110) 资助
Supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (60533110)
1. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院 哈尔滨 150001 2. 厦门大学国家示范性软件学院 厦门 361005
1. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001 2. National Pilot Software School, Xiamen University, Xiamen 361005
DOI: 10.3724/SP.J.1004.2008.01540

是分布式执行的, 节点不需要维护可用路由路径的完整信息, 只需根据局部信息动态地决定下一跳, 这使得它适合拓扑动态频繁变化的无线传感器网络; 4) 通过局部的消息交换或稍带, 节点就可以及时获知周围节点的能量水平, 而不需要基站周期性地更新节点的路由. 仿真实验结果表明, EB-SPR 能够产生理想的网络延迟和获得较长的网络生命周期.

1 算法设计和分析

本文假设所有传感器节点随机均匀地分布在一个矩形区域 \mathcal{A} 内并保持静态, 一个基站位于 \mathcal{A} 的右边界中点上; 所有传感器节点是同构的, 并具有相同的初始能量; 所有节点通信半径都为 r 且在网络通信中保持不变. 下面介绍本文研究中使用的相关定义.

定义 1 (传感器网络图). 在平面 \mathcal{A} 上, 如果两个传感器节点 u 和 v 之间的距离小于等于 r ($r > 0$), 那么它们之间存在一条通信链路并称 u 和 v 是邻节点; 由网络节点集 V 和节点之间的通信链路集 E 组成的图 G 称为传感器网络图 (图 1), 本文假设 G 总是连通的.

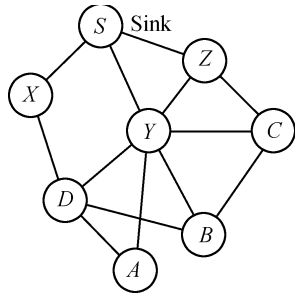


图 1 一个简单的传感器网络图

Fig. 1 A simple wireless sensor network topology

定义 2 (层次传感器网络图). 设定基站的层号为 0, 然后对 G 从基站开始进行按层遍历, 这样可以赋予每个节点一个层号 l , 称节点具有层号的传感器网络为层次传感器网络, 记为 G_l (例如, 图 2 是从图 1 得到的一个 G_l); 另外, 如果 $l_X = l_D - 1$, 则称 X 为 D 的上层节点.

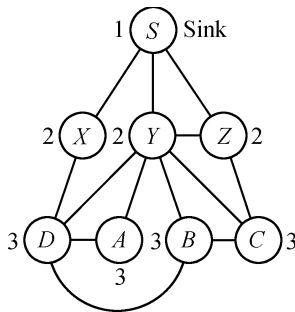


图 2 层次传感器网络图

Fig. 2 Layered sensor network topology

定义 3 (父节点). 在 G_l 中, 两个节点 u 和 v 的层号分别记为 l_u 和 l_v , 如果 $(u, v) \in E_{G_l}$ 且 $l_u = l_v - 1$, 则称 v 是 u 的父节点, u 是 v 的子节点, v 所有父节点的集合记为 $S_p(v)$.

定义 4 (兄弟节点). 在 G_l 中, 两个节点 u 和 v 的层号分别记为 l_u 和 l_v , 如果 $(u, v) \in E_{G_l}$ 且 $l_u = l_v$, 则称 v 是 u 的兄弟节点, v 所有兄弟节点的集合记为 $S_b(v)$.

定义 5 (叔父节点). 在 G_l 中的三个节点 u, v, w , 如果 $w \in S_p(u), u \in S_b(v)$ 且 $w \notin S_p(v)$, 则称 w 是 v 的叔父节点, v 所有叔父节点的集合记为 $S_u(v)$.

定义 6 (路径长度). 在 G 的一个路由方案下, 一个数据包从产生的节点处到基站所经过的边的数量.

从上述定义可以看出, G_l 没有改变 G 的节点间拓扑关系. 如图 3 所示, 容易证明, 如果每个传感器节点都只在父节点集 S_p 中选择下一跳来转发数据包, 则构成了一个 SPR 通信网络, 其中每个节点的层号就是它到基站的路径长度. 参照上述定义, 用 $E_p(v), E_b(v)$ 和 $E_u(v)$ 分别来表示节点 v 的父节点、兄弟节点和叔父节点能量水平值的集合.

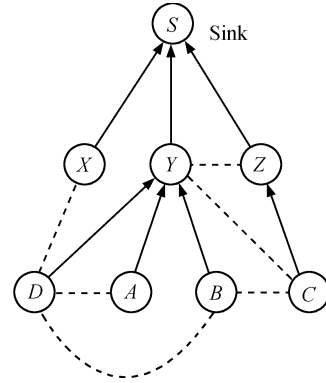


图 3 最短路径路由产生的拓扑

Fig. 3 Shortest path routing topology

1.1 算法描述

算法 EB-SPR 的基本思想为: 尽量沿着最短路由路径向基站方向发送数据包, 这样可以保证得到较小的时间延迟和整条路由路径能耗的优化; 优先使用能量水平高的节点作为转发节点, 以均衡网络能耗. 在 EB-SPR 开始执行前, 网络首先通过基站发送消息, 用类似文献 [9] 的 flooding 操作来初始化网络, 并为每个传感器节点分配一个层号. 通过局部的消息交换, 节点一般可以确定自己的 S_p, S_b 以及 E_p, E_b . 网络初始化完成以后, 节点就可以只根据获得的局部能量信息来决定下一跳. 算法 EB-SPR 的伪码描述如下.

```

1 if the packet to be sent is from  $i$ 's brother then
2   search  $E_p$  and find  $e_j \leftarrow \max\{E_p(i)\}$ 
3   send this packet to  $j$ 
4    $\alpha \leftarrow \alpha + 1$ 
5 else
6   determine subset  $E'_b(i)$  such that  $E'_b(i) \geq e_i + e_0$  and
   find  $e_j \leftarrow \max\{E'_b(i)\}$ 
7   determine subset  $E'_u(i)$  according to  $E'_b(i)$  such that
    $E'_u(i) \geq \max\{E_p(i)\} + e_0$ 
8   if  $E'_b(i) \neq \emptyset$  and  $E'_u(i) \neq \emptyset$  then
9     send this packet to  $j$ 
10  else
11    send this packet to  $k$  satisfying  $e_k \leftarrow \max\{E_p(i)\}$ 
12  end
13   $\alpha \leftarrow \alpha + 1$ 
14 end
15 if  $\alpha = T_M$  then
16   send  $M_{eng}$ 
17    $\alpha \leftarrow 0$ 
18 if  $i$  receives an  $M_{eng}$  then
19   update  $E_p(i) \cup E_b(i) \cup E_u(i)$ 
20 return
    
```

下面假设算法 EB-SPR 在节点 v 上执行. 当节点 v 要发送缓冲区内一个数据包 \mathcal{P} 时, 它首先要进行判断: \mathcal{P} 是来自兄弟节点、子节点还是自己产生的. 如果 \mathcal{P} 来自兄弟节点, v 搜索父节点能量水平集合 $E_p(v)$, 并找到能量水平最高的父节点作为下一跳, 如图 4, 节点 B 选择 Y 而不是 Z 作为下一跳来转发 \mathcal{P} , 因为 $e_Y = 20 > e_Z = 18$. 如果 \mathcal{P} 是 v 自己产生的或者是来自它的某个子节点, v 首先搜索 $E_p(v)$ 和 $E_b(v)$, 并计算一个 $E_b(v)$ 的子集 $E'_b(v) = \{e_i | i \in S_b(v) \text{ 并且 } e_i \geq \max\{E_p(v)\} + e_0\}$, 其中, e_0 表示发送一个数据包所需要的能量. 若 $E'_b(v)$ 非空, 它就继续计算一个 $E_u(v)$ 的子集 $E'_u(v) = \{e_j | j \in S_u(v) \text{ 并且 } j \text{ 是 } E'_b(v) \text{ 中某些节点的父节点}\}$. 若 $E'_b(v)$ 和 $E'_u(v)$ 非空, 说明至少存在 v 的一个兄弟节点 u 和 u 的父节点 w , 使得它们的能量水平比 $\max\{E_p(v)\}$ 高出至少 e_0 , 此时 u 把 \mathcal{P} 发给能量水平最高的一个兄弟节点 j , 而 j 也必然能找到能量水平比 $\max\{E_p(v)\}$ 高的下一跳节点. 如图 4, 节点 A 选择兄弟节点 D 作为下一跳来转发 \mathcal{P} , 然后 D 再把 \mathcal{P} 转发给 X . 这种优先使用能量水平高的兄弟节点和叔父节点的路由转发方式节省了 v 父节点的能量, 进而均衡了网络能耗. 若 $E'_u(v)$ 空, 此时即使 $E'_b(v)$ 非空, v 仍然从父节点中选择下一跳.

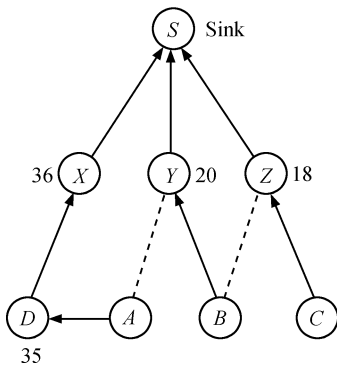


图 4 EB-SPR 产生的路由

Fig. 4 Routing topology created by EB-SPR

算法 EB-SPR 要求节点周期性地向邻节点广播自身的能量水平消息 $M_{eng}(ID, e)$, 同时每个节点也要更新 E_p 、 E_b 、 E_u , 以便能及时、正确地选择下一跳节点. 由于 EB-SPR 的消息交换只在局部进行, 而以往算法一般都要由基站发起路由更新, 所以本文算法具有较低的维护代价和较小的时间延迟. 这里要解决的关键问题有两个: 1) 如何令一个节点获知叔父节点的能量水平信息; 2) 如何确定节点广播 M_{eng} 的周期. 如果一个节点在 M_{eng} 中还包含了自身所有邻节点的能量水平信息, 那么可以确保网络中每个节点都可以知道其叔父节点的能量水平 (如果存在的话), 但此时 M_{eng} 的尺寸为 $O(n)$, 这可能远远超过了数据包尺寸. 如果节点提高发送功率使 M_{eng} 能覆盖到一跳以外的节点, 这不仅增加了节点硬件成本, 还会对其他节点的无线通信操作造成过多的干扰, 从而导致网络吞吐量下降. 本文采取的办法是: 每个节点在广播的 M_{eng} 中除了包含自身的能量水平外, 只包含一个拥有最高能量水平的邻节点信息, 此时 $M_{eng} = (ID, e, ID_{max}, e_{max})$. 这样, v 只需判断在 $E'_b(v)$ 非空的情况下是否存在一个叔父节点, 其能量水平高于自己的所有父节点能量水平, 而不再需要搜索 $E'_b(v) \times E_u(v)$ 来确定 $E'_u(v)$. 容易知道, 算法 EB-SPR 依然可以正确地选择下一跳路由, 而且把消息尺寸降到 $O(1)$, 同时还节省了节点的存储空间并

降低了计算量. 在本文算法下, 节点周期性地向一跳邻居广播 M_{eng} , 本文规定一个阈值 T_M 来表示数据包个数, 节点每发送完毕 T_M 个数据包就广播 M_{eng} . T_M 大小的设定对于节点能否及时地获知其邻节点的能量水平较为重要; 同时 M_{eng} 也会占用额外的带宽和能量. 事实上, 一种可以代替周期性广播操作的有效方法是捎带 (Piggyback) 技术. 在使用 ACK 握手策略的 MAC 算法^[16] 下, 比如 IEEE 802.11, 当节点 d 接收完一个数据包时, 它要发送 ACK 到上一跳节点 s , 因此 d 可以在该 ACK 中加入关于 M_{eng} 的字段, 这样 d 的邻节点一般能捕获该 ACK, 进而能及时地获知 d 的能量水平. 另外, 在没有 ACK 支持的网络中, 在数据包中加入关于 M_{eng} 的字段, 可以达到同样的效果. 对于事件发生频率较高或者网络流量较大的传感器网络应用, 捎带 M_{eng} 的方法比较有效, 因为它可节省网络能耗和带宽, 并降低网络延迟; 而对于事件发生频率较低的应用, 使用节点周期性广播 M_{eng} 的方法较为合适, 因为每个邻节点不必像捎带方法那样要缓存每个串听到的 ACK 消息或数据包, 进而可提高网络的有效吞吐量.

1.2 算法分析

下面通过三个定理, 证明本文算法 EB-SPR 的复杂度和所产生网络延迟的有界性.

定理 1. EB-SPR 产生的路由路径长度不超过 SPR 的 2 倍.

证明. 如图 5 所示, 假设 $k \geq 2$ 且 $l_D = l_B = k$, $l_X = l_Y = l_P = k - 1$, $l_Q = k - 2$, 那么在 SPR 下, 任一节点 B 到基站的路由路径长度为 k . 在算法 EB-SPR 下, B 的数据包从第 k 层到第 $k - 1$ 层的两种可能路线为: $B \rightarrow Y$, 然后由 Y 转发该数据包; $B \rightarrow D \rightarrow X$, 然后由 X 转发该数据包. 由算法 EB-SPR 可知, EB-SPR 对转发兄弟节点数据包的策略进行了限制, 即一个数据包不能在同一层上被转发两次, 所以每个数据包到达上一层时最多经历两跳, 所以 B 的数据包到达基站时最多经历 $2k$ 跳. \square

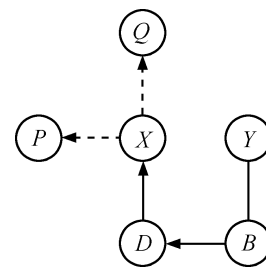


图 5 EB-SPR 下一跳选择方式

Fig. 5 Ways to select next hop in EB-SPR

定理 2. EB-SPR 的计算复杂度不超过 $O(n^2)$.

证明. 对 n 个节点均匀分布在面积为 s 的无线传感器网络, 每个传感器节点的邻节点个数 m 的期望 $E(m) = n\pi r^2/s = O(n)$. 对于算法 EB-SPR, 考虑如下两种情况: 1) M_{eng} 包含节点自身能量水平和所有父节点的能量水平. 它要维护三个集合 E_p 、 E_b 、 E_u , 并且要记录兄弟节点和叔父节点是否存在, 又因为 $|E_b| < m$ 、 $|E_u| \leq m|E_b|$, 所以 EB-SPR 的空间复杂度为 $O(n^2)$. 由算法 EB-SPR 可知, 该算法通过搜索 E_b 来确定 E'_b , 并找到能量水平最高的兄弟节点, 这需要 $O(n)$ 时间; 通过搜索 $E'_b \times E_u$ 来确定 E'_u , 这需要 $O(n^2)$ 时间; 另外, 算法更新 E_p 、 E_b 、 E_u 所用时间为 $O(n)$. 2) M_{eng} 只包含节

点自身能量水平和最高的父节点能量水平. 此时节点 v 只需要维护两个集合 $E_p(v)$ 和 $E_{bu}(v) = \{(e_i, e_j) | i \in E_b(v) \text{ 并且 } e_j = \max\{E_p(i)\}\}$; 节点 v 最多同时搜索 $E_p(v)$ 和 $E_{bu}(v)$ 就能决定下一跳, 并且有 $E_{bu}(v) \leq E'_b(v) < m$, 所以算法 EB-SPR 的时空复杂度为 $O(n)$. 综上, EB-SPR 在不同的实现方式下, 其时空复杂度不超过 $O(n^2)$. \square

定理 3. EB-SPR 的网络消息复杂度为 $O(n)$.

证明. 在 EB-SPR 可以执行之前, 网络需要进行遍历来给每个节点分配一个层号, 每个节点被访问一遍并且在网络运行期间每个节点只被遍历一次, 所以遍历操作消息复杂度为 $O(n)$. 如果每个传感器节点周期性地向一跳邻节点广播包含自己能量水平的消息 M_{eng} , 则每个周期网络内广播 $O(n)$ 个消息. 综上, 其网络消息复杂度为 $O(n)$. \square

2 模拟实验

本节对本文提出的能量均衡的短路径路由算法 EB-SPR 与 SPR 和 MP 在网络生命周期和网络延迟两个方面进行了比较, 评价指标分别为网络中首次出现节点能量耗尽的时间和数据包平均路由路径长度. MAC 层采用类似 802.11DCF 的算法, 并且在 ACK 中稍带发送节点的能量信息. 模拟实验包含 100 个传感器节点, 随机均匀分布在一个 200×200 正方形区域 \mathcal{A} 内, 基站位于 \mathcal{A} 的右边中点上. 节点无线通信半径 $r = 40$, 节点初始能量为 10 J. 每次实验开始时随机选择 k 个节点作为源节点, $k \leq 100$. 将网络运行时间划分为周期, 所有源节点在一个周期内发送 100 个 64 byte 的数据包, 然后在下一周期开始前重新选择 k 个源节点. 假设节点每发送一个数据包消耗 10^{-4} J, 节点计算和接收数据包不消耗能量. 在 SPR 初始化时, 节点选择 ID 最小的父节点作为下一跳转发节点, 并且每条路由路径在网络运行中保持不变. EB-SPR 初始化时采用从基站开始的 flooding 操作作为每个节点赋予一个层号.

从图 6 的实验结果可以看出, 随着源节点个数 k 的增加, EB-SPR 的网络生命周期一直大于 MP 和 SPR. 与 SPR 和 MP 不同, EB-SPR 下每条路由路径不一定是总能耗最低的, 但是 EB-SPR 会优先使用能耗多的父节点或兄弟节点作为下一跳转发节点, 从而有效地均衡了网络能耗并延长了网络生命周期. 由于 MP 选择最短路径进行路由, 所以这里只比较 EB-SPR 和 SPR 的数据包平均路由路径 (图 7). SPR 下的源数据包到基站的路由路径长度接近 5, 由于节点随机均匀分布, 节点到基站距离和最小跳数的期望值是固定的. EB-SPR 的路由路径长度都没有超过 10, 而且随着源节点个

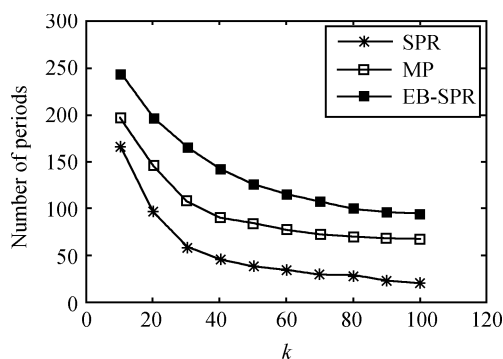


图 6 三个算法下的网络生命周期比较

Fig. 6 Comparison of lifetime among SPR, MP, and EB-SPR

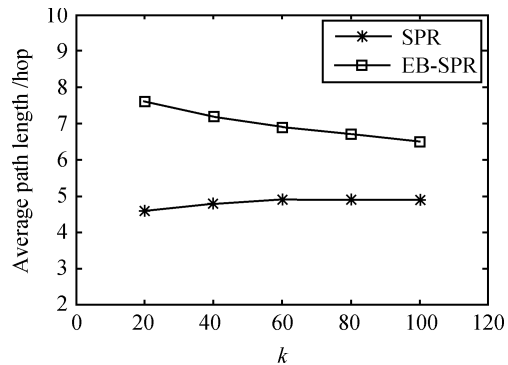


图 7 两种算法下的平均路由路径长度比较

Fig. 7 Comparison of path lengths of EB-SPR and SPR

数的增多而略保持下降的趋势. EB-SPR 虽然产生了比 SPR 高的网络延迟, 但是都能被控制在 SPR 的 2 倍幅度以内.

3 结束语

本文提出了一种能量均衡的无线传感器网络短路径路由算法 EB-SPR. 每个节点考虑所有可能的下一跳节点的能量水平等因素, 并通过局部消息交换动态地决定下一跳节点, 而且, EB-SPR 不需要全局信息和周期性的网络更新操作, 节省了网络的能耗和带宽. EB-SPR 虽然不一定能够产生总能耗最小的路由路径, 但却均衡地使用了节点的能量, 提高了网络生命周期. 另外, 由于对数据包被转发的情况进行了限制, 所以 EB-SPR 产生的网络延迟具有明确的上界. 模拟实验结果表明, EB-SPR 进一步提高了网络生命周期并产生了较小的网络延迟.

References

- 1 Akyildiz I F, Su W L, Sankarasubramaniam Y, Cayirci E. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 2002, **40**(8): 102–114
- 2 Tubaishat M, Madria S. Sensor networks: an overview. *IEEE Protentials*, 2003, **22**(2): 20–23
- 3 Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D, Heidemann J, Silva F. Directed diffusion for wireless sensor networking. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, **11**(1): 2–16
- 4 Heinzelman W R, Chandrakasan A, Baladrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. In: Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: IEEE, 2000. 3005–3014
- 5 Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: power-efficient gathering in sensor information systems. In: Proceedings of IEEE Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2002. 1125–1130
- 6 Ye F, Luo H Y, Cheng J, Lu S W, Zhang L X. A two-tier data dissemination model for large-scale wireless sensor networks. In: Proceedings of the 8th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Atlanta, USA: ACM, 2002. 148–159
- 7 Chang J H, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, **12**(4): 609–619

- 8 Shah R C, Rabaey J M. Energy aware routing for low energy Ad Hoc sensor networks. In: Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, USA: IEEE, 2002. 350–355
- 9 Hong X Y, Gerla M, Wang H B, Clare L. Load balanced, energy-aware communications for mars sensor networks. In: Proceedings of Aerospace Conference. Montana, USA: IEEE, 2002. 1109–1115
- 10 Huang S C, Jan R H. Energy aware, load balanced routing schemes for sensor networks. In: Proceedings of the 10th International Conference on Parallel and Distributed Systems. Newport Beach, USA: IEEE, 2004. 419–425
- 11 Hu Ning, Zhang De-Yun. Energy balance routing in wireless sensor networks. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2006, **40**(6): 676–680
(胡宁, 张德运. 无线传感器网络的能量平衡路由. 西安交通大学学报, 2006, **40**(6): 676–680)
- 12 Huang Liu-Sheng, Li Hong, Xu Hong-Li, Wu Jun-Min. A load balancing multi-path routing in wireless sensor networks. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, **36**(8): 887–892
(黄刘生, 李虹, 徐宏力, 吴俊敏. 无线传感器网络中基于负载均衡的多路路由. 中国科技大学学报, 2006, **36**(8): 887–892)
- 13 Singh M, Prasanna V K. Energy-optimal and energy-balanced sorting in a single-hop wireless sensor network. In: Proceedings of the 1st IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Texas, USA: IEEE, 2003. 50
- 14 Youssef M A, Younis M F, Arisha K A. A constrained shortest-path energy-aware routing algorithm for wireless sensor networks. In: Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference. Orlando, USA: IEEE, 2002. 794–799
- 15 Ramanathan S, Steenstrup M. A survey of routing techniques for mobile communications networks. *Mobile Networks and Applications*, 1996, **1**(2): 89–104
- 16 Zheng Guo-Qiang, Li Jian-Dong, Zhou Zhi-Li. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2008, **34**(3): 305–316
(郑国强, 李建东, 周志立. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展. 自动化学报, 2008, **34**(3): 305–316)

孙国栋 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院博士研究生. 主要研究方向为无线传感器网络. 本文通信作者.

E-mail: sunguodong@hit.edu.cn

(SUN Guo-Dong Ph.D. candidate at the School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology. His main research interest is wireless sensor networks. Corresponding author of this paper.)

廖明宏 博士, 教授. 主要研究方向为网络智能技术, 智能嵌入式软件, 普适计算.

E-mail: liao@hit.edu.cn

(LIAO Ming-Hong Ph.D., professor at the National Pilot Software School, Xiamen University. His research interest covers network intelligent technology, intelligent embedded software, and pervasive computing.)