

延长实时无线传感器网络生命周期的能量平衡路由

赵保华^{1,2}, 李培龙^{1,2}, 高存皓^{1,2}, 周颢^{1,2}

(1. 中国科学技术大学计算机科学与技术系, 230027, 合肥; 2. 安徽省计算与通讯软件重点实验室, 230027, 合肥)

摘要: 为了延长实时无线传感器网络的生命周期, 在二阶段定向扩散协议(DD)的基础上, 设计了一种实时路由协议(EBR)。该协议可收集到所有的、通过接收器节点发送的兴趣信息的实时路径立体空间测量误差(MPE)值, 源节点通过选择最优的 MPE 值来决定探测数据信息的发送路径, 这样接收器节点最终得到的数据传输路径可满足路由实时性要求, 同时保持网络的全局能量平衡。仿真实验表明, EBR 的全局能量平衡能力优于 DD, 并能有效延长网络的生命周期。在同等条件下, EBR 提供的网络实时服务时间比 DD 多 4.37%, 采用 EBR 的网络生命周期比 DD 长 44.6%。

关键词: 无线传感器网络; 实时服务; 路由协议; 全局能量平衡

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1137-05

Prolonging Lifecycle of Energy Balance Routing in Real-Time Wireless Sensor Networks

Zhao Baohua^{1,2}, Li Peilong^{1,2}, Gao Cunhao^{1,2}, Zhou Hao^{1,2}

(1. Department of Computer Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Anhui Province Key Laboratory of Software in Computing and Communication, Hefei 230027, China)

Abstract: To prolong the lifecycle of real-time wireless sensor networks, a real-time routing protocol (EBR) was designed based on two phases directed diffusion (DD). EBR can receive all real time paths' MPE of interest messages sent by receiver nodes. The sending node determines the sending path of exploratory data message through selecting the optimal MPE value. Thus, the final obtained path of receiver node for data transfer can satisfy the demands of real-time application while keeping the network global energy balance. Simulation results show that EBR outperforms DD in global energy balance ability and can efficiently prolong the network lifecycle. The real-time service time provided by EBR is 4.37% more than DD and the network lifecycle is 44.6% longer than DD under the same conditions.

Keywords: wireless sensor network; real-time service; routing protocol; global energy balance

在无线传感器网络(WSN)中,节点通常采用容量有限的电池提供能量,所以在设计路由协议时节能是首要考虑的因素。为了避免“热点区域”现象,设计协议还需考虑节点的全局能量平衡,以使网络达到最大的生命周期。目前,已有的相关路由协议

可满足上述要求,如将邻近空闲节点用繁忙节点代替,以使节点能量消耗达到均衡^[1],或以线性规划为基础的基于链路成本的最短成本路由算法^[2],其能量平衡路由(EBDD)^[3]在路由建立阶段收集多条路径信息,并通过调整权值来平衡最小传输能量路由

和最大化最小节点剩余能量路由,以达到网络能耗均匀分布。

但是,上述路由并未考虑路径的实时性,所以它们无法应用到实时 WSN 之中。为此,本文对二阶段定向扩散协议(DD)^[4-5]进行了扩展,设计了一种考虑全局能量平衡的实时路由协议(EBR)。该协议首先获取网络中的路径信息,根据收集到的路径信息计算并选择数据的传送路径,这样 WSN 的能量分布较为均衡,并可延长网络的实时服务时间和生命周期。

1 问题描述

将无线传感器网络建模为无向连通图 $G(V, L)$,其中 V 是传感器节点集合, L 是节点间通信链路集合,那么可用 $l(i, j) \in L$ 表示连接节点 i 和节点 j 的无线链路(假设其可以双向通信),用 E_i 表示节点的当前能量值。若 $P(i, j)$ 表示在节点 i 到节点 j 的所有路径集合, $P(i, j)$ 中的第 k 条路径记为 $P_k(i, j)$,则该路径长度记为 $L_{P_k}(i, j)$, $P_k(i, j)$ 上所有节点的集合(不包含 i, j)记为 $N_{P_k}(i, j)$, $P_k(i, j)$ 上所有节点能量的集合(不包含 i, j)记为 $E_{P_k}(i, j)$, $E_{P_k}(i, j) = \{E_i \mid i \in N_{P_k}(i, j)\}$ 。

定义 1 $P_k(i, j)$ 上所有节点(不包含 i, j)能量中的最小值称为 $P_k(i, j)$ 的立体空间测量误差(MPE)值^[6],记为 $e_{\text{MPE}k}^l(i, j)$,则 $e_{\text{MPE}k}^l(i, j) = \min(E_{P_k}(i, j))$ 。

定义 2 $P(i, j)$ 中所有 $L_{P_k}(i, j) \leq l$ 的最大路径 MPE 值记为 $B_{\text{MPE}}^l(i, j)$,则 $B_{\text{MPE}}^l(i, j) = \max(\{e_{\text{MPE}k}^l(i, j) \mid 0 < k \leq |P(i, j)|, L_{P_k}(i, j) \leq l\})$ 。

指定节点 i 和节点 j 分别为无线传感器网络中的源节点 S 和接收器节点 s ,则定义如下规则。

规则 1 从 S 到 s ,满足条件 $L_{P_k}(i, j) \leq \text{MAX_LEN}$ 的路径 $P_k(i, j)$ 才能满足路由的实时性要求。

规则 2 在 $P(i, j)$ 中,应尽可能选择 MPE 值更大的路径。

路由协议设计的目的是,在网络中选择一条从 S 到 s 的最优路径,这条路径既满足实时性要求,又能最大限度地保持网络的全局能量平衡^[7]。根据以上 2 个规则,协议设计的目的可以抽象为:在图 G 的 $P(i, j)$ 中,选择一条满足以下 2 个条件的 $P_k(i, j)$,即

$$\begin{aligned} L_{P_k}(i, j) &\leq \text{MAX_LEN} \\ e_{\text{MPE}k}^l(i, j) &= B_{\text{MPE}}^{\text{MAX_LEN}}(i, j) \end{aligned}$$

2 路由协议设计

路由协议是基于二阶段 DD^[1-2]设计的,二阶段 DD 的协议过程可以参见文献[1],而 EBR 对二阶段 DD 进行了扩展,即:在第一阶段的兴趣信息 iMsg 扩散时期,由 S 收集所有有效路径的长度和路径 MPE 值,然后 S 根据第 1 节中的定义 2 计算 $B_{\text{MPE}}^{\text{MAX_LEN}}(i, j)$,而在探索数据扩散时期将探索数据信息扩散至满足条件 $E_n \geq B_{\text{MPE}}^{\text{MAX_LEN}}(i, j)$ 的节点 n ;在第二阶段, s 在所有收到的探索数据信息标识的路径中选择一条跳数最小的路径,然后向其回复加强兴趣信息 rMsg。

2.1 路径信息收集

在扩散过程中,iMsg 可以经历从 s 到 S 的所有有效路径,所以可以使用 iMsg 来记录需要收集的路径信息。需要收集的路径信息包括路径的跳数和路径的 MPE 值,为此在 iMsg 中扩展 3 个域:pLen、pMPE 和 MAX_LEN。pLen 用来记录 iMsg 经过的跳数,记为 J_{pLen} ;pMPE 用来记录 iMsg 经过路径的 MPE 值,记为 E_{pMPE} ;MAX_LEN 记录由 s 指定的数据传输路径的最大跳数。

当网络内部节点收到 iMsg 时,将其 pLen 加 1,然后根据第 1 节中的定义 1 和当前节点的能量值来更新 iMsg 中的 pMPE 值。当 S 收到 iMsg 时,只将其 pLen 加 1,然后记录下该 iMsg 的 pLen、pMPE 和 MAX_LEN。

2.2 $B_{\text{MPE}}(i, j)$ 值的生成

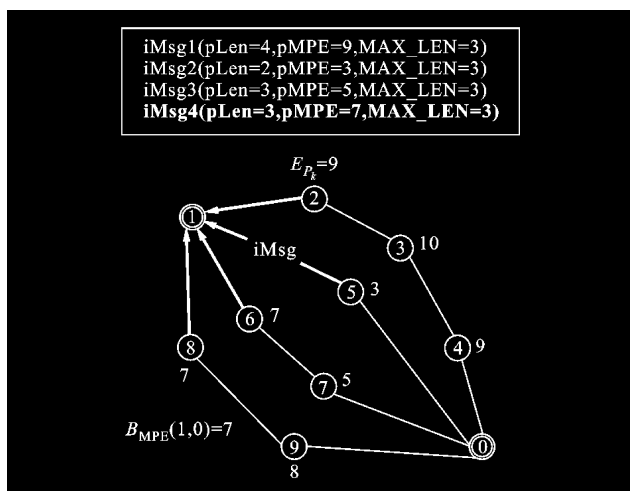
通过扩散 iMsg, S 可以收集到从 s 到 S 的 $P(i, j)$ 中所有有效路径的 $L_{P_k}(i, j)$ 和 $E_{P_k}(i, j)$,其中 $0 < k \leq |P(i, j)|$ 。为了选取最优的数据传输路径, S 需要根据收集到的信息和第 1 节中的定义 2 计算最优的 $B_{\text{MPE}}^{\text{MAX_LEN}}(i, j)$ 。

图 1 是 $B_{\text{MPE}}(i, j)$ 的一个计算实例,从图中可以看出, S_1 与 s_0 之间存在 4 条路径。在 iMsg 扩散时期, S 得到的 MAX_LEN=3,并且收集到包含这 4 条路径长度和 MPE 值的 iMsg,如图中的 iMsg1~iMsg4 所示。 S 需要求得 $B_{\text{MPE}}^3(1, 0)$ 的值,即 S 首先在所有 $\text{pLen} \leq 3$ 的 iMsg 中选择拥有最大 pMPE 值的 iMsg4,然后选择 $\text{pMPE}=7$ 的作为 $B_{\text{MPE}}^3(1, 0)$ 。

在网络中,当不存在从 S 到 s 满足实时性要求的路径时,得到的 $B_{\text{MPE}}^{\text{MAX_LEN}}(i, j)=0$,此时的 EBR 协议会选择一条最短路径来传输数据。

2.3 最优路径选择

当得到 $B_{\text{MPE}}(i, j)$ 值之后, S 即开始发送探索



① ~ ⑨: 节点; 节点边的数字: 节点的剩余能量值

图 1 $B_{MPE}(i, j)$ 的生成

数据信息 eMsg. 求得 $B_{MPE}(i, j)$ 值的目的是为了指引 eMsg 只被扩散到剩余能量大于等于 $B_{MPE}(i, j)$ 值的节点. 为此, 在 eMsg 中扩展 2 个域, 即 pLen 和 $B_{MPE}(i, j)$, 其中 pLen 用来记录 eMsg 经过的跳数, $B_{MPE}(i, j)$ 用来记录自身的最优值.

网络内部节点收到 eMsg 时, 如果自身的能量值大于等于 eMsg 中的 $B_{MPE}(i, j)$ 值, 则将 pLen 加 1 后继续将该 eMsg 扩散到其他的邻居节点. 最终, s 收到的 eMsg 均是在 $B_{MPE}(i, j)$ 值的指引下沿着 MPE 值较大的路径到达的. 在探索数据信息扩散结束后, s 便收集到了从 S 到 s 的满足 $e_{MPE_k}(i, j) \geq B_{MPE}(i, j)$ 的所有路径, 并且得到了这些路径的跳数 pLen. s 从中选择 pLen 最小的 eMsg 标识的路径作为数据传输路径, 并记录此 eMsg 为 optMsg.

当 eMsg 中的 $B_{MPE}(i, j) > 0$ 时, s 节点必然选择了一条最优路径, 证明如下.

根据第 1 节的描述, 最优路径是指从 S 到 s 在所有满足实时性的路径中 MPE 值最大的路径. 根据 2.2 节的处理方式可知, 当 $B_{MPE}(i, j) > 0$ 时, 网络中必然存在最优路径, 最优路径集合为 $P^0(i, j) = \{P_k(i, j) \mid e_{MPE_k}(i, j) = B_{MPE}^{MAX_LEN}(i, j), L_{P_k}(i, j) \leq MAX_LEN, 1 \leq k \leq |P(i, j)|\}$, $P^0(i, j)$ 不为空集. 根据定义 2 可以得到路径集合 $P^N(i, j) = \{P_k(i, j) \mid e_{MPE_k}(i, j) > B_{MPE}^{MAX_LEN}(i, j), L_{P_k}(i, j) \leq MAX_LEN, 1 \leq k \leq |P(i, j)|\}$ 必然为空集.

在本文中, s 选择的路径 $P_0(i, j)$ 是路径集合 $P^E(i, j) = \{P_k(i, j) \mid e_{MPE_k}(i, j) \geq B_{MPE}^{MAX_LEN}(i, j), 1 \leq k \leq |P(i, j)|\}$ 中路径长度 $L_{P_k}(i, j)$ 为最小的路径. 定义路径集合 $P^L(i, j) = \{P_k(i, j) \mid e_{MPE_k}(i, j)$

$\geq B_{MPE}^{MAX_LEN}(i, j), L_{P_k}(i, j) > MAX_LEN, 1 \leq k \leq |P(i, j)|\}$, 则可得 $P^E(i, j) = P^L(i, j) + P^0(i, j) + P^N(i, j) = P^L(i, j) + P^0(i, j)$. 由于 $P^L(i, j)$ 中的路径长度均大于 $P^0(i, j)$ 中的路径长度且 $P^0(i, j)$ 不为空集, 所以在本文中 $P_0(i, j) \in P^0(i, j)$ 是 s 选择的一条最优路径.

探索数据信息扩散的过程如图 2 所示. 若获得了 $B_{MPE}^3(1, 0)$ (见图 1), 则探索数据只需扩散到剩余能量大于等于 7 的节点上, 能量值小于 7 的节点⑤和节点⑦将无法收到探索数据. 最终, s 收到了 2 个 eMsg, 长度分别为 4 和 3, 而 s 选择长度最小的 eMsg2 标识的路径作为最优路径.

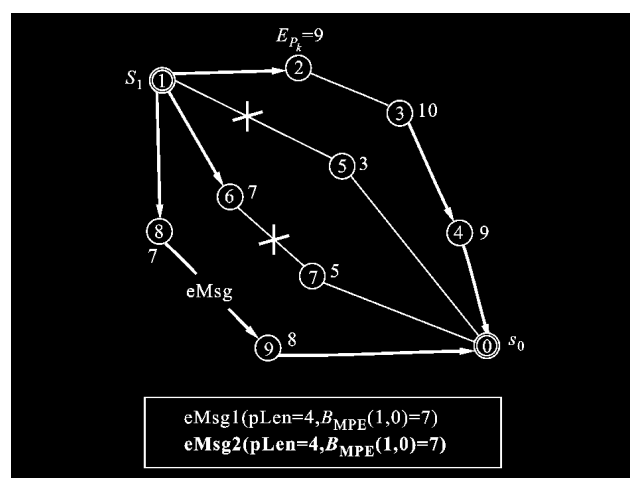


图 2 最优路径选择

2.4 最优路径生成

s 将 rMsg 发送给 optMsg 指定的上一跳邻居, 并更新最优路径上节点的梯度信息. 当 optMsg 到达 S 时, 即形成一条从 S 到 s 的最优数据传输路径, S 发出的数据信息将沿此最优路径发送到 s .

3 仿真实验

本文在 NS2 中实现了 EBR 机制, 并对其性能与 DD 进行了比较. 仿真环境为: 在长 $Y=2$ km、宽 $X=2$ km 的正方形区域随机散布 225 个节点、1 个 S 和 1 个 s . S 以 0.05 s 的间隔发送 128 B 的数据. 节点传输范围为 300 m, 发送能耗为 0.660 W, 接收能耗为 0.395 W, 空闲能耗为 0.035 W. MAC 层采用 802.11 协议, 节点队列长度为 50 个最大包长, 信道传输速率为 2 Mb/s. EBR 中的最大跳数限制为 13.

3.1 节点能耗分布比较

DD 在运行至 3 000 s 时, 所有节点的能耗如图

3所示.由于DD选择从 S 到 s 的最短路径作为数据传输路径,所以绝大多数的能耗都集中在从 S 到 s 的狭长地带,其他区域的能耗很少,可见网络能耗极为不均衡. EBR运行至相同时间时的节点能耗如图4所示,从中看出EBR在满足路径实时性的条件下选择了MPE值最大的路径作为数据传输路径,所以EBR的节点能耗分布比较均匀,在网络中节点的能量处于平衡状态.

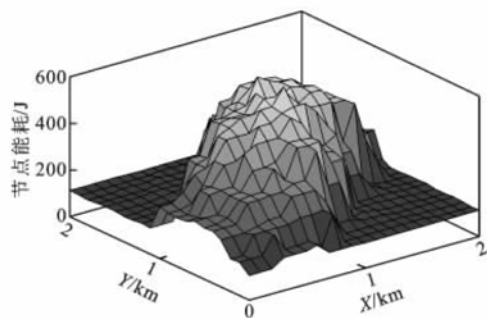


图3 DD的节点能耗分布

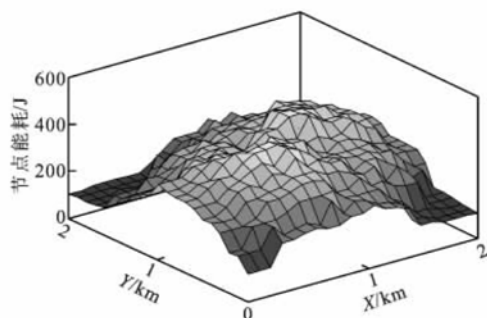


图4 EBR的节点能耗分布

3.2 实时服务时间比较

由于EBR的跳数限制为13,故网络的实时服务时间即为 S 到 s 在跳数不大于13的路径上的运行时间. DD的路径跳数与网络运行时间 t 的关系如图5所示,从中可以看出,DD最初选择的路径是最

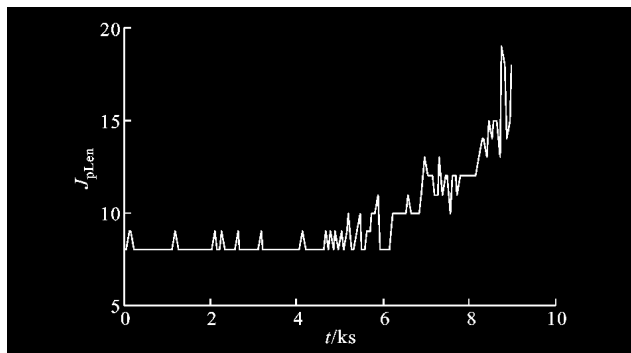


图5 DD的路径跳数与网络运行时间的关系

短的,而随着最短路径上节点的不断死亡,它所选择的路径将逐渐变长,直至路径长度超过13,最终DD提供的实时服务时间为8 283 s. EBR的路径跳数与 t 的关系如图6所示,从中可以看出,EBR每次选择了跳数不大于13且MPE值最大的路径,直到跳数不大于13的所有路径都因为节点的死亡而失效,则此后EBR选择的路径跳数会迅速增加,最终EBR提供的实时服务时间为8 645 s.可见,EBR更优秀,它提供的实时服务时间比DD多了4.37%.

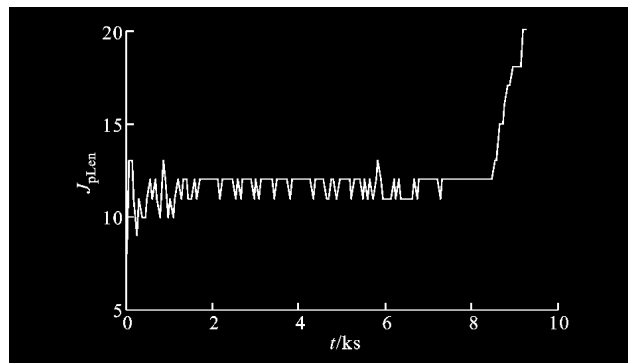


图6 EBR的路径跳数

3.3 网络生命周期比较

网络生命周期一般定义为从网络开始运行到第1个节点能量耗尽的时间. EBR和DD选择的路径MPE值的变化如图7所示,从中可以看出,DD选择的路径MPE值下降得比较迅速,在第5 869 s时由于选择的路径MPE值过低而导致在数据传输的过程中出现了第1个能量耗尽的节点,而EBR选择的路径MPE值下降得比较缓慢,直到第8 486 s才出现了第1个能量耗尽的节点.可见,EBR提供了更长的网络生命周期,比DD的网络生命周期延长了44.6%.

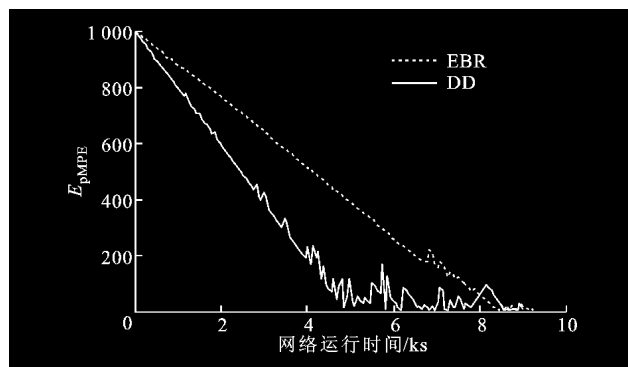


图7 EBR和DD选择的路径MPE比较

4 结论

本文为了在实时无线传感器网络中实现能量平

衡并延长其网络生命周期,扩展了二阶段定向扩散协议的路由协议,并设计了一种可以应用于实时无线传感器网络、且能够达到全局能量平衡的路由协议.该协议通过路径信息收集、BMPE 值生成、最优路径选取、最优路径生成 4 个阶段来获得一条最优的数据传输路径.仿真实验表明,EBR 比 DD 取得了更优的全局能量平衡,在同等条件下,EBR 比 DD 提供了更长的网络实时服务时间和网络生命周期.

参考文献:

- [1] Ding Wei, Iyengar S S, Kannan R, et al. Energy equivalence routing in wireless sensor networks [J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2004, 28 (8):467-475.
- [2] Chang J H, Tassiulas L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2004, 12 (4):609-619.
- [3] 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.
- [4] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion for wireless sensor networking [J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2003, 11(1):2-16.
- [5] Silva F, Heidemann J, Govindan R, et al. Directed diffusion, ISI2TR220042586 [R]. Los Angeles, USA: USC/Information Sciences Institute, 2004.
- [6] Chen Min, Kwon T, Choi Y H. Energy-efficient differentiated directed diffusion (EDDD) in wireless sensor networks[J]. *Computer Communications*, 2006, 29: 231-245.
- [7] Liu Hengchang, Zhao Baohua. A near-optimal optimization algorithm for link assignment in wireless ad-hoc networks [J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2006, 21(1):89-94.

(编辑 苗凌)

西安交通大学基础医学、力学中心被评为省级实验教学示范中心

陕西省第三批省级实验教学示范中心的评审工作结束,我校医学院的基础医学实验教学中心和航空航天的力学实验教学中心经评审成为省级实验教学示范中心.本次省教育厅组织专家对 28 所高校报送的物理、化学、生物等 16 个学科别类 54 个实验中心进行了评审,24 个实验教学示范中心通过评审.由教务处牵头,在重条处、重点办、人事处及各学院的大力协助下,省教育厅专家完成了对我校申报的 5 个实验中心的综合评审,并给予较高评价.

实验教学示范中心建设工作是《教育部、财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》(教高[2007]1 号)的重要内容,也是提升高等学校办学水平和教育质量的重要举措.同时,实验教学示范中心建设状况也是高等学校教学评估的重要内容,有助于提高实验教学质量,提升学生实践能力、创新能力的培养水平.

截至目前为止,陕西共有国家级教学实验示范中心 6 个,省级教学实验示范中心 63 个,其中我校拥有国家级教学实验示范中心 2 个,省级教学实验示范中心 6 个,具体如下.

国家级:工科物理教学实验示范中心;电工电子教学实验示范中心.

省级:工科物理教学实验示范中心;电工电子教学实验示范中心;计算机教学实验示范中心;工程训练中心;医学基础教学实验示范中心;力学教学实验示范中心.

(教务处)