

无线传感器网络中的能效优化路由算法*

彭利民^{1,2}, 刘浩²

(1. 广州体育学院 计算机应用教研室, 广州 510500; 2. 华南理工大学 计算机科学与工程学院, 广州 510641)

摘要: 根据无线传感器网络节点能量消耗和网络生存周期的特点, 通过建立动态规划能量优化模型, 在路由总能耗满足能量阈值约束条件下, 均衡消耗网络中各节点能量, 在此基础上提出一种适合无线传感器网络的动态规划路由算法。仿真结果表明, 提出的路由算法能充分地利用有限的能量资源, 较大地延长网络生存周期并降低节点的平均能耗。

关键词: 无线传感器网络; 动态规划; 路由; 网络生存周期

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2010)06-2198-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2010.06.057

Energy-efficient routing algorithm for wireless sensor networks

PENG Li-min^{1,2}, LIU Hao²

(1. Computer Application Teaching Department, Guangzhou Sport University, Guangzhou 510500, China; 2. School of Computer Science & Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: According to the characteristic of nodes' energy consuming and network lifetime in the wireless sensor networks, the paper proposed a dynamic programming model for energy-optimizing. Under the constraint of the total energy-consuming, which was less than the energy threshold value, presented a routing algorithm based on dynamic programming model, which made the network nodes' energy consuming uniformly during routing from source to destination. Simulation results show that the proposed routing algorithm can utilize the limited energy resources rationally, and prolong the network lifetime and decrease the average energy consumption effectively.

Key words: wireless sensor networks (WSN); dynamic programming; routing; network lifetime

0 引言

无线传感器网络通常运行在人无法接近的恶劣或危险的远程环境中, 电源能量通常由于无法补充或替代而受到限制, 因此, 怎样高效地利用无线传感器网络的能量资源, 以提高网络生存周期已成为无线传感器网络领域中一个十分重要的研究课题^[1]。文献[2]假定各节点可以在自适应调节发射功率的基础上, 基于线性规划方法, 提出一种最大化网络生存周期的路由算法; 文献[3]通过建立无线传感器网络生存周期的理论模型, 利用集中式迭代算法, 提出了一种能量 Pareto 路由算法; 文献[4]提出根据网络中各节点能量水平, 选择合适的中继节点分发数据, 均衡整个网络的能量消耗, 避免个别节点过早失效, 从而延长网络生存时间; 文献[5]通过设置节点能量水平阈值 γ , 应用剪枝方法裁掉网络中节点能量水平低于阈值 γ 的相关边, 在此基础上利用 Dijkstra 算法求解最小能耗路由; 文献[6]综合考虑在传感器网络中节点链路接入、数据包传输能耗及节点剩余能量的基础上, 提出了一种自适应能耗均衡路由策略; 文献[7]综合考虑网络中节点的剩余能量与节点间传输数据的能耗, 基于最短路径树算法, 通过构造两种不同的权值函数, 提出了权值路由算法; 文献[8]在满足能量三角不等式的前提下, 应用动态规划的思想, 提出了一种最小跳步路由

算法。

在无线传感器网络中, 由于发送单位数据所消耗的能量通常与传送距离的幂次方成正比^[8], 路由能耗通常不满足所谓的三角不等式, 即数据从 v_i 经 v_k 传到 v_j 所消耗的总能量大于数据从 v_i 直接到 v_j 所消耗的能量通常不成立, 也就是说, 有时增加路由跳数反而能降低传送数据的能耗, 因此, 文献[8]中最小跳数路由不一定就是最小能耗路由; 另一方面, 由于无线传感器网络中流量分布不均匀性, 即使采用最小能耗路由算法, 也容易使网络中个别关键节点能量过早耗尽而失效, 造成网络分割和连通性无法保持, 直接导致网络生存时间缩短。因此, 在设计路由算法时, 不仅要考虑路由的总能耗, 还要从整个网络系统的角度出发, 根据具体的应用背景, 考虑网络中各个节点的能量水平。本文根据无线传感器网络的节点能量消耗和网络生存周期特点, 通过借鉴动态规划思想, 提出一个适合无线传感器网络的能效优化路由算法, 达到既减少路由能耗, 又使网络中各节点的能量均衡配置, 从而延长整个网络的生存周期。

1 问题描述

在本文中, 假定无线传感器网络中的传感器节点位置是固定的, 每个传感器节点能量是有限的, 每个传感器节点能感知

收稿日期: 2009-11-17; 修回日期: 2009-12-24 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60973150)

作者简介: 彭利民(1976-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为无线网络、分布式计算等(penglm86@126.com); 刘浩(1977-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为 P2P 网络、并行计算等。

通信范围内的节点距离,且可根据距离自动调整节点信号发射功率,以减少不必要的能量消耗。

1.1 符号和公式

采用 $G = G(V, A, c)$ 表示给定的无线传感器网络。其中: V 是节点集,节点个数为 n ; A 是边的集合; $c: A \rightarrow R^+$ 为 A 中的每条边赋一个权值,表示从节点 i 到节点 j 发送一个数据包所消耗的能量,即使用 $c(i, j)$ 表示节点 i 发送一个数据包的能量消耗, $e_{i,j}$ 表示节点 i 到节点 j 的边, $i, j \in V$ 。

E_i 是节点初始能量水平, EC_i 是节点当前能量水平;

$P_j(s, t)$ 表示从源节点 s 到目的节点 t 的第 j 条路径;

P_{all} 表示从源节点 s 到目的节点 t 的路径集合;

$R_j = \min_{i \in P_j(s, t)} EC_i$ 表示源节点 s 到目的节点 t 第 j 条路径上节点当前能量水平最小值;

$R_i = \max\{R_j | P_j(s, t) \in P_{all}\}$ 表示源节点 s 到目的节点 t 所有路径中节点能量水平 R_j 中的最大值;

$E(s, t)$ 表示从源节点 s 到目的节点 t 的路由能耗;

$E(k, t)$ 表示从节点 k 到目的节点 t 的路由能耗,其中 $k \in V$;

E_{min} 表示从源节点 s 到目的节点 t 的最小能耗(采用 Dijkstra 最短路径路由,以 $c(i, j)$ 作为边的权重);

z 是能耗调节因子, zE_{min} 表示从源节点 s 到目的节点 t 的能耗阈值;

$P(v_0, v_k) = v_0, v_1 \dots, v_k$, 表示从节点 v_0 到目的节点 v_k 的路径;

$e(P(v_0, v_k)) = \sum_{i=0}^{k-1} c(v_i, v_{i+1})$, 表示从节点 v_0 到目的节点 v_k 的路由能耗。

1.2 优化模型

为了求解在能耗约束条件下能量均衡路由问题,本文建立了以下能耗优化路由优化模型。

1) 优化目标

$$\max R_i \tag{1}$$

式(1)使从源节点 s 到目的节点 t 路径中 R_i 值最大,即网络采用能量均衡路由,避免个别节点过早耗尽能量。

2) 约束条件

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{if } e_{i,j} \in P(s, t) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{2}$$

$$\sum_{e_{i,j} \in A} c(i, j) * x_{i,j} < zE_{min} \tag{3}$$

式(2)中的变量 $x_{i,j}$ 是二元变量,即如果边 $e_{i,j}$ 是从源节点 s 到目的节点 t 路径上的边,则 $x_{i,j} = 1$, 否则为 0; 式(3)表示从 s 到 t 路由的总能量小于 zE_{min} 。

$$EC_i - c(i, j) > 0 \tag{4}$$

式(4)表示从源节点 s 到目的节点 t 的路径上节点发送一个数据包后剩余能量水平应该大于 0。

2 分级动态规划路由模型

无线传感器网络能效优化路由问题就是寻找无线传感器网络中从源节点 s 到目的节点 t 的能效最优路径。动态规划是把一个多阶段过程问题转换为一系列单阶段问题,用不变嵌入原理求解原问题的最优策略,因此,动态规划的这种处理问

题方法非常适合用来解决无线传感器网络中的路由问题。为了将无线传感器网络的路由问题转换为动态规划问题,本文参考文献[9]最短路径问题的动态规划求解方法,建立一个如图 1 所示的 n 级多目标动态规划模型。

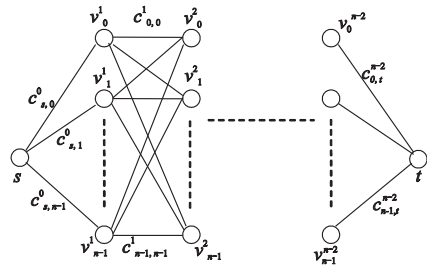


图1 分级动态规划路由模型

如图 1 所示, s 表示源节点, t 表示目的节点, 每级有 n 个节点, 分别标志为 v_0, v_1, \dots, v_{n-1} , 为了区分每个节点在各级中的位置, 使用 v_i^l 表示第 l 级的第 i 个节点。使用 $c^l(i, j)$ 表示节点 v_i^l 发送一个数据包到节点 v_j^{l+1} 的能耗, 如果节点 v_j^{l+1} 不在节点 v_i^l 的通信范围内, 那么 v_i^l 和 v_j^{l+1} 在 $G = G(V, E, w)$ 中无边相连, 则该边的权重 $c^l(i, j) = \infty$, 且假定在相邻两级间连接自身节点边的权重为 0, 即 $c^l(i, i) = 0$ 。使用 $E(k, t)$ 表示从节点 k 到目的节点 t 的路由能耗, 其中 $k \in V$, 则 v_i^l 到 t 路由的总能耗记为 $E(v_i^l, t)$ 。当 l 级中有 n 个节点的时候, 那么向量 E^l 表示 l 级中各节点到 t 的路由能耗, 即 $E^l = [E(v_0^l, t), E(v_1^l, t), \dots, E(v_{n-1}^l, t)]$ 。由于第 0 级仅有节点 $s, E^0 = [E(s, t)]$ 。

3 基于动态规划的路由算法

根据图 1, 本文将无线传感器网络 G 表示为 n 级, 且每级中最多有 n 个节点的网络结构(第 0 级中只有源节点 s , 第 $n-1$ 级中只有目的节点 t , 其他级中都有 n 个节点), 使用 $P(v_k^i, t)$ 表示第 k 级中节点 i 到目的节点 t 的路径, 使用 $R(v_k^i, t) = \min_{j \in P(v_k^i, t)} EC_j$ 表示第 k 级中节点 i 到目的节点 t 路径上节点的当前能量水平最小值, 使用 $E(v_k^i, t)$ 表示第 k 级中节点 i 到目的节点 t 的路由总能耗。因此, 根据无线传感器网络的路由问题描述, 可以采用以下基于动态规划的递归方法描述能耗路由问题:

$$E(v_k^i, t) = \begin{cases} \max_{EC_j} \{c(v_k^i, v_{k+1}^j) + E(k+1, t)\} & \\ E(t, t) = 0 & \text{if } k = n-1 \end{cases} \tag{5}$$

式(5)中, 当 $k = n-1$ 时, 因为 $n-1$ 级中只有目的节点 t , 节点到节点自身路由的能耗为 0, 所以 $E(t, t) = 0$; 当 $0 \leq k < n-1$ 时, 表示在满足 $E(v_k^i, t) = (c(v_k^i, v_{k+1}^j) + E(k+1, t)) < zE_{min}$ 的前提下, 在 k 级中选取当前能量水平最大的节点 v_k^i 进行路由。

如果使用 $n \times n$ 的表格保存网络各级中节点到目的节点 t 的能耗 $E(v_k^i, t)$ 以及各级中节点到目的节点 t 路径上节点当前能量水平的最小值 $R(v_k^i, t)$, 那么, 根据 $G = G(V, A, c)$ 可以得到 $n-2$ 级中每个节点到目的节点 t 的 $E(v_{n-2}^i, t)$ 和 $R(v_{n-2}^i, t)$, 然后利用式(5)和第 $n-2$ 级的结果, 则可以得到第 $n-3$ 级各节点的 $E(v_{n-3}^i, t)$ 和 $R(v_{n-3}^i, t)$, 依此往前推, 进而可以得第 0 级中源节点 s 的 $E(s, t)$ 和 $R(s, t)$, 因此, 只要 $E(s, t) < zE_{min}$, 那么 $R(s, t)$ 即为路径 $P(s, t)$ 上的节点当前能量水平最小值。

由于分级路由模型中, 每级最多有 n 个节点, 计算每级中

节点的 $E(v_k^i, t)$ 和 $R(v_k^i, t)$ 的时间复杂度为 $\Theta(n^2)$, 同时, 动态规划模型分为 n 级, 所以该算法总的时间复杂度为 $\Theta(n^3)$ 。

4 仿真及结果

本文采用 NS2 来模拟验证提出的路由算法, 在 25×25 区域内随机分布 50 个传感器节点, 检测控制中心节点 (即 sink 节点) 位于右上方区域中心, 且该节点初始能量无限大, 其他传感器节点初始能量均设置为 30 J, 各个传感器节点均处于静止状态且各节点射频半径相互独立, 节点之间是否连接取决于它们之间的距离, 节点剩余能量随发送数据包而减少, 当节点剩余能量低于发送能耗时, 即认为该节点由于能量太低而失效。假定节点可以自动调节发送功率, 且将数据包发送到下一跳节点消耗能量为 $0.001 \times d^3$ (d 表示节点间距离), 因此, 节点间发送数据消耗的能量取决于节点间距离。在本文实验中, 笔者在网络中随机地选择源节点和目的节点 (sink 节点) 进行数据包通信, 各个数据包大小均设置为 512 Byte。在随机生成的网络拓扑选取 10 个进行网络模拟, 对每个随机网络拓扑使用第一个数据包发送失败前, 网络发送数据包个数表示网络生存周期。本文实验中, 不考虑节点竞争信道、数据分组出错、超时重发、信令传递、计算数据融合等传感器网络事件。由于本文中 z 是能耗调节因子, 当 z 为 1 时, 本文提出的基于动态规划路由算法 (DRP) 即为最小能耗路由算法, 当 z 为无穷大时, DPR 路由算法即为能耗均衡路由算法。由于本文实验中网络节点个数较小, 当 z 为 10 的时候, DPR 路由算法也可以认为是能耗均衡路由算法。为了考察 DPR 路由算法在调节因子 z 取不同值时对网络性能的影响, 对 DPR 路由算法进行实验模拟, 实验结果分别如图 2~4 所示。为了便于图中表示, 当 $z=1$ 时, DPR 路由算法表示为 MER, 当 $z=10$ 时, DPR 路由算法表示为 BER。

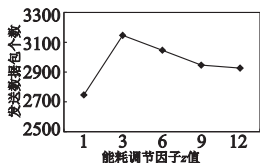


图2 z 值与网络生存周期

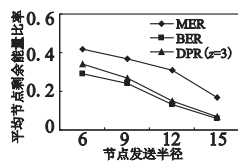


图3 发送半径与节点平均能耗比率

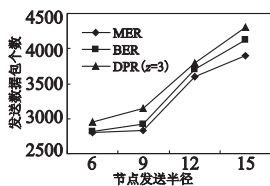


图4 发送半径与网络生存周期

首先, 考察 z 值对网络生存周期的影响。从图 2 可以看出, 在 $z=1$ 时, 即采用最小能耗路由时, 网络最大发送数据包较小, 随 z 增大到一定程度时, 网络生存周期最大, 然后随 z 值继续增大, 网络生存周期缓慢减少。在网络规模确定的情况下, 不同的节点发送半径 (最大) 影响网络拓扑结构, 因而也会影响网络中能量消耗关系, 因此, 在不同的发送半径下, 考察 z 取三个不同值 (即 $z=1, 3$ 和 10) 时网络中节点剩余能量比率 (即平均节点的剩余能量水平/平均节点的初始能量水平)。从图 3 可以看出, 当 $z=1$ 时, 即网络采用最小能耗路由算法 (MER) 网络中平均节点剩余能量最大; 当 $z=10$ 时, 即网络采用能量均衡路由算法 (BER) 网络中平均节点剩余

能量最小, 说明路由算法在传送数据包的时候, MER 采用最小能耗进行路由, 而 BER 则只考虑网络中当前节点能量水平, 没有考虑路由总能耗, 所以能量消耗最多; 然而, 当 $z=3$ 时, DPR 算法既要考虑每个节点的能量水平, 也要考虑路由能耗, 所以网络中平均节点剩余能量居中。图 4 给出了节点在不同的发送半径下, z 取三个不同值 (即 $z=1, 3$ 和 10) 对网络生存周期的影响。从图 4 可看出, 三种情况中, 使用 MER 时, 网络发送数据包个数最小, 说明此时网络生存周期最短, 当 $z=10$ 时, 网络生存周期较大, 当 $z=3$ 时, 网络生存周期最大。其主要原因是 MER 只考虑了路由能耗, 没有考虑网络中节点能量水平, 使个别关键节点能量过早消耗而失效, 导致网络生存周期缩短, 而 BER 却只考虑了路由中节点能量水平, 没有考虑路由能耗, 也使得网络生存周期不够理想。然而, 当 DPR 算法中 $z=3$ 时, 该算法既考虑了路由能耗, 也考虑了节点能量水平, 所以网络生存周期最大。综合上述三个实验结果, 说明在设计无线传感器网络路由算法的时候, 只有综合考虑节点能量水平和节点传输数据的能耗, 路由算法才能达到提高网络生存周期的目的。

5 结束语

本文针对无线传感器网络中路由能量消耗问题, 通过借鉴动态规划思想, 在满足路由能耗约束的条件下, 选择网络中能量水平较高的节点进行路由, 提出了一个适合无线传感器网络的能效优化路由策略。仿真结果表明, 本文提出的 DPR 路由算法, 能充分考虑路由能耗和各节点的能量水平, 达到既降低网络中路由能耗, 又使网络中节点能量均衡分布, 延长无线传感器网络生存周期的目的。

参考文献:

- [1] 孙利民, 李建中, 陈渝. 无线传感器网络 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [2] CHANG J H, TASSIULAS L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Trans on Networking, 2004, 12 (4): 609-619.
- [3] DAGHER J C, MARCELLIN M W, NEIFELD M A. A theory for maximizing the lifetime of sensor networks [J]. IEEE Trans on Communication, 2007, 55 (2): 323-331.
- [4] MAINWARING A, POLASTRE J, SZEWCZYK R, et al. Wireless sensor networks for habitat monitoring [C]//Proc of the 1st ACM Workshop on Wireless Sensor Networks and Applications. Atlanta: ACM Press, 2002: 88-97.
- [5] TOH C K. Maximum battery life routing to support ubiquitous mobile computing in wireless Ad hoc networks [J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39 (7): 138-147.
- [6] 赵彤, 郭田德, 杨文国. 无线传感器网络能耗均衡路由模型及算法 [J]. 软件学报, 2009, 20 (11): 3023-3033.
- [7] 朱艺华, 沈丹丹, 吴万登, 等. 无线传感器网络优化生存时间的动态路由算法 [J]. 电子学报, 2009, 37 (5): 1041-1045.
- [8] 杨文国, 郭田德, 赵彤. 基于动态规划的无线传感器网络的路由算法 [J]. 计算机研究与发展, 2007, 44 (5): 890-897.
- [9] GRAMA A, GUPTA A, KARYPIS G, et al. An introduction to parallel computing: design and analysis of algorithms [M]. 2nd ed. Redwood City, CA: Addison Wesley, 2003.