

doi: 10.7690/bgzdh.2019.10.006

基于动态规划的无线传感器网络路由优化策略

谢昌荣, 李菊英

(绵阳职业技术学院计算机科学系, 四川 绵阳 621000)

摘要:为解决以往设计的无线传感器网络路由算法存在的不足,提出一种适合无线传感器网络的最短距离-最小能耗路由算法。依据无线传感器网络最常用的能量消耗模型,通过设置节点剩余能量的动态调节因子,基于动态规划方法建立网络模型,在每个阶段根据节点剩余能量动态调整决策集合,选择最短距离-最小能耗路由,并采用Omnet++仿真软件进行实验分析。结果表明:该算法相对简单,在一定程度上能减少无线传感器网络的能耗以及延长生命周期。

关键词:无线传感器网络;能量消耗模型;动态规划;最短距离;最小能耗

中图分类号:TP702 **文献标志码:**A

Optimizing Strategy of Wireless Sensor Network Router Based on Dynamic Programming

Xie Changrong, Li Juying

(Department of Computer Science, Mianyang Polytechnic, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the shortcoming of the routing algorithm designed in the past, the shortest distance-minimum energy consumption routing algorithm for wireless sensor networks is proposed. On the basis of the most commonly used energy consumption model of wireless sensor networks, by setting the node residual energy dynamic adjustment factor, the network model is established based on the dynamic programming method. At each stage, the decision set is dynamically adjusted on the basis of the residual energy of nodes, and the shortest distance-minimum energy consumption routing is selected, and the Omnet++ simulation software is used for the experimental analysis. The results show that the algorithm is relatively simple and it can reduce the energy consumption and extend the life cycle of wireless sensor network.

Keywords: wireless sensor network; energy consumption model; dynamic programming; shortest distance; minimum energy consumption

0 引言

在多跳无线传感器网络中,优化的路由算法是研究传感器监测节点到汇聚 Sink 节点之间传送数据的路径方法,因无线传感器节点资源极其有限,故高效的路由算法是研究的热门课题。文献[1]在满足三角不等式的能量基础上,基于动态规划的原理,研究得出了最少跳数、最少跳数最大剩余能量和最少跳数最小费用3种路由算法;文献[2]应用动态规划,设置能耗约束条件,选择无线传感器网络中能量较多的节点进行路由,给出了一种能耗优化的路由求解策略;文献[3]将无线传感器网络转换为标准的动态规划模型,提出了最小能耗路由算法和能量均衡的低能耗路由算法;文献[4]在总体考虑节点传输能耗、节点链路接入及节点剩余能量的前提下,对无线传感器网络给出了一种自适应能耗均衡路由求解算法;文献[5]使用设定传感器节点剩余能量的

阈值,通过剪枝方法,剪掉传感器网络中传感器节点剩余能量低于阈值的相关边,再应用Dijkstra算法求出最小能耗路由方法;文献[6]在综合考虑无线传感器网络节点剩余能量、路径跳数和网络能量状况的基础上,提出了一种能量有效、负载均衡的多路径路由策略;文献[7]对于无线传感器网络,通过建立生存周期的理论模型,应用迭代算法,提出了一种能量多目标规划问题的最优解(Pareto)路由策略^[7];文献[8]在综合考虑传感器节点剩余能量和传感器节点传输数据的能耗基础上,基于最短路径树算法,提出了“比例权值路由算法”和“权值路由算法”。

设计无线传感器网络时,一般要考虑低能耗、简单、多路径和收敛快4个因素^[9]。以往设计的无线传感器网络路由算法,一部分路由算法满足了能量高效,但算法相对复杂、计算量较大、收敛慢;

收稿日期:2019-05-17;修回日期:2019-06-14

基金项目:四川省教育厅科研项目(14SB0400);四川省级大学生创新创业训练计划项目成果(201412753019)

作者简介:谢昌荣(1964—),男,四川人,学士,副教授,从事计算机网络与安全和物联网研究。E-mail:103088624@qq.com。

另一部分路由算法相对简单，但能量消耗较大，且不满足能量均衡。因此，笔者根据无线传感器网络最常用的能量消耗模型，基于动态规划方法，通过设置节点剩余能量动态调节因子，提出一种适合无线传感器网络的最短距离—最小能耗路由算法 (shortest distance-minimum energy routing algorithm, SD-MEER)。

1 问题描述

笔者假设多跳的无线传感器网络是线性和有限的，无线信道传输所需能量是对称的，即从节点 A 到节点 B 和从节点 B 到节点 A 传输数据所需的能量相同；其能量消耗计算方法是由放大器、发射和接收电路组成^[10]，在多跳的无线传感器网络中，各节点通信所需能量消耗主要考虑发送数据和接收数据的能量消耗，其余能量消耗文中均没有考虑，如计算能耗、空闲能耗等。

根据最常用多跳的无线传感器网络各节点能量消耗计算模型，即 first order radio 模型^[11]，多跳的无线传感器网络各节点接收 K 比特数据时的能耗为 KE_{elec} ；将 K 比特数据从一个级的传感器节点发送到下一级的传感器节点所消耗的能量为 $KE_{elec}+KE_{amp}d^2$ ；那么距离为 d 的 2 个级间传感器节点传输和接收 K 比特数据的总能量消耗为：

$$E(k,d) = K(2E_{elec} + E_{amp}d^2)。 \quad (1)$$

其中： E_{elec} 为电路上接收或发送 1 比特数据的能耗； $E_{amp}d^2$ 为放大器发送 1 比特数据的能耗。

从式(1)可见：1) 无线传感器网络各节点的能量消耗总量与数据包大小 K 成正比， K 越大， $E(k,d)$ (节点消耗能量)就越多；2) 当 K 一定时，发送数据的能量消耗与 d (两级节点间的距离)成平方倍增长，若 d 越大，所发送数据消耗的能量 $E(k,d)$ 就越多；3) 节点消耗的能量还与节点接收和发送的数据包有关，发送和接收的数据包越多，节点的能量消耗就越大。

基于以上分析可知，节点之间的距离和数据包的数量及大小是影响节点能量消耗的重要因素。显然，节点若选择最短距离发送数据包，可以减少节点发送数据包的能耗；减少路由数据包的发送次数可以减少节点的总能耗。笔者主要从这 2 方面对多跳无线传感器网络的路由算法进行优化设计，同时，通过设置节点剩余能量动态调节因子，来达到节点能量相对均衡的功能。

2 无线传感器网络路由模型设计

无线传感器网络的核心问题是节点间的路由问题，特点是数据传输的多跳特性。动态规划是基于全局最优化之上的，能有效解决多阶段最优化问题，故利用动态规划原理来设计无线传感器网络的路由算法，就可以根据每一阶段节点间的距离和节点的剩余能量进行决策，最终保证得到全局路由最优和能量均衡。

在多跳的无线传感器网络中，节点一般分为传感器节点和 Sink 节点(汇聚节点)。笔者假设：1) 汇聚节点定期进行数据收集，一般接有专用电源，能量供给可以不受限制；2) 传感器节点的初始能量 e_0 、发射功率和通信半径 R 等均相同；3) 传感器节点与 Sink 节点位置均固定不变。

笔者使用带有权值的连通图 $G=G(V,E,D)$ 表示给定的多级无线传感器网络。其中， V 表示节点集，每个节点 $v_{i,j} \in V$ ， E 表示节点剩余能量的集合，每个节点 $v_{i,j}$ 的剩余能量 $e_{i,j} \in E$ ， D 表示可通信的相邻两级节点之间距离的集合，两级节点之间距离 $d(v_{i,j},v_{i+1,j}) \in D$ ，受传感器节点通信半径的限制，每个传感器节点只能和它的通信半径范围内的下一级相关节点进行通信， $d(v_{i,j},v_{i+1,j})$ 可用如下欧式公式计算得到：

$$d(v_{i,j},v_{i+1,j}) = \sqrt{(x_{i,j} - x_{i+1,j})^2 + (y_{i,j} - y_{i+1,j})^2}。 \quad (2)$$

其中， $(x_{i,j},y_{i,j})$ 和 $(x_{i+1,j},y_{i+1,j})$ 分别为节点 $v_{i,j}$ 和 $v_{i+1,j}$ 的位置坐标。节点的通信半径记作 R ，故 $0 < d(v_{i,j},v_{i+1,j}) \leq R$ ，可见 G 不是完全图。

n 级多目标动态规划无线传感器网络路由模型如图 1 所示。

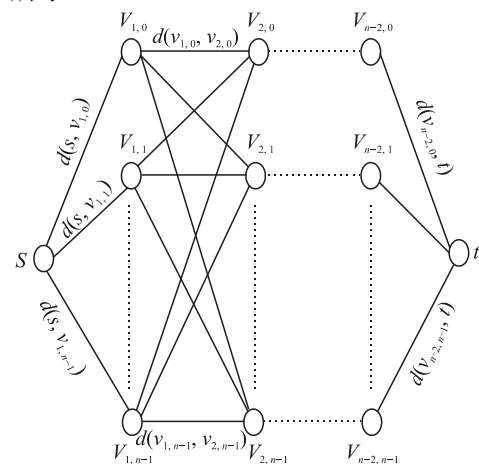


图 1 n 级动态规划路由模型

其中： S 表示源节点， t 表示目的节点，除第 0 和

$n-1$ 级外, 每级有 n 个节点, i 级的节点分别表示为 $\{v_{i,0}, v_{i,1}, \dots, v_{i,n-1}\}$; 使用 $d(v_{i,j}, v_{i+1,j})$ 表示第 i 级节点 $v_{i,j}$ 到第 $i+1$ 级节点 $v_{i+1,j}$ 的距离, 如果节点 $v_{i+1,j}$ 不在 $v_{i,j}$ 通信半径内, 那么 $v_{i,j}$ 和 $v_{i+1,j}$ 在 $G=G(V,E,D)$ 中的权重 $d(v_{i,j}, v_{i+1,j})=\infty$, 表示无法相连; 而且还假定在相邻两级连接相同编号的 j 节点边的权重为 0, 即 $d(v_{i,j}, v_{i+1,j})=0$; 使用 $e_{i,j}$ 表示 $v_{i,j}$ 节点的剩余能量, 那

$$D(i,t) = \begin{cases} \min\{e_{i,j} > \beta_i e_0 d(v_{i,j}, v_{i+1,k}) + D(i+1,t), & i = n-1, n-2, \dots, 0; \quad j = 0, 1, 2, \dots, n-1 \\ D(t,t) = 0 & \text{if } i = n-1 \end{cases} \quad (3)$$

其中: i 为模型的阶段变量; j 为某阶段中的节点变量; n 为阶段数, n 值的确定在动态规划路由模型建立好后完成; $D(i,t)$ 为第 i 级节点 $v_{i,j}$ 到汇聚节点的最短距离。该值包括 2 部分: 1) $d(v_{i,j}, v_{i+1,k})$ 为在满足第 i 阶段节点剩余能量 $e_{i,j} > \beta_i e_0$ 条件下, 第 i 阶段节点 $v_{i,j}$ 到第 $i+1$ 阶段已选定节点 $v_{i+1,k}$ 的最短距离; 2) $D(i+1,t)$ 为 $i+1$ 阶段节点 $v_{i+1,k}$ 到目标 t 节点的最短距离。 $e_{i,j}$ 为第 i 级第 j 个节点的剩余能量; β_i 是在每一级设一个剩余能量动态调节因子, 如 β_i 的初值若取 0.012, 当第 i 级某个节点的剩余能量小于或等于 $0.012 e_0$ 后, $\beta_i - 0.001 \geq \beta_i$, β_i 的值变为 0.011; 当第 i 级出现第 2 个节点的剩余能量小于或等于 $0.011 e_0$ 后, $\beta_i - 0.001 \geq \beta_i$, β_i 的值变为 0.010; 依次类推, 直到 β_i 的值接近 0, 节点的能量即将耗尽为止。若 β_i 的取得当, 利用 β_i 取值的变化, 能达到节点能量相对均衡的功能。

运用逆序递推求解法, 从 $n-2$ 级开始, 由后向前逐级递推, 其求解分析步骤如下:

1) 将实际的无线传感器网络转化为图 1 所示的 n 级动态规划模型, 根据 $G=G(V,E,D)$ 初始化节点信息及各级节点到下一级所有节点的距离等。

2) 利用式(3), 第 $n-2$ 级中节点剩余能量 $e_{n-2,j} > \beta_{n-2} e_0$ 的各节点到目的节点 t 的最短距离, 以及目的节点 $D(t,t)=0$, 可求得第 $n-2$ 级到目的节点 t 的最短距离路径 $D(n-2,t)$ 。在 $n-2$ 级, 若某一节点剩余能量不满足 $e_{n-2,j} > \beta_{n-2} e_0$ 时, 该节点不作为路由节点, 只作发送自身数据的节点, 且 $\beta_{n-2} - 0.001 \geq \beta_{n-2}$ 。

3) 利用式(3)和 $n-2$ 级的结果, 第 $n-3$ 级中节点剩余能量 $e_{n-3,j} > \beta_{n-3} e_0$ 的各节点到 $n-2$ 级已选择节点 $v_{n-2,k}$ 的最短距离, 以及 $D(n-2,t)$, 可求得第 $n-3$ 级到目的节点 t 的最短距离路径 $D(n-3,t)$ 。 β_{n-3} 的动态取值与 β_{n-2} 类似。

4) 依次往前推, 即可求得源节点 S 到目标节点 t 最短距离路径 $D(S,t)$ 。以此最短距离路径作为无线

么第 i 级 n 个节点的剩余能量可表示为 $\{e_{i,0}, e_{i,1}, \dots, e_{i,n-1}\}$ 。

3 SD-MECR 算法

根据图 1, 基于动态规划原理, 在节点满足剩余能量大于 $\beta_i e_0$ 的条件下, 建立从监测传感器节点到汇聚节点 (Sink) 的最短距离—最小能耗路由函数:

传感器网络的路由路径, 如果计算出的最短距离路径不止一条, 则随机选择一条, 其余作为备份路径。

该网络投入运行的初期阶段, 各节点初始能量相同, 每个监测节点以最短距离—最小能耗路由发送数据给汇聚节点, 保证了网络路由的距离最短、总能耗最小, 相当于静态路由, 算法复杂度最大为 $O(n^2)$ 。该网络运行一段时间后, 在每个周期的各个阶段, 要根据每个阶段各个节点的剩余能量 $e_{i,j}$ 是否大于 $\beta_i e_0$ 进行动态调整, 决策集合 $E(e_{i,j})$ 是由剩余能量 $e_{i,j} > \beta_i e_0$ 的节点构成, 从 $E(e_{i,j})$ 中选择一个节点, 使该节点到下一阶段已选节点的距离最短, 依次类推即可重新形成最短距离—最小能耗路由, 属于动态路由, 算法复杂度最大为 $O((n-z)^2)$, z 为剩余能量小于或等于 $\beta_i e_0$ 的节点数。这样可尽量保证网络节点不会过早死亡, 达到网络能耗尽量均衡。

4 仿真结果与分析

笔者采用著名的 Omnet++ 仿真软件进行实验, 将 SD-MECR 与有名的洪泛路由 (flooding) 和定向扩散路由 (directed diffusion, DD)^[10] 进行能耗对比。在 5 种不同大小的传感器节点环境中进行仿真实验, 将 40、80、120、160 和 200 个传感器节点分别部署在边长为 150、200、250、300 和 350 m 的正方形区域内。网络节点中包括 4 个传感器数据源节点 (S) 和 1 个汇聚节点。无线通信方式为双向无差错传输, MAC 协议为 802.11, 兴趣报文大小为 12 bit, 数据包大小为 48 bit, 通信的带宽为 252 kb/s, 节点间有效发射距离为 50 m, 源节点发送数据包的时间间隔为 0.05 s, 每个节点初始能量为 1 J。

实验中, 分别对 3 个算法的节点能耗进行比较, 在不同的仿真实验环境下, 各进行 5 次实验, 每次仿真时间为 20 s, 取实验结果数据的平均值作为最终值。节点数为 120 的 SD-MECR 算法实验数据如表 1 所示。

表 1 节点数为 120 的 SD-MECR 实验数据 J

次数	正方形边长/m				
	150	200	250	300	350
1	0.008 0	0.008 3	0.008 8	0.009 6	0.010 1
2	0.007 9	0.008 5	0.009 0	0.009 5	0.009 9
3	0.007 8	0.008 4	0.009 1	0.009 6	0.010 0
4	0.007 9	0.008 7	0.009 0	0.009 3	0.009 8
5	0.008 1	0.008 3	0.008 9	0.009 4	0.010 2
平均能耗	0.007 9	0.008 4	0.009 0	0.009 5	0.010 0
总平均能耗	0.009 0				

3 种算法在大小不同的仿真实验环境中,网络中每个传感器节点能耗的平均值对比如图 2 所示。可见,采用 Flooding 算法的路由节点平均能耗较大,采用 DD 算法的路由节点平均能耗要低一些,笔者提出的 SD-MECR 算法节点平均能耗最低,由于引入了动态规划的思想,根据无线传感器节点能量消耗模型,对数据包路由路径进行了优化,更好地避免了 Flooding 路由导致网络中一个节点可能会多次接收到同一个数据包和产生了大量无用重复的数据包;有效地避免了 DD 算法中初期路由的盲目性^[10]。SD-MECR 算法节点平均能耗比 DD 算法约低 16%,稳定周期比 DD 算法提高约 12%;因此,在一定程度上提高了无线传感器网络的性能。

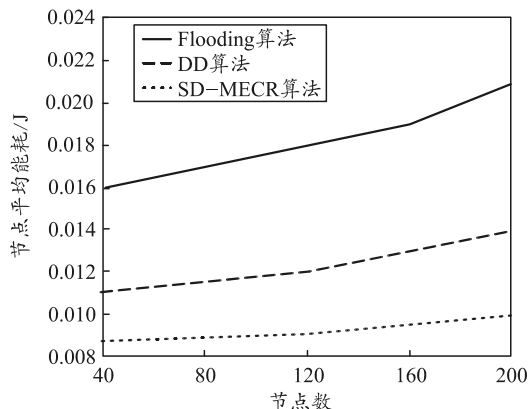


图 2 3 种算法节点平均能耗对比

5 结束语

无线传感器节点能量消耗模型的特点: 1) 节点间选择最短距离发送数据包,可以减少节点发送数据包的能耗; 2) 减少路由数据包的发送次数,可以

减少节点的总能耗。笔者据此建立无线传感器网络的动态规划模型,提出了一种最短距离—最小能耗路由 SD-MECR 算法。仿真实验结果表明:节点平均能耗较低,延长了节点生命周期。但是,由于动态规划存储量大、计算量也大,势必给各个传感器节点带来能量消耗,还待进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 彭利民,刘浩. 无线传感器网络中的能效优化路由算法[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2198-2199.
- [3] 汪祥莉,李腊元. 无线传感器网络中基于动态规划的路由算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(11): 114-116.
- [4] 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.
- [5] TOHC 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] 樊志平,谢冬青,金政哲. 无线传感网络能量有效负载均衡的多路径路由策略[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(2): 253-257.
- [7] DAGHER J C, MARCELLIN M W, NEIFELD M A. A Theory for Maximizing the Lifetime of Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2007, 55(2): 323-332.
- [8] 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.
- [9] 唐勇,周明天,张欣. 无线传感器网络路由协议研究进展[J]. 软件学报, 2006, 17(3): 410-421.
- [10] 汪祥莉. 无线传感器网络中高能低功耗路由技术的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011: 118-138.
- [11] HEINZELMAN W B, CHANDRAKASAN A P, BALAKRISHNAN H. An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(4): 660-670.