

高效能耗传感器网络的模型分析与路由算法设计

刘林峰^{1,2}, 刘 业¹, 庄艳艳²

(1. 东南大学计算机网络和信息集成教育部重点实验室, 江苏南京 210096;
2. 东南大学计算机科学与工程学院, 江苏南京 210096)

摘 要: 传统的传感器网络生命期模型未考虑节点异跳上单位传输费用的差异性, 针对该缺点本文建立生命期模型并转化目标为带不等式约束的最大费用最大流问题, 依据模型中所体现路由规划与生命期优化的本质联系, 提出一种基于节点负载压力的自适应路由算法, 算法实现所需的计算量、通信量较小. 通过仿真实验对算法进行了性能分析和验证, 仿真结果表明该算法能有效地延长传感器网络生命期.

关键词: 无线传感器网络; 理想生命期; 拉氏松弛; 路由算法

中图分类号: TP393 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2007) 03-0459-04

Analysis of Model and Design of Routing Algorithm in Energy Efficient Wireless Sensor Networks

LIU Lin-feng^{1,2}, LIU Ye¹, ZHUANG Yan-yan²

(1. Southeast University Key Laboratory of Computer Network and Information Integration, Ministry of Education, Nanjing, Jiangsu 210096, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: Traditional lifetime models of wireless sensor networks don't take into account the diversity of nodes' unit transmission cost on different hops. This paper explored this defect and constructed a new lifetime model, then transformed the objective of model into a max-cost max-flow problem with an additional inequality constraint. A heuristic routing protocol, Load Pressure Routing (LPR) algorithm, based on the relation between routing layout and lifetime optimization was presented. LPR needs relatively less computation and communication. LPR is analyzed and validated for performance through simulations, the result of which suggests it can prolong the lifetime of networks efficiently.

Key words: wireless sensor network; perfect lifetime; Lagrangian relaxation; routing algorithm

1 引言

传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)缺乏持续能量供给, 所以首要设计目标是通过高效使用能量来最大化网络生命期. WSN 的绝大部分能量消耗于通信传输环节^[1], 因此节点对下一跳链路的选择将极大影响本身及后继节点的能耗. 国内外研究机构已相继提出了多种 WSN 生命期模型^[2-3], 并将之转化为并发最大流问题, 但该类模型未区分节点异跳上的单位传输费用. 对于某个特定的节点, 单位传输费用的物理意义指该节点传输单位数据到下一跳节点所消耗的能量, 它受发射功率、距离和干扰强度等因素影响, 在实际 WSN 中对于节点的不同下跳, 不应忽略其上单位传输费用的差异, 此差异使文献^[23]中对理想生命期的分析不再适用. 回顾传统的无线自组织网络的能量路由协议, Chang 等人提出一种基于最短路的路由算法 FA^[2], 节点通过在定量数据发送后重新计算最短路径, 来选取当前的高效能耗路由, 但最短路算法复杂度达到节点数的平方级, 对于计算能力有限的传感器节点而言偏高; Shah 等人提出一种能量多路径路

由机制^[4], 在源点和宿点间建立多条路径, 根据路径上单位流量费用及节点的剩余能量, 选择概率被赋予每条路径, 源点依此概率选路直至路由中断, 该算法会使一个较优的交叉节点在多条路由中重复体现优势, 因此预置概率无法反映路径的实时状况. 文献^[5]提出一种边界定位的路由算法, 依据少量节点位置确定坐标系和路由, 但该算法所需的额外通信费用较大.

2 WSN 理想生命期模型的理论分析

2.1 WSN 模型构造

WSN 生命期^[2-3, 6-7]定义为: 在 WSN 系统的流量路由过程中, 最先因电池能量耗尽而失效的节点的生命期. 考虑一组静态传感器节点随机散布于监测区域的情况: 节点携带能量有限的电池, 产生并发送监测所得数据, 同时为邻居节点提供报文转发服务, 所有流量最终归宿于汇聚节点. 抽象相邻传感器节点间的通信链路为有向弧, 创建一个虚拟源点^[3], 假定网络中有 k 个能采集到数据的节点, 各自通过虚拟弧与虚拟源点相连. WSN 拓扑抽象成一个完全有向图模型 $G(N, A, W)$,

收稿日期: 2005-11-10; 修回日期: 2006-09-15

基金项目: 国家 973 计划 (No. 2003CB314801); 国家自然科学基金资助项目 (No. 60573133)

C), 主要参数定义如下: N 表示模型中所有传感器节点、虚拟源点 s 和汇聚节点 t 的集合, 节点数为 n ; A 表示有向链路 (i, j) 的集合, 其中 $i, j \in N$, 链路数为 m ; W 为 $n \times m$ 维矩阵, 其元素 w_{ij} 表示经由链路 (i, j) 的单位流量费用; E 表示 n 维列向量, 其元素 e_i 表示节点 i 的初始电池能量; C 为 $n \times m$ 维矩阵, 其元素 c_{ij} 表示链路 (i, j) 的最大容量; F 表示 m 维列向量, 其元素 f_{ij} 表示当前链路 (i, j) 上已通过的流量, 前 k 个元素对应于 k 条虚拟弧上的流量。

2.2 理想网络生命期问题的分析和转化

在当前 WSN 的流量规划 F 下, 节点 i 的生命期

$$T_i = e_i / \sum_{(i,j) \in A} (w_{ij} q_{ij})$$

其中 q_{ij} 表示经由链路 (i, j) 上的流量速率, 该式表示节点生命期为能量与能耗之比。根据系统生命期的定义, 系统的生命期 $T_s = \min T_i (i \in N)$ 。本文借鉴文献[3]的二分搜索思想, 预设网络生命期为一个上界值 n ($\max T_i$)。依据生命期设置虚拟源点的后继链路容量, 计算模型中可行的最大流并判断虚拟源点的后继链路是否饱和, 若不饱和表明预设生命期无法达到, 则对网络生命期以二分搜索, 直至连续两次预设的生命期间隔在允许的误差范围内, 且虚拟源点的后继链路的饱和判断结果相异, 此时设置的生命期即为该 WSN 的理想生命期。因此理想网络生命期问题可转化为 $\log n$ ($\max T_i$) 个 WSN 流量极大值问题。

2.3 WSN 流量极大值问题的设计与分析

2.3.1 最大费用最大流问题的构造

设计 m 维行向量 B , 其元素 $b_i = \begin{cases} 0, & \text{if } i > k \\ 1, & \text{else} \end{cases}$, 则目标函数可表示为 $z^* = \max BF$ 。根据经典网络流的定义, 模型必须满足流量守恒定律, 如式(1)所示。

$$\sum_{(j,i) \in A} f_{ji} - \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} = \begin{cases} z^*, & i = s \\ 0, & i \in N \\ -z^*, & i = t \end{cases} \quad (1)$$

传统的网络生命期模型分析中, 由于未区分节点异跳的单位传输费用, 节点能量对流量的约束可通过弧容量来表现^[2-3]。现需考虑节点与不同邻居链路上的单位能耗差异, 因此用弧容量作为能量约束的转换对象将不再可行。为使典型网络流问题适用于本模型, 设置

$$c_{ij} = \begin{cases} e_i / w_{ij}, & i = s \\ \int_0^{f(v_j)} f(v_j) dv_j, & i \in N \end{cases}$$

其中 $f(v_j)$ 表示节点 j 的流量速度 v 的概率密度函数, T_s 即表示 2.2 节中的系统生命期。当向量 B 取值具有一般性时, B 的元素可视为相应链路的单位流量费用,

即在最大网络流前提下传输费用的极大化, 从而转化为最大费用最大流问题, 该问题可通过对 B 取否运算演化为最小费用最大流问题^[8]解决。

2.3.2 拉氏松弛法对能量约束的处理

为使模型实现完全约束, 新增加一个额外的不等式约束条件: $e_i(n) DF \leq e_i(n) E, i \in N$, 用以直接体现每个传感器节点的能量上限, 并构造 $n \times m$ 维矩阵 D , 其元素 d_{ij} 的取值规则如下: 若对于某个属于 N 的节点 m 有 $(i, m) \in A$ 且 $e_j(m) F = f_{im}$, 则 $d_{ij} = w_{im}$, 否则 $d_{ij} = 0$ 。其中 $e_j(m) = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$ 表示 m 维单位向量, 此向量的第 j 个分量为 1, 其余分量为 0。本文采用拉氏松弛法^[9]来消除不等式约束, 更新模型的 B 参数并对目标函数求解。根据已建立的目标函数 z^* 及新增约束, 拉格朗日函数^[9] $L(\mu)$ 定义为

$$L(\mu) = \max\{BF + \mu(E - DF)\}$$

其中 F 满足约束式(1), 拉格朗日乘子 μ 为一个元素非负的 n 维行向量, 此时可得定理 1 和定理 2, 详细证明过程可参见文献[9]的类似推导。

定理 1 WSN 最大流 z^* 不会大于 $L(\mu)$ 的值。

定理 2 使用拉氏松弛法后的解 F^* , 若满足以下两个条件: F^* 为 WSN 最大流问题的可行解; $\mu(E - DF^*) = 0$ 。则 F^* 为 z^* 的最优解。

$L(\mu)$ 的优化解 F^* 若满足定理 2 中两个条件, 则亦为原目标函数 z^* 的解, 否则可通过牛顿方法^[9]对乘子 μ 以一定步长迭代重复最小费用最大流算法。若 $L(\mu)$ 与 z^* 间存在不可忽略的对偶间隙^[9], 可采用分支定界方法, 最终可获得一个 WSN 最大流的近似最优解。

2.4 WSN 理想生命期算法的伪代码

根据对 WSN 理想生命期的分析, 本文设计的 O-LT 算法伪代码如下:

1. O-LT($G(N, A, W, C), E$)
 2. $\{ T_1 = T_{\max}; T_2 = 0; T_3 = T_1;$
 3. while($(T_3 - T_2) > \epsilon$) /* ϵ 为生命期误差范围 */
 4. $\{ \mu = 0; LR(B, D, E, \mu);$ /* $LR()$ 表示拉氏松弛 */
 5. do $\{ \mu = \text{Newton}(\mu);$ /* $\text{Newton}()$ 更新 μ */
 6. $F^* = \text{mcmf}(G(N, A, W, C), -B, D, E, \mu);$ /* $\text{mcmf}()$ 表示最小费用最大流算法 */
 7. } while(F^* dissatisfy theorem2)
 8. if ($\sum_{i=2}^{k+1} f_{1i} = \sum_{i=2}^{k+1} c_{1i}$) $\{ T_2 = T_1; T_1 = (T_1 + T_3)/2;$
 9. else $\{ T_3 = T_1; T_1 = (T_1 + T_2)/2;$
 10. $T = T_2;$ /* T 表示理想生命期 */
- 由伪代码可知, 网络生命期二分搜索复杂度 $O(\log$

$n)^{[3]}$;乘子更新次数不会超过节点数,最坏复杂度为 $O(n)$;当前较快的最小费用最大流算法复杂度为 $O((m \log n)(m + n \log n))^{[8]}$ 。所以,算法 O-LT 的最坏时间复杂度为 3 部分的乘积即 $O(m^2 n(\log n)^2 + mn^2(\log n)^3)$ 。

3 LPR 算法设计

从 WSN 模型的理论分析可知,能量约束下的最大流目标体现了权衡节点的链路费用和流量负载的思想,WSN 应偏向使用单位耗费较低的路径,同时避免流量过度聚集于局部区域。由于对节点异跳上单位费用的区分,使得路由算法设计的关注对象从路径层面转移到节点层面,从节点的层面分析,路由的选择应避免存在负载压力较大节点的路径,负载压力可表现为流量对节点所产生的能耗与节点剩余能量的相对关系,此外还应尽量降低路由算法实现所需的计算量和通信量。因此本文设计了一种基于节点负载压力的自适应路由算法(Load Pressure Routing, LPR)。LPR 算法提出一种描述 WSN 中节点负载压力的参数 P_i ,称为节点 i 的节点负载度。 P_i 的含义为潜在负载给节点 i 造成的压力程度,值越大表示可通过流量的能力越弱。给出 P_i 启发式的定义,如公式(2)所示。

$$P_i = \left(\sum_{j:(i,j)} \frac{f_{ij} w_{ij}}{A} \right) / \bar{e}_i \quad (2)$$

式(2)中, A 为预置的调整指数, \bar{e}_i 表示当前节点 i 剩余的可用能量, f_{ij} 表示在未来的节点流量采样间隔内,节点 i 预测的发往后继节点 j 的流量,由流量的历史值 f_{ij} 与当前采样值 \tilde{f}_{ij} 取指数平均而得, $f_{ij} = \alpha \tilde{f}_{ij} + (1-\alpha) f_{ij}$, 其中反映历史值与采样值的权重关系。假定一条路由由 $n_s, n_1, n_2, \dots, n_t$, 其中 n_s 为源点, n_t 为汇聚节点。为阐述路由算法之便,引入节点的“路由负载度”概念,定义节点 n_i 的路由负载度 R_{n_i} ,如公式(3)所示。

$$R_{n_i} = \begin{cases} \max(P_{n_i}, R_{n_{(i+1)}}), & i = n_s \\ 0, & n_i = n_t \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可知,当节点预测的负载压力已达上限时,则路由负载度为 P_{n_i} , 否则选自身与后继节点的负载度中较大者作为路由负载度。对于同一源点,若节点 n_i 同时为多条路由的交叉节点,设 n_i 的所有后继节点分别为 n_j, \dots, n_k , 则有 $R_{n_i} = \max(P_{n_i}, \min_{n=j, \dots, k} (R_{n_j}))$ 。在每个采样间隔后,节点依据流量预测值更新节点负载度,接收后继节点的路由负载度后,按照上述方法生成自身的路由负载度并发往前继节点。在路由发现阶段,节点根据所有后继节点的路由负载度选择最小者作为流量的下一跳节点。LPR 采用指数平均法预测节点负载度,通过数值比较产生路由指标,网络整体复杂度仅为 $O(m)$,路由信息维护过程中节点只负责传递自身的路

由负载度,并且兴趣数据也仅沿节点的下一跳判断进行转发,自适应机制使得节点的信息传递具有局部性,因此不易导致通信重复。

4 仿真实验及分析

4.1 仿真环境

为了评价和分析本文提出的基于节点负载压力的自适应路由算法 LPR 的性能,对 LPR 进行了仿真实验,实验中忽略通信延时和报文接收的节点能耗。仿真实验网络拓扑如图 1 所示。

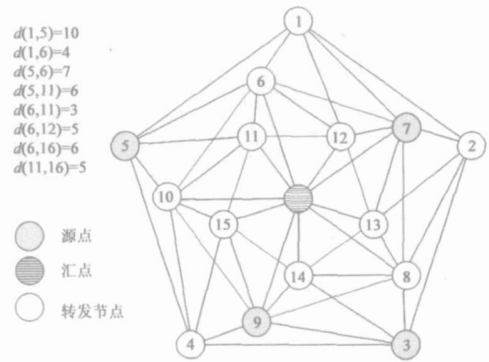


图 1 仿真拓扑图

仿真拓扑由顶点为节点的两个同心正五边形构成,共有 16 个传感器节点,其中编号 3、5、7、9 的节点是数据采集节点,以速率 v 生成兴趣数据;正五边形中心节点为汇聚节点;实线边代表节点间的无线对称链路, $d_{(i,j)}$ 表示节点 i 和 j 间距离, (i,j) 链路上单位流量费用函数 $w_{ij} = kd_{(i,j)}^3$;源点的初始能量设为 $40J$,转发节点都为 e_f 。其它仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

参数	描述	取值
k	单位费用函数的参数	$10^{-3} J/kB \cdot m^3$
	流量的历史值与采样值的权重关系	0.3
v	源点的流量生成速率	8kbps
	节点采样间隔	0.5s
e_f	转发节点的初始能量	20J

4.2 仿真实验

4.2.1 实验 1

定义 LPR 仿真所得 WSN 生命期与理想生命期的比率 $R_{LPR} = T_{LPR} / T_s$, 作为评价 LPR 算法性能的指标, T_s 从算法 O-LT 计算获得,约为 279.6s。为了研究预设参数、对 LPR 性能的影响,用 LPR(,) 标识不同参数值时的性能曲线, R_{LPR} 值变化如图 2 所示。从图 2 中可以看出,当 α 、取值很小时, LPR 性能较差,这是由于参数的取值未能使负载度充分考虑潜在负载及剩余能量因素。当 α 、取值均大于 1 后, R_{LPR} 维持在相对稳定的状态,均在 91% 以上。在 $\alpha = 1, \beta = 3$ 附近 R_{LPR} 达到最高点,约为 96.4%, 这表明负载压力指标应侧重考虑节点

剩余能量因素()应选取经过多次实验所获得的性能较为良好的数值,该值直接影响后续实验的结果,这种取值方式是为了更好的体现 LPR 算法的性能,以获得对 LPR 相对客观的评价。

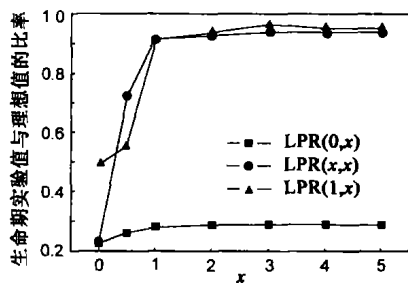


图 2 (α, β) 变化时 LPR 性能曲线

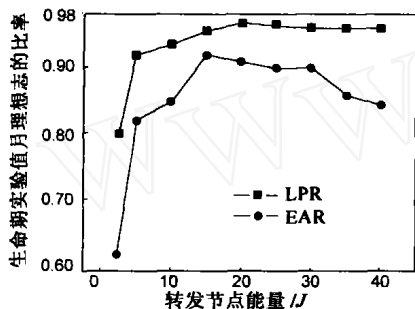


图 3 e_f 变化时 LPR 与 EAR 性能比较

4.2.2 实验 2

使用实验 1 中所获得参数()的较优值(1,3). 当 e_f 变化时,其余参数同表 1,比较 R_{LPR} 与能量感知路由协议(简称为 EAR)实验结果 R_{EAR} ,其中 $R_{EAR} = T_{EAR}/T_s$. 曲线变化如图 3 所示,从图中可以看到,在 e_f 较小(横坐标 2.5~10)时 LPR 与 EAR 性能都表现出较为明显的上升势态,这是因为此时随 e_f 不断增大,2 种路由算法的执行时间增长,LPR 的选路间隔的粒度相对得到细化,性能持续上升;EAR 按概率选路的次数增加,由随机性对算法性能造成的负面影响逐渐削弱. e_f 继续变大至 15 后,LPR 性能曲线持续平稳状态,表明此时 LPR 性能受能量因素影响很小. EAR 性能曲线呈小幅降势,两者性能差距趋于明显,在横坐标为 4 处性能差达到 11.5%. 这是由于转发节点能量较大,WSN 生命期和总流量相应增加,由预置概率造成的非合理选路亦增多,抑制 EAR 性能的影响愈加显著.

5 结束语

本文对基于高效能耗的路由规划问题进行了深入研究,针对节点异跳上的单位传输费用的差异性,对 WSN 生命期模型进行了理论分析,最终转化为带不等式约束的最大费用最大流问题进行处理,并相应提出一种基于节点负载压力的自适应路由算法 LPR. 仿真结果表明,LPR 算法能有效地延长 WSN 生命期.LPR 算法中、等预设参数直接影响 LPR 的性能,它们的取值与

WSN 的拓扑环境和各项参数密切相关,获取它们的最优值或较优值应成为 LPR 执行之前的必要工作,否则可能会导致 LPR 的恶劣性能,因此研究其在随机拓扑的 WSN 中自适应调整算法将是下一步的主要工作.

参考文献:

- [1] Estrin D. Tutorial "Wireless sensor networks" part IV: sensor network protocols [EB/OL]. <http://nest1.ee.ucla.edu/tutorials/mobicom02/>. 2002/2005-11.
- [2] Chang J H, Tassiulas L. Energy conserving routing in wireless ad-hoc networks[A]. In Proc of IEEE INFOCOM[C]. Tel Aviv, Israel:IEEE Press, 2000. 22 - 31.
- [3] Zussman G, Segall A. Energy efficient routing in ad hoc disaster recovery networks[A]. In: Proc of Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. San Francisco, California, USA: IEEE Press, 2003. 682 - 691.
- [4] Shah R C, Rabaey J M. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[A]. In: Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference Record[C]. Orlando, FL, USA: IEEE Press, 2002. 350 - 355.
- [5] Rao A, Ratnasamy S, Papadimitriou C, et al. Geographic routing without location information[A]. In: Proc of 9th Annual Int'l Conf on Mobile Computing and Networking[C]. San Diego, CA: ACM press, 2003. 96 - 108.
- [6] Sankar A, Liu Z. Maximum lifetime routing in wireless ad-hoc networks[A]. In Proc of Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies[C]. Hong Kong, China: IEEE Press, 2004. 1089 - 1097.
- [7] Akkaya K, Younis M. A survey on routing protocols for wireless sensor networks[J]. Elsevier Engineering Information, 2005, 3(3): 325 - 349.
- [8] Orlin J B. A faster strongly polynomial minimum cost flow algorithm[A]. In: Proc of the Twentieth Annual ACM Symposium on Theory of Computing[C]. Chicago, IL, USA: ACM Press, 1988. 377 - 387.
- [9] Ahuja R K, Magnanti T L, Orlin J B. Network flows: theory, algorithms, and application[M]. Beijing: China machine press, 2005. 598 - 637.

作者简介:



刘林峰 男,1981 年生于江苏丹阳,博士研究生,主要研究方向为自组织网络和分布式系统. E-mail: liulf@seu.edu.cn