

负载均衡的无线传感器网络拓扑控制算法

郝晓辰¹, 翟明¹, 刘彬¹, 张增仁²

(1. 燕山大学电气工程学院, 秦皇岛 066004; 2. 饶阳县交通局, 饶阳 059000)

摘要: 针对无线传感器网络节点能耗分布不均匀的问题, 提出一种负载均衡的拓扑控制算法, 该算法将节点看作数据转发节点, 把节点间距离和节点剩余能量作为拓扑构建的依据, 对剩余能量较少的节点赋予一定的节点度约束, 从而均衡网络负载, 解决网络中部分节点因负载过重而导致的能耗过大问题, 有效延长网络生命期。

关键词: 无线传感器网络; 拓扑控制; 负载均衡; 本地最小生成树

Load-balanced Topology Control Algorithm in Wireless Sensor Network

HAO Xiao-chen¹, ZHAI Ming¹, LIU Bin¹, ZHANG Zeng-ren²

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004; 2. Traffic Bureau of Raoyang, Raoyang 059000)

【Abstract】 Aiming at the problem of unbalanced load for nodes in Wireless Sensor Network(WSN), a load-balanced Topology Control(TC) algorithm is proposed, which makes nodes as data transmitting nodes and makes the distance between two nodes and residual energy of nodes as the foundation of setting up the topology. The nodes with low energy are given node degree, which balances the network load, solves the problem that the energy consumption of some nodes in network is too fast due to over load of nodes, and extends the network lifetime.

【Key words】 Wireless Sensor Network(WSN); Topology Control(TC); load-balanced; Local Minimum Spanning Tree(LMST)

1 概述

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)是由任意散落在被监测区域内的大量传感器节点以自组织形式构成的网络, 并通过网络将监测数据传送到接收站进行处理^[1]。随着微电子技术、通信技术和计算机技术的飞速发展, WSN在军事和民用各个领域都得到广泛应用^[2-3], 其应用潜力巨大, 已成为目前通信领域的研究热点。由于无线传感器网络缺乏持续能量供给, 其首要设计目标是通过高效使用能量来最大化网络生命期^[4]。由于 WSN 的绝大部分能量消耗于通信传输环节, 因此网络的拓扑结构对网络能耗有着重要影响。高效使用能量延长传感器网络生命期已成为现阶段 WSN 领域研究的主要问题^[5]。

WSN 节点分布的不均匀性使其节点能耗速度有着很大差别, 这造成部分负载过重的节点因能耗过高而过早“死亡”, 使网络生命期缩短。基于最小生成树(Minimum Spanning Tree, MST)的无线传感器网络拓扑控制算法利用贪心算法求各链接通信功率之和最小的拓扑结构, 因为用该结构进行通信耗能最少, 但节点交换全局信息所耗能量巨大, 不适于大规模网络^[6]。文献[7]提出分布式拓扑控制方案, 通过计算转播区域和衡量转播代价降低能耗, 但其拓扑连通冗余度相对较高, 能耗相对较大。有些专家提出基于本地最小生成树(Local Minimum Spanning Tree, LMST)的拓扑控制算法, 该方法利用可达邻居节点信息独立构建本地最小生成树, 能有效降低维持全局连通的传输功率, 但由于未提及负载分布问题, 因此造成部分节点因负载过大而提前死亡。也有学者提出负载均衡的概念, 并以节点数目平衡为标准进行分簇来实现簇内能耗平衡。文献[8]提出度约束最小生成树拓扑控制方案

(Topology Control Scheme, TCS)在一定程度上考虑均衡耗能问题, 并以节点间距离和剩余能量为标准建立链接, 提高通信的健壮性, 但忽略了部分节点由于转发数据而使耗能过大的问题。

在基于功率控制的算法中, 因转发数据可造成部分节点能耗过大而提前死亡, 降低网络生命期, 本文以全局均衡耗能为目标, 综合考虑健壮性、可转播性和抗干扰性等因素, 在 TCS 的基础上提出负载均衡的拓扑控制算法(Load-balanced Topology Control Algorithm, LBTCA), 该算法充分考虑节点担当数据转发任务时的能耗过大问题, 通过调整转发负载降低节点能耗, 从而延长网络生命期。

2 无线传感器网络拓扑结构模型

无线传感器网络拓扑结构在二维平面内可简化为一个有向连通图 $G(V, E)$, 其中, V 表示节点的集合; E 表示链接的集合。

定义 1(节点的可达邻居集合): 节点 i 的可达邻居集合为节点 i 以最大发射功率工作时, 所覆盖半径为 R_{\max} 的区域内节点的集合。

节点 i 及其的可达邻居集合构成的网络拓扑可表示为子图 $G_i(V_i, E_i)$ 。通过剔除网络中通信功率过大且不必要的链接, 同时保证节点之间的连通, 可以使拓扑网络的生命时间最大限度的延长。节点转发数据的耗能模型如下所述:

作者简介: 郝晓辰(1980 -), 男, 博士研究生, 主研方向: 无线传感器网络, 拓扑控制; 翟明, 硕士研究生; 刘彬, 教授、博士生导师; 张增仁, 本科生

收稿日期: 2008-09-10 **E-mail:** haoxiaochen@sohu.com

传感器节点发射 r 比特数据包所消耗的能量为

$$p_t(r, d) = r(\alpha_1 + \alpha_2 d^n) \quad (1)$$

其中, d 为两节点之间的距离; α_1 是与距离无关的量, 包括发射电路所耗能量等; α_2 是与距离有关的量; n 为路径损耗指数, 通常取 2~4 之间。

传感器节点接收 r 比特数据包所消耗的能量为

$$p_r(r) = r\beta \quad (2)$$

其中, β 为接收能量系数。

传感器节点将 2 个数据流 r_1 和 r_2 融合成一个数据包 r 的耗能为

$$p_a(r_1 + r_2; r) = (r_1 + r_2 - r)\gamma \quad (3)$$

其中, γ 数据融合系数。

从式(1)~式(3)可以看出, 若剩余能量较少的节点仍然承担着较重的转发任务, 那么就很可能导致该节点过早死亡, 从而影响网络生命时间的延续。所以, 在构建无线传感器网络拓扑时, 节点应选择剩余能量多的节点作为数据转发的主要节点, 而剩余能量较少的节点作为数据源节点, 这样将有效解决由于负载过大而过早死亡的问题。

3 负载均衡的拓扑控制算法

为便于控制策略描述和分析, 作如下假设:

(1) 每个节点都具有相同的最大发射功率, 其覆盖范围是半径为 R_{\max} 的圆形区域, 且可通过调节发射功率以适应其覆盖范围内不同距离节点的通信;

(2) 每个节点通过定位算法或 GPS 可以获得自己的位置信息;

(3) 每个节点都能够获得自身的剩余能量, 有一定的存储空间来存放邻居节点信息;

(4) 忽略真实环境中存在障碍物等影响通信质量的因素, 确保所有的数据包都能够可靠传输。

构建两节点间是否建立链接进行通信的综合权值参数 ω_{ij} 为

$$\omega_{ij} = d(i, j)^a / (e_i e_j / \sqrt{e_i^2 + e_j^2})^b \quad (4)$$

其中, $d(i, j)$ 为两节点之间的距离; e_i, e_j 分别表示传感器节点的剩余能量, a, b 为预设指数。权值由 $d(i, j), e_i e_j / \sqrt{e_i^2 + e_j^2}$ 两部分决定, 分别反映两节点之间的功耗大小和链接的健壮情况, 从 $e_i e_j / \sqrt{e_i^2 + e_j^2}$ 易知, 当两端节点剩余能量处于较高或平衡状态时, 其链接健壮性较好。

负载均衡拓扑控制算法描述如下:

(1) 所有节点将自身唯一的 ID 号、位置信息和剩余能量作为 HELLO 消息以最大发射功率进行广播。

(2) 接收到 HELLO 消息的节点, 根据其位置坐标建立可达邻居节点信息表, 其中包括每个邻居节点的 ID 号、距离 $d(i, j)$ 和剩余能量, 并分别计算综合权值 ω_{ij} ; 节点按照剩余能量大小对本地所有节点进行排序, 并把剩余能量最少节点的节点度上限设置为 1, 即只有一个邻居, 选择距离最近的节点与其建立连接。

(3) 每个节点根据可达邻居节点信息、综合权值和最大节点度在本地独立构建最小生成树, 具体步骤如下:

1) 将自身节点 v 设为树根节点, 令树上节点集合 $V(T) = \{v\}$, 树上链接集合 $E(T) = \text{空集}$;

2) 检查树上节点的节点度是否达到节点度上限, 若达到,

则不在此节点建立链接; 若树根节点 v 到达节点度上限, 则算法停止, 所产生的 $V(T)$ 和 $E(T)$ 即为本地树结构;

3) 在所有 u 不属于 $V(T)$ 的邻居节点中, 若连接节点 u 和 w 的边 $e = uw$ 是最小综合权值边(不包括已达节点度上限节点所形成的边)且 $\{E(T) \cup \{e\}\}$ 是无圈图, 其中, $w \in V(T)$, 则令 $V(T) = V(T) \cup \{u\}, E(T) = E(T) \cup \{uw\}$;

4) 若 $|E(T)| = \text{可达邻居节点个数}$, 则算法停止, 所产生的 $V(T)$ 和 $E(T)$ 即为本地树结构。否则, 转第 2) 步, 向树中增加新的节点。

(4) 节点以到树上最远邻居的距离为发射半径来广播自己的树上邻居 ID, 然后根据接收到的信息删除网络中的单向链接, 保证链接的双向连通。

上述算法可由图 1 进行说明, 设图中 4 个节点的剩余能量分别为 28, 25, 14, 26, 若只采用综合权值参数来构建拓扑, 则由图 1(a) 可以看出, 剩余能量较少的节点担当了数据转发的主要任务, 将很快失效, 不利于网络生命期的延续, 因此, 需要为剩余能量较少的节点设置一定的节点度约束, 使其不再担当过重的数据转发任务, 从而延长节点的生存时间, 如图 1(b) 所示。

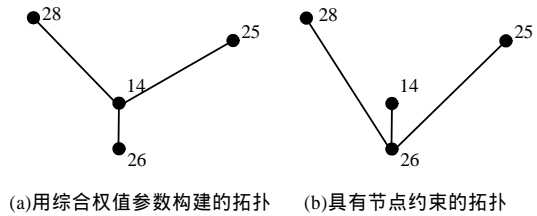


图 1 LBTCA 算法示意图

经过上述基于 LMST 的负载均衡拓扑控制算法处理后, 剩余能量较少的节点将不再担当数据转发任务, 有利于延长网络的生命周期, 从而实现均衡耗能。

4 性能分析与实验

为评估该算法的性能, 采用 Matlab 仿真软件进行多次仿真试验, 以所获得的拓扑结构为主要性能指标, 并与 LMST 等拓扑控制算法进行比较。

仿真系统配置如下: 假设有 50 个节点随机地部署在一个 50 m × 50 m 的方形平面区域内; 每个节点的剩余能量服从泊松分布, 均值为 25 个单位电量。由 LMST, TCS 以及 LBTCA 的拓扑控制算法所生成的拓扑结构分别如图 2~图 4 所示。

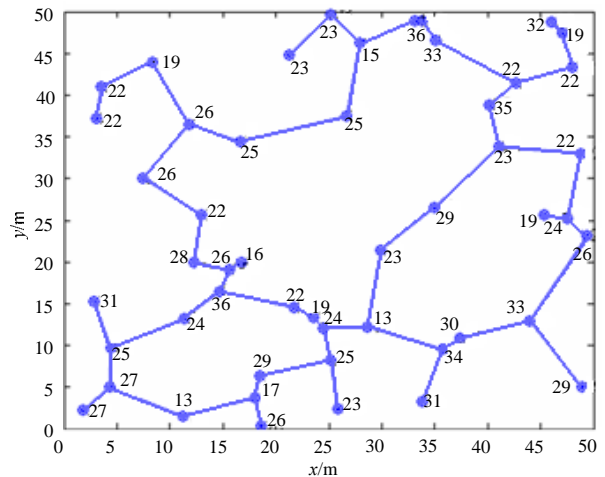


图 2 LMST 算法拓扑结构

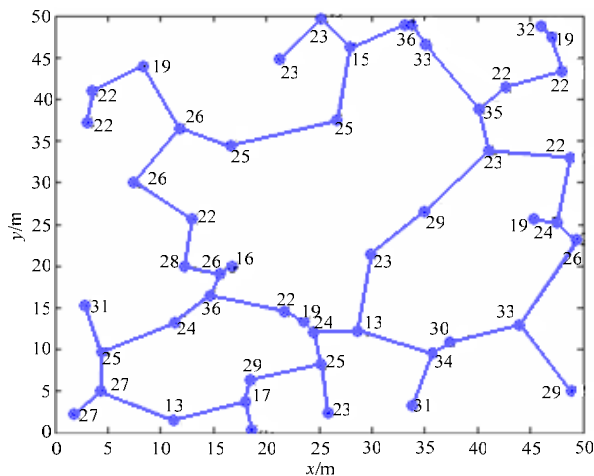


图3 TCS 算法拓扑结构

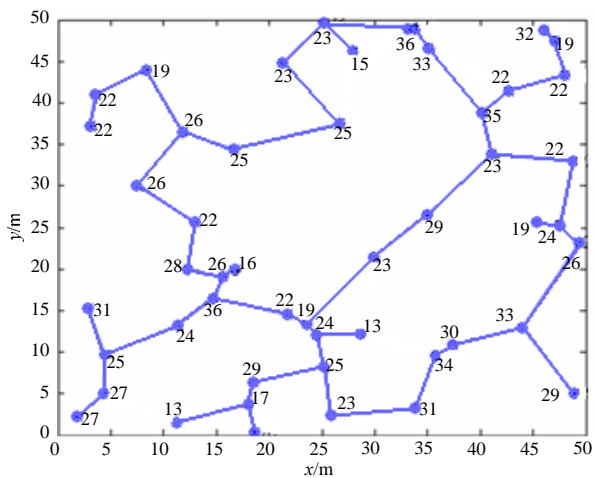


图4 LBTCA 算法拓扑结构

从图 2~图 4 可以看出, LBTCA 所描述的负载均衡拓扑控制算法生成的拓扑结构由于考虑了节点的可转播性, 使得剩余能量较少的节点(如剩余能量分别为 13,15 的节点)成为数据源节点, 节省了担当数据转发节点耗费的能量, 从而延长整个网络的生命周期。

5 结束语

本文提出一种负载均衡的拓扑控制算法, 该算法考虑了节点的可转播性, 并对节点赋予一定的节点度约束, 让剩余能量较多的节点担当数据转发任务, 保证了部分节点不会因转发过多数据而过早失效, 从而延长整个网络的生命期, 实验结果证明了该算法的有效性。

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] 任丰原, 黄海宁. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [3] Akyildiz I F, Cayirci E. Wireless Sensor Networks: A Survey[J]. Computer Networks, 2002, 38(4): 393-422.
- [4] 杜可君, 周兴社, 李志刚. 无线传感器网络中基于网络层的能源有效性研究[J]. 计算机应用研究, 2006, 23(6): 137-143.
- [5] 张学, 陆桑璐, 陈贵海. 无线传感器网络的拓扑控制[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 943-954.
- [6] Bourhour T. Energy-efficient Topology Control for Wireless Ad Hoc Sensor Networks[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2004, 20(1): 27-37.
- [7] Rodoplu V. Minimum Energy Mobile Wireless Networks[J]. Selected Areas in Communications, 1999, 17(8): 1333-1344.
- [8] 刘林峰, 刘业. 传感器网络中基于退火算法的拓扑控制方案[J]. 通信学报, 2006, 27(9): 71-77.

编辑 陈文

(上接第 60 页)

//则从 seq(j) 中删除从第 k 号元素到第 k'-1 号元素, 即删除 //套结

```
SCAN BACK FROM seq(j)[s] //从 seq(j)的尾部开始回扫
IF FIND FIRST k' SUCH THAT seq(j)[k'] = q'_k THEN
DELETE seq(j)[k] TO seq(j)[k'-1] FROM seq(j)
s = s - (k' - k) //修改 seq(j)的长度
k = k + 1 //准备修改 seq(j)的下一位置
ENDIF
END WHILE
4) FOR i = 1 to s-1
Nd = Nd - { q'_i } //记录 seq(q'_i)的产生
seq(q'_i) = seqt(j, q'_i)
//设置 seq(q'_i)为 seq(j)从 q'_ik 开始包括 q'_i 的尾部
t'_q = Right(q'_{i+1}, 1) //产生序列(7)的第 q'_i 号元素
NEXT
```

(3) 算法结束

定理 3 由算法 3 对一个给定的 $LTL(m, n)$ 所产生的序列是一个 $LTL(m-1, n) (n > 2)$ 进行证明:

由于 $Nd = \{x_1 x_2 \dots x_{n-1} | x_i \in \{0, 1, \dots, m-1\}, i = 1, 2, \dots, n-2\} - \{ \underbrace{00 \dots 0}_{n-1 \text{ 个 } 0} \}$, 且在算法结束时, $Nd = \emptyset$, 因此对任何 $j \in \{x_1 x_2 \dots x_{n-1} | x_i \in \{0, 1, \dots, m-1\}, i = 1, 2, \dots, n-1\} - \{ \underbrace{00 \dots 0}_{n-2 \text{ 个 } 0} \}$ 都被遍历。

由于 seq(i) 是无节点链, 经过算法修改后的 seq(j) 仍保

持为一节点链, 因为算法中取

$$q'_k = REPLACE(seq(j)[k], m, x)$$

但可能使 seq(j) 变为一有节点链, 由于算法中每进一步都进行了扫描并删除套结, 保证最后所得的 seq(j) 是一无节点链。因此, 算法中 $t'_{q_k} = Right(q'_{k+1}, 1)$ 是合理的, 即 $q'_{k+1} = Right(q'_k, n-2) \& t'_{q_k}$, 故 seq(j) 满足定义 1 的条件。

对算法 3 略作修改可得到更多的不同。

6 结束语

利用 Look-up 表和 Look-up 表标签来生成序列, 不仅在已知 Look-up 表标签的情况下生成 de Bruijn 序列有效, 而且在已知一个 de Bruijn 序列的情况下, 生成其邻近的序列, 即升级的、降级的、加元的、消元的序列都有效。本文即利用该方法, 给出一种消元算法, 该算法有效。

参考文献

- [1] Xie Shenquan. Notes on De Bruijn Sequences[J]. Discrete Applied Mathematics, 1987, 16(2): 157-177.
- [2] Fredricksen H. A Survey of Full Cycle Algorithms[J]. SIAM Review, 1982, 24(2): 195-221.
- [3] 朱士信. de bruijn 序列的升元算法[J]. 电子科学学刊, 2000, 22(1): 68-72.

编辑 金胡考

