

基于最优刚性图的链路质量与能量的拓扑控制算法

罗小元¹, 王慧彬¹, 王金然², 关新平^{1,3}

(1. 燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 北京市工贸技师学院
轻工分院, 北京 100079; 3. 上海交通大学 电信学院, 上海 200240)

摘要: 针对目前无线传感器网络研究中网络能量利用率低和通信链路不可靠等问题, 提出一种基于最优刚性图的网络拓扑优化算法. 该算法通过建立包含链路质量和能量两方面内容的链路权值函数来构建链路可靠性强、能量利用率高的网络拓扑结构. 研究表明, 所构建的拓扑具有平均节点度低和链路性能好等优越特性. 仿真结果表明, 与现有拓扑控制算法相比, 所提出的算法能够更有效地减少能量消耗, 从而延长网络寿命.

关键词: 无线传感器网络; 拓扑优化; 最优刚性图; 链路质量; 能量消耗

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Link quality and energy topology control algorithm based on optimally rigid graph

LUO Xiao-yuan¹, WANG Hui-bin¹, WANG Jin-ran², GUAN Xin-ping^{1,3}

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Branch of Light Industry, Beijing Industry and Trade Technicians College, Beijing 100079, China; 3. School of Electronic and Electric Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: LUO Xiao-yuan, E-mail: xyluo@ysu.edu.cn)

Abstract: By noting the problem such as low energy efficiency and unreliable communication links in existing studies on wireless sensor networks(WSNs), a novel topology control algorithm based on the optimally rigid graph theory is proposed. A function, which can comprehensively reflect both link quality and energy consumption, is built to weight communication links with strong reliability and high efficient utilization of energy in the proposed algorithm. It is proved that the proposed algorithm has the properties of low average node degrees and good link performance. Finally, some simulation results show that the energy consumption can be reduced efficiently and network life can be prolonged by using the proposed algorithms, compared with the existing topology control algorithms.

Keywords: wireless sensor network; topology optimization; optimally rigid graph; link quality; energy loss

0 引言

无线传感器网络(WSNs)凭借其灵活性、自组织性、部署迅速等特点, 在森林监测、灾害管理、太空探索、工业自动化、安全设施以及边境保护^[1-2]等许多领域得到了广泛的应用. 但是, 传感器节点能量的有限性和网络的不可靠性给无线传感器网络的应用带来了很大的挑战. 具有完整性、易维护性等特点的网络拓扑结构能够提高能量的利用率, 有利于对无线传感器网络化控制系统实施有效、精确的控制.

汇集节点(Sink)的位置对无线传感器网络的

可靠通信、能量消耗等性能有很大的影响. 为了延长网络的生命周期, Rahman等^[3]应用 Particle swarm optimization (PSO) 算法^[4]确定 Sink 的最优位置, 缩短了节点间的通信距离, 减小了能量消耗. 但是, 此方法仅通过优化 Sink 节点的位置构建网络, 节能效果有限. Ya等^[5]提出的 Geographical adaptive fidelity (GAF) 算法通过节点的地理位置为节点进行分簇, 同时依据节点睡眠调度的策略合理分配节点的工作时间, 这样可以减少不必要的能量消耗, 但是该算法没有对活跃节点进行拓扑控制. 为了在提高无线传感器网络

收稿日期: 2014-06-18; 修回日期: 2014-12-18.

基金项目: 国家973计划项目(2010CB731800); 国家自然科学基金项目(61074065, 61375105); 河北省自然科学基金项目(F2012203119).

作者简介: 罗小元(1976—), 男, 教授, 博士生导师, 从事无线网络拓扑优化、多自主体合作控制等研究; 王慧彬(1987—), 女, 硕士生, 从事无线传感器网络拓扑优化算法的研究.

的能量利用率的同时降低设备成本, Othman 等^[6]在确保网络可通信的前提下, 通过调整传感器节点间的传输功率使其减小, 从而降低了网络能量损耗值, 延长了网络的生命周期. 随着拓扑控制算法的不断提出, 连通支配集策略被广泛应用于优化算法中. Rizvi 等^[7]提出的 Energy-efficient connected dominating set (EECDs) 算法通过构建一个主干通路提高网络能量利用率, 并延长网络的生命周期, 此算法仅适用于规模较小的网络系统. 同样, 由 Torkestani^[8]提出的基于节点度和最小的支配集构建拓扑结构达到了节能的目的. 康一梅等^[9]基于分簇机制提出的低能耗多层次型拓扑控制算法是一种支持多跳网络、降低能耗的多级组网的控制算法, 但进行推选和更换簇头时仅根据各节点的剩余能量和节点间的距离, 对于簇头的可靠性有一定的局限性. Khan 等^[10]提出的 Color based topology control (CBTC) 算法降低了通讯的时延, 减小了能量损耗, 同时也避免了覆盖洞的出现. 以上拓扑控制算法在一定程度上实现了减小能量损耗的目的, 但是均没有考虑在无线传感器网络中链路质量对拓扑结构的影响. 此外, 频繁的链路中断会引起路径的重建, 同时也会消耗大量的能量, 因此, 选择链路质量好的通信链路能有效提高通信传输的可靠性能, 对提高无线传感器网络能量利用效率具有重要的意义. Chandane 等^[11]采用分布式的方法, 以能量代价和信号接收强度作为度量标准, 提出了 Distributed link quality aware routing (DLQAR) 算法, 该算法增强了网络的鲁棒性, 提高了能量的利用率, 但是算法只能用于由同构传感器节点构成的网络. Huang 等^[12]针对无线传感器网络中不可靠链路通信耗能过大的问题, 基于路径损耗及节点剩余能量, 提出了 Path-loss based energy-aware topology control (PLEACT) 算法, 可以用于异构传感器节点的拓扑控制, 但是不能保证所有节点至少有两个逻辑邻居, 无法实现无线传感器网络真正的鲁棒性.

本文引入综合反映链路质量和能耗两方面因素的链路权值函数, 依据权值函数值建立满足秩为 $(2n-1)$ 的刚度矩阵, 选择路径损耗值及能耗小的链路, 基于最优刚性图构建网络拓扑. 本文提出一种基于刚性图的链路质量及能量拓扑控制 (LQETCORG) 算法, 考虑了传感器节点之间的路径损耗、能量消耗及节点的初始能量对无线传感器网络的影响, 通过该算法的优化, 拓扑结构具有复杂度低、耗能少、鲁棒性强等特性.

1 网络模型与预备知识

1.1 图论基础

具有 N 个顶点、 E 条边的无向图 G 是由代表传

感器节点的顶点集 $V = \{1, 2, \dots, N\}$ 和节点之间通信连接边集 $E = \{(i, j) \in V \times V : i \neq j\}$ 组成的. 顶点是由随机部署的传感器节点的位置 $p_i \in R^2$ 所决定的.

对于任意节点 $i, j \in V$, 若满足 $\|p_i - p_j\| \leq R_c$, R_c 为节点的有效传输半径, 则称节点 i 与节点 j 邻接. 给定一个加权函数 $\phi: E \rightarrow R$, 是将一条边映射成一个实数.

下面分别给出刚性图 and 最优刚性图的概念. 刚性图是无向图, 如果对于所有的顶点对 $(i, j) \in E$, 有 $\|f_i(t) - f_j(t)\| = \text{常数}$, 则称这个图是一致的, 其中 $f_i(t) (t \geq 0)$ 表示传感器节点的位置发生变化时的轨迹曲线. 如果这个边一致, 拓扑结构在移动中任意两个顶点 i 和 j 的轨迹 $f_i(t)$ 和 $f_j(t)$ 在任何时间 t 的距离都能保持不变, 则称这个拓扑结构图为刚性图, 在刚性图中每个顶点至少要有两条邻接的边^[13]; 反之, 则称其为可变形图. 可变形图和刚性图如图 1(a) 和图 1(b) 所示.

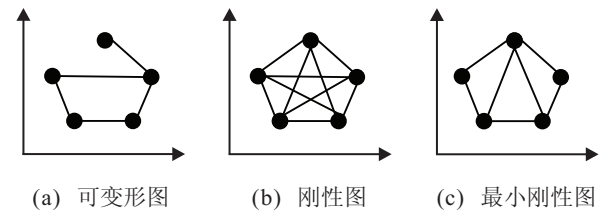


图 1 可变形图、刚性图和最小刚性图示意

刚度矩阵是刚性图的一种代数描述形式, 其构造规则如下. 首先各顶点坐标按以下顺序排列: $\{p_1^{(1)}, \dots, p_1^{(n)}, p_1^{(2)}, \dots, p_2^{(n)}, \dots, p_N^{(1)}, \dots, p_N^{(n)}\}$; 然后, 构建一个行和列分别为相对应的边和顶点的坐标矩阵 $M \in R^{|E| \times Nm}$. 例如, 在刚度矩阵 M 中对应于边 $(i, j) \in R^2$ 的行为

$$p_1^1 p_1^2 \cdots p_i^1 \quad p_i^2 \quad \cdots \quad p_j^1 \quad p_j^2 \quad \cdots \quad p_N^1 p_N^2 \\ (i, j) [0 \ 0 \ \cdots \ p_i^1 - p_j^1 \quad p_i^2 - p_j^2 \quad \cdots \quad p_j^1 - p_i^1 \quad p_j^2 - p_i^2 \quad \cdots \ 0 \ 0].$$

按以上规则建立起来的矩阵 M 称为刚度矩阵.

注 1 在构建拓扑结构的局部刚度矩阵时, 需要知道传感器节点的位置, 因此, 本文的算法在那些无定位功能的无线传感器网络应用中可能会存在一些局限性. 然而, 许多实际无线传感器网络是具备 GPS 定位或者其他节点定位功能的^[14-15]. 在这类网络中, 本文提出的分布式拓扑控制算法具有网络容错性强、能量利用率高、网络寿命长的优势.

如果刚性图去除任意一条边都会破坏此图的刚性, 则称此图为最小刚性图, 如图 1(c) 所示. 刚性图有如下两个性质.

引理 1^[16] 如果已知刚性图 $G(V, E)$ 的一个子图 $G'(V', E')$ 可由任意其他刚性图子图 $G''(V'', E'')$

替代, 则得到的图仍是刚性的。

引理 2^[16] M 为二维平面中具有 N 个顶点的图的刚性矩阵. 这个图是刚性的, 当且仅当

$$\text{rank}(M) = 2N - 3. \quad (1)$$

在刚性图的基础上进一步介绍最优刚性图. 依据拓扑图中边的长度为每条边赋予权值, 若满足以下两个条件: 1) 拓扑图是最小刚性的; 2) 拓扑图的边的加权和最所有相同顶点组成的刚性图中最小的. 则称该拓扑图为最优刚性图.

定义 1 (节点度) 节点度为能与该点直接通信的邻居节点个数.

刚性图是不可变形的意味着基于刚性图构建的拓扑图是稳定的, 由刚性图的性质可知形成的拓扑结构是 2-连通的, 即每两个传感器节点至少有两可通信的链路, 具有真正的鲁棒性. 基于最优刚性图形成的网络拓扑在保证刚性图的特性基础上, 选择链路权值较小的路径构成无线传感器网络, 可以降低网络的能量消耗和路径损耗值, 同时降低网络的节点平均度和网络的复杂性. 由最优刚性图的定义及以上的讨论可知, 最优刚性图为通信复杂度最小的刚性图, 因此, 引入最优刚性图来进行拓扑优化可以使 WSNs 的性能达到最好. 具体的算法将在后文给出.

1.2 网络模型

假定本文研究的无线传感器网络系统中传感器节点满足如下基本要求:

- 1) 在网络中的各个传感器节点都能计算并存储相关的数据, 同时已知自身的发射功率并且可以直接测量接受信号强度值;
- 2) 在节点的最大发射功率范围内, 节点之间的通信是双向的;
- 3) 节点的初始能量是已知的.

1.3 链路质量的确定

在无线传感器网络中可靠的链路能有效改善通信传输的质量, 同时能够提高网络能量利用效率. 因此, 在网络的拓扑优化中链路质量是不可忽视的重要因素之一. 现有的一些算法中直接以接收信号强度 (RSS)^[13] 作为链路质量标准进行拓扑优化, 但是针对节点的发射功率可变的传感器节点的拓扑控制而言, 直接用 RSS 作为链路质量的评定量是不可行的, 本文用路径损耗作为链路可靠性的性能指标.

采用路径损耗 P_{loss} 作为链路质量的度量标准, 可以克服接收信号强度所存在的需要相同的发射功率基准的问题, 更具有广泛性. 其定义为

$$P_{\text{loss}} = k \cdot P - \text{rss}. \quad (2)$$

其中: rss 为节点接收到信号的功率值; $k = (\text{rss}_{\text{max}} -$

$\text{rss}_{\text{min}}) / (P_{\text{max}} - P_{\text{min}})$, rss_{max} 、 rss_{min} 分别是所有传感器节点接收信号强度的最大、最小值, P_{max} 、 P_{min} 分别是节点的发射功率的最大、最小值; P 为节点发射功率.

2 LQETCORG 算法

基于最优刚性图的 WSNs 链路质量和能量拓扑控制 (LQETCORG) 算法主要由寻找邻居、权值计算、信息交互和拓扑构建 4 个阶段组成.

2.1 寻找邻居阶段

无线传感器网络中各节点需要建立各自的邻居信息列表, 然后根据此信息列表进行拓扑优化. 首先, 各传感器节点以自身的最大发射功率发送 Hello 信息, 其内容包括节点自身的序列号、初始状态时的能量值及最大发射功率 P_{max} . 当节点接收到此信息时, 根据信息中的内容各自建立一个初始状态的邻居信息列表 Inlist_i , 格式见表 1.

表 1 节点 i 的初始邻居信息列表 Inlist_i

nid	e	P_t
-----	-----	-------

表 1 中: nid 为邻居节点的序列号, e 为邻居节点的初始能量值, P_t 为邻居节点的最大发射功率. 此过程的伪码如下.

构建邻居信息列表:

- 1) for 每个节点 i do
- 2) while 节点 i 接受来自节点 j 的 Hello 消息 do
- 3) if j 不在节点 i 的邻居信息列表 Inlist_i do
- 4) 增加新的一行到 Inlist_i
- 5) $\text{nid} = j, e = e_j, P_t = p_j$
- 6) end if
- 7) end while
- 8) end for

2.2 权值计算阶段

为了能够提高无线传感器网络的能量利用率, 进而延长网络的工作时间, 确定链路时除了考虑收发信息消耗的能量以及节点的初始能量, 还应考虑链路质量的可靠性. 可靠的链路不仅可以确保数据的接收率, 还可以减少拓扑结构重建的概率, 从而大大减少能量的消耗, 更好地改善网络的性能. 基于上述考虑, 网络中任意两个具有邻接关系的节点 i, j 的链路 $(i, j) \in E$, 定义其权值函数为

$$W_{i,j} = \frac{P_{\text{loss}} \cdot (E_{ti} + E_{rj})}{e_i + e_j}. \quad (3)$$

其中: P_{loss} 为节点 i, j 之间的路径损耗值, 可由式 (1) 获得; $E_{ti} + E_{rj}$ 为两节点之间收发数据的能量消耗, 其定义如下^[17]:

$$E_t = E_{\text{elec}} \cdot l + E_{\text{amp}} \cdot l \cdot d^2, \quad (4)$$

$$E_r = E_{\text{elec}} \cdot l, \quad (5)$$

E_{elec} 是发送和接收数据时单位比特消耗的能量, E_{amp} 是放大单位比特消耗的能量, l 代表数据包的比特数, d 为两传感器节点之间的距离; e_i 、 e_j 分别是节点 i 、 j 的初始能量。

由权值表达式(3)可知, 链路权值 $W_{i,j}$ 越小, P_{loss} 、 $E_{ti} + E_{rj}$ 值越小, 同时节点的剩余能量 $e_i + e_j$ 越大. 基于最优刚性图构建的拓扑图是链路权值最小的拓扑图, 因此减少了网络拓扑的路径损耗值, 进而使得网络的链路更加可靠, 同时减少了网络的能量消耗, 实现了节能、提高能量利用率的目的。

2.3 信息交互阶段

各节点再次发送一条 Exchange 消息, 包含每个节点的邻居信息列表 Inlist, 这样使得节点之间可以获得所有邻居节点的邻居信息、节点间的路径损耗、能量消耗以及由上一阶段计算得到的链路权值, 建立一个新的信息列表 Einlist, 格式见表 2。

表 2 节点 i 的信息交互列表 Einlist _{i}

nid	e	P_t	P_{loss}	$E_{ti} + E_{rj}$	W
-----	-----	-------	-------------------	-------------------	-----

表 2 中各符号的意义同表 1 中所示. 此阶段的伪代码如下。

交互信息列表:

- 1) for 每个节点 i do
- 2) while 节点 i 接受来自节点 j 的交互消息 do
- 3) if j 在节点 i 的邻居信息列表 Inlist _{i} do
- 4) 增加信息 P_{loss} , $E_{ti} + E_{rj}$, W 到 Einlist _{i} 中
- 5) end if
- 6) end while
- 7) end for

2.4 拓扑构建阶段

由权值函数的意义可知, 链路权值越小, 此链路的路径损耗值、能量消耗值越小, 同时节点的剩余能量越多, 此链路的可靠性越好. 因此, 依据已经建立好的信息列表中的信息, 将 Einlist _{i} 中节点 i 与其邻居节点之间的通信链路权值进行升序排序, 随后按此顺序建立子图的刚度矩阵 M_i , 再按照最优刚性图理论对节点依次优化, 在保证整个网络连通性前提下, 选择权值较小的链路优化网络的拓扑结构图, 最终可以构建一个具有综合考虑可靠性、鲁棒性和能量损耗等特性的拓扑结构图. 具体的执行过程如下所示。

拓扑构建:

- 1) 将 Einlist _{i} 中的链路权值进行升序排列
- 2) 按权值的升序序列建立拓扑图的刚度矩阵 \hat{M}_i

3) 初始化 M_i , $M_i = \hat{M}_i(1)$

4) for $j = 1 : |\hat{E}|$

5) while rank(M_i) $\leq 2(|N_i| + 1) - 3$

6) $M_i = \begin{bmatrix} M_i \\ \hat{M}_i(j + 1, :) \end{bmatrix}$

7) if M_i 是满秩

8) 将此行对应的边记录到集合 \hat{E}' 中

9) end if

10) end while

11) end for

12) for $u = \{N, i\}$

13) for $v = \{N_i, i, u \neq v\}$

14) if $(u, v) \notin v$

15) 删除所有在 $\hat{E}'_q (q \in i \cup N_i)$ 中记录的 (u, v)

16) end if

17) end for

18) end for

2.5 LQNTCORG 算法分析

假设所有节点均以自身最大功率所构建的拓扑结构为 $G(V, E)$, 经 LQNTCORG 拓扑控制算法优化后的具有刚性特性的拓扑结构图表示为 $G'(V, E')$ 。

性质 1 若 $G(V, E)$ 是连通的, 则 $G'(V, E')$ 是链路可靠连通的, 且 $G'(V, E')$ 是 2-连通的。

证明 由上述算法 LQNTCORG 可知, $G'(V, E')$ 是 $G(V, E)$ 的全局最优刚性图, 刚性图的概念强于连通图, 因而 $G'(V, E')$ 能继承 $G(V, E)$ 的连通性, 同时 $G'(V, E')$ 是基于最优刚性的, 故链路是可靠通信的. 此外, 最优刚性图中的顶点均至少与两个邻居节点直接通信, 此特性满足 2-连通性的充要条件: 所得最优刚性图中两个不同的顶点之间至少存在两条链路. \square

性质 2 $G'(V, E')$ 的节点平均度 $\text{Deg}(G')$ 收敛于 4, 即 $\text{Deg}(G') < 4$ 。

证明 $G'(V, E')$ 是最优刚性图, 同时也是刚性图. 由引理 2 可知, $G'(V, E')$ 有 $2N - 3$ 条边. 由图形边数与节点度的关系可知, $G'(V, E')$ 节点度总和为边数 $2N - 3$ 的两倍, 则平均节点度 $\text{Deg}(G') = 2(2N - 3) / N = 4 - 6/N$, 因此 $G'(V, E')$ 的节点平均度随着节点数量的增加不断趋近于 4, 即 $\text{Deg}(G') < 4$. \square

由上述性质可知, 按本文提出的算法构建的网络拓扑不仅提高了网络链路的可靠性, 降低了通信能量消耗, 而且还能保证网络的 2-连通性, 实现真正的鲁棒性. 同时该网络拓扑的节点平均度趋近于 4, 从而减少了网络的复杂度, 降低了网络中节点之间的干扰。

注 2 本文提出的算法是通过依次建立节点的信息邻居列表, 优化节点之间的拓扑结构, 最终实现

对整个网络的优化,因此称此算法为分布式优化算法.可见通过该算法不仅能够优化无线传感器网络的初始拓扑结构,而且对于动态拓扑结构也可以进行局部重新优化,相对于集中式的优化算法使用范围更广泛.

3 仿真实验

利用 Matlab 工具进行仿真实验,通过与同是基于路径损耗的 LQNTCORG 算法的比较来验证本文算法的有效性.仿真参数如表 3 所示.

表 3 仿真参数

参数	数值
区域 / m ²	1000×1000
节点数 / 个	100
通信半径 / m	160
$E_{elec} / (J/bit)$	50
$E_{amp} / (pJ/bit \cdot m^2)$	100
l / bit	1

具有 N 个节点的无线传感器网络使用最大传输功率工作时所形成的拓扑 $G(V, E)$ 定义为最大功率拓扑,其拓扑结构如图 2(a) 所示.图 2(b) 和图 2(c) 分别

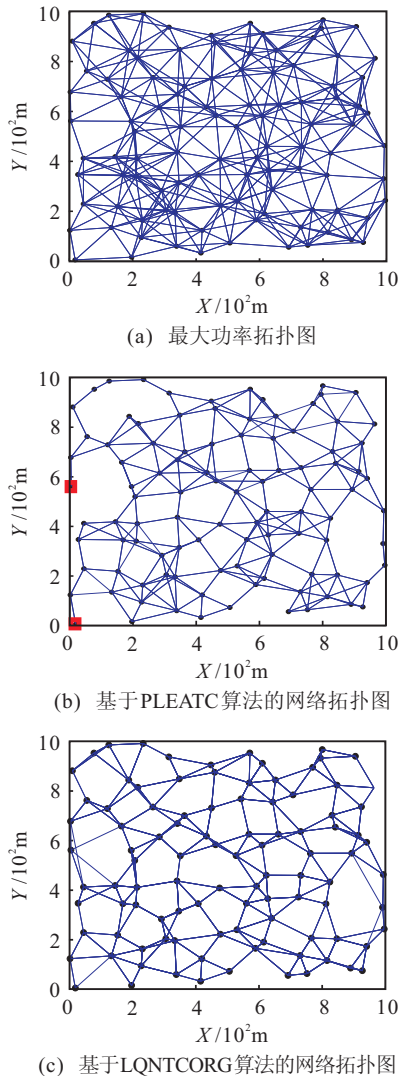


图 2 基于不同算法获得的网络拓扑结构比较

是执行 PLEATC 算法、LQNTCORG 算法得到的拓扑结构图.显然,图 2(a) 拓扑结构的链路数量很大,复杂度高,造成网络的能量消耗大.图 2(b) 与图 2(c) 相比降低了链路的复杂度和网络中的能量消耗,但是网络节点的度分布不均匀.例如图 2(b) 中的许多边界区域的一些节点只有一个邻接节点,网络的鲁棒性较差,而某些节点的度比较高,造成这些节点能量消耗快,网络负载不均衡将会严重影响网络的寿命.而采用本文提出的 LQNTCORG 算法生成的拓扑如图 2(c) 所示,每个节点都保证至少有两个度,因此具有较强的鲁棒性;同时,节点的度分布比较均匀,有利于提高网络寿命.以上比较表明 LQNTCORG 算法具有较好的鲁棒性.

无线传感器网络中,节点度即为与节点直接通信的邻居个数.过高的节点度会导致传播信号之间的干扰增强,进而使得能量消耗增加;当节点度过低时会增加通信路径,使得网络的能耗增加.图 3 给出了在 1000 m×1000 m 区域内,散布 100, 200, 300, 400, 500 个节点时,执行 PLEATC 算法和 LQNTCORG 算法得到拓扑图的平均节点度的变化曲线.由图 3 可知:随着传感器节点数量的逐渐增多,PLEATC 算法的平均节点度逐渐增大;而 LQNTCORG 算法生成的拓扑图随着节点数增多,节点平均度趋近于 4,减少了网络中节点之间的干扰,达到了节能的目的,同时验证了性质 2 的正确性.

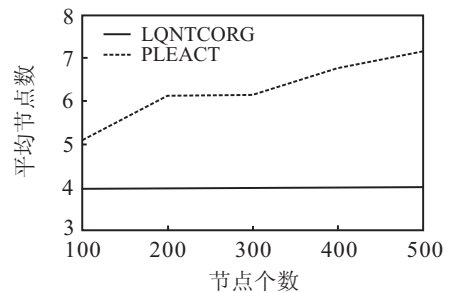


图 3 节点平均度对比

图 4 给出了执行 PLEATC 算法和 LQNTCORG 算法时,随着节点数目的增加平均能量消耗的变化情况.由图 4 可知:执行 LQNTCORG 算法的网络的平均能量消耗值远小于 PLEATC 算法,这样有利于网络生命

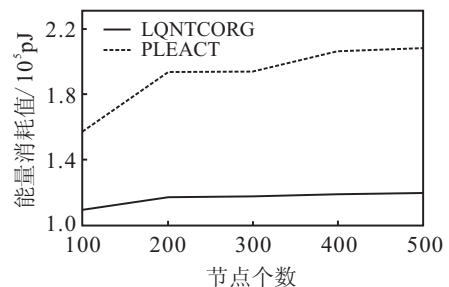


图 4 平均能量消耗对比

周期的延长;随着节点数的增加,由PLEATC算法优化得到的网络的平均能量消耗值大幅度增加,而执行LQNTCORG算法时的增长趋势却很平缓,可见,基于最优刚性图对无线传感器节点进行拓扑优化可以提高网络链路的可靠性,进而提高能量利用率,延长网络的生命周期。

4 结 论

针对无线传感器网络中链路质量较差的路由对网络能量造成极大耗费的问题,本文采用路径损耗作为链路质量标准,联合通信能量消耗、初始能量值构建权值函数,并基于最优刚性图提出了LQNTCORG算法,由该算法生成的拓扑结构具有真正的容错特性,同时具有合适的平均节点度,使得网络能耗减少,网络的寿命增加,实现了网络拓扑结构的优化。

参考文献(References)

- [1] Aziz A A, Sekercioglu Y A, Fitzpatrick P. A survey on distributed topology control techniques for extending the lifetime sensor of battery powered wireless sensor networks[J]. *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, 2013, 15(1): 121-144.
- [2] Tapiwa C M, Gerhard H P. A distributed topology control technique for low interference and energy efficiency in wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Industrial Informatics*, 2012, 8(1): 11-19.
- [3] Rahman M N, Matin M A. Efficient algorithm for prolonging network lifetime of wireless sensor networks[J]. *Tsinghua Science and Technology*, 2011, 16(6): 561-568.
- [4] Hong T, Shiu G, Lee Y. Finding base-station locations in two-tiered wireless sensor networks by particle swarm optimization[C]. *Particle Swarm Optimization*. East Providence: Intech, 2009: 261-274.
- [5] Ya X, Heidemann, Estrin D. Geography-informed energy conservation for ad hoc routing[C]. *Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking*. Roma: ACM, 2001: 70-84.
- [6] Othman J B, Bessaoud K, Bui A, et al. Self-stabilizing algorithm for efficient topology control in wireless sensor networks[J]. *J of Computational Science*, 2013, 4(4): 199-208.
- [7] Riziv S, Qureshi H K, Khayam S A, et al. An energy efficient topology control algorithm for connected area coverage in wireless sensor networks[J]. *J of Network and Computer Applications*, 2012, 35(2): 597-605.
- [8] Torkestani J A. An energy-efficient topology construction algorithm for wireless sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2013, 57(7): 1714-1725.
- [9] 康一梅,李志军,胡江,等.一种低能耗层次型无线传感器网络拓扑控制算法[J]. *自动化学报*, 2010, 36(4): 543-549.
(Kang Y M, Li Z J, Hu J, et al. A Low-power hierarchical wireless sensor network topology control algorithm[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(4): 543-549.)
- [10] Khan M A, Khan A, Shah S K, et al. An energy color based topology control algorithm for wireless sensor networks[J]. *Wireless Sensor Network*, 2013, 5(1): 1-7.
- [11] Chandane M M, Bhirud S G, Bonde S V. Distributed link quality aware routing in wireless sensor network[J]. *The 2012 IEEE Int Conf on Computer Science and Automation Engineering*, 2012, 25(2): 528-532.
- [12] Huang M, Cheng L L. Energy-aware topology control algorithm of wireless sensor networks based on path loss[J]. *Computer Engineering*, 2012, 38(5): 92-94.
- [13] Sardellitti S, Barbarossa S. Optimal topology control and power and power allocation for minimum consensus networks[J]. *IEEE Trans on Singal Processing*, 2012, 1(60): 383-398.
- [14] Song C C, Hsu Y C, Feng C F, et al. Construction of a wireless sensor networking platform with vibration sensing and GPS positioning[C]. *IEEE ICCAS-SICE Internation Joint Conf. Fukuoka*, 2009: 5570-5575.
- [15] Sun W Y, Su X L. Wireless sensor network node localization based on genetic algorithm[C]. *IEEE Int Conf on Communication Software and Networks(ICCSN)*. Xi'an, 2011: 316-319.
- [16] Luo X Y, Li S B, Guan X P. Automatic generation of minimally persistent formations using rigidity matrix[C]. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. Xi'an, 2009: 1198-1203.
- [17] Heinlman W R, Chandrakasana A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless sensor networks[C]. *Proc of the 33rd Annual Hawaii Int Conf on System Sciences*. Haweii: IEEE, 2000: 1-10.

(责任编辑:李君玲)