

## 面向低功耗无线传感器网络的智能拓扑控制算法\*

倪磊, 李晓钰, 张勇

(成都工业学院 网络与通信工程学院, 四川 成都 610400)

**摘要:** 降低无线传感器节点能耗是当下拓扑算法研究的重点。通过对功率控制型算法进行研究后发现, 现有算法忽略多跳中继区域问题, 从而增加节点的能耗。因此提出面向低功耗的智能拓扑控制算法, 该算法通过收集各节点功耗反馈信息后形成最大邻近节点拓扑, 遍历所有邻近节点后选择能量消耗最小的路径。对网络连通性、节点度和能量消耗等性能指标仿真分析, 算法能够消除不合理的多跳, 降低每个节点的最大发射功率, 维护全网络的连通性, 理论上具有一定的实际应用价值。

**关键词:** 无线传感器网络; RBTC; 节点度; 低功耗

**中图分类号:** TN915.01

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16157/j.issn.0258-7998.200355

**中文引用格式:** 倪磊, 李晓钰, 张勇. 面向低功耗无线传感器网络的智能拓扑控制算法[J]. 电子技术应用, 2020, 46(11): 79-81, 86.

**英文引用格式:** Ni Lei, Li Xiaoyu, Zhang Yong. Intelligent topology control in low power wireless sensor networks [J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(11): 79-81, 86.

## Intelligent topology control in low power wireless sensor networks

Ni Lei, Li Xiaoyu, Zhang Yong

(School of Network &amp; Communication Engineering, Chengdu Technological University, Chengdu 610400, China)

**Abstract:** Reducing the energy consumption of wireless sensor nodes is the focus of intelligent algorithm research. This paper studies the power control algorithm and finds that the existing algorithm ignores the problem of multi-hop relay area, which increases the energy consumption of nodes. Therefore, this paper proposes a low-power intelligent topology control algorithm. The algorithm collects the feedback information of each node's power consumption, forms the topology of the largest neighboring node, traverses all neighboring nodes, and selects the path with the least energy consumption. The algorithm can eliminate unreasonable multi-hop, reduce the maximum transmission power of each node, and maintain the connectivity of the whole network. In theory, the algorithm has certain practical application value.

**Key words:** wireless sensor network; RBTC; node degree; low power consumption

## 0 引言

随着人工智能及智能制造在工业领域、军事领域、环境监测等方面的广泛应用, 新型分布式无线传感器由于无需接线、超低能耗、使用方便, 正变得越来越广泛。如何在满足网络覆盖度和连通度的前提下, 节省无线传感器节点能量、形成高效的数据转发拓扑结构, 是拓扑控制算法研究的重点<sup>[1]</sup>。

目前提出的拓扑控制算法一般是针对网络拓扑的某一方面进行了优化设计。文献[2]中算法未考虑网络负载平衡、网络的整体能耗水平和网络中单一节点能量状态带来的影响; 文献[3]最小生成树算法(MSTP)和文献[4]邻近图算法(DRNG)都忽略了多跳中继区域问题, 从而增加了节点的能耗; 文献[5]中算法易形成节点孤

岛, 影响网络的连通性, 无法保障数据传送的可靠性<sup>[5-6]</sup>; 文献[7]算法未考虑通信开销和网络的鲁棒性问题。本文通过对多跳中继区域的分析, 设计一种智能拓扑控制算法 RBTC(Relay-Based Topology Control Algorithm)。通过分析得出, 该算法不仅能消除不合理多跳, 而且降低最小路径损耗和发射功率。

## 1 模型搭建

设部署网络的每个传感器节点  $m_i (1 \leq i \leq n)$  的发射半径用  $R_i (1 \leq i \leq n)$  表示。网络拓扑结构采用无向图  $G_{\max} = (V(G_{\max}), E(G_{\max}))$   $G(V, E)$  模型。其中,  $V(G) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  表示网络中随机分布的节点集合;  $E(G) = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V(G), R_i \geq D(v_i, v_j) \text{ 且 } R_j \geq D(v_i, v_j)\}$ ,  $D(v_i, v_j)$  表示节点  $v_i$  和节点  $v_j$  之间的距离<sup>[8]</sup>。

设在初始加入网络时节点  $u$  以最大功率  $P_{\max}$  工作, 广播探测拓扑的请求消息 TD\_Req (Topology Discovery

\* 基金项目: 四川省科技厅应用基础研究项目(2018JY0507)

# 通信与网络 Communication and Network

Request)中包含节点  $u$  的 ID、节点位置和最大功率等信息。节点  $v$  收到 TD\_Req 后检查是否满足条件,若满足则以 TD\_Ack(Topolgoy Discovery Acknowledgement)消息(节点  $v$  的 ID、位置和最大功率)反馈。当收到  $v$  的响应信息后,节点  $u$  把节点  $v$  加入到集合  $NBR(u)$  中。 $NBR(u)$  中节点  $v$  的权值是一个二元组,  $w_u(v) = \langle D(u, v), ID(v) \rangle$ 。

设节点  $m$  和  $n$  是节点  $u$  的两个最大邻近节点,即  $m, n \in NBR(u)$ , 则节点  $m$  优于节点  $n$ , 当且仅当  $R(m) > D(m, n) \& \& R(n) > D(m, n) \& \& m \in \text{Relay}(u, n)$ , 其中  $\text{Relay}(u, n)$  为节点  $u$  和  $n$  的中继区域, 优于关系表示为  $m \xrightarrow[u]{\text{Better}} n$ 。

若节点  $m$  优于节点  $n$ , 在获得所有邻近节点信息后, 节点  $u$  按照权值递增的顺序对  $NBR(u)$  中的节点排序, 即  $NBR(u) = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  且  $w_u(v_1) < w_u(v_2) < \dots < w_u(v_n)$ , 然后遍历  $NBR(u)$  得到最大权值<sup>[9]</sup>。

若  $u_{i+1} \in \text{NonNbrs}(u_i)$ , 则有  $(u_i, a), (a, u_{i+1}) \in E(G_{\max})$ , 说明  $u_i$  通过  $a$  跳到  $u_{i+1}$  比直接到  $u_{i+1}$  消耗的能量少。

综上所述, RBTC 智能拓扑维护算法导出的拓扑是连通的且具有最小能量特性。

## 2 算法步骤

(1) 每个节点以最大发射半径获得  $NBR(u)$ , 将  $NBR(u)$  与  $\text{NonNbrs}(u)$  设置为空;

(2) 按权重顺序处理  $NBR(u)$  中的每一个邻近节点  $w$ : 在  $NBR(u)$  中存在节点优于  $w$ , 则将  $w$  存入  $\text{NonNbrs}(u)$ ; 如果  $NBR(u)$  不存在节点优于  $w$ , 则将  $x$  从  $\text{NonNbrs}(u)$  删除, 将  $x$  加入到  $NBR(u)$ , 将  $w$  存入  $\text{NonNbrs}(u)$ ;

(3) 节点  $u$  按步骤(2)循环遍历  $NBR(u)$ ;

(4) 通过对称机制消除单向链路;

(5) 根据  $NBR(u)$  中最大距离邻居节点来确定发射功率。

## 3 结果分析

仿真参数中假设传感器分布区域 2 000 m, 节点发射半径为 400 m, 节点的能量为 0.5 J, 控制包长度为 200 bit, 数据包长度为 1 000 bit, 能量模型距离极限为 87.7。

### 3.1 不合理多跳

由图 1 看出, 在 MTCP 和 DRNG 形成的网络拓扑中都存在着不合理多跳。且随节点数目的增加, 不合理多跳的数目增加较快。产生不合理多跳的原因主要是 MTCP 和 DRNG 拓扑控制算法都没有考虑中继节点是否处在发送和接收节点的中继区域。

随着节点数目的不断增加, 不合理节点越多, 能量消耗降低明显。一般来说, 传感器节点数目众多, 除去不合理多跳, 可以大大减少能量消耗, 最终 RBTC 形成的拓扑图如图 2 所示。

### 3.2 能量分析

假设需要将所有节点的数据信息发送到汇聚节点, 汇集节点在普通节点中随机生成, 对每个节点能量消耗

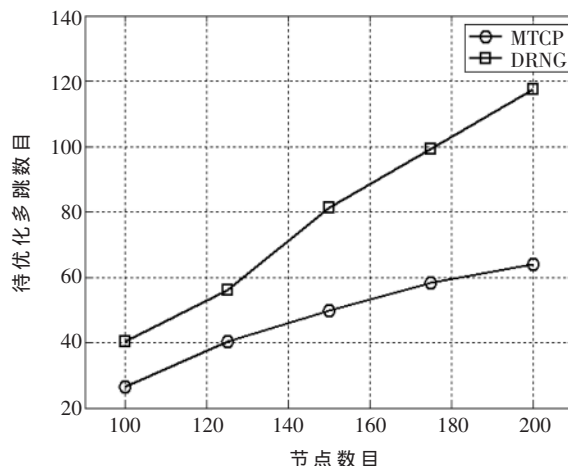


图1 待优化多跳数目分析

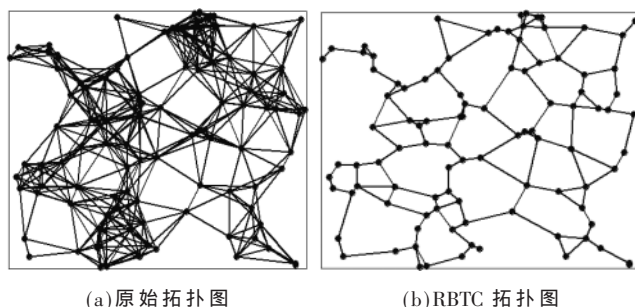


图2 原始拓扑图与 RBTC 形成的拓扑图

的能量总和进行分析。图 3 显示最小路径能量消耗总和。从图 3 中可以看出, 虽然 RBTC 算法形成的拓扑其平均半径和最大半径比 MTCP 平均半径和最大半径提高了 1/5, 但是能量消耗降低了将近 1/3; RBTC 算法形成的拓扑其平均半径和最大半径比 DRNG 平均半径和最大半径提高了 1/20, 但是最小路径能量消耗降低了将

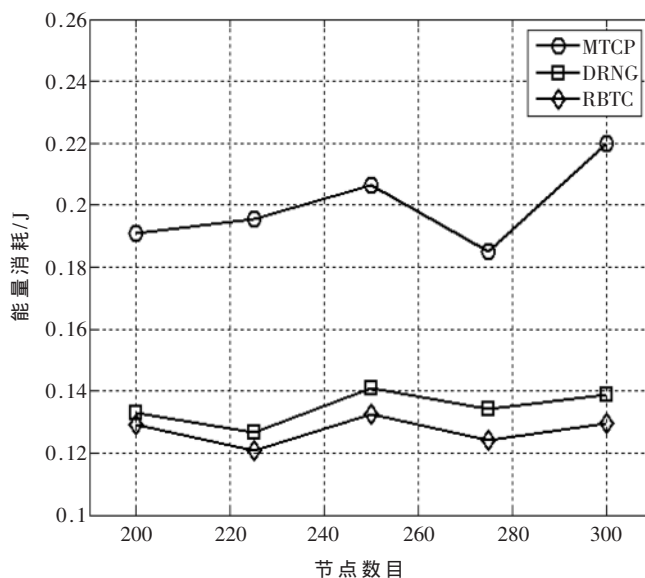


图3 能量消耗与节点数目关系

# 通信与网络 Communication and Network

近 1/15。所以, RBTC 算法形成的拓扑, 增加了拓扑的平均半径, 但是由于保留了原始拓扑中的最小能量路径的链路, 在数据包传输时大大降低节点转发消耗的能量, 从而达到节能的效果。在传感器网络中, 平均发射半径只是反映节点能耗的静态参数, 最小能量路径消耗更能反映网络在实际的数据传输中的能耗, RBTC 算法形成的拓扑降低了这种能耗, 更具有实际的价值。

## 3.3 节点度分析

通过上节能量的对比, RBTC 算法由于保留了最小路径消耗, 但如果节点度过大, 则将会影响到路由的选择。

从图 4 中可以看出, MTCP 的平均节点度为 2 左右, DRNG 的平均度为 2.5 左右, RBTC 形成拓扑的平均节点度为 3.5 左右。与 MTCP 和 DRNG 相比略有提高, 这种提高主要是由于 RBTC 算法保留最小能量路径而增加了邻居节点。从图 5 中可知, RBTC 形成拓扑最大节点度仍然小于 6(这种度的范围是符合路由要求的)。并且在节点数目  $N$  不断递增的同时, RBTC 的平均节点度和最大节点度都是趋于平稳的, 所以适合大规模无线传感器网络。

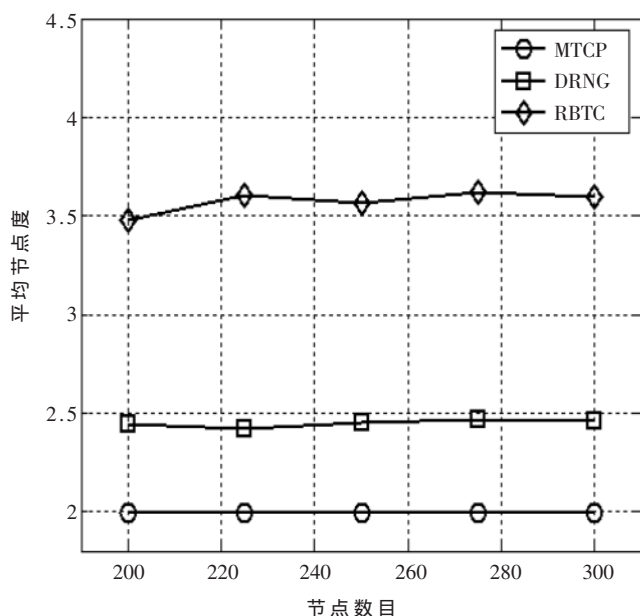


图 4 平均节点度对比

## 3.4 最小化最大发射半径分析

现在需要考虑最小化最大发射半径, 即在 MTCP 算法、DRNG 算法和 RBTC 算法形成的拓扑具有连通性的前提下, 每个节点最小的最大发射半径(所有节点最大发射半径相同)。从图 6 可以看出, RBTC 算法比其他两种算法需要最大发射半径都要小, 这就意味着节点的最大功率可以设置为较小值, 降低了每个节点的最大发射功率。

## 4 结论

(1) 通过对 RBTC、MTCP 和 DRNG 拓扑控制算法进行

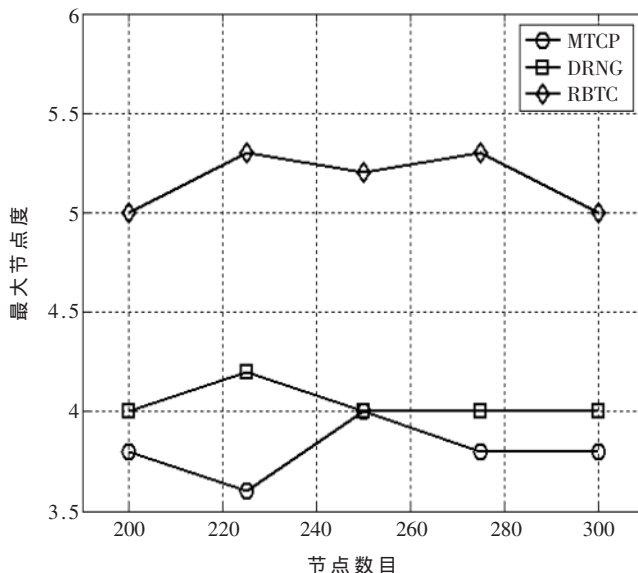


图 5 最大节点度对比

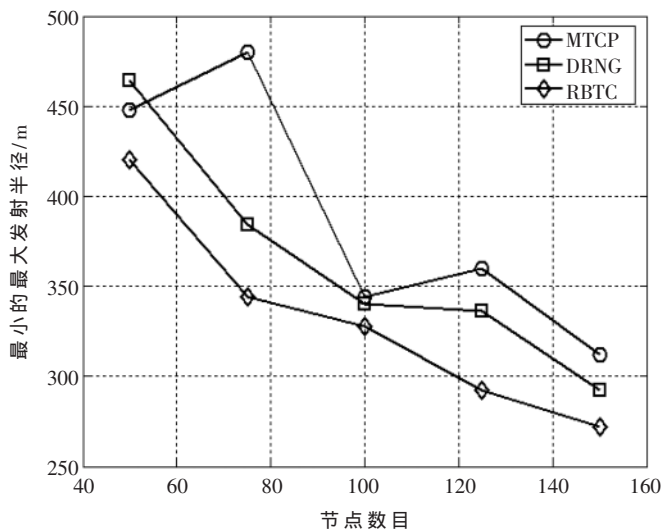


图 6 节点数目与最小的最大发射半径的关系

仿真比较可知: 在 MTCP 和 DRNG 算法形成的拓扑中存在着大量不合理多跳, 并且数目随着节点数目的增多而增多。

(2) 算法 RB 具有稳定的连通性, 在节点度上提升了大约 1 个度, 平均半径上提升了 20%, 且随着节点数目增多, 节点度趋于平稳, 平均半径增量减小。

(3) 算法在最小路径能耗上降低了 33.3%, 最小的最大发射功率降低了 12.5%, 理论上证明了算法具有低能量消耗和可维护性。在无线传感器网络中, 最小能量路径消耗更能反映网络在实际的数据传输中的能耗, 因此本文提出的 RBTC 算法更具有实际应用价值。

## 参考文献

- [1] 陈衍庆, 余银犬. 超低功耗无线传感器技术应用与智能状态监控[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(4): 1-7.

(下转第 86 页)

## 计算机技术与应用 Computer Technology and Its Applications

- 现[D].北京:北京交通大学,2018.
- [2] DHARINI R, PARVATHI R, DAVID T, et al. Event detection from twitter—a survey[J]. International Journal of Web Information Systems, 2018, 14(3): 262–280.
- [3] 李中伟, 赖华, 周超. 基于事件多要素模型的新闻主题句抽取[J]. 计算机与数字工程, 2017, 45(6): 1156–1160.
- [4] CHEN G, KONG Q, MAO W. Online event detection and tracking in social media based on neural similarity metric learning[C]. 2017 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI). IEEE, 2017.
- [5] 唐亮, 席耀一, 彭波, 等. 基于词向量的越汉跨语言事件检索研究[J]. 中文信息学报, 2018, 32(3): 64–70.
- [6] 黄贤英, 陈红阳, 刘英涛, 等. 一种新的微博短文本特征词选择算法[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(9): 1761–1767.
- [7] ZHANG Y, QU Z. A novel method for online bursty event detection on Twitter[C]. 2015 6th IEEE International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). IEEE, 2015.
- [8] 李红梅. 基于微博的突发事件检测研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [9] YAO J, CUI B, HUANG Y, et al. Bursty event detection from collaborative tags[J]. World Wide Web, 2012, 15(2): 171–195.
- [10] 张雄宝, 陆向艳, 练凯迪, 等. 基于突发词地域分析的微博突发事件检测方法[J]. 情报杂志, 2017, 36(3): 98–103, 97.
- [11] 仲兆满, 管燕, 李存华, 等. 微博网络地域 Top-k 突发事件检测[J]. 计算机学报, 2018, 41(7): 1504–1516.
- [12] ZHANG C, ZHOU G, YUAN Q, et al. GeoBurst: real-time local event detection in geo-tagged tweet streams[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology, 2016, 9(3): 1–24.
- [13] HASAN M, ORGUN M A, SCHWITTER R. Real-time event detection from the Twitter data stream using the TwitterNews+ Framework[J]. Information Processing & Management, 2018, 53(3): 1146–1165.
- [14] 王洁, 乔艺璇, 彭岩, 等. 基于深度学习的美国媒体“一带一路”舆情的情感分析[J]. 电子技术应用, 2018, 44(11): 102–106, 110.
- [15] 苏丰龙, 谢庆华, 邱继远, 等. 基于深度学习的领域实体属性词聚类抽取研究[J]. 微型机与应用, 2016(1): 53–55, 59.
- [16] 郭跬秀, 吕学强, 李卓. 基于突发词聚类的微博突发事件检测方法[J]. 计算机应用, 2014, 34(2): 486–490, 505.
- [17] CHICKERING D M. Learning Bayesian networks is NP-complete[J]. Networks, 2000, 112(2): 121–130.
- [18] 梁月仙, 陈自岩, 王洋, 等. 基于时空分析的突发事件检测方法[J]. 计算机工程, 2018, 44(5): 7–13.

(收稿日期: 2020-02-25)

## 作者简介:

富雅玲(1993–), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 自然语言处理、信息安全。

杨文忠(1971–), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 舆情分析、信息安全, E-mail: yangwenzhong@xju.edu.cn。

吾守尔·斯拉木(1942–), 男, 本科, 院士, 主要研究方向: 自然语言处理、多语种信息处理。

(上接第 81 页)

- [2] 郭稳涛, 何怡刚. 基于着色能量高效的无线传感网拓扑控制算法[J]. 仪表技术与传感器, 2018(5): 94–98.
- [3] 马发民, 王锦彪, 张林, 等. 无线传感网络改进的最小生成树算法[J]. 河南科学, 2017, 35(4): 541–547.
- [4] 刘军, 孙茜, 李少华, 等. 基于定向天线的无线自组网拓扑控制算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(9): 1257–1260.
- [5] 吴伟男, 刘建明. 面向低功耗无线传感器网络的动态重传算法[J]. 计算机科学, 2018, 45(6): 34–38.
- [6] YING B. An adaptive compression algorithm for energy-efficient wireless sensor networks[C]. International Conference on Advanced Communication Technology. IEEE, 2017: 861–868.
- [7] 陈瑶, 梁加红, 邹顺. 无人机 Ad Hoc 网络拓扑控制算法

研究[J]. 计算机仿真, 2010, 27(7): 33–37.

- [8] ANASTASI G, CONTI M, FRANCESCO M D. Energy conservation in wireless sensor networks: a survey[J]. AdHoc Networks, 2009, 7(3): 537–568.

- [9] COSTA D G, GUEDES L A, VASQUES F, et al. Partial energy-efficient hop-by-hop re transmission in wireless sensor networks[C]. IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE, 2013: 146–151.

(收稿日期: 2020-05-05)

## 作者简介:

倪磊(1984–), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向: 智能控制。

李晓钰(1982–), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向: 传感器网络。

张勇(1980–), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向: 卫星通信网络。



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所