

# 无线传感器网络中考虑干扰的拓扑优化

张路桥<sup>1,2</sup>, 朱清新<sup>1</sup>, 吕涛<sup>1,3</sup>, 王佳昊<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学计算机学院 成都 610054; 2. 成都信息工程学院网络工程学院 成都 610225;  
3. 西南科技大学国防科技学院 四川 绵阳 621010)

**【摘要】**针对目前大多数拓扑控制算法忽略节点间通信干扰的问题, 提出一种更为合理的节点间通信干扰的定义方法, 并在此基础上提出具有低干扰特点的拓扑控制算法。仿真结果表明, 该算法能在保证连通性的前提下, 减小节点的通信半径, 减少生成拓扑中的冗余通信链路, 降低节点之间的通信干扰。

**关键词** 通信干扰; 连通性; 冗余链路; 拓扑控制; 无线传感器网络

**中图分类号** TP393

**文献标识码** A

**doi:**10.3969/j.issn.1001-0548.2011.04.018

## Interference-Aware Topology Optimization in Wireless Sensor Network

ZHANG Lu-qiao<sup>1,2</sup>, ZHU Qing-xin<sup>1</sup>, LÜ Tao<sup>1,3</sup>, and WANG Jia-hao<sup>1</sup>

(1. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology Chengdu 610054;

2. School of Network Engineering, Chengdu University of Information Technology Chengdu 610225;

3. School of National Defense Science and Technology, Southwest University of Science and Technology Mianyang Sichuan 621020)

**Abstract** Topology control is one of the most important techniques in wireless sensor network, and also one of the hottest research topics. However, most topology control algorithms fail to take communication interference into account. In this paper, a more practical definition of communication interference is introduced first, and then a new topology control algorithm is proposed. At last simulation and analysis is given, which shows by careful choosing the communication range of nodes, redundant communication links can be significantly reduced and communication interference can be minimized, meanwhile the network's connectivity is not jeopardized.

**Key words** communication interference; connectivity; redundant links; topology control

在无线传感器网络中, 拓扑控制是各类路由算法的基础, 也是降低节点能耗、延长网络生存时间、降低节点之间通信干扰以及保证网络连通性的重要手段<sup>[1]</sup>。拓扑控制主要包括节点的功率控制与拓扑结构控制两方面内容<sup>[2]</sup>, 同时拓扑结构会受到节点的发射功率的影响。按照拓扑控制的实现方式, 可以将拓扑控制算法分为基于几何图的拓扑控制算法与基于分簇的拓扑控制算法两大类<sup>[3]</sup>。

目前, 大多数的拓扑控制算法均未考虑节点之间通信干扰的问题<sup>[4-5]</sup>, 甚至将节点之间的通信干扰简单定义为节点度数, 并通过降低节点度数的方式降低干扰, 但这种方式已被证明是欠妥的<sup>[6-9]</sup>。文献[6-7]将通信链路所覆盖范围内的节点定义为干扰节点, 并通过调整节点的发射功率降低出现干扰的可能性。文献[8-9]从接收数据节点处信号强度的角度对干扰进行定义, 并提出通过提高接收节点所收到信

号的信噪比来降低干扰。文献[10]对连通性要求与节点的最小通信范围作了详细讨论, 指出如果连通性要求从100%降低到90%, 节点的最小通信范围大约可以降低35%~40%。

本文在文献[6-7]的基础上, 提出一种新的干扰定义方法, 将其作为链路质量高低的评价标准, 并将该标准应用于节点功率控制及邻居节点选择, 以尽可能地降低消息碰撞的可能性, 从而提高信息发送成功率, 减少因重传所带来的能量消耗, 最终降低节点的能量消耗。

除考虑干扰外, 网络的连通性, 也是本文算法考虑的因素。但本文所提出的算法并不以保证整个网络的连通性为目标, 而以90%的节点均被纳入到最大连通子图为目标。因为如果适当降低对连通性的要求, 可以大大降低对节点最小通信范围的要求, 而发送信号所需能量与通信距离往往呈幂级数关

收稿日期: 2011-03-08; 修回日期: 2011-06-27

基金项目: 国家自然科学基金(60903157); 四川省教育厅青年基金(10ZB093)

作者简介: 张路桥(1983-), 男, 博士生, 讲师, 主要从事无线传感器网络、数据网格方面的研究。

系, 所以可以大大降低节点的通信能耗。另外, 通信能耗在节点能耗中所占比重最大, 适当降低对于连通性的要求, 有助于延长整个网络的生存时间。本文首先介绍关于本文算法的假设; 然后给出通信干扰的定义, 并提出新的拓扑控制算法 (least interference topology algorithm, LITA); 最后给出仿真结果, 并将LITA与其他几种典型的基于几何图的拓扑控制结构进行比较。

### 1 关于本文算法的几点假设

- 1) 所有节点均随机分布于欧几里得平面上, 任意节点 $v_i$ 的位置由其 $x$ 坐标与 $y$ 坐标表示, 即 $(x_i, y_i)$ 。
- 2) 初始情况下, 所有节点拥有相同的最大通信范围 $CTR_{max}$ (critical transmitting range), 但各节点可以根据情况自行调节其通信范围。
- 3) 节点能根据所接收到的信号强弱, 判定节点之间的距离, 且距离越远, 信号越弱<sup>[11]</sup>。
- 4) 如果节点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间存在通信链路, 则 $v_i$ 可接收到 $v_j$ 所发出的信号,  $v_j$ 也可以接收到 $v_i$ 所发出的信号。
- 5) 为保证所生成的拓扑能到达设定的连通性要求, 节点的初始分布必须满足当所有节点都以 $CTR_{max}$ 进行通信时, 最大连通子图包含90%或以上的节点。

根据以上假设, 可以将无线传感器网络抽象为传感器节点为顶点和通信链路为边的的无向图。

### 2 对干扰定义的改进

文献[6-7]提出了一种对于节点间通信干扰的定义, 具体如下:

- 1) 节点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间存在通信链路 $L_{ij}$ 的条件是 $d_{ij} \leq CTR_{max}$ , 其中 $d_{ij}$ 代表在欧几里德平面上节点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间的距离, 即 $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ ;
- 2) 对于节点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间的通信链路 $L_{ij}$ , 干扰节点集合 $NP_{ij} = \{ \forall v_k / d_{ik} \leq d_{ij} \text{ or } d_{jk} \leq d_{ij} \}$ 。

干扰节点示意图如图1所示, 其中节点 $v_i$ 与 $v_j$ 之间的距离为 $d_{ij}$ , 处于以 $v_i$ 或 $v_j$ 为圆心,  $d_{ij}$ 为半径范围内的节点均在通信链路 $L_{ij}$ 的干扰范围内。

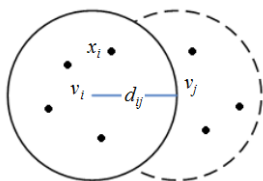


图1 干扰节点示意图

需要说明的是, 位于干扰范围内的节点仅仅是有可能互相干扰, 而非一定产生干扰; 必须是位于干扰范围内的节点同时进行数据发送才会产生干扰。例如如图1中的 $x_i$ 与 $v_j$ 同时进行数据发送才会互相产生干扰。所以本文将 $NP_{ij}$ 定义为对通信链路 $L_{ij}$ 存在潜在干扰的节点的集合。

另外需要特别说明的是, 干扰是无法完全消除的。但是, 可以根据潜在干扰节点的数量以及节点同时进行数据发送的概率, 计算出出现碰撞的概率, 并将其作为判断链路质量的指标。

- 1) 首先假定所有节点在任意时刻 $t$ 进行数据发送的概率均为 $P$ , 则对于一条存在 $k$ 个潜在干扰节点的通信链路 $L_{ij}$ , 在任意时刻 $t$ 成功发送消息的概率 $P_k(t) = 1 - (1 - P)^k$ ;
- 2) 该通信链路 $L_{ij}$ 其连续发送 $m$ 次消息, 至少有1次成功的概率为 $P_{km} = 1 - P_k(t)^m$ 。

根据上述标准, 可以在给定 $m$ 的情况下, 优先选择具有较大 $P_{km}$ 值的链路, 即在相同发送次数前提下成功发送数据概率较大的链路, 用于构造目标网络拓扑。

### 3 算法描述

本文利用所提出的链路质量评价标准, 提出一种集中式算法LITA, 在保证90%或以上的节点接入网络的情况下, 构造给定节点分布情况下的最优网络拓扑。具体算法步骤如下:

- 1) 所有节点均以 $CTR_{max}$ 发送hello消息, 以获取位于其通信范围内的所有邻居节点;
- 2) 对以 $CTR_{max}$ 为通信半径的所有通信链路 $L_{ij}$ , 计算其潜在的干扰节点个数 $IN_{ij}$ ;
- 3) 在原始节点分布图中逐步增加通信链路, 且新增的链路必须满足:
  - ① 引入新的节点;
  - ②  $P_{km} \geq P_d$ , 其中 $P_d$ 为预设值。如果新增链路后无法达到设定的连通性目标, 则 $m$ 值加1( $m$ 的初始值为1), 即逐步降低对链路质量的要求, 直至最大连通子图包含90%以上的节点。其中 $P_d$ 为预设值, 并将在5中说明不同 $P, P_d$ 值对算法收敛速度的影响。
- 4) 所有节点根据算法第3)步的结果, 调整自身发射功率 $CTR$ 。

为方便对算法进行评价, 作出如下定义: 1) 最终所形成的网络拓扑 $G$ 中包含的通信链路的数量定义为 $LC$ ; 2) 某条通信链路 $L_{ij}(L_{ij} \in G)$ 的干扰 $IG_{ij} = IN_{ij}$ , 而 $IG_{max} = \max(IG_{ij})$ ; 3) 整个网络的平均干

$$\text{干扰IG} = \sum \text{IG}_{ij} / \text{LC}$$

### 4 仿真

本节将通过仿真实验说明算法的正确性，即在保证连通性的前提下，能生成冲突可能性最小的网络拓扑。本文还将在相同节点初始分布的情况下，对单位圆图(unit disk graph, UDG)、伽布里图(gabriel graph, GG)、邻近图(relative neighborhood graph, RNG)与LITA所生成的网络拓扑进行对比。仿真所使用的参数如表1所示。

参数	数值
节点分布范围	(0,0)~(200,200)
节点数量	100
$P$	0.2
$P_d$	0.8
$\text{CTR}_{\text{max}}$	30

节点初始分布和最大功率拓扑图(即UDG图)分别如图2和图3所示。不难看出，在UDG图中，网络中存在大量的冗余链路。虽然冗余链路的存在并非毫无意义，而且在某些路由算法<sup>[12]</sup>中冗余链路的存在是其算法基础，但该方式迫使节点以最大功率进行数据发送，导致节点间的通信干扰增强，并加剧节点的能量消耗。

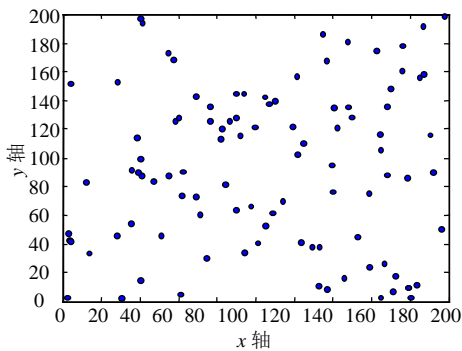


图2 节点初始分布图

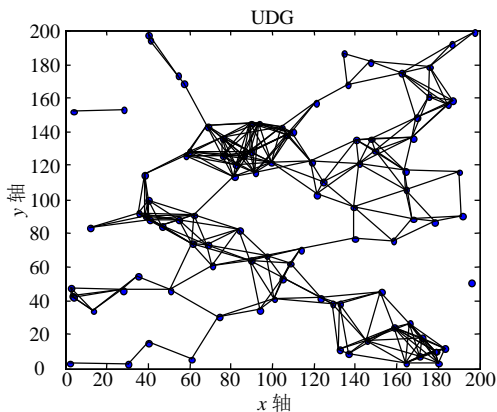


图3 UDG图

利用Gabriel图以及RNG图，对UDG图进行优化，可以降低节点的发射功率，减少冗余链路，结果如图4与图5所示。可以非常直观地看出经过优化后的网络拓扑中的通信链路数量大大减少了。

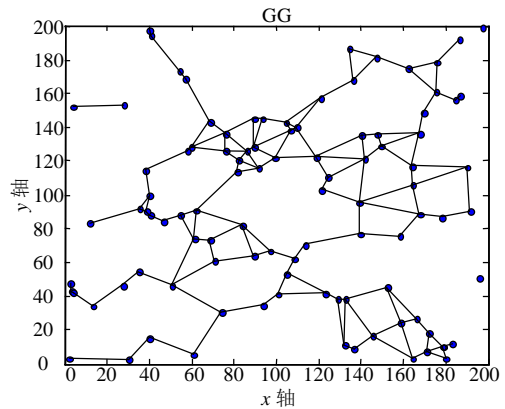


图4 Gabriel图

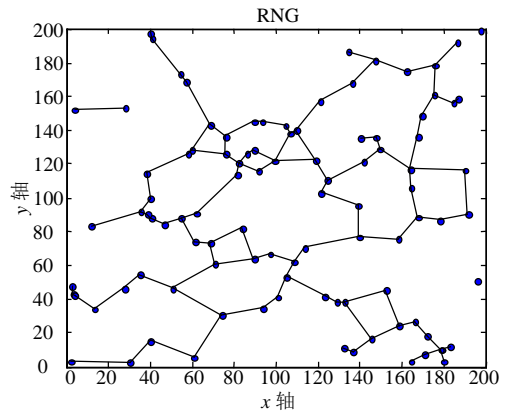


图5 RNG图

利用本文所提出的LITA算法，可以进一步降低对节点发射功率的要求，减少冗余通信链路，降低节点间的互相干扰，结果如图6所示。

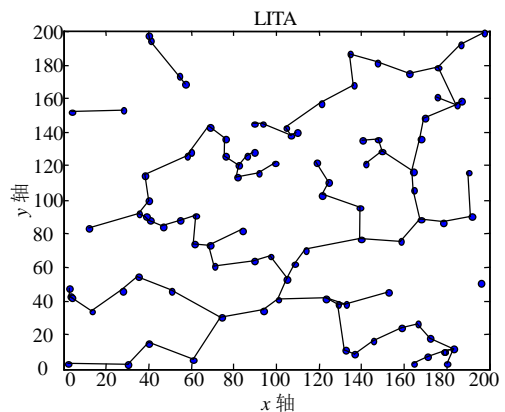


图6 LITA图( $P=0.2, P_d=0.2$ )

除拓扑图外，本文还从所形成的拓扑中包含的通信链路的数量LC、节点平均通信半径CTR、整个网络的平均干扰IG以及最大干扰IGmax等4方面对以上4种算法进行了对比，10次仿真结果的平均值如

表2所示。不难看出, LITA算法对于节点的发射功率要求最低, 维持整个网络连通性所需的通信链路数最小, 而且整个网络的平均干扰与最大干扰相对其他算法均有所改善。

表2 UDG、RNG、Gabriel、LITA对比

算法	LC	CTR	IG	IG <sub>max</sub>
UDG	298	19.09	4.82	15
RNG	154	16.97	3.35	12
Gabriel	118	14.94	2.57	8
LITA	102	13.98	1.67	5

另外, 本文还对不同 $P$ 和 $P_d$ 值下算法的平均运算次数(即多少轮)能完成拓扑构建进行了实验, 10次仿真结果的平均值如表3所示。从表中数据可以看出, 在相同 $P$ 值情况下, 即节点同时发送数据概率不变的情况下, 减小 $P_d$ 值(即降低对发送数据成功率的要求), 备选链路的数量增加, 从而可更快地完成拓扑的构建; 在相同 $P_d$ 值情况下, 即对发送数据成功率要求不变情况下, 减小 $P$ 值(即节点同时发送数据概率降低), 出现数据发送冲突的可能性变小, 从而增加可选链路的数量, 加快算法的运算速度。

表3 不同 $P$ 与 $P_d$ 值下算法的平均运算次数 $R$

参数		$R$
$P$	$P_d$	
0.2	0.7	5
0.2	0.9	7
0.3	0.7	26
0.3	0.9	31
0.5	0.7	77
0.5	0.9	294

## 5 结论

本文提出了一种基于几何图的集中式拓扑控制算法, 算法在保证整个网络一定程度连通性( $\geq 90\%$ 节点接入)的前提下, 通过减小节点最大通信半径, 实现了减少冗余链路、降低节点间通信相互干扰的设计目标。另外, 本文算法还可以与各类节点休眠机制<sup>[13]</sup>结合, 进一步减少出现干扰的可能性。在今后的研究中, 将从分布式拓扑生成算法、降低算法复杂度等方面入手, 对算法进行进一步的完善。

### 参 考 文 献

[1] BANNER R, ORDA A. Multi-objective topology control in wireless networks[C]// The 27th Conference on Computer Communications. Pheniox, USA; IEEE, 2008: 448-456.

[2] 王殊, 阎毓杰, 胡富平, 等. 无线传感器网络的理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.  
WANG Shu, YAN Yu-jie, HU Fu-ping, et al. Theory and application of wireless sensor network[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[3] MANOLOPOULOS Y, KASAROS D, PAPANITRIOU A. Topology control algorithms for wireless sensor networks: a critical survey[C]//ACM Comp Sys Tech 10. Sofia, Bulgaria; ACM, 2010: 17-18.

[4] SANTI P. Topology control in wireless Ad hoc and sensor networks[J]. ACM Computing Surveys, 2005, 37(2): 164-194.

[5] 甘从辉, 郑国强, 唐盛禹. 无线传感器网络的拓扑控制研究[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(9): 3214-3218.  
GAN Cong-hui, ZHENG Guo-qiang, TANG Sheng-yu. Survey of topology control in wireless sensor networks[J]. Application Research of Computers, 2009, 26(9): 3214-3218.

[6] MOAVENI N K, LI X Y. Low-interference topology control for wireless Ad hoc networks[C]//The 2nd IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks. Santa Clara, California, USA: Old City Publishing, Inc, 2005: 41-64.

[7] BURKHART M, RICKENBACH von P, WATTENHOFER R, et al. Does topology control reduce interference? [C]//IEEE Mobihoc 2004. New York, USA: ACM, 2004: 9-19.

[8] GAO Y, HOU J C, NGUYEN H. Topology control for maintaining network connectivity and maximizing network capacity under the physical model[C]//IEEE Infocom 2008. Phoenix, AZ: IEEE, 2008:1013-1021.

[9] 胡致远, 彭强, 刘春艳. 基于节点增益不同的无线网络拓扑控制技术[J]. 计算机应用, 2009, 29(10): 2611-2613  
HU Zhi-yuan, PENG Qiang, LIU Chun-yan. Topology control of wireless network based on different transceiver gains[J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(10): 2611-2613.

[10] SANTI P, BLOUGH D. The critical transmitting range for connectivity in sparse wireless Ad hoc networks[J]. IEEE Trans Mobile Computing, 2003, 2(1): 25-39.

[11] BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: an in-building RF-based user location and tracking system[C]//IEEE Infocom 2000. Tel Aviv, Israel: IEEE, 2000: 775-784.

[12] SHAH R C, RABAEY J. Energy aware routing for low energy ad hoc sensor networks[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Orlando, FL: IEEE, 2002: 17-21.

[13] WELSH M, MAINLAND G. Programming sensor networks using abstract regions[C]//ACM NSDI' 04. [S.l.]: USENIX Association Berkeley, 2004.

编辑 蒋晓