

构造无线传感器网络的小世界效应研究

唐 鹭¹,洪月华²,伍华健²

TANG Lu¹,HONG Yue-hua²,WU Hua-jian²

1.桂林电子科技大学 计算机与控制学院,广西 桂林 541004

2.玉林师范学院 数学与计算机系,广西 玉林 537000

1.College of Computer and Control,Guilin University of Electronic Technology,Guilin,Guangxi 541004,China

2.Department of Mathematics and Computer Science,Yulin Normal University,Yulin,Guangxi 537000,China

TANG Lu,HONG Yue-hua,WU Hua-jian.Research of small-world effect to construct wireless sensor network.Computer Engineering and Applications,2010,46(2):90-92.

Abstract: Based on the small-world effect and wireless sensor network topology,this paper presents a method to construct a method of wireless sensor network with small-world effect.Through introducing a reliable link(Shortcut) communicate to sink directly in the optimized wireless sensor network topology,it can form a small-world effect of wireless sensor network,simplify the network topology,and show a clear cluster structure.The simulation shows that the optimized wireless sensor network topology is more beneficial in being added reliable links.To add adequate reliable links not only reduce average energy consumption and the average path length but also balance energy consumption in some extent.

Key words: wireless sensor networks;small-world;cluster;construct

摘 要:基于小世界特性和无线传感器网络拓扑结构提出了一种构造无线传感器网络使其具有小世界效应的方法,通过在优化了的无线传感器网络拓扑结构中引入与汇聚节点直接通信的可靠链路(捷径),形成具有小世界效应的无线传感器网络,使网络拓扑结构简化,并显示出明显的簇结构,仿真表明,经过拓扑优化后的网络更有益于可靠链路的添加,适当增加少量的可靠链路不仅减少了节点的平均能量消耗和平均路径长度而且在一定程度上均衡了各节点的能量消耗。

关键词:无线传感器网络;小世界;簇;构造

DOI:10.3778/j.issn.1002-8331.2010.02.028

文章编号:1002-8331(2010)02-0090-03

文献标识码:A

中图分类号:TP393

1 引言

大量真实网络,如电力网络、计算机互联网、食物链网络、演员关系网、科学家合作网络等都是小世界网络^[1]。其主要特点表现为网络具有高的聚集系数(clustering efficient)和低的平均路径长度(average path length)。

1967年,Stanley Milgram从他著名的“六度分离”实验中得出推断:地球上任意两个人之间的平均距离是6。1998年,Watts和Strogatz为了描述规则网络向随机网络演变过程中一些网络特性的变化,首次提出了“小世界网络”的概念^[2]。构造具有小世界效应的无线传感器网络现有两种方法,一种是物理方法,一种是逻辑方法。物理方法包括添加有线链路^[3]和提高无线设备的发射功率来构造捷径。逻辑方法是采用多跳路由^[4-5]。但逻辑方法不能降低路径长度,因此,大多数研究采用有线链路作为捷径^[3,6],近期也有使用移动节点来构造网络^[7]。然而,有线链路的长度很难预先确立,部署不仅花费大而且不适合一些特定环境,同理,使用移动节点会带来一定的延迟而且只是适用于一定场合。因此引入与汇聚节点直接通信的超级节点作为无

线链路(捷径)来构造具有小世界效应的无线传感器网络。

大多数研究^[3,6,8]都是假设整个无线传感器网络的节点是均匀分布的,而事实上由于温度、空气、障碍等环境因素影响整个无线传感器网络节点无法均匀分布,这类无线传感器网络的簇结构并不是那么明显,对于捷径的添加具有较大的难度,因此先优化传感器网络拓扑结构使其具有小世界特性再添加捷径对于降低整个网络的通信开销^[9]、减少节点间的干扰冲突及延长单个节点的平均使用寿命具有非常重要的作用。

2 网络模型及相关定义

研究基于节点随机分布的无线传感器网络模型。根据复杂网络中的社团结构的定义^[9],假设整个网络由若干个“群(group)”或“簇(cluster)”构成,网络是静态的,唯一的汇聚节点位置固定。超级节点具有更高能量、存储器和数据处理能力,能实现数据融合与更有效传输,暂不考虑超级节点的损坏问题。

2.1 集聚系数

假设网络中的一个节点 i 有 k_i 条边将它和其他节点相连,

基金项目:广西青年科学基金资助项目(No.0832101)。

作者简介:唐鹭(1984-),女,硕士生,主要研究方向:无线传感器网络;洪月华(1973-),女,讲师,主要研究方向:计算机网络;伍华健(1964-),男,教授,硕士生导师,主要研究方向:无线传感器网络、P2P。

收稿日期:2009-03-24

修回日期:2009-05-18

这 k_i 个节点就称为节点 i 的邻居。显然,在这 k_i 个节点之间最多可能有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边。而这 k_i 个节点之间实际存在的边数 E_i 和总的可能的边数 $k_i(k_i-1)/2$ 之比就定义为节点 i 的聚集系数 C_i ,即

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)} \quad (1)$$

从几何特点看,上式的一个等价定义为

$$C_i = \frac{\text{与点 } i \text{ 相连的三角形的数量}}{\text{与点 } i \text{ 相连的三元组的数量}}$$

其中,与节点 i 相连的三元组是指包括节点 i 的三个节点,并且至少存在从节点 i 到其他两个节点的两条边。

2.2 平均路径长度

网络中两个节点 i 和 j 之间的距离 d_{ij} 定义为连接这两个节点的最短路径上的边数。网络中任意两个节点之间的距离的最大值称为网络的直径,记为 D ,即

$$D = \max d_{ij} \quad (2)$$

网络的平均路径长度 L 定义为任意两个节点之间的距离的平均值,即

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{i>j} d_{ij} \quad (3)$$

其中 N 为网络节点数。网络的平均路径长度也称为网络的特征路径长度(characteristic path length)。

2.3 节点度

图论中节点 i 的度 k_i 定义为与该节点相连接的其他节点的总数目,网络中所有节点 i 的度 k_i 的平均值称为网络的(节点)平均度,记为 $\langle k \rangle$,网络中节点的度分布用分布函数 $P(K)$ 来表示,其含义为一个任意选择的节点恰好有 k 条边的概率,也等于网络中度数为 k 的结点数占网络节点总数的比值。

3 拓扑优化

通过有选择性地删除一些多余的边,使网络具有更明显的簇结构,从而优化无线传感器网络的拓扑结构。通过下列算法判断是否删除边 $e(v, u)$:

(1)若边是连接两个节点唯一的一条边,则该边不删除,否则删除之后网络中会存在孤立点。

(2)通过有选择性地删除一些多余的边,使网络具有更明显的簇结构,从而优化无线传感器网络的拓扑结构。

定义评估函数: $F_e = a\Delta C - b\Delta L$, 其中 $\Delta C = C_e' - C_e$, $\Delta L = L_e' - L_e$, C_e 的值为删除边 $e(v, u)$ 前,所有包含该边的三角形中顶点聚集系数之和(如果不在任何一个三角形内则计算 v, u 聚集系数之和), C_e' 则为删除之后的值。 L_e 为删除边 e 前图的最短路径长度, L_e' 为删除边 e 后图的最短路径长度。 a, b 为待定系数。如果 $F_e > 0$, 则删除边 e , 如果 $F_e < 0$, 则不能删除。

4 添加捷径构造小世界

拓扑优化完后已经使得无线传感器网络拓扑结构具有明显的簇结构,简化了网络拓扑结构,并且整个网络平均跳数的变化不大,这样不仅可以减少节点间的干扰冲突,提高整个网络的通讯效率,减少网络能量的消耗,而且使捷径的添加变的更加容易。优化后的无线传感器网络拓扑聚集系数增大较快,而平均最短路径增大相对缓慢的多,但一定程度上还是在增大,从而考虑采用添加捷径的方法来降低平均路径长度,从而使网

络更具有小世界特性提高无线传感器网络的能量和数据查询效率。

4.1 簇结构

(1)从优化过后的网络拓扑中选中度最大的节点 $node(i)$, 与这个节点相连的最近节点 $node(j)$ 加入到此簇 $cluster(i)$ 当中。当所有节点处理完成转(4)。

(2)从剩余节点中选取离簇中任意节点最近的节点 $node(k)$ 。

(3)设簇中所有节点之间存在的边数为 m , 节点数目为 n , p 为常数,当 $2m/n(n-1) > p$ 并且当前簇的节点数 $n+1 < g$ (g 为允许簇内拥有的最大节点数)时则节点 $node(k)$ 进簇,反之返回(1)。

(4)把剩余的节点并到最近的簇中,把拥有极少数的节点的簇并到最近的簇中。

4.2 超级节点的选择

(1)在所选簇中选择度最大的节点 $node(i)$ 作为首个活跃度最大的节点。遍历所有簇直到结束。

(2)将活跃度最大的节点作为相对的汇聚节点,簇内所有节点传数据至活跃度最大的节点,通过蚁群算法(Ant Colony Optimization, ACO),从而得出次活跃度最大的节点,与上次活跃度最大的节点比较,如果次活跃度最大的节点相对活跃度大,则次活跃度最大的节点作为活跃度最大的节点重复本次步骤;如果次活跃度最大的节点相对活跃度较小,则上次活跃度最大的节点作为此簇活跃度最大的节点,返回(1)。

在每个簇活跃度最大处添加超级节点。

4.3 路由模型

路由模型逻辑拓扑结构分三层如图1所示。最上层为汇聚节点,其次是超级节点,最下层为普通节点。层内之间可以通信。假设网络是位置感知的,每个节点知道自己位置和邻居位置和超级节点位置。在汇聚节点一跳内的节点直接与汇聚节点通信,其他节点根据贪婪路由算法^[10]以及解决贪婪算法引起的位置最优问题(local optimal problem)的算法^[11]通过比较“捷径”是否具有更短的通信距离,如果是,则选用“捷径”将数据发送到超级节点再由超级节点发送到汇聚节点;反之则利用原有的无线多跳链路发送数据。当节点出现位置最优问题时,启用右手定则修复模式。同理,超级节点之间也选取最优路径发送数据至汇聚节点。

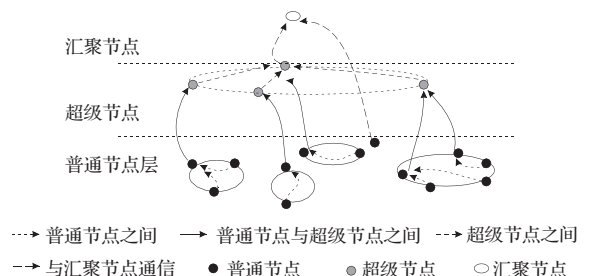


图1 路由模型逻辑拓扑示例图

4.4 评价标准

由于节点的能耗主要用于数据的传送和接收,因而能量消耗将与数据包传输的跳数成正比关系。用 $L(0)$ 表示纯粹无线传感器网络的平均最短距离,用 $L(N)$ 表示引入 N 条“捷径”后的网络平均距离;定义平均路径比率 $PLR(N) = L(N)/L(0)$, PLR 越小表示传感器网络的数据查询效率越高。相应的,可用 $ESR(N) = 1 - PLR(N)$ 表示传感器网络能量节省率, ESR 越大表示“捷径”

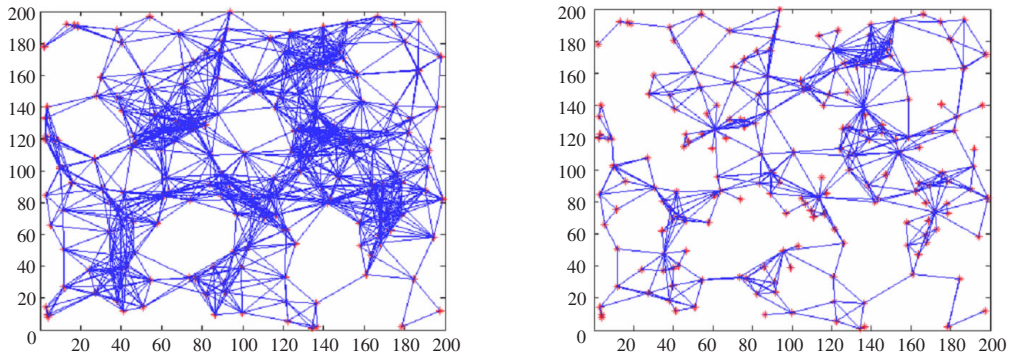


图2 在算法作用下网络拓扑截取图

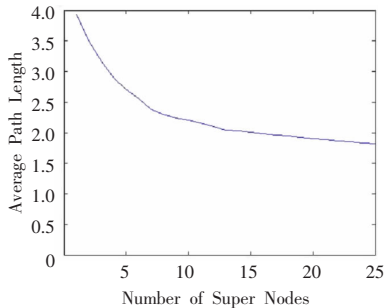


图3 该模型的平均路径长度

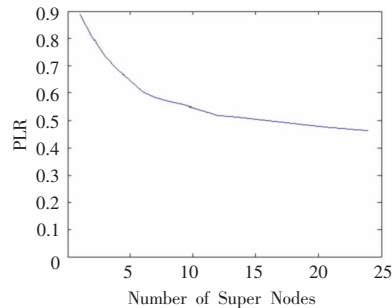


图4 路径长度变化率

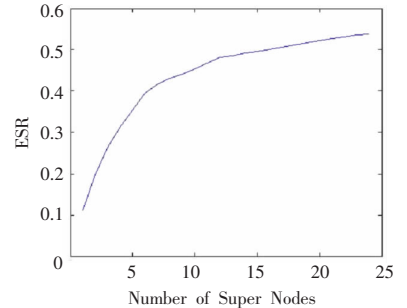


图5 节能效率对比

的配置越合理,传感器网络的能量效率越高。

5 仿真与分析

仿真采用 Matlab 作为仿真工具,网络规模为 200×200 的范围内随机产生 249 个节点,在 (100, 100) 处设汇聚节点,超级节点从 0 到 5, 10, 15, 20, 25。通过仿真数据,得到相应的网络拓扑优化图、该模型的平均路径长度图、路径长度变化率和节能效率对比图(图 2~图 5)。从图 2 可以看出通过算法优化,网络的平均集聚系数有了大幅度的提高,网络显示出明显的簇结构,而且平均最短路径的增长比例不大,而在近邻节点数取 4~6 之间时,平均路径长度下降趋势特别显著,而在近邻节点进一步增加并不能使平均路径长度有更显著的下降。随着超级节点数目的增加,平均路径长度、路径长度变化率都有明显的降低,当超级节点数从 0 增加到 12 降低最为明显,此时能量消耗降低 40% 左右。但增加更多的超级节点不再明显减小平均路径长度和路径长度变化率,节能效率变化率也趋于平稳。因此,增加超级节点不会影响网络的结构,但是可以明显减小网络的平均路径长度,该结果与复杂网络的小世界特性是一致的。

6 小结

根据小世界网络理论,基于节点随机分布传感器网络模型,对现有构造具有小世界现象的无线传感器网络的方法作进一步改进,采用先优化网络拓扑结构后构造的方法。仿真表明在汇聚节点位置固定的拓扑优化后的网络中适当增加少量的超级节点不仅显著减少了网络的平均路径长度能有效改善节能效果,而且在一定程度上均衡了各节点的能量消耗。

参考文献:

- [1] Collins J J, Chow C C. It's a small world[J]. Nature, 1998, 393: 409-410.
- [2] Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of "small-world" networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [3] Sharma G, Mazumdar R. Hybrid sensor networks: A small world[C]// MobiHoc 05. New York, USA: ACM, 2005: 366-377.
- [4] Helmy A. Mobility-assisted resolution of queries in large-scale mobile sensor networks (MARQ)[J]. Computer Networks Journal Elsevier Science, Special Issue on Wireless Sensor Networks, August 2003.
- [5] Helmy A. Contact based architecture for resource discovery (CARD) in large scale MANets[C]// Proc IPDPS, April 2003.
- [6] Chitradurga R, Helmy A. Analysis of wired shortcut in wireless sensor networks[C]// Proc IEEE/ACM International Conference on Pervasive Services, July 2004.
- [7] Jiang C J, Chen C, Chang J W, et al. Construct small worlds in wireless networks using data mules[C]// IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2008.
- [8] Helmy A. Small worlds in wireless networks[J]. IEEE Communication Letters, 2003, 7(10): 490-492.
- [9] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [10] Jain R, Puri A, Sengupta R. Geographical routing using partial information for wireless ad hoc networks, Technical Report M99/69[R]. University of California, Berkeley, 1999.
- [11] Karp B, Kung H T. GPSR: Greedy perimeter stateless routing for wireless networks[C]// Proc ACM MobiCom, August 2000.