

基于小世界模型的 WSN 簇间拓扑优化方法

景维鹏 刘亚秋 杨显辉

(东北林业大学信息与计算机工程学院 哈尔滨 150040)

摘要 针对无线传感器网络节点因能量消耗、硬件故障、通信因素等导致的链路失效问题,提出一种基于复杂网络小世界模型 Kleinberg 的无线传感器网络簇间拓扑优化方法,该方法依据簇头节点的局部视图 ViewList 信息中的长链与短链构建 WSN 簇间拓扑。实验分析表明,利用该方法演化的无线传感器网络拓扑在节点失效概率为 0.2 时,网络寿命比 DECD 提高 25%,并具有良好的能量均衡性和较低的消耗代价。该方法构建的拓扑具有较好的容错性和较强的鲁棒性。

关键词 复杂网络,最小世界模型,局部信息,容错性,鲁棒性

中图分类号 TP393 **文献标识码** A

Topology Optimization Based on Small-world Model in Wireless Sensor Networks

JING Wei-peng LIU Ya-qiu YANG Xian-hui

(Information and Computer Engineering College, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract According to wireless sensor network nodes energy consumption, hardware failure and communication factors lead to link failure, an evolving network method based on complex network theory of small-world Kleinberg model was proposed, which uses long chains and short chains in partial view information to build inter-cluster topology in wireless sensor network. Theoretical analysis and simulations show that the network lifetime is longer 25% than DECD in the WSN topology which uses this method when the node failure probability is 0.2 and it has a good balance of energy consumption and lower cost. Thus the topology which uses the method to build has fault-tolerant and good robustness.

Keywords Complex network, Small-world model, Partial view, Fault-tolerance, Robustness

无线传感器网络(WSN)是一组具有感知能力、计算能力、通信能力的传感器节点构成的自组织、分布式的网络系统。WSN 有着广泛的应用场景,可以应用在国防军事、环境监测、智能交通、医疗救护等领域^[1]。作为一种典型的普适计算(pervasive computing)应用,WSN 通过大量部署在监测区域内的传感器节点,采集网络覆盖区域内感知对象的信息,通过多跳路由通信方式,将收集、处理后的信息发送给基站。相继提出一些以节能为目的的路由算法,如:LEACH^[2], HEAD^[3], PEGASIS^[4], PEDAP^[5]等。然而这些协议都是从节省能量的角度出发,并未考虑节点失效问题,在实际应用中随着节点工作时间的增加,节点能量逐渐消耗,节点失效的概率也会随之增加,同时由于硬件故障、环境干扰等因素,也经常会出现节点失效现象。由于部分节点的失效,将导致该无线传感器网络局部甚至整体的失效。因此,无线传感器网络中的可靠性及容错性也就显得尤为重要。目前针对失效节点的容错路由协议已知较少。

小世界现象是复杂网络的重要内容。小世界网络模型的产生起初是由 Watts 和 Strongatz 在规则网络中加入随机性得到的^[6],之后很多学者探索基于 WS 模型的小世界特性产

生的不同方法。本文在分簇的 WSN 网络基础上,使用复杂网络 Kleinberg 小世界模型^[7],提出具有良好容错性的 WSN 拓扑演化方法。

1 WSN 容错路由技术

现有的 WSN 路由协议按照拓扑结构可以分为平面型和层次型两种。LEACH^[2]与 HEAD^[3]协议是基于分簇结构的层次路由协议。PEGASIS^[4]协议把网络中所有节点用贪婪算法构成一个链,实现数据传送,如果链中某个节点死亡则会出现数据丢失现象;PEDAP^[5]协议是依据节点能耗构建最小汇聚树的方式实现集中式算法,如果出现非能耗的节点死亡时, Sink 节点无法排除该故障,则断链的汇聚树依然存在,导致数据大量丢失。无线传感器网络中的容错机制可以有效避免节点出现因能量及其他非人为因素而导致的链路失效现象,在部分节点受到能量和外界因素影响而失效时,局部失效不会导致全局网络失效。已提出一些具有容错机制的路由算法。

CARM^[8]采用分簇的方法构建 WSN 网络,各个节点轮流作为簇头实现 WSN 的容错性能,然而该算法实现过于复

到稿日期:2009-07-07 返修日期:2009-09-13 本文受中央高校基本科研业务费专项资金项目(DL09BB04),哈尔滨市科技局青年创新人才基金(2007RFXXS003),东北林业大学青年科研基金(09033)资助。

景维鹏(1979-),男,博士生,讲师,主要研究方向为移动计算、容错计算等,E-mail:nefujwp@gmail.com;刘亚秋(1971-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为移动计算、智能控制、软计算等(通讯作者);杨显辉(1980-),男,硕士生,主要研究方向为无线传感器网络。

杂,当簇头节点失效概率较大时,数据仍会出现丢失,同时作为备用簇头的节点,其能量消耗也不容忽视。

FTCRP^[8]也采用分簇方法,通过握手机制来监视簇内的簇头节点与非簇头节点,分别对簇头与非簇头节点失效采用不同策略,从而减少传感器节点无效工作时间,提高有效时间利用率,实现系统容错性。该算法过多关注簇内节点变化状况,使得协议的整体性能受到一点影响。

另外一些文献如[10,11],则通过在源节点与目的节点之间建立 k 重多路径方式并将数据包分成不同子数据包进行传输,实现系统容错性。其弊端是受各种因素影响,多个数据包不能保证同时到达目的节点,甚至有的数据包不能到达,这会增加重新封装数据包的难度,加大能量消耗。文献[12]则通过设置参数 E_k 来判定 k 重路径的优先级,从而完成数据包的拆分与封装。然而该算法中簇头节点要处理大量参数 E_k 等级判定工作,使得簇头节点能量消耗过快,没有完全实现开销与可靠性的平衡。文献[13]则通过在 WSN 网络中增加中继节点的方法,构造 2-连通网络,使得骨干网络具有一定容错能力。文献[14]通过改变节点通讯半径的方法实现异构网络的容错性能。REED^[15]主要的目标是构造 k 连通的容错网络结构, k 是一个常数,它依赖于特定的应用。容错性能的实现是利用选取的实际网络中独立的 k 个簇头集合。因此,当前簇头节点如果发生错误,每个节点可以迅速地加入到其他的簇头节点所在的簇中。利用簇头节点冗余形成的簇头间通讯构成 k 重覆盖的网络,进而实现网络容错性能,提高可靠性。

可以看到,以上 WSN 路由拓扑的容错性能的研究都是集中在构建多重冗余链路及簇间、簇内节点冗余设计上。这些机制虽然满足系统的容错要求,但或多或少增加构建网络的成本,降低网络整体性能,影响网络寿命。文献[17]提出了一种基于复杂网络随机行走方法的无线传感器网络簇间演化方法,该模型验证无线传感器网络具有复杂网络无标度特性,同时具有一定的容错能力。文献[18]提出一种基于小世界现象的无线传感器网络拓扑优化方法,该方法对小世界现象中的对边的介数和聚类系数进行分析,有选择删除多余边,使得该算法具有明显的簇结构,并且网络的平均跳数变化不大。

本文借助小世界模型中成熟的 Jon Kleinberg 模型,提出了一种全新的无线传感器网络拓扑演化方法。该方法依据簇头节点的局部视图信息实现簇间路由,在没有增加节点和额外链路开销情况下,提高了网络的稳定性和可靠性,增强了网络拓扑的容错性。

2 基于 Kleinberg 模型的 WSN 拓扑优化

小世界现象普遍存在于大量真实网络中,如计算机互联网、电力网络等,最近研究表明,某些传感器网络同样表现出复杂网络具有的小世界现象^[16]。本文通过在 WSN 中引入多个逻辑链路形成具有小世界效应的无线传感器网络拓扑演化模型,该方法能够降低整个网络的通信开销,减少节点平均能耗,使网络具有一定容错性能。

2.1 Kleinberg 模型

Kleinberg 模型中的 N 个节点分布在一个二维网格上。网格上节点 u 和 v 之间距离 $d(u, v)$ 定义为两个节点之间的网格步数,即曼哈顿距离 $d(u, v) = \|U - V\|$, 其中 U, V 为节

点 (u, v) 的坐标。网络中每个节点通过有向边连接所有与该节点的网格距离不超过某个常数 $p \geq 1$ 的邻居节点,这些链接称为该节点的短链。此外,还有 q 条有向边从该节点连接网络中的其他 q 个节点,这些链接称为这个节点的长链。在 Kleinberg 模型中,节点 u 和 v 之间有长链的概率与 $[d(u, v)]^{-\alpha}$ 成正比,如式(1)所示。

$$p = \frac{[d(u, v)]^{-\alpha}}{\sum_v [d(u, v)]^{-\alpha}} \quad (1)$$

式中, α 为一个参数,叫做聚类指数,用以控制节点的聚类程度。简单来说,一个节点与近邻节点建立连接的可能性较大,与远方节点建立连接的可能性较小。

在 Kleinberg 模型中可以看到,构建基于小世界模型的 WSN 网络,关键是对长链和短链的选择。本文在 Kleinberg 对小世界现象研究的基础上,提出一种依据节点当前能量、长链与短链等信息的局部视图方法构建网络拓扑,并对视图按平均能量原则进行动态维护。这个算法是动态的,分布式的,依赖于局部信息,因而维护开销小,具有较好的能量均衡性、可扩展性和容错性。

2.2 拓扑演化

本文借助 Kleinberg 模型方法实现无线传感器网络簇间拓扑的优化,充分考虑节点的当前剩余能量,在选择加入节点及信息维护时依据节点局部信息,实现动态、具有小世界特性的无线传感器网络簇间拓扑优化。

本文采用 DECDC 协议中的簇生成算法,该算法依据节点的剩余能量、簇头之间的距离选举产生簇半径为 r_c 的簇头,得到的无线传感器网络结构分布性较好,覆盖范围较大。拓扑优化方法包含簇头节点加入、局部路由信息维护,同时这些过程都是完全分布式的自动演化。

基于 Kleinberg 模型的簇间拓扑优化方法如下:

1)初始化:以 Sink 节点和它的邻居簇头节点两两相连,这样构成了无线传感器网络初始拓扑结构;

2)如果网络中相应的节点观测到信息,则将此信息发送到其所在的簇头节点,该簇头节点即作为 WSN 中的加入节点开始构建簇间拓扑。该簇头节点以大于 r_c 范围广播查询信息。其他簇头节点收到该信息后,将返回一个应答信息,同时该广播信息在网络中的存活时间 TTL 的值与广播簇头的时间一致,如式(2)所示。

$$TTL = k \times T \times E_{\text{current}} / E_a \quad (2)$$

式中, k 是一个随机均匀分布的实数值 ($0 < k < 1$), T 则是实现规定的簇头选择算法的持续时间值, E_{current} 表示节点的当前

能量。 E_a 为产生观测信息簇的平均能量 $E_a = \frac{\sum_{i=1}^m s_j \times E_{\text{current}}}{m}$,

S_j ($1 \leq i \leq m, i \neq j$) 表示该簇头节点半径 r_c 内的邻居节点, m 表示所有邻居节点的数量。

3)当其他簇头节点收到广播信息即加入申请后,把新节点的 ID 转发给自己局部视图中所有节点。局部视图 ViewLsit 中记录当前节点相连节点的相关信息,如表 1 所列。

表 1 簇头节点局部视图 ViewLsit

节点 ID	当前能量	状态	距离
1	10	有效	18
3	7	有效	25
2	2	无效	85

4) 当视图中的簇头节点收到转发的加入申请后,只要自己的视图中没有相应要加入簇头的 ID,则按照概率 p_e (如式(3)所示, $E(i)$ 为该节点的当前能量, k_j 为该节点当前视图中的长链与短链之和,即节点度) 计算新加入的节点加入到该簇头节点视图中的概率。由式(3)可以看到,簇头节点能量越大,则其能够存储新加入簇头节点信息的几率就越大,其成为新拓扑结构中的中间节点的可能性就越大。

$$P_e = \frac{E(i)}{\sum_{k \in Neighbor} kE(j)} \quad (3)$$

如果多个簇头节点能量足够满足式(3)的概率要求,则在满足能量要求的簇头节点中按照概率 p_d 最终确定新节点是否加入到自己的视图中。概率 p_d 决定于申请节点与当前簇头节点的距离。如果申请节点与当前簇头相邻,取 $p_d = \frac{1}{m}$,这是短链;如果不相邻,取 $p_d = \frac{1}{dm}$,这是长链(d 为申请加入节点 u 与当前簇头节点 v 的曼哈顿距离即 $d = \|u-v\|^a$; m 为视图大小,即节点的度)。如果没有保留该节点信息,它就会把这个转发申请转发到自己视图中的所有短链节点或继续转发,直到有节点保存。

5) 由拓扑结构变化过程可以看到,当节点加入网络中时,即在其所在簇的区域内有监测信息要发送时,只需要在开始阶段处理相应的局部信息。当该节点存储到其邻居节点的局部视图 ViewLsit 中后则依据优先选择短链的原则把数据转发至 Sink 节点。如果局部视图 ViewLsit 中存在多个短链,则依据簇头节点的当前能量 $E(i)$ 来确定选择哪个短链作为转发路径,即选择 $\text{MAX}(E(i))$;如果局部视图中没有短链或是短链小于给定的阈值,则选定前能量 $E(i)$ 最大值 $\text{MAX}(E(i))$ 作为信息传递路径。从以上过程可以看到,当有节点加入网络时,仅仅需要处理申请节点的局部信息。

2.3 局部视图维护机制

局部视图 ViewLsit 维护主要实现长链与短链的维护,使得簇头节点及时更新视图。为实现长链与短链的有效利用,设定两种状态:有效和无效,如表 1 所列。并周期性进行状态更新。当连接处于有效状态时,可以立即处理数据。设定连接的平均能量值 \bar{E} , 低于 \bar{E} 的连接其状态被设为无效。当处于无效状态时,不立即将该连接删除。每次有新节点加入时,重新计算 \bar{E} , 确定 ViewLsit 中的长链与短链状态为有效或是无效。如果某个簇头节点长期处于无效状态,则在连接簇头的局部视图 ViewLsit 将其连接信息删除,同时在拓扑中移除与删除节点直接相连的边。这样可以更好实现拓扑的优化。周期地更新连接状态,使得该拓扑能动态适应无线传感器网络环境下的路由信息变化,进而实现最佳连接状态。

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^n E(i)}{n} \quad (4)$$

利用该方法构建的小世界特性 WSN 簇间拓扑具有典型的小世界性,同时簇头节点的选取是动态变化的,因此该方法可以维持整个网络节点能量的均衡,可有效避免部分节点因能量的消耗而过早死亡。

3 仿真实验

本文做如下假定:节点每一轮以相同的概率失效(通信因素、硬件故障导致实效)。失效后在下一轮仍然能正常工作,

除非是由能量耗尽引起的实效,不考虑其他因素导致的节点死亡。使用 NS-2 对该模型算法进行验证。实验中各项参数如表 2 所列,监测区域要求 100% 覆盖。

表 2 仿真实验中的参数表

参数名	值
节点数量	100
初始化能量	10J
每轮时间	20s
分布区域	100 * 100
数据包大小	525(Byte)
建立时间: 稳定时间	1: 30

3.1 网络生命周期评价

首先对网络的节点生存时间即网络寿命进行评估。对节点在不同的死亡概率下的网络生存寿命进行分析:当失效概率为 0 时,如图 1 所示,利用小世界模型得到的网络拓扑 SWM 与 LEACH 协议具有相同的或是相近的网络生存寿命。当概率为 0.1 时,如图 2 所示,SWM 网络寿命有了明显提高。当概率为 0.2 时,SWM 比 DECCDC 提高 25%,比 LEACH 提高近 50%,如图 3 所示。

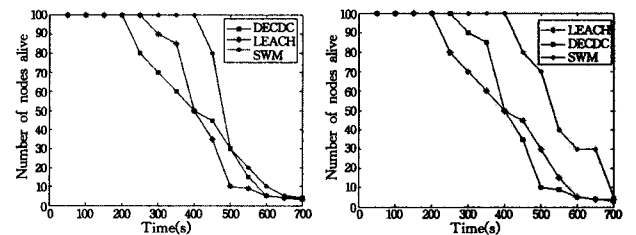


图 1 失效概率 $P=0$ 时的节点寿命 图 2 失效概率 $P=0.1$ 时的节点寿命

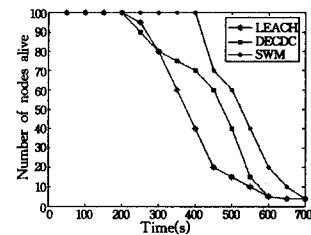


图 3 失效概率 $P=0.2$ 时的节点寿命

3.2 性能测试

通过分析可以知道节点失效概率为 0.2 时,该模型体现出巨大的优势,本节在失效概率为 0.2 的情况下,对其性能进行测试:

1) 网络能量使用均衡性:从整个网络角度来反映整个节点的能耗均衡性,反映了该模型延缓网络寿命的能力。如式(5)所示: $E(i), E(j)$ 为节点当前能量, N 为节点数量。

$$EQMD = \sqrt{\sum_i (\sum_j E(i)/N - E(j))^2} \quad (5)$$

依据式(5)和图 4 所示,经过多轮测试,SWM 的网络拓扑能耗趋于平衡,可见其具有良好的能量均衡性。

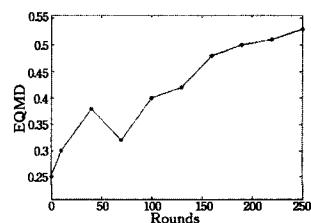


图 4 网络能量的使用情况

2)成功传送数据包的概率:只有将数据完整传送到汇聚节点才能体现数据传送的准确性,如式(6)所示, $Data_Success_Num$ 为一段时间内簇头节点成功传送到汇聚节点的数据包数, $Data_All_Num$ 为在一段时间内不考虑故障因素传输成功的数据包总数,利用比值体现该模型准确数据传送的能力。如图5所示,该模型数据成功率基本在90%左右。

$$P = \frac{Data_Success_Num}{Data_All_Num} \times 100\% \quad (6)$$

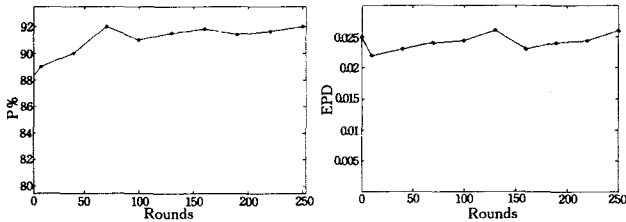


图5 成功传送数据包的概率 图6 成功传送所消耗能量代价

3)成功传送所消耗能量代价:反映将数据有效地传送到汇聚节点所消耗的能量情况,如式(7)所示。 $E(0)$ 为初始能量值。由图6可以看到,该模型构造的网络拓扑能耗均衡。

$$EPD = \frac{\sum_i E(0) - \sum_i E(i)}{Data_Success_Num} \quad (7)$$

可以看到,该模型演化的 WSN 簇间拓扑结构具有能量使用率和能量使用均衡性,能有效延缓网络寿命。在一定的簇头失效情况下,该模型仍具有较强的数据传输能力,可见其具有良好的容错性。

结束语 本文依据无线传感器网络的特点,给出了具有容错性能的簇间拓扑演化模型。该模型采用最小世界理论,簇头节点依据自身的局部视图构建簇间拓扑,实现容错和节能目标。仿真实验结果表明,该模型具有良好的容错性能和能量有效性,并能有效延长网络生存周期。

参考文献

- [1] Akyildiz IF, Su W, Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2002, 40(8): 102-114
- [2] Heinzelman W, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-Efficient communication protocol for wireless micro sensor networks[C]//Proc. of the 33rd Annual Hawaii Int'l Conf on System Sciences, Maui; IEEE Computer Society, 2000; 3005-3014
- [3] Heinzelman W. Application-Specific protocol architectures for wireless networks [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2000
- [4] Lindsey S, Raghavendra C S. PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems[C]//Proceedings of IEEE Aerospace Conference. 2002, 3: 1125-1130
- [5] Ozgur T H, et al. Power efficient data gathering and aggregation in wireless sensor networks[J]. SIGMOD Record, 2003, 32(4): 66-71
- [6] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' network[J]. Nature, 1998, 393(6884): 440-442
- [7] Kleinberg J. Navigation in a small world[J]. Nature, 2000; 406-845
- [8] Zheng Zeng-wei, Wu Zhao-hui, Lin-Huai-zong, et al. CRAM: an energy efficient routing algorithm for wireless sensor network [C]//International Symposium on Computer and Information Science. Antalya, Turke, 2004; 341-350
- [9] 江贺, 务志坤, 张宪超. 一种容错的无线传感器网络聚类路由协议[J]. 小型微型计算机系统, 2007, 8(8): 1362-1366
- [10] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks [C]// Proc. Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networks. 2000
- [11] Nasipuri, Das S. On-Demand Multipath Routing for Mobile Ad Hoc Networks[C]//8th Intl. Conference on Computer Communications and Networks(IC3N 99). 1999
- [12] Dulman S, Nieberg T, Wu Jan. Trade-off between traffic overhead and reliability in multipath routing for wireless sensor networks [C] // Wireless Communication and Networking, WCNC2003. 2003; 1918-1922
- [13] Kashyap A, Khuller S, Shayman M. Relay placement for higher order connectivity in wireless sensor networks[C]//Proceedings of 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Span, 2006; 1-12
- [14] Han Xiao-feng, Cao Xiang, Errol L, et al. Fault-tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks[C]// Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications. Anchorage, AK, 2007; 1667-1675
- [15] Younis O, Fahmy S, Santi P. Robust communications for sensor networks in hostile environment [C]// Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Quality of Service. 2004; 10-19
- [16] Sharma G, Mazumdar R. Hybrid sensor networks: A small world [C]//MobiHoc 05. New York, USA; ACM, 2005; 366-377
- [17] 陈力军, 刘明, 陈道蓄, 等. 基于随机行走的无线传感器网络簇间拓扑演化[J]. 计算机学报, 2009(1): 69-76
- [18] 叶秀彩, 许力, 林力伟. 基于小世界现象的无线传感器网络拓扑优化[J]. 福建师范大学学报: 自然科学版, 2008(5)
- [19] Jing Weipeng, Liu Yaqiu. DECD: An energy-aware route protocol for wireless sensor networks [C]// 2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics. 2008
- [33] Srivastava U, Munagala K, Widom J. Operator placement for in-network stream query processing [C] // Proceedings of the Twenty-fourth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium on Principles of Database Systems. New York, USA; ACM, 2005; 250-258
- [34] Sameul R M, Michael J F, Joseph M H. TinyDB: an acquisitional query processing system for sensor networks[J]. ACM Transactions on Database Systems, 2005, 30(1): 122-173
- [35] Boukerche A, Samarah S. A Novel Algorithm for Mining Association Rules in Wireless Ad Hoc Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2008, 19(7): 865-877
- [36] Ezeife C I, Monwar M. SSM: A Frequent Sequential Data Stream Patterns Miner [C] // Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining. IEEE, 2007; 120-126
- [37] Vincent S T, Kawuu W L. Mining Temporal Moving Patterns in Object Tracking Sensor Networks [C] // Proceedings of the 2005 International Workshop on Ubiquitous Data Management. IEEE, 2005; 105-112
- [38] Nhan D P, Mohamed M G, Uwe R. Resource-aware Online Data Mining in Wireless Sensor Networks [C] // Proceedings of the 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Data Mining. IEEE, 2007; 139-146

(上接第16页)