

基于随机行走机制的无线传感器网络拓扑演化研究

王莹¹
WANG Ying

摘要

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 部署在人迹罕至和环境恶劣的区域, 网络的能耗和抗毁性能成为 WSN 拓扑设计时需要考虑的关键问题。无标度网络中节点度分布不均匀且具有幂律特性, 故节点对随机打击具有很好的抗毁性, 可以满足 WSN 拓扑设计的要求。针对 WSN 在实际应用中面对蓄意攻击时的脆弱性等问题, 提出了具有可控幂律的无标度拓扑演化模型 (CRSM)。为了使 CRSM 模型演化后的拓扑具有很好的自我修复、可重构性和可调性, 在 CRSM 的基础上提出了具有链路补偿机制的无标度拓扑演化模型 (LCSM)。CRSM 和 LCSM 模型演化的网络拓扑在随机和蓄意打击下都具有很好的抗毁性和容错性, 可满足恶劣环境对 WSN 鲁棒性的要求。

关键词

无线传感器网络; 无标度理论; 拓扑演化; 容错性; 网络生命期

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.10.032

0 引言

无线传感器网络 (wireless sensor networks, WSN) 由大量具有处理和计算能力的有限传感的通信节点组成, 可监测物理或环境条件, 如温度、声音、振动、压力、运动或污染物。从本质上讲, WSN 就是可以将所有类型的传感器和网络互联的一种技术^[1]。目前的 WSN 被越来越广泛地应用于各种工业和消费者应用程序, 如工业过程监控和控制、机器健康监测、环境和栖息地监测、医疗保健应用、智能家居和交通管制。在军事和战争中, WSN 部署在恶劣的环境中, 在节点能量有限且节点分布范围较广的情况下, 不能通过更换电池的方式来保证网络稳定运行, 因此面临因能量和通信链路的受限问题而导致设计和管理 WSN 的困难, 急需一种具有抗毁能力和低能耗的拓扑控制的方法。WSN 拓扑结构及自组织演化规律对网络的连通与覆盖、定位与路由、拓扑控制等研究影响深远。WSN 由于电池耗尽或者节点中一些内部问题容易使网络失效, 另外, 自然灾害和故意攻击将导致网络轻易崩溃。拓扑结构的构建与控制为解决 WSN 这些问题方面是一项至关重要的技术。该技术通过功率控制、关键网络节点选择以及删除不必要的通信链路等, 实现更高的通信质量和有效的能量使用以及网络的健壮性。因此, 如何提高网络的生存性、鲁棒性是 WSN 研究中的重要问题。

在实际应用中, WSN 往往通过分簇形成异构拓扑, 核心思想是将一些节点标记为特殊功能节点, 使其控制邻居节点, 这个控制节点称为簇头^[2]。文献 [3] 使用随机行走机制

来构建一个簇间拓扑演化模型, 通过随机行走的方式选择邻居节点, 更加贴近真实网络的演化特征。新节点建立连接时根据簇头节点当前能量进行选择, 可以减少节点因能量耗尽而失效情况的发生。文献 [4] 基于文中提出的 CABG 分簇算法, 采用随机行走的方式进行拓扑演化, 由于在连接方式中考虑了节点剩余能量和节点度, 使得演化后的网络拓扑具有较好的负载和能量均衡。文献 [5] 中引入度约束对节点度进行限制, 并采用分簇结构生成网络, 更加贴近 WSN 实际应用场景, 可以较好地平衡网络能耗。文献 [6] 中针对簇头不平衡竞争半径, 提出一种 IDUC 算法, 使之在异构网络中有更好的适应性。

现有的 WSN 拓扑模型虽然都在一定假设条件下达到了一定的效果, 但对于能量均衡和拓扑模型动态变化情况下链路的选择有局限性。因此, 将无标度特性引入 WSN 中旨在更好地满足现实世界的需要, 更好地延长网络生命期的拓扑模型成为 WSN 应用发展新的研究方向。

1 拓扑演化机制

1.1 经典 BA 模型

BA 模型的产生基于两个步骤^[7], 一是节点的增长, 二是节点的择优连接, 具体过程如下。

(1) 增长。用 m_0 表示初始网络中节点的数目, 在此后网络演化相等的时间段内, 网络中都有新节点的加入, 并且新节点与网络中原有节点产生 m 条边连接, 即 $m < m_0$ 。

(2) 择优连接。新增节点与原有节点 i 相连的概率取决于节点 i 的度 k_i 。

1. 河南工业贸易职业学院 河南郑州 4511971

1.2 具有调节参数的 EETM 模型

能量有效的无标度拓扑演化模型 (energy efficient topology model, EETM)^[8] 依据 WSN 节点的能量与通信半径的关系, 控制节点通信半径的大小, 同时引入调节参数, 使拓扑的度可调。其拓扑演化过程如下。

(1) 增长。用 m_0 表示初始网络中节点的数目, 在此后网络演化相等的时间段内, 网络中都有新节点的加入, 并且新节点与网络中原有节点产生 m 条边连接, 即 $m < m_0$ 。节点的能耗具有可控性, 节点可以根据自身发射功率的大小来调节通信半径。

(2) 择优连接。节点在可调的通信半径内连续切换, 新增节点在选择网络中相连的节点时, 仅在通信半径的范围内进行选择。

EETM 模型是调节参数模型的一个代表, 这种模型从节点度和节点通信半径等角度出发, 以节点的剩余能量可控为前提来制约节点的通信半径。由于引入了调节参数, 通过推理验证可知该模型的度分布服从 $[3, +\infty)$, 故该模型生成的网络拓扑符合多种情况的要求, 也具有较好的容错性。

1.3 网络生命期评估模型

网络生命期对网络的工作性能具有重要意义, 通常情况下, 在 WSN 中, 将网络中最早失效的传感器节点的生存时间记为网络的生命期。影响网络生命期的因素有节点剩余能量、通信半径等, 节点失效后会造成网络连通性的降低以至于影响到网络生命期。

2 提出一种具有可控幂律的无标度拓扑演化模型 (CRSM 模型)

在评价 WSN 性能时, 抗毁性是一个重要指标。WSN 的抗毁性指网络中的部分节点在受到蓄意攻击时能够保持网络正常运行的能力。针对 WSN 的抗毁性, 本文从层次型拓扑构建的角度出发, 考虑节点剩余能量和节点间距离对网络生命期的影响, 并结合了 HEED 簇头生成算法与随机行走机制, 以节点剩余能量和节点间距离的比值作为适应度函数, 提出一种具有可控幂律的无标度拓扑演化模型 (controllable power rate scale-free topology evolution model, CRSM)。

在众多经典分簇算法中, HEED 分簇算法^[9] 是由 Ossa-ma 等人于 2004 年提出的。簇头的选择主要依赖于剩余能量, HEED 分簇速度更快, 能产生更加均匀的簇头、更合理的网络拓扑。在现实网络中, 随机行走是一种解决随机问题的方法, 它与人类生活息息相关, 例如醉汉行走的轨迹、布朗运动、股票的涨跌等都可以用它来模拟。随机行走^[10] 构造局域世界的方式比全局范围进行选择更加具有优势。

CRSM 模型的拓扑演化机制分为以下五个步骤。

(1) 初始网络和簇分布。初始网络中由 m_0 个节点和 e_0 条边构成全连通的网络, 节点在网络中均匀分布。根据 HEED 分簇算法来实现节点的分簇, 同时获得网络中簇头的分布情况。

(2) 局域世界的选择。在初始网络中随机选择一个簇头节点作为起始节点利用随机行走的方式确定局域世界 local, 行走步长设定为 q 。

(3) 节点增长。在相同的时间间隔内向网络中新增一个簇头节点 n 和节点出发的 m 条 ($m < m_0$) 条边。

(4) 择优连接。新增簇头节点以一定的概率 P 在局域世界 local 中随机选择 m 个簇头进行连接, 同时标记被连接的簇头节点。

$$P = \alpha_1 \frac{k_i}{\sum_j k_j} + \alpha_2 \frac{\eta_i}{\sum_j \eta_j} \quad (1)$$

式中的适应度函数 η_i 计算公式为:

$$\eta_i = \frac{E_i}{d_i} \quad (2)$$

式中: d_i 为节点与邻居节点间的距离, $E_i = f(E_i)$ 为关于节点剩余能量的连续函数, 且 $0 < \alpha_1 < 1$, $0 < \alpha_2 < 1$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。

择优概率与网络生命期评估模型中的参数有关联, 区别于 BA 模型择优选择过程中依赖于节点度的单一性, 该模型节点偏好连接不仅与节点度有关, 而且节点剩余能量高、传输距离短的节点更具有优势, 从而达到节能, 均衡网络能量的目的。

(5) 如果随机行走的节点和网络中有标记的簇头重复进行连接, 则在下一轮的行走机制中将选择从这个簇头节点开始。

CRSM 模型拓扑演化如图 1 所示。

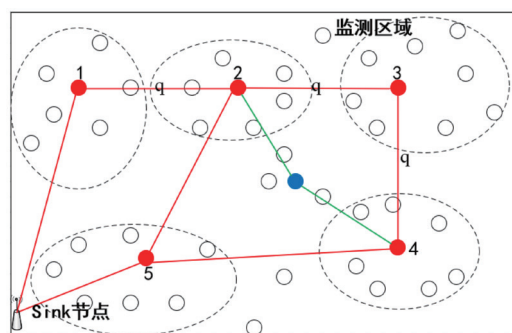


图 1 CRSM 模型拓扑演化图

假设节点在监测区域中均匀分布, 按照 HEED 分簇算法选出簇头节点, 簇头节点负责簇内信息的采集及融合和簇间的数据转发。监测区域中共有 5 个簇头节点, 在网络中随机选择节点 1 开始长度为 q 的随机行走, 假设节点 1 和 2、2 和 3、3 和 4 之间的距离为 q , 则随机行走确定的局域世界 local 的节点为 1,2,3,4, 新加入节点 n 在其局域世界范围内的节点总数用 M_n 表示, 则 $M_n = 4$ 。新加入节点 6 选择簇头节点进行连

接,根据表中P值的大小,则节点6选取节点2和3连接。

表1是根据该网络节点剩余能量、节点度和节点间距离的值计算所得的结果。

表1 CRSM模型中初始计算结果

节点编号	节点度	节点剩余能量/J	节点间距离/m	P
1	8	10	10	0.49
2	9	9	5	0.83
3	10	7	4	0.82
4	9	5	3	0.78
5	10	3	8	—

3 提出一种具有链路补偿机制的无标度拓扑演化模型

WSN处在动态变化的环境中,网络中不仅有节点的增加,还存在节点的失效,失效节点会降低网络的连通性和通信效率。为了保证节点失效时网络的连通性,故在CRSM模型的基础上加入链路删除和链路补偿机制,提出一种具有链路补偿机制的无标度拓扑演化模型(link compensation mechanism in scale-free topology evolution model, LCSM)。链路删除机制可以删除网络中易失效节点来保证网络的通信效率,有利于降低网络中的节点能耗;链路补偿机制使得网络在遇到故障时能够进行自愈以保证网络的可用性。理论分析和仿真实验表明,LCSM模型可以均衡网络能耗并保证WSN数据传输的效率和可靠性,最终提高了网络抗毁性延长了网络生命期。LCSM模型的拓扑演化机制如下。

(1) 初始网络和簇分布。初始网络中由 m_0 个节点和 e_0 条边构成全连通的网络,节点在网络中均匀分布。根据HEED分簇算法来实现节点的分簇,同时获得网络中簇头的分布情况。

(2) 局域世界的选择。在初始网络中随机选择一个簇头节点作为起始节点利用随机行走^[10]的方式确定局域世界local,行走步长设定为 q 。

(3) 节点增长。在相同的时间间隔内向网络中新增一个簇头节点 n 和节点出发的 m 条($m < m_0$)条边。

(4) 择优连接。新增簇头节点以一定的概率 P 在局域世界local中随机选择 m 个簇头进行连接,同时标记被连接的簇头节点。

(5) 链路删除机制:以反择优概率 P^* 选择网络中某个簇头节点进行删除,且与之相连的所有链路均被删除。

$$P^*(k_i) = \frac{\{1 - P(k_i)\}}{[N(t) - 1]} \quad (3)$$

(6) 链路补偿机制:如果网络中的节点失效后失去一条链路,网络中产生 n 个同样也遵循上节择优连接概率规则的新的连接,来保证网络的连通性和数据转发的及时有效性,最终网络中所有节点都被互连。

能量小,传输距离大的节点被删除的概率大,这种动态变化特征符合WSN中实际情况。具体演化过程如下。

sink及邻居节点形成具有 m_0 个节点的初始网络→利用HEED分簇算法使节点在网络中分簇,并得到簇头的分布情况→在初始网络中随机选择一个簇头节点进行长度为 q 的随机行走构成局域网络→新加入簇头节点选择局域网络中 m 个簇头节点连接→在局域网中,选择簇头节点进行删除,并删除与之相连的链路→局域网中出现链路失效时,网络中节点会产生 n 条新的连接→判断是否所有簇头节点都连接。

4 节点度和能量关系演化

图2给出了BA、EAEM、CRSM和LCSM模型节点的度与节点剩余能量之间的关系,其中横坐标为节点度的不同值,纵坐标为对应节点度值下节点剩余的能量。从图中可以看出,EAEM、CRSM和LCSM模型具有相似的走势,随着节点度的增加,对应的节点剩余能量也增加。这是因为新节点在选择网络中已有节点进行连接时,这三种模型均考虑了节点剩余能量对连接的影响。而BA模型的波动较大,源于新节点在择优连接时仅考虑了节点度这一个因素,不符合网络实际的变化情况。在节能方面,CRSM和LCSM模型优于EAEM和BA模型,这是因为在择优连接时CRSM和LCSM模型不仅综合考虑了节点的剩余能量和节点间的距离,而且引入了调节参数,可以优化网络拓扑促使网络向节能方向转变,从而均衡了能耗,避免由于能量耗尽导致庞大节点失效,进而延长了网络生命期。

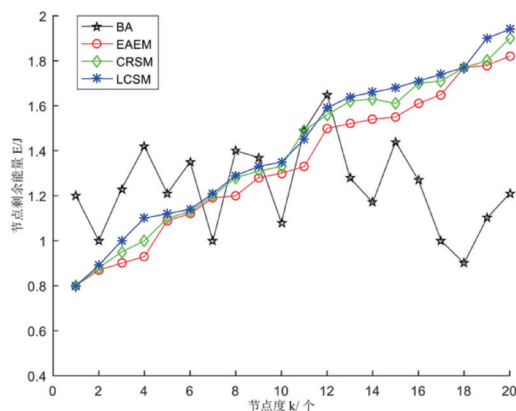


图2 节点度与能量的关系

5 结语

本文从层次型拓扑构建的角度出发,通过HEED分簇算法得到簇头分布情况,同时网络中的簇头节点以随机行走的方式来确定局域范围内的节点,并根据网络生命期评估模型的建立得出节点剩余能量、节点间距离和节点度与网络生命期的关系,研究了基于随机行走机制的无线传感器网络拓扑演化机制。

(下转第142页)

参考文献:

- [1] 隋星原,王峰.结合权益证明的工作量证明共识算法优化[J].计算机仿真,2023,40(12):455-459+464.
- [2] 商广勇,赵钦,陆冬妮,等.基于动态分组的主流区块链PoS共识算法研究[J].现代电子技术,2023,46(9):87-90.
- [3] 高建彬,刘洋洋,夏虎,等.基于信誉分类的拜占庭容错共识算法[J].无线电工程,2024,54(4):804-816.
- [4] 叶博文,贾小林,顾娅军.面向物联网的改进PBFT共识算法[J/OL].计算机系统应用,1-8[2024-03-13].https://doi.org/10.15888/j.cnki.csa.009455.
- [5] 黄宇翔.应用于供应链的区块链PBFT共识算法优化[J].计算机系统应用,2024,33(4):209-214.
- [6] 王震,张珊珊,鄢斌扬,等.基于自适应粒子群优化算法的串联复合涡轮储能优化策略[J].计算机应用,2024,44(2):611-618.
- [7] KUMAR P D, BISWAJEET S, SUKADEV M. An efficient

detection and classification of acute leukemia using transfer learning and orthogonal softmax layer-based model[J]. IEEE/ACM transactions on computational biology and bioinformatics, 2022, 20: 1817-1828.

- [8] 王森,李志淮,贾志鹏.主节点随机选取的改进PBFT共识算法[J].计算机应用与软件,2022,39(10):299-306.
- [9] 刘泽坤,王峰,贾海蓉.结合动态信用机制的PBFT算法优化方案[J].计算机工程,2023,49(2):191-198.
- [10] 李帅,侯瑞春,陶冶.基于区块链的服务型制造供应链溯源技术研究[J].制造业自动化,2023,45(4):196-203.

【作者简介】

曹碧娟(2000—),女,辽宁抚顺人,硕士研究生,研究方向:网络服务与信息安全。

黄迎春(1976—),男,辽宁瓦房店人,硕士,副教授,研究方向:网络服务与信息安全、嵌入式系统实时调度。

(收稿日期:2024-07-10)

(上接第138页)

在具有可控幂律的无标度拓扑演化模型中,通过引入节点度调节因子和适应度函数调节因子来保证网络的幂律分布在一定范围内可调,使得网络中的节点在失效时具有较好的容错性。在具有链路补偿机制的无标度拓扑演化模型中,首先通过对网络中能量小、距离大的节点和相应的链路进行选择性的删除,可以降低网络能耗;其次通过对失效链路进行适当补偿,增强了网络的自愈和重构能力,因此演化的网络拓扑具有很好的抗毁性。两个模型在网络构建和择优连接的过程中具有一致性,新加入簇头节点都是通过随机行走的方式确定其局域世界,并按照择优连接概率选择合适的簇头节点进行连接。两种模型构建的网络拓扑在能耗方面更加均衡,且网络的容错性和抗毁性得到了提升,延长了网络生命周期。

参考文献:

- [1] SHI W, HONG B. Task scheduling in budget-constrained cloud computing systems to maximise throughput[J]. International journal of computational science and engineering, 2012, 7(4):319-328.
- [2] MATHIVILASINI S, SRIVATSA S K. A novel energy efficient for wireless hart applications[J]. Research journal of applied sciences engineering & technology, 2015, 11(4):396-399.
- [3] 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,2009,32(1):69-76.

- [4] 郑耿忠.无线传感器网络拓扑控制与优化研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.
- [5] 符修文,李文锋.基于局域世界的无线传感器网络分簇演化模型[J].通信学报,2015,36(9):204-214.
- [6] CHEN C, XIN G, YU J, et al. IDUC: an improved distributed unequal clustering protocol for wireless sensor networks[J]. International journal of distributed sensor networks, 2015(5):682-693.
- [7] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [8] 刘洲洲,王福豹.能量有效的无线传感器网络无标度拓扑模型[J].北京邮电大学学报,2015,38(1):87-91.
- [9] LIN C H, TSAI M J. A comment on HEED: a hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. IEEE transactions on mobile computing, 2006, 5(10):1471-1472.
- [10] SARAMAKI J, KASKI K. Scale-free networks generated by random walkers[J]. Physica A, 2004 (341):80-86.

【作者简介】

王莹(1993—),女,河南开封人,硕士,助教,研究方向:计算机网络、大数据。

(收稿日期:2024-07-21)