

西安电子科技大学

硕士学位论文



基于拓扑重构的无线传感器网络
抗毁性优化策略研究

作者姓名 田秀雯

指导教师姓名、职称 刘三阳 教授

申请学位类别 理学硕士

学校代码 10701
分 类 号 TP393

学 号 1407122444
密 级 公开

西安电子科技大学

硕士学位论文

基于拓扑重构的无线传感器网络 抗毁性优化策略研究

作者姓名：田秀雯

一级学科：数学

二级学科：应用数学

学位类别：理学硕士

指导教师姓名、职称：刘三阳 教授

学 院：数学与统计学院

提交日期：2017 年 6 月

西安电子科技大学 学位论文独创性（或创新性）声明

秉承学校严谨的学风和优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢中所罗列的内容以外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果；也不包含为获得西安电子科技大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同事对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文若有不实之处，本人承担一切法律责任。

本人签名： 田高要 日期： 2017.6.18

西安电子科技大学 关于论文使用授权的说明

本人完全了解西安电子科技大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于西安电子科技大学。学校有权保留送交论文的复印件，允许查阅、借阅论文；学校可以公布论文的全部或部分内容，允许采用影印、缩印或其它复制手段保存论文。同时本人保证，结合学位论文研究成果完成的论文、发明专利等成果，署名为西安电子科技大学。

保密的学位论文在___年解密后适用本授权书。

本人签名： 田高要 导师签名： 刘三阳

日期： 2017.6.18 日期： 2017.6.18

Research on Invulnerability Optimization Strategy through Topology Reconstruction for Wireless Sensor Networks

A thesis submitted to
XIDIAN UNIVERSITY
in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master
in Applied Mathematics

By
Tian Xiuwen
Supervisor: Liu Sanyang Title: Professor
June 2017

摘要

无线传感器网络是由大量具有信息采集和无线通信等功能的微型传感器节点,通过自组织方式形成的网络。网络中的节点通过相互合作,完成对所在区域环境的监测,数据的收集和传输任务。由于无线传感器网络通常被部署在较为恶劣且无人接触的环境中,单个传感器节点又受到自身能量和通信宽带的限制,所以网络很容易被破坏而不能有效地工作。因此,对无线传感器网络抗毁性优化问题的研究成为了一个非常重要的课题。

本文通过对网络拓扑结构的合理分析,从拓扑重构的角度对网络抗毁性的优化进行了研究,主要包括失效预防和拓扑修复两个方面,并提出了两种提高网络抗毁性的算法:

(1) 针对正常运作的无标度网络,提出了一种预防网络失效的拓扑优化算法,以提高网络的抗毁性。算法首先对网络鲁棒又脆弱的拓扑特征进行了分析,然后对网络中的部分链路进行了合理地删除,以均衡节点间的负载,保护网络中相对重要的关键节点不会因超载而失效;同时,为了进一步提高网络抵御外部攻击的抗毁性,算法找取了邻接网络中抗毁性相对较高的节点,采用旅行商问题的思想,构建了邻接网络的环形立交结构,得到了一种链路花费最少的拓扑结构。仿真结果表明,这种拓扑重构算法能够有效地提高网络的传输容量以及网络的抗毁性。

(2) 针对被分割的无线传感器网络,提出了一种修复网络连通的抗毁性优化算法。这种算法致力于利用最少的中继节点达到提高网络性能的目的。算法分为两个阶段:第一阶段是网络 1-连通拓扑结构的修复。在考虑网络各分区的位置以及相互之间距离的基础上,首先进行网络骨干多边形的构建,然后部署适量的中继节点实现网络各分区的连通,但此时得到的网络拓扑结构并不稳定,网络很可能因某个中继节点的失效而再次造成分割。因此,为进一步提高网络的抗毁性和容错性,算法的第二阶段是对网络的各分区进行 2-连通拓扑的构建,即在分区与骨干多边形之间建立第二条不相交路径。

关键词: 无线传感器网络, 抗毁性, 失效预防, 拓扑修复, 骨干多边形

ABSTRACT

Wireless Sensor Network (WSN) is formed by a large number of sensor nodes which are low cost and have signal acquisition, wireless communication and other functions through self-organized way. And it completes the task of collection and transmission the data of monitoring area through mutual cooperation of sensor nodes. WSN is widely applied in military surveillance, environmental monitoring, urban traffic management and so on, recently. Due to the network is often deployed in the harsh environment and sensor nodes are subject to their own energy and broadband communication restrictions, the network is vulnerable to be damaged and can not work effectively. So, the study of the problem of the network invulnerability optimization has become a very important topic.

Through the reasonable analysis to the topological structure of the network, this paper optimizes the network invulnerability from the point of view of the topology reconstruction which includes two aspects of failure prevention and topological repair, and puts forward two algorithms accordingly.

(1)The paper proposes a topology optimization algorithm to prevent the failure of scale-free network which operates normally and improve the network invulnerability. The algorithm firstly analyzes the robust and fragile topological features of the network and then removes some links among the network to balance the node load and reduce the probability of the overload of node as much as possible. In order to further improve the network invulnerability to against the external attacks, the algorithm selects the node with relatively high invulnerability in each adjacent network and constructs a connected ring interchange topology among them that according to the thought of the traveling salesman problem (TSP). The simulation results show that this kind of topology reconstruction algorithm can effectively improve the network transmission capacity and the invulnerability of the network.

(2)Based on a partitioned WSN, the paper presents an invulnerability optimization algorithm to repair the network connectivity which opts to employ the fewest relay nodes. The algorithm forms the largest inner simple cycle at the first phase which referred to as backbone polygon. Then, the initial 1-connected topology is established where the

terminals of the backbone polygon act as a core mesh and each partition that is not part of the backbone polygon is connected to the backbone polygon over the shortest path. In order to avoid the network divided again that due to the failure of a single relay node, the second phase of the algorithm is to form a bi-connected inter-partition topology among the backbone polygon and partitions that can boost the application robustness, improve the fault tolerance and balance the inter-segment traffic in a network.

Keywords: Wireless Sensor Network, network invulnerability, failure prevention, topological repair, backbone polygon

插图索引

图 1.1	WSNs 结构模型.....	2
图 1.2	传感器节点结构图	3
图 1.3	WSNs 体系结构.....	4
图 3.1	网络分支中代表节点连接示意图	23
图 3.2	五种网络大小下网络最大介数值与移除边比例的关系图	25
图 3.3	随机攻击下网络抗毁性值比较	26
图 3.4	随机攻击下网络通信效率比较	27
图 3.5	恶意攻击下网络抗毁性值比较	28
图 3.6	恶意攻击下网络通信效率比较	28
图 4.1	WSNs 遭受破坏被分割的场景图.....	32
图 4.2	算法 RNPCR 第 1 轮凸包的形成	33
图 4.3	算法 RNPCR 第 2 轮凸包的形成	35
图 4.4	算法 RNPCR 骨干多边形的形成	35
图 4.5	连通网络的形成	36
图 4.6	2-连通网络的形成.....	36
图 4.7	随通信半径增大所需中继节点个数比较图 (8 个分区)	38
图 4.8	随分区个数增加所需中继节点个数比较图 (通信半径 150 m)	38
图 4.9	随通信半径增大平均节点度比较图 (8 个分区)	39
图 4.10	随分区个数增加平均节点度比较图 (通信半径 150 m)	39
图 4.11	随通信半径增大平均路径长度比较图 (8 个分区)	40
图 4.12	随分区个数增加平均路径长度比较图 (通信半径 150 m)	40

表格索引

表 3.1	仿真参数	24
表 3.2	G_{RR} , $G_{HBF-\alpha}$ 和 G_{LNT0} 的平均路径长度增长率 (%)	26
表 3.3	G_{RR} , $G_{HBF-\alpha}$ 和 G_{LNT0} 的最大介数降低率 (%)	26

符号对照表

符号	符号名称
B_i	节点 i 的介数
B_{\max}	节点最大介数值
d_{ij}	节点 i 与 j 之间的最短路径长度
E	网络的通信效率
H	网络抗毁性值
k_i	节点 i 的度数
L	网络平均路径长度
M	监测区域边长
N	网络中节点的数量
N_p	网络分区数量
R	中继节点通信半径
R_0	传感器节点通信半径
R_c	网络容量

缩略语对照表

缩略语	英文全称	中文对照
WSNs	Wireless Sensor Networks	无线传感器网络
TSP	Traveling Salesman Problem	旅行商问题
GA	Genetic Algorithm	遗传算法
RN	Relay Node	中继节点
NP	Network Partition	网络分区
EAEM	Energy Aware Evolution Model	能量意识演化模型
EBEM	Energy Balanced Evolution Model	能量均衡演化模型
LGEM	Linear Growth Evolution Model	线性增长演化模型
AGEM	Accelerated Growth Evolution Model	加速增长演化模型
REP	Redundant Energy Prediction	剩余能量预测
FLSS _k	Fault-tolerant Local Spanning Subgraph	容错局部生成子图
EPMRA	Energy Priority-variety Multi-path Routing Algorithm	多路径路由选择算法
DAS	Directed Angulation towards the Sink	指向 Sink 的直接测角
SSD	Sink node as Source / Destination	以 Sink 节点为源节点或目的节点
CORP	A distributed Cell-based Optimized Relay node Placement	基于网格的分布式最优中继节点布置策略
HDF	High Degree First strategy	高度优先策略
HBF	High Betweenness First strategy	高介数优先策略
VNDR	Variance of Neighbor Degree Reduction strategy	邻居节点度降阶方差策略
RA	Random Addition strategy	随机加边策略
LDF	Low Degree First strategy	度低者优先策略
LBF	Low Betweenness First strategy	介数低者优先策略
SMB	Shortcut for Maximum Betweenness strategy	最大介数节点增加 Shortcut 法
RR	Random edge Rewiring strategy	随机边重连接策略
HDF- α	High Degree First edge rewiring strategy- α	度高者优先重连接策略 α

HDF- β	High Degree First edge rewiring strategy- β	度高者优先重连接策略 β
HBf- α	High Betweenness First edge rewiring strategy- α	介数高者优先重连接策略 α
HBf- β	High Betweenness First edge rewiring strategy- β	介数高者优先重连接策略 β
HEBF	High Edge Betweenness First edge rewiring strategy	边介数最大者优先重连接策略
FESTA	Federating network Segments via Triangular steiner tree Approximation	基于三角斯坦纳近似树方法组合网络分区
LNT0	A Link-based Network Topology Optimization Algorithm	一种提高无标度网络抗毁性的拓扑优化算法
DORMS	A Distributed algorithm for Optimized Relay node placement using Minimum Steiner tree	基于最小斯坦纳树的分布式中继节点布置算法
RNPCR	A Relay Node Placement Algorithm for Connectivity Restoration in Partitioned Wireless Sensor Network	一种修复分区无线传感器网络连通的中继节点部署算法

目录

摘要	I
ABSTRACT	III
插图索引	V
表格索引	VII
符号对照表	IX
缩略语对照表	XI
第一章 绪论	1
1.1 课题背景及研究意义	1
1.2 无线传感器网络概述	2
1.2.1 无线传感器网络的结构与特点	2
1.2.2 无线传感器网络的关键技术	4
1.2.3 无线传感器网络的应用	5
1.2.4 无线传感器网络面临的挑战	6
1.3 本文的主要工作和组织结构	7
第二章 无线传感器网络抗毁性优化问题	9
2.1 无线传感器网络抗毁性概述	9
2.1.1 网络抗毁性的定义	9
2.1.2 影响网络抗毁性的因素	9
2.2 无线传感器网络抗毁性优化研究现状	10
2.3 基于拓扑重构提高网络抗毁性的主要实现机制	13
2.3.1 拓扑重构的意义	13
2.3.2 基于拓扑重构提高网络抗毁性的主要算法	13
第三章 一种提高无标度网络抗毁性的拓扑优化算法	19
3.1 相关工作	19
3.2 主要模型及主要参数	20
3.2.1 BA 无标度网络模型	20
3.2.2 TSP 模型	20
3.2.3 主要参数	21
3.3 基于无标度网络的抗毁性优化算法	22
3.3.1 算法基本思想	22
3.3.2 算法步骤	23

3.4	性能仿真与分析	24
3.4.1	仿真环境.....	24
3.4.2	仿真结果.....	24
3.5	本章小结	28
第四章	一种修复网络不连通分区的中继节点部署算法	31
4.1	相关研究	31
4.2	基础网络模型	32
4.3	算法描述	33
4.3.1	骨干多边形的构建.....	33
4.3.2	部署中继节点恢复网络连通.....	35
4.3.3	分区 2-连通拓扑的形成	36
4.4	性能仿真与分析	37
4.4.1	仿真环境.....	37
4.4.2	仿真结果.....	37
4.5	本章小结	41
第五章	结束语	43
5.1	本文总结	43
5.2	展望	43
参考文献	45
致谢	49
作者简介	51

第一章 绪论

1.1 课题背景及研究意义

随着当今科学技术的快速进步,无线传感器网络(Wireless Sensor Networks,简称 WSNs)已深深融入到当今不断发展的信息时代。而且,随着日益成熟的网络无线通信技术以及低功耗的嵌入式技术,一种体积较小、成本较低且自组织能力强的传感器节点正进入传感器发展的领域,现已经带来了 WSNs 信息感知的一场意义重大的变革^[1-2]。随着传感器网络技术的快速发展,以及人们逐渐意识到 WSNs 所具备的能够被快速部署在监测环境中,并且具有强隐蔽性、高容错性的独特优势,WSNs 在学术界和工业界分别引起了巨大轰动,各国也开始纷纷调动相关技术,引进人才并投入资金对其进行研究和开发。紧跟时代的步伐,我国也开始对 WSNs 进行研究和开发使用。我国对 WSNs 的研究主要集中在智能家居、环境感知与灾害防御、穿戴式计算等领域。目前,WSNs 的研究与应用已从最开始的军事领域逐步推广到了民用领域,而且,也逐渐成为了对人类的生产和生活方式具有重大影响的关键技术之一。WSNs 将人们逻辑思维上的世界与真实存在的物理世界融合在一起,使得人们不再需要靠自身五官去感知和判断周围的环境,而只需要作为信息的接收用户,等待 WSNs 发送消息,筛选出自己所需要的有用信息。这种形式不仅极大地促进了人类与自然界的亲密接触,还改变了人与自然的交互方式。WSNs 必将因其所具备的诸多优点以及自身的潜在价值,成为信息时代一个持久的主题。

大量的传感器节点通过自组织的形式构成了 WSNs,而这些节点则利用自组织网络技术和无线通信技术对部署区域内的信息进行实时数据采集、环境监控和目标感知,实现信息的收集、处理及发送,完成所分配的任务。虽然组成 WSNs 的传感器节点很容易通过飞机撒播、人工放置和大炮发射等方式进行部署,但是由于节点的体积较小,自身资源有限,且所位于的环境通常比较恶劣,使得 WSNs 很容易因遭受外界因素的攻击而被破坏,造成网络不能正常的工作甚至崩溃。因此,为降低甚至避免网络因遭受攻击而造成的一系列损失,有必要采取相应的措施提高网络的抗毁性,让 WSNs 变得更加安全、可靠。在 WSNs 抗毁性的研究中,提高网络整体性能的最重要技术途径之一就是网络的拓扑结构进行优化。

一个不好的网络拓扑结构很有可能导致网络出现许多缺陷,例如:

(1) 某些节点可能会因其传输功率的大小,以及所处地理位置的特殊性,而导致自身因工作产生过多的负荷,致使有限的能量被快速耗尽,进而对网络的吞吐率以及网络的寿命产生了一定的影响;

(2) 传感器节点所构成的网络拓扑结构中, 可能会存在大量的冗余链路, 而这些冗余链路将导致网络的拓扑信息中存在大量的冗余信息, 对网络进行路由计算时, 将会产生计算复杂度不断增大的现象, 影响了网络的工作效率;

(3) 由于网络中节点随机部署, 造成网络中的链路分布不均衡, 这对网络的连通性和抗毁性将产生重大影响, 特别是在军事应用中将直接影响网络的安全连通性。

因此, 对被破坏前后的网络拓扑结构进行一定的优化, 不仅能够提高网络的运作效率, 而且能够保证 WSNs 节点间的通信质量, 提高网络容量和网络抗毁性, 为数据的收集融合等提供拓扑基础。基于此, 本文从网络预防和网络修复两个方面, 研究了如何通过拓扑重构技术对 WSNs 的抗毁性进行优化。

1.2 无线传感器网络概述

1.2.1 无线传感器网络的结构与特点

WSNs 是一种智能的自治测控网络系统, 它能够自主地在被部署的环境中发挥自身的功能, 执行并完成用户所指定的任务, 并将收集到的数据传输给用户。一般地, 一个体系结构完整的 WSNs 是由传感器节点、通信网络、基站(即所称的 Sink 节点)以及用户终端四部分组成。大量随机部署的传感器节点之间相互合作, 对所监测区域进行信息采集, 然后进行相应简单地处理, 并借助中继以多跳的方式发送给 Sink 节点^[3], 最后通过卫星等中转到达用户。用户根据所接收到的数据, 对传感器节点进行相应地管理, 进而对 WSNs 发布所要执行的监测任务, 并完成对传感器节点所检测到的数据的收集和处理。如下图 1.1 所表示的就是一个完整的 WSNs 结构模型以及网络中所收集数据的传输方向。

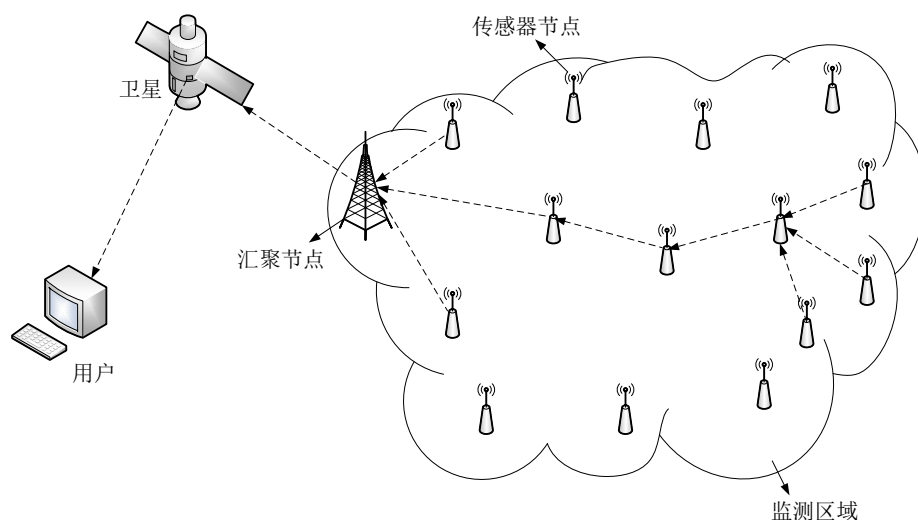


图 1.1 WSNs 结构模型

其中，传感器节点作为 WSNs 的最基本组成部分，其是由数据的采集、处理、传输部分以及供应该过程的电源模块组成^[4]，结构示意图如图 1.2。传感器节点通过相互合作，对所在区域环境进行监测，完成数据的收集和传输任务。

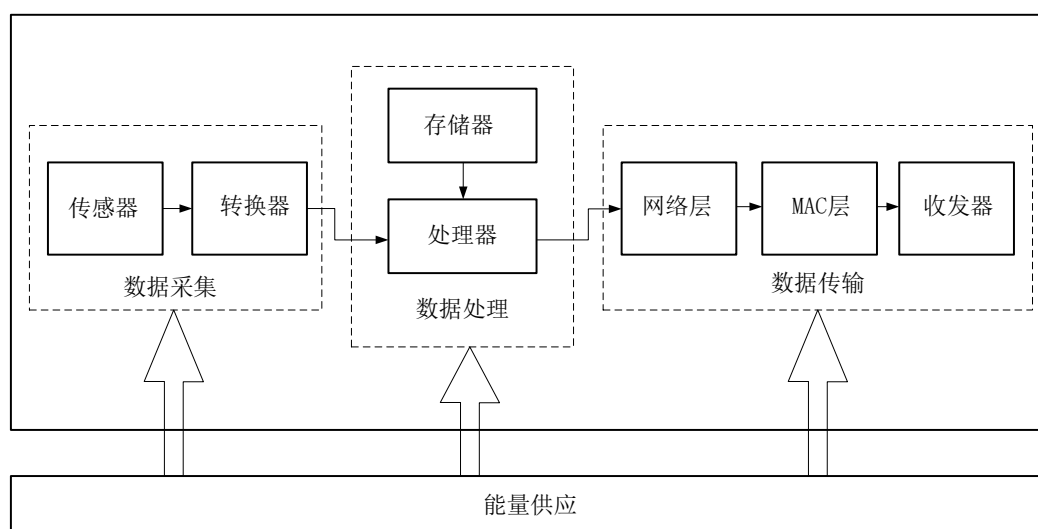


图 1.2 传感器节点结构图

随着时间的推移，无线网络技术已在各个领域上取得了突飞猛进的发展和进步。WSNs 有很多不同于无线自组织网络（Ad Hoc Network）的特点^[5]：

（1）传感器节点散布规模广，数量巨大，成本偏低

WSNs 一般是由成千上万个体积微小的传感器节点构成，其不仅规模相对无线自组织网络成数量级的扩大，还能够更有效地获取所需的实时信息。可见，WSNs 工作质量和工作效率的提高，并不能依赖于单个设备功能的改善和提高，而是借助功能完善后的单个设备通过大规模的嵌入共同合作完成的。

（2）无人值守及可靠性

WSNs 中的传感器节点一般是被大量随机抛撒在指定的极为恶劣的环境或无人区域内进行信息收集工作。这就要求传感器节点本身应该被设计和制造的非常坚固，否则，节点的失效和不可更换性将会对网络的寿命产生不可估量的影响。此外，为防止所采集的数据被盗或者被伪造，要求所设计的网络结构不仅具有较好的鲁棒性，而且 WSNs 的通信协议也要十分可靠。

（3）网络拓扑动态性强

每个 WSNs 都有各自的拓扑结构，而且，网络的拓扑结构及整体性能与其所在的环境密切相关，环境中任何一个不确定因素的变化都很有可能引起网络中链接的中断或者节点的失效。所以，为了不影响网络的正常运作，保证网络的通信质量，就要求 WSNs 中的节点能够实时地适应周围环境的变化，自动调整状态，进行自我维护，进

而避免因环境因素而导致网络拓扑结构被破坏,影响了网络正常的工作。

(4) 应用相关性

根据不同应用领域的需求, WSNs 可经过专门的设计应用在不同的领域中,进行外部物理环境的感知,进而获取所需要的外界信息。但是,由于不同的领域关注的物理量有所不同,这使得各领域对 WSNs 系统的要求不尽相同,所以 WSNs 的通信协议平台并不能完全统一,而是只能针对不同的应用领域和不同的应用,有差别的设计功能相异的 WSNs,才能实现网络对不同监测任务的高效完成,满足用户不同的需求。

(5) 以数据管理与处理为技术核心

WSNs 是以数据为核心的高效网络^[6],所有节点都会产生大量的实时性数据流,而 WSNs 只专注于具备某些特征的有效数据,而不是仅仅对单个节点所收集的数据投入过多精力。因此,这就要求我们能够更好地掌握收集、分析、提炼和传输分布式数据流的技巧。

1.2.2 无线传感器网络的关键技术

WSNs 是现代信息世界探究的热门课题,仍存在许多亟需深入研究和解决的关键技术,如通信、管理、分布式信息处理等^[7-10]。下面我们从系统的角度清晰地阐述 WSNs 正在和仍需继续研究的主要内容,如图 1.3 所示,主要包括以下相辅相成的三层。

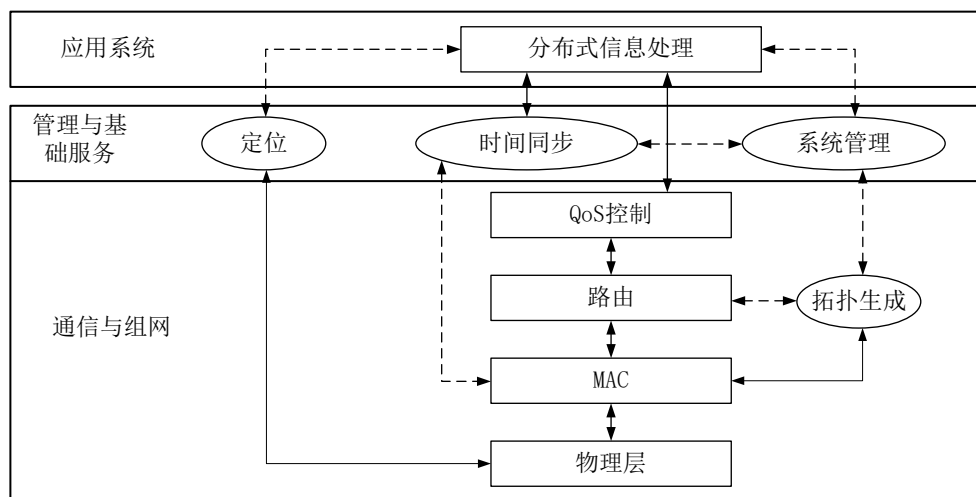


图 1.3 WSNs 体系结构

(1) 通信与组网

通信与组网是构成 WSNs 体系结构的最基础一层,其主要的工作是负责传感器节点间的相互通信,并为上一层提供架构基础,主要的研究内容是 WSNs 的通信协议,分为以下四个方面:

①物理层：该层的主要职责是调制出合适的控制信号，以完成相应数据的发送与接收。目前，WSNs 主要采用的是无线电通信，而这种传输介质需要解决信号频段的选择和调制等问题。

②数据链路层：该层主要负责两个实体的连接，构建数据畅通传输的链路，使得网络层能够呈现出一条没有错误且连通的链路。但考虑到用户间的相互竞争及 WSNs 生存环境的动态性变化，合理地分配信道资源以提高网络吞吐量成了研究重点。

③网络层：建立合适的通信路由协议，为 WSNs 中任意需要通信的节点进行服务，并且在传输和转发数据的同时，对该传输路径进行维护。

④传输层：主要功能是对节点产生的实时性数据流进行传输控制，并借用多种高级介质与外部网络进行通讯，进而能够保证数据传输的正确性。

（2）管理与基础服务

此层主要负责向最上层提供相应的服务支持，以配合完成用户所分配的监测任务。其所提供的的支持主要有：系统管理、时间同步和节点定位等。

①系统管理：WSNs 通常是在指定的较为恶劣的监测区域中进行工作，网络极易遭受破坏而不能正常运作。因此，通过对 WSNs 的实时监测和管理，及时发现问题，并采取相应的措施抵御网络故障或者增加新的布设恢复网络连通等。

②时间同步：WSNs 所获得的监测区域内的实时信息是通过网络中所有节点的相互合作得到的，而所有节点的合作基础正是时间同步。目前，设计具有一定同步精度的低开销的且能够动态扩展的时间同步机制是一个亟需解决的问题。

③定位：WSNs 利用网络中某些位置已知的节点，确定其他节点的位置并建立关系形成一个通信的网络。为了顺利完成监测任务，传感器节点需要具备及时准确提供自身位置信息的能力，以便快速定位节点的位置，向用户提供有价值的感知信息。

（3）应用系统

应用系统层的主要职责是在通信与组网、管理与基础服务的基础上，为用户提供通用的面向不同应用领域的服务。在 WSNs 的监测应用中，用户并不关心单个传感器所采集的数据信息，而关注在监测区域通过节点合作收集的信息，分析监测区域内是否有入侵者活动。因此，要求 WSNs 具有分布式的信息处理功能，即在实际应用中，WSNs 中的传感器节点可以在减少冗余信息，消除噪声干扰，并在生成准确度较高的监测值的基础上进行信息的收集，并对这些信息进行融合提炼。

1.2.3 无线传感器网络的应用

WSNs 作为信息网络世界的最新探究焦点，对其的研究已取得了飞速的发展。WSNs 所具有的通过节点间相互通信进行信息收集的传感技术，以及它的随机分布性、自组织性等优势使得用户能够更加迅速确切地了解并掌握监测区域的信息，这也促使

WSNs 能在很多领域得到广泛应用，并且也具有很高的实际应用价值^[5]，如：

（1）军事应用

WSNs 是由大规模低成本随机密集分布的传感器节点以自组织的形式构成的网络，而网络所具备的较强隐蔽性和高容错性等特点，使得其能够广泛地应用于各种恶劣的军事战场环境去执行任务，例如监控敌方的当前兵力和装备资源量，侦察敌方的战斗地形及其抵御布防机制，定位我方进攻目标等。

（2）环境应用

采用 WSNs 代替传统的方式去收集环境的数据，并对环境监测具有重大的意义。例如：随机密集地撒播在森林中的传感器节点，通过及时收集和处理目标区域内的温度、湿度等数据，可以准确的定位到着火位置，防止火势的快速蔓延，尽可能的减少危害与损伤。

（3）医疗应用

WSNs 所具有的自组织及对周围环境的实时感知等特点，为将来的远程医疗提供了更加快捷的实现手段和更好的条件。将传感器节点安装在人类的身体上，随身携带，能够长期有效地对人类的行为进行监控，进而收集相关的生理数据，使得医生能够及时对数据进行精确处理分析和判断，尽早发现病症。此外，WSNs 还可以用来管制医用药品等。

（4）家庭应用

WSNs 在家庭方面也有很大的应用和发展空间。随着无线传感技术的进步，将具备多种功能的传感器安装到吸尘器、冰箱等家电中，并将它们与 Internet 进行连接，家电中的节点相互之间能够交流，并能够保持与外部的通讯交流，实现家庭的自动化，即所谓的智能家居。

（5）商务应用

目前，WSNs 在商业领域也有很重要的应用。例如：对人们办公室环境的监测和控制。由于办公室的空调一般都是中央空调，这种控制系统会造成空调产生的气流分布不均匀，所以，可以通过在办公区安装 WSNs 来收集温度信息，控制不同区域的温度，进而为人们提供一个舒适的工作环境。

1.2.4 无线传感器网络面临的挑战

近年来，WSNs 作为信息网络世界的一种新型网络，对其的研究十分活跃，也取得了很多成果，但是在 WSNs 的发展进程中依然存在许多严峻的问题和挑战。

（1）低能耗

WSNs 的工作环境通常是无人值守的区域。由于传感器节点的体积小，能量有限，长期的工作使得网络能耗过大，而对网络中即将死亡的节点进行人为的电池更换是不

可取的,因此,这就要求在 WSNs 的应用中采取相应的措施,使得工作中的节点都能合理地使用能量,减少不必要的浪费,提高网络整体的稳定性。

(2) 低成本

WSNs 是由成千上万个随机布设的传感器节点组成,单个节点的价格开销会对整个网络的总成本造成很大程度的影响。因此,需要设计一种对监测数据信息的处理及存储和传输能力要求比较低的网络,并制定相应的通信协议进行网络的运作,达到降低网络成本的目的。

(3) 网络拓扑

在 WSNs 系统中,节点随机分布且数量巨大,节点间多跳的通信方式也使得网络具备很强的拓扑动态性。针对 WSNs,需要设计一种适用于大型网络且低开销的、便与维护且符合 WSNs 通信特点的、以提高路由协议效率为目标的网络拓扑结构以及网络通信协议,以满足用户需求。

(4) 安全

由于传感器节点受自身体积的限制,导致 WSNs 系统的能量有限,因此有必要设计一种适合 WSNs 特点的低开销的通信协议。由于部分传感网都是使用单频率通信机制进行网络节点间的通信,而这种通信频率很容易被入侵者捕获,以对网络进行攻击破坏,使得网络存在严重的安全隐患。采取哪种网络防御机制以及如何在保证网络能耗最低的情况下完成数据加密和入侵检测以及被攻击破坏情况下高效可靠地完成指定任务,是目前对 WSNs 研究所面临的严峻挑战。

(5) 实时性

WSNs 对所在的应用领域中完成监测任务的实时性要求十分严格,也非常重要。因为网络接受到用户所发布的监测任务,并做出回应的时间长短,对判断这个通信系统性能的好坏具有直接的影响。如果网络不能将对监测区域的感知信息及时地传输给用户,有可能使用户错过了最佳的应用时机而造成不必要的损失。因此,针对 WSNs 的大规模、拓扑动态变化及易受干扰等因素的限制,设计出实时性更好的网络也是 WSNs 研究过程中的一个亟需解决的问题。

1.3 本文的主要工作和组织结构

本文主要研究的是如何通过优化网络的拓扑结构来提高网络的性能,并基于网络的拓扑重构,从失效预防和拓扑修复两个方面提出了相应的优化网络抗毁性的策略。从失效预防方面,根据对无标度网络性质的分析,为预防网络中的关键节点因超载或被攻击而失效,造成网络崩溃,对网络中的边进行了合理地删除;同时,基于节约资源和提高网络性能的原则,算法又采用了旅行商优化模型,利用添边策略对网络进行

了优化拓扑的构建,达到了对网络中关键节点的保护以及提高网络抗毁性的目的。对于拓扑结构因自身或外界因素而被破坏的网络,本文从拓扑修复方面提出了一种修复 WSNs 不连通分区的中继节点部署算法。算法为达到恢复网络连通的目的,根据网络分割所造成的分区的位置,在考虑网络平均路径变化和 network 资源消耗的基础上,设计了一种能够合理部署中继节点的网络骨干多边形,实现了网络连通的修复。为了再次提高修复后网络的抗毁性,算法针对各个分区又进行了拓扑 2-连通的构建。仿真实验结果表明,这种拓扑修复的算法可以得到一个连通性更高的网络,实现了网络的抗毁性优化。

以下是本文的各章节安排:

第一章是绪论部分,主要简述了课题的研究背景以及研究意义,对 WSNs 的结构、特点、关键技术、应用以及所面临的挑战进行了介绍,并给出了本文的章节安排。

第二章是对无线传感器网络抗毁性优化问题的介绍,主要对 WSNs 的抗毁性进行了简要的概述,包括其定义以及影响因素;给出了 WSNs 抗毁性优化策略的研究现状,并详细介绍了基于拓扑重构提高网络抗毁性的主要实现机制。

第三章介绍了一种提高无标度网络抗毁性的拓扑优化算法,简述了无标度网络的性质,详细论述了为预防网络失效而采用的网络拓扑优化方法,并通过 MATLAB 仿真平台,对实验结果进行了详细分析。

第四章介绍了一种恢复无线传感器网络分区连通的中继节点部署算法,为实现已失效网络的连通和网络抗毁性的提高,通过构建网络中的特殊结构,部署一定的中继节点对网络进行了拓扑修复,并通过相应的实验验证了这种策略的可行性和优越性。

第五章,总结与展望,详细概括了本文的研究方向及所做工作,并且展望了 WSNs 抗毁性优化的下一步研究内容。

第二章 无线传感器网络抗毁性优化问题

2.1 无线传感器网络抗毁性概述

2.1.1 网络抗毁性的定义

WSNs 是现今国内外最为热门的新课题之一，各国学者都在积极深入地对 WSNs 各方面进行研究。由于 WSNs 所执行的监测任务，一般都是在极为恶劣的环境中进行，而且传感器节点自身携带的能量是很少的，导致 WSNs 比一般网络更容易发生故障，更容易遭受攻击，进而导致网络性能下降以致无法正常地运作。因此，有必要研究出一些增强网络可靠性的措施，使网络不易发生故障，而且在发生故障的时候，网络也能够采取一定的措施进行连通修复，使网络能继续提供一定的服务，这种衡量网络能力的性质即是 WSNs 的抗毁性。

WSNs 的抗毁性因其所在应用领域的不同，定义也不尽一致。在通信领域里，一般认为网络的抗毁性就是网络拓扑结构的可靠性，其衡量的标准即为：中断一些节点间的通信所需要被破坏的节点数量或链接数量。在军事领域里，网络抗毁性则是指系统在受到敌方的物理破坏或人为攻击的情况下，能够在规定时间内完成指定任务的能力。而在军事领域中，网络所遭受的攻击一般是通过电磁信号对通信进行干扰，以及破坏保障网络的重要枢纽，进而造成供应我军的物资链中断等。可见，WSNs 在不同的应用领域其侧重点也不同。因此，不失一般性，我们给出 WSNs 抗毁性的如下定义：

WSNs 的抗毁性是指，当网络中的节点或边因自身原因或者遭受外界故意攻击而失效时，网络仍持续自身功能的一种能力。对网络抗毁性的研究，主要目的就是为了能够正确地分析和评估网络的抗毁性性能，进而发现网络中的薄弱环节，及时采取有效的优化措施预防网络功能失效，并对被破坏的网络进行连通拓扑的修复，提高网络的抗毁性。我们通常采用节点连通度、网络通信效率、网络平均节点度^[11-13]等作为衡量某个 WSNs 抗毁性高低的测度指标。

2.1.2 影响网络抗毁性的因素

传感器节点被大规模随机密集地撒播于无人值守的监测区域，一般会遭受到的攻击分为随机性攻击和蓄意性攻击。对于这两种攻击，网络都有可能因为某些节点的失效而导致功能的降低甚至是结构的崩溃。

随机攻击一般是没有针对性的，是由于网络自身的原因而随机性发生的一些故障。造成这种失效的原因主要有以下几个方面：

(1) 节点自身因素：一般 WSNs 节点体积较小，能量有限，通信范围也比较窄，

这就造成了节点的通信可靠性降低,而且某些节点也很容易因能量不足等原因失效,进而对网络的正常运行造成影响。

(2) 通信模式:由于传感器节点的通信半径较小,因此网络采用多跳的通信方式进行数据的传输。而在传输过程中会有节点充当中继节点转发数据,导致其能量消耗过快,其死亡失效的概率也就越高。

(3) 外部环境:节点一般被布设在森林、火山、战场等环境较为恶劣的地方进行数据的收集,这种环境因素将会加大节点失效的概率。

(4) 人为破坏:这种人为破坏是指在并不清楚网络具体结构的情况下,对网络中的节点进行随机性的破坏,以达到破坏网络结构,降低甚至摧毁网络的目的。

蓄意性攻击是在对网络的拓扑结构已经比较了解的基础上,针对性的攻击网络中重要度比较高的节点,对网络结构造成更为严重的破坏,大大降低网络连通性等抗毁性能,使得网络不能正常高效地运行,甚至是崩溃。

通过对网络特征的分析,除了考虑随机攻击和蓄意攻击会对网络的抗毁性产生影响外,还有以下几个方面需要考虑:

(1) 网络的应用环境

针对 WSNs 应用环境的不同,在对网络抗毁性进行分析时,所考虑的侧重点是不一样的。例如,对应用在战场上的网络进行抗毁性分析时,应更多地关注攻击的选择性;对于一般的通信网络而言,需要更多考虑的是节点因自身原因而发生故障时,网络能保持稳定工作的能力,这主要是因为通信网络所在环境要比战场环境稳定的多。

(2) 网络节点的核心作用

如果网络拓扑存在核心节点,比如网络中的割点,并且这些节点因一些原因即将失效或已经失效,那么网络性能将会受到严重的影响。因此,不仅需要建立衡量节点重要性的模型,对这些重要节点进行保护,还要考虑如果这些节点失效造成网络分割,采取哪种合适的策略进行连通修复,以提高网络的抗毁性。

(3) 网络结构

WSNs 中传感器节点的重要性不只与所构成的网络结构有关系,还跟其在网络中所处的位置以及该位置所扮演的角色有关系。比如,靠近 Sink 节点的普通节点,一般会被用作转发节点,此时,该节点的存在对其它节点功能的发挥具有很重要的意义。因此,合理地分析网络结构,了解节点的重要程度,是提高网络拓扑抗毁性的坚实基础。

2.2 无线传感器网络抗毁性优化研究现状

WSNs 目前虽然已有了很广泛的应用,但是,其所面临的稳定性和安全性问题

也越来越多。一个运作良好的网络突然失效很可能会对用户造成巨大甚至无法弥补的损失,这就要求我们要更加深入地理解和研究网络的抗毁性,寻找能够提高网络抗毁性的有效措施,以保证网络正常高效的运行状态。以下从拓扑演化、路由控制以及拓扑重构三个方面,对网络抗毁性优化的研究现状进行简要介绍。

(1) 拓扑演化

以复杂网络作为理论基础对 WSNs 拓扑生成机制进行研究,并通过其演化行为展现 WSNs 中的动态复杂性和动力学特征,从而优化 WSNs 拓扑结构,并且提高网络的抗毁性,最典型的就是无标度网络的拓扑演化。

2000 年,Albert 等人^[14]对比了相同攻击模式下随机网络和无标度网络的鲁棒性,为网络抗毁性的研究提供了理论基础。Zhu 等人^[15]在局域世界模型的基础上,提出了两种具有无标度网络特征的 WSNs 演化模型:EAEM(Energy-Aware Evolution Model)及 EBEM(Energy-Balanced Evolution Model)。其中,EBEM 在新节点加入时,除了考虑能耗之外,还加入了“有限支撑”的约束,对单个节点的连边数量进行限制,有效地避免了负荷的不均匀分配。但是这两个模型并没有对网络中簇头的选取连接进行考虑,忽略了 WSNs 的异质性特征。Zheng 等人^[16]提出了 LGEM(Linear Growth Evolution Model)及 AGEM(Accelerated Growth Evolution Model)两个模型。两者均是采用模块化的分簇算法^[17],将 WSNs 进行分簇并合理的配置簇头,生成具有层次的网络结构,所生成的网络在随机攻击和恶意攻击下都具有相对较好的抗毁性和连通性。不同于传统以“偏好依附”为原则的生长机制,Zheng 等人^[18]又提出了一种采用随机行走的方式^[19]进行节点连接的拓扑演化,同样得到了抗毁性较好的网络拓扑结构。

(2) 路由控制

对大多数 WSNs 而言,为完成所分配的任务,通常需要密集地布置大规模的传感器节点,而这些节点的分布往往会造成大量冗余链路及节点的存在。因此,许多学者从冗余机制出发,通过路由控制策略对提高网络抗毁性的方法进行了研究。

马士强等人^[20]基于冗余机制,提出了一种多簇头机制来减少网络的通信次数,优化网络能耗和网络抗毁性。但是这种路由机制需同时维持多个簇头节点的路由信息,导致节点之间的数据传输量增大,能耗变多,直接影响了网络的寿命。基于此,蔡海滨^[21]等建立了一种剩余能量预测 REP(Redundant Energy Prediction)模型应用于网络节点之间通信,使得网络的能量能够被合理充分地利用。冯东芹等人^[22]提出了一种集中式分簇路由算法,算法通过对备份簇头定期收到的工作簇头的状态测试报文进行分析,及时更换不正常的工作簇头,从而减少甚至避免对网络性能的影响。

在 WSNs 中,频繁地使用网络中的同一条路径传输数据,会使得路径上的某些节点因负载过大而过快耗尽自身的能量,使得整个网络产生分割,形成多个不连通片。

因此, Li 等人^[23]提出了 FLSS_k (Fault-tolerant Local Spanning Subgraph) 算法, 该算法通过在各节点之间建立多条独立的路径来应对节点易发生故障失效的问题, 增强了网络的容错性并提高了网络抗毁性。文献[24]提出了多路径路由选择算法 EPMRA (Energy Priority-variety Multi-path Routing Algorithm), 算法首先对网络中路径优先级进行了计算, 然后实施了路由的发现、维护以及路由更新措施, 并通过仿真得知网络整体的能量消耗分布比较均匀, 路由的健壮性和可靠性也比较高。后来, 针对网络普遍存在的“热区”问题, 文献[25]利用非均匀分簇算法的设计思想对网络路由进行了改进, 并取得了较好的结果。

(3) 拓扑重构

根据拓扑重构的实现策略, 可以分为预防型方案和恢复型方案。预防型重构的基本思想是预先知道网络性质及拓扑结构, 采取一定的措施, 为防止未来可能出现的网络故障做准备。恢复型重构的基本思想是网络因故障而被分割时, 采取相应的措施对网络连通进行恢复, 相比于预防型重构, 其时效性较低。

文献[26]和[27]分别从节点度和介数的角度, 提出了一种通过保护网络重要节点, 来提高网络抗毁性等性能的策略。Guidoni 等人^[28-29]则提出了 DAS (Directed Angulation towards the Sink) 方案和 SSD (Sink node as Source / Destination) 方案, 这两种方案均是借助网络中的长程连接, 利用小世界网络的异质性来预防网络失效。在此基础上, 符修文等人^[30]利用 WSN 介数中心度对网络节点中心度分布进行计算, 并提出一种面向抗毁性的超级节点及超级链路的布局策略, 提升了网络异质性和网络抗毁性能。

针对网络因外界攻击而被分割造成不连通的情况, 文献[31]利用约束移动的分布式连接方法, 判定每个节点所支配的邻居节点集中哪些是凸顶点, 以及哪个可以替换已失效的节点, 通过移动节点达到网络连通恢复的目的。文献[32]采用 K 跳近邻局部信息恢复网络连通的策略, 先探测失效节点的位置, 然后利用设计好的移动控制器操纵候选节点到该位置, 进而恢复网络连通。LEE S 等人^[33]提出了算法 CORP (A distributed Cell-based Optimized Relay node Placement), 该算法通过将网络进行网格布局, 分布式最优布置中继节点达到对网络连通修复的目的。

对 WSNs 抗毁性研究的实际应用中, 往往并不注重如何高效地进行网络的重新设计以及构建, 而是在已有的网络拓扑结构基础上, 提出具体策略优化网络的抗毁性, 提高网络性能。因此, 本文从优化网络拓扑结构的角度入手, 从网络预防和修复两个方面对优化网络抗毁性的拓扑重构方法进行了研究。

2.3 基于拓扑重构提高网络抗毁性的主要实现机制

2.3.1 拓扑重构的意义

重构的概念最早是在配电网中提出的,它能够在网络运行正常的情况下实现对网络能耗的降低以及网络负荷的均衡,在网络发生故障的情况下快速恢复非故障区的供电。重构技术在计算机网络^[34]中的应用主要表现在,当网络中出现故障或者失效时,采取相应的措施恢复网络性能,以提高网络通信的可靠性,使网络能够继续不间断地运行。

WSNs 的拓扑重构则是指,当网络拓扑中的一些关键节点即将失效或者已经失效时,会造成网络性能下降甚至是网络分割,此时要采用一定的措施来维护网络拓扑并使网络恢复连通。其主要分为两个方面:失效预防和拓扑修复。所谓失效预防即提前采取一定的措施防止拓扑结构发生故障,其属于一种静态的拓扑维护机制。而拓扑修复则是指在网络故障发生后,根据实际情况,借助一定的资源或布置新的设施对网络的拓扑结构进行修复,这属于一种动态的拓扑维护机制。

如果没有拓扑重构策略,当网络发生故障而造成部分节点和链路的失效时,将会大大地增加节点间数据包传输的延迟时间,导致网络的负荷增加,甚至造成大量数据的丢失,进而影响网络的通信质量,给用户带来严重的损失。所以,为有效地提高网络的寿命和网络的抗毁性等性能,就需要对网络的性质以及拓扑结构进行合理地分析,采取相应的拓扑重构策略改善网络的弊端。因此,本文从拓扑重构的角度对适合 WSNs 特点的抗毁性优化方法进行了研究,使得网络面对外部攻击或自身故障有更强的抵御能力,即使遭到了破坏,也能对网络进行修复,恢复网络的连通,提高网络的抗毁性。

对 WSNs 拓扑重构技术的研究为建立一个高效抗毁的网络打下了坚实的基础,对保障 WSNs 高效、安全、可靠的运行具有重要的理论意义和应用价值,同时,也具有广泛的实用性和应用前景。

2.3.2 基于拓扑重构提高网络抗毁性的主要算法

在 WSNs 抗毁性研究的实际应用中,抗毁性的优化策略通常都是针对已有的网络进行性能的改进和提高,而不是对网络进行重新的设计和构建。本文从拓扑重构角度对网络进行的抗毁性优化策略研究就是基于已有的网络,实质就是在网络中增加相应的备份链路和备份设备,通过这些增添的节点或边改进网络的拓扑结构,缩短网络节点之间的最短路径,提高网络的连通性。当然,提高网络抗毁性的策略并不仅仅包含增加备份链路等,通过对网络具体特征的分析,适当的对网络中的链路进行调动,也能够构建抗毁性极高的网络拓扑结构。下面是基于拓扑重构,从失效预防和拓扑修复

两个方面，对优化网络抗毁性的几种经典策略进行了简要的阐述。

(1) 失效预防

在实际应用中，WSNs 的一些关键节点往往承受相对于其余普通节点更多的网络负荷，当这些节点被外界攻击或者因自身原因而失效时，很可能会导致整个网络的瘫痪，所以，通过对网络基本性质的研究来寻找合适的预防措施是十分必要的。对 WSNs 抗毁性的优化不仅仅包含对网络拓扑面临攻击时鲁棒性的提高，而且包含对网络自身性能如网络容量的提高。

① 移除边策略

由于节点的随机分布导致通过某些节点及链路的负荷过多，影响了网络抗毁性和通信可靠性，因此，文献[26]和[27]分别提出了高度优先策略(High Degree First strategy, HDF)和高介数优先策略(High Betweenness First strategy, HBF)，两策略均是通过移除一些核心节点之间的连边，达到均衡网络通信所需的负荷，并提高网络传输容量的目的。不同的是，在 HDF 策略中，核心节点之间的边的权重值是根据 $(k_i \times k_j)$ 值进行定义的， k_i 和 k_j 表示边的终端节点的度。而 HBF 策略中是按照边的权重值 $(B_i \times B_j)$ 从大到小进行排序的，其中 B_i 和 B_j 分别是边的终端节点的介数。核心节点之间的边一般都承受着更多的网络负载，更容易造成拥塞，也更容易成为攻击的对象，因此，合理地移除高拥塞的边，降低核心节点的重要度，可以在重新分配网络节点负载的同时有效地提高网络的传输容量，优化网络的抗毁性。

在最短路径路由策略下，数据包会更多地经过核心节点，从而很容易造成节点拥塞。为进一步改进网络的性能，邻居节点度降阶方差策略(Variance of Neighbor Degree Reduction strategy, VNDR)^[35]在考虑了核心节点重要性的基础上，利用拟退火算法进行网络中部分连边的移除，使得各通信节点的负荷达到均衡，实现提高网络抗毁性的目的。策略首先通过公式(2-1)计算出节点 i 的相对邻居节点度方差值 $r \text{ var}(i)$ ，对网络中各边的相对重要程度进行定量分析。

$$r \text{ var}(i) = \frac{\text{std}_{j \in \text{nei}(i)}(d(j))}{(1/|\text{nei}(i)|) \sum_{j \in \text{nei}(i)} d(j)} \quad (2-1)$$

式中 $\text{nei}(i)$ 是节点 i 的邻居节点集合， $d(j)$ 是节点 j 的度， $\text{std}_{j \in \text{nei}(i)}(d(j))$ 为 $d(j)$ 的标准方差。然后在此基础上，对节点 i 给定参数 H ，其值为：

$$H(i) = r \text{ var}(i) \times \text{std}_{j \in \text{nei}(i)}(d(j)) \times d(j) \quad (2-2)$$

选择具有最大 H 值的节点 p_i ，并从其邻节点中选择度数最高的节点 q_i ，循环删除两节

点间的连边，直到达到预设的移除边数量并生成一个新的网络拓扑。

在 WSNs 的实际应用中，为优化网络的拓扑结构，提高网络容量和网络抗毁性，边移除策略操作方便并且经济有效。然而，随着信息时代的快速发展，所需网络的规模在逐渐增大，这无疑给保证网络的通信质量提出了新的挑战。

② 增边策略

相对于移除边策略，下面给出了四种增边策略^[36]，这四种策略的基础网络模型均包括随机网络 ER 模型、无标度网络 BA 模型，而且这些策略的目的都是为了提高网络的传输容量和抗毁性等性能。

a) 随机增加策略 (Random Addition strategy, RA): 随机选取网络中的两个节点，若两者之间没有边，则将二者相连；循环进行直到所添加的连边比例达到所设置的比例。这种随机性添边策略，虽然能够增大网络的容量，但是效率并不好。

b) 度低者优先策略 (Low Degree First strategy, LDF): 该策略改善了 RA 添边的随机性，将网络中所有节点的度按从大到小的顺序进行排列，然后选择度和最小且没有边相连的两个节点进行添边，继续进行，完成网络拓扑的不断更新。

c) 介数低者优先策略 (Low Betweenness First strategy, LBF): 类似于 LDF，此是对网络中所有节点的介数按从大到小的顺序排列之后，选择介数和最小且没有相连的两个节点进行添加。

d) 最大介数节点增加 Shortcut 法 (Shortcut for Maximum Betweenness strategy, SMB): 首先找到与介数值最大的节点 a 相连的所有边，并记为集合 E_a ；然后对 E_a 中所有边的介数按从大到小顺序排序，记这些边的另一端节点集合为 V_a ；最后从 V_a 中选择位于最前面的两个无边相连的节点进行添边，循环进行直到达到预设的增边比例。

一般情况下，一个网络中节点的重要性是通过该节点的度数或介数进行衡量的，除 RA 策略外，其余三种策略均是利用这一思想。但仿真表明，这四种策略在不同的基础网络下，所构成的网络拓扑的性能并不均具有优势。例如，对于 BA 网络而言，SMB 增边策略能够大幅度增加网络的传输容量，但是对网络鲁棒性改进很小；相反，LDF 策略对网络传输容量改进较小，而对网络抗毁性的提高比较显著。因此，在实际网络中，全面的研究分析网络的结构和性质，对正确地选取有效增边策略具有重要意义。如果选择的策略不恰当，很可能会降低网络的整体性能。

③ 重连边策略

在最短路径路由算法下，网络结构的不均匀往往会降低网络的传输容量以及抗毁性，使得整个网络不能持续正常地运行。以无标度网络为基础网络，文献[37]提出了六种重连边策略，对删除的边进行再次利用。这六种策略都必须在删边过程中保证网络的连通性，即如果删除某条边会造成网络中部分节点不连通，则不删除此边，选择下一条符合条件的边删除。

a) 随机边重连策略 (Random edge Rewiring strategy, RR): 从网络中随机移除一条连边, 然后再对网络中随机选择的两个不相连的节点添边; 重复这种操作, 直到达到所规定的删边比例停止。

b) 度高者优先重连接策略 α (High Degree First edge rewiring strategy- α , HDF- α): 分别计算出网络中各个节点的度数, 然后对网络中的边利用 $\omega_{ij} = k_i + k_j$ 值进行赋权, 式中 k_i 和 k_j 分别是节点 i 和节点 j 的度。将各边的权重值从大到小排序, 移除其中一条权重最大连边, 同时, 随机选取其中两个未被连接的节点, 进行添边; 重复执行。

c) 度高者优先重连接策略 β (High Degree First edge rewiring strategy- β , HDF- β): 与 HDF- α 思路是类似的, 只是节点间连边的权重变为 $\omega_{ij} = k_i \times k_j$, 添边操作则相同。

d) 介数高者优先重连接策略 α (High Betweenness First edge rewiring strategy- α , HBF- α): 分别计算出网络中各个节点的介数值, 以及网络中各个连边的权值 $\omega_{ij} = B_i + B_j$, 式中 B_i 和 B_j 分别是节点 i 和节点 j 的介数; 随机移除一条具有最大权重的边, 并进行随机添边处理。

e) 介数高者优先重连接策略 β (High Betweenness First edge rewiring strategy- β , HBF- β): 在两点之间移除一条具有最大权重 $\omega_{ij} = B_i \times B_j$ 的边, 然后同样地, 在网络中随机地进行添边处理。

f) 边介数最大者优先重连接策略 (High Edge Betweenness First edge rewiring strategy, HEBF): 不同于策略 HBF- α 和 HBF- β , 该方法是移除网络中具有最大边介数的连边, 再进行下一步地随机添边处理。

这些重连边算法已被证实能够有效地改善网络结构的均匀性, 降低无标度网络中因重要节点失效对网络性能造成的影响。相比上述的移除边策略, 所提出的几种重连边策略在改善网络容量和网络抗毁性上都有很大的提高, 这也进一步说明了重连边策略的有效性。

(2) 拓扑修复

对于 WSNs 而言, 网络的正常运行是以强连通的网络拓扑结构为基础的, 因此, 当网络被攻击而造成分割时, 对网络拓扑连通的修复变得十分重要。以下几种算法均是针对被攻击后分割成多个网络分区的网络提出的, 并且算法中用各个分区中的某一个单独节点代表该分区在网络中的相对位置。下面简略介绍这几种经典算法的主要思想。

① FESTA 算法

FESTA (Federating network Segments via Triangular steiner tree Approximation) 算法^[38]是一种基于最小斯坦纳树理论, 利用三角斯坦纳近似树方法进行中继节点部署, 以完成对 WSNs 连通恢复的算法。该算法主要分为三步: 第一, 进行内三角的重建以连接网络分区; 第二, 连接网络中孤立的分区实现网络的连通; 最后进行斯坦纳边界

最优化以实现中继节点数量的优化。该算法利用了最小斯坦纳树理论，在恢复网络连通的基础上，不仅避免了资源的浪费，还得到在网络平均节点度及平均路径长度等性能参数上均表现出优越性的网络。很多文献利用斯坦纳树理论进行网络修复都是从平面角度考虑，如果推广到三维空间，在空间中部署中继节点，将不仅能够有效地减少中继节点的使用数量，还能得到连通性和抗毁性更强的网络拓扑结构。

② Spider-Web Heuristic 算法

Spider-Web Heuristic 算法^[32]是一种启发式高鲁棒性的中继节点部署方法，它采用了蜘蛛网式的布局结构对网络进行了连通修复。算法首先通过凸包算法确定各个网络分区的区域边界，然后计算网络各分区的相对最中间的位置 CoM (Center of Mass)。从每个分区中选择一个代表性节点，分别以各代表节点和 CoM 为端点形成一条线段，计算各线段的欧式距离并按照从大到小的顺序进行排列，从距离最大的节点位置开始布置中继节点，并以左右连通的方式依次进行，直到所有的网络分区都连通。这种方法与斯坦纳树算法相比，虽然网络的连通性和覆盖性都有了很大的提高，但是所需的中继节点的数量也明显增加，即需要更多的网络花费。

③ CORP 算法

CORP (A distributed Cell-based Optimized Relay node Placement) 算法^[33]是一种基于网格的分布式最优中继节点布置策略。主要思想是对 WSNs 所在区域进行细胞网格划分，通过不断向中间靠拢寻找需要布置额外中继节点的位置，建立各个网络分区的连接，恢复网络连通。具体分为两步：

Step1: 最优邻居节点的选择。对模拟网络进行网格划分，计算每个边界节点的所有邻居节点分别与其他分区之间的距离之和，取其中距离和最小的邻居节点作为该边界节点的最佳邻节点，并在此处布置新的中继节点代替。

Step2: 优化中继节点数量。两个分区的最优邻居节点相邻或碰头时，即用一个合并节点 JC 进行表示，并利用公式(2-3)，计算节点 JC_i 同分区节点 Seg_j 连通所需的最少中继节点数量：

$$Num = \left\lceil \frac{Length(JC_i, Seg_j)}{R} \right\rceil - 1 \quad (2-3)$$

若 Num 的值小于利用 Step1 循环所得的 JC_i 同 Seg_j 间连通所需的中继节点数量，则在 JC_i 和 Seg_j 所形成的直线上，利用欧式距离与中继节点通信半径 R 的关系重新进行中继节点的布置，剔除多余的中继节点。这种算法并没有对各个分区的代表节点进行合理优化地选取，即便进行了中继节点数量的优化，但是效果并不是很好，而且所得的网络在连通度上并没有得到显著的提高。

网络通信的可靠性是网络拓扑结构优劣的体现,对分割网络连通的有效修复则是网络抗毁性的表现。上述三种对网络拓扑进行修复的算法,实质上均是使用最少的中继节点达到重建健壮拓扑,修复网络连通的目的,只是放置中继节点的方法不同。但是对于修复后的网络,很有可能又会因为其中所部署的某个中继节点的失效而再次被分割,因此,对修复后的网络进行容错性和鲁棒性的改进也是非常重要的课题。

第三章 一种提高无标度网络抗毁性的拓扑优化算法

3.1 相关工作

随着随机网络模型和小世界网络模型的发现和发展, Albert 等人^[14]提出了无标度网络模型, 即 BA 模型, 并证明了 BA 模型的一个重要结构性质, 即对随机攻击具有很强的鲁棒性, 然而对于恶意攻击就显得异常脆弱。大量相关的实验也表明, 现实网络大部分都具有这种“健壮又脆弱”的特性。然而, 在 WSNs 的实际应用中, 节点的通信容量是有限的, 其负荷量也因网络结构的不同而不同, 网络中的一个或部分节点(或边)的失效将会导致网络节点负载被重新分配, 网络的动态改变, 很可能会使得大规模的节点或边发生故障, 更严重的还可能使整个网络崩溃, 这也是无标度网络易发生的一种现象。因此, 针对无标度网络, 除了要采取相应的措施提高网络抵抗攻击的抗毁性外, 还要考虑网络如何有效地避免拥塞以提高级联抗毁性。

目前, 对提高网络抗毁性的很多研究都是通过优化网络的拓扑结构实现的, 并且在对网络性质进行分析的基础上, 针对性地改动网络拓扑, 能够有效地改善网络性能。Zhe Liu 等人^[26]提出一种高度优先(HDF)策略, 该策略通过移除无标度网络核心节点间的连边来大幅度提高网络容量。因为这样会使得核心节点不至于有过多的连边, 数据包就会在核心节点的周围链路传输, 进而避免该节点的超载, 提高了网络容量。但是结果证明, 删减过多的话也会适得其反。Guoqing Zhang 等人^[27]从介数的角度出发, 提出了一种提高网络容量的策略即 HBF, 具体操作是将高介数节点之间的边移除。与 HDF 策略相比, 该策略利用网络的介数值要比网络的度数更能表示节点的中心性。删边机制虽然在一些实际的复杂系统中实现起来相对容易, 并能够大幅度增加网络的容量, 但是从资源利用的角度来看, 比如在通信网络中, 删除链路会造成链路资源的浪费。因此, Zhongyuan Jiang^[37]等人提出了几种重连边策略。尽管仿真表明这些方法能够有效地缓解网络拥塞的现象, 提高无标度网络的传输效率, 但是采用的这些方法并不能有效地改善网络面对外部攻击时的抗毁性性能。

静态抗毁性作为网络容量以外的另一个重要的网络特征, 它的改善能够更好地保证网络的可靠稳定运行, 因此, 为改善网络的性能而选择合理有效的拓扑优化策略是十分关键的。本章基于拓扑重构技术提出了一种提高无标度网络抗毁性的拓扑优化算法 LNT0 (A Link-based Network Topology Optimization Algorithm), 对无标度网络的抗毁性进行了优化。这种拓扑优化策略本质上是对网络冗余链路的优化, 在某种程度上可以避免基于节点优化的缺点, 尤其在以下几个方面: 第一, 不会改变已有的网络拓扑结构; 第二, 极大的改善了网络的安全性能; 最后, 从花费角度而言, 如果针对

有线通信网络，基于冗余链路的方法不会有多少优势，但是用于无线通信网络中，其花费优势相对节点优化而言将大大提高。

3.2 主要模型及主要参数

3.2.1 BA 无标度网络模型

随机网络模型是假设网络节点之间通过一种均匀且随机的连接方式所形成的一种网络，但在实际网络中，节点间的连接方式却与其相反，为优先连接方式。Barabasi 和 Albert 提出了一种现在被广泛应用的模型：BA 无标度网络模型。本章所提算法即是基于 WSNs 中的这种 BA 网络模型。

一个 BA 无标度网络模型的构造一般分为以下两步：

Step1: 增长。首先，假设初始网络是由少量 (m_0 个) 节点构成，然后每次向网络中添加且只添加一个新节点，并将该节点与当前网络中已存在的 m 个节点相连，其中 $m \leq m_0$ 。

Step2: 优先链接。在 Step1 的操作下，将当前新添加的节点 i 与某个已存在节点 j 相连时，给定如下式 (3-1) 的连接概率：

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j} \quad (3-1)$$

式中，变量 j 为网络中已有的节点标识，节点 j 的度数为 k_j 。经过 t 个时间步长后，将会生成一个具有 $t+m_0$ 个节点和 mt 条边的网络。

本章算法假设 $m_0 = 3$, $m = 2$ ，在 1000×1000 区域大小内，随机布置了 100 个传感器节点，按照上述生长机制生成 BA 无标度网络模型，其中 Sink 节点的坐标为 (500, 500)，位于该网络区域的中心。

3.2.2 TSP 模型

旅行商问题^[39] (Traveling Salesman Problem, TSP) 的定义可以简述如下：有 n 座城市，一位推销员从其中的某一座出发，要求其不重复地走完其余 $n-1$ 座城市并最终回到出发的城市；如果城市之间的相互距离都是固定的，则从中找到这么多可能的路径中最佳的一条。

转化为数学语言描述即：构造一个图 $G = (V, E)$ ，其中 V 为图中的节点集合， E 为图中连接两个节点的边集合，设 $D = (d_{ij})$ 为任意两节点之间的距离矩阵，其中 d_{ij} ($i, j \in V, i \neq j$) 为节点 i 到节点 j 的距离， $d_{ij} > 0$ 且 $d_{ij} \neq \infty$ ，本章算法中假设

$d_{ij} = d_{ji} (i, j \in V)$ 。旅行商问题就是寻找一条能够通过所有的节点，并且每个节点只通过一次的，具有最短路径的回路。如果已知城市 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 的一个访问顺序为 $T = (t_1, \dots, t_i, \dots, t_n)$ ，其中 $t_i \in V$ ， $t_{n+1} = t_1$ ，那么将该问题抽象成数学模型即为：

$$\min L = \sum_{i=1}^n d_{t_i, t_{i+1}} \quad (3-2)$$

本章将算法 LNT0 所要解决的最短路径连接问题转化成了 TSP 模型，并利用遗传算法 GA 进行了求解。其中，遗传算法利用轮盘赌选择算子来执行。

3.2.3 主要参数

(1) 介数

介数能够描述节点在网络中的重要性，即节点的介数值越大，其对网络性能的影响越大。介数还可以从理论上对网络的相对负载情况进行估算。基于最短路径路由算法，一个节点 i 的介数被定义为：

$$B(i) = \sum_{u \neq v} \frac{\sigma_{uv}(i)}{\sigma_{uv}} \quad (3-3)$$

其中， $\sigma_{uv}(i)$ 是从节点 u ，经过节点 i 到达节点 v 的最短路径的条数； σ_{uv} 为从节点 u 到节点 v 的所有最短路径的条数。

(2) 平均路径长度

无向网络中的路径长度是指源节点到目的节点所需要的总跳数；在最短路径路由算法下，最短路径长度 d_{ij} 是指从节点 i 到另一个节点 j 所经过的所有跳数和的最小值。网络的平均路径长度 L 即为所有节点之间的路径长度的平均值：

$$L = \frac{1}{\frac{1}{2}N(N-1)} \sum_{1 \leq i, j \leq N} d_{ij} \quad (3-4)$$

其中， N 为网络中总的节点个数。 L 与网络的传输效率以及网络的容量都具有紧密的联系。

(3) 网络抗毁性值

当网络受到外部攻击时，网络中的某些节点及链路可能会失去工作能力，进而造成网络产生一些孤立节点，或者一些具有多个节点的网络片段，但网络中部分连通的

区域仍能保持通信的能力。因此,网络的抗毁性可以用被攻击后的网络中的最大连通片的相对大小来衡量,即

$$H(G) = S_1 / S_0 \quad (3-5)$$

式中, S_1 是受攻击后网络中的最大连通片的大小; S_0 代表初始网络的大小。

(4) 网络通信效率

通常一个网络的性能,我们也可以用其传播信息的有效性来衡量,也就是所谓的网络通信效率,即

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3-6)$$

式中, d_{ij} 指网络中节点 i 和节点 j 之间的最短路径; N 为网络节点数量。只有当网络是一个完全连通图时,通信效率才会达到最大值 1,所以,网络的通信效率也是衡量一个网络鲁棒性大小的指标。

3.3 基于无标度网络的抗毁性优化算法

3.3.1 算法基本思想

无标度网络的生长机制导致网络中度数高的节点数量很少,而度数低的节点数量很多,这种分布的不均匀性使得网络中部分节点及链路所承受的负荷相对其他节点和链路的要多很多。这就造成这些节点和链路也很容易成为外部攻击的主要对象,也很容易因自身能量的快速耗尽而失效,进而对网络的性能产生很大的影响。因此,为了能有效地提高无标度网络的静态抗毁性和动态抗毁性,本章基于拓扑重构的思想,提出了 LNT0 算法。该算法中首先采用了花费较低的移除边策略 HBF 对网络的容量进行了优化。通过移除一些关键节点之间的连接,使得节点间的负载均衡分配,不至于网络核心节点因超载而失效。然而,当一个核心节点受到攻击时,与该节点相连的部分节点将会失去相互通信的功能,导致网络产生许多不连通的网络片段,极大地降低了网络的连通性,而且一些节点也会因此丧失通信能力。因此,基于环形拓扑结构的启示,我们在删边所得的网络基础上建立邻接网络的环形立交结构,将网络中即将或已经产生的网络碎片进行连通。我们采用 TSP 的思想,将该环形立交结构的形成规整成为一个数学优化模型,并采用遗传算法进行最优解求解。可以更清晰地掌握该算法最主要的目的,即使用最少的链路花费实现网络抗毁性的显著提高。

3.3.2 算法步骤

Step1: 分别计算初始 BA 网络中各个节点的介数值, 并将连接节点 i 和 j 的边 l_{ij} 赋权值 ω_{ij} :

$$\omega_{ij} = B_i + B_j \quad (3-7)$$

式中 B_i 和 B_j 分别是节点 i 和节点 j 的介数;

Step2: 对各个边的权重 ω_{ij} 从大到小进行排序, 并选择边权重最大的边 l_{ij} 进行删除; 如果删除的边会断开网络中的部分节点通信, 则取消删除, 选择下一条符合条件的边删除, 当删除比例达到预设的值时, 停止删边操作, 并记此时的网络为 G_{HBF} ;

Step3: 将网络 G_{HBF} 中各个节点的度进行从大到小排序, 并记度最大的节点为 $Nodes_i$;

Step4: 确定与 $Nodes_i$ 相邻的节点, 并记由这些邻接点构成的网络为 G_i ; 该网络 G_i 是由许多网络分支 $G'_{i1}, G'_{i2}, \dots, G'_{in}$ 组成, 并将这些分支中的节点数记为 $N'_{i1}, N'_{i2}, \dots, N'_{in}$;

Step5: 分别找到各个网络分支的拟合中心, 并记为 $o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{in}$; 然后找到各个网络分支中度数最小的节点记为 $u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in}$; 分别在每个网络分支 $G'_{ij}, j=1, 2, \dots, n$ 中确定一个搜索范围, 即: 以拟合中心 o_{ij} 为搜索中心, 以拟合中心到度最小的节点的距离 d_{ij} 作为搜索半径; 比较搜索范围内各个节点 (除 u_{ij} 节点外) 的度数, 选取度数最小的节点记为该网络分支中的代表节点 c_{ij} ; 如果该搜索区域内没有节点, 则将节点 u_{ij} 记为 c_{ij} 。这种选择代表节点的方法综合考虑了节点的能耗和网络的平均路径长度, 尽可能使网络寿命延长;

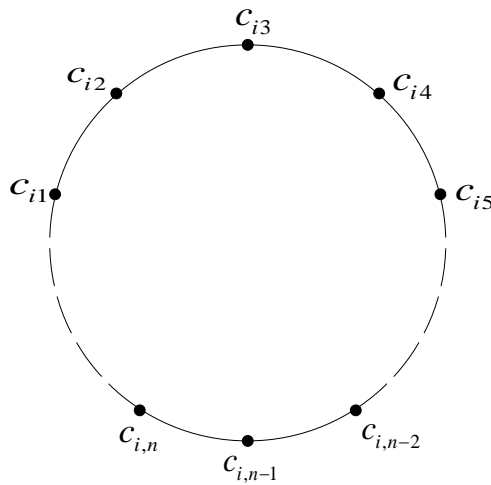


图 3.1 网络分支中代表节点连接示意图

Step6: 将各网络分支中的代表节点 c_{ij} 按照 TSP 思想进行最优连接, 采用遗传算法对该优化模型进行求解。将每个分支中的节点 c_{ij} 进行最优连接, 最直观的连接图为图 3.1 所示的环形图;

Step7: 计算优化的节点数, 直到满足预设的节点数量为止; 否则, 继续执行 Step3。

3.4 性能仿真与分析

3.4.1 仿真环境

我们使用 MATLAB 仿真平台对本章所提出的 LNT0 算法进行了仿真与性能分析。假设传感器节点在一个 $M \times M$ 的正方形区域内随机分布, 同时, 网络中的普通节点能量有限, 具有相同的主机和路由器功能, 能够生成、转发和存储数据包。

本章算法 LNT0 所对比的策略分别是 BA 初始网络, RR 和 HBF- α , 其中:

(1) 随机边重连策略 (Random edge Rewiring strategy, RR): 随机地移除网络中的任一条边, 然后再随机地选取两个未连接的节点之间加边; 重复该操作直到达到规定的比例停止。

(2) 介数高者优先重连接策略 α (High Betweenness First edge rewiring strategy- α , HBF- α): 分别计算网络中各个节点的介数值, 并将网络中的每条边都赋予权值 $\omega_{ij} = B_i + B_j$, B_i 和 B_j 分别表示节点 i 和 j 的介数; 然后移除网络中权重最大的两个节点之间的边, 并在网络中随机地选取两个没有连接的节点进行添边处理; 重复该操作直到达到规定的比例时停止。

仿真过程中的参数取值如表 3.1。

表 3.1 仿真参数

参数	大小
仿真区域	$1000 \times 1000 m^2$
节点数目 N	100-500
链接移除比例 f_d	0.06
优化率 Popt	30%
被攻击节点比例 P	0.1-0.6

3.4.2 仿真结果

(1) 删边比例的确定

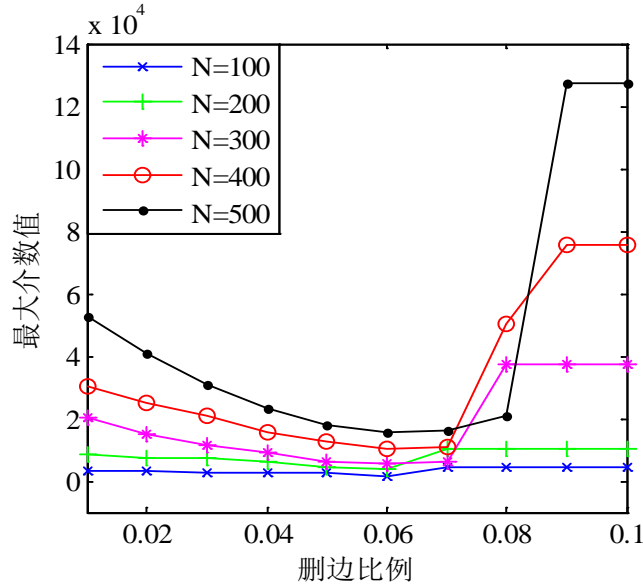


图 3.2 五种网络大小下网络最大介数值与移除边比例的关系图

对网络进行删边扩容是一种低花费高效率的拓扑优化方法,但并不是删边越多越好,也不是哪条边都可以删除。网络最大介数值 B_{\max} 与网络容量 R_c 是一种成反比的关系^[40],即

$$R_c = \frac{CN(N-1)}{B_{\max}} \quad (3-8)$$

其中 C 是指节点容量, N 代表网络中节点的总数量。因此,网络最大介数值 B_{\max} 的大小能够比较直观地反应出网络容量 R_c 的变化情况。图 3.2 给出了算法 LNT0 采用的删边策略下网络最大介数值与删边比例的关系。

由此可知,删边比例平均在 0.06 时,网络的最大介数值最小,也就是此时网络的容量相对最大。因此 LNT0 算法将删边比例参数设定为 $f_d=0.06$ 。

(2) 网络容量和平均路径长度

在此,我们通过计算网络中节点最大介数值 B_{\max} 的降低率间接评估三种优化策略对网络传输容量增长率的影响。下面展示的实验结果均是通过 20 次独立网络试验后计算的平均值。

表 3.2 给出了三种优化网络相对于初始 BA 网络的平均路径长度增长率变化的情况。可见,三种优化网络的平均路径长度均是变长的,但是 LNT0 策略对网络平均路径长度的影响是最小的。表 3.3 中,很清晰的可以观察到三种优化方法相对于原始网络而言,网络节点的最大介数值均是降低的,也就意味着网络容量均有所增加;虽然策略 HBF- α 对网络负载的均衡改进已比较大,但是策略 LNT0 以构建特殊拓扑结

构的优势使得网络容量得到进一步的优化。这也充分说明,在实际的复杂系统中,采用恰当的拓扑优化策略,即使以牺牲一点平均路径长度为代价,对网络整体性能的提高还是非常值得的。

表 3.2 G_{RR} , $G_{HBF-\alpha}$ 和 G_{LNT0} 的平均路径长度增长率 (%)

拓扑优化算法	网络节点数量				
	100	200	300	400	500
RR	1.91	2.62	2.94	1.51	1.57
HBF- α	5.96	7.13	8.65	9.62	9.55
LNT0	1.17	1.74	2.69	3.35	3.68

表 3.3 G_{RR} , $G_{HBF-\alpha}$ 和 G_{LNT0} 的最大介数降低率 (%)

拓扑优化算法	网络节点数量				
	100	200	300	400	500
RR	7.87	7.76	5.91	4.69	6.25
HBF- α	45.53	50.15	54.48	62.93	63.54
LNT0	50.83	55.34	58.20	66.20	67.85

(3) 随即攻击下的实验

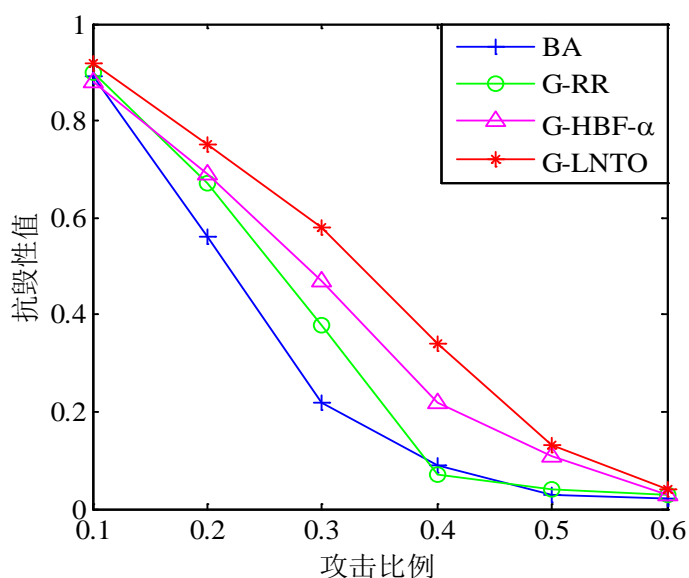


图 3.3 随机攻击下网络抗毁性值比较

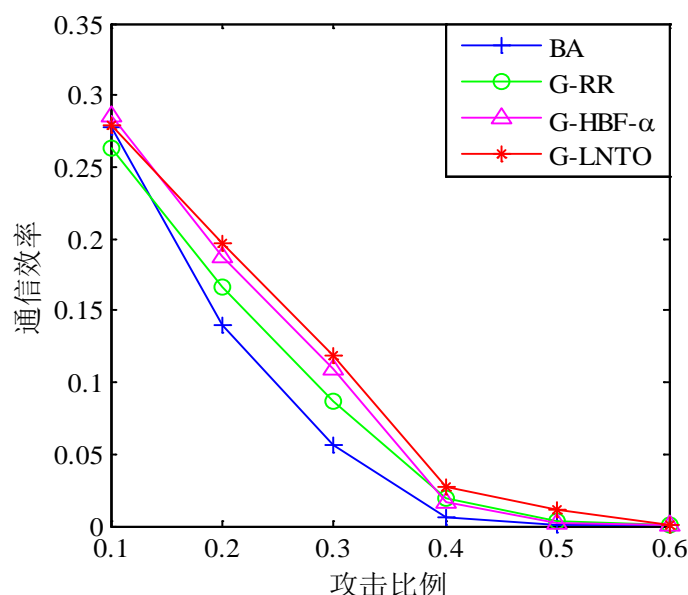


图 3.4 随机攻击下网络通信效率比较

所谓随机攻击是指网络中的节点随机失效，而与失效节点相连的边也无法再进行网络通信。网络的抗毁性通常用网络在遭受攻击后所产生的最大连通分支的相对大小来衡量。如图 3.3 中可以看出，三种优化后的网络在随机攻击下的网络抗毁性值 H 均比初始网络的要高；而且，策略 LNTO 所提高的程度是最明显的。图 3.4 中随着失效节点数量的增多，四个网络的通信效率 E 均有所下降。这是因为一些节点的失效导致网络中的某些最短路径失效，进而增加了网络整体的平均路径长度，降低了网络的通信效率。但是，图中仍可看出，策略 LNTO 的通信效率相对来说是最高的，这也进一步表明，该算法在提高网络的鲁棒性和网络的信息传递效率方面还是十分有效的。

(4) 恶意攻击下的实验

所谓恶意攻击就是敌方通过攻击网络中少量的关键节点就能达到使整个网络通信瘫痪的目的。因而，增强网络面对恶意攻击的鲁棒性十分重要。在图示的实验结果中，同样也是利用抗毁性和全网通信效率对 LNTO 算法性能进行衡量。从图 3.5 中可以看出，当 30% 的网络节点遭受攻击时， G_{LNTO} 的抗毁性值要比其他三个网络的值高出 3 倍。这说明了所提出的 LNTO 算法能够更有效地均衡网络节点的负荷，降低网络中核心节点的重要性。图 3.6 的仿真结果表明，当网络遭受恶意攻击时， G_{LNTO} 中任意两节点间的平均路径长度比其他三个网络增长缓慢。而且，要使网络完全崩溃，在 $G_{HBF-\alpha}$ 和 G_{RR} 中仅需要攻击网络中 40% 的节点，然而在 LNTO 策略下则需要攻击至少 60% 的节点才能使网络崩溃。通过仿真的分析我们可以得到，这种构建环形立交拓扑结构的方法对于提高 BA 无标度网络的抗毁性是十分有效的，尤其针对恶意攻击。

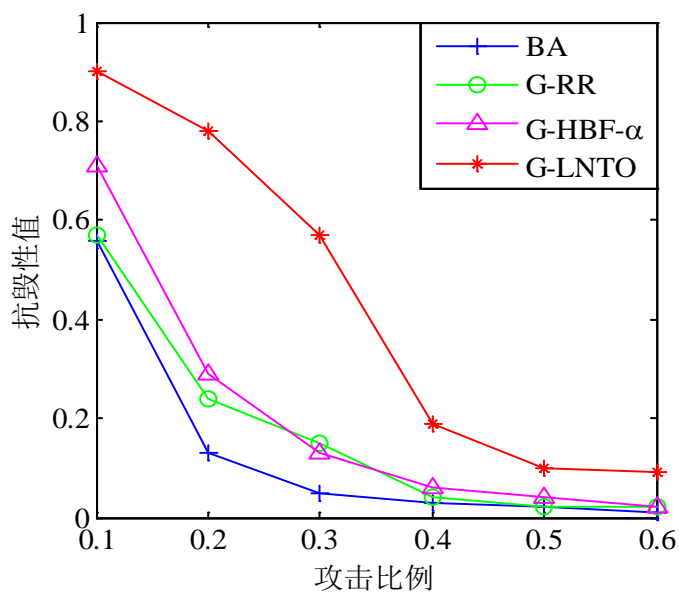


图 3.5 恶意攻击下网络抗毁性值比较

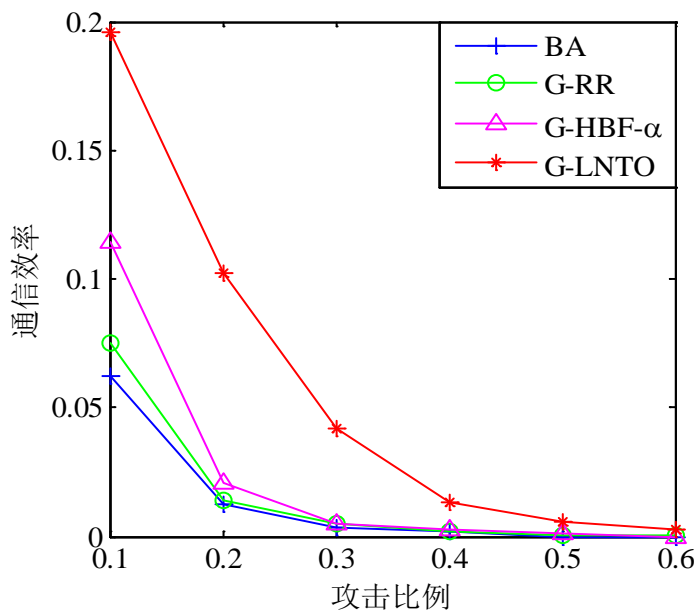


图 3.6 恶意攻击下网络通信效率比较

3.5 本章小结

在对网络抗毁性研究的实际应用中, 由于各种因素的制约, 往往更注重的并不是重新设计和构建一个新的网络, 而是在已有的网络拓扑基础上, 提出具体的抗毁性优化策略, 提高当前的网络鲁棒性。目前, 针对优化网络的拓扑结构方面, 对提高无标度网络静态和动态抗毁性的研究并不多。本章通过对无标度网络特征的分析, 提出了

一种在保证网络容量有所改善的前提下,进一步优化网络静态抗毁性的拓扑重构方法。所提出的基于冗余链路的拓扑优化方法 LNT0,合理地考虑并利用了网络中耗能较多,且对网络平均路径影响较小的节点,进行了网络拓扑结构的重构,并应用旅行商问题 (TSP) 对这种拓扑重构问题进行了优化求解。仿真实验结果也表明,本章所提出的 LNT0 算法,不仅节约了数据包传输过程中的能耗,增大了网络的传输容量,对于优化 BA 无标度网络拓扑的鲁棒性以及提高传递信息的能力也是十分有效的。

第四章 一种修复网络不连通分区的中继节点部署算法

4.1 相关研究

随着电子技术的飞速发展, WSNs 已在一些恶劣的环境中得到了广泛的应用, 如、军事侦查、环境监测和目标跟踪等。当 WSNs 部署在一个恶劣的环境下时, 很可能会因为以下两个原因造成网络的分割, 使得网络无法正常地运作: (1) 当网络的一个重要节点如割点, 因其自身能量的耗尽或者外部的攻击而失效; (2) 多个节点的同时失效。尤其是在军事应用等行业中, 网络功能的失效将会导致不可估量的损失。因此, 在 WSNs 的应用中, 保持网络的连通性才能实现网络的高效运行, 这是非常重要的。而当网络发生分割, 针对造成分割的原因, 采用适当的拓扑重构方法恢复网络连通, 提高网络抗毁性是目前研究的重要方向。

网络拓扑重构通常包含失效预防和拓扑修复。其中, 失效预防就是在网络构建和网络正常运作的过程中进行部分链接的删除或额外链接的添加, 从而使网络不会因故障的发生而造成网络分割, 使网络不连通。例如, 通过向网络中添加冗余节点形成 k -连通 ($k \geq 2$) 的网络, 使得网络中的每对节点间均存在至少 k 条独立的通信链路, 以此来提高网络的抗毁性。如果网络已经因故障而发生分割, 就需要对网络进行连通的恢复, 主要包括对网络中已存在节点的移动^[41-42]和额外中继节点的添加^[33-43]。Sookyoung Lee 等人^[41]提出了一种布置中继节点的算法 DORMS (A Distributed algorithm for Optimized Relay node placement using Minimum Steiner tree), 该算法采用了最小斯坦纳树方法, 通过移动最少的中继节点 (Relay Node, RN) 对网络的连通进行了恢复。这种方法所需要的 RN 数量比较少, 节省了资源, 也达到了恢复网络连通的目的, 但不适合应用于大规模网络的分割。Ameer A. Abbasi 等人^[42]提出了一种最小移动拓扑修复算法, 基于减少移动距离和消息复杂度来移动最少数目的节点恢复网络连通, 但是该算法并不高效。通过向结构被破坏的 WSNs 中添加额外的中继节点, 进行网络连通的恢复, Sookyoung Lee 等人^[33]提出了一种基于网格布置中继节点的算法 CORP (A distributed Cell-based Optimized Relay node Placement), 算法中包含了优化中继节点数量的步骤, 避免了资源的浪费。Fatih Senel 等人^[43]则提出了一种启发式的高鲁棒性中继节点部署方法 1C-SpiderWeb Heuristic, 其采用的是蜘蛛网式的特殊布局方法。在这种方法的基础上, 他们又提出了算法 2C-SpiderWeb Heuristic, 利用额外中继节点的放置实现网络各分区间的 2-连通拓扑结构, 进一步提高了网络的抗毁性。

本章在对上述额外中继节点的添加算法进行分析的基础上, 针对被分割的网络, 为有效地恢复其连通并进行正常的工作, 进一步改善网络的抗毁性性能, 提出了一种

修复分区无线传感器网络连通的中继节点部署算法 RNPCR (A Relay Node Placement Algorithm for Connectivity Restoration in Partitioned Wireless Sensor Network)。算法 RNPCR 假设所布置的中继节点都是静止的且具有相同的通信半径 R ，WSNs 遭到破坏后形成的孤立子网称为网络分区^[44] (Network Partition, NP)。为尽可能地减少所需中继节点的数量，算法充分地考虑了各网络分区的位置及它们之间的距离，采用一种通过不断形成凸包构建骨干网络的方法，进行网络分区间中继节点的部署，使网络恢复连通；同时，为实现性能更好的网络拓扑，防止网络因某个中继节点的失效而再次造成分割，算法又布置了额外的中继节点，对网络各分区进行了 2-连通拓扑的构建。仿真结果也表明此算法所得到的网络在平均路径长度和平均节点度上较 2C-MSS^[45] 和 2C-SpiderWeb^[43] 更有优越性，抗毁性更高；而且相比于 2C-SpiderWeb，其使用的中继节点数量也较少，节约了网络资源。

4.2 基础网络模型

WSNs 中节点的随机分布通常会产生网络的割点，而割点作为网络的瓶颈节点，它的失效可能会引起 WSNs 区域性的通信中断，使得网络的整体能耗增加，也影响了网络中信息的收集，处理以及传送的功能。可见，割点是 WSNs 中一旦失效便造成网络分割的关键节点。由于本章所提算法 RNPCR 的主要目的是通过部署额外的中继节点，恢复网络的连通性进而提高网络的抗毁性，因此，算法 RNPCR 所利用的基础分区网络可假设为随机去除随机网络中的割点形成。所需基础网络中含有的分区个数由去除的割点位置决定，具有一定的随机性。WSNs 遭到破坏而被分割后的网络模型由图 4.1 可见。

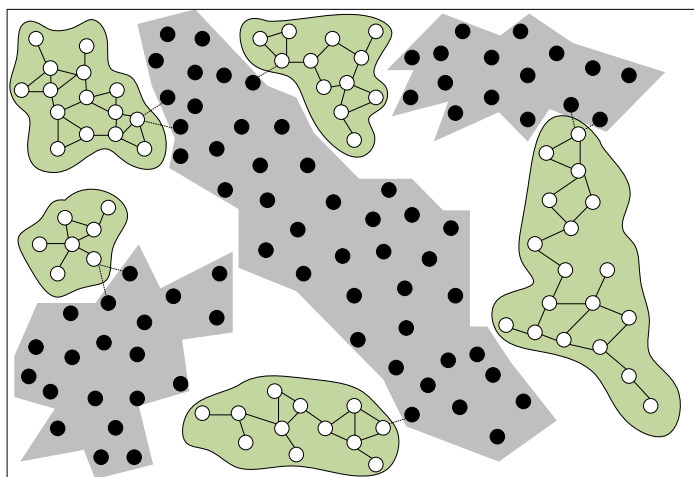


图 4.1 WSNs 遭受破坏被分割的场景图

(实心节点所在区域为被攻击区域，空心节点所在区域为产生的网络分区)

4.3 算法描述

本章所提出的算法 RNPCR 致力于利用最少数量的中继节点对已被分割的网络进行连通修复。修复后的各网络分区之间维持的是 1-连通状态，一旦网络中所布置的某个中继节点失效，就很有可能造成整个网络的再次分割。因此，为了更好地提高网络拓扑的稳定性和抗毁性，有必要消除节点失效对修复后的网络拓扑结构的相对不稳定影响。构建网络各分区间的 2-连通拓扑结构可以在网络的低功耗和高容错性之间取得一种平衡，也能够使得在某个节点失效的情况下，剩余网络仍能够保持连通。所以，本章算法的主要思想分为两个阶段：第一，基于骨干多边形的构建，恢复网络连通。第二，分区间 2-连通拓扑结构的构建。这是建立在网络连通恢复的基础上，通过在分区与骨干多边形间建立第二条不相交路径来提高所得网络拓扑的容错性和抗毁性。

4.3.1 骨干多边形的构建

(1) 分区代表节点的找取

针对基础分区网络，找到各分区的代表节点 $\text{Re } p(i)$ 。该代表节点，我们选取的是各个分区子网中距离其他节点总距离最短的节点，并用中继节点代替。用此节点位置来代替所在分区的位置有利于降低网络的平均路径长度，也有利于网络节点负载的均衡。然后对网络进行网格的划分，网格的大小是对角线长度为中继节点半径 R 的正方形，如图 4.2 所示，代表节点 $\text{Re } p_i^1 (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 的坐标分别为 $(7, 1)$, $(7, 9)$, $(4, 13)$, $(1, 3)$, $(3, 9)$, $(4, 4)$ 。

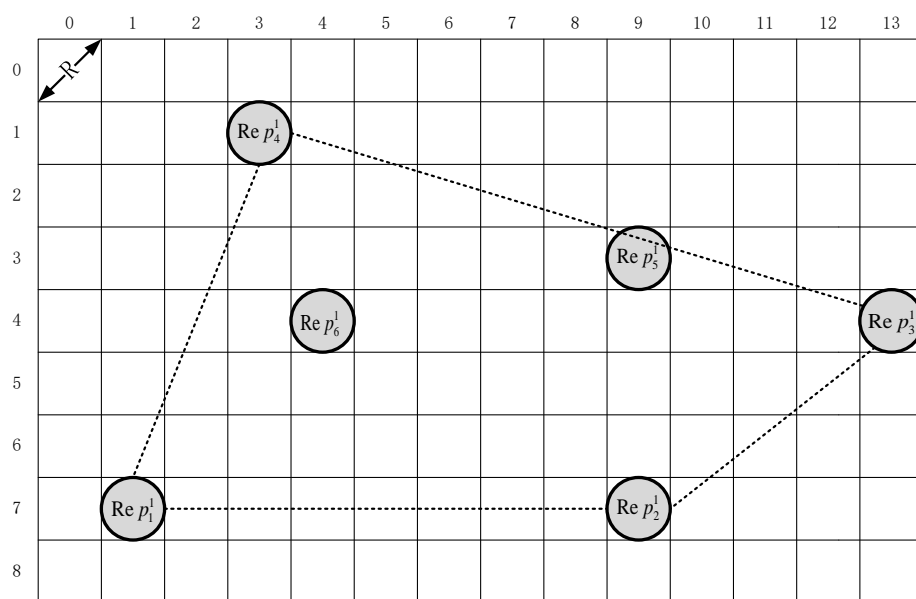


图 4.2 算法 RNPCR 第 1 轮凸包的形成

(2) 凸包的确定

Step1: 对所有的代表节点 $\text{Re } p(i)$ 利用葛立恒扫描法^[46]进行第 1 轮凸包的形成。

如图 4.2 可见, 代表节点 $\text{Re } p_1^1$ 、 $\text{Re } p_2^1$ 、 $\text{Re } p_3^1$ 、 $\text{Re } p_4^1$ 表示最外层凸包的组成节点, 记这些节点组成的集合为 S_1 , 其余被包括在凸包内的代表节点记为集合 $S_1' = \{\text{Re } p_5^1, \text{Re } p_6^1\}$ 。为方便理解, 我们将集合又记为: $S_1 = \{Tp_1^1, Tp_2^1, Tp_3^1, Tp_4^1\}$ 及 $S_1' = \{Tp_5^1, Tp_6^1\}$ 。

Step2: 在第 1 轮凸包形成的基础上进行第 2 轮凸包的形成。

Step2.1: 求取由第 1 轮凸包形成第 2 轮凸包的过渡节点。下面利用公式^[33](4-1) 确定第 r 轮凸包的第 n 个组成节点 Tp_n^r 的下一过渡节点 Tp_n^{r+1} :

$$Tp_n^{r+1} = \underset{cell_{nxy} \in Neighbor(Tp_n^r)}{\min} \sum_{n \neq t} f(cell_{nxy}, Tp_t^r) \quad (4-1)$$

其中, $cell_{nxy}$ 是指当前凸包组成节点 Tp_n^r 的邻居细胞网格, 即邻居节点; $Tp_t^r (t \neq n)$ 表示除节点 Tp_n^r 以外组成当前凸包的节点。函数

$$f(C_i, C_j) = \max(|row(C_i) - row(C_j)| - 1, |column(C_i) - column(C_j)| - 1) \quad (4-2)$$

是用于计算连接任意两个细胞网格所需要的最少细胞网格数量; 其中 $row(C_i)$ 代表网格 C_i 所在的行指标, $column(C_i)$ 代表 C_i 所在的列指标。例如计算 $f(\text{Re } p_1^1, \text{Re } p_4^1)$, 即

$$f(\text{Re } p_1^1, \text{Re } p_4^1) = \max(|7-1|-1, |3-1|-1) = 5 \quad (4-3)$$

公式(4-1)的含义就是找取 Tp_n^r 的过渡节点 Tp_n^{r+1} , 使得其是距离 S_r 中其他节点 $Tp_t^r (t \neq n)$ 的距离和最小的一个网格。这种找取过渡节点的方法是为了减少中继节点的使用量。

Step2.2: 对第 1 轮凸包的所有过渡节点和集合 S_1' 中的代表节点应用葛立恒扫描法, 构建第 2 轮凸包, 如图 4.3, 并将节点同样分成组成第 2 个凸包的节点集合 S_2 和被包含的代表节点集合 S_2' 。

Step3: 利用公式(4-1)重复 Step2 的操作, 对所求得的过渡节点及集合 S_{r-1}' 进行第 r 轮凸包的确定, 直到某一轮所形成的凸包内不再包含任何一个分区代表节点, 停止。最后得到的凸包即为需要找的骨干多边形, 如图 4.4。

Step4: 在形成骨干多边形之后, 对网络的所有分区代表节点进行分类, 分成能够通过过渡节点构成骨干多边形的代表节点集合 W , 和从某一轮开始已不再参与凸包形成的代表节点集合 W' 。

如果进行到某一轮时,凸包内仅有一个代表节点且在该凸包的中心,则不需要再进行下一轮凸包的确定,此时的凸包即为骨干多边形,中心的代表节点即归入集合 W' 。

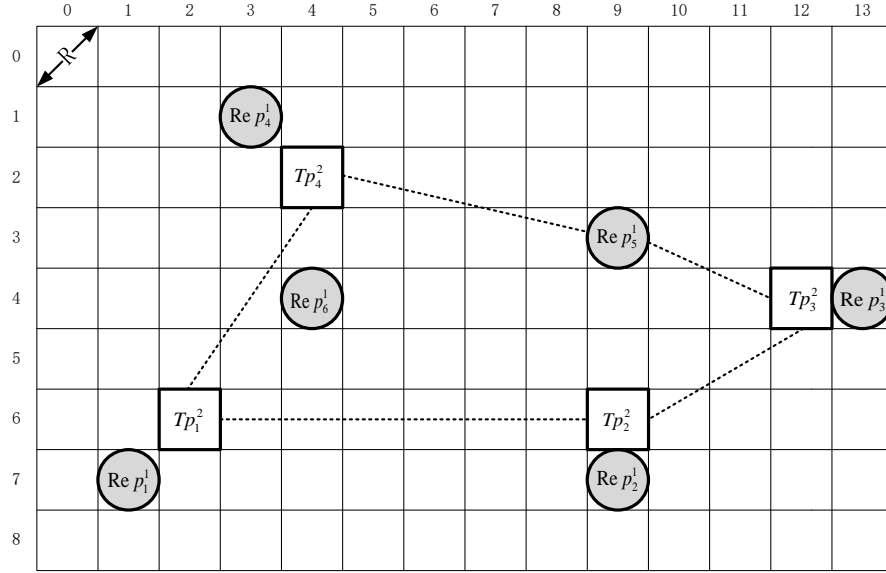


图 4.3 算法 RNPCR 第 2 轮凸包的形成

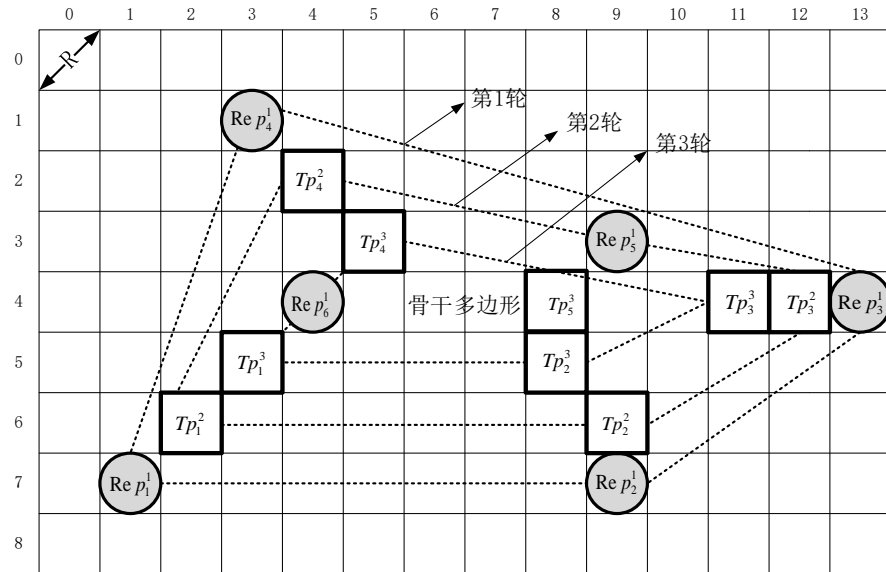


图 4.4 算法 RNPCR 骨干多边形的形成

4.3.2 部署中继节点恢复网络连通

Step1: 对骨干多边形进行中继节点的添加。根据骨干多边形各边的长度和中继节点的通信半径大小,均匀地分布中继节点,使得骨干多边形相邻的两个组成节点连通。将骨干多边形的组成节点及各边添加的节点记为集合 P_{ring} 。

Step2: 对集合 W 中所包含的所有分区代表节点进行连通。如图 4.5, 节点

P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 、 P_5 形成的路线，即是 W 中的分区代表节点，在形成骨干网络的过程中所确定的过渡节点的位置替换成中继节点所形成的连通路程。记这些路径上，除分区代表节点和集合 P_{ring} 以外的节点集合为 P_{length} 。

Step3: 对集合 W' 中的分区代表节点进行连通。将这些分区代表节点同距离集合 P_{ring} 或者 P_{length} 中最近的中继节点进行连接，并根据距离均匀布置中继节点形成连通路程，如图 4.5 中代表节点 P_6 、 P_7 。此时，分区网络已恢复连通。

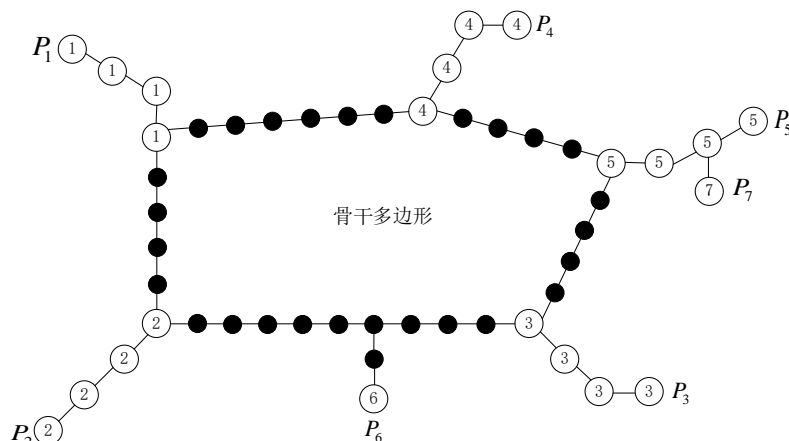


图 4.5 连通网络的形成

4.3.3 分区 2-连通拓扑的形成

上述所得的网络可能会因某个中继节点的失效而再次造成分区的形成，因此，为进一步提高网络的容错性等抗毁性性能，现对网络再次进行中继节点的部署，使得各分区间形成 2-连通拓扑结构。

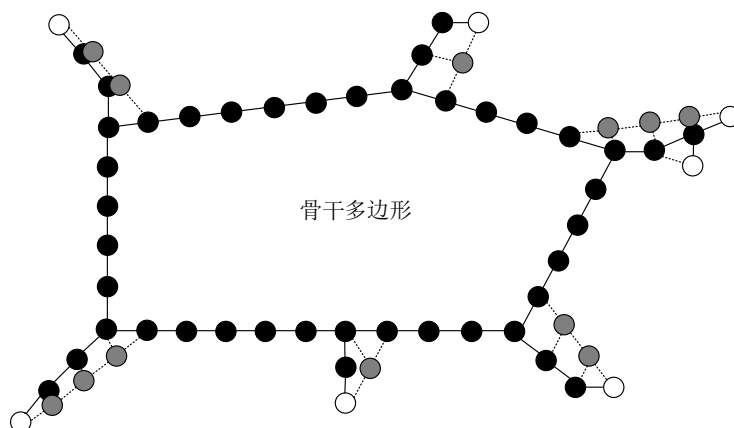


图 4.6 2-连通网络的形成

如上图 4.6，在图 4.5 的基础上，将各分区代表节点同骨干多边形上距离其最近的左或右邻近节点进行连接，并布置中继节点使该链路连通；为尽量减少中继节点的

使用，第二条路径的形成，也可以选取距离已存在路径上最近的中继节点进行连接，但若产生割点，则不采用此连接方法。图中空心圆点代表网络的分区，黑色圆点代表网络连通所需要的中继节点，灰色圆点代表第二条路径形成所需要的中继节点。

4.4 性能仿真与分析

4.4.1 仿真环境

为评估该算法的性能，我们利用 MATLAB 进行了相应的仿真实验，通信模型采用了随机网络，即：将 100 个传感器节点随机撒播于 $1000m \times 1000m$ 的区域内，任意两个普通节点间的距离如果小于通信范围 R_0 ($R_0 = 100m$)，即可通信。通过去除网络中的部分割点来模拟生成具有不同网络分区个数的网络拓扑。在仿真中，不管哪种算法，当中继节点部署完成后，在其通信范围内的传感器节点都与之构建链路形成最终的网路，然后对此网路性能进行衡量和分析。

仿真所对比的算法：

(1) 2C-MSS 算法^[45]：算法根据网路各分区间的距离进行额外节点的部署，即每条链接所需的节点数量为 $\left\lceil \frac{|e|}{R} - 1 \right\rceil$ ，其中 $|e|$ 为边 e 的长度， R 为节点通信范围；然后再对所加节点进行裁剪优化，得到近似于利用旅行商问题思想所需节点数量的效果，实现了使用最少额外节点实现网路连通的目的。

(2) 2C-SpiderWeb 算法^[43]：采用蜘蛛网式布局结构对网路进行连通修复。算法首先计算网路各分区相对中间的位置 CoM (Center of Mass)，并分别与网路分区代表节点连线，从距离最大的节点位置开始布置中继节点，依次采用左右连通的方式进行，直到网路连通；然后对分区和内部骨干多边形结构进行第二条独立链路的建立。

4.4.2 仿真结果

(1) 中继节点的部署量

图 4.7 中设定网路分区个数 $N_p = 8$ ，描述了中继节点通信半径特征对中继节点部署数量的影响。由于节点间通信路径长度的固定，随着中继节点通信半径的增大，3 种方法所需的中继节点数量必然都在减少。但是图中可以看出，相同情况下，无论中继节点的通信半径如何变化，RNPCR 算法所需的中继节点个数逐渐趋向于 2C-MSS 算法，但始终比 2C-SpiderWeb 算法的少，即 RNPCR 算法相比于 2C-SpiderWeb 算法更节省资源。这也说明了，资源的使用量最重要的还是取决于算法的优越性。图 4.8 中可见，设定中继节点的通信半径 $R = 150m$ 时，3 种使得网路恢复连通算法所需要中继节点都会随着网路中出现的分区个数的增加而增加，这也与实际情况相吻合。但是在相同网路分区个数的情况下，本章算法要比 2C-SpiderWeb 算法使用的中继节点

个数少，这是由于 RNPCR 算法在形成骨干多边形的过程中考虑了各个分区的位置，而 2C-SpiderWeb 算法只考虑了形成最外层凸包的分区位置。

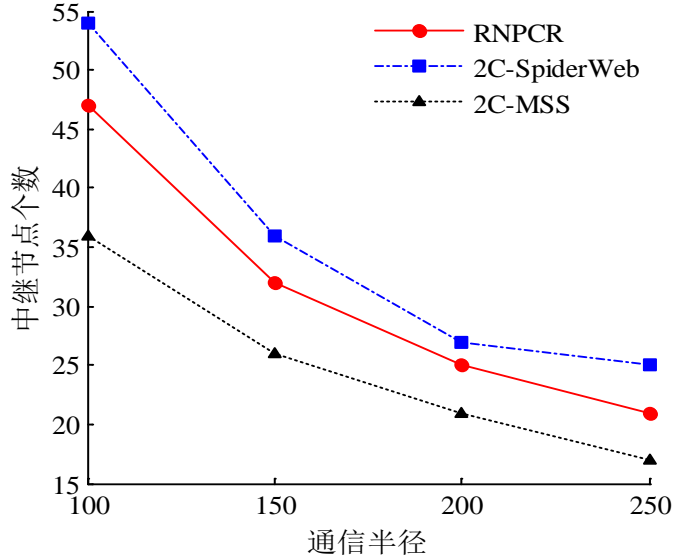


图 4.7 随通信半径增大所需中继节点个数比较图（8 个分区）

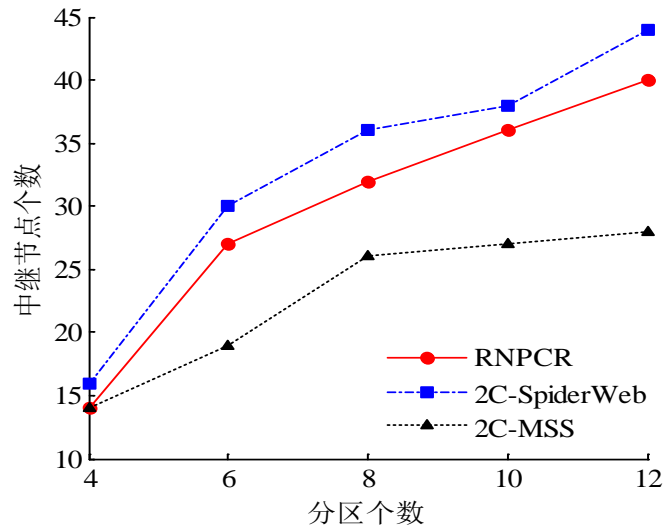


图 4.8 随分区个数增加所需中继节点个数比较图（通信半径 150m）

（2）网络平均节点度

网络平均节点度^[47]指的是网络中每个节点所连接的其他网络节点的平均个数，其值越大，网络的抗毁性越高。图 4.9 中设定网络的分区个数 $N_p = 8$ ，描述了中继节点通信半径对平均节点度的影响。其中，不管通信半径为多大，RNPCR 算法都要比 2C-MSS 算法的节点连通性高，这是因为在恢复网络连通的过程中 RNPCR 算法是通过形成骨干多边形进行网络两连通的构建，而 2C-MSS 算法只是基于分区构成的边界

进行网络的连通。由图 4.7 可知, 2C-SpiderWeb 算法要比 RNPCR 算法多部署 12% 的中继节点, 所以导致 2C-SpiderWeb 算法产生更多的链接数。但是在中继节点半径较小的时候, RNPCR 算法的平均节点度是趋近于 2C-SpiderWeb 算法的。图 4.10 设定中继节点的通信半径 $R=150m$, 描述的是网络分区个数对平均节点度的影响。可见, 当 $N_p > 8$ 时, RNPCR 算法形成的网络拓扑结构要比另两种算法的优越。这是因为骨干多边形的形成及两连通的构建充分考虑了各分区的距离位置因素, 且当网络分区个数越多时, 算法的优越性差距就会越明显。

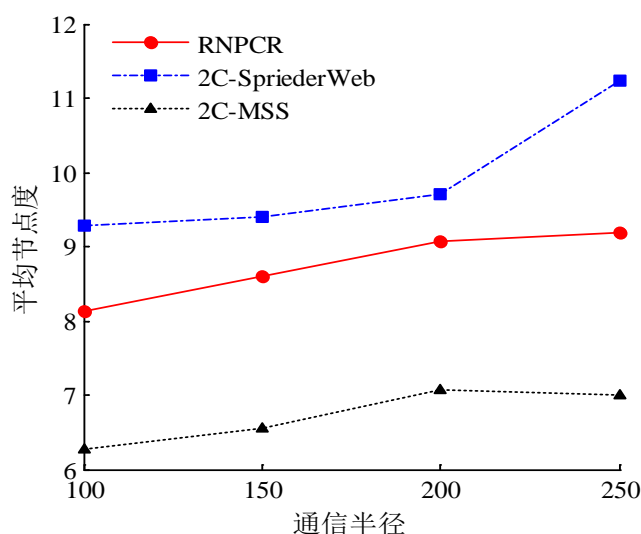


图 4.9 随通信半径增大平均节点度比较图（8 个分区）

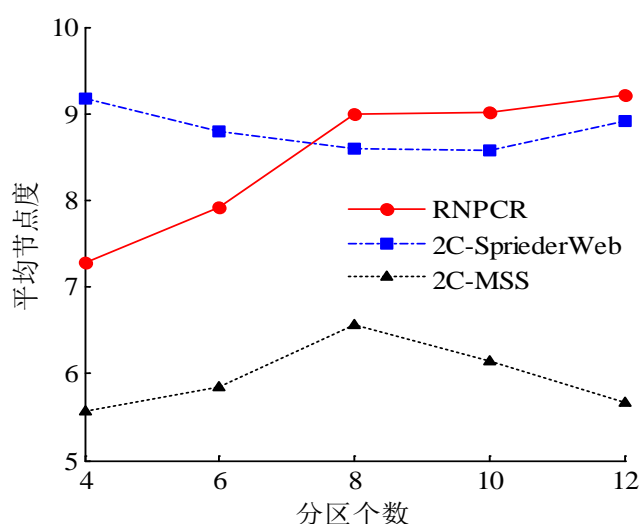


图 4.10 随分区个数增加平均节点度比较图（通信半径 150m）

（3）网络平均路径长度

网络平均路径长度是指任意两网络节点间的平均通信距离，其值越小，说明网络

的通信效率以及网络的连通性等抗毁性能越高。

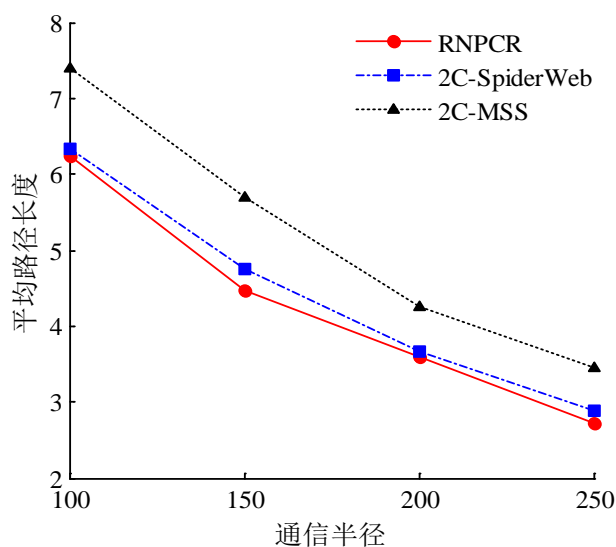


图 4.11 随通信半径增大平均路径长度比较图（8 个分区）

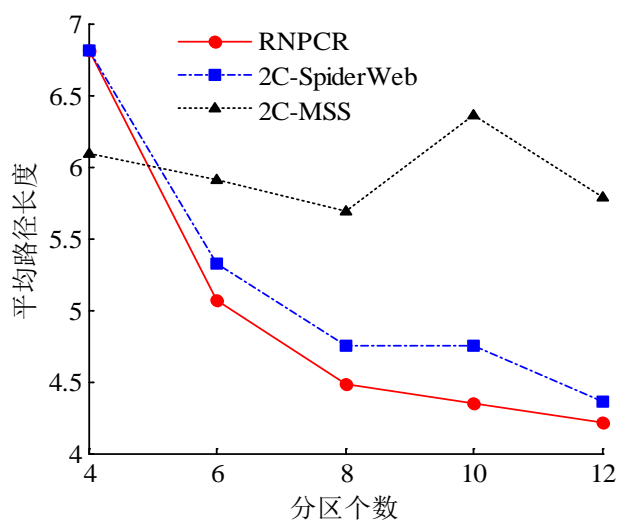


图 4.12 随分区个数增加平均路径长度比较图（通信半径 150m）

图 4.11 和 4.12 在相同网络分区个数和相同通信半径下分别对网络平均路径长度进行了衡量。可见 RNPCR 算法更具有优越性。这是因为在骨干多边形的形成过程中 2C-SpiderWeb 算法只一直向网络的质心逼近来构建。RNPCR 算法在构建两连通拓扑时，并不是所有的分区都要连接在骨干多边形上，而是连接距离最近的中继节点，这种做法进一步减少了平均路径长度，同时也充分利用了链路，降低了传输容量超载的可能性。图 4.12 中，当网络分区为 4 时，2C-MSS 平均路径长度更小。这是因为即使只有 4 个分区，RNPCR 算法也要进行凸包的逼近来形成骨干多边形，这显然要比直接利用链路连接相邻分区的 2C-MSS 算法所需的路径长。当然，如果出现 4 个分区恰

好在第一轮就形成骨干多边形, 则 RNPCR 算法将和 2C-MSS 算法达到相同的拓扑效果。

4.5 本章小结

由于 WSNs 工作环境的恶劣, 节点很容易遭到破坏而造成网络分割, 因此, 需要对网络连通进行修复。同时, 为防止因单个节点的故障而再次造成网络分割, 构建容错拓扑结构也是很有必要的。本文提出的算法 RNPCR 通过部署中继节点, 使得被严重破坏而分割成多个分区的 WSNs 恢复连通。算法考虑了各个分区的位置以及相互之间的距离, 由最外层凸包不断向内部逼近构建骨干多边形, 尽可能的减少了所需中继节点的数量。对恢复连通后的网络又进行了分区 2-连通拓扑的构建, 进一步提高了网络的容错性和抗毁性, 从网络平均节点度和平均路径长度方面也表明了所得到的网络拓扑结构具有更强的鲁棒性。

第五章 结束语

5.1 本文总结

随着对 WSNs 研究的不断深入,网络抗毁性的研究意义也日益凸显。如果在网络发生故障前,没有对网络进行故障的预防处理,或者在网络故障发生后,没有及时对网络进行补救,那么网络的整体结构将会产生重大改变,严重影响网络服务质量,致使用户遭受巨大的损失。网络抗毁性从网络的连通性角度描述了网络的拓扑结构对通信可靠性的影响,同时,网络抗毁性也是进行网络性能评估的一项重要依据,因此,对网络抗毁性的优化是十分必要的。

本文在对 WSNs 的结构、特点等方面进行介绍的基础上,深入的分析了目前 WSNs 抗毁性优化问题的研究状况,引入了两种通过网络拓扑重构技术对网络抗毁性进行优化的策略:

(1) 本文第三章针对无标度网络模型,提出了一种对正常网络进行失效预防的抗毁性优化策略 LNTD。通过对网络结构和特性的分析,在对网络容量进行优化的基础上,构建了邻接网络的环形立交结构,实现了对网络关键节点的保护,进而达到了提高网络抗毁性性能的目的。

(2) 针对失效的 WSNs,为提高其抗毁性,本文第四章提出了算法 RNPCR。算法通过合理地部署中继节点对网络拓扑进行修复,恢复网络的连通。为使用尽可能少的网络资源,即中继节点,所采用的中继节点部署方案是在构建合理的网络骨干多边形的基础上进行的。为进一步提高网络的连通性及容错性等抗毁性能,对恢复连通后的网络又进行了 2-连通拓扑的构建。

以上两种算法分别从网络失效预防和拓扑修复两个方面提出,针对网络的不同工作状态,采取了不同的拓扑重构措施,有效地提高了网络的通信效率、平均节点度及平均路径长度等抗毁性性能。

5.2 展望

目前,在对 WSNs 抗毁性优化策略的研究中,能够同时优化网络的静态抗毁性和动态抗毁性^[48]的较少,而且网络容量作为网络动态抗毁性的衡量指标之一,它的提高有利于降低网络级联故障发生的概率。本文第三章所提的算法是针对 BA 网络模型,并没有验证是否对别的网络拓扑也适用。这也是我们的下一步工作,即改进方案使其适用于各种网络拓扑模型。

针对修复 WSNs 拓扑连通方面,本文并没有研究实时性问题,而这种实时性的要

求在军事应用中是十分重要；也就是当网络出现分割时，所采用的拓扑修复策略能否及时监测到并快速恢复连通。目前，有较多文献都是从二维平面的角度去考虑网络连通恢复的问题，而很少有文献从三维甚至多维空间角度来研究修复网络连通的问题，因此，这也是一个需要深入研究的方向，因为这个方向很有可能会进一步减少所需的中继节点数量，节约网络资源，并且所得网络连通性更好。

参考文献

- [1] 王殊, 阎毓杰, 胡富平. WSNs 的理论及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2007.
- [2] 景博, 孙勇. 智能网络传感器与 WSNs[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [3] 郑相全. 无线自组网技术实用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [4] 许毅. 无线传感器网络原理及方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [5] 彭力. 无线传感器网络原理与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.
- [6] KRISHNAMACHARI B, ESTRIN D, WICKER S. Modelling data-centric routing in wireless sensor networks[C]//IEEE infocom. 2002, 2: 39-44.
- [7] 于海斌, 曾鹏, 王忠锋等. 分布式 WSNs 通信协议研究[J]. 通信学报, 2004, 25(10): 102-110.
- [8] 曾鹏, 于海斌, 梁英等. 分布式 WSNs 体系结构及应用支撑技术研究[J]. 信息与控制, 2004, 33(3): 307-313.
- [9] VIEIRA M A M, COELHO JR C N, DA SILVA D C, et al. Survey on wireless sensor network devices[C]//Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA'03. IEEE Conference. IEEE, 2003, 1: 537-544.
- [10] COMER D, STEVENS D L. Internetworking with TCP/IP[M]. Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 2003.
- [11] 李文锋, 符修文. 无线传感器网络抗毁性[J]. 计算机学报, 2015, 38(3): 625-647.
- [12] 刘啸林. 网络抗毁性研究介绍[J]. 计算机应用与软件, 2007, 24(6): 135-136.
- [13] YANG T, LIN Z, YUAN B. A Betweenness Calibration Topology Optimal Control Algorithm for Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 2013.
- [14] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Attack and error tolerance of complex networks[J]. Nature, 2000, 406(6794): 378-382.
- [15] ZHU H, LUO H, PENG H, et al. Complex networks-based energy-efficient evolution model for wireless sensor networks[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2009, 41(4): 1828-1835.
- [16] ZHENG G, LIU S, QI X. Scale-free topology evolution for wireless sensor networks with reconstruction mechanism[J]. Computers & Electrical Engineering, 2012, 38(3): 643-651.
- [17] 郑巍, 刘三阳, 寇晓丽. 基于模块度的 WSNs 分簇算法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(1): 66-67.
- [18] ZHENG G, LIU Q. Scale-free topology evolution for wireless sensor networks[J]. Computers & Electrical Engineering, 2013, 39(6): 1779-1788.
- [19] 陈力军, 刘明, 陈道蓄等. 基于随机行走的 WSNs 簇间拓扑演化[J]. 计算机学报, 2009,

- 32(1): 71-72.
- [20] 马士强. WSNs 抗毁性研究[D]. 2012:16-20.
- [21] CAI H B, JU X M, CAO Q Y. Energy prediction and reliable clustering routing protocol for multilevel energy heterogeneous wireless sensor networks[J]. Chinese Journal of Computers, 2009, 32(12): 2393-2402.
- [22] GUPTA C, SHARMA R, AGARWAL N, et al. Fault tolerant event detection in distributed WSN via pivotal messaging[J]. International Journal of Computers & Technology, 2013, 7(1): 463-472.
- [23] LI N, HOU J C. FLSS: a fault-tolerant topology control algorithm for wireless networks[C]//Proceedings of the 10th annual international conference on Mobile computing and networking. ACM, 2004: 275-286.
- [24] 于继明. WSNs 基于分簇的多路径路由算法研究[D]. 2008:72-83.
- [25] 王猛. 基于分簇的无线传感器网络多路径路由优化算法的研究[D]. 2014.
- [26] LIU Z, HU M B, JIANG R, et al. Method to enhance traffic capacity for scale-free networks[J]. Physical Review E, 2007, 76(3): 037101.
- [27] ZHANG G Q, WANG D, LI G J. Enhancing the transmission efficiency by edge deletion in scale-free networks[J]. Physical Review E, 2007, 76(1): 017101.
- [28] GUIDONI D L, MINI R A F, LOUREIOR A A F. On the design of resilient heterogeneous wireless sensor networks based on small world concepts[J]. Computer Networks, 2010, 54(8): 1266-1281.
- [29] GUIDONI D L, BOUKERCHE A, VILLAS L A, et al. A tree-based approach to design heterogeneous sensor networks based on small world concepts[C]//Local Computer Networks (LCN), 2011 IEEE 36th Conference on. IEEE, 2011: 666-672.
- [30] FU X, LI W, FORTINO G. Empowering the invulnerability of wireless sensor networks through super wires and super nodes[C]//Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGrid), 2013 13th IEEE/ACM International Symposium on. IEEE, 2013: 561-568.
- [31] Akkaya K, Senel F, Thimmapuram A, et al. Distributed recovery from network partitioning in movable sensor/actor networks via controlled mobility [J]. IEEE Transactions on Computers, 2010, 59(2): 258-271.
- [32] Mi Z, Yang Y. Connectivity restorability of mobile ad hoc sensor network based on k-hop neighbor information[C]//Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on. IEEE, 2011: 1-5.
- [33] LEE S, YOUNIS M. Optimized relay placement to federate segments in wireless sensor networks[J]. Selected Areas in Communications, IEEE Journal on, 2010, 28(5): 742-752.
- [34] 陈林星, 曾曦, 曹毅. 移动 Ad Hoc 网络——自组织分组无线网络技术[M]. 北京: 电子工业

- 出版, 2006, 2-33.
- [35] HUANG W, CHOW T W S. An efficient strategy for enhancing traffic capacity by removing links in scale-free networks[J]. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, 2010, 2010(01): P01016.
- [36] 蒋忠元. 复杂网络传输容量分析与优化策略研究[D]. 北京交通大学, 2013.
- [37] JIANG Z Y, LIANG M G, AN W J. Effects of efficient edge rewiring strategies on network transport efficiency[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2014, 394: 379-385.
- [38] SENEL F, YOUNIS M. Relay node placement in structurally damaged wireless sensor networks via triangular steiner tree approximation[J]. *Computer Communications*, 2011, 34(16): 1932-1941.
- [39] 李飞, 白艳萍. 用遗传算法求解旅行商问题[J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2007, 28(1): 49-52.
- [40] HUANG W, CHOW T W S. Effective strategy of adding nodes and links for maximizing the traffic capacity of scale-free network[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2010, 20(3): 033123.
- [41] LEE S, YOUNIS M. Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum Steiner tree[J]. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 2010, 70(5): 525-536.
- [42] ABBASI A A, YOUNIS M, BAROUDI U. Restoring connectivity in wireless sensor-actor networks with minimal node movement[C]//*Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2011 7th International. IEEE, 2011: 2046-2051.
- [43] SENEL F, YOUNIS M F, AKKAYA K. Bio-inspired relay node placement heuristics for repairing damaged wireless sensor networks[J]. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2011, 60(4): 1835-1848.
- [44] 陈洪生, 石柯. 基于四边形斯坦纳树的无线传感器网络连通恢复[J]. *计算机学报*, 2014, 37(2).
- [45] KASHYAP A, KHULLER S, SHAYMAN M A. Relay Placement for Higher Order Connectivity in Wireless Sensor Networks[C]//*INFOCOM*. 2006, 1: 12.
- [46] GRAHAM R L. An efficient algorithm for determining the convex hull of a finite planar set[J]. *Information processing letters*, 1972, 1(4): 132-133.
- [47] 季赛, 袁慎芳, 马廷准等. 无线传感器网络中节点故障诊断方法的研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(23).
- [48] 谭跃进, 吴俊, 邓宏钟. 复杂网络抗毁性研究进展[J]. *上海理工大学学报*, 2011, 33(6).

致谢

时光荏苒，硕士研究生的学习和生活已接近尾声，回顾在西电三年的硕士生涯，奋斗和辛劳已成为最美的回忆，而我所收获的不只是丰硕的知识，还有一颗感恩的心。值此论文完成之际，请允许我在此对所有关心和帮助过我的老师和同学们表示最诚挚的感谢和最美好的祝愿！

首先我要感谢我的导师刘三阳教授。初入西电求学时，刘老师就教导我要在学业上下功夫，不能荒废短暂的三年时光，提醒我要学会高效地利用一天的时间。刘老师博大精深的学识，创新的思维，严谨的科研态度以及执着的精神都让我受益终身。本论文从选题、开题、设计、实验到论文撰写及定稿，每个流程都倾注了刘老师大量的心血，给我提供了许多宝贵的意见和建议。饮水思源，感激之情无以言表！

感谢数学与统计学院的所有老师在我研究生阶段的学习中所传授的宝贵知识，让我具备了完成我的论文的坚实基础。在他们的课堂上，我也收获了正确的价值观和人生观，他们无私奉献、善于钻研的品质将是我未来生活的榜样。

本论文的完成也离不开实验室朝夕相处的同门师兄弟和师妹们的帮助，通过与他们讨论，让我汲取了许多宝贵的意见。虽有时会浮躁，但是他们的关心和帮助让我感到了温暖，让我充满了力量。在此，我要深深地感谢他们，我会珍藏我们在一起的点点滴滴。

衷心感谢我的家人在我求学道路上的鼓励和支持，感谢他们一直以来对我的辛苦栽培和无私奉献。

最后，感谢百忙之中抽出宝贵的时间评阅本论文的每一位评审老师！

作者简介

1. 基本情况

田秀雯，女，安徽亳州人，1993 年 10 月出生，西安电子科技大学数学与统计学院应用数学专业 2014 级硕士研究生。

2. 教育背景

2010.08~2014.07 淮北师范大学，本科，专业：应用数学

2014.09~2017.07 西安电子科技大学，硕士研究生，专业：应用数学

3. 攻读硕士学位期间的研究成果

3.1 发表学术论文

- [1] X. W. Tian, S. Y. Liu, Z. H. Zhang and H. J. Dong, "A Topology Optimal Algorithm for Improving the Invulnerability of Scale-Free Networks," 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI), Hong Kong, 2016, pp. 94-99. (EI:20171403533490)

3.2 参与科研项目及获奖

- [1] 国家自然科学基金项目，基于鲁棒优化的不确定环境下无线传感网络生存期优化技术（61373174），2014.01—2017.12。
- [2] 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目（JB150716）。



西安电子科技大学
XIDIAN UNIVERSITY

地址：西安市太白南路2号

邮编：710071

网址：www.xidian.edu.cn