

无线传感器网络连通恢复综述*

吴春辉, 陈洪生[†]

(湖北科技学院 计算机科学与技术学院, 湖北 咸宁 437005)

摘要: 针对无线传感器网络中连通恢复问题,分析和总结了近年来相关的主要方向和研究成果,同时对无线传感器网络连通恢复解决方法进行了分类和总结,并指出了其中的不足与未来的研究方向。

关键词: 无线传感器网络; 连通恢复; 解决方法

中图分类号: TP393

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2014)05-1302-06

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.05.004

Connectivity restoration review for wireless sensor networks

WU Chun-hui, CHEN Hong-sheng[†]

(College of Computer Science & Technology, Hubei University of Science & Technology, Xianning Hubei 437005, China)

Abstract: This paper studied connectivity restoration of WSNs, analyzed and summarized the related main direction and the research results in recent years, and classified connectivity restoration solution of WSN, pointed out the deficiency and future research direction.

Key words: wireless sensor network (WSN); connectivity restoration; solution

随着电子技术的飞速发展,无线传感器网络(WSN)已经得到越来越广泛的应用,并且WSN真正实现了无处不在的理念。因此不管是在民用还是在特殊行业,特别是在一些恶劣环境如矿井监测、环境监测、军事侦查、水下监测、海岸线监测、目标跟踪等方面得到了广泛引用。由于传感器自身资源的限制,其能量有限,并且在恶劣环境下很容易被损坏,而在WSN中网络的连通性非常重要,特别是在军事、环境监测等行业中,有可能由于网络的损坏导致不可估量的损失,因此在出现网络非连通时能否及时准确地恢复网络连通非常重要。

连通是指网络中任何两个节点之间都有通路,各个节点实现无阻碍的通信,可以互相交换信息,实现网络畅通。 K 连通是指网络中任何两个节点之间有 K 条独立的通路,连通性方面有1连通、2连通、 K 连通等多种方式的连通,其连通度越大,网络的鲁棒性越好。连通恢复是指将非连通的网络通过一些方法使得网络变为连通的过程。连通恢复中,针对连通度的问题有单连通恢复和 K 连通恢复,在网络恢复时可根据实际情况实现相应的 K 连通。单连通是指只要使得网络连通即可,而 K 连通则是要使得网络中所有节点达到 K 连通。连通恢复基本都是在节点失效导致网络非连通情况下进行的,而节点失效无非就是以下几种情况:单个节点失效情况下的连通恢复;多个节点失效情况下的恢复;几个节点同时失效情况下的恢复;网络被分割成很多孤岛情况下的连通恢复。

1 现有的解决方法

当前关于连通恢复的研究有很多,并取得了不错的效果,综观国内外关于恢复连通的文献来看,恢复连通的方法有很多,大致可以分为以下几类:首先从节点是否移动上可以分为静态无线传感器网络下的连通恢复和存在移动节点的动态无

线传感器网络下的连通恢复;还有一种划分方法就是根据是否需要布置新的中继节点分为需要重新布置新的节点到失效节点或失效区域位置的方法和利用原有节点通过移动其邻居节点实现连通。在恢复连通过程中必然会提到覆盖性问题,也就是说恢复连通的同时还要尽量保持原来的网络覆盖,否则在实际应用中将受到很多影响。针对当前文献中提到的一些方法总结得出表1进行比较对照。

表1 各种方法在各文献中的使用情况对照表

文献	模型		时机			实现		资源不足		特殊情况	
	图	最小生成树	斯坦纳树	主动	被动	主/被动	集中式	分布式	受控移动	部署新节点	三 K 覆盖维 K 连通
[1]			√		√		√			√	
[2]	√			√				√			
[3]			√		√			√	√		
[4]											√
[5]											√
[6]											√
[7]	√				√		√			√	
[8]	√				√			√	√		
[9]	√				√			√	√		
[10]	√					√		√	√		
[11]	√				√		√			√	
[12]	√					√		√	√		
[13]	√				√			√	√		
[14]	√	√			√		√			√	
[15]											√
[16]											√
[17]			√		√			√		√	
[18]											√
[19]	√				√			√	√		
[20]	√				√		√			√	√
[21]	√				√			√	√		

1.1 基本方法

1.1.1 静态网络中的模型

在无线传感器网络中恢复连通的理论模型有很多,大部分

收稿日期: 2013-09-12; 修回日期: 2013-10-27 基金项目: 校级青年科研基金资助项目(KY11061)

作者简介: 吴春辉(1981-),女,湖北通城人,讲师,硕士,主要研究方向为无线自组织与传感器网络;陈洪生(1981-),男(通信作者),山东沂源人,讲师,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、延迟容忍网络(chenh1981@163.com)。

可以归结为以下几种:

a)图。通过构建无向图模型进行连通恢复,以传感器节点作为图的顶点,能够通信的节点间用一条无向边表示,从而通过无向图模型来抽象整个网络结构,一旦有节点失效可以根据失效节点在图中的位置采取相应的方法,这其中就有关节点和叶节点的概念。若叶节点失效可以不用作任何处理都可以保证连通,但可能有一定的区域不能被覆盖;若关节点失效就要采取或者移动邻居节点或者重新布置新节点的方式来恢复连通。

b)最小生成树。通过建立最小生成树来恢复连通,此模型是把节点抽象成一个个的树节点,然后采用普里姆算法或克鲁斯卡尔算法,以节点间的欧氏距离为权值找到最小生成树,实现连通或通过此方式布置相应节点。

c)斯坦纳树。通过找到斯坦纳树顶点来确定重新部署节点位置或移动节点移动到的目的位置。斯坦纳树问题是一个经典的 NP 问题,所以特别是在极度恶劣环境下网络遭到严重破坏时,会用到此方法来找布置位置。当然在无线传感器网络连通恢复上有很多文献都是使用了构建斯坦纳树的理论进行研究,并取得了很好的效果。

1.1.2 时机角度

一般情况下节点的破坏程度不大,一般是单个节点被破坏或者多个节点在不同的时刻失效,当然也可能导致网络被分成几个孤立的部分,对于以上情况很多文献都提出了很好的方法来解决连通问题,根据恢复时机不同主要包括主动恢复、被动恢复和主/被动恢复。

a)预先处理的主动恢复。此种恢复方法是指在没有出现失效节点之前网络中各节点就进行了一些预先准备决策工作,以备出现节点失效或网络非连通时立即进行恢复。其中文献[2]就是采用的此种方式进行无保障无线传感器网络下约束策略自重构,作者为了在无线传感器网络下的自组织而提出了无保障无线传感器网络下策略约束自重构(policy controlled self-configuration for unattended wireless sensor networks,PCSSN)方案。此算法包含拓扑发现和拓扑维持两个阶段。基于马尔可夫决策处理而设计了一种触发最优个数节点的策略,因此应用精度不会受到影响。这种策略是基于邻居节点间的距离、剩余能量和邻居个数,它们代表着跳数、网络生命周期和网络连通状态的指标。作者还考虑了节点失效的情况,因为节点失效在恶劣无保障环境下会经常出现。整个系统任务使用的是平面结构,未考虑任何分层事件,从而减小了问题的复杂度。每个节点的结构如图1所示,每个节点都包含一个决策机器(decision maker,DM)来评估决定局部最优活动节点。DM主要由两部分组成:一个表Tinfo,用来记录一跳邻居节点的结构信息;一个是数据结构ER_i,用来记录定义好的应急节点(当此节点失效时,此应急节点作为后备,立即生效,从而保证整个网络的连通性)的IDs。

表Tinfo有五个字段,即node identifier(NID)、residual energy(RES)、distance from the neighbor(DIS)、timestamp(TS)和the current state of the node(ST)。DIS存储邻居节点与当前节点的距离用 $d(n_i, NID)$ 表示,TS存储信息最后更新的时间。每个节点包括两个列表,一个是活动邻居列表(AC_i),另一个是被动邻居列表(PN_i),AC_i包含节点 N_i 感应范围内所有活动节点的IDs,而PN_i包含节点 N_i 感应范围内所有被动节点的IDs。

在PCSSN中,有几个参数非常重要: T_{re} (reorganization time)重新构建时间间隔; T_{chk} (check if neighbor nodes are experiencing failure)检查失效邻居节点时间; T_{th} 表示节点最大延迟

时间。在非常恶劣的环境下应该使得以上几个参数的值越小越好,如果在不是很恶劣环境下这几个参数可以成比例地增大,如果允许间断的网络这些值可以很大。

此算法的优点是:(a)由于采用的是分布式处理方法,适用于大规模的环境;(b)在能量消耗上相比其他算法,在节点逐步增多、稠密的情况下,效果很好;(c)功效上也就是丢包率上比其他算法优越;(d)覆盖率也比较高;(e)此算法对在不可估计恶劣环境下的网络有较强的应用价值,因为在此算法中考虑了节点失效情况下实时地替换节点,从而保证网络的连通性。

b)被动恢复。此种恢复是指在节点失效时才进行相应的处理恢复,在被动恢复中也有些方法进行了预处理,如预先保存了邻居节点的信息等,也有些方法没有保存任何信息,文献[8,9,21]都是保存了邻居节点信息,然后根据邻居节点信息进行恢复。其中文献[8,9]是通过运动协助连接恢复,主要提出了单连通和双连通的算法思想:(a)找到失效节点并且初始化恢复处理,主要是判断失效节点是否为边界节点,其邻居节点是否为边界节点及失效节点是否导致剪裁顶点(cut vertex)的出现;(b)选择哪个节点作为移动节点和移动到哪里去,主要从最小节点度、最短距离和最高节点编号几个方面考虑;(c)节点重置,如果节点移动到指定位置后满足了要求就不用再移动其他节点,若不满足则再移动其邻居节点中的边界节点,按照瀑布重置的方式继续下去,直到满足要求为止。通过总的传输距离和消息数等性能评估参数进行了实验模拟。

对于此算法中的一些定理及定义存在的一些问题在文献[8]中作了详细的说明,其算法中对某些特殊情况不适用,甚至不能实现连通,同时在覆盖性上也没有考虑。笔者认为在此文中只考虑了单个节点失效,而在实际情形下有可能很多节点甚至大规模节点出现失效,此算法可能就不适用。在此方面,文献[1,3]都有所涉及采用建立斯坦纳树的启发式方法,通过加入一些中继节点或提前布置一些冗余中继节点进行移动实现连通。但是上述文献中也只考虑了把网络连通即可,未考虑整个区域的覆盖及双连通或多连通来增强其鲁棒性。文献[4]提出了一种新的思想,即蜘蛛网式地布置节点,实现网络连通,这样提高了连通性和覆盖性,但也增加了布置节点的个数。以上所有的修复工作都是考虑节点是二维分布即同一平面上的情况,而实际情况是节点分布可能是三维,即不在同一个平面的情况下该如何进行网络的修复。在文献[4~6]中都介绍了一些三维传感器网络的方法,可以考虑将其应用来解决三维传感器网络下的网络恢复问题。

文献[21]也提出了一种基于K跳近邻局部信息恢复网络连通的策略(CRC)。这种策略主要包括两步:(a)其设计一种候选者选择算法来指派每个恢复职责到最好的可用的候选者节点;(b)设计一个移动控制器来驱使最好的可用候选节点到期望位置,从而避免内部节点的冲突和网络的再分割。此算法经过仿真验证性能良好。

c)主/被动混合恢复。此类恢复是指即要作一些预先处理如保存邻居节点信息等,又需在出现节点时才进行处理。对于此种恢复,文献[12,13]中就采用了主/被动混合恢复。

文献[12]提出了一种恢复内部连通性的局部性算法(RIM),此算法是一种分布式的恢复内部网的算法,在节点失效后可以有效地恢复网络连通。RIM不同于其他算法需要分析和评估失效节点,而是直接触发局部恢复处理过程迁移失效节点的邻居节点,同时为了减少消息负载,RIM选择移动距离最小的节点移动。主要步骤为:保存一跳邻居节点信息表、探测失效节

点并初始化恢复过程,通过瀑布模型进行节点恢复,并通过通信半径、布置节点个数、移动距离、交换消息数等参数进行评估。此算法尽管性能良好,但是此算法只考虑了单个节点失效情况,没考虑同一时刻多个节点失效的情况,同时未考虑在恶劣环境下大面积节点失效的情况,且未考虑覆盖性。

文献[13]提出了 DCR,一种新的分布式的分割探测和连接恢复算法来容忍失效节点,DCR 提前根据局部拓扑信息标志在网络连通性上的关键节点,并且恰当地指派非重要的备用节点。当探测到失效节点时,备用节点就会初始化恢复过程,这将会涉及到多节点协调重布置,作者还提出了 DCR 的扩展版 RAM 用来处理多节点失效的情况。提出的算法力求避免拖延,使得恢复局部化并且最小化移动负载。此文献提出的 DCR 和 RAM 两种分别对单个和多个节点失效时进行网络恢复的算法,采用的机制是提前预测和及时响应相结合的混合算法进行恢复,并且分别通过一些参数来判定备用节点,与前人文献的不同在于采用混合局部性探测恢复算法,并且是通过一跳邻居内来决定备用节点,仅实现 1 连通情形下的算法。在选择备用节点上 DCR 使用的参数是 travel feasibility、neighbor actor status(NAS)、actor degree(AD)、inter-actor distance(ID)。RAM 使用的参数约束是:(a)当关节点选择备用点时,首先选择非关节点并且不服务于其他节点;(b)一个关节点除非没有被其他节点指派才可被选为备用点;(c)关节点 A 选择非关邻居节点 B 作为备用点, RAM 要求 B 可以通过以上同样的方法选择备用点 C,但是节点 B 的状态不能改变为关节点。该算法的不足在于两种算法在解决恢复问题时,只考虑了 1 连通,网络的鲁棒性差,未考虑覆盖问题,当在恶劣环境下大规模的节点失效时,算法是否还有效,并且覆盖度必然降低如何解决。

1.1.3 算法实现

从算法实现角度分析,各类文献大部分都是采用了集中式或分布式两种算法中的一种或两种结合来实现。

a)集中式。它是指算法在执行时,对所有参与运算的节点一起执行,互相之间存在联系。其优点是算法实现比较简单,缺点是算法效率随着问题规模的增大而增大,不适用于大规模网络。文献[1,7,11,14,20]等都是采用了集中式算法。

b)分布式。它是指算法在执行时,不是整体一起执行而是局部地以部分为单位分别执行算法,互不干扰,同步进行。缺点是算法实现相对较复杂,优点是算法效率随问题规模的增大变化不大,故分布式算法适用于大规模网络。很多文献中都采用了此种算法,如文献[2,3,8~13,17,19,21]等。

1.2 资源不足

在当前无线传感器网络应用中,很多应用都是在环境非常恶劣的条件下进行的,所以恶劣环境下的连通恢复显得尤为重要。当前有很多研究者在这方面进行了研究,并取得了一定的效果。在恶劣环境下如果节点被破坏,一般都是大面积的损坏,这时资源会出现不足,一般都需要重新布置新的节点,当然也有在布置节点时就布置很多冗余节点,一旦失效,通过冗余节点进行恢复。因此,在此种情况下一般有两种方法恢复:通过冗余节点的受控移动及通过布置新节点。

a)受控移动。它是指将满足某些条件约束的节点在某种事件触发下移动到目标位置。很多文献都采用了此方法恢复连通。

文献[10]通过受约束的移动实现分割网络下的分布式恢复,作者提出的恢复单个节点失效和多个节点(两个为例)失

效的方法,其核心是利用了约束集的思想,提前分布式地计算出每个节点的邻居节点中的支配节点或非支配节点及是否为凸顶点,在节点失效时立即判断哪个节点作为替换节点,然后进行移动,从而使得整个网络连通;当然在多个节点失效时,有可能出现路径和替换节点的冲突问题,故作者提出了加锁机制来解决这种冲突,并且取得了很好的效果。但是还有很多问题需要解决,如在启发式算法的应用上还需要更深的研究,只考虑了连通性未考虑覆盖性,需要同时考虑这两方面。

文献[3]提出在无线传感器网络下使用最小斯坦纳树恢复多重同时失效,此文提出的有效的恢复连通的策略是通过移动最少的中继节点,找到最优数目的中继节点及其位置是 NP 难题,所以采用启发式方法。作者使用最小斯坦纳树方法提出了分布式最优布置中继节点算法(DORMS)。由于需要自动操作,在大规模网络中的分析是很难实现,DORMS 移动每个部分中的中继节点到布置区域的中心。当中继节点在彼此的传感范围内时,被分开的部分就恢复了操作,即网络连通。DORMS 还通过斯坦纳树初始化内部部分拓扑使得需要的中继最小。自由的中继可以返回到各自的部分以重复它们的预失效任务。

DORMS 由三阶段组成,即初始化响应阶段、最优化阶段和重布置阶段。此文所提出的算法是最好的一种分布式重新布置新节点而达到连通的方法,同时还通过最优化使得使用尽量少的中继实现连通从而节省资源。

文献[19]不同于其他文献的是不需要保存邻居信息,提出了最小移动拓扑修复算法(LeMoToR),此算法是一种分布式方案,它依赖于节点对网络的局部观察。为了恢复连通,此算法致力于迁移最少数目的节点并且减少移动距离和消息复杂度。不同于要保持 1 或 2 跳邻居节点信息的方法,LeMoToR 算法为了知道拓扑结构,利用存在于网络中路径发现活动,同时避免了故障前额外通信负载。如果失效节点是一个关键节点,即失效导致网络被分割成多个孤岛部分,此时找出邻居节点所在的孤岛节点最少的那个邻居节点移动到失效节点的位置,然后用同样的方法进行循环,直到整个网络连通。其主要步骤是错误探测、最小块(孤岛)识别、替换失效节点和孩子节点移动。该算法通过模拟性能较好,但是其方法并不是高效最优的,因为其中只考虑了 1 连通,没有考虑覆盖问题。

b)布置新节点。它是指在网络受到严重破坏、并且所布置的冗余节点也无法进行补救时必须采用的方法。

文献[1,17]都是采用了斯坦纳树理论部署节点,斯坦纳树也是一种近似理论,就是有些问题无法找到最优时,需要找到近似最优,斯坦纳树就是一种找到近似最优的方法,因此在部署新节点时很多文献中采用了此方法。

文献[1]提出了在结构被破坏的无线传感器网络中通过三角斯坦纳近似树布置中继节点,并取得了很好的效果,作者通过部署少量的中继节点来重建一个健壮的网络拓扑。找中继节点最小值和位置是一个 NP 问题,因此作者使用启发式方法进行。作者提出了一个新的三步算法 FESTA,这个算法是建立在斯坦纳恰当三角上。每步通过一终端表示,三个终端中的每个子集构建了一个三角关系,找到三角关系中的最优解决方案是一个相对容易的问题。第一步 FESTA 找到最好的三角并且通过重建内三角连接建立片岛,然后连接各个孤立的片岛,最后斯坦纳边界被最优化。此文提出的方法与其他几种增加资源的算法相比,从增加中继节点个数、平均节点度、平均路径长度、覆盖范围等几个方面,在各个性能参数上都表现出了其优越性。同时还对算法时间复杂度进行了分析,得到其时间

复杂度为 $O(N^4)$, 其中 N 为终端个数即孤岛个数。

对此文献提出的算法存在一些缺点及一些见解:

(a) 使用的是启发式算法, 得到的结果必然是局部最优而不是全局最优, 而局部最优的效果到底如何, 不好评估, 可以从其他的优化算法着手尝试。

(b) 在布置中继节点时只是直接考虑直接加入, 未考虑用已有的传感器节点充当中继节点来进行连接。是否可以通过计算确定了中继节点放置的位置后, 直接从三角的三个集合中找到能量大且距离中间位置近的传感器节点, 使其移动到相应位置上去, 从而连通各个孤岛。

(c) 是否可以根据文献[22]中确定的能量消耗最大区域采取预先防范措施, 如在此区域再部署一些新节点等。

(d) 很多文献中都是从平面角度考虑的连通问题, 是否可以从三维甚至多维空间角度来解决连通性问题, 如本文中是否能在空间中部署一些新的中继节点, 这样可能会减少中继节点的个数, 并且连通性很好。

文献[17]提出分割无线传感器网络中的最佳连接恢复, 此文提出的 CIST 是一种新颖的连接多个孤岛的启发式部署节点的方法, 与其他方法一样都是用一个单独的节点代表一个孤岛, 此方法不同于其他方法的是, 在构建连接的内拓扑时所有位于孤岛边界的都被认为是分界点。此方法的主要思想是找到三个孤岛中最好的三角集, 使得通过斯坦纳最小权三角连接孤岛所需节点数比通过斯坦纳边连接要少。此方法的缺陷在于用的启发式方法, 当然对于恢复问题, 很多都是 NP 问题, 无法用最优方式解决, 并且此方法是集中式的算法, 若规模很大时, 其算法的时间复杂度将相应会增加, 这一点作者没有进行分析; 当权值小于 0 时, 采用直接两两直接连接方式是否为最佳方式, 也不一定, 实验数据也不大, 同时在高连通性全覆盖性等服务质量上也没有保证。

文献[7]提出结构上被破坏的无线传感器网络下的启发式高鲁棒性的中继节点的部署, 此文使用了与以前不同的算法部署中继节点, 使用蜘蛛网式的布局方法。首先通过凸壳算法确定各个孤岛的大概范围边界, 然后再计算出最中间的位置, 从每个孤岛中选出一个代表性的节点, 连接每个孤岛中的节点和中间位置节点从而形成一条直线, 然后再根据这两点间的欧氏距离从大到小排序, 按照顺序从最大的开始布置中继节点, 并且采用左右连通的方式, 直到所有孤岛都达到连通状态。具体部署如图 2 所示。

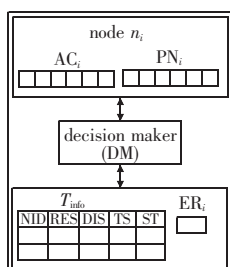


图 1 策略约束自重构方案图

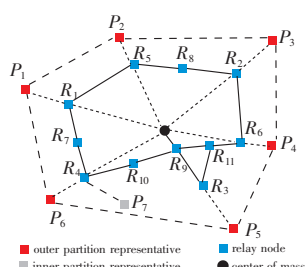


图 2 蜘蛛网式中间节点部署图

此方法的优点是, 与斯坦纳树算法相比在连通性和覆盖性上都有明显的优势, 但缺点就是使用的中继节点个数明显比前面方法要多; 并且在连通性和覆盖性方面只是从实验的角度进行了验证比较, 没有从理论上证明到底是几连通, 覆盖率达到多少, 都没有给出具体的定理及说明, 同时也只是从二维角度出发, 未考虑三维情况下如何部署。

文献[11]提出无线传感器网络下连接孤岛的中继节点分

布优化, 作者研究了连接无线传感器网络中的孤岛或自动集问题, 提出了一种基于网格的分布式最优布置中继节点算法 (CORP), 这种方案是基于向中间靠拢布置额外节点来建立各个孤岛之间的连接。此算法主要步骤为:

(a) BC identification phase, 即最好邻居节点的选择步骤, 首先在确立了边界节点后, 对每个边界节点都要确定一最好邻居节点, 通过计算每个边界节点的邻居节点与其他孤岛之间的距离之和, 取最小的那个格子作为 BC, 并且在 BC 处布置新的中继节点, 然后确立新的边界节点, 一直循环下去直到所有孤岛都连接在一起。当然其中有可能出现 BC 节点碰头的情况, 如果出现此情形就合并, 从而实现了两个孤岛的连接, 只需用一个合并节点即 JC 来表示其合并即可。具体如图 3 所示。

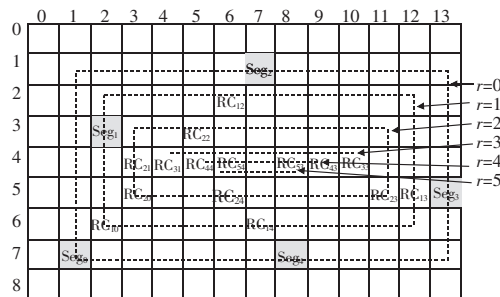


图 3 最好邻居节点的选择图

(b) Pruning phase, 即剪裁步, 实际是优化布局节点, 尽量使用少的中继节点实现连通, 避免资源的浪费。其优化如图 4 所示。此算法的模拟实验是基于集中式计算方式进行的, 实际上如果在大规模网络中使用集中式效率会下降, 而分布式方法作者只作了简单介绍, 并没有详细说明, 故此算法对于小规模网络即孤岛很少, 集中式计算的情况下性能不错, 但是在大规模分布式计算方式下没有进行验证分析, 并且在确定每个孤岛的核节点时没有考虑优化; 第二步的剪裁效果并不是很好, 同时更没考虑整个网络的覆盖性, 尽管进行了连通度的分析, 但是没有一个是定量的多连通的说明。

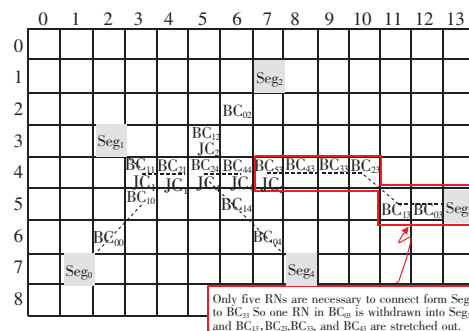


图 4 剪裁优化部署中继节点图

文献[14,20]在恢复连通时都考虑了服务质量即最重要的属性覆盖度, 把连通性和覆盖度两者结合起来进行恢复, 这在以往的文献中是没有的, 特别是文献[14]提出的方法是前面所没有的, 对无线传感器网络具有重要意义。

文献[14]提出在无线传感网络下连接孤岛的有效服务感知中继节点布置算法, 通过布置最少数的中继节点构建这些孤岛以实现令人满意的连通性和服务质量需求。寻找最少数量和合适位置的中继节点是 NP 难问题, 故采用启发式方法。节点的部署区域是建立了一相同大小的单元式的网格模型, 对每个网格单元根据布置的中继节点的剩余能量分配费用。优化问题就转换为找到基于网格的最小花费路径同时兼顾服务质量需求的问题。此文不同之处在于将服务质量加入到了恢复

连通中,并且通过将区域划分成网格,以网格为单位建立有向带权图,用启发式算法找到最短路径,从而布置最少的中继节点来实现连通,同时兼顾了服务质量,经实验证明,此算法在布置节点个数、算法运行时间、恢复网络拓扑的连通度及容错能力上面都比以往的一些基本算法如 MST、1tRN、STP-MSP、AIG 等性能要好得多。

文献[20]提出无线传感器网络下一种布置恢复连通节点的简单高效方法,通过计算位置信息来恢复连通,如果整个网络原来是 K 连通的,在用此算法恢复时尽量实现 K 连通。首先判断两个孤岛中最小的那个节点数,若小于 K ,那么最多只能实现孤岛中最小值的连通,否则可以实现 K 连通,然后找到两个孤岛中最小距离的节点对,同时计算出它们之间的距离。根据距离与传感半径的比值计算出要布置的节点个数并布置相应个数的节点,从而实现了 1 连通;循环此算法,继续找最小距离节点对,布置新节点,直到实现 K 连通为止。此算法能实现 K 连通,但是此算法只是考虑网络被分割为了两个孤岛的情况,若不止两个孤岛,还用此方法效果不一定好,并且在每次找两个最小距离点时其时间复杂度也很高,同时各个节点还要知道自己的位置,若网络中有些节点是动态变化的,那么此方法也不适用。

1.3 特殊情况

特殊情况主要考虑了三维无线传感器网络下的连通恢复方法及覆盖性研究。三维无线传感器网络的应用越来越广泛,特别是在海洋和天气预报等方面,对三维传感器网络的研究显得迫在眉睫。当下也有很多关于这方面的研究,大部分都研究其覆盖度连通性及路由协议等方面,但是真正兼顾连通和覆盖的研究并不多,并且恶劣环境下连通性和覆盖度的研究更少。

文献[5,6,15,16,18]分别从不同角度对三维无线传感器网络连通和覆盖进行了研究,并得出了一些定理和结论,为以后的研究和应用提供了理论依据和实践指导。文献[5]构造低连通全覆盖三维传感器网络,通过规则方格布局设计了一个样式集合实现了 1、2、3、4 连通和全覆盖,并且证明了它们在通信半径大于传感半径下的任意值时的最优性。作者还研究了所有提出的低连通的演变。在三维传感器网络中与最优部署相关的两项工作是球体覆盖和在不相关计算几何下的 PACK 及连通性和覆盖性。文献[6]在三维无线传感器网络中使用连续过滤实现关键稠密下的覆盖和连通,连续过滤的理论非常适用在无线传感器网络下连通性问题,即寻找网络是否提供了长距离多跳的通信。在此文中,作者致力于过滤在 3D WSNs 下覆盖性和连通性中的作用。由于覆盖和连通的相互依赖性,问题不仅是连续覆盖问题而是一个相互协调的连续过滤问题。首先通过覆盖过滤计算关键稠密度;然后通过连接过滤计算关键稠密度;最后通过覆盖和连通过滤两者一起计算关键稠密度。对于以上三个问题,文中还计算了它们对应的关键网络度。文献[15]在三维无线传感器网络下连通性的 K 覆盖和度量的研究中提出了 reuleaux tetrahedron 模型,从而保证在 3D 区域下的 K 覆盖。基于 reuleaux tetrahedron 的几何特性推导出了 3D 空间下确保 K 覆盖的最小传感器三维稠密度,并且还计算出了三维无线传感器网络下同构和异构情况下 K 覆盖的连通度。同时基于禁止错误集理论提出了一种更接近现实的度量连通性的方法,通过这种理论发现,三维 K 覆盖下的无线传感器网络可以容忍很多传感器节点失效。此文主要在三维 K 覆盖无线传感器网络下提出了一些见解,并且基于一些理论推

导出了一些实现最小和最大覆盖的公式,这些公式对进一步研究三维传感器网络下的覆盖性和连通性都有很重要的意义。同时作者还根据实际情况提出了随机概率模型下的覆盖性和连通性的解决方法,并且通过模拟验证了其适用性,此种方法更接近于现实情况。当然作者在研究时都没有提到大规模毁坏情况下如何实现覆盖和连通,并且都基于包括 sink 节点情况下,有时很可能 sink 节点也失效,文中未提到如何解决,当然这可能不是此文的重点,但是在实际情况如下文中所说的在将节点布置在森林中、水下等更恶劣的环境如战场中时,以上所说情况是会发生的。文献[16]在无线传感器网络下实现全覆盖和 K 连通的最优部署方式,研究了在不同的传感通信范围和感应范围下同构无线传感器网络中实现全覆盖和 K 连通。特别是作者提出了 3 连通和 5 连通的新方式,并且发现存在一种基于六边形的基本通用方式能产生出所有的知道的最优样式。以前提出的基于维诺图的方法不能用来证明最优的新的样式,作者提出了一种基于多边形部署的方法理论,同时证明了在一定范围的 R_c/R_s 下达到 3、4、5 连通的最优部署样式,还证明了在所有范围的 R_c/R_s 下达到 6 连通的最优部署样式。当 $K > 6$ 时, K 连通是很复杂的,并且作者也没能构建孤岛式的原子部署多边形下的网络,同时在 R_c/R_s 更小的情况下实现 3、4、5 连通是以后研究的重点。此文提出的方法在实现全覆盖 K 连通同构的无线传感器网络中能提供一些最优的部署方式,并且给出严格的理论证明和相应的公式参数,并通过模拟实验进行了验证,同时作者应用传感模型和通信模型,考虑了在实际情况下的传感范围和通信范围所受到的影响,给出了相应的概率计算公式及参数设置。但在实际情况下,真正实施部署时有可能存在部署错误,实际的传感范围和通信范围都应设置得比原始值小些,还有可能受地理环境的影响,再就是实际中网络有可能是异构的,这些情况都是需要考虑的。在实现网络恢复时,可以考虑使用此文中提出的一些理论进行相应的全覆盖和 K 连通,当然这势必会增加节点个数,同时此文中提出的理论方法也可应用于三维传感器网络中实现相应条件下的覆盖和连通。文献[18]提出传感器下的最优多覆盖,第一次得出两覆盖部署样式下的最优部署密度边界和通过传感节点下的维诺多边形产生的是一致的,并且基于最优边界提出了最优两覆盖样式,然后作者还考虑到连通性的需求扩展了这些样式并且设计了最优样式集合可以达到两覆盖 1、2、3 连通。此文首次找到了最终解决最优多覆盖问题的方法,得到的结果具有重大的理论和实践意义。以后的工作是考虑全局最优覆盖样式和扩展最优样式到非圆盘传感模型和通信模型。

此外,文献[4]研究了三维定位的问题,为在极度多路径环境下无线传感器网络节点的定位提出了一种超宽带三维定位技术。这里的新方法主要有两步:a)一种超宽带脉冲边缘侦查方法,它结合一系列存在于空间的测量方法来隔离从容器墙中不需要的多路径干预瞄准线部分;b)一种新的基于对球面功能交叉点统计分析的定位算法,用于接收时域数据以提高每次测量定位的评估时间。这两种特征结合有利于精确定位和累积错误评估资源,并且产生了一种在很强的散射环境下逼近 2 cm 的解决方案。此文对连通性和覆盖度都有重要意义,可以在三维无线传感器网络中通过此算法进行相关的定位来布置或移动节点实现连通和覆盖。文献[22]提出了无线传感器网络下的损失推理算法来提高数字生态环境下的数据可靠性,提出了一种基于被动测量的损失推理算法(loss inference based on passive measurement, LIPM),用来推断 WSN 下连接损

失性能,分别建立了树模型和损失模型,并且首次将轮廓图应用到无线传感器网络损失性能评估中,从而使 LIPM 算法快速定位能量损失最大区域,对错误诊断起到非常重要的作用。此文献对失效节点预测上有着重要的意义,可以通过此方法预测出最有可能失效的区域以进行特殊恢复连通处理。

总之,无线传感器网络中连通恢复的方法有很多,以上对当前一些文献所提出的方法进行了分析,任何一种方法都有其优点所在,目的都是以最少的资源实现网络连通,同时尽量兼顾区域的覆盖性。但是真正最优的方法是很难找到的,研究者也都为此进行了不懈的努力。

2 不足与未来的方向

针对目前的研究来看,在 WSN 中恢复连通上存在很多具有挑战性的问题:

a)在网络遭到大规模损坏时,如何找到最优的方案重新部署新的节点或移动邻居节点到相应位置,此问题已经过论证为 NP 问题,因此几乎所有文献在解决这一问题时都是采用启发式算法寻找布置位置,并通过实验来验证算法的性能。

b)在恢复连通时,都只考虑了如何恢复连通,而未从服务质量上考虑,特别是覆盖度上没有考虑,仅有几篇文献在这方面进行了研究,取得了一定的效果。

c)在恢复连通上各方面性能需要考虑:(a)自组织性,对于出现节点失效时,如何能尽快高效地自组织网络实现连通及覆盖;(b)可靠性,若出现单个或大规模节点失效需通过节点移动重新部署或重新放置节点时,移动节点的智能性移动速度等都非常重要;(c)实时性,若出现网络非连通时,能够实时监测到并且快速恢复连通,其中的反应时间要快,因为在有些网络中特别是军事中,实时性要求很高。

d)目前无线传感器网络连通恢复大部分都是在二维平面下进行的研究,而当前三维传感器网络的应用越来越广泛,特别是在海洋探测、森林监测、高山环境监测等方面,所有三维传感器网络下的连通恢复也是非常具有挑战性的。

3 结束语

本文对当前与无线传感器网络中连通恢复及覆盖相关的主要研究成果进行了综述。当前大部分研究都处在摸索实验研究阶段,特别是三维传感器网络下的连通恢复和覆盖都处在理论研究阶段,真正用于实际的系统还很少,但是对这方面的研究是当前的热点,因为现在和将来都将是传感器无处不在的物联网时代,所以对无线传感器网络中连通恢复及覆盖的研究具有重大的意义。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] MISRA S, JAIN A. Policy controlled self-configuration in unattended wireless sensor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2011, 34(5): 1530-1544.
- [3] LEE S, YOUNIS M. Recovery from multiple simultaneous failures in wireless sensor networks using minimum Steiner tree[J]. *Parallel Distributed Computing*, 2010, 70(5): 525-536.
- [4] DAVIS J G, SLOAN R, PEYTON A J. A three-dimensional positioning algorithm for networked wireless sensors[J]. *IEEE Trans on Instrumentation and Measurement*, 2011, 60(4): 1423-1432.
- [5] ZHANG Chuan-lin, BAI Xiao-le, TENG Jin, et al. Constructing low-connectivity and full-coverage three dimensional sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(7): 984-993.
- [6] AMMARI H M, DAS S K. Critical density for coverage and connectivity in three-dimensional wireless sensor networks using continuum percolation[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(6): 872-885.
- [7] SENEL F, YOUNIS M, AKKAYA K. A robust relay node placement heuristic for structurally damaged wireless sensor networks[C]//Proc of the 34th IEEE Conference on Local Computer Networks. 2009.
- [8] WANG Shi-guang, MAO Xu-fei, TANG Shao-jie, et al. On movement-assisted connectivity restoration in wireless sensor and actor networks[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2011, 22(4): 687-694.
- [9] ABBASI A A, YOUNIS M, AKKAYA K. Movement-assisted connectivity restoration in wireless sensor and actor networks[J]. *IEEE Trans on Parallel and Distributed Systems*, 2009, 20(9): 1366-1379.
- [10] AKKAYA K, SENEL F, THIMMAPURAM A, et al. Distributed recovery from network partitioning in movable sensor/actor networks via controlled mobility[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2010, 59(2): 1105-1120.
- [11] LEE S, YOUNIS M. Optimized relay placement to federate segments in wireless sensor networks[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2010, 28(5): 742-752.
- [12] YOUNIS M F, LEE S, ABBASI A A. A localized algorithm for restoring internode connectivity in networks of moveable sensors[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2010, 59(12): 1669-1682.
- [13] IMRAN M, YOUNIS M, SAID A M, et al. Localized motion-based connectivity restoration algorithms for wireless sensor and actor networks[J]. *Journal of Network and Computer Applications*, 2012, 35(2): 844-856.
- [14] LEE S, YOUNIS M F. Effective QoS-aware relay node placement algorithm for connecting disjoint wireless sensor subnetworks[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2011, 60(12): 1772-1787.
- [15] AMMARI H M, DAS S K. A study of k-coverage and measures of connectivity in 3D wireless sensor networks[J]. *IEEE Trans on Computers*, 2010, 59(2): 243-257.
- [16] YUN Zi-qiu, BAI Xiao-le, XUAN Dong, et al. Optimal deployment patterns for full coverage and K-connectivity ($K \leq 6$) wireless sensor networks[J]. *IEEE/ACM Trans on Networking*, 2010, 18(3): 934-947.
- [17] SENEL F, YOUNIS M. Optimized connectivity restoration in a partitioned wireless sensor network[C]//Proc of IEEE GLOBECOM. 2011: 1-5.
- [18] BAI Xiao-le, YUN Zi-qiu, XUAN Dong, et al. Optimal multiple-coverage of sensor networks[C]//Proc of IEEE INFOCOM. 2011: 2496-2506.
- [19] ABBASI A, YOUNIS M, BAROUDI U. Restoring connectivity in wireless sensor-actor networks with minimal node movement[C]//Proc of the 7th International Wireless Computations and Mobile Computing Conference. 2011: 2046-2051.
- [20] WANG Da-jin, LIN Li-wei, XU LI, et al. A simple and cost-effective scheme to deploy connection-restoring nodes for disconnected WSNs[C]//Proc of International Conference on Communications and Signal Processing. 2011: 117-121.
- [21] MI Zhen-qiang, YANG Yang. Connectivity restorability of mobile Ad hoc networks based on K-hop neighbor information[C]//Proc of International Conference on Communications. 2011: 2449-2453.
- [22] YANG Yu, XU Yong-jun, LI Xiao-wei, et al. A loss inference algorithm for wireless sensor networks to improve data reliability of digital ecosystems[J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 2011, 58(6): 2126-2137.
- [23] BICAKCI K, TAVLI B. Prolonging network lifetime with multi-domain cooperation strategies in wireless sensor networks[J]. *Ad hoc Networks*, 2010, 8(6): 582-596.