

基于多元权函数的地面防空通信拓扑修复研究

任风麟, 王刚, 李腾达

(空军工程大学防空反导学院, 西安, 710051)

摘要 对地防通信网拓扑修复问题进行了研究。首先基于多元权函数与连通支配集对拓扑进行预处理, 为影响拓扑连通的关键节点规划故障处理链路。其次当故障发生后, 网络拓扑通过节点级联移动的方式恢复连通性。针对地防通信网络的特点构造权函数, 生成的故障处理链路更加贴合地防需求。在连通支配集的基础上求解拓扑割点, 优化节点故障后的拓扑运行逻辑与工作效率, 有效缩短了故障处理时间。对随机生成的20节点地防通信网络进行了拓扑修复, 连通支配集中的节点均生成了最短故障处理链路。选定网络中任意一个节点故障, 故障处理后网络无孤立节点, 证明了算法能够有效处理单节点失能的地防通信拓扑修复问题。

关键词 通信拓扑; 连通支配集; 极大独立集; 网络连通

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2024.06.009

中图分类号 TN915.02 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2024)06-0068-09

A Study of Topology Repair of Ground-Based Air Defense Communication Based on Multivariate Weight Functions

REN Fenglin, WANG Gang, LI Tengda

(Air Defense and Antimissile School, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract Conducted research on the topology repair problem of ground air defense communication networks. Firstly, the topology is preprocessed based on the multivariate weight function and connectivity dominating set, and the fault handling links are planned for the key nodes affecting the connectivity of the topology. Secondly, when a fault occurs, the network topology restores connectivity by cascading node movement. A weight function is constructed according to the characteristics of the ground defense communication network, and the generated fault handling links are more suitable to the needs of the ground defense. The topology cut-points are solved on the basis of the dominating set of the connectivity, so as to optimize the logic and efficiency of the topology operation after node failures, and to shorten the fault handling time effectively. The algorithm is used for topology repair of the randomly generated 20-node ground defense communication network, and the generation of the nodes in the connectivity dominating set with the shortest fault processing links. Failure to arbitrary node is selected in the network, there is no isolated node in the network with the fault being processed, proving that the algorithm can effectively deal with single node failure of ground defense communication topology repair problem.

收稿日期: 2024-04-21

基金项目: 国家自然科学基金(62106283)

作者简介: 任风麟(1996-), 男, 山西运城人, 硕士生, 研究方向为信息系统与保障工程。E-mail: 1598325730@qq.com

引用格式: 任风麟, 王刚, 李腾达. 基于多元权函数的地面防空通信拓扑修复研究[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(6): 68-76. REN Fenglin, WANG Gang, LI Tengda. A Study of Topology Repair of Ground-Based Air Defense Communication Based on Multivariate Weight Functions [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(6): 68-76.

Key words communications topology; connected dominance set; extremely independent set; network connectivity

对于遭毁后的通信网连通恢复方法,国内外已有许多研究。文献[1]以不相交路径数为网络可靠性指标,基于不相交路径的拓扑构建算法构建具备抗毁能力的网络拓扑。文献[2]对开放最短路径优先协议进行优化,提出一种适合基于分布式软件定义网络的机动通信系统的拓扑发现方法。文献[3]对于战术通信网进行预先优化,采取基于拓扑删除的算法,有效降低网络密度的同时保持网络抗毁能力。文献[4]从4个不同方面分析了战术通信网抗毁能力的影响因素,提出了若干提升抗毁能力的对策措施,对提升战术通信网抗毁能力有一定参考意义。文献[5]从拓扑结构角度出发,提出了一种基于遗传算法的通信网络拓扑优化算法,减少了节点度的平均值,能够有效提升通信网络的抗毁能力。文献[6]基于人工智能多代理概念,通过智能体对已有通信拓扑的学习增强其规划通信拓扑的能力。文献[7]对依赖于电力网络和通信网络之间的关系进行了研究,提出当任意系统故障后,系统的故障恢复速度与另一系统的支撑能力相关。文献[8]基于文献计量学理论,对当前网络抗毁性领域的发展进程、合作关系和热点方向进行梳理分析,提出随着网络科学理论的日趋完善,网络抗毁性研究将会在复杂系统与复杂性科学领域迎来更广泛的应用空间。文献[9]对已知拓扑情况下MST、近似最短路径问题、子图连通性等经典全局网络优化问题进行了研究,提出了最优化方案。文献[10]对图神经网络作为通信网络建模工具的优势进行了论证,介绍了应用于无线与有线网络最新的2种图神经网络模型。文献[11]根据无线通信网络损坏程度分别采取移动节点、增加中继节点、构建抗毁性拓扑的手段恢复网络连通。文献[12]对分布式系统中的拓扑重构问题进行了研究,提出了两种有效的拓扑恢复策略。文献[13]中对于网络严重受损的情况,采用基于斯坦纳树及泰森多边形的连通恢复算法以恢复网络连通。文献[14]对故障无线传感器网络的连通恢复问题进行了研究。提出ESCR(efcient solution for connectivity restoration)用于检测故障并恢复网络连通,同时确保尽可能减少移动所需能量。文献[15]基于延迟和邻居连通性的限制,使用基于网络编码的拓扑控制算法,研究了节点移动对干扰和延迟的影响。文献[16]在多模态网络环境下,基于多智能体系统提出一个通信拓扑重构方法。文献[17]利用网络信

息构建连通支配集,提出了一种基于2跳信息的路由恢复协议,能够有效修复受损路由并恢复网络连通。文献[18]预先基于不相交路径算法构建满足可靠性约束的网络拓扑,确保网络在少部分节点失能时仍能保持连通。当网络拓扑小范围受损时启用备用节点,恢复关键节点效能,当网络严重受损时使用基于崎岖度的微波站启发式部站算法恢复网络连通性。文献[19]首先对于单节点失效情况基于连通支配集预先选定故障处理节点,单节点失效后启用故障处理流程。对于网络严重受损的情况启用基于内部凸包骨架的多分区连通恢复算法,根据算法部署中继节点,同时提高网络抗毁能力。文献[20]首先采取面向抗毁性的拓扑优化算法构建了邻接网络的环形立交结构以增强网络抗毁性,对于网络大规模失效的情况基于网络骨干多边形构建的算法,部署适量的中继节点以恢复分区连通。文献[21]针对无线传感器网络复杂环境中簇头节点失效问题,提出一种改进的多簇头K连通抗毁拓扑构建方法,能够有效提高网络的抗毁能力。文献[22]通过无线通信网络的组网和路由协议实现了某型制导武器灵活组网、抗毁重构、动态拓扑和多制式通信等能力特点。

对于因部分关键节点失效导致地防通信网络失去连通的问题,通常有3种方法用于恢复连通。一是启用预置的备份链路和备份通信站,保证网络连通;二是采取移动通信节点的手段,移动的目的是顶替失效节点的拓扑位置,进而恢复网络连通,该方法主要用于少部分节点或个别节点失能的情况;三是新增部分中继节点,在恢复连通的同时可构建具备抗毁性的拓扑,该方法主要适用于网络严重受损的情况。

地面防空战术通信网的通信手段通常是有线与无线通信手段相结合,2种通信手段各自有其特点,总原则是有线保通、无线保底。有线通信传输距离远、信道容量大、抗干扰能力强。但需提前敷设相当长度的光缆或电缆,耗费大量人力物力时间,且在面临山地、湖泊、矿区等特定地理环境时,线路布设、线路维护、故障维修等工作将面临较大局限性。无线通信开通速度快,撤收转移速度快,有利于规避敌硬杀伤手段打击,但通信距离相对较近、通信容量相对较小,易受到敌压制性电磁干扰。

在网络失能后,要根据具体情况,按照先代通后抢通的原则进行业务恢复。因有线通信方式展开时

间长,调度信道速度慢,通常采取调度机动无线车辆接替的方式,能够更快沟通链路,恢复网络连通。因此本文主要研究当连通的战术通信网少部分节点遭到敌精确打击破袭导致网络失效时,通过调整无线通信节点的方式如何恢复网络连通的问题。

1 模型构建

连通支配集^[23]:给定一个无向图 $G(V_t, E_g)$, 若有一个顶点子集 $D \subseteq V_t$, 使得 $V_t \setminus D$ 中任意顶点至少与 D 中有一个顶点相连, 则该子集为顶点子集。若该子集的导出子图是连通的, 则该子集为连通支配集。

导出子图:设图 $G(V, E)$, 令 $S \subset V$, 使得 S 为 G 的任意顶点子集。则 G 的导出子图 $G(S)$ 中, 其顶点集为 S , 边集为 G 的边集 E 中 2 个顶点均属于 S 的边的集合。

极大独立集^[24]:设 D 为无环图, S 为 $V(D)$ 的非空子集, 若 S 中任何两顶点在 D 中均不相邻, 则称 S 为 D 的独立集。如果对 D 中任何异于 S 的独立集均有 $|S'| \leq |S|$, 则将 S 称为极大独立集。

割点定义^[25]:如果图 G 的边集 $E(G)$ 可以划分为二非空子集 E_1 和 E_2 , 使边导出子图 $G[E_1]$ 和 $G[E_2]$ 恰好只有一公共顶点 v , 则称顶点 v 为 G 的割点。

因通信拓扑未确定情况下,网络的节点权函数、极大独立集、连通支配集求解存在困难。文中使用数学归纳法,对多个随机节点构成的网络连通图进行研究,进而说明算法对通信网络的普适性。

图 1 为由 10 个节点随机生成的战术通信网。当拓扑中任意一个节点受损时,可通过移动节点的手段恢复网络拓扑,在解决问题过程中,需要对最终结果进行优化,目标为最小化节点移动距离,最小化移动节点数量。

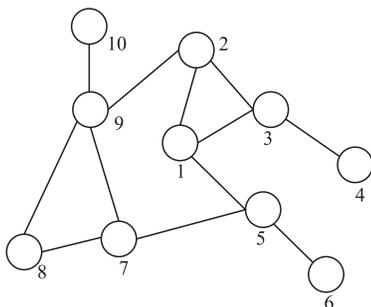


图 1 战术通信网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the tactical communications network

2 基于多元权函数的连通支配集构建算法

2.1 算法设计及基本定义

本文恢复网络连通的算法设计主要如下,首先计算拓扑图中各节点权函数,权函数主要是衡量各节点的重要程度,主要由节点度与节点到边缘的距离两部分加权求得;之后根据通信拓扑即各节点权函数的大小求出节点的极大独立集,根据极大独立集与权函数求出拓扑的连通支配集,为连通支配集中每个支配节点选择故障处理节点及故障处理链路。最后节点失效后判断节点是否为割点,若为割点,则调动故障处理链路进行处理。若不为割点但同时连通支配集中 2 个以上节点失能,则调动故障处理链路处理。具体算法流程如图 2 所示。

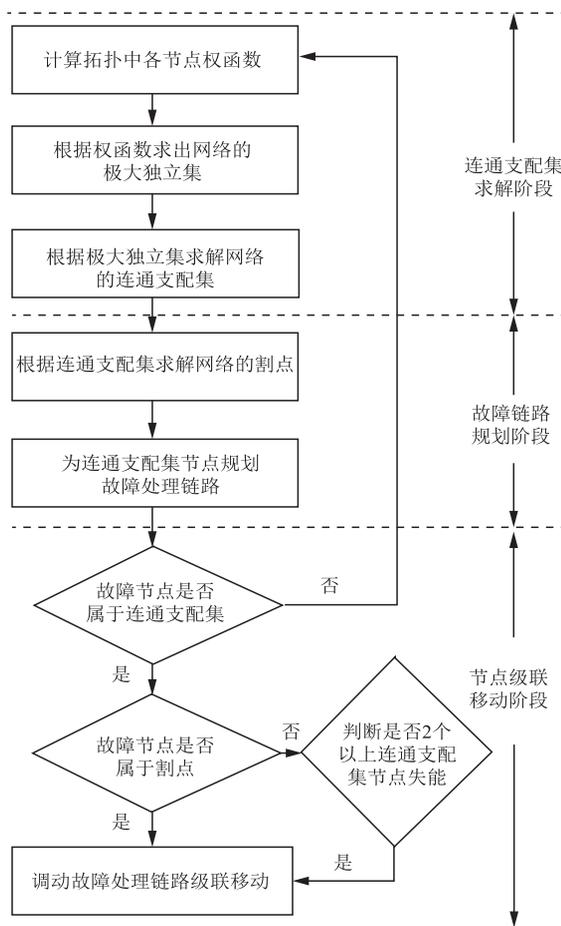


图 2 算法流程

Fig. 2 Algorithm flow chart

统计学认为,在统计中计算平均数等指标时,对各个变量值具有权衡轻重作用的数值就称为权数那么“变权函数”应该是与权数变化有关的函数权变。

按照算法设计,需要对拓扑网络中各点的重要程度进行衡量,以此为依据求解网络的极大独立集与连通支配集。根据地防通信网络的特点,对权函

数的权值进行分析。节点越靠近拓扑的“中心”说明节点的重要程度越高,节点越靠近边缘,则重要程度越低。因此节点到最近的边缘节点的距离越远,则重要程度越高。此外节点连接的邻居节点数量越多,该节点故障后造成的影响将更为严重,因此节点的邻居节点数量越多,节点重要程度越高。

边缘节点:若该节点节点度为 1,则为叶结点。若该节点的所有邻居节点均两两相邻,也为边缘节点。

节点到边缘的距离 D_i :通常希望位于拓扑结构中心的节点重要程度更高,设置节点到边缘的距离 D_i 为节点到最近的边缘节点的跳数。

节点度 L_i :节点 i 的邻居节点数量和。

权函数 T_i :用于衡量节点在拓扑中的重要程度,由节点度 L_i 和节点到边缘的距离 D_i 加权求得:

$$T_i = aL_i + bD_i \quad (1)$$

式中: T_i 越大,节点在拓扑中的重要程度越高; a 、 b 分别为节点度、节点到边缘距离的重要性大小,文中均取值 0.5,也可根据拓扑恢复中对二者的重视程度另外取值。

2.2 权函数的计算

首先对 D_i 进行求解,给出算法如下:

算法 1 基于通信拓扑的多元权函数求解算法

输入:通信拓扑图 $G(V, E)$

输出:各节点到边缘的距离 D_i

1. 设所有节点初始均未扫描,初始 D_i 均为无穷
2. 当节点 D_i 改变后,向相邻节点发送广播,接受到广播的节点 $D_j = \min\{D_i, D_j + 1\}$,其中 D_j 为向 i 广播节点的边缘距离
3. 扫描所有边缘节点,设置 $D_i = 0$,并向相邻节点发送广播
4. 当所有节点均被扫描后,算法结束,输出各点的 D_i

图 3 为权函数求解结果,黑色节点为边缘节点,根据表 1 中节点对应的函数 T_i 的值可知,节点 1、2、9 重要性最高。

表 1 随机拓扑图节点权函数 T_i 明细表

Tab. 1 Breakdown of node weight function T_i

节点号	节点到边缘的距离 D_i	节点度 L_i	节点权函数 T_i
1	2	3	2.5
2	2	3	2.5
3	1	3	2.0
4	0	1	0.5
5	1	3	2.0
6	0	1	0.5
7	1	2	1.5
8	0	2	1.0
9	1	4	2.5
10	0	1	0.5

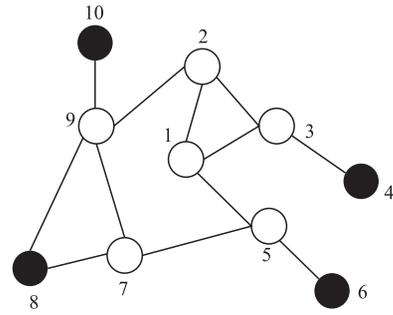


图 3 权函数计算

Fig. 3 Calculation of weight function

2.3 极大独立集的构造

为选出拓扑图的关键节点,需构建拓扑图的连通支配集,而求解拓扑图的连通支配集通常可以通过构建极大独立集的方法来实现。本文借鉴文献[18]给出的极大独立集构造算法并进行改进如下:

算法 2 基于多元权函数的极大独立集求解算法

输入:图 G ,中心节点

输出:极大独立集

1. 设置 3 个顶点集 a 、 b 、 c ,选取权函数 T_i 取值最大的为中心节点,将中心节点划入 a 组。中心节点对相邻一跳节点进行广播,接受 a 组广播的节点标记为划入点集 b 中,并向周围发送 b 组广播
2. 对于接受到 b 组广播的未扫描节点,标记为 c 组,并设置计时器为 1
3. 对于计时器到期的多个相邻 c 组节点,比较其节点度大小,节点度最大的编入 a 组,并向周边发出 a 组广播
4. 对于计时器到期的孤立 c 组节点,编入 a 组,并向周边发出 a 组广播
5. 对于接到 a 组广播的 c 组节点,编入 b 组并广播 b 组消息
6. 当所有节点全部扫描完毕,且 c 组无节点时,算法结束,输出 a 组节点为极大独立集

图 4 为算法求解结果,以 1 号节点为中心节点,最终极大独立集包含 $\{1, 4, 6, 9\}$ 4 个节点。

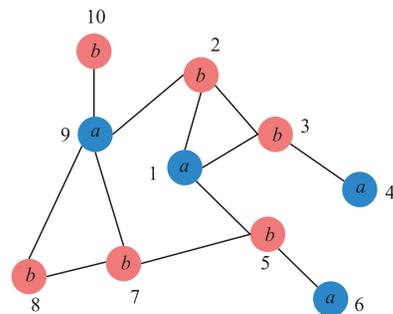


图 4 极大独立集的求解

Fig. 4 Solving for extremely large independent sets

2.4 连通支配集的构造

运用 2.3 节计算得出的极大独立集,借鉴文献[26]中连通支配集的构造算法,运用权函数和节点度数对节点进行筛选。具体算法如下:

算法 3 基于极大独立集的连通支配求解算法

输入:极大独立集

输出:连通支配集

1. 选取极大独立集中权函数最大的点作为中心节点。继承上一节中极大独立集求解过程中设置的点集 a 、 b 、 c 3 个,增加点集 d
2. 令中心节点 $\in d$,并向相邻节点发送 d 组广播
3. 当 b 中的节点接收到 d 组广播,且它有 a 组邻居节点时,将该节点编入点集 c ,设置计时器为 1
4. 当 a 中的节点接收到 d 组广播,若它的邻居节点均收到 d 组广播,将该节点编入点集 b ;否则编入点集 d 并发送 d 组广播
5. 当计时器到期时,对于 c 中的独立节点(无同时到期的 c 组邻居节点),执行下一步。对于同时到期的相邻的 c 组节点,比较 a 组邻居节点数,按照数值大小顺序执行下一步,若 a 组邻居节点数相等,比较各点权函数,按照数值大小顺序执行下一步。若均权函数相等,则随机顺序执行下一步
6. 若该节点有 a 组邻居节点,则将该节点变入 d 组并发送 d 组广播,否则将该节点编入 b 组
7. 当点集 a 与 c 均为空集时,算法结束,输出点集 d

如图 5 所示,同样以 1 号节点为中心节点,按照算法计算得出网络拓扑的连通支配集为 $\{1, 2, 3, 5, 7, 9\}$ 共 6 个节点。

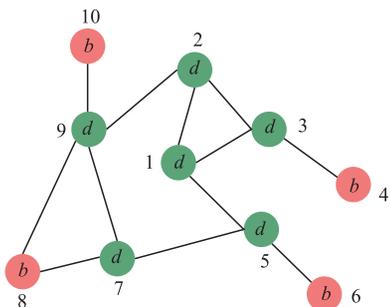


图 5 连通支配集的求解

Fig. 5 Solving for connected dominating sets

3 基于级联移动的通信拓扑修复算法

前文依次完成了求解各节点权函数,求解网络极大独立集与连通支配集。本节主要根据连通支配集对网络拓扑的割点进行求解,同时为连通支配集中的节点规划故障处理链路。

3.1 求割点算法

求割点的目的在于减少网络拓扑规划的工作量。当网络仅单个节点失效时,大部分节点往往并不会影响网络连通。如果因为非关键节点失效而整体级联移动,反而在连通恢复的时间内网络将处于中断状态。因此在单个节点失效时仅对割点进行拓扑修复。但仍旧需要对连通支配集内的节点规划故

障处理链路,原因在于当多于 1 个的节点失效后,可能导致多级联动网络整体失能,此时就需要对连通支配集内的全部节点进行恢复。

本节借鉴 Tarjan 算法,利用连通支配集对遍历节点进行筛选,减少了算法的时间复杂度。首先证明被支配节点不是割点,减少遍历数量。

证明 图 $G(V, E)$ 中的割点必在连通支配集中。

证: 设图 $G(V, E)$ 有任一连通支配集为 T , 由支配集的定义可知, $V \setminus T$ 中任意顶点至少与 T 中有 1 个顶点相连。

假设 $V \setminus T$ 中任意 1 个顶点 S 为割点,则去掉 S 后,图 $G(V, E)$ 不连通。由连通支配集定义可知, T 的导出子图是连通的,则图 G 去掉 S 后剩余子图是连通的,因此 $V \setminus T$ 中任意 1 个顶点 S 为割点不成立,因此图 $G(V, E)$ 中的割点必在连通支配集中,证毕。

其次借鉴 Tarjan 算法,寻找连通支配集中的割点。具体算法如下:

算法 4 基于连通支配集的割点求解算法

输入:连通支配集

输出:割点

1. 设置点集 A 、 B 、 C 。对连通支配集中所有节点进行扫描,若节点 u 至少有一邻居节点节点度为 1,则将 u 加入点集 A ,否则加入点集 B
2. 选取 B 中任意一个点 u ,选取 u 的任意邻居节点 v ,以 v 为起点寻找不经过 u 的到 u 的其余邻居的路径。若 v 到 u 的所有其余邻居均存在备用路径,则将 u 加入点集 C 。否则将 u 加入点集 A
3. 重复步骤 2,直到 B 为 \varnothing ,输出点集 A

如图 6 所示,连通支配集中 3、5、9 为割点。

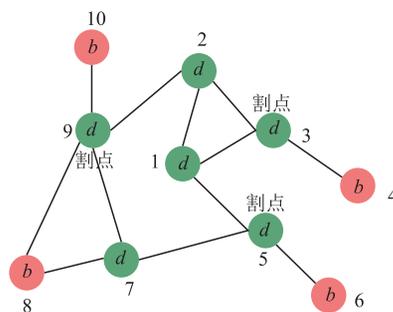


图 6 割点的求解

Fig. 6 Solution of the cut-off point

3.2 故障处理链路规划

因连通支配集节点均为保障拓扑图连通的主要节点,使用连通支配集内部的节点进行故障处理可能导致二次连通中断的问题。通常应该选择被支配节点作为故障处理节点。但因被支配节点距离故障处理节点距离无法把控,有可能出现网络恢复时间长的问题。因此采取逐级联动恢复的方式,确定故障处理

链条,逐次移动位置,被支配节点作为最后移动的节点,最终损失一个被支配节点,补充一个关键节点。

在通信拓扑产生后为连通支配集中每个节点选择故障处理节点,故障发生后各节点自行按照故障处理链路进行级联移动操作。定义任意节点到最近被支配节点距离为 d_i ,单位为 km。

具体故障处理链路规划算法如下:

算法 5 基于连通支配集的故障处理链路规划算法	
输入:	连通支配集,被支配节点
输出:	连通支配集各节点的故障处理链路及故障处理节点
1.	设所有节点初始均未扫描,初始 d_i 均为无穷,为所有节点设置路径标签为本节点编号 i
2.	当节点 d_i 改变后,向相邻节点发送广播,广播的内容为本节点 d_i 的值及路径标签。接收到广播的节点,本节点 $d_j = \min\{d_j, d_i + d_{ij}\}$,若 $d_i \geq d_j + d_{ij}$,将路径标签修改为 ij ,否则标签保持不变。其中 d_j 为广播来源节点的 d 值, d_{ij} 为本节点到广播来源节点的距离
3.	扫描所有边缘节点,设置 $d_i = 0$,并向相邻节点发送被支配节点距离及路径标签
4.	当所有节点到被支配节点距离及路径标签不再改变时,算法收敛。连通支配集中任意节点到被支配节点距离为 d_i ,路径标签即为故障后的级联移动链路

如图 7 所示,节点 1 的故障处理链路为 6、5、1,移动距离为 2;节点 2 的故障处理链路为 4、3、2,移动距离为 2;节点 3 的故障处理链路为 4、3,移动距离为 1;节点 5 的故障处理链路为 6、5,移动距离为 1;节点 1 的故障处理链路为 6、5、1,移动距离为 2;节点 9 的故障处理链路为 1、0、9,移动距离为 1。由此可见,对于由 10 个节点随机组成的地面防空战术通信网,本文提出的算法能够完成故障处理并恢复网络连通。那么对于由 n 个节点随机生成的地面防空战术通信网,算法同样能够进行故障处理。

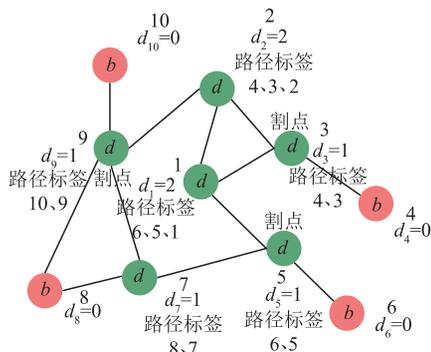


图 7 故障处理链路的计算

Fig. 7 Calculation of troubleshooting links

4 仿真实验

当网络中任意一个节点故障后,网络将处于性

能降级状态,甚至失去连通。本文拓扑修复的总体思路是通过连通支配集构建算法与割点求解算法甄选出影响网络连通的关键节点,进而通过故障处理链路规划算法为全体连通支配集中的节点规划故障处理链路。当节点故障后通过节点级联移动的方式填补故障节点的空缺,相当于舍去一个次要节点,恢复一个连通支配集节点。

为说明拓扑修复算法的有效性,本节中对拓扑修复的具体指标进行明确。拓扑修复的主要目标是恢复网络连通,可通过检查网络中任意 2 个节点间是否有可用路径,若均存在可用路径,说明网络连通,若任意 2 个节点间无可用路径,说明存在孤立节点,拓扑修复后网络不连通。拓扑修复的次要目标是使节点级联移动的总路径最短,同时移动节点的数量最少,也就是实现拓扑修复代价最小化。

使用 Matlab 软件,在长 100 km,宽 100 km 的区域中,随机生成 20 个干线节点及节点的路径,全体节点及路径构成连通图 $G'(V, E)$,如图 8 所示。

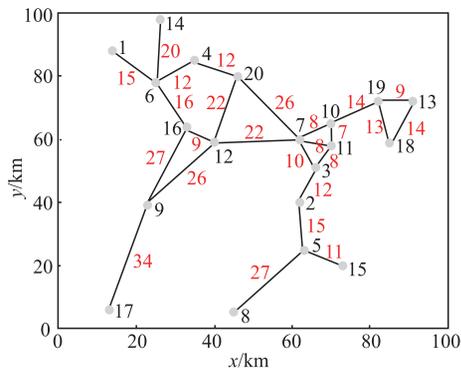


图 8 随机通信网络的生成

Fig. 8 Generation of stochastic communication networks

根据文中提出的算法对 $G'(V, E)$ 进行预处理,依次计算各节点权函数,进而求得极大独立集与连通支配集,并确定各节点的故障处理链路。若每个节点均可规划故障处理链路,说明算法生成的故障处理链路能够完成单个节点故障引发的网络不连通,实现战术通信网的拓扑修复。

首先对各节点权函数进行求解,如图 9 所示。

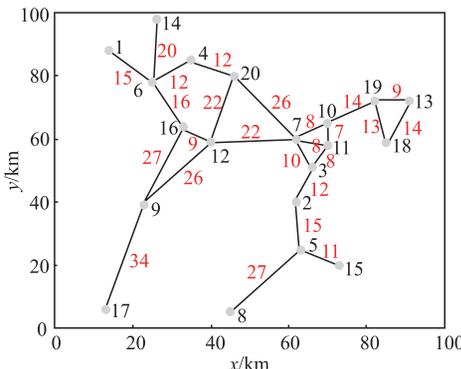


图 9 随机通信网络的权函数求解

Fig. 9 Weight function solution for stochastic communication networks

由表 2 可见,最大权函数为 4.0,节点 7 的权函数最大,因此后续计算中以节点 7 为中心节点。

表 2 节点权函数 T_i 明细表

Tab. 2 Breakdown of node weight function T_i

节点号	节点到边缘的距离 D_i	节点度 L_i	节点权函数 T_i
1	0	1	0.5
2	2	2	2.0
3	3	3	3.0
4	2	2	2.0
5	1	3	2.0
6	1	4	2.5
7	3	5	4.0
8	0	1	0.5
9	1	3	2.0
10	2	3	2.5
11	3	3	3.0
12	2	4	3.0
13	0	2	1.0
14	0	1	0.5
15	0	1	0.5
16	2	3	2.5
17	0	1	0.5
18	0	2	1.0
19	1	3	2.0
20	3	3	3.0

根据权函数生成极大独立集如图 10 所示。

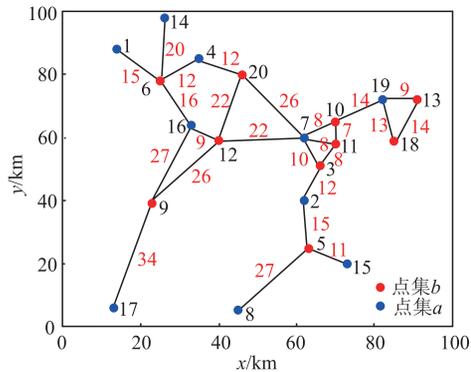


图 10 随机通信网络极大独立集的求解

Fig. 10 Solving for extremely independent sets of stochastic communication networks

图中蓝色为极大独立集节点,极大独立集为点集 $\{1, 2, 4, 7, 8, 14, 15, 16, 17, 19\}$ 。

根据极大独立集生成连通支配集如图 11 所示,图中绿色节点为连通支配集节点,连通支配集为点集 $\{2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 12, 16, 19, 20\}$ 。

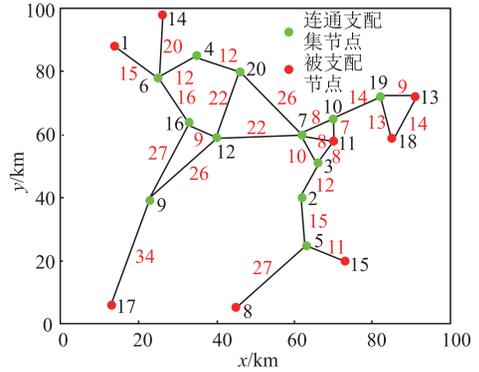


图 11 随机通信网络连通支配集的求解

Fig. 11 Solving for connected dominating sets of stochastic communication networks

最后根据连通支配集计算割点。割点的重要性高于连通支配集中的其余节点,当割点失能后,网络必然会出现不联通的问题,连通支配集中除割点外的其余节点失能后,将导致网络出现性能降级问题。割点集合为 $\{2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 19\}$ 。

在求得连通支配集及割点的基础上,使用故障处理链路规划算法,为连通支配集中的节点规划故障处理链路,具体仿真结果如图 12 所示,故障处理链路明细如表 3 所示。

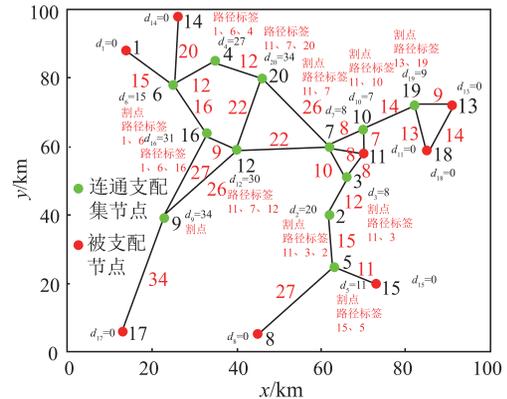


图 12 随机通信网络连通支配集的故障处理链路求解

Fig. 12 Failure handling link solving for random communication network connectivity dominating set

表 3 故障处理链路明细

Tab. 3 Troubleshooting link breakdown

节点号	故障处理	节点移动	级联移动
	链路	总距离/km	节点个数
2	11、3、2	20	2
3	11、3	8	1
4	1、6、4	27	2
5	15、5	11	1
6	1、6	15	1
7	11、7	8	1
9	17、9	34	1
10	11、10	7	1
12	11、7、12	30	2
16	1、6、16	31	2
19	13、19	9	1
20	11、7、20	34	2

从仿真结果来看,文中提出的拓扑修复算法为网络中8个割点及4个连通支配集中的其余节点均规划了故障处理链路,当上述12个节点故障后按照节点级联移动的方式恢复连通。选定连通支配集中任意一个节点故障,拓扑修复后的网络任意两点间均存在可用路径,不存在孤立节点,因此文章中提出的算法能够完成拓扑修复的主要目标;此外对拓扑修复的消耗资源进行统计,如表2所示,连通支配集节点总数为12,平均移动距离为19.5 km,平均移动节点数量为1.42,可见故障处理链路规划算法按照路径最短原则选择故障处理链路,兼顾了拓扑修复的次要目标。因此文章提出的算法能够解决地面防空战术通信网中单节点故障的拓扑修复问题。

5 结语

本文在分析地面防空兵通信保障形势的基础上,提出了一种基于连通支配集的网络拓扑修复算法,使用MATLAB软件对算法进行仿真验证,算法简单有效,兼顾了恢复网络连通与减小移动节点与移动距离的要求,为未来地面防空作战中修复骨干通信网提供参考。

参考文献

- [1] 邹映琨. 多约束条件下战术网规划及抗毁重构方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
ZOU Y K. Research on Tactical Network Planning and Anti-Destruction Reconstruction Method under Multi-Constraint [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2017. (in Chinese)
- [2] 朱宇昂,赵亚丽,赫佳雷,等. 基于分布式SDN的机动通信系统拓扑发现方法[J]. 系统工程与电子技术,2024,46(1):357-365.
ZHU Y A,ZHAO Y L,HE J L,et al. Topology Discovery Method for Mobile Communication Systems Based on Distributed SDN[J]. Systems Engineering and Electronics,2024,46(1):357-365. (in Chinese)
- [3] 陈琦,黄勇,黄永胜,等. 基于链路删除的战术通信网络拓扑优化方法研究[D]. 武汉:国防科技大学,2023.
CHEN Q,HUANG Y,HUANG Y S,et al. Research on Topology Optimization of Tactical Communication Network Based on Link Deletion[D]. Wuhan:National University of Defense Technology,2023. (in Chinese)
- [4] 刘学亮,李松,滕荔楠. 战术通信网抗毁性分析及对策研究[J]. 中国新通信,2021,23(12):26-27.
LIU X L,LI S,TENG L N. Research on the Analysis of Survivability of Tactical Communication Networks and Countermeasures[J]. China New Telecommunica-
- tions,2021,23(12):26-27. (in Chinese)
- [5] 尹梦梦,王磊,姚昌华,等. 一种基于遗传算法的通信网拓扑优化方法[J]. 通信技术,2021,54(6):1392-1399.
YIN M M,WANG L,YAO C H,et al. A Method for Optimizing Communication Network Topology Based on Genetic Algorithm[J]. Communications Technology,2021,54(6):1392-1399. (in Chinese)
- [6] DU Y L,LIU B,MOENS V,et al. Learning Correlated Communication Topology in Multi-Agent Reinforcement Learning[C]// Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems. Richland SC:International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems,2021:456-464.
- [7] DANZIGER M M,BARABÁSI A L. Recovery Coupling in Multilayer Networks[J]. Nature Communications,2022,13(1):955.
- [8] 张亮,妙晨,孟瑶,等. 基于文献计量的网络抗毁性研究分析[J]. 信息工程大学学报,2021,22(4):450-455.
ZHANG L,MIAO C,MENG Y,et al. Research and Analysis of Network Invulnerability Based on Bibliometrics Theory[J]. Journal of Information Engineering University,2021,22(4):450-455. (in Chinese)
- [9] HAEUPLER B,WAJC D,ZUZIC G. Universally-Optimal Distributed Algorithms for Known Topologies [C]//Proceedings of the 53rd Annual ACM SIGACT Symposium on Theory of Computing. New York:ACM,2021:1166-1179.
- [10] SUÁREZ-VARELA J,ALMASAN P,FERRIOL-GALMÉS M,et al. Graph Neural Networks for Communication Networks:Context,Use Cases and Opportunities[J]. IEEE Network,2023,37(3):146-153.
- [11] 曾雅丽. 无线传感器网络连接修复方法研究[D]. 福州:福建师范大学,2016.
ZENG Y L. Connectivity Recovery In Wireless Sensor Networks [D]. Fuzhou: Fujian Normal University,2016. (in Chinese)
- [12] RODRÍGUEZ A,GÓMEZ J,DIACONESCU A. A Decentralised Self-Healing Approach for Network Topology Maintenance [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems,2020,35(1):6.
- [13] 王茂秋. 无线传感器网络节点定位和故障连通恢复研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2021.
WANG M Q. Study on Node Localisation and Faulty Connectivity Recovery in Wireless Sensor Networks [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2021. (in Chinese)
- [14] SAEED M K,HASSAN M,MAHMOOD K,et al. Efficient Solution for Connectivity Restoration (ESCR) in Wireless Sensor and Actor-Networks[J]. Wireless

- Personal Communications, 2021, 117(3): 2115-2134.
- [15] RAJAKUMARI K, PUNITHA P, LAKSHMANA KUMAR R, et al. Improvising Packet Delivery and Reducing Delay Ratio in Mobile Ad Hoc Network Using Neighbor Coverage-Based Topology Control Algorithm[J]. International Journal of Communication Systems, 2022, 35(2): e4260.
- [16] 张汝云, 肖戈扬, 单麒麟, 等. 多模态网络下多智能体协同控制的通信拓扑重构方法[J]. 通信学报, 2022, 43(4): 50-59.
- ZHANG R Y, XIAO G Y, SHAN Q H, et al. Communication Topology Reconstruction Method for Multi-Agent Cooperative Control in Polymorphic Networks[J]. Journal on Communications, 2022, 43(4): 50-59. (in Chinese)
- [17] SHENBAGALAKSHMI G, REVATHI T. RETRACTED ARTICLE: Enhanced Route Discovery Using Connected Dominating Set and 2-Hop Repair in Wireless Ad Hoc Networks[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2021, 12(3): 4193-4203.
- [18] 张智凯. 局部设施失效的网络多约束资源重组方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- ZHANG Z K. A Study of a Multi-Constraint Resource Restructuring Method for Networks with Localised Facility Failures [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] 苏航. 无线 Mesh 网络多目标优化连通恢复技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.
- SU H. Research on Multi-Objective Optimization Connectivity Recovery Technology in Wireless Mesh Networks[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023. (in Chinese)
- [20] 田秀雯. 基于拓扑重构的无线传感器网络抗毁性优化策略研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2017.
- TIAN X W. Research on Invulnerability Optimization Strategy Through Topology Reconstruction for Wireless Sensor Networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)
- [21] 吴昊, 陈雯柏, 王文凯, 等. 基于多簇头 K 连通的抗毁拓扑构建方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(7): 276-282.
- WU H, CHEN W B, WANG W K, et al. A Method of Constructing Invulnerable Topology Based on Multi-Cluster K-Connectivity[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35(7): 276-282. (in Chinese)
- [22] 杨加一, 闫俊. 近距无线通信组网拓扑技术[J]. 电子科技大学, 2024, 37(4): 97-102.
- YANG J Y, YAN J. Research on Network Topology Technology of Close Range Wireless Communication [J]. Electronic Science and Technology, 2024, 37(4): 97-102. (in Chinese)
- [23] 李瑞婷. 连通支配集问题的求解算法研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2020.
- LI R T. Research on Solving Algorithms of Connected Dominating Set Problems[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2020. (in Chinese)
- [24] 孙惠泉. 图论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- SUN H Q. Graph Theory and Its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2004. (in Chinese)
- [25] 徐俊明. 图论及其应用[M]. 2 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- XU J M. Graph Theory and Its Applications[M]. 2nd ed. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003. (in Chinese)
- [26] 鲁登月. 无线传感器网络中连通支配集的构造算法研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2014.
- LU D Y. Research on Construction of Connected Dominating Sets in Wireless Sensor Networks[D]. Suzhou: Soochow University, 2014. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)