

军事通信网络拓扑结构抗毁性仿真^①

王智源¹ 丁泽中¹ 胡广水² (1. 后勤工程学院 重庆 401311; 2. 65121 部队 吉林 四平 132202)

摘要: 在经典无尺度网络模型(BA 模型)基础上, 构建邻接网络的环形立交结构, 提出了基于冗余链路的军事通信网络拓扑结构优化方案, 并研究了其拓扑结构的优化算法。利用 MATLAB 软件对优化方案进行仿真研究。仿真结果表明, 本文提出的优化方案对军事通信网络自身性质并无显著影响, 但能较好地提高网络的抗毁性。

关键词: 军事通信网络; 拓扑优化; 抗毁性; 仿真研究

Invulnerability Simulation of Military Communication Networks Topology

WANG Zhi-Yuan¹, DING Ze-Zhong¹, HU Guang-Shui²

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Unit 65121, SiPing 132202, China)

Abstract: Based on the classical scale-free network model (BA model), this article designs a adjacent network of which key nodes are constructed to be like the structure of rotary interchange, and puts forward a method of the topology optimization for military communication networks by redundant links, and has a research on the arithmetic of the topology optimization. The method proposed are simulated by matlab. The results of the simulation show that the method can well improve the invulnerability of military communication networks, which has less influence on the network.

Keywords: military communication networks; topology optimization; invulnerability; simulation research

1 引言

军事通信网络是用于军事目的、保障作战指挥的通信网, 主要功能是保障情报侦察、指挥协同、武器控制、后勤支持和日常管理等信息的准确传递。军事通信网络由多种结构并存并不断发展变化, 其拓扑结构呈现出典型的“无尺度”特性^[1]。在无尺度网络中, 集散节点和关键子网的失效可能会造成整个网络的崩溃, 进而引发严重后果。因此, 研究军事通信网络集散节点抗毁性策略, 探讨网络拓扑结构优化方案, 将为有效阻止网络攻击和提高抗毁性提供重要手段。

1.1 传统优化方案

目前, 主要采用基于节点的拓扑结构优化方法对无尺度网络进行优化以提高其抗毁性。文献^[2]提出了两种针对集散节点的优化处理策略, 即层次化处理集

散节点(树形结构)和分布式处理集散节点(超立方体结构)的方法。仿真结果表明, 这两种网络结构的抗毁性优于对集散节点不加约束控制的网络, 优化后的网络优势明显, 但尚存在一定不足:

(1) 在集散节点优化处理策略中, 层次化处理集散节点的主要缺陷是当某一个虚拟节点遭受攻击时, 网络立即被分割成 3 个子网(以二叉树结构为例), 网络节点之间的通信受到较大影响, 但子网内节点通信却不受影响。分布式处理集散节点恰好相反, 网络中某一个集散节点发生故障或遭受攻击时自动将其断离网络, 剩余节点自行重构, 网络被分割成两个部分, 一部分由与故障节点相连的节点构成, 另一部分由超立方体结构其它顶点及其相连的节点构成。但其缺点是节点数随维数指数级增长, 难以组成高维超立方体

① 收稿时间:2010-04-13;收到修改稿时间:2010-06-12

结构,可扩展性不大。

(2) 层次化结构和超立方体结构,都是基于节点对整个网络拓扑进行优化。由于各个虚拟节点之间并不是纯粹的、完全互为备份的关系,因此这类优化只是一个分散原有集散节点风险的过程,任何一个虚拟节点遭受攻击仍然会对整个网络造成影响,只是这种影响被降低了。

(3) 从优化成本的角度考虑,层次化结构要优于超立方体结构。超立方体结构要建立的虚拟节点数随着维数的增加呈指数级增长。实际应用中,如果各虚拟节点在地理位置上相距不远,这种优化在应对物理攻击方面意义不大;如果虚拟节点之间相距较远,则通信线路的建设仍需投入较大成本。

1.2 基于冗余链路的军事通信网络拓扑结构优化方案

针对基于节点的军事通信网络拓扑优化算法中存在的不足,本文提出了基于冗余链路的网络拓扑结构优化方案。该优化方案是通过在网络中增加额外的链路,改变网络节点之间的连接关系,最终达到改善网络性能的目的。具体表现在以下三个方面:

(1) 不破坏现有的网络结构。基于冗余链路的优化方案不改变现有节点之间的连接关系,只通过增加链路,提高冗余的手段来改善网络性能。

(2) 显著提高网络的安全性。通过层次化处理优化后的网络,更趋向于树形结构,一旦受到攻击,网络被分割成多个碎片的可能性很大。而基于链路的优化方案则降低了出现该状况的可能性。

(3) 从优化成本角度考虑,如果是针对有线通信网络,基于链路的优化方案没有显著优势。但如果是针对无线通信网络,该方案的低成本优势就将会被显著的表现出来。

2 优化方案设计

为提高无尺度军事通信网络战场抗毁性能,必须确保网络集散节点在遭受攻击时,能够保持网络剩余节点间的连通性,满足军事通信网的基本性能要求。

2.1 针对集散节点的优化结构选取

集散节点遭到攻击就意味着与集散节点相连的链路全部失效,原来必须依靠集散节点进行通信的节点对之间就无法继续通信。集散节点对于这样的节点对

之间的重要性将不言而喻。从拓扑角度分析,环网结构在抗毁性方面具有显著优势(如图 1(a)所示),任意一个节点发生故障,其影响面都相对较小。因此,通过构建与集散节点邻接节点的环网结构,就能有效提高网络拓扑结构的抗毁性。

2.2 算法思想

图 1 描述了基于冗余链路的网络拓扑结构优化过程。(a)所示的原始通信网络中存在某个集散节点,当该节点遭到破坏后,与其相连的边随之失效,与集散节点相邻的节点被包含在若干个网络碎片当中(如(b)所示)。我们称这种网络碎片为集散节点的邻接网络。就整个网络而言,在失去了集散节点的情况下,有很多节点对之间将不能相互通信。

为保证剩余节点之间的通信,必须采取一定措施保证这些节点之间的连通。受环形立交结构的启发,我们用一条链路将各碎片网络串接起来(如(c)所示),这样整个网络中任意两个节点之间将至少存在一条链路使得它们之间的通信成为可能。根据这一思想,本文提出了基于冗余链路的网络拓扑结构优化方案:通过搜索网络中的集散节点(根据节点度大小进行判断),设计一条环状链路将这一集散节点的邻接网络连接起来((d)虚线所示)。

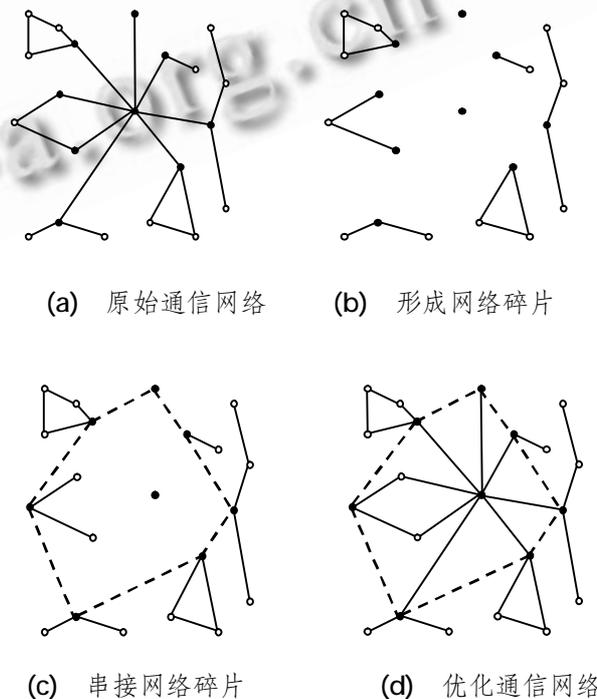


图 1 基于冗余链路的网络拓扑结构优化示意图

2.3 算法描述

对于无尺度网络 G ，其拓扑结构优化算法具体如下：

- (1) 寻找网络 G 中未经优化且度数最大的节点，记为 $Node_i$ ；
- (2) 将 G 中由 $Node_i$ 除外的节点构成的网络记为 G'_i ；
- (3) G'_i 由若干个网络碎片(即 $Node_i$ 的邻接网络)构成，它们分别记为 $G'_{i1}, G'_{i2}, \dots, G'_{im}$ ；
- (4) 统计各网络碎片中节点的数量，分别记为 $N'_{i1}, N'_{i2}, \dots, N'_{im}$ ；
- (5) 找出每个网络碎片 $G'_{i1}, G'_{i2}, \dots, G'_{im}$ 中的几何中心节点，这些中心节点满足它们到本网络中的其它节点的总距离最短，分别记为 $Node'_{i1}, Node'_{i2}, \dots, Node'_{im}$ ；
- (6) 假设此处 $N'_{i1} > N'_{i2} > \dots > N'_{im}$ ，那么将各个网络碎片的中心节点按图 2 所示连接起来，形成环形立交结构；
- (7) 将 $Node_i$ 标记为已优化节点；
- (8) 统计已优化的节点数，判断其是否达到方案要求的优化比例。若达到，则终止优化程序，否则重复(1)。

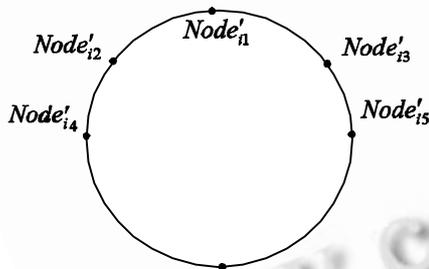


图 2 网络碎片中心节点的链接方式

3 网络仿真

为验证优化方案的正确性和有效性，运用 MATLAB 构建 BA 模型，模拟网络在遭受随机攻击和蓄意攻击时网络性能的变化[3-5]。仿真结果表明，优化后的网络性质并无显著影响，但抗毁性指标显著提升，尤其在遭受蓄意攻击时表现出较好的鲁棒性。仿真所涉及的相关参数设置如下：

- (1) N : 网络节点数；

- (2) k : 网络中各节点的度；
- (3) $p(k)$: 节点度为 k 的概率；
- (4) p_{opt} : 网络节点优化比例；
- (5) $N_{冗余链路}$: 网络经过优化后新加入的链路的数量；
- (6) $N_{优化前链路}$: 优化前网络中链路的数量；
- (7) $N_{瘫痪链路}$: 遭到攻击后网络中无法通信的链路数量；
- (8) P : 网络节点被随机攻击的比例；
- (9) E_{glob}, E_{loc} : 全局网络通信效率、局部网络通信效率；
- (10) $N_{fragment}$: 网络在受到攻击后形成的网络碎片的数量；
- (11) $max\ size\ fragment$: 最大网络碎片的大小(用节点数表示)；
- (12) $Effective\ connectivity\ ratio$: 网络有效连通率。

3.1 优化前后网络遭受随机攻击的对比分析

选取网络节点数 $N=500$ 、优化比例 $P_{opt}=30\%$ ，对网络优化前后遭受随机攻击的影响进行仿真。图 3、4、5、6、7 所示仿真结果表明，优化前后的网络在应对随机故障时，其性能的变化趋势一致。优化后的网络在应对随机意外故障时优于优化前的网络，尤其表现在网络通信效率提升、网络碎片数量减少。但从整体来看，优化前后的网络在应对随机故障时差别不是很大。

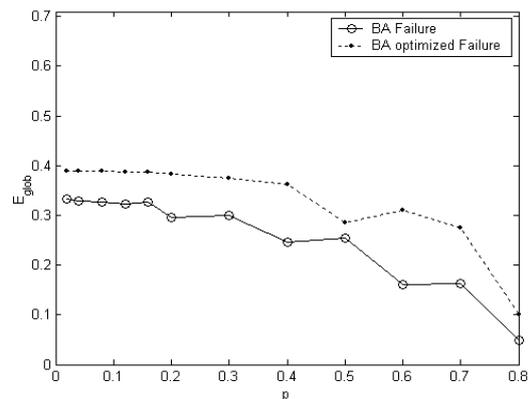


图 3 出现意外故障时网络全局通信效率的变化趋势对比

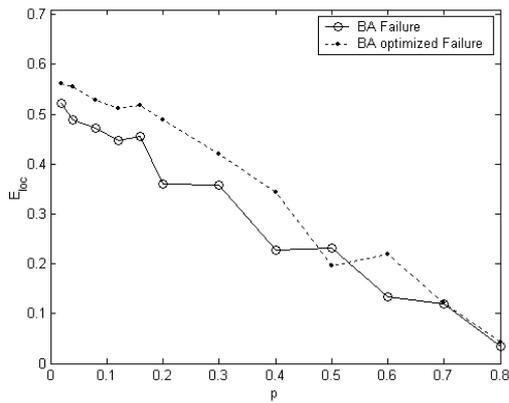


图4 出现意外故障时网络局部通信效率的变化趋势对比

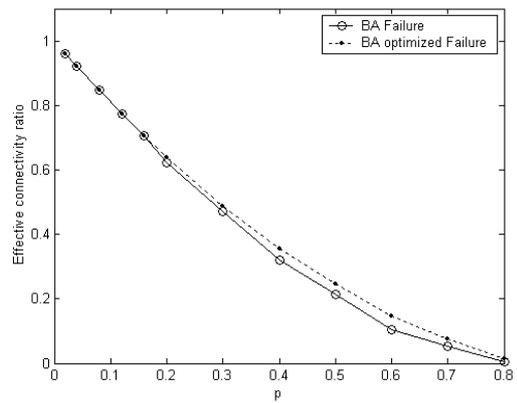


图7 出现意外故障时网络有效连通率的变化趋势对比

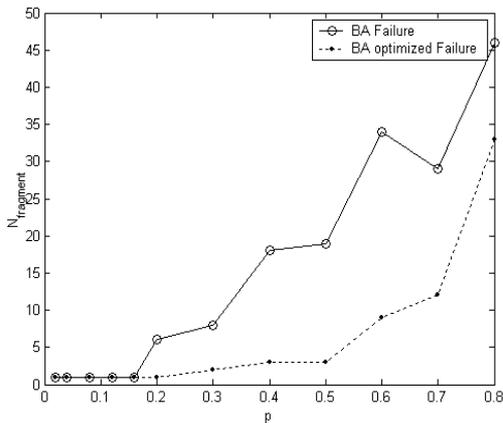


图5 出现意外故障时网络碎片数量的变化趋势对比

3.2 优化前后网络遭受蓄意攻击的对比分析

选取网络节点数 $N=500$ 、优化比例 $P_{opt}=30\%$ ，对网络优化前后遭受蓄意攻击的影响进行仿真。图8、9、10、11、12所示的仿真结果表明，优化后的网络在应对蓄意攻击时，整体性能明显优于优化前的网络。从图8、9可知，网络在遭到蓄意攻击后，节点对之间的路径长度增加的趋势变缓。从图10可知，当网络中40%的集散节点遭到攻击后，网络生成碎片数仅为优化前的10%。从图11、12可知，要想完全摧毁网络，优化前只需攻击30%的节点，而对于优化后的网络，则必须摧毁50%的节点才能取得相同的效果。

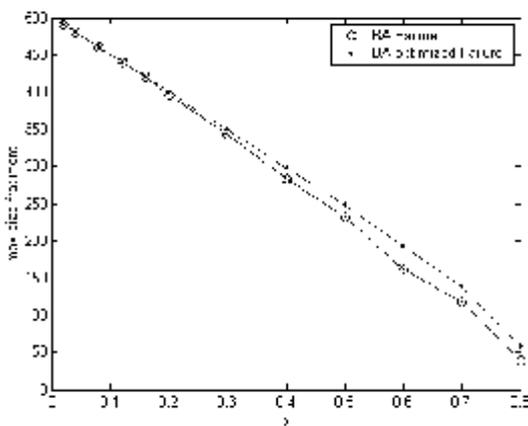


图6 出现意外故障时最大网络碎片规模的变化趋势对比

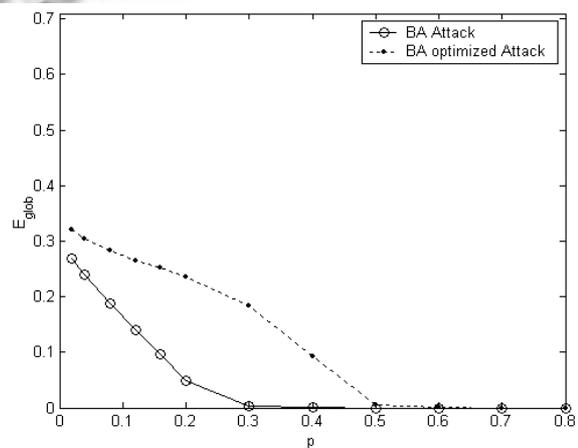


图8 遭受蓄意攻击时网络全局通信效率的变化趋势对比

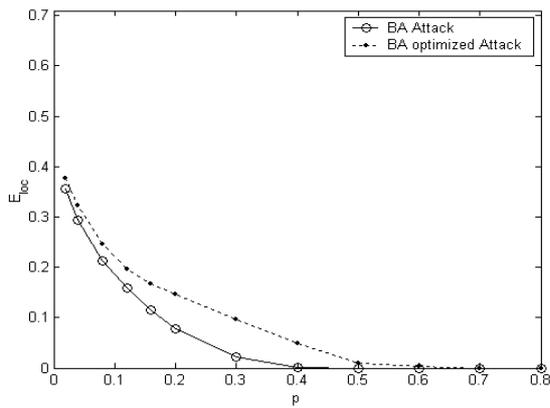


图9 遭受蓄意攻击时网络局部通信效率的变化趋势对比

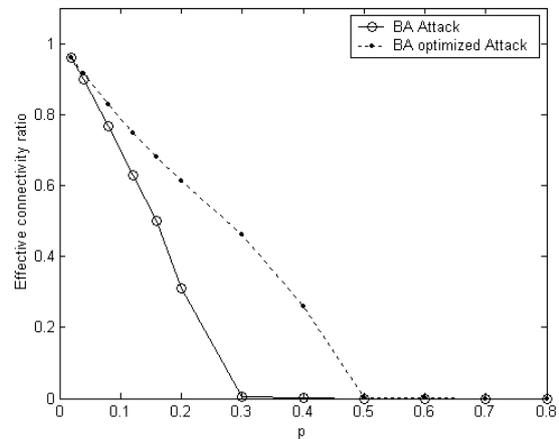


图12 遭受蓄意攻击时网络有效连通率的变化趋势对比

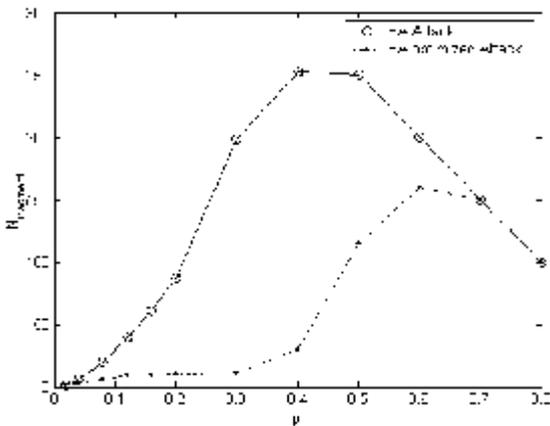


图10 遭受蓄意攻击时网络碎片数的变化趋势对比

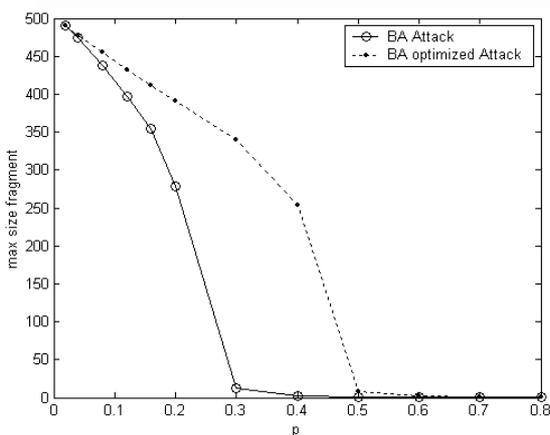


图11 遭受蓄意攻击时最大网络碎片规模的变化趋势对比

4 结语

本文通过对全连通网络在网络连通性方面的优势分析,提出针对网络集散节点的邻接网络环形立交结构连接方案,并研究了网络拓扑结构的优化算法。利用 MATLAB 软件对优化方案进行仿真。仿真结果表明,本文提出的基于冗余链路的军事通信网络拓扑结构优化方案对网络拓扑结构本身影响较小,但能较好地提高网络的抗毁性。因此,该方案是正确、有效的。

参考文献

- 1 王海涛.军事通信网及其相关问题的探讨.通信世界, 2002,8:39-40.
- 2 陶少华,刘玉华,许凯华.无尺度网络中集散节点抗脆弱性策略.计算机工程与应用, 2007,43(2):151-153.
- 3 刘捷.无尺度网络建模仿真与分析.武汉理工大学学报, 2006,9(28):108-111.
- 4 邓宏钟,朱大智,吴俊等.具有任意度分布的复杂网络拓扑结构建模方法.系统工程, 2006,10(24):11-14.
- 5 肖波,刘连栋,许可.全球 IPv6 骨干网络拓扑建模研究.北京:北京航空航天大学第四届研究生学术论坛, 2007.