

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.017

## 基于改进聚类生存度的军事通信网可靠性分析

马睿<sup>1</sup>, 朱建冲<sup>1</sup>, 杨美玲<sup>2</sup>

(1. 海军工程大学管理工程系, 武汉 430033; 2. 中国人民解放军 91321 部队通信营, 上海 200436)

**摘要:** 针对现有全网聚类生存度计算方法计算不够准确的问题, 提出一种改进算法。该方法将每个聚端和与其相连的聚枝看作一个整体, 并在 Matlab 软件中使用改进后的聚类生存度分析在针对性攻击下复杂网络的生存性。仿真结果表明: 改进后的算法保持了原算法的计算速度, 同时还提高了计算的准确性。

**关键词:** 军事通信网; 聚类生存度; 可靠性

**中图分类号:** TP393.06 **文献标志码:** A

## Reliability Analysis of Military Communication Network Based on Improved Clustering Survivability

Ma Rui<sup>1</sup>, Zhu Jianchong<sup>1</sup>, Yang Meiling<sup>2</sup>

(1. Dept. of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;

2. Communication Battalion, No. 91321 Unit of PLA, Shanghai 200436, China)

**Abstract:** According to the calculation defect of network clustering survivability algorithm, an improved algorithm is proposed. In this method, every clustering end and clustering branches connected to it are seemed as one unit, and the survivability of complex network under preferential attack is analyzed by use of the improved clustering survivability in Matlab. The simulation result indicates that the improved algorithm is more accurate than the original one while keeping its high speed.

**Key words:** military communication network; clustering survivability; reliability

### 0 引言

作为战时搜集、处理和传发信息的信道, 军事通信网在信息化作战中发挥着神经触角的作用。由于战场环境复杂条件恶劣, 要求军事通信网具有较强的抗毁性和生存性。现存的网络可靠性指标可分成 2 类<sup>[1]</sup>: 图论和概率论意义上的连通性(抗毁性、生存性等)、以网络的某种性能指标为基础的可用度(有效性等)。军事通信网的节点和链路易受到敌方的针对性破坏, 因此, 要研究针对性攻击下军事通信网可靠性, 就需要研究网络抗毁性和生存性。

关于网络生存性的研究, P. Baran 于 1964 年对规则网络进行了研究, 提出网络冗余等级的概念<sup>[2]</sup>。Albert R 等对复杂网络进行了研究<sup>[3]</sup>。Castillo E<sup>[4]</sup>等提出用贝叶斯网预测路网流量, 黄晶<sup>[5]</sup>等在 Castillo E 等人的基础上提出用贝叶斯网计算路网失效程度的方法。郭伟<sup>[6]</sup>研究了快速计算野战地域通信网生存性的方法, 提出了跳面节点的概念。王兴帅<sup>[7]</sup>等在郭伟的研究基础上提出了聚点团生存度的概念。任晓涛<sup>[8]</sup>等提出了一种基于聚类的生存性测度——全网聚类生存度, 该测度综合考虑了网络拓扑结构中节点度分布的均匀性和网络组件可靠性

对于网络生存性的影响。上述学者对网络生存性的研究取得了很多成果, 但也存在一些问题。目前的通信网络结构一般都是不规则的且规模庞大, 用蒙特卡罗方法需要大量采样计算才能得到准确结果。贝叶斯网在对大规模网络可靠性的分析过程中结构非常复杂, 计算量也相当惊人。基于节点跳面的概念对网络可靠性进行分析时, 虽然计算速度快, 但如果考虑链路失效的情况, 那么必须保证同一跳面上的相邻节点是相互连通的, 否则, 该方法只适用于无线通信网。根据文献[9]中均匀网络在面对针对性攻击时表现出更好的生存性的结论可知, 全网聚类生存度反映的是网络在面对针对性攻击时的生存性, 因而可以用于军事通信网的可靠性分析, 但文献[8]中对于聚类生存度的计算还不够准确。因此, 笔者提出了一种新的改进聚类生存度的算法, 对网络生存性进行分析。

### 1 改进的聚类生存度

文献[8]将聚类生存度定义为聚核至少能和一个聚端通信的概率, 计算公式为

$$S_i = 1 - \prod_{j \in E_i} (1 - r_{ni} r_{ej} r_{nj}) \quad (1)$$

收稿日期: 2012-01-27; 修回日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(70471031); 海军工程大学科研基金(HGDSK2012E13)

作者简介: 马睿(1982—), 男, 山东人, 硕士研究生, 从事装备保障指挥自动化研究。

其中:  $E_i$  是聚类  $i$  的聚枝集合;  $r_{ni}$  是节点  $i$  的节点可靠度;  $r_{eij}$  是链路  $eij$  的链路可靠度, 链路  $eij$  连接节点  $i$  和节点  $j$ 。全网聚类生存度定义为网络中各个聚类生存度的加权平均值, 计算公式为

$$S_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i S_i \quad (2)$$

$N$  是网络中节点数目,  $w_i$  是聚类  $i$  的近均度,  $w_i$  的计算公式为

$$w_i = \frac{F}{F + |d_i - \bar{d}|} \in (0, 1], \quad F > 100 \quad (3)$$

仔细观察式 (1), 实际上它描述的是如图 1 的点群结构。

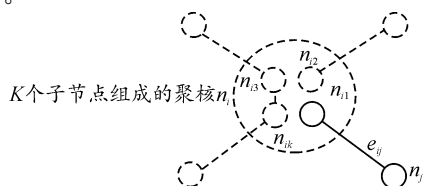


图1 点群结构

该结构中, 聚核位置不是有一个节点, 而是有  $K$  个子节点,  $K$  是  $E_i$  中聚枝的个数。聚核中每个子节点均与一个聚端连接, 其可靠度均为  $r_{ni}$ ,  $1 - r_{ni} r_{eij} r_{nj}$  表示一个子节点-聚端对不能通信的概率,  $\prod_{j \in E_i} (1 - r_{ni} r_{eij} r_{nj})$  表示所有子节点-聚端对不能通信的概率,  $1 - \prod_{j \in E_i} (1 - r_{ni} r_{eij} r_{nj})$  表示至少有一个子节点-聚端对

可以通信的概率。根据文献[8]中对聚类的定义, 聚核只有一个节点, 由此可见式 (1) 表示的并不是严格意义上的聚类生存度。

根据聚类生存度的定义, 如果聚核失效, 那么该聚类生存度必然是零, 而聚端与聚枝失效不一定导致聚类生存度为零, 所以为了反映聚核在聚类生存性中的核心地位, 笔者对聚类生存度的计算做如图 2 所示的改进。

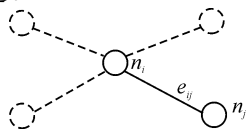


图2 聚类结构

对图 2 所示的聚类, 聚核为节点  $n_i$ , 聚枝为边  $e_{ij}$ , 聚端为节点  $n_j$ 。  $r_{ni}$ ,  $r_{eij}$ ,  $r_{nj}$  分别为聚核、聚枝、聚端有效的概率, 将每个聚端和与其相连的聚枝看做一个整体, 则单个聚端-聚枝不连通的概率是  $1 - r_{eij} r_{nj}$ , 对于有  $K$  个聚端-聚枝的聚类, 全部聚端-聚枝都不连通的概率为  $\prod_{j \in E_i} (1 - r_{eij} r_{nj})$  ( $E_i$  是聚类  $i$  中聚枝的集合), 至少有一个聚端-聚枝连通的概率为  $1 - \prod_{j \in E_i} (1 - r_{eij} r_{nj})$ , 由于聚核至少与一个聚端连通的前提是聚核必须有效, 所以聚类  $i$  的生存度表达式应

为

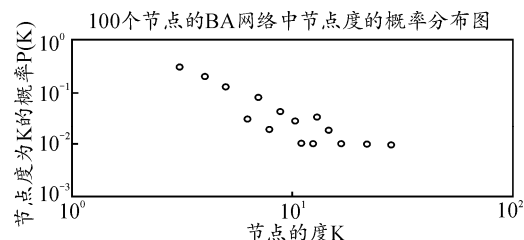
$$S_i = r_{ni} \left( 1 - \prod_{j \in E_i} (1 - r_{eij} r_{nj}) \right) \quad (4)$$

根据式 (2) 可得全网聚类生存度的计算公式为

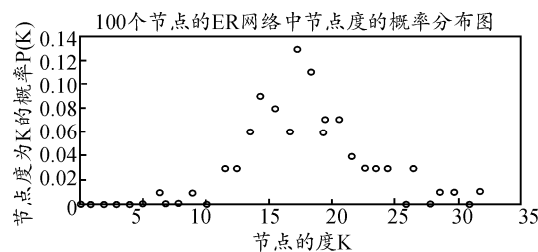
$$S_G = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N w_i r_{ni} \left( 1 - \prod_{j \in E_i} (1 - r_{eij} r_{nj}) \right) \quad (5)$$

## 2 仿真分析

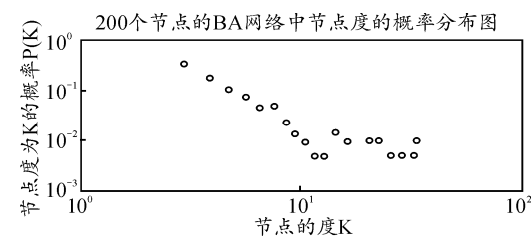
通信网络在结构上属于复杂网络<sup>[3]</sup>, 目前复杂网络中比较典型的是 ER 随机网络和 BA 无标度网络。使用改进前后聚类生存度算法对节点数为 100 和 200 的随机网络和无标度网络在链路可靠节点遭受攻击以及节点和链路均遭受攻击情况下的生存性进行分析, 并将第一种情况下的结果与文献[3]中的结果进行比较。用 Matlab 产生节点数为 100 和 200 的 ER 随机网络和 BA 无标度网, 节点度分布如图 3。



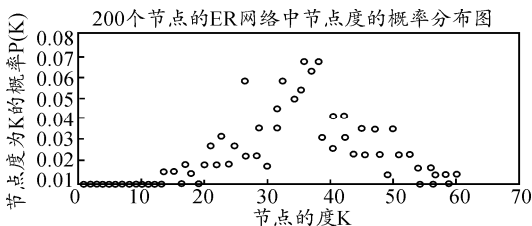
(a) 100 个节点 BA 的网络节点度分布



(b) 100 个节点的 ER 网络节点度分布



(c) 200 个节点的 BA 网络节点度分布

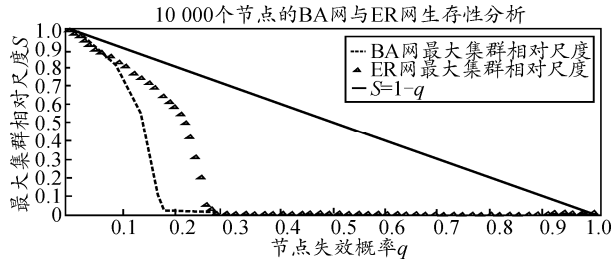


(d) 200 个节点的 ER 网络节点度分布

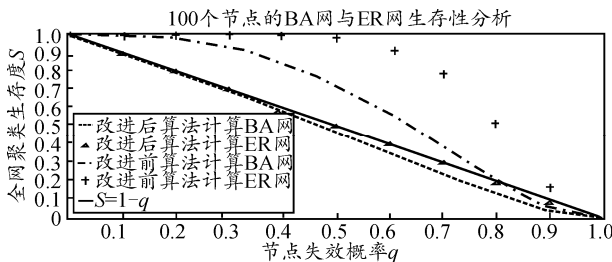
图3 网络模型的节点度分布

### 2.1 链路可靠节点遭受攻击时的网络生存性

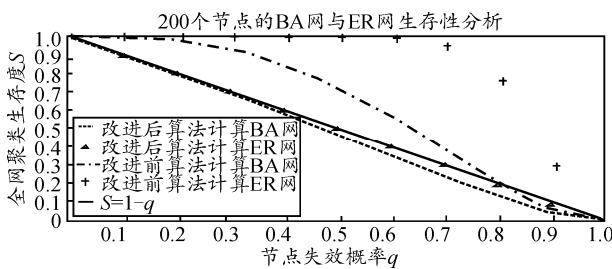
使用改进前后算法计算 ER 随机网络和 BA 无标度网络在链路可靠、节点遭受攻击情况下的全网聚类生存度,并与文献[3]中 10 000 个节点规模的随机网络和无标度网络最大集群相对尺度比较。



(a) 文献[3]中 10 000 个节点的网络生存性分析结果



(b) 100 个节点的网络生存性分析结果



(c) 200 个节点的网络生存性分析结果

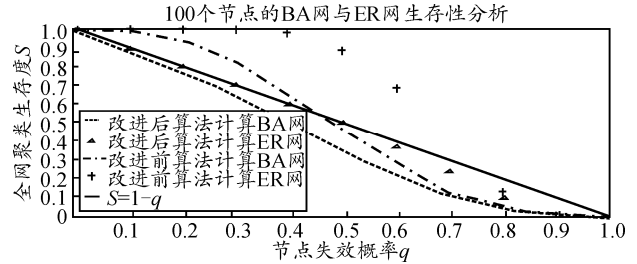
图 4 链路可靠节点遭受攻击时的网络生存性

图 4 显示改进前后算法与文献[3]中的方法所得结果的相同点是:在针对性攻击情况下,ER 随机网络的生存性好于 BA 无标度网络。文献[3]中的最大集群相对尺度曲线与文中改进算法算得的全网聚类生存度曲线都在直线  $S=1-q$  下方,而改进前算法算得的全网聚类生存度曲线在  $S=1-q$  上下波动。对结果分析可知,由于全网聚类生存度是各个节点聚类生存度的加权平均值,而各个节点的近均度  $w_i \leq 1$ ,所以全网聚类生存度必不大于各个节点聚类生存度的最大值。而聚类生存的前提是聚核节点有效,所以聚类生存度必不大于聚核节点的有效概率,从而全网聚类生存度必不大于节点有效概率,即全网聚类生存度必不大于  $1-q$ 。从另一个角度考虑,直线  $S=1-q$  反映的是全连通网络的生存性,是一个网络能够达到的生存性最理想状态,任何非全连通网络

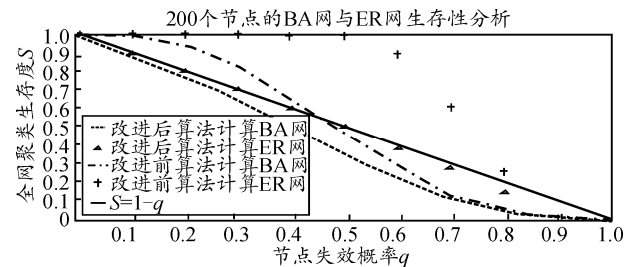
的生存性不可能超过全连通网络。改进后的算法与文献[3]中算法的计算结果均在直线  $S=1-q$  下方,都没有超过最理想的网络生存状态,可见改进算法比原算法更加准确地反映了网络的生存性。

### 2.2 链路和节点均遭受攻击时的网络生存性

文献[3]没给出节点和链路都遭受攻击时的最大集群相对尺度,使用改进前后的算法计算链路和节点都遭受攻击情况下的全网聚类生存度如图 5。



(a) 100 个节点的网络生存性分析结果



(b) 200 个节点的网络生存性分析结果

图 5 节点和链路均遭受攻击时的网络生存性

图 5 显示:在加入对链路的攻击后,网络的生存性明显下降,这与实际情况相符;使用改进前后算法得到的全网聚类生存度显示随机网络的生存性依然高于无标度网络;改进前的算法结果仍然存在超过网络最理想生存性状态的情况。

### 2.3 算法的计算速度

在 CORE i3/2310M 平台上使用改进前后的算法以及文献[6]中的方法分析节点数为 100~200 的全连通网络生存性,运算时间如表 1。

表 1 不同方法分析节点数为 100~200 的全连通网络生存性所用时间 s

算法	节点数					
	100	120	140	160	180	200
改进前算法	12.1	18.7	24.3	32.2	41.1	49.3
改进后算法	12.2	18.5	24.6	32.1	41.3	49.1
文献[6]算法	15.7	26.4	42.7	61.4	94.8	142.6

表 1 显示,改进前后算法的运算速度基本相同,都比文献[6]中算法的速度快,并且随着节点数目的增加,这种速度上的差距越发明显。

仿真结果表明:笔者提出的改进聚类生存度对

网络生存性的分析比原算法更加准确, 而且保持了原算法较快的运算速度。

### 3 结束语

通过对仿真结果进行比较分析, 笔者提出的改进算法对于网络生存性的分析科学合理, 比原算法更加准确, 既考虑了网络拓扑结构中节点度分布的均匀性, 又考虑了网络部件自身可靠性, 而且计算速度较快。根据军事通信网的实际情况, 网络部件的可靠性可以从部件自身防御性和敌人的威胁性等方面分析, 运用熵权等理论工具进行计算, 从而将该方法与军事通信网的实际情况具体结合起来, 这也是笔者下一步准备做的工作。

### 参考文献:

[1] 罗鹏程, 金光, 周经伦, 等. 通信网可靠性研究综述[J]. 小型微型计算机系统 2000, 21(10): 1073-1077.

[2] P. Baran On distributed communication networks [J]. IEEE Trans. on Communications Systems, 1964, 1(1): 212.  
 [3] Albert R, Barabasi A L. Statistical mechanics of complex networks[J]. Rev. Mod. Phys. 2002, 74: 47-97.  
 [4] Castillo E, Mene'ndez J M, Sa'nchez2Cambronero S. Predicting traffic flow using Bayesian networks. Transportation Research Part B, 2008(42): 482-509.  
 [5] 黄晶, 徐丽群. 基于贝叶斯网络的路网失效程度评估方法研究[J]. 科学技术与工程 2010, 10(9): 2127-2133.  
 [6] 郭伟. 野战地域通信网可靠性的评价方法[J]. 电子学报, 2000, 28(1): 3-6.  
 [7] 王兴帅, 石孝文, 韩啸. 地域通信网聚点团生存性估计方法[J]. 吉林大学学报: 自然科学版, 2007, 25(5): 500-504.  
 [8] 任晓涛, 赵胜辉, 匡镜明. 战术通信网基于聚类的生存性估计[J]. 兵工学报, 2004, 25(4): 441-445.  
 [9] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

\*\*\*\*\*

(上接第 43 页)

乘车士兵损伤因子  $e_2$  的计算公式

$$e_2 = 1 - (1 - s_2)^n$$

$s_2$  为单车通过所有雷场的通过概率, 且有

$$s_2 = 1 - (1 - s_1)^{D_a \rho}$$

式中:  $D_a$  为攻击部队的冲击距离;  $s_1$  为单车通过一个雷场的通过概率, 且有

$$s_1 = [1 - (1 - Q)^{4\rho'}]q$$

式中:  $Q$  为坦克或装甲车的触发概率;  $q$  为地雷对坦克或步战车的条件毁伤概率, 且有

$$q = \rho'[(2B + D) - \frac{2}{3}D]$$

式中:  $B$  为坦克履带宽;  $D$  为地雷直径。

情报侦察保障主要由基本战术单位建制的军事情报部队和从上级获取的相关情报信息组成, 由于各种情报侦察资源的来源不同, 侦察器材的配置地域和侦察范围各异以及作战地域内纵深和正面的扩大, 因而在作战地域内基本战术单位所能获取的情报资源也不完全一样。因此, 在情报侦察上, 也采取分层处理的方法, 求取作战地域上每个纵深层次上情报侦察保障的能力, 其计算公式为

$$O_j = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} F_i e_{ij}$$

式中:  $m$  为第  $j$  层上情报资源单位的数量;  $\lambda_{ij}$  为第  $i$  类情报资源单位在第  $j$  层上所有情报资源单位所占的权重;  $F_i$  为第  $i$  类情报资源单位的侦察能力;  $e_{ij}$  为第  $i$  类情报资源单位在第  $j$  层上的有效性。

其中  $F_i$  的计算公式为

$$F_i = 1 - (1 - kfSQ)^n$$

式中:  $k$  为该类侦察器材的抗干扰能力系数;  $f$  为该类情报资源单位内单件侦察器材侦察保障能力;  $S$  为该类侦察器材的地形影响系数;  $Q$  为该类侦察器材的气象影响系数;  $n$  为该类情报资源单位内侦察器材的数量。

### 3 结束语

对不同的武器在不同的地域产生的威胁进行评估, 有效避免了以前对整个战场威胁给出一个笼统评价而产生的不明确性。根据各类武器在不同地域的威胁组成、程度, 导出威胁组成要素配置和运动的模型, 有助于推知作战对象在一定时期的动机和部署意图, 从而有利于部队根据威胁程度来调整作战部署。

### 参考文献:

[1] 董树军, 等. 作战效能评估理论与方法[M]. 北京: 解放军出版社, 2006: 76-79.  
 [2] 王希星, 尹健等. 陆战主战武器作战效能指数等效分析方法[J]. 仿真技术, 2007, 23(7): 270-272.  
 [3] 唐上钦, 黄长强, 等. 基于威胁等效和改进 PSO 算法的UCAV 实时航路规划方法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(8): 1706-1710.  
 [4] 张最良, 等. 军事运筹学[M]. 北京: 军事科学出版社, 1993: 98-99.  
 [5] 王飞, 等. 军事地形分析建模与应用[M]. 北京: 解放军出版社, 2002: 130-131.