

基于作战仿真的军用通信网络战时抗毁性研究

潘丽君, 范锐, 王精业

(装甲兵工程学院装备指挥与管理系, 北京 100072)

摘要: 针对军用通信网络特殊的使用场合和使用时机, 给出了军用通信网络战时抗毁性定义, 分析了影响其抗毁性的可能因素, 提出了基于干线节点密度变化、网络可通性度量(连通度)、网络流量变化等的军用通信网络战时抗毁性评价方法与评价指标, 并建议了改善军用通信网络战时抗毁性的可能措施与方法。

关键词: 军用通信网络; 抗毁性; 连通度

Research on Survivability for Military Communication Network Based on Combat Simulation

PAN Lijun, FAN Rui, WANG Jingye

(Dept. of Equipment Command and Management, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

【Abstract】 According to the special situation and occasion that military communication network is used in, the definition for survivability in battlespace is provided and explained, possible factors affecting survivability are analyzed. Then, evaluating measures and algorithms such as changes of backbone nodes' distributing density, network's connectivity, instantaneous or statistical traffic loads and so on are put forward. Several steps and methods to improve survivability are suggested.

【Key words】 Military communication network; Survivability; Connectivity

作为战场信息系统中的信息传输基础, 军用通信网络承担着语音、数据、图像、视频等大量多媒体业务的传送任务, 是信息传输的物理平台。随着不同传输媒介的普遍采用, SDH、ATM、MANET 等通信、网络新技术的引入与应用, 信息传输的数质量都得到极大提高, 网络性能和战时可用性也大大增强。然而, 随着作战人员、武器装备对信息系统依赖程度的大幅度增加, 信息流在作战中的主导和控制作用日益明显, 制信息权已成为敌对双方争夺的焦点, 信息系统成为双方首选的打击目标, 信息部队的作战指挥与对抗也由“后台”走向了“前台”, 破坏信息流的有序流动成为双方对抗的重点。战场信息系统的安全性、可靠性、抗毁性(也称存活性, 顽存性等)问题已成为系统规划、论证、方案设计与优化的重点考虑内容。

基于作战模拟的通信网络仿真, 可用于研究战场环境下网络的性能发挥, 网络的战时可用性和抗毁性等; 有助于寻找网络中的关键节点和关键链路、网络瓶颈所在以及动态重组后的不合理之处, 从而及时进行有针对性地备份设计、路由修改及网络管理。网络的战时抗毁性已成为现代作战环境下联络畅通、指挥控制可信、有效的有力后盾。

1 军用通信网络战时抗毁性定义

军用通信网络的战时抗毁性(survivability)是指: 当网络中出现确定性或随机性故障, 部分组成要素或局部子网遭受人为或自然的软压制、硬摧毁时, 网络维持及恢复其性能、效能到一个可接受程度的能力。该能力的量化表示, 可以从网络各组成的随机毁损出发给出抗毁度量, 也可从网络拓扑结构的组成及动态变化给出确定性度量。突出抗毁性而非可靠性, 是为了强调战场环境下通信网络的抗毁和抗干扰能力,

以示与侧重装备保障与维修实效性相关的可靠性的区别。

由于军用通信网络组成复杂, 要素众多, 网络抗毁度量计算量大。不同的抗毁性度量模型对应不同的指标集和度量算法。文献[1]针对抗毁性算法复杂问题, 在分析网络结构、评估抗毁性时, 对网络分层研究, 突出主干网的重要性, 将下层网络看作一个整体, 引入了网团、网团权重等概念, 提出利用网团间可能建立的路径总数 P 与网团间要求建立的路径数 s 之比作为网络拓扑抗毁性度量。

2 军用通信网络战时抗毁性影响因素

影响军用通信网络战时抗毁性的因素较多, 主要包括:

(1) 随机或突发的战场硬杀伤。硬毁伤是影响军用通信网络抗毁性的首要因素, 因为: 1) 指控系统及其“神经”通信网络已成为敌方首选的重要打击目标。2) 作战过程中各指挥机构、指控车辆、干线节点等电磁辐射较为密集, 特征明显, 隐蔽困难, 暴露机会加大。3) 大量精制武器、定向能武器、反辐射弹的使用, 使得通信网络及其主要组成部件一旦被发现, 直接摧毁的可能性较大, 且摧毁后恢复较困难。

(2) 随机或突发的战场软杀伤。由战前、战时的电子战信息战决定, 主要包括电磁压制和网络攻击。软杀伤可使系统失去正常工作能力, 恢复时间较长。

(3) 系统或设备的自然损伤或故障。因系统不稳定或外界环境变化等导致系统或设备的可靠性下降, 其度量一般以平均故障间隔时间(MTBF)和平均故障修复时间(MTTR)表示。

(4) 战术转移与快速机动。随着战线推移和作战进程发

作者简介: 潘丽君(1970 -), 女, 副教授, 主研方向: 无线通信, C⁴I装备作战仿真研究; 范锐, 博士生; 王精业, 教授、博导
收稿日期: 2006-01-29 **E-mail:** panlijun@263.net

展,部分战术通信网络因战事需要实施战术转移或替换,导致网络的持续工作能力和重组能力发生变化。

(5)战时无线通信网络数据传输的不可靠。

(6)无线通信网络数据传输速率有限。

(7)无线网络通信中的终端遮蔽问题。

(8)人为操作失误。可导致通信网络或其部组件不能正常工作,严重时装备毁损或系统瘫痪。

(9)自然灾害。如台风、洪水、地震、泥石流等,这些偶然因素会使网络及其部组件丧失部分或全部战斗力。

其中,(1)~(3)主要描述软硬摧毁对网络战时抗毁性的影响。(5)~(7)主要考虑无线传输机制对网络可靠性的影响。(1)~(3)、(4)、(8)、(9)都会使网络拓扑结构发生了变化,并直接影响到网络传输的可靠性。

3 军用通信网络战时抗毁性评价方法与评价指标

20世纪70年代以后,关于通信网可靠性的研究进入了一个新阶段,发展了许多理论,提出了不少通信网可靠性的评估方法及相应的指标测度方法,常用的有确定性测度、概率性测度和完成性测度。各种测度方法都围绕通信网的可靠性、抗毁性和网络服务性能的评估展开。

军用通信网络战时抗毁性评估涉及的因素较多,各因素间彼此相关,包括网络拓扑结构及其动态变化情况、节点或链路等组网设备的可靠性、软压制硬毁伤的随机性、电信业务流量的随机性与暴发性、网络路由技术及控制管理策略等,使得网络可靠性、抗毁性的评估算法较为复杂,许多评估算法的计算复杂度都属于NP-Hard问题。为此,人们开展了许多近似算法研究,如网络可靠性的上下界评估研究等。

军用通信网络的战时抗毁性指标与其承担的具体军事任务有关,如接受预警信息后做好出动准备的部队兵力百分比、部队兵力隐蔽百分比等。基于作战仿真的军用通信网络抗毁性分析可围绕下列几点展开:

(1)在敌火、自然灾害等前提下,部组件、链路、节点等被毁伤后,网络能力的下降程度;

(2)在网络及其设备故障条件下,网络能力的下降程度;

(3)在网络部分遭受病毒、电磁干扰等软攻击下,网络能力的下降程度;

(4)在网络管理及使用人员操作失误下,网络能力的下降程度等。

网络能力与网络拓扑密不可分。具体评价指标包括遭受摧毁或压制后网络的最小最大连通度变化,干线节点分布密度的变化,网络中最大可靠路、最大容量路、最大期望容量集、最佳流的变化等质量参数^[2]。体现到作战效能中,则可能导致:

(1)指挥机构的缺失及指挥链的中断;

(2)情报信息更新缓慢;

(3)不能及时形成有利的交战态势;

(4)错过目标打击最佳时机或目标打击失误;

(5)因无法及时撤离而发生毁损等后果。

3.1 基于干线节点密度变化的战时抗毁性分析

干线节点是战场上的通信枢纽,是网络的核心。伊拉克战争给人们带来的一条宝贵经验就是与通信枢纽剥离的指控机构具有更强的生存能力。干线节点的相对密度高,分散在不同作战地域的指控机构要求入网实施通信联络、信息共享更为容易。密度过大,又易受压制和摧毁。剩余有效干线节点密度和失效干线节点密度等指标可用来评估网络抗毁

性能。

定义 1 有效/失效干线节点密度等于某一覆盖地域内有效/失效干线节点数除以该区域面积,度量单位为干线节点数/ km^2 。

$$K = N / A \quad (1)$$

其中 N 指定区域内的干线节点数(含冗余备份节点),在某一次仿真开始时可给定;

A 指定区域的面积(km^2)。

评定时可比较有效/失效干线节点密度的变化。

3.2 基于可通性度量的战时抗毁性分析

评价网络抗毁性的主要可靠性指标有:节点连通度、链路(边)连通度、网络平均连通度等。

由图论知识^[3,4]可得:一个几何图形的连通度可以用节点的连通度和边的连通度来描述。Newport等人^[5,6]也针对该两项指标提出了自己的网络抗毁性和可靠性分析算法。同样,可以用连通度来描述网络拓扑结构强度及它抗毁性。下面分别给出节点连通度和边连通度的基本定义。

定义 2 节点连通度是指使 X 、 Y 两个节点不连通所需移去的最少节点数。

定义 3 边连通度是指使 X 、 Y 二个节点不连通所需移去的最少边数。

图 1 描述了一个简化的低梯队坦克连战术互联网网络,包含连、排、单车 3 级。其中节点 A 、 B 分别代表连长车和后勤保障车, C 、 D 、 E 分别代表 3 辆排长车,而 X_1 、 X_2 、 X_3 ($X = C$ 、 D 、 E) 则分别代表每个排的 3 辆坦克。

图 1 中,欲使节点 A 与节点 C_1 不连通,有几条不同的途径,但移去节点 C 是移去最少节点而达到目的的途径。因此,可认为 A 、 C_1 间的节点连通度 $C_n = 1$ (1 个节点)。从边连通度的角度来看,移去 CC_1 是移去最少边数而达目的的路径,因此其边的连通度 $C_e = 1$ (1 条边)。而对于两两互连的连排一层网来说,由于采用的是网状网,每个节点都有直达其它节点的路由,其连通度比排到单车一级网要大得多。

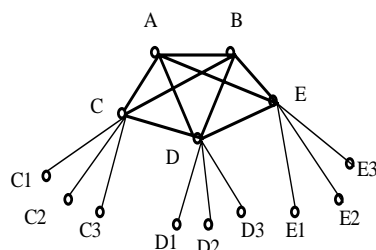


图 1 典型坦克连战术互联网

从连通度定义看,连通度愈大,则节点对间断开难度增加,反之,节点对间易断开。将这个论点运用于军用通信网络拓扑结构图,可得网络的连通度大,则网络的抗毁性大,反之则小。因此,为了提高网络抗毁性,应在资金许可情况下,尽量构建连通度大的网络拓扑结构。对已有的或正在建设中的信息网,分析并明确连通度较小的薄弱节点和传输链路,对重要节点进行必要的备份,并采取适当的保护措施。

通常情况下,在考虑网络抗毁性时,不仅要考虑关键边的连通度,而且要考虑全网各节点对间的平均连通度,即网络的平均抗毁性。

定义 4 网络的平均抗毁性是指整个网络所有节点对间的平均连通度。其抗毁性指标定义为网络中所有节点对间不相交通路数的平均数,对于一个由 n 个节点, m 条边组成的

战场通信网络，用 F 表示。

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n C_n(i, j) / 2N \quad (2)$$

$$C_n(i, j) = \min[d(i), d(j)] \quad (3)$$

其中， $C_n(i, j)$ 代表节点对间连通度，即节点间不相交通路数，可利用最大流量最小割量定理计算^[7]。 $d(i)$ 、 $d(j)$ 分别表示节点 i 、 j 关联的节点数。N 为网络中节点对的数量。

平均连通度是一个很好的指标。遗憾的是，面对类似战役级通信系统这样的大型综合性网络时，任一节点对间都存在大量的迂回路由，平均连通度仅能反映网络节点间可靠连通的能力，不能反映网络拓扑结构的抗毁能力，文献[8]针对这一问题，提出了一种快速评价野战地域网可靠性的方法。对于有针对性的两节点(如师基指至前沿某一攻击直升机、坦克等)间抗毁性分析，链路连通度和节点连通度更有说服力。

对于几种常见的典型拓扑结构网络，网状网的连通度最大，抗毁性最好。环状网的抗毁性不高，多环网中的互连接点是环网的关键点和薄弱点，确保其抗毁性的最简单最可靠方法是增加备份节点和路由。

在进行基于连通性的抗毁性分析时，节点或边失效的原因可能是软压制、硬毁伤、自然减员，也可能是由于节点或链路每一类设备的可靠性下降。前者依据战事的推过程进行确定，后者则需根据相应的指标属性，引入随机因子，经必要的判断后确定。

3.3 基于网络流量的战时抗毁性分析

网络的作用就是将业务流从源端(source)传送至宿端(sink)。合理分配流量，可充分利用网络资源。流量分配的优劣直接关系到网络的使用效率和抗毁性。

通信网内的流量通常是指传信率，其分配主要受限于网络拓扑结构，链路、转接节点和端节点的容量。通信流量往往具有随机性和爆发性。通过分析最大容量路集的变化、流经各转接节点(含干线节点)的最大流变化、最佳流或最小代价流的变化情况等，可进行基于网络流量的抗毁性分析。

用有向图 $G=(V, E)$ 来表示所研究的军用通信网络，端(节点)集 $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ，边(链路)集 E 是有向的，代表节点间来往的信息流，用 e_{ij} 表示从 v_i 到 v_j 的边。每条边能通过的最大流量称为边的容量，用 c_{ij} 表示；边上的实际传输流量记为 f_{ij} 。若边 $e_{ij} \notin E$ ，则 $c_{ij}=0$ ， f_{ij} 也必定为 0。一组流量的安排 $\{f_{ij}\}$ 称为网内的一个流。若这个流使从源端到宿端有总流量 F，且该流为可行流，则必满足：

(1)非负性和有限性： $0 \leq f_{ij} \leq c_{ij}$

(2)连续性：

$$\sum_{v_i \in (v_s)} f_{ij} - \sum_{v_i \in (v_t)} f_{ij} = \begin{cases} F & \text{若 } v_i \text{ 为源端 } v_s \\ -F & \text{若 } v_i \text{ 为源端 } v_t \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

$$\text{式中 } \Gamma(v_i) = \{v_j : e_{ij} \in E\} \\ \Gamma'(v_i) = \{v_j : e_{ji} \in E\}$$

不同的流量分配得到不同的可行流。最大流优化问题可归结为变更某一可行流中的 f_{ij} 值，使 F 最大的线性规划问题，这在网络重组决策中非常有用。仿真过程中可根据仿真

流量的变化逐帧逐路由统计。

最佳流或最小代价流问题可归结为寻求占用关键节点最少、威胁等级最小的流。每条边除容量 c_{ij} 和流量 f_{ij} 之外，还考虑代价 α_{ij} ，表示费用、重要等级或威胁度。在给定 F 的条件下，选择路由，分配流量，调整每一段的 f_{ij} ，使总代价 $\Phi = \sum_{e_{ij} \in E} \alpha_{ij} f_{ij}$ 最小。仿真过程中只需设定每一中间链路的费

用、重要等级或威胁度，计算总代价，从而找出最小代价流。

有线链路的容量通常由线路本身属性决定，而无线链路的容量则取决于源和宿所采用装备的性能。链路中的实际流量由各仿真实体的需求决定。由于仿真体系中考虑了所有仿真实体，结合实体所用的终端指控系统、协议、数据封包形式、加解密算法、纠错编码方式等，可获得出入各端节点的业务类型及流量大小。在统计所有源至宿的流量时，必须考虑途中所有转接节点的分组缓存处理能力，分组数不得超过最长可能队列，否则网络会发生拥塞、崩溃。

4 提高军用通信网战时抗毁性的措施与方法

提高战场通信网络战时抗毁性的措施较多，主要有：

(1)提高网络生存能力。可采用介于树形网和全网网之间的分布式栅格状网，综合使用多种通信手段和多重线路设置，关键节点或设备进行必要的冗余备份、重用和复用，提高通信枢纽和指挥中心的生存能力；

(2)引入更大的容量和更小的传输时延；

(3)提高兼容性，使战略网与战术网、军网与民用公网间能实现互连互通；

(4)增加保密性；

(5)改善系统稳定性。

对于一些重点军事目标，还可引入其它一些提高其抗毁性的措施，如增强隐蔽性、增强防护性、防电磁泄露、必要的核辐射防护等。

分析军用通信网络的战时抗毁性，应从提高网络的整体抗毁能力出发，把有效防护和快速恢复结合起来，确保战场通信网络在局部受损的情况下具有较强的再生恢复能力，从而以较低的投入赢得较高的军事效益。

参考文献

- 1 钟联炯, 徐 锋. 通信网络拓扑抗毁性算法[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(6, Supplement): 113-114.
- 2 谢 政. 网络算法与复杂性理论(第 2 版)[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2003.
- 3 Wing O, Demetrios P. Analysis of Probabilistic Networks[J]. IEEE Trans. on Communication Technology, 1964, 12(3).
- 4 王朝瑞. 图论(第 3 版)[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- 5 Newport K T. Network Survivability Through Connectivity Optimisation[C]. Proc. of ICC'87, 1987.
- 6 Newport K T. Design of Survivable Communication Networks Under Performance Constraints[J]. IEEE Trans on Reliability, 1991, 40(4): 433-440.
- 7 周炯盘. 通信网理论基础[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1991.
- 8 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.
- 9 王海涛. 军事通信网及其相关问题的探讨[Z]. <http://www.cww.net.cn>, 2003.

