

C³I 系统的网络可靠性综述

郑 龙, 刘敬军, 罗鹏程, 周经伦

(国防科技大学 信息系统与管理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 总结评价了近年来国内外在 C³I 系统的网络可靠性方面的研究进展, 阐述了 C³I 系统中的网络可靠性、抗毁性、生存性以及有效性等基本概念。并从影响网络可靠性的因素角度进行研究, 提出与 C³I 系统相关的各种建模分析方法。最后对 C³I 系统网络可靠性的未来研究做了进一步的展望。

关键词: C³I 系统; 通信网络; 可靠性; 分析方法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1005-3751(2006)04-0011-03

Review of Network Reliability for C³I Systems

ZHENG Long, LIU Jing-jun, LUO Peng-cheng, ZHOU Jing-lun

(School of Info. System & Management, National Univ. of Defense Techn., Changsha 410073, China)

Abstract: Summarize and appraise the domestic and international research progress of C³I systems network reliability in near these decades, expatiate the basic conception of network reliability, network invulnerability, network survivability and network availability in the C³I systems. And carry on research in terms of factor influencing reliability of the network, put forward its various kinds of relevant modeling analytical methods with C³I systems. At last the trend of development in the future has been prospected.

Key words: C³I systems; communication network; reliability; analytical methods

0 引言

20 世纪 60 年代出现了指挥、控制和通信综合系统—C³ 系统的概念; 70 年代美国国防部把 C³ 和情报综合到一起组成 C³I 系统; 90 年代美国国防报告提出了综合 C⁴I 体制, 随后又把监视和侦察综合进入 C⁴I 系统, 称为 C⁴ISR 系统; 随着现代军事理论的发展, 又将协调性和互操作性等加入 C⁴I 系统, 形成了近期的多种系统。经研究表明以上系统对国防通信系统起到了极大的推动作用, 并在多次区域性战争中证明了其强大威力, 曾被前苏联称为第二次世界大战以来继原子弹和导弹之后的第三次军事革命。C³I 系统是由网络互连组成的军事信息系统, 其中包括许多子系统。除传感器、通信设备、武器系统外, 计算机、软件环境、网络设备也是主要组成部分, 尤其是计算机系统, 它在信息传输应用方面作用显著。如此众多的系统, 要协调一致, 相互间要保持密切的联络, 这就必须由网络将它们连接起来, 使信息在各自的控制下进行可靠地传递。由此可见整个 C³I 系统的可靠性、抗毁性、生存性、有效性和保密性在很大程度上取决于军事通信网络。网络决定了 C³I 系统的作用空间和控制范围, 是实现军队指挥自动化的基础。C³I 可靠性研究的根本就是对网络可靠性进行

研究。同时也由于系统对网络的日益依赖, 网络故障时有发生。除了每天可能发生的小故障外, 还有敌方使用武力或利用管理的漏洞, 以常规物理方式直接破坏, 摧毁计算机网络的实体。因此人为、自然和战争所造成的网络故障率攀升, 加强网络可靠性的研究对提高 C³I 系统的可靠性有重要的现实意义^[1~4]。

1 网络可靠性概念

C³I 系统中的网络是指在一定作战地域内开设若干个干线节点, 以多路传输信道互连, 形成栅格状可移动的公用干线网, 各级用户通过入口节点入网, 达成作战信息传递的通信网络。对于一个系统, 可靠性是重要的整体指标, 网络亦不例外。网络的可靠性不仅与设备、链路有关, 而且与网络结构有密切的关系。从目前的研究情况来看, 网络可靠性的定义很多, 列举如下:

定义 1 网络在规定条件下, 在规定时间内, 保持连通的能力。记为 $R(t)$, 其表示 $R(t) = P(T > t)$ 。

定义 2 网络在规定的条件下, 规定的时间内, 完成指定功能的能力。

定义 3 网络拓扑为网络在其组成部分处于有随机故障的环境中工作时所提供的合适的连接能力^[5]。

定义 4 在人为或自然的破坏作用下, 网络在规定条件下和规定时间内的生存能力。

定义 5 在人为或自然的破坏作用下, 网络在特定环

收稿日期: 2005-10-21

作者简介: 郑 龙(1980-), 男, 江西南昌人, 博士研究生, 研究方向为信息系统工程、可靠性理论与工程; 周经伦, 博士生导师, 教授, 主要从事系统工程专业方向研究。

境下和规定时间内,充分完成规定通信功能的能力。

定义 6 当传输、交换发生故障和话务异常时可以维持正常业务的程度。

定义 7 由源点到终点能够成功地传送所需信息的概率。

定义 8 在给定时间间隔,装备能在给定条件下执行要求功能的概率。

定义 1,2 都是从传统的可靠性定义变化而来,突出了对象、条件、时间和功能的说明;定义 3 从网络拓扑结构来定义;定义 4,5 都是根据一般可靠性的定义演绎而来,突出人为或自然灾害的影响,前者是指网路的生存性,后者则是指网路的有效性,环境、时间和充分完成功能是这一定义的要三要素;定义 6 是我国惯称的“网路可靠性”定义,实际是指网路的稳定质量;定义 7 主要是从网路结构和组织方面对可靠性进行定义(即属于狭义可靠性),是在考虑了节点与链路的可靠性,以及网路拓扑结构和容量基础上给出的,是指网路的可用性;定义 8 则是以装备的可靠性来定义网路的可靠性。其它一些国内外文献也对网络可靠性作了定义,但都不出这几个定义所涵盖的范围^[1,3,5]。

综上所述,可认为 C³I 的网络可靠性是指网络系统在遭到敌方有意破坏或攻击的连续运行过程中,能完成预期所规定的正常连通功能的能力(或概率)。“完成预期所规定的正常连通功能的能力”是 C³I 网络可靠性的测度。它既包含了网络的生存能力和有效性(时点指标),也反映了网络的适应能力;既研究网络正常运行情况下的可靠性,也研究异常情况下的可靠性,是对整个网络运行过程的综合测度。这一定义包括了可靠性研究对象、规定条件、规定时间、规定功能和概率五项要素。其中对象是网络;规定时间与条件是网络系统在遭到敌方有意破坏或攻击的连续运行过程,其可靠性就应理解为一个过程性指标;规定功能是指预期所规定的正常连通功能迅速且充分地得到完成,功能的网状划分见图 1,6 个方面的功能又要若干性能指标来支撑;可靠度就是正确完成 C³I 通信网络连通的概率。

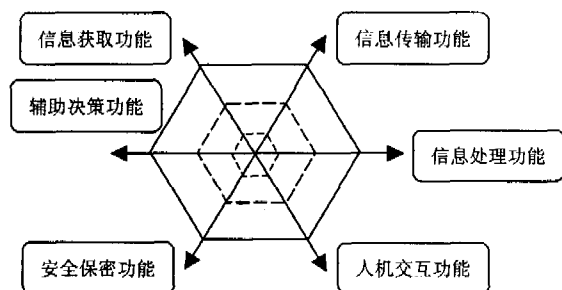


图 1 C³I 系统的网状功能模型图

2 网络可靠性研究现状

C³I 系统越来越依赖于网络的正常工作,而网络规模越来越大,网络通信行为也越变越复杂,对其网络分析、设计都带来了巨大的困难。

网络可靠性的分析方法最初只限于两终端问题,随着大型复杂网络系统的发展,使其分析变得更为一般化,同时出现不少新的算法以及新的理论。20 世纪 70 年代起,网络可靠性理论得到飞速发展,大量关于网络系统可靠性分析的文章在 IEEE. Trans. Rel 和 Micro&Rel 这两个刊物上发表。对于一般的网络系统终端的可靠性分析,50 年代提出用“因式分解定理”或用“条件概率”求解可靠性。1969 年,提出了图的最大连通度的问题,从而开始了网络的脆弱性、幸存性等可靠性问题的研究。到了 70 年代,尽管印度学者又对该方法进行了修改,但在求解内联分支为 m 的网络的可靠性时,不得不同时穷举 2^m 个状态,这对复杂网络来说是困难的。到了 80 年代,利用图论中的边收缩原理和条件概率对网络可靠性进行了简化,提出了 FACTORING 算法^[6~9],但其实现极为复杂。1986 年,提出了网络可靠性综合的概念,使网络可靠性的研究更具实质性的内容。国内学者曹晋华、程侃、廖炯生等纷纷对其可靠性进行了系统的研究。总之,网络系统的可靠性能直接影响整个 C³I 系统的可靠性,只有在保证信息有效传递的前提下,才能充分发挥 C³I 系统的功能。

2.1 影响网络可靠性因素

影响 C³I 系统网络可靠性的因素主要包括:

- (1)战地网络的拓扑结构;
- (2)构成 C³I 网络部件的可靠性、可维护性;
- (3)战地网络的管理控制系统;
- (4)网络的故障诊断能力;
- (5)战地网络的自我恢复能力,包括采用的保护方式、采取的维修策略、采用的路由算法等;
- (6)战地网络的运行环境;
- (7)用户对网络业务性能(如吞吐量和时延等)的要求;
- (8)其它影响 C³I 网络可靠性的因素^[10]。

2.2 网络可靠性测度

目前国内外研究是将网络抽象为一个由节点和链路组成的传送各种信息(业务流)的流图进行分析,C³I 的网络可靠性的测度归纳起来主要有 3 种:抗毁性、生存性和有效性^[2,10]。

(1)网络抗毁性。指网络在遭到敌方有意破坏或攻击的情况下,能完成通信功能的能力。由于战场环境的特殊性使其节点经常移动,加之节点和链路随时都有被摧毁和被破坏的可能,使网络结构发生变化。其研究任务就是在可能变化的拓扑结构中保持连通和自组织的能力,一般通过网络遭破坏前后的粘聚度和连通度来表示。

(2)网络生存性。指网络在战争中随机性破坏下的可靠性,反映了随机性破坏和网络拓扑结构对网络可靠性的影响。随机性破坏是指网络部件的被攻击失效;网络生存性是由概率论和图论中得出的,其得出的连通性(网络端到端的连通概率)作为生存性的测度。

(3)网络有效性。指一种在战争中基于业务性能的可靠

可靠性测度。如军用通信网中因部件失效并没有引起连通性故障,却造成质量指标下降。由于应用影响深远,国内外对其测度指标研究较多。最近有人将路由选择策略对业务性能的影响进行考虑,使研究结果更有意义。

主要测度有:

- a. 网络中特定节点在规定时间内能收到某一节点发送信息的概率;
- b. 网络中的一个中心节点到其他节点的传输时延不超过给定阈值的概率;
- c. 网络业务吞吐量超过一个给定阈值的概率。

比较指标研究成果见表 1。就网络技术而言,还有可用性、保密性、完整性、不可抵赖性等^[2,4,10]。

表 1 三类可靠性指标研究成果的比较

项目	抗毁性	生存性	有效性
出发点	网络拓扑(抽象图)	网络拓扑+随机性(概率图)	网络拓扑+随机性+业务性能(概率流图)
指标	连通度、粘聚度	连通率	基于业务性能的概率指标
研究方法	图论	图论、概率论	图论、概率论及有关通信理论
测度性质	固有可靠性	固有可靠性	工作可靠性
复杂性	小	中	大
实用性	小	中	大

2.3 网络可靠性分析方法研究

C³I 网络系统从网络的层次角度去研究:一、从网的角度出发,根据前述三方面的可靠性测度求出表达全网的可靠性指标。二、从全网的任意两个节点出发,根据前述的三种可靠性测度求出用网络任意两节点的可靠性指标来表述全网的可靠性。

从网络体系结构的各层实现不同的功能和性能指标来研究,可得到 C³I 系统的计算机网络可靠性的概念体系,见表 2。每层定义相应的可靠性,即该层协议功能和性能指标的描述,上层是建立在下层的基础上,并为更上一层可靠性概念服务,分析网路运行质量,对网络可靠性进行综合评价。

表 2 网络可靠性的概念体系

网络层次	可靠性层次	级别
应用层	应用层可靠性	用户级
传输层	传输层可靠性	逻辑网络级
网络层	网络层可靠性	逻辑网络级
数据链路层	数据链路层可靠性	物理网络级
物理层	物理层可靠性	物理网络级

从互连网络拓扑结构对其深入理论研究和数学分析,以系统各部分之间的结构关系和功能关系,将网络简化为一个由节点和链路组成的图形。在简化系统的物理表象的同时,也保留系统所含的结构和功能信息。采用图论和排队论的理论对其进行分析和计算。采用的方法有:

布尔真值表法、全概率公式法、部件状态图示法、最小路集法、全概率分解法、卡诺图法、BDD 法等。采用以上方法就二十几个节点以下的小网络而言可以进行精确计算,但对大网络的精确计算就目前来说是难以进行的。因为,随着网络的节点和链路的增加,出现 NP-HARD 问题。经过几代人的努力网络可靠性算法^[4,6-9,11-13]还有:基于组合数学容斥原理的容斥法、因子定理的分解法、不交集之和法、拓扑可靠性法、网络分析法、状态空间法、蒙特卡罗模拟法、Boolean 代数技术、多项式方法、模糊可靠性法、神经网络技术、遗传算法、计算机仿真技术等。

3 网络可靠性研究的发展趋势

C³I 随着网络的发展,其网络可靠性研究在观念和范围方面都在不断地演进。不仅要研究其设计方法、网络结构,而且要研究影响网络实际运行可靠性的各个方面,也就是要进行网络可靠性综合研究。一方面依靠健全管理、工程和合理使用统计技术的重实效的方法来研究^[11,13];另一方面通过量化因子和模型的数学分析方法来定性定量地研究。

其次随着网络与通信的普及,用户对网络的要求不断提高。网络可靠性研究的出发点由面向研究者转变为面向使用者,以便更好地满足使用者的需求。其研究范围向整个业务过程的质量演化,与此同时,其可靠性管理体系的完善更使网络可靠性的研究不断延伸提高^[4]。

4 结束语

对 C³I 中网络可靠性的研究现状进行了较详细的总结,并以此结合国内外各种网络可靠性的分析方法进行了讨论。随着 C³I 的网络可靠性研究的深入和相关学科的发展,还会出现新的方法,这些方法都存在优点和局限性。善用这些新技术,C³I 的网络可靠性研究必将跨越图论阶段而进入与网络性能相结合的阶段,实现 C³I 系统通信网络的智能化、一体化。这将能满足 C³I 的各种要求,根据战场的需要,提高信息通信能力,加强指挥控制通信的机动性,覆盖更广泛的区域,从而更好地加强战术效能和部队的生存能力。

参考文献:

[1] 思 凌. 高科技培育下的“网络中心战”[J]. 自动化博览, 2003, 20(1):65-68.

[2] 梁雄健,孙青华. 通信网可靠性管理[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2004.

[3] 叶酉荪,南 庚. 军事通信网分析与系统集成[M]. 北京:国防工业出版社, 2005.

[4] 李 颖. 通信网络系统可靠性研究[J]. 移动通信, 2003 (2):177-179.

[5] Walrand J, Varaiya P. High-Performance Communication Networks[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.

性可知能够在再现物面上得到原物光波前。由于分数傅里叶变换周期性质,重现系统实现 $4 - p_1$ 阶分数傅里叶变换也可以重现物光波前。还有其它可能选择,这里不予讨论。

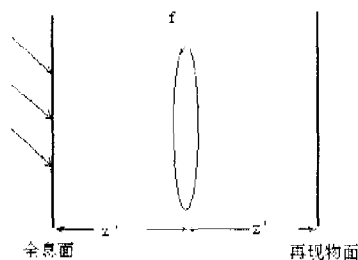


图 3 分数傅里叶全息图再现光路

2.2 分数傅里叶变换全息图的记录和重现的计算机模拟

记录物体为二值化后的数字图像,参考光波的方向角 $\theta = \pi/6$,记录系统的入射波长 $\lambda = 630\text{nm}$,透镜焦距为 $f = 150\text{mm}$ 。在 Matlab 平台下,将前述快速算法直接推广到二维情况,模拟记录和重现过程,得到如下结果(见图 4)。

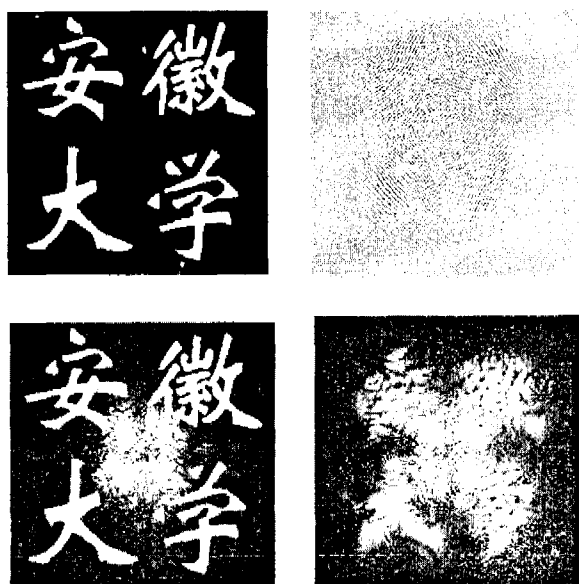


图 4 分数傅里叶变换全息图的生成和重现结果

图中:左上图是原物图像;右上图是原物图像在 $p_1 = 0.6$ 阶分数傅里叶变换域生成的全息图;左下图是对右上

图所示全息图进行 $p = 4 - p_1 = 3.4$ 阶分数傅里叶变换所得到的重现图像;右下图对右上图所示全息图进行 $p = 3.9$ 阶分数傅里叶变换所得到的结果。

由图可见,由于记录和重现时的分数阶不匹配,得不到原物的重现图像;重现的结果图像中含有一些背景噪声,这是由于对式(11)作匹配分数傅里叶变换时,(11)式中有共轭项存在。

3 总 结

分析 Lohmann 单透镜模型的物理过程,利用菲涅耳衍射的快速算法,提出了基于 Lohmann 单透镜模型的分数傅里叶变换快速算法,物理概念十分明确;利用此快速算法实现了分数傅里叶变换全息图的计算机模拟和重现。分数傅里叶变换是一种较新的信息处理方法,由于它既区别于一般的菲涅耳全息图,又有别于一般的傅里叶变换全息图,可以预料,它必将有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Namis V. The Fractional order Fourier transform and its application in quantum mechanics[J]. J Inst Maths Appl, 1980, 25 (12): 241 - 265.
- [2] Lohmann A W. Image rotation, Wigner rotation, and the fractional Fourier transform[J]. J Opt Soc Am, 1993, 10 (12): 2181 - 2186.
- [3] Finet P P. Fresnel diffraction and the fractional - order Fourier transform[J]. J Opt Lett, 1994, 19(18): 1388 - 1390.
- [4] 陈家璧,苏显渝. 光信息技术原理及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2001.
- [5] 杨 虎,张艺芳. 分数傅里叶变换与菲涅耳衍射的等效性[J]. 光电子激光, 2001, 12(1): 93 - 96.
- [6] 谢世伟,高峰,曾阳素,等. 分数傅里叶变换计算全息图[J]. 中国激光, 2003, 30(5): 431 - 434.
- [7] 丁大为. 菲涅耳全息图的计算机生成和数字重现[D]. 合肥:安徽大学教育部重点实验室, 2004.
- [8] 刘 诚. 无直透光和共轭像的数字全息[J]. 光学学报, 2002, 22(4): 427 - 431.

(上接第 13 页)

- [6] Satyanarayana A. A Unified Formula for Analysis of Some Network Reliability Problems[J]. IEEE Trans Reliability, 1982, 31: 23 - 32.
- [7] Satyanarayana A. New Topological Formula and Rapid Algorithms for Reliability Analysis of Complex Networks[J]. IEEE Trans Reliability, 1978, 27: 82 - 100.
- [8] Satyanarayana A, Chang M K. Network Reliability and the Factoring Theorem[J]. Network, 1983, 13: 107 - 120.
- [9] 郭 波,武小悦. 系统可靠性分析[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2002.

- [10] 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.
- [11] 美国 FCC 网络可靠性委员会(NRC)报告. Network Reliability Performance Committee Compendium of Technical Papers: Section A,B,C,D[Z]. 1999.
- [12] 张学渊. 通信网可靠性及其在中国的研究[D]. 北京:北京邮电大学, 1997.
- [13] 美国 TPC 可靠性与脆弱性研究小组. Nation Information Infrastructure Risk Assessment: A Nation Information at risk [Z]. 1999.