

军事分析仿真评估系统 WMD 模型研究

杨山亮 赵鑫业 杨 妹 付跃文 周 云

(国防科学技术大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘要 大规模杀伤性武器(WMD)是军事分析仿真评估系统的重要研究内容,建立合适和准确的 WMD 模型能够有效模拟和预测 WMD 影响进程,为生化防护辅助决策提供重要的参考信息。首先介绍了 WMD 模型在军事分析仿真评估系统中的地位和作用,然后从 HPAC 模型引擎、数据驱动模式和数据采集接口 3 个方面详细分析了 WMD 模型的建模思想,最后在军事分析仿真评估原型系统的平台上,通过仿真实例验证了 WMD 模型的有效性和正确性。

关键词 军事分析仿真评估系统, WMD, HPAC 模型引擎, 数据驱动模式, 数据采集接口

中图分类号 TP391.9 文献标识码 A

Research on WMD Model in Military Simulation and Analysis System

YANG Shan-liang ZHAO Xin-ye YANG Mei FU Yue-wen ZHOU Yun

(College of Information Systems and Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Weapons of mass destruction are of great significance as an important part of military simulation and analysis system. Establishing the proper and correct WMD model can simulate and predict WMD impact process effectively, which can provide significant reference information for biochemical-protection decision support operations. Firstly, the status and role of WMD in military simulation and analysis system were introduced in brief. Secondly, the modeling ideas of WMD model were described detailedly from the three aspects of HPAC model engine, data-driven mode and data acquisition interface. Finally, an illustrative example utilizing the prototype military simulation system was given to verify the correctness and validity of the WMD model.

Keywords Military simulation and analysis system, Weapons of mass destruction, HPAC model engine, Data-driven mode, Data acquisition interface

1 引言

计算机作战模拟作为一种作战指挥决策辅助手段,对于提高部队作战效能、降低军演成本、检验战法等具有重要作用,受到了世界各国军方的高度重视^[1]。尤其在 20 世纪末前后几场局部战争中,作战模拟系统得到了成功应用,取得了巨大的军事效益。以海湾战争为例,美国军事人员在战争开始之前已经利用作战模拟系统对即将执行的战斗计划进行了逼真的模拟与分析,从而准确预测了敌方主力部队的进攻方向,为实际军事行动提供了重要的参考。

国内对作战模拟系统的研究起步较晚,但部分军事院校和科研单位也取得不少成果。文献[2]基于 HLA 技术框架以及分层式 RTI 搭建了海军诸兵种综合战术训练仿真系统的体系结构,使用面向对象的建模方法实现的仿真系统能够满足当前海军战术训练的需求;文献[3]从硬件和软件两个方面研究了导弹仿真训练系统的设计原理和功能模块,基于虚拟现实技术实现了某型号导弹仿真训练系统;文献[4]面向空军武器装备论证的实际需求,提出了一个面向空军战役过程推演的仿真系统体系结构。然而现有的作战模拟系统一般存在如下局限性:

(1)不具备一体化、联合作战行动层面的作战分析功能;

(2)无法诠释战场空间内信息战的能力;

(3)不能完整地考虑部队战备、训练水平、后勤以及大规模杀伤性武器(Weapons of Mass Destruction, WMD)行动等要素。

随着战争的形态和运行规律的巨大变化以及面向实施大规模联合作战和多样化军事任务指挥筹划的需要,新一代军事分析仿真评估系统的建设迫在眉睫。军事分析仿真评估系统应该具备多元作战力量、多维战场空间、多种行动样式、各类保障体系融为一体的基于信息系统作战的模拟评估能力^[5]。大规模杀伤性武器(WMD)是军事分析仿真评估系统的重要研究内容,建立合适和准确的 WMD 模型能够有效地模拟和预测 WMD 影响进程,为生化防护辅助决策提供重要的参考信息。

本文首先介绍新一代军事分析仿真评估系统的总体建设思想,并基于军事地理信息系统设计实现了军事分析仿真评估原型系统。重点分析了基于动态 Agent 的 WMD 模型及其在战场上的影响作用,从 HPAC 模型引擎、数据驱动模式和数据采集接口 3 个方面详细叙述了 WMD 模型建模思路,最后通过仿真实例验证了 WMD 模型的正确性。

到稿日期:2013-01-31 返修日期:2013-04-15 本文受国家自然科学基金项目(61074108)资助。

杨山亮(1987—),男,博士生,主要研究方向为智能作战模拟、作战决策支持,E-mail:yangshanliang@nudt.edu.cn;赵鑫业(1984—),男,博士生,主要研究方向为系统仿真、模糊逻辑推理。

2 军事分析仿真评估系统

军事仿真按照用途进行划分主要分为 3 种类型:测试仿真、训练仿真和分析仿真。用于进行分析仿真的作战模拟系统称为军事分析仿真评估系统,需要完成的使命包括粗粒度模型作战方案推演优化,作战计划的检验、统计评估,在线辅助决策支持和军事能力建设(人事、装备、保障体系)^[6]。

美军在作战模拟领域建设了众多不同模型层次的军事系统,如表 1 所列。这些系统涉及的仿真域比较分散,不利于进行联合作战层次的军事推演和需求分析,因此建立一个能够包含海、陆、空、天、电子和 WMD 等在内的全方位、一体化联合作战模拟系统,并取代已有的分散建立的作战模拟系统,已经成为目前作战模拟领域的研究热点。

表 1 分散建立的军事仿真系统

	工程/交战级	任务级	战役级
陆	Combat XII	COSAGE	CEM
海	Storm	NSS	GCAM
空/天	Brawler	EADSIM	Thunder
运输后勤	ULog	AMP	JFAST
ISR	COSMOS	SLAMEM	SEAS

目前基于高层体系结构(High Level Architecture, HLA)的分布式仿真框架在作战模拟领域的应用最为广泛,其基本软件环境构成如图 1 所示^[7]。模型开发工具提供基本联邦成员模型;想定规划软件生成的仿真脚本首先转换为实验方案,然后通过管理控制软件控制仿真系统运行;数据采集软件负责仿真数据采集,将数据存入仿真资源库,为分析评估提供海量数据。

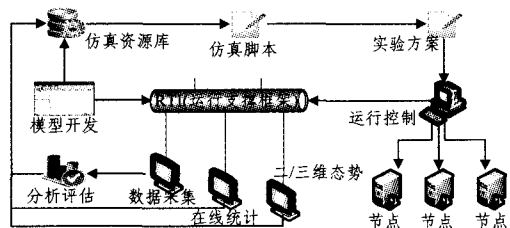


图 1 基于 HLA 的分布式仿真软件环境

HLA 中对联邦成员模型重用性、接口互操作性等方面建立了统一的标准,并明确规定联邦成员必须以面向对象的方法实现,同时将具体的仿真功能、仿真运行管理和底层通信分开,从而为联邦成员的实现以及功能模块的分层实现提供了便利^[8]。但是随着作战模拟向智能化方向发展,基于 HLA 框架的联邦成员模型不能有效表达自主性、反应性和预测性等社会特性,极大影响了模型的智能性体现。

在新一代军事分析仿真评估系统的设计过程中,首先借助指挥控制(Command and Control, C2)组件实现对作战仿真实体思维过程的抽象,把决策过程和决策能力从仿真模型中分离出来;然后再把作战仿真实体活动规律或行为过程所依赖的模型数据、军事规则和为行为特性剥离出来,利用一系列 If-Then-Else 形式的启发式规则来表达知识。设计的核心思想就是把作战仿真实体建设成为一个模型引擎,其决策过程和为行为过程都被抽象成能够从外部观察、理解、修改和配置的内容。

这和基于 Agent 的建模思想不谋而合,基于 Agent 的建模仿真以自底向上的视角来刻画整个系统行为,是研究军事

作战等复杂系统的一个有效途径^[9]。在军事作战仿真中,指挥控制体系具有实时性强、动态不确定性及群体性特点,通过构建多 Agent 体系结构来描述指挥决策过程,利用多个指挥决策 Agent 之间的复杂交互即可有效地实现作战仿真应用的目标。

3 大规模杀伤性武器(WMD)

大规模杀伤性武器(WMD)包括核武器、化学武器和生物武器。核武器对平民人员的杀伤效果巨大,而且伤害效果潜伏期时间长,很早就被国际社会禁止使用,因此本文不把核武器作为建模仿真的对象,文中提到的 WMD 只包括战场上的生化武器。

生化武器是指以生物毒剂或者化学毒剂杀伤有生力量的武器和器材的总称。按照生化毒剂对人类的作用可以将其分为失能性和致死性两类,如表 2 所列^[10-14]。尽管随着 1972 年《禁止生物武器公约》和 1997 年《禁止化学武器公约》的颁布和生效,生化武器销毁和禁止取得了一定进展,但是生化武器并没有彻底消亡。一方面历史遗留的大量生化武器仍然危害着大家的安全;另一方面许多国家和政府并没有放弃生化武器的研制,特别是某些恐怖组织也逐渐掌握了生化武器的制造技术,各国都面临着生化恐怖袭击的威胁^[15]。

表 2 生化毒剂分类

	生物毒剂	化学毒剂
失能性毒剂	布氏杆菌	毕兹
	委内瑞拉马脑炎病毒	苯氯乙酮 亚当氏剂
致死性毒剂	炭疽杆菌	塔崩
	伤寒杆菌	沙林
	黄热病毒	芥子气
	肉毒杆菌毒素	氢氰酸
		光气

建立合适和准确的 WMD 模型能够有效地模拟和预测 WMD 影响进程,可以为生化防护辅助决策提供重要的参考信息。目前军事领域对 WMD 模型的研究还比较少,本文是在相关资料的基础上做一个初步的分析和探讨。

根据战场角色在作战过程中的不同作用,可以将其行为概括为两种典型的行为方式:反应式和慎思式^[16]。具有指挥控制功能的指挥员 Agent 一般属于慎思式 Agent,而把低层次的作战人员 Agent、WMD 模型 Agent 设计成反应式 Agent,反应式行为具有明显的技术性和强制性特征,不需要进行规划、推理和决策。

4 基于动态 Agent 的 WMD 模型

WMD 模型包含两种动态 Agent:毒剂云团 Agent 和传染区 Agent,分别对应化学武器和生物武器的攻击效果。WMD 模型的动态性体现在生化武器攻击成功后,在攻击位置动态创建 Agent,并随着攻击效果的结束而退出虚拟战场。

4.1 HPAC 模型引擎

建立基于动力学的生化攻击效果预测模型一般比较复杂和困难,国内对这方面的研究也比较少。由美国特殊武器防卫署提出的危险预测与评估模型(Hazard Prediction and Assessment Capability, HPAC)能够有效地模拟生物、化学武器或核武器的杀伤效应评估。HPAC 采用二维封闭整体吹喷模型(SCIPUFF)模拟气体传播过程,可以准确预测有关特定

化学物质、生物因子和核物质的潜在危险性区域,为风险评估和生化防护提供辅助决策信息支持^[17-19]。截止目前,HPAC已经被美国政府、北大西洋公约组织的分支机构,以及州和地方紧急计划和反应单位等 100 多个机构使用。

HPAC 拥有许多毒剂云团模板和传染区模板,其为生成毒剂云团和传染区提供数据支持,同时受到气象因素和地形条件的影响^[20]。每个模板用一系列嵌套的环状区域表示,每个环状区域表示一个毒剂浓度及其覆盖区域,通常内环浓度是外环浓度的十几倍,如图 2 所示^[12]。污染区域的具体形状需要根据所在位置的风力和风向确定,杀伤效果一般与到污染源的距离相关。

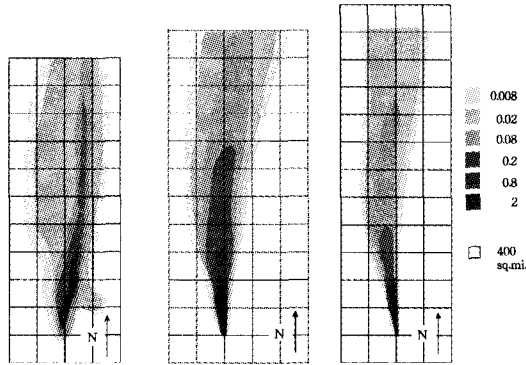


图 2 HPAC 毒剂云团模板

WMD 模型中的毒剂云团 Agent 和传染区 Agent 都把 HPAC 预测评估模型作为驱动 Agent 运行的核心引擎,其 Agent 框架结构如图 3 所示。HPAC 模型引擎从外部环境实时获取气象和地形信息,通过内部 SCIPUFF 传播模型计算扩散系数,并将其反馈给外部环境。同时保持和其它作战 Agent 的通信和交互,并由裁决管理器做出杀伤裁决。

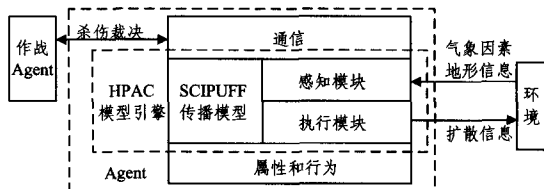


图 3 HPAC 模型引擎

4.2 基于 XML 的数据驱动模式

军事分析仿真评估系统是一个知识系统,同时也是开放的系统,它的构建离不开模型数据的支持和保障。模型数据是驱动仿真系统运行的核心,主要包括作战编成数据、作战实体属性与行为数据、自然环境数据(地形、大气、海洋、电磁辐射等)、作战规则数据等^[5]。

传统基于 HLA 的分布式仿真系统中,模型数据一般都在联邦成员里以硬编码的方式存在,使得模型数据和模型结构耦合程度很高^[21]。当用户需要改变模型配置数据时,往往需要以修改模型结构为代价,带来很大的人力物力资源开销。通常一个仿真实体开发完毕后,其所有依赖的知识和数据都被封死在代码中,没有给用户提供的修改的能力,从而使开发的仿真系统失去了继续发展的机会。

通过构件化建模的思想可以实现仿真模型与数据的完全分离:仿真模型拓扑结构与用户交互数据的分离;规则、命令、属性数据与指控模型框架的分离;仿真实体模型与环境数据的分离。利用关系数据库或基于可扩展标记语言(Extensible

Markup Language, XML)的数据文件都可以给军事分析仿真评估系统提供完整和一致的数据支持。由于 XML 数据具有良好的结构化和层次化的特点,因此采用了基于 XML 的数据驱动模式,它为仿真模型之间数据的共享和互操作提供了很好的解决方法。WMD 模型所需要的支撑数据主要包括:

(1)化学毒剂对作战人员的影响效果。化学毒剂类型一般分为 AC、GA 和 VX 等,不同的化学毒剂其杀伤效果也不同,同时需要定义毒剂剂量。数据项结构如表 3 所列,应用 XMLSpy 工具显示数据文件的存储结构见图 4。

表 3 化学毒剂影响效果数据表

数据项	含义	值域
ChemAgent_Type	毒剂类型	GA; VX 等
ChemAgent_Dosage	毒剂剂量	大于零
ChemAgent_State	毒剂状态	液态;气态
ChemAgent_Effect	毒剂影响方式	失能性;致死性
ChemAgent_ReleaseType	毒剂释放方式	连续;瞬时
ChemCloud_ID	毒剂云团标志	字符串
Attacking_Platform	毒剂投送平台	飞机;导弹

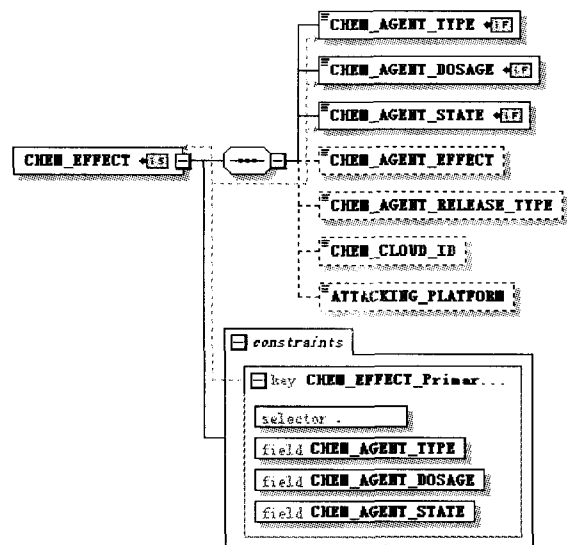


图 4 基于 XML 的 WMD 数据存储结构

(2)化学传感器的探测数据。在最大探测距离之内,作战实体探测到毒剂云团时,首先基于当前的天气条件预测可能的危险区域,然后生成一个化学防护报告,并经过通信系统传递给上级指挥链,所有在危险区域内的友方单位都可以接收到这个报告。

(3)关于生物毒剂传染过程的详细描述。传染参数包括传染速率、平均传染时间、是否具有传染性、是否出现症状、致死性的比例等。化学毒剂自身不能复制,但生物毒剂可以通过各种致命的活性微生物进行传播,它们侵入人体后,能够以几何级数进行繁殖传染。

4.3 WMD 数据采集接口设计

传统的作战态势感知一般采用二/三维态势显示方式,二维态势显示方便用户对战场大场景进行感知,三维态势显示可以使用户了解局部战场细节,但两者都无法使用户从定量的角度精确掌握实时战场的兵力出动、弹药消耗、战果战损等指标信息。因此如何实现定性态势感知与定量评估分析相结合,是军事分析仿真评估系统亟待解决的一个关键问题。

针对传统评估方法的不足,通过在军事分析评估系统内部定义多个动态数据采集接口完成数据收集和解析任务,从

而达到定量分析作战模拟结果的目的。动态数据采集接口具有良好的外部互联性和互操作性,可以直接以图表的方式进行结果输出。通常一个评估指标包含多个数据采集项,为了形成一个衡量指标评估结果,需要对多个数据采集项进行数据融合和综合分析。

WMD模型需要采集的数据主要包括:生化攻击引起的人员伤亡,如表4所列;毒剂云团的扩散过程;生物毒剂的传染过程;作战人员 Agent 的生化防护状态改变等作战过程数据。

表4 人员伤亡数据采集接口

采集参数	参数含义	参数类型
BattleSide	属方(红方,蓝方)	String
RelativeTime	相对生化攻击的偏移时间	Float
Cloud/Infection_ID	生化识别信息	String
Person_Symptomatic	出现症状人员数量	Integer
Person_Communicable	可传染人员数量	Integer
Person_Incapacitated	失去作战能力的人员数量	Integer
Person_Dead	死亡人员数量	Integer
Person_Recovered	痊愈的人员数量	Integer

通过对 WMD 采集数据的定制和组合,可以形成完整的生化防护报告,它既能以图形或表格形式显示,也可以应用文件格式(Excel、Access)导出,以方便进一步的分析和研究。这样实现了与二/三维态势显示的时空联动控制,从定性 with 定量相结合的角度展现综合战场态势,为指挥员决策提供了多维信息。

5 WMD 模型仿真实验

依据第2节提出的军事分析仿真评估系统设计思想,开发实现了军事分析仿真评估原型系统。该系统基于军事地理信息系统(Military Geographic Information System, MGIS)在 Visual C++ 平台下开发实现,集成运用了 XML 和 BCG 界面库组件等技术。系统的主界面如图5所示。

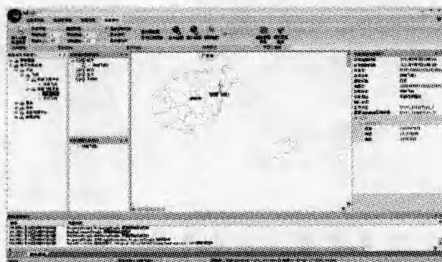


图5 军事分析仿真评估系统运行界面

军事分析仿真评估系统以 CAISR 为核心,作战信息流采用 OODA 环(Observer-Orient-Decide-Action, OODA)来模拟实现,这意味着作战 Agent 的指挥与控制是基于“感知的事实”而非“客观的事实”,比以往作战模拟中基于“客观事实”的指挥控制更为科学和合理^[22]。

同时根据提出的 WMD 模型建模思路初步建立了 WMD 模型,此外军事分析仿真评估系统还包含处于不同指控层次的作战 Agent 模型,用以辅助分析 WMD 模型的作战效果。图6显示 WMD 模型的杀伤人员数量统计结果,横轴表示相对生化攻击的仿真时间,纵轴表示杀伤数量,并且可以支持不同类型的图表显示方式。除此之外,还可以记录作战 Agent 的生化防护状态变化情况以及 WMD 影响范围。

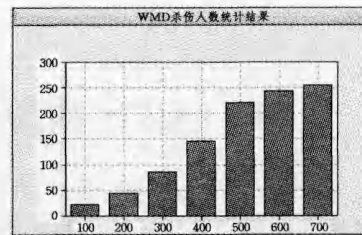


图6 WMD 杀伤人员数量统计

结束语 本文首先分析了基于 Agent 的军事分析仿真评估系统建设思想和框架,然后简单介绍了 WMD 模型及其在军事分析仿真中的地位和作用。在 HPAC 评估预测模型的基础上搭建了 WMD 模型框架,采用 XML 技术作为底层数据驱动模式,并详细设计了用于图表显示的数据采集接口。最后开发实现了军事分析仿真评估原型系统,以此为平台验证了所开发的 WMD 模型的有效性和正确性。本文没有研究非战争军事行动,运用 HPAC 评估预测模型模拟恐怖主义生化袭击、生化毒剂泄露等公共突发事件将是以后重点的研究方向。

参考文献

- [1] 黄柯棣,邱晓刚,等. 建模与仿真技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社,2011
- [2] 张欣景,赵志军,谢国新,等. 海军诸兵种综合战术训练仿真系统构建研究[J]. 指挥控制与仿真,2010,32(5):71-75
- [3] 李会杰,李雅峰,何循来. 基于虚拟现实技术的某型导弹仿真训练系统研究[J]. 系统仿真学报,2008,20(9):2323-2325
- [4] 李群,杨峰,孙伟,等. 空军战役过程推演仿真系统研究[J]. 系统仿真学报,2003,15(4):502-504
- [5] 黄柯棣,赵鑫业,杨山亮,等. 军事分析仿真评估系统关键技术研究[J]. 系统仿真学报,2012,24(12):2439-2447
- [6] 毕义明,刘良,刘伟,等. 军事建模与仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2009
- [7] 黄健,郝建国,黄柯棣. 基于 HLA 的分布仿真环境 KD-HLA 的研究与应用[J]. 系统仿真学报,2004,16(2):214-221
- [8] 陈昊,慕晓冬,杨旭,等. Agent 方法在基于 HLA 的作战仿真系统中的应用[J]. 西川兵工学报,2012,33(4):94-96
- [9] 李瑛,毕义明. 作战仿真中指挥 Agent 的实现[J]. 火力与指挥控制,2010,35(4):164-166
- [10] Specialized Radiological Monitoring and Hazard Assessment Capabilities[EB/OL]. http://www.acq.osd.mil/ncbdp/narp/Radiation_Data/Specialized_Radiological.htm,2005
- [11] Chang J C, Hanna S R. Use of Salt Lake City URBAN 2000 Field Data to Evaluate the Urban Hazard Prediction Assessment Capability(HPAC)Dispersion Model[J]. American Meteorological Society,2005(44):485-500
- [12] Chancellor R W. A Comparison of Hazard Prediction and Assessment Capability(HPAC)Software Dose-rate Contour plots to A Sample of Local Fallout Data from Test Detonations in the Continental United States, 1945-1962[D]. Virginia: Air Force Institute of Technology,2005
- [13] 潘歧京,黄波. 核化生武器与防护[M]. 北京:国防工业出版社,2004

(下转第34页)

图7显示了当低质量链路 $LPR=0.3$ 、网络中随机布置12条 CBR 数据流、仿真实验运行 100s 时, LONC 机制、BEND 和 COPE 协议单位时间吞吐量变化情况。从图 7(a) 可以看出, 初始时刻, 网络中刚加入数据流, 3 种机制的单位时间吞吐量都较低, 随着时间的推移, 网络状况趋于稳定, 单位时间吞吐量比初始时刻高。仿真结果显示, COPE 协议单位时间吞吐量最低, 平均值大约为 38pkt/s, LONC 和 BEND 单位吞吐量都较 COPE 有所提高, 分别约为 46pkt/s 和 45pkt/s。从运行总体趋势观察, LONC 机制单位时间吞吐量最高, 并且波动最小。图 7(b) 的累积分布函数直观地表明, LONC 机制单位时间吞吐量最高, 其次是 BEND 协议, COPE 协议的单位吞吐量最低。COPE 协议的编码包种类有限, 大多数情况是两个包进行编码, 而 LONC 和 BEND 都采用机会转发, 潜在的编码机会变多, 吞吐量提高。LONC 机制考虑了链路质量, 各个数据包受链路质量的影响都是通过统一的效用函数计算的, 效用值直接影响数据包的调度优先级。相比于仅依据编码包中原始包数调度数据包的 BEND 协议, 链路质量对 LONC 的影响越稳定, 其单位时间吞吐量越平稳。

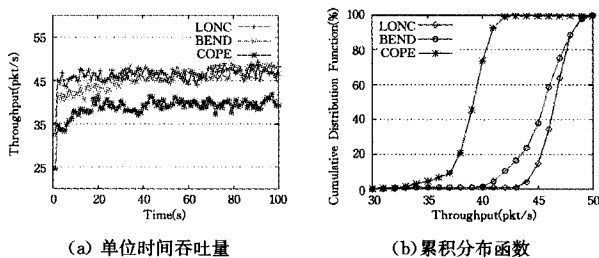


图7 单位时间吞吐量的变化情况

结束语 本文提出了一种无线网络链路质量感知的机会网络编码机制。该机制使用的是 COPE 类型的流间网络编码协议, 结合机会转发技术来充分利用无线媒介的共享特性。考虑到无线网络的链路质量, 引入期望传输次数作为参考基数, 提出了效用函数的概念, 以此来评价发送数据包的效率。根据节点待转发数据包的效用值, 为其动态分配调度优先级, 使得高优先级的数据包有更高的概率获得转发机会。LONC 机制能够在链路质量较差的环境中, 保证数据传输的可靠性和网络的吞吐量, 其性能较经典的 COPE 协议有明显的提高。由于无线多媒体业务对于链路的质量更敏感, 对于数据可靠性要求更高, 接下来的工作会涉及这方面内容并对此进

行研究。

参考文献

- [1] 沈航, 白光伟, 赵露, 等. 多跳无线网络中具有时间意识的视频流控制协议[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2012, 42(5): 808-813
- [2] Katti S, Rahul H, Hu W, et al. XORs in the air: practical wireless network coding[C]// Proceedings of ACM SIGCOMM, Pisa, Italy, September 2006: 243-254
- [3] Chi Kai-kai, Jiang Xiao-hong, Horiguchi S. A More Efficient COPE Architecture for Network Coding in Multihop Wireless Networks[J]. IEICE Transactions on Communications, 2009, E92-B(3): 766-775
- [4] Hang Ming-fong, Lin Sheng-wei, Liao Wan-jiun. C2AR: Coding and Capacity Aware Routing for Wireless Ad Hoc Networks[C]// Proceedings of IEEE ICC, Cape Town, South Africa, May 2010: 1-5
- [5] Zhang Jian, Chen P, Marsic I. MAC-layer Proactive Mixing for Network Coding in Multi-hop Wireless Networks[J]. Computer Networks, 2010, 54(2): 196-207
- [6] USALe J, Lui J C S, Chiu D M. DCAR: Distributed Coding-Aware Routing in Wireless Networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(4): 596-608
- [7] Ahlswede R, Cai N, Li S R, et al. Network Information Flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [8] Douglas S J, De C, Aguayo D, et al. A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing[J]. Wireless Networks, 2005, 11(4): 419-434
- [9] Rozner E, Seshadri J, Mehta Y, et al. Simple Opportunistic Routing Protocol for Wireless Mesh Networks[C]// Proceedings of IEEE, Wireless Mesh Networks, Sept. 2006: 48-54
- [10] Chachulski S, Jennings M, Katti S, et al. Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing[C]// Proceedings of ACM SIGCOMM, New York, USA, October 2007: 169-180
- [11] 陈贵海, 李宏兴, 韩松, 等. 多跳无线网络中基于网络编码的多路径路由[J]. 软件学报, 2010, 21(8): 1908-1919
- [12] Shen Hang, Bai Guang-wei, Zhao Lu, et al. An Adaptive Opportunistic Network Coding Mechanism in Wireless Multimedia Sensor Networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2012(2012): 13

(上接第 17 页)

- [14] 汪致远. 化学、生物武器与防化装备[M]. 北京: 原子能出版社, 2003
- [15] 李其祥, 张振中. 论化学武器的危害及其防护[J]. 山西科技, 2007, 1: 103-106
- [16] 刘永红, 薛青, 曹波伟, 等. 基于指令机制的作战 Agent 体系结构研究[C]// 全国仿真技术学术会议论文集. 2011: 120-123
- [17] General and Specific Characteristics for HPAC Model[EB/OL]. http://www.ofcm.gov/atd_dir/pdf/hpac.pdf, 2006
- [18] Warner S, Platt N, Heagy J F. Application of user-oriented measure of effectiveness to HPAC probabilistic predictions of Prairie Grass field trials[R]. DASW01-98-C-0067. Institute for Defense

Analyses, 2001: 275

- [19] Lee R W. Moving the Hazard Prediction and Assessment Capability to a Distributed, Portable Architecture[R]. Salt Lake City, Springfield, 2002
- [20] Hill A. Using the Hazard Prediction and Assessment Capability (HPAC) Hazard Assessment Program for Radiological Scenarios Relevant to the Australian Defense Force[R]. Victoria: DSTO Platforms Sciences Laboratory, 2003
- [21] 钟自鸣, 黄健, 龚建兴, 等. BOM 组件式仿真系统数据驱动方法[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(21): 6765-6769
- [22] Albertsds, Hayesre. Understanding command and control [M]. Washington D C: CCRP, 2006: 167-177