

NS 仿真器的一个网络编码扩展

李令雄^{1,2} 洪江守² 龙冬阳^{1,2}

(广东省信息安全重点实验室 广州 510006)¹ (中山大学计算机系 广州 510275)²

摘要 网络编码自提出以来,引起了广泛关注,在常见仿真器上对其进行仿真研究十分必要。现有的仿真器缺乏对网络编码的模拟能力。实现网络编码的相应扩展是对网络编码性能进行仿真研究的基础。选取 NS2 仿真器作为平台研究分析了 NS2 现有架构与网络编码的不兼容之处。在此基础上,首次提出网络编码扩展的实现方案,主要包括架构调整和编码模块实现两部分。最后在经典网络拓扑上进行了模拟验证。

关键词 网络仿真器,网络编码,线性编码,NS

中图分类号 TP337 文献标识码 A

NS Extension for Network Coding

LI Ling-xiong^{1,2} HONG Jiang-shou² LONG Dong-yang^{1,2}

(Guangdong Key Laboratory of Information Security Technology, Guangzhou 510006, China)¹

(Dept. of Computer Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)²

Abstract Network coding has received extensive research attention, but the Simulation research on popular network simulators is few. Most of current network simulators were designed to simulate traditional networks, where nodes can only copy and forward packets only. While in the paradigm of network coding, nodes can perform coding operations on packets. The extension for network coding is fundamental for further simulation study. We analyzed the structure of NS firstly, and identified the parts that should be modified to suit for network coding. Then we proposed and implemented the extension. At last, simulation experiment on basic network was performed to verify the availability of the extension.

Keywords Network simulator, Network coding, Linear coding, NS

1 引言

网络仿真在网络研究中扮演着重要的角色,它为网络研究提供了方便、高效的分析和验证方法。NS(Network Simulator)^[1]是一款著名的网络仿真器,能很好地模拟各种网络环境。它最初由美国伯克利大学开发,采用面向对象结构。该仿真器在结构设计上具有良好的开放性和可扩展性,吸引了大量学者对其进行功能扩展,已逐步演变成网络研究领域的首选仿真器之一。

理论研究已证明^[2],通信网络中端对端的最大信息流量由有向图的最小割决定。目前存储转发的路由模式无法达到流量的理论上界。而网络编码^[3]证明,若允许中间节点对不同信息流进行编码,则可达单源多播网络的理论上界。自提出以来,网络编码迅速引起广泛兴趣,基于网络编码技术的新应用在 Ad-hoc 网^[4,5]、P2P 对等网^[6,7]、网络管理、纠错等多个领域都已出现。微软、朗讯、贝尔实验室都对其可能的工业应用产生了兴趣。由于网络编码的发展十分迅速,目前许多关于其应用的研究(特别是有线网络),其实验部分多采用自编模拟程序的方式。由于该方式实验结果不利于重现、比

较和分析,对某些应用的性能存在争议^[8,9]。在认可度高的仿真器上对网络编码应用进行实验仿真,对推动网络编码研究有着重要的意义。另一方面,由于现有网络仿真器的设计开发都是针对传统网络,其框架中都不支持路由编码功能,因此对网络编码应用进行仿真之前,必须进行针对网络编码的基础性功能扩展。

本文选择 NS 这一网络仿真平台,对其进行了功能扩展,从而在 NS 上模拟网络仿真应用提供了支持。本文首先对比分析网络编码模型与 NS 的现有结构,指出 NS 结构上所需的调整(第 2 节);在此基础上,对原有节点结构进行了扩展,使节点编码成为可能,实现了编码、解码模块功能,实现了对随机网络编码协议的初步支持(第 3 节);最后在典型网络拓扑上进行了仿真实验,验证了该扩展的可行性(第 4 节)。

2 模型和系统分析

2.1 网络编码

Ahlsweede^[3]等人于 2000 年提出网络编码技术,证明了若允许传输节点具有编码功能,网络的传输效率可达到最大流的理论上界。图 1 演示了网络编码模型。 x, y 表示源节点 s

到稿日期:2008-08-14 返修日期:2008-12-11 本文受国家自然科学基金(60273062, 60573039),广东省自然科学基金(04205407, 5003350)资助。

李令雄(1981-),男,博士,研究方向为网络编码、网络安全, E-mail: lilingxiong@gmail.com; 洪江守(1987-),男,硕士,研究方向为网络编码; 龙冬阳(1958-),男,博士生导师,研究方向为编码理论、网络与信息安全、量子理论等。

产生的数据包,分别对应于某个编码域上的两个符号;中间节点3对其输入进行编码操作,产生一个新包($x+y$),转发给下一节点。如该图所示,每个终端节点都能从所接收到的信息中解码出所需信息(x 和 y)。自提出以来,网络编码迅速发展。2003年,Li^[10]等人提出线性网络编码方法,并证明该方法总能达到多播网络的最大容量。Koetter^[11]等人提出网络编码的代数描述:从网络全局看,各节点的编码效果等价于某个编码矩阵。2006年,Kotter等人^[12]提出随机网络编码方案,节点编码不再需要全局拓扑信息的支持,而采用分布式方案,只需要在选定的有限域中随机产生系数,进行编码。同时证明了,根据该方案,当选定域足够大时,终端节点能以足够的概率解码,恢复出原始信息。

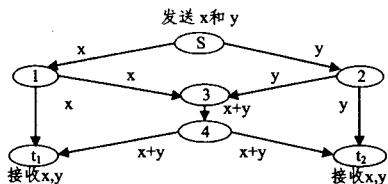


图1 网络编码模型

2.2 技术难点: NS结构与网络编码的不兼容

网络编码的基础在于路由器的编码功能。然而,NS的设计开发针对传统网络,其节点的设计模拟了传统网络的路由器,同样不具有编码功能。为了模拟网络编码中的路由编码,需要对节点模块进行扩展,增加编码功能。

另外,NS采用离散事件驱动机制来模拟包的传输,不支持同时对多个包进行处理,需要进行扩展。图2演示了NS的包模拟机制。真实网络以网络组件(节点/链路)为中心,数据经一个组件处理后交给下一个组件处理,一个组件可以处理同时到达的多个包(如图粗箭头 data path所示)。NS以单个包为中心,对该过程进行模拟(如图中细箭头所示);当包到达组件的时刻(模拟时间)来临时,事件调度器调用组件进行处理。处理结束后,包进入事件队列排队。当包到达下一组件的时刻来临时,调用下一组件进行处理。由以上过程可知,事件调度器一次只调度一个事件(包)进行模拟。即使现实中同时到达某一组件的包,在模拟时对调度器而言也需分先后进行处理。因此,在现有机制下,从不同链路同时到达节点的包无法同时处理和进行编码。

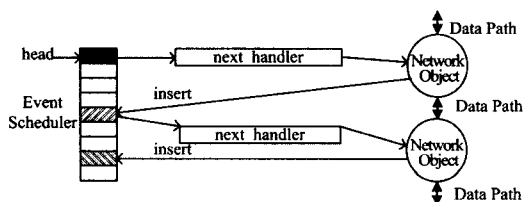


图2 NS离散事件驱动机制

通过以上分析可知,对NS进行针对网络编码的基础性扩展,需要覆盖以下部分。

①扩展包调度机制,使得节点能同时处理来自不同链路的包。对包调度机制的扩展需要注意两点:首先,不影响NS现有功能,对网络上传的其它协议的包不产生影响;其次,兼容NS现有框架,修改不影响NS对网络性能的评估。

②增加编码、解码模块,支持对包进行有限域上的编码、解码运算。NS中缺少域运算的支持,需要进行扩展。

③扩展节点结构,使之支持随机编码/解码功能以及广播输出编码包的功能。

3 系统设计

3.1 总体结构设计

为了实现上节分析的目标,系统实现分为以下5个部分:

①区分网络编码协议包与其它协议包。在Packet类中定义网络编码包的包头类型,以区分其它协议包。这样保证网络组件能区分编码包和其它包,所做的扩展只对网络编码包有效,而不影响现有的仿真功能。

②分类器和复制器。在节点入口处,插入新分类器。它将网络编码包分离出来,按特定方式处理。而其它包则向后传递,按原方式进行。复制器使得节点能将经处理的包复制到多个输出链路上。

③编码缓冲队列和定时器。缓冲队列缓冲来自不同链路的包,在定时器控制下进行编码和发送。它们和分类器一起作用,使来自不同链路的包可进行编码。

④编码、解码模块。实现了网络编码类,它将包映射到伽罗瓦域,并对包进行域上的线性组合运算,支持随机网络编码协议。

⑤网络编码代理,封装了编码缓冲队列、定时器以及编码、解码模块,提供对解码过程的支持。

系统运行流程为:

Step 1 源节点以网络编码包的形式发送原始信息。

Step 2 当包到达中间节点,首先进入节点入口(_entry),使用网络编码分类器(NCClassifier)进行分类。根据包头信息,网络编码包被传给网络编码代理(NCAgent),后者将包放入编码缓冲队列(NCEncodeQueue)。其它包不经处理传递给后续分类器。

Step 3 根据定时器的设置,事件调度器按时调用(NCAgent),后者负责调用编码模块(NCCoder),将编码缓冲队列中(NCEncodeQueue)的包进行编码,并传递给下一网络组件。

Step 4 当包到达终端节点,进入节点入口,网络编码分类器(NCClassifier)核对目标地址,将网络编码包交给网络编码代理(NCAgent)。后者将包放入解码缓冲队列(NCDecodeQueue)。

Step 5 网络编码代理(NCAgent)收集到足够的包后,调用解码模块(NCDecoder),执行解码过程,恢复出原始信息。

3.2 详细设计

3.2.1 分类器(NCClassifier)

对网络编码包的特殊处理流程首先从网络编码分类器NCClassifier开始,它从Classifier类继承,在节点初始化时挂载到节点入口上。分类器位置如图3所示。这样的设计使得网络编码的相关扩展完全独立于节点的其它结构,保持了良好的可扩展性。另一方面,该分类器只遴选出网络编码包,对其它网络协议而言是透明的,保证了网络编码的相关扩展不影响NS已有功能。NCClassifier的初始化加载通过ns-node.tcl中的insert-entry过程来实现。

进入节点的包会先被分类器处理,未被其分类的包会传递给后续结构。

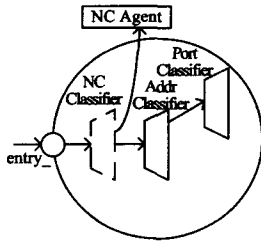


图3 节点的内部结构

3.2.2 复制器(NCReplicator)

由于编码过程减少了包的数量,在后续节点时,需要对经过编码的包进行复制。如图1中的节点4,输入的包($x+y$)要被复制,分别输出到链路(4, t1)、(4, t2)上。复制器NCReplicator继承于Replicator类,它根据编码包的地址信息,复制到输出链路。

3.2.3 编码缓冲队列(NCEncodeQueue)和定时器(NCTimer)

编码缓冲队列NCEncodeQueue继承自PacketQueue类,提供入队函数void enqueue(Packet * p)、出队函数Packet * deque()作为接口。NCAgent通过调用入队函数,将需要编码的包放入NCEncodeQueue。定时器NCTimer继承自Timerhandler类,每到一定时间,触发包缓冲队列的编码事件。在初始化Timer时指定Handler为NCAgent,通过timeout函数和resched函数实现事件的触发和再次调度。

3.2.4 网络编码类(NCCoder)

NCCoder类负责对包进行编码、解码。它提供了伽罗瓦域上的线性组合,判断矩阵是否满秩,求逆矩阵等编码、解码所需的数学运算支持。定时器NCTimer被触发时,NCAgent调用NCCoder类对缓冲队列中的所有包进行编码,产生的新包被发送到下一网络组件。伽罗瓦域上基本运算的实现,参考了数学函数库^[13],编码过程如下:

```
void NCCoder::encode(vector <galois::GaloisFieldsElement> &
send_packet)
{
    if(只缓冲一个包)
        send_packet=队列中唯一的包;
    else{
        if(如果是源节点)
            send_packet=队列中某一个包;
        else{
            随机产生编码系数 rand_coef;
            send_packet=rand_coef * packet_vector_;
        }
    }
}
```

而判断矩阵满秩,采用高斯消元法实现,算法过程如下:

```
bool NCCoder::is_independent(vector <galois::GaloisFieldElement>
* rcv_coef_vector_)
{
    unsigned int i=0,j=0,p=0,q=0;
    const unsigned int m=(unsigned int) coef_matrix_.size()+1,
n=nb_chunks_;
    //check_list 是用于检测满秩的临时矩阵
    while((i<m)&&&j<n)){
        //检查 check_list 每行的主元素是否为0,若是,进行矩阵行
        变化。
```

```
test_max_val(check_list);
//使用高斯消元法将 check_list 化为上三角矩阵
Gauss(check_list)
}
int rank_=0;
for(i=0;i<m;i++){
    if(check_list[i][i]!=0)
        rank_++;
}
if(rank_=m)
    //矩阵满秩
    return true;
else
    return false;
}
```

3.2.5 网络编码代理(NCAgent)

网络编码代理NCAgent处理编码、解码过程,维护相关参数。对于线性网络编码方案^[10],它维护节点相对各输入链路的编码系数。对于随机网络编码方案^[12],它负责产生随机系数。系统初始化时,通过ns-node.tcl中的attach,install过程将NCAgent挂载到NCClassifier上。

3.2.6 网络编码包头类型(hdr_NC)

区分网络编码协议包与其它协议包。在Packet类中定义网络编码包的包头类型(hdr_NC),这样保证网络组件能区分编码包和其它包,所做的扩展只对网络编码包有效,不影响现有的仿真功能。创建相应的类,和OTcl建立关联(定义PackerHeader/NC)。在构造函数中,执行bind_offset()操作。编辑ns-packet.tcl,使新的包格式能够被应用。通过Packet类中struct hdr_cmn中包含的信息,完成包头类型的判断。

4 实验演示

我们在网络编码的经典网络上(如图1所示)进行了模拟实验。源节点0同时向节点5,6发送包,各边的传输容量相同。图4给出了使用该网络编码扩展前后的效果对比。不使用扩展时,如图4(a)所示,节点3和节点4之间的链路在第1秒时开始出现拥塞,部分包(蓝色块表示)被丢弃。使用网络编码扩展后,如图4(b)所示,节点3进行编码,并向后继节点发送编码包(红色块表示),节点3和节点4之间的链路可避免拥塞;节点4将编码包复制,分别发送给节点5,6。

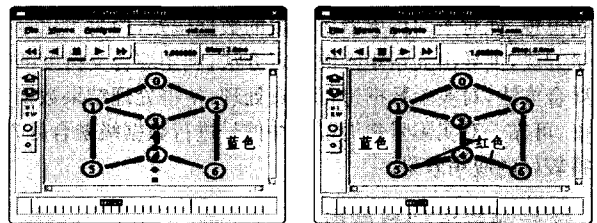


图4

结束语 本文介绍了对NS的节点模块进行网络编码扩展。以该工作为基础,结合不同的网络编码路由方案,可实现对网络编码应用的仿真研究。下一步工作将对更为复杂的网

(下转第144页)

性能相关,但在 ERP 软件的测试用例中存在打开文件时间、数据库更新时间和访问时间等 12 个与时间行为相关。最后一个偏离的凸点表示的质量特性是可安装(10),显然它的值偏离是由于这两个软件安装的复杂程度及其不同引起。

为了完成第三个实验,我们随机选取三个基于 GIS 的软件产品。我们为一些测试后有较高评价的项目中创建一个档案资料库。通过比较档案资料库的数据,我们计算 3 个项目的质量测试值,如图 2(c)所示。显而易见的是,质量总是在那些无功能的属性上波动,如交互性、安全性和共存性。

结束语 本文关注于如何改善测试成本和质量这两个软件测试中最重要的问题,提出一种新的度量方法。采用 ISO/IEC 9126 中的特征属性作为统一的质量特性。引入模糊集来表示测试用例和质量特征之间的模糊和不确定的相互关系,为测试案例中各成分之间不精确的、不确定的相互关系带来更合理的表示。采用新的度量方法,在不提高成本的情况下,软件测试的质量和有效性更容易测量。特别是在早期的测试中,它能改善质量评估和测量的能力。它可以更进一步地用来解决测试管理和质量相关的问题,比如质量对比和质量适应性分析。

实验的结果进一步显示本文提出的度量方法能有效测量和评估测试项目的质量和有效性,能够作为测试管理的工具。值得注意的是,软件的类型在实验的度量中有显著的干扰作用,因此,这种度量方法更适用于通用的软件类型。

参 考 文 献

- [1] DeMillo R A, Offlutt A J. Constraint-Based Automatic Test Data Generation[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1991, 17(9): 900-910
- [2] Dustin E, Rashka J, Paul J. Automated Software Testing: Introduction, Management, and Performance[M]. Addison-Wesley, 1999
- [3] Weyuker E, Goradia T, Singh A. Automatically Generating Test Data from a Boolean Specification[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1994, 20(5): 353-363
- [4] Kan S H. Metrics and Models in Software Quality Engineering, Second Edition[M]. Addison-Wesley, 2003
- [5] Potter R W. The Art of Measurement: Theory and Practice [M]. Prentice Hall PTR, 2000
- [6] Fenton N E, Pfleeger S L. Software Metrics: A Rigorous and Practical Approach, Second Edition[M]. PWS Publishing Company, 1997
- [7] Voas J M, McGraw G. Software Fault Injection: Inoculating Programs against Errors[M]. Wiley, 1998
- [8] Idri A, Abran A. A Fuzzy Logic Based Measures For Software Project Similarity: Validation and Possible Improvements[C]// Proceedings of the 7th International Symposium on Software Metrics. England, UK, IEEE Computer Society, 2001: 85-96
- [9] Bosc P, Damiani E E, Fugini M G. Fuzzy Service Selection in a Distributed Object-Orient Environment[J]. IEEE Transactions on Fuzzy System, 2001, 9(5): 682-698
- [10] Last M, et al. The Data Mining Approach to Automated Software Testing[C]// SIGKDD'03. ACM 1-58113-737-0/03/0008. August 2003
- [11] ISO/IEC JTC1/SC7. Software engineering-Product quality-Quality Model, ISO, 2001
- [12] ISO/IEC JTC1/SC7. Software engineering -Product quality-External quality metrics, 2003
- [13] Salton G, Buckley C. Term Weighting Approaches in Automatic Text Retrieval[J]. Information Processing and Management, 1998, 24(5): 513-523
- [14] Damiani E, Fugini M G. Automatic Thesaurus Construction Supporting Fuzzy Retrieval of Reusable Components[C]// Proceedings of ACM SIG-APP Conference on Applied Computing (SAC'95). Nashville, TE, USA, 1995
- [15] 黄贤英, 张丽芳. 基于粒子群优化的模糊聚类算法[J]. 重庆工学院: 自然科学版, 2008, 22(11): 120-123

(上接第 73 页)

络拓扑进行仿真。

参 考 文 献

- [1] The network simulator - ns-2[OL]. www.isi.edu/nsnam/ns/
- [2] Elias P, Feinstein A, Shannon C. A note on the maximum flow through a network[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1956, 2(4): 117-119
- [3] Ahlswede R, Cai N, Li Shuo-Yen R, et al. Network information flow[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2000, 46(4): 1204-1216
- [4] 彭木根, 王月新, 王文博. 无线自组织网络的网络编码技术[J]. 中兴通讯技术, 2007, 13(004): 56-60
- [5] 熊志强, 黄佳庆, 刘威, 等. 无线网络编码综述[J]. 计算机科学, 2007, 34(3): 6-9
- [6] 马冠骏, 许胤龙, 林明宏, 等. 基于网络编码的 P2P 内容分发性能分析[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(011): 1237-1240
- [7] Ma Guan-jun, Xu Yin-long, Lin Ming-hong, et al. A content distribution system based on sparse linear network coding[C]// Third Workshop on Network Coding(Netcod 2007). 2007
- [8] Gkantsidis C, Rodriguez P. Network coding for large scale content distribution[C]// INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE, 2005, 4
- [9] Wang M, Li B. How practical is network coding[C]// Proc. of the Fourteenth IEEE International Workshop on Quality of Service(IWQoS 2006). 2006: 274-278
- [10] Li S, Cai R. Linear network coding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2003, 49(2): 371-381
- [11] Koetter R, Médard M. An algebraic approach to network coding [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking(TON), 2003, 11(5): 782-795
- [12] Ho T, Medard M, Koetter R, et al. A random linear network coding approach to multicast[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(10): 4413-4430
- [13] Galois field arithmetic library[OL]. http://www.partow.net/projects/galois/index.html