

# 基于虚拟机和资源映射的网络仿真系统

刘行兵 穆晓霞 段新涛

(河南师范大学计算机与信息工程学院 新乡 453007)

**摘要** 协议评估是网络协议设计开发的重要环节,直接影响到协议设计开发的效率和质量。网络模拟、实际测试和网络仿真是 3 种主要的协议评估途径,网络模拟在真实性上存在明显不足;实际测试不具有可重复性和可控制性;网络仿真兼有两者的优点,又可避开其不足,为协议评估提供低成本、可控制、可重复、高真实度的测试平台。分析了网络模拟、实际测试和网络仿真对协议评估的影响,归纳了网络仿真的分类,重点对参数控制的网络仿真系统设计思想进行了分析,最后对网络仿真的发展趋势进行了展望。

**关键词** 网络仿真,协议评估,设计思想,移动自组织网络

中图法分类号 TP391.9 文献标识码 A

## Network Emulation System Based on Virtual Machines and Resource Mapping

LIU Xing-bing MU Xiao-xia DUAN Xin-tao

(College of computer and information engineering, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China)

**Abstract** Performance evaluation is an important stage during the development of network protocols. Algorithms and Protocols are usually tested in experimental network or simulation environments. Simulation level of abstraction may be too high to capture low-level effects. Experimental networks are neither controllable nor repeatable. Emulation provides a third point for protocol testing and evaluation; it is expected to be a low-cost, controllable and repeatable testing platform with high degree of realism. In this paper, we make a survey on network emulation systems, including their concepts, classification, focus on design methodology of the Virtual Machines and the Resource Mapping emulation system, the developing trends and main challenges are also summarized.

**Keywords** Network emulation, Protocol evaluation, Design methodology, MANET

## 1 引言

协议评估是网络协议设计的重要环节,协议评估的有效性、便利性直接影响协议设计开发的质量和效率[1]。典型的协议评估途径包括模拟(Simulation)、仿真(Emulation)和实际测试(Real World Experiment, RWE)[2]。网络模拟可用于创建虚拟的实验场景,通过各种模型和伪代码的执行产生数据,进而描述协议的运行情况。网络模拟具有良好的扩展性,是可控制的、可再生的并且在网络开发早期就可以使用,但是模拟环境往往由于抽象层次过高而缺乏真实性,此外,网络模拟环境中运行的代码不能直接在真实网络中运行,往往需要重新编写。RWE 是指构建一定规模的测试网络,在真实的网络上运行真实的协议代码,从而分析协议的性能。RWE 具有较好的真实性,但其扩展性一般较差,实验控制比较困难,实验场景也很难完全重复,并且 RWE 仅能在研究开发的较晚时期进行。网络仿真系统是网络模拟与 RWE 的折衷,兼有两者的特征[3]。它可以在虚拟的网络上运行真实的协议或应用代码,直接分析协议的特性,具有较好的可控制性、可重复性和扩展性,真实性也比较高。三者的细致比较如表 1

所列。

表 1 3 种网络协议评估方式比较

项目	Simulation	Emulation	RWE
定义	虚拟环境上运行伪代码	虚拟环境上运行真实程序	真实环境上运行真实程序
扩展性	好	好	差
控制性	好	好	差
精确性	差	好	好
可再生	是	是	否
真实性	低	高	高
是否实时	否	是	是
可获得性	开发早期	开发早期	开发较晚期
举例	NS, OpNet, GloMosim	Netbed, NSE, NEMAN	CMU-DSR, MIT RoofNet

本文主要对网络协议评估手段进行了比较,介绍了网络仿真系统的类别划分,分析了基于参数控制的网络仿真系统设计思想,最后归纳了网络仿真的发展趋势。

## 2 类别划分

网络仿真系统可以按照层次特征、分布特征、设计目标、目标网络等不同标准进行分类。

本文受国家自然科学基金(U1204606)资助。

刘行兵(1973—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要研究方向为无线网络、网络安全、软件工程;穆晓霞(1980—),女,博士生,讲师,主要研究方向为密码学与信息安全;段新涛(1972—),男,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为图像分析。



按照层次特征分类,网络仿真有水平仿真和垂直仿真之分。水平仿真指的是被仿真实体位于协议栈的某一个特定层次上,而且这种特定层次的仿真往往通过集中控制来实现。垂直仿真指仿真的软件运行于一组连续的协议层次上,典型的是 MAC 层、IP 层,也有可能包含更高的层次。垂直仿真往往通过分布的方式来实现,即仿真软件分布在多个物理节点或虚拟节点之上,例如 MVLE、NEMAN 都可以仿真网络的 MAC 层和网络层。

按照分布特征分类,网络仿真系统分为单机仿真系统和分布式仿真系统。单机仿真系统通常是在同一台物理机器上运行多个虚拟机,或多个虚拟设备,再通过中央控制管理形成仿真网络;分布式仿真系统往往拥有多个物理节点,被仿真实体分布于不同的物理机器之上。

按照设计目标分类,网络仿真系统分为子网仿真和环境仿真。前者的目标在于使得仿真系统能够与外部真实的网络数据流进行交互,后者的目标在于使得现实世界的协议程序可以直接在仿真网络上运行。前者的使用方式是在真实的数据流中插入仿真系统节点,从而形成虚拟的网络环境,后者的使用方式则是直接在仿真系统上运行待测试的协议或程序。

按照仿真的目标网络分类,可大致划分为有线网络仿真、无线网络仿真和综合仿真。

表 2 给出常用网络仿真系统的具体分类。

表 2 网络仿真系统分类

分类标准	具体类别	仿真环境
层次特征	水平	DummyNet, MobiEmu, NSE, NIST Net
	垂直	NetBed, MVLE, NEMAN, APE, MobiNet
分布特征	单机	DummyNet, NSE, NIST Net, MVLE, NEMAN
	分布式	MobiEmu, APE, MobiNet
设计目标	子网仿真	DummyNet, NSE, NIST Net, MobiNet
	环境仿真	MobiEmu, MVLE, NEMAN, APE
目标网络	有线网络仿真	DummyNet, NIST Net
	无线网络仿真	MobiEmu, MVLE, NEMAN, APE, MobiNet
	综合仿真	NSE, Netbed

### 3 设计思想

网络仿真系统的发展经历了大约 10 年的历程。从最初的 WAN 仿真系统 DummyNet, 到最近的 MANET 仿真系统 APE、MobiNet 和 NEMAN, 网络仿真系统在不断发展和进化, 从其发展历程可看出设计思想的传承和延续。各种设计思想的发展并不平衡, 相当多的工作集中于基于参数控制的方式, 基于虚拟机/虚拟设备的方法也受到了相当程度的重视。其他设计方式要么仍处于起步阶段, 要么由于成本较高而未得到充分发展(不过仍然可以为网络仿真系统的设计提供一些借鉴)。下面就基于虚拟机和资源映射的网络仿真系统的设计思想进行归纳总结。

#### 3.1 基于虚拟机/虚拟设备

基于虚拟机的仿真系统的基本思想是, 在同一台机器上运行多个虚拟机, 再通过一个中央控制模块控制不同虚拟机之间的互联关系, 从而形成由虚拟机组成的虚拟网络。其基本体系结构如图 1 所示。典型的代表有 UML<sup>[4]</sup> 和 MVLE<sup>[5]</sup>。基于虚拟设备的仿真系统则把虚拟设备及其上的一组进程作为一个虚拟节点, 同一台机器上的多个虚拟节点组成一个局部网络, 再通过拓扑管理模块定制各种拓扑结构, 对

数据流施加各种影响从而形成用户所需要的网络场景。由于虚拟设备带来的负载比虚拟机要低很多, 系统的可扩展性得以提高。基于虚拟设备的仿真系统尚处于起步阶段, 其中 MANET 仿真系统 NEMAN<sup>[6]</sup> 就是一个典型的代表。

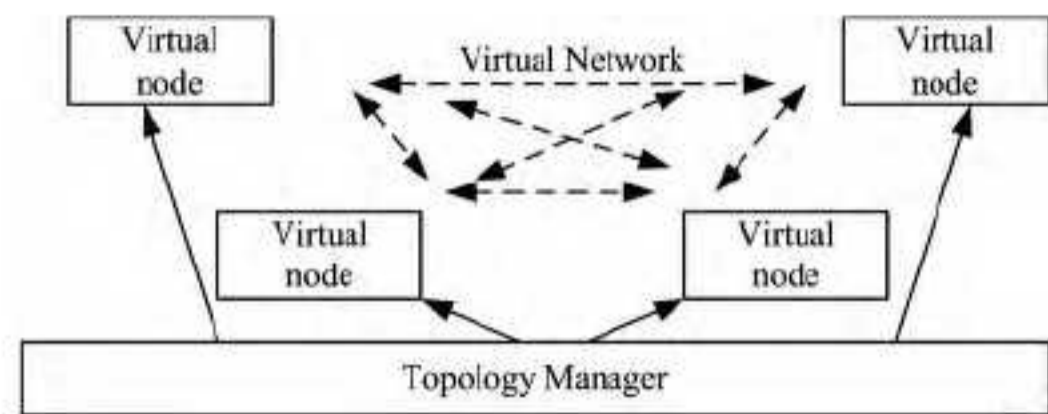


图 1 基于虚拟机的仿真系统

UML 是 User-Mode-Linux 的缩写, 它在用户空间运行 Linux 内核, 形成一个良好的虚拟机。如果在同一台机器上运行多个 UML 的实例, 再通过中央控制模块控制其互联关系, 便可仿真指定类型的网络。然而, UML 的缺点在于, 由于它采用的是三层重叠结构(真实内核、用户态进程、用户态内核), 因此运行效率受到严重影响, 在 UML 上程序的运行速度比正常情况下平均慢 20% 左右, 因此所能仿真的带宽(数据传输速率)受到严重限制。

MVLE 是一个 MANET 仿真系统, 它是对基于 UML 的单机网络仿真系统的改进。其基本思想是, 在一个高效的微内核(Fiasco Microkernel<sup>[7]</sup>)上运行多个 L4Linux<sup>[8]</sup> 的实例, 然后通过网络仿真器(Network Emulator)来控制不同 L4Linux 系统实例之间的通信, 从而产生所需的网络拓扑。L4Linux 是 Linux 内核 2.4 版本的修改, 它把 2.4 版本内核的硬件操作委托给微内核, 而 L4Linux 则完全运行于用户态。在该方式下, L4Linux 的无线网卡驱动被委派给微内核来实现, 则仿真系统只需要重写驱动程序以支持多个 L4Linux 实例的并发运行即可。与基于 UML 的仿真系统相比, 由于减少了软件层叠的层次, 该方式的响应时间和系统负载都大大减小。

NEMAN 是一个基于虚拟设备的 MANET 仿真系统, 从图 2 所示的体系结构中可以看出, NEMAN 由 3 大部分组成: 用户界面、拓扑管理器和虚拟设备上的进程。其中用户界面供用户设定网络拓扑结构, 拓扑管理器负责根据用户的输入, 定制相应的拓扑, 而用户进程则是待测试的协议或应用。

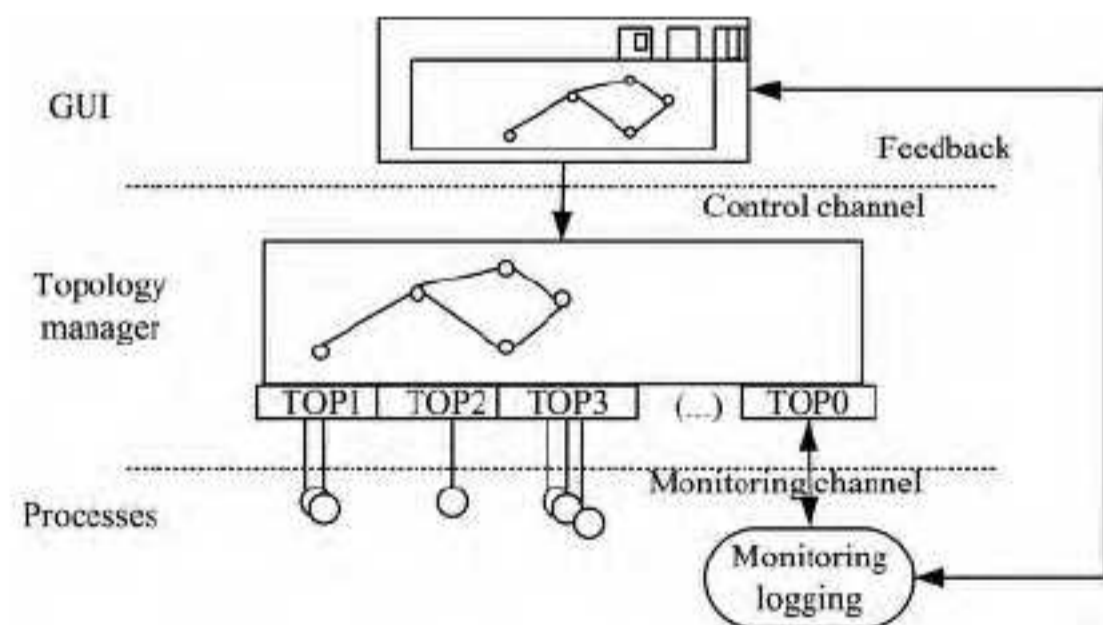


图 2 NEMAN 体系结构

NEMAN 的核心是 TAP 设备和拓扑管理器。TAP 设备是 Linux 内核中提供的虚拟设备, 每个 TAP 设备代表一块网卡。通过 TAP 设备, 仿真的层次可以深入到物理层和 MAC 层。拓扑管理器是一个中央控制进程, 它会捕获到每一个即将传送的 MAC 帧, 然后根据当前拓扑结构决定该帧的去向(有可能被转发给多个节点、一个节点, 也有可能被丢弃)。系统中存在一个独立的 TAP 设备(图 2 中的 TOP0), 可以与其



他所有节点通过监控通道 (Monitoring Channel) 进行双向通信,这是 NEMAN 的重要特征之一。有了监控节点,一方面可用于监控网络特征,另一方面可以实现流量注入。

由于采用虚拟设备代替虚拟机,仿真系统的可扩展性得到很大提高。基于 UML 的系统一台机器上最多能仿真数十台虚拟机器组成的网络,而 NEMAN 则可以在一台普通机器上仿真数百个节点组成的网络。

NEMAN 在网络层实现了 OLSR (Optimized Link State Routing) 路由协议<sup>[9]</sup>,以支持高层应用 (比如中间件开发)。NEMAN 的缺陷在于,它仅仅实现了网络层仿真的真实性,对于下面各层,NEMAN 仅考虑到了连接性 (Connectivity),而没有考虑到 MAC 层可能存在的冲突和隐藏节点等问题,因此其真实性方面存在明显不足。

### 3.2 基于资源映射

该类网络仿真系统的基本思想是,提供系统级别的服务,根据用户的需求,从系统资源中选取比较符合条件的节点组成仿真网络。仿真系统所提供的仅仅是一种资源映射的服务,即把用户设定的逻辑拓扑映射为仿真拓扑,该仿真拓扑基本可满足用户指定的各种性质。典型的代表是 NetBed<sup>[10-12]</sup>。

NetBed 主要是一个网络仿真系统,但同时支持模拟和 RWE。从图 3 所示的体系结构中可以看出,Netbed 包括 4 种类型的资源:局域网络资源、分布式资源、仿真资源和模拟资源。局域网资源由大量 PC 组成,它们之间通过高端的交换机 (图中的 Programmable Patchpanel) 组成全联通的网络,并通过虚拟局域网 (VLAN) 的方法构造任意的网络拓扑;分布式资源是分布于世界各地的节点,它们被用于对广域网进行仿真;仿真资源是通过 NSE 或在虚拟局域网之间插入 DummyNet 节点来实现和提供的;模拟资源可通过 NS 模拟器来实现。用户通过 NS 场景文件或图形化输入来定制实验场景,系统则根据用户的要求进行相应的资源分配。用户看到的是逻辑节点,它有可能被映射为模拟的节点、仿真的节点甚至真实的节点。Netbed 还提供了诸如抢占、调度等系统级服务,并为用户提供了良好的实验控制接口。

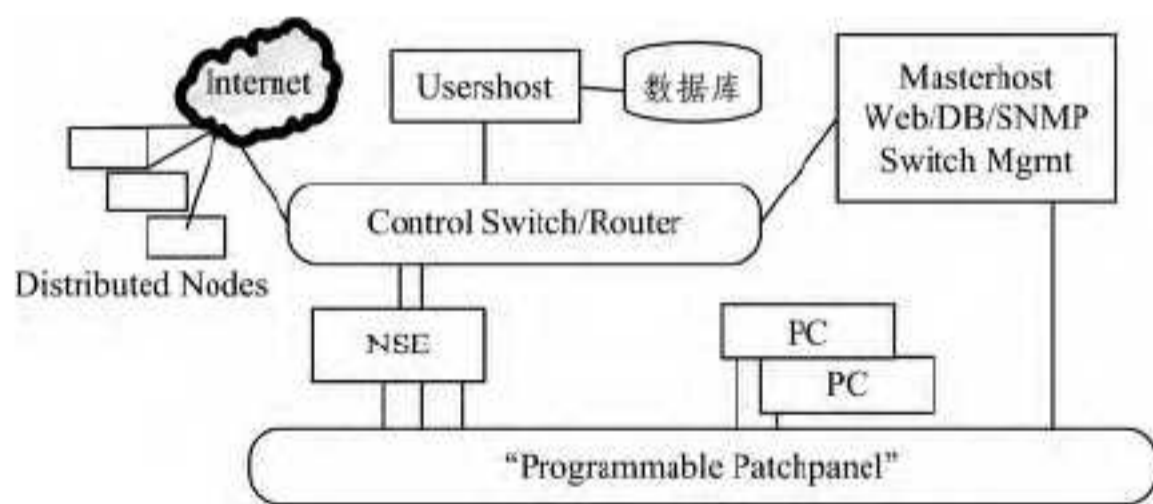


图 3 Netbed 体系结构

由于 NetBed 提供了系统级的资源管理服务,从而可以有效地利用资源。此外,NetBed 可以在同一个物理节点上运行多个 FreeBSD Jail<sup>[13]</sup> 虚拟节点 (每个物理节点可运行多达 20 个 Jail),而每个虚拟节点在一定情况下都可以作为独立的节点来使用,从而使得被测试的网络规模不再受限于物理网络的规模。

## 4 发展趋势

纵观网络仿真系统简短的发展历程,可以看出其发展趋势包括以下 4 个方面:

(1) 网络仿真所关注的因素逐渐增加,从而使得仿真系统

对网络的仿真与现实系统更加接近。这一点从基于参数控制的网络仿真系统的发展过程可以清晰地看出。

(2) 被仿真的网络逐渐从有线网络向无线网络特别是 MANET 的方向转移。

(3) 仿真系统所关注的层次逐渐从网络层向 MAC 层甚至物理层转移,追求更低层次真实性是网络仿真系统的发展方向。

(4) 仿真系统从单纯的参数控制向参数评估的方向发展。早期的仿真系统,主要的目标在于控制各种网络特征参数,形成虚拟的网络,然而,却很少有数据支持和系统分析来证明不同实验之间的可重复性和实验的真实性。由于 MANET 环境下许多因素是难以完全控制的,因此仿真系统必须提供试验重复性评估的途径。

结束语 网络仿真系统是一种不同于模拟和实际测试的、新型的协议评估途径,它为协议评估提供了一种低成本、可控制、可重复、高真实度的测试平台。本文对网络仿真的基本概念、类别划分、基于虚拟机和资源映射的网络仿真设计思想进行了总结,并归纳了网络仿真系统的发展趋势。由于网络仿真平台的设计思想不同,存在多种网络仿真平台,将在后述文献中对其进行分析。

## 参考文献

- [1] 徐庚保,等. 计算机仿真系统述评[J]. 计算机仿真,2012,29(4): 1-5
- [2] 刘军,等. 自组织网络仿真平台的设计与实现[J]. 计算机科学,2008,35(1):24-26
- [3] Siraj S, Gupta A K, Badgujar R. Network Simulation Tools Survey[J]. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering,2012,1(4):201-210
- [4] Dike J. A User-Mode Port of the Linux Lernel[C]//5th Annual Linux Showcase & Conference. Oakland, California,2001
- [5] Engel M, Smith M, Hanemann S, et al. Wireless Ad-Hoc Network Emulation Using Microkernel-Based Virtual Linux Systems[C]//EuroSim'04. 2004
- [6] Pužar M, Plagemann T. NEMAN: A Network Emulator for Mobile Ad-Hoc Networks[R]. Technical Report # 321, ISBN 82-7368-274-9, Department of Informatics, University of Oslo, March 2005;155-161
- [7] Hohmuth M. The Fiasco Kernel: Requirements Definition[R]. TU Dresden Technical Report TUDFI98-12. 1998
- [8] Härtig H, Hohmuth M, Wolter J. Taming Linux[C]// Proceedings of the 5th Australasian Conference on Parallel and Real-Time Systems. Adelaide,1998
- [9] Clausen T, Jacquet P. Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)[S]. RFC 3626. October 2003
- [10] White B, Lepreau J, Stoller L, et al. An Integrated Experimental Environment for Distributed Systems and Networks[C]// OSDI'02. 2002;255-270
- [11] Ricci R, Alfred C, Lepreau J. A Solver for the Network Testbed Mapping Problem[J]. ACM Computer Communications Review, 2003,33(2):30-44
- [12] White B, Lepreau J, Guruprasad S. Lowering the barrier to wireless and mobile experimentation[C]// Proc. of HotNets-I. Oct. 2002
- [13] Kamp P-H, Watson R N M. Jails: Confining the omnipotent root [C]//Proc. 2nd Intl. SANE Conference. May 2000