

新型网络模拟器 NS-3 研究

张登银, 张保峰

(南京邮电大学 计算机学院, 江苏 南京 210003)

摘 要:网络模拟器是现代通信网络领域的重要研究工具。文中追踪国际上最新研究进展,从现有网络模拟领域需要解决的问题出发,通过对现有主流网络模拟器进行简要的对比分析,揭示了 NS-3 产生的技术背景和设计目标,然后详细分析了 NS-3 的主要技术特点和系统功能,并从内核和组件两个层面剖析 NS-3 的体系结构,着重分析了 NS-3 中网络节点(Node)和数据分组(Packet)这两个主要网络模块的组成和作用。论文无论是对网络模拟器本身还是网络技术的研究,均具有较好的理论指导意义和应用参考价值。

关键词:网络模拟;网络仿真;NS-3;体系结构;网络组件

中图分类号:TP393.01

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)11-0080-05

Research on New Network Simulator NS-3

ZHANG Deng-yin, ZHANG Bao-feng

(College of Computer Science, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Network simulator is an important research tool in modern communication networks area. Track the latest research progress of the international community and originate from the existing problems in network simulations. Based on comparative analysis of various mainstream network simulators, revealed the technical background of NS-3's generation and its design goals firstly, then analyzed the main features and functions of NS-3 in details, and anatomized the architecture in kernel and component levels. Finally, focused on the composition and functions of the two main network component module which are Node and Packet. The research result is of high theoretical and practical significance on both network simulator itself and the network research technology.

Key words: network simulation; network emulation; NS-3; architecture; network component

0 引言

在现代通信网络研究中,网络模拟技术得到了日趋广泛的应用,而网络模拟的有效性和准确性很大程度上依赖于所采用的网络模拟工具的性能。在研究开发网络模拟工具的方法和实现方面,国内所做的研究还较少,但国外已经有许多研究成果,包括商品化软件工具和研究用软件工具^[1],如 OPNET, QualNet, GloMoSim, NCTUNS, GTNetS (包括 RTIKit library), OM-NET++, SSFNet, JiST, Yans 和 NS-2。

然而在研究过程中发现,当前各种网络模拟工具都存在这样那样的不足,针对这个问题,美国华盛顿大学的 Thomas R. Henderson 教授及其小组在美国自然科学基金 NSF 的支持下,于 2006 年开始研究一个全

新的网络模拟工具 NS-3,并于 2008 年 6 月发布了第一个稳定版本 NS-3.1。NS-3 是在广泛汲取现有网络模拟器如 NS-2, GTNetS, yans 等的成功技术和经验的基础上开发的,专门用于教育和研究用途的离散事件模拟器。它基于 GNU GPLv2 许可,可以免费地获取、使用和修改^[2]。

目前国内外对 NS-3 进行研究的成果和报告还很少,文中以在相关项目中对 NS-3 所作的研究为背景,对 NS-3 的设计理念和功能特点进行了分析介绍,给出了在研究过程中归纳的 NS-3 体系结构,剖析了 NS-3 的主要网络模块。

1 相关工作

NS-2 全称是 Network Simulator Version 2,是美国 DARPA 支持的项目 VINT (the Virtual InterNet Tested)中的基础和核心部分。NS-2 是面向对象的、离散事件驱动的网络模拟器,由 C++ 和 Otel 语言编写而成。它是一个完全免费的软件,具有开放的体系结构,并带有大量协议库支持,尤其适合于对基于

收稿日期:2009-03-06;修回日期:2009-06-12

基金项目:国家自然科学基金(60573141);国家高技术研究发展计划(2007AA701302, 2008AA701202)

作者简介:张登银(1964-),男,江苏靖江人,博士,研究员,CCF 会员,研究方向为信号与信息处理、IP 网络技术和信息安全。

TCP/IP 的网络进行模拟,是进行网络模拟最流行的软件之一,享有很高的学术声誉^[3,4]。

GTNetS 全称是 The Georgia Tech Network Simulator,是美国乔治亚工学院的 Dr. George Riley 领导的 MANIACS 研究小组开发的一款网络模拟器,主要用于大中型网络研究,包括对分布式模拟的支持(需要 RTI Kit library)。GTNetS 是一个全特性的网络模拟环境,其设计理念是创造一个完全近似于实际网络的模拟环境,使得模拟能够准确地反映真实网络状况并且方便代码在模拟环境和实际环境间移植。在 GTNetS 中,协议栈各层之间有明确的界限。数据包 Packets 中包含一系列的协议数据单元 PDU,这些 PDU 会随着 Packets 在协议栈中的上下流动而被剥离或者添加。节点对象 Node 可以绑定多个网络接口,每个接口又可以绑定一个 IP 地址和物理链路,这与现实环境中电脑+网卡的结构十分相似。传输层协议对象采用一种与真实网络协议(TCP)类似的方式与端口绑定,在传输层协议对象间通过源 IP、源端口、目的 IP、目的端口进行连接。应用层和传输层协议间的接口使用大家所熟悉的类 UNIX sockets API 进行连接,应用层可以承载多种协议对象,包括模拟的和真实的数据^[5]。

Yans 全称是 Yet Another Network Simulator,是法国 INRIA Planete 研究组在实现一个基于 NS-2 的 802.11a/e 模型时的产物。Yans 的核心部分由一个采用 C++ 实现的提供事件调度的内核和一系列用于实现各种网络模型的 APIs 构成。各种各样的网络模型都可以在此 APIs 的基础上进行开发或者移植。Yans 同时也提供了一个缺省的 Python 语言包装器,该包装器采用 SWIG(Simplified Wrapper and Interface Generator)技术对内核进行包装,从而可以实现“使用任何语言进行模拟的同时,编写新的模型只需一种语言”,大大提高了 Yans 的易用性和可扩展性。Yans 目前已经实现了一个基本的模块集,其中最主要的就是 802.11 网络模型。值得一提的是,因为 Yans 的很多目标与 NS-3 一致,所以 Yans 已经慢慢整合到更加庞大的 NS-3 计划中去了^[6]。

NS-3 全称是 Network Simulator Version 3,它是一个极具特色的新型网络模拟器,与其他网络模拟器相比,NS-3 在完备性、开源性、易用性和可扩展性等方面的特色使得它优于现有的大多数主流网络模拟器。NS-3 的功能极其强大,可以对各种网络、各种协议、各个层次进行模拟和研究,由于提供了灵活的扩展支持,研究者可以根据自己的需要进行任意的扩展^[7~9]。NS-3 目前只提供了一些基本的功能模块,

其现有的功能可以从其功能模块中看到,如图 1 所示。目前的 NS-3 与 NS-2 相比,模块还少很多,但是将 NS-2 模块移植过来的工作一直在稳步进行。另外,NS-3 自身也有很多模块正在开发中,主要有:仿真与实时调度模块,同步 Posix-like API,网络模拟之源 NSC 的整合,可视化模块,IPv6,实用应用程序整合,并行模拟,统计分析模块,Wimax 模块,水下声学模块等等^[10]。

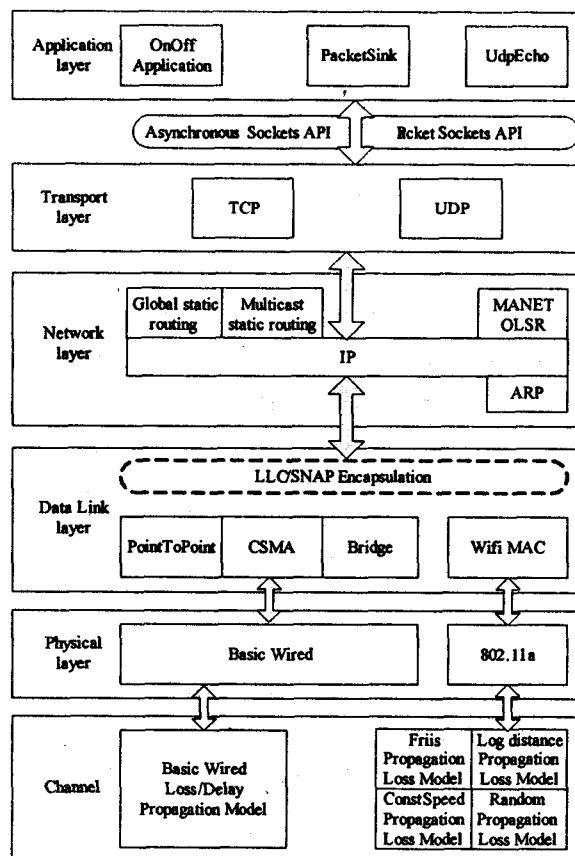


图 1 NS-3 功能模块

2 NS-3 体系结构

NS-3 的体系结构主要由模拟器内核和网络组件两部分组成,如图 2 所示。模拟器内核主要由事件调度器和网络模拟支持系统组成,是 NS-3 中最核心的部分。由于广泛汲取了其他网络模拟系统和现代软件工程领域的成功经验和现代软件工程技术,NS-3 的内核在可量测性、可扩展性、模块化、支持仿真与现实融合等方面具有极大的优势。网络组件是现实网络中各组成部分在网络模拟器中的抽象表示,是网络研究者们最关心的内容。NS-3 的网络组件采用了较低的抽象层次,完全从实际网络环境中进行抽象,力求最大程度地贴近现实,反映真实的网络环境,因此其模拟结果更加真实,更加具有指导意义。

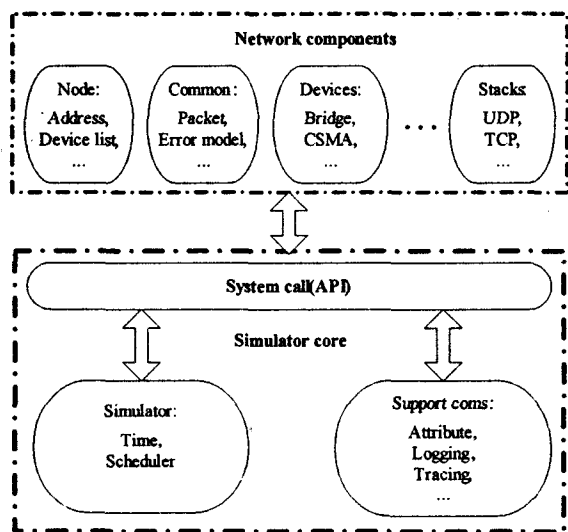


图 2 NS-3 体系结构

2.1 模拟器内核

NS-3 同 NS-2 一样，是一个离散事件模拟器，其基本的事件调度器与 NS-2 基本类似，所不同的是，NS-3 中增加了实时调度器的实现，所以可以方便的与实验床环境和虚拟机环境进行融合，但是这部分工作还不是很完善，下面主要介绍内核中对网络模拟的支持。

NS-3 的网络模拟支持系统主要包括 3 部分：Attribute 系统，Logging 系统和 Tracing 系统。

2.1.1 Attribute 系统

网络模拟中主要有两方面的内容需要配置：仿真拓扑和各仿真对象实例的参数值。对于后者，大多数模拟器是通过设定公共访问函数或者静态变量等方法来实现的，而 NS-3 提供了一种更为简便和安全的方法——Attribute 系统，来实现 NS-3 中各种仿真参数的组织、访问、修改和文档化，同时它也是 trace 和 statistics 模块的基础。

Attribute 系统允许用户针对单个仿真实体的某些参数值进行单独设定，也允许对各种仿真实体的参数值进行全局设定，操纵起来十分灵活。在实现的时候，各模拟对象属性值的访问和设定都被转移到了 Type-Id 类中，这样就形成了一个基于字符串的属性集独立命名空间，可以通过命名空间路径或者指针进行访问，使得对属性的管理、操作以及扩展十分方便和安全。

2.1.2 Logging 系统

Logging 系统是 NS-3 中新引入的概念，在很多大型系统中，都会提供一种基于控制台的消息记录模块，用来向用户即时地反馈命令的执行情况或者系统的运行情况，NS-3 采用了这种机制，实现了一种可选的、多等级的消息记录模块——Logging 系统。在使用

时，不同等级之间可以单独设置也可以累加设置，可以通过 shell 环境变量 NS_LOG 设置也可以通过函数调用在脚本中设置，十分方便灵活。

Logging 系统在 NS-3 中主要有两种应用：一是通过输出网络组件内部模块执行过程来方便用户理解，二是通过输出简单的调试信息来方便用户调试。仿真实践证明，这种机制在进行仿真过程的追踪和模块扩展的时候极其方便有效。

2.1.3 Tracing 系统

NS-3 通过 Tracing 子系统来实现结构化的仿真结果输出。Tracing 系统的设计，遵循两个基本的思想：即 trace 源与 trace 目相互独立和采用标准的 trace 输出格式。

trace 源是模拟过程中通知事件发生的实体，并可以提供对内部数据的访问，trace 目是 trace 源提供的事件和数据的消费者，单独的 trace 源不做任何实质的工作，只有将它与目连接起来才可以对模拟过程中感兴趣的事件或数据进行处理。通过这种机制，一般的用户可以通过简单的配置 trace 目来实现不同的 trace 行为，而不用修改整个 trace 系统或者内核，对于中高级用户，则可以通过修改 trace 源输出的格式和添加新的 trace 源来实现高级的功能。

在 trace 输出格式上，NS-3 即考虑了标准化的要求，也考虑了前后延续的要求，提供了两种输出格式：ASCII 格式和 PCAP 格式。ASCII 格式类似于 NS-2 中使用的 .tr 文件格式，采用以行为单位的字符串来表示网络事件；PCAP 格式是一种标准的网络抓包文件格式，可以采用多种工具进行分析，如 tcpdump 和 wireshark(Ethereal)。

2.2 网络组件

NS-3 中对网络组件的抽象完全来自于现实网络模型，具有低耦合高内聚的特点，主要包括以下组件：

1) 节点 Node: 基本的计算设备抽象，提供了管理和操纵计算设备的方法。典型的，可以将节点当作一个空的计算机机架，可以通过添加应用程序、协议栈、扩展卡等来使其具有相应的功能。

2) 应用 Application: 用户应用程序的抽象，用来产生和消费网络流量，驱动网络模拟器。

3) 协议栈 Protocol stack: 真实网络协议栈的抽象，位于应用 Application 和网络设备 NetDevice 之间，提供连接管理、传输控制、路由、地址管理等功能，力求与真实网络协议兼容。

4) 网络设备 NetDevice: 网络通信设备及其驱动程序的抽象，是协议栈和信道之间的接口，节点只有绑定网络设备后才具有通信功能，一个节点可以绑定多个

网络设备。

5) 数据包 Packets: 协议栈各层协议数据单元 PDU 的抽象, 是网络中真实传输的流量, 与真实网络数据包兼容的同时, 提供了对网络模拟的额外支持。

6) 信道 Channel: 物理传输媒介的抽象, 用来模拟信号在传输过程中的变化特性, 如传播时延、能量损耗、噪声干扰、误码率等等。

3 NS-3 主要模块

3.1 Node 模块

在 NS-3 中, 各种各样的网络节点如终端、路由器、接入点等都是类 Node 的实例。在设计的时候, 为了避免在 Node, Application, NetDevice 等基类间引入过多的依赖, NS-3 采用类聚合(aggregation)的概念来取代继承和派生, 用户可以在 Node 中聚合其他对象实例来定义特殊功能的节点。如图 3 中实线部分所示, Node 基类仅仅包含一个应用程序列表(初始为空), 一个网络设备列表(初始为空), 一个唯一的节点 ID 号和一个用于分布式仿真的系统 ID 号。在聚合了相应的协议栈和网络设备后, Node 就成为具有相应功能的特定节点了。这时的节点结构示例如图 3 整体所示, 在网络设备之上是标准的 TCP/IP 协议栈, 在协议栈之上是各种应用程序, 通过标准 sockets API 与协议栈连接。用户在扩展的时候, 只需将自己设计的设备、协议栈、应用程序等聚合到原生的节点上就可以了, 而不用修改 Node 或者对它进行派生。

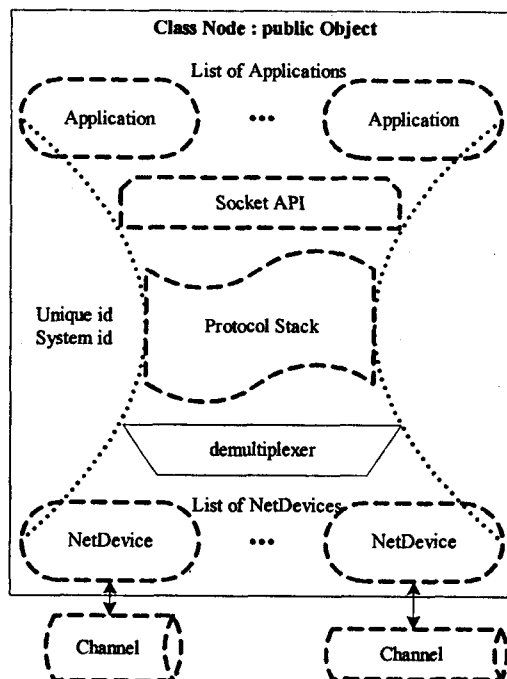


图 3 NS-3 Node 组成结构

值得一提的是, 在很多网络模拟器中, 节点总是与

特定的网络设备绑定, 不能灵活地支持多种设备, 这在大型异构网络模拟的时候具有很大的局限性。在 NS-3 中, Node 类提供了一种类似于 Linux 的设备无关子层(如 eth0)的机制——协议解复用器, 作为与网络设备的接口来实现对多种网络设备的支持。协议解复用器基于回调函数(callback)来实现, 每一个连接到节点上的设备都要注册一个回调函数, 当网络设备接收到数据帧后就把帧交给相应的回调函数处理, 节点中对应的回调函数根据 EtherType 字段查找另一个回调函数: ProtocolHandler 来处理相应的数据帧。ProtocolHandler 函数是上层协议聚合到节点的时候在节点中注册的, 典型的就是把自己的 Receive 函数注册为 ProtocolHandler, 这样就可以实现协议解复用器的功能了。

3.2 Packet 模块

Packet 往往是网络模拟器中最基本、最重要的模块, 它的设计在很大程度上决定着整个模拟器的功能和性能。

在 NS-3 中, Packet 的设计目标主要包括:

- 1) 添加新的包类型时避免修改模拟器内核;
- 2) 与现实网络数据包兼容;
- 3) 支持包的分段和重组;
- 4) 支持模拟附加信息;
- 5) 可承载真实数据和模拟数据;
- 6) 支持开源操作系统网络协议栈的移植;
- 7) 内存管理灵活、安全、有效。

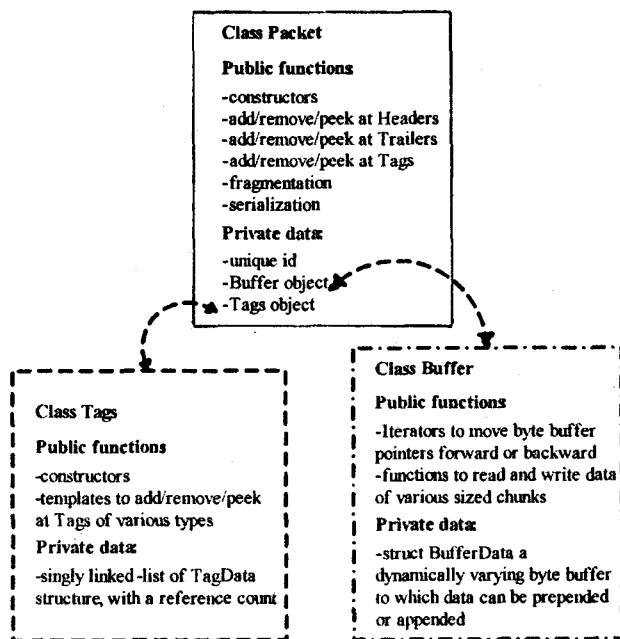


图 4 NS-3 Packet 组成结构

如图 4 所示, NS-3 的 Packet 实现主要包括一个字节缓冲 Buffer、一个标签列表 Tags 和一些公共接口函数 APIs。Packet 的字节缓冲同 Linux 的 skbuf 和

BSD 的 mbuf 类似,是一个真实数据包在内存中的序列化表示。标签列表是附加信息的容器,主要用于携带模拟专用信息如流标号、跨层信息等。公共接口函数提供了包头、数据和标签在 Packet 中的添加、移除和读取功能,以及 Packet 本身的分段重组和序列化反序列化功能。如果一个 Packet 被转移到仿真环境或者真实网络环境中,只需将标签字段剥落,然后把字节缓冲中的内容直接拷贝到真实的数据包中就可以了。

Packet 的字节缓冲基于 Linux 的 skb 或 BSD 的 mbuf 来实现,存储 Packet 在内存中的序列化内容。该序列化的表示与真实网络数据包按比特位匹配,意味着缓冲区的内容就是一个真实的网络数据包,不同的是,NS-3 中 Packet 的数据部分可以是任意位的 0 填充而没有真实的内存分配给它。基于此,Packet 的分段和重组变得非常自然而且支持与仿真环境和现实网络的移植。

Packet 的标签列表用于存储用户定制的、仅用于模拟研究的附加信息。与字节缓冲不同的是,标签列表是一个 TagData 类型数据结构的链表。NS-3 允许每个 Packet 包含一个标签列表,每个标签列表可以存储任意规模的由用户提供的数据结构集合。虽然标签列表的规模可以是任意的,但是其中的每个标签只能有一个实例,由其类型唯一标识,且每个标签最大只能有 16 字节。

4 结束语

作为开源网络模拟器 NS-2 的替代者,NS-3 没有采用 NS-2 的架构,而是进行了全新的设计和实现,在实用性、兼容性、易操作性、可扩展性等方面有突出的表现。虽然 NS-3 刚刚发布,在功能模块上与 NS-2 相比还有很大差距,但是由于 NS-3 极其贴近现实的设计和强大的可扩展性操作,使得在进行新的课题研究的时候,可以很方便地建立网络模型并进行

代码实现,真正的将易操作性和可扩展性结合了起来。

文中对 NS-3 进行了全面的介绍,并结合项目经验对体系结构和主要模块进行了深入剖析,为 NS-3 及相关课题的后续研究和学习提供了有力的支持。

参考文献:

- [1] 雷 擎,王行刚. 计算机网络模拟方法与工具[J]. 通信学报,2001,22(9):84-90.
- [2] Henderson T R, Floyd S, Riley G F. NS-3 Project Goals [C]//Proceedings of the Workshop of Network Simulation. Pisa, Italy:[s. n.],2006.
- [3] 李 越,钱德沛,何 莹,等. 网络仿真器 NS 问题分析和改进方案[J]. 系统仿真学报,2005,17(11):2832-2836.
- [4] Ye Qiang, MacGregor M H. Combining Petri Nets and ns-2: A Hybrid Method for Analysis and Simulation[C]//Proceedings of the 4th Annual Communication Networks and Services Research Conference (CNSR'06). Moncton, New Brunswick:[s. n.],2006.
- [5] Riley G F. The Georgia Tech Network Simulator[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2003 Workshops. New York, NY, USA:[s. n.],2003.
- [6] Lacage M, Henderson T R. Yet another network simulator [C]//In WNS2006: Proceeding from the ACM 2006 workshop on NS-2: the IP network simulator. New York, NY, USA:[s. n.],2006.
- [7] Henderson T R, Lacage M, Riley G F. Network Simulations with the ns-3 Simulator[C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM'08. Seattle, Washington:[s. n.],2008.
- [8] Ns-3 developers. ns-3 Tutorial[EB/OL]. 2008-10-07. <http://www.nsnam.org/docs/tutorial/index.html>.
- [9] Ns-3 developers. ns-3 Reference Manual[EB/OL]. 2008-10-07. <http://www.nsnam.org/docs/manual.html>.
- [10] Henderson T. ns-3 tutorial slides[C]//Proceedings of the International Conference on Simulation Tools and Techniques 2008(Simutools 2008). Mercure Marseille, France:[s. n.],2008.
- [11] [J]. 计算机技术与发展,2007,17(7):127-130.
- [4] Jacobson V. Congestion Avoidance and Control[J]. ACM Computer Communication Review,1988,18(4):314-329.
- [5] Stevens W. RFC2001-TCP Slow Start, Congestion Avoidance, Fast Retransmit, and Fast Recovery Algorithms[DB/OL]. 2005-04[2006-12-10]. <http://www.faqs.org/rfcs/rfc2001.html>.
- [6] 黄 涛. 博弈论教程[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社,2004.
- [7] Shenker S. Fundamental design issues for the future Internet [J]. IEEE journal on selected areas in communication - ns, 1995,13(7):1176-1188.
- [8] Varian H R. Microeconomic Analysis[M]. 北京:经济科学出版社,2001.
- [9] Odlyzko A M. Paris Metro Pricing: The minimalist differentiated services solution[C]//in 1999 Seventh International Workshop on Quality of Service. [s. l.]:IEEE, 1999:159-161.
- [10] Stallings W. High-speed Networks: TCP/IP and ATM Design Principles[M]. 北京:电子工业出版社,1999.
- [11] 柯志享. 计算机网络实验——以 NS2 模拟工具实作[M]. 台北:学业行销股份有限公司,2005.

(上接第 79 页)