

大规模无线移动自组织网络混合模拟测试方法

郭一辰*, 陈靖, 张黎, 黄聪会

(空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

(*通信作者电子邮箱 ilqwf@hotmai.com)

摘要:针对已有无线移动自组织网络(MANET)测试方法存在模型简单、成本高、不易重复等问题,提出一种基于NS2的大规模MANET混合模拟测试方法(LHEN)。使用NS2的模拟功能,利用Tap代理完成虚拟分组与实际分组间的嵌套和解嵌,通过网络对象及NS2实时调度器实现虚拟环境和真实环境的通信;采用控制网络无线信号强度的方式模拟真实节点移动,完成对真实网络环境的构建。使用混合模拟和仿真两种方法分别建立大规模MANET网络进行实验对比,所测性能指标变化趋势基本一致,平均差值低于18.7%。实验结果表明,LHEN可以用于大规模MANET网络各项性能指标测试及验证。

关键词:无线移动自组织网络;无线测试方法;NS2;混合模拟;衰减器

中图分类号: TP393.06 **文献标志码:** A

Hybrid emulation test method for large scale mobile Ad Hoc network

GUO Yichen*, CHEN Jing, ZHANG Li, HUANG Conghui

(Institute of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710077, China)

Abstract: The current disadvantages of Mobile Ad Hoc Network (MANET) test method include simple model, high cost and difficult duplicate. In this paper, a large-scale MANET hybrid emulation testing method based on NS2 (LHEN) was proposed to solve these problems. By making use of simulation function of NS2, the authors could complete encapsulation and decapsulation of real packets and virtual packets with Tap agent, thus they could achieve the communication between virtual environment and real environment through network objects and NS2 real-time scheduler. A real node movement could be emulated by controlling network wireless signal strength, and then a real network environment was established. Finally, the authors constructed a large scale MANET respectively for contrast experiments through method of hybrid emulation and simulation. The experimental results show that the performance is almost consistent and mean difference value is lower than 18.7%, which means LHEN is able to be applied in some indicators test and verification for a large scale MANET.

Key words: Mobile Ad Hoc Network (MANET); wireless test method; Network Simulator version 2 (NS2); hybrid emulation; attenuator

0 引言

无线移动自组织网络(Mobile Ad Hoc Network, MANET)由一组无线移动节点组成,这些节点能够在不需要现有网络基础设施的条件下动态地组成一个临时网络^[1]。由于其拓扑结构动态变化,因此需要路由协议保证网络有序运行。有两种常用方法用来衡量协议性能:一种是应用仿真工具进行测试评估。NS2是网络研究中最常用的仿真工具,但由于仿真器内部的模型完整性较低,导致仿真结果并不能完全体现协议的真实性能。与NS2类似,很多现有的非商业仿真工具均采用一种理想、简单的无线传播模型,这类模型无法全面反映真实物理信道的特性^[2]。另一种方法是针对特定场景构建实际MANET测试床,并将协议在该测试床中运行^[3]。虽然实验场景达到了真实的目的,但这种方法费用昂贵,重复性差,不具备在大规模节点网络中测试的条件^[4]。

由于仿真和测试床各有利弊,网络模拟方法应运而生。模拟是仿真和测试床的“折中”,在一个典型的模拟实验中,通过将真实环境产生的通信引入到仿真器内部,网络模拟解

决了仿真模型过于简单的问题,使仿真过程更加接近实际环境,同时克服了测试床实验带来的弊端^[5]。

本文提出了一种基于NS2的大规模MANET混合模拟测试方法(Large-scale MANET Hybrid Emulation testing method based on NS2, LHEN)。该方法利用仿真平台NS2的模拟功能^[6]巧妙地将物理节点的通信流量引入到仿真环境中,利用实际信道对协议性能的各种影响完善了仿真器中的原有模型。同时通过切换信号衰减强度方式模拟物理节点移动,一定程度上缩小了实验尤其是大规模网络实验所需空间,从而能够以较小的代价建立大规模网络测试场景,避免了真实测试床方法带来的控制难、造价贵、重复性差等问题。

1 NS2 模拟功能

NS2是一个事件驱动的网络仿真器,仿真网络中传送的数据包是事件,根据包的产生、发送、到达和丢弃等事件驱动时钟。NS2的模拟功能通过网络对象将真实网络事件引入到仿真器中,并把处理过的数据包发回至真实网络,从而将实际物理环境因素引入到虚拟仿真环境。

收稿日期:2012-07-19;修回日期:2012-08-31。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61172083)。

作者简介:郭一辰(1988-),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向:移动自组织网络; 陈靖(1963-),女,山西洪桐人,教授,博士生导师,主要研究方向:分布式系统理论与技术; 张黎(1988-),男,湖北仙桃人,博士研究生,主要研究方向:分布式理论与技术; 黄聪会(1985-),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要研究方向:虚拟化技术。

一些包括 Tap 代理和网络对象的集合提供了仿真器和真实网络之间的接口。Tap 代理把真实的网络数据嵌入到模拟的数据包中;反之亦然。如图 1 所示,其中 PC1、PC2 为加载了路由协议的真实物理节点。网络对象被安装在 Tap 代理中,为真实数据的发送和接收提供接口。

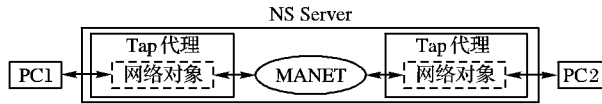


图 1 模拟系统中的数据包流

1.1 Tap 代理

在 NS2 包含的各种类中, TapAgent 类是一个由 Agent 基类派生的简单类,它能够生成模拟器的数据包,同时在 NS2 的数据包公共头中包含任意指定的值。Tap 代理处理数据包公共头中包大小字段和包类型字段,它把插入到模拟器中的包的类型字段设为 PT_LIVE。

每个 Tap 代理只能具有一个相关的网络对象, Tap 代理能够从一个相关的网络对象接收数据包,也能把数据包发送到一个相关的网络对象,对 Tap 代理的配置方式为:

```
Set a0[ new Agent/Tap]
$a0 network $netobj
$a0 set fid_26
$a0 set prio_2
$ns connect $a0 $a1
```

其中 \$netobj 代表一个网络对象。

1.2 网络对象

一些网络对象提供了特殊的功能,如对数据包进行过滤,或者以混杂模式接收网络数据包,以及在一组节点间进行通信等。根据所访问真实网络协议层的不同以及运行仿真器主机操作系统所提供服务的不同,网络对象分为几种不同的类别。当前 NS2 支持三种网络对象:包捕获器/伯克利包过滤器(Packet Capture/Berkeley Packet Filter, Pcap/BPF)网络对象、IP 网络对象以及 IP/UDP 网络对象。本文使用 Pcap/BPF 和 IP 网络对象实现真实网络与 NS Server 间数据包的交互。Pcap/BPF 提供了劳伦斯伯克利国家实验室(Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL)包捕获程序库(libpcap)的扩展接口,能够把帧通过网络接口驱动程序写到真实的网络上。IP 网络对象具有 IP 协议的原始访问能力,能够处理完整、规范的 IP 数据包,并且配置简单。在需要发送数据包时,可以使用系统的 IP 路由功能,发送的数据包头部包含了目的地址网络接口的物理地址,配置 IP 网络对象的方法为:

```
Set ipnet[ new Network/IP]
$ipnet open writeonly
...
$ipnet close
```

通过使用 BPF 和 IP 网络对象, NS2 能够从一个接口读取帧并使这些帧通过模拟网络,最后使用原始的 IP 网络对象把它们再发到真实的网络中。

2 混合模拟测试关键技术

2.1 事件调度

NS2 是一个离散事件驱动的仿真工具,逻辑关系的运行依赖于事件,事件由仿真器内部的全局虚拟时钟控制。在一个混合模拟器中,所有的数据通信要经过真实的无线传播媒介,这就导致决定仿真事件分派的虚拟时钟(Virtual Clock, VC)和决定实际无线信道传送分组速率的物理时钟(Real-

world Clock, RC)之间的不一致。为解决时间不匹配问题,方案采用系统时钟对事件进行实时调度。

2.2 数据分组的发送和接收

仿真器内部使用的数据分组格式与真实协议现有格式不符,不包含用于无线信道传输所需的协议头区域,无法实现虚拟和实际两种环境的直接交互。因此,在将仿真器中的分组发送到真实无线网络环境中前需要对其进行修改;反之亦然。这个过程在 Tap 代理中完成。

2.3 节点移动性模拟

在无线 Ad Hoc 网络中, 802.11b 网卡的通信距离为数百米, Maltz 等^[7]在这样的通信距离条件下进行过相关实验,可以想象,当各个节点之间距离很远时,实验过程的管理和控制将会变得困难,且实验不易重复。因此相比将节点在无线网卡实际通信范围内进行真实的移动,本文选择在小范围内通过技术手段模拟节点位置变化,将实验“压缩”在一个实验台范围内进行。文献[8]中通过在微型机器人上架设天线和信号衰减器,并设计中央控制器对所有微型机器人进行控制的方式,将移动节点限制在较小范围内,模拟节点移动,但这种方案实现复杂,代价昂贵,不适合在大规模网络实验配置。

研究发现,信号强度的变化是节点位置变化的一个重要特征,因此可以通过对信号强度的衰减模拟节点位置变化,代替节点真实移动。基于步进电机的衰减器在 PC 机控制下能够对信号强度实现远程调节,若将每步变化控制在足够小范围内,则可以近似认为信号强度连续变化,节点平滑运动。但由于步进电机造价较高,本文选择一种简单的信号衰减模型,即通过切换天线实现信号强度的突然改变。

3 混合模拟测试方法设计

3.1 总体设计思路

LHEN 应用 NS2 的模拟功能,将实际网络中的通信引入到仿真实验中,在一定程度上避免了由于仿真平台内置场景模型不完整导致的实验结果不准确这一弊端,因此该模拟方法应遵循以下原则:

- 1) 实验过程可控且具有可重复性;
- 2) 体现节点移动对拓扑的影响;
- 3) 测试方法的设计不能影响协议、操作系统和硬件性能;
- 4) 实验设备能够快速变换布局;
- 5) 测试方法易于管理且具有较高性价比。

根据以上设计原则, LHEN 设计结构如图 2 所示。

测试方案由一台装有 NS2 的主机及若干(图中为 4 台)移动模拟器(如 PC 机)组成,每台模拟器配备一块无线网卡用于与 NS2 主机通信,通过 NS2 的 Tap 代理分别与仿真器中的一个虚拟节点(图中灰色节点)构成映射关系,虚拟节点的移动和静止完全由模拟器运动状态决定^[9]。本方法的主要目的是将实际网络通信环境因素引入仿真场景,出于对实验可控性和可重复性,以及支持大规模网络模拟的考虑,移动模拟器不宜采用物理运动的方式达到节点位置的变化,在 LHEN 中设计通过信号衰减模拟节点的移动。

如图 2 所示,移动模拟器采用带外置天线的标准 802.11b 无线网卡(如 Cisco Aironet LMC 352 型^[10])。在正常通信条件下,所有网卡都处在相互的信号覆盖范围内,这种拓扑结构无法满足测试方案的需求。因此设计引入全向天线,同时在网卡和天线间加入衰减器,缩小了网卡的通信范围,从而在实验室范围内建立起一个完全多跳的网络环境。

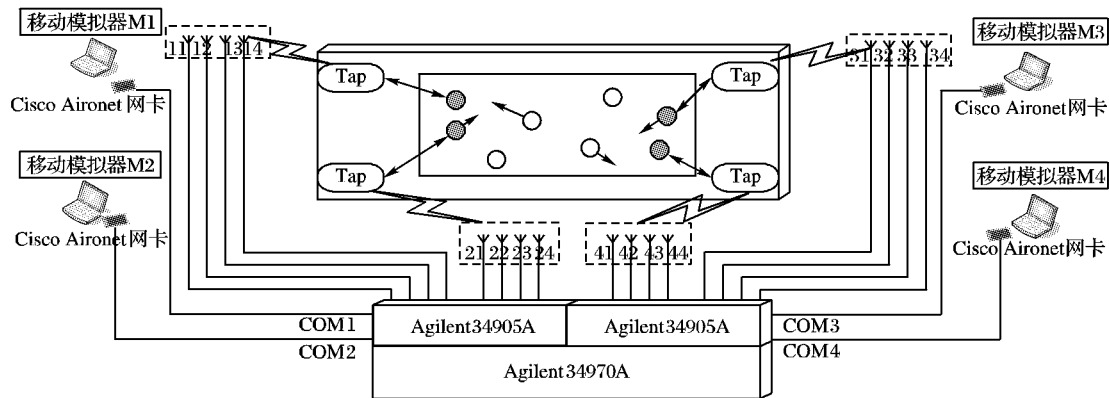


图2 LHEN 总体设计

3.2 实时调度实现

本文在所有节点上使用系统时钟以保证各节点在每次实验开始时被同步,因此事件将根据它们的实际执行时间进行分派,而不是在前一个事件执行完后进行。方案中使用NS2内置的实时调度器(Real-time Scheduler, RS)并对其进行适当调整。实时调度器实现了将一个事件在真实时间上运行的软件调度,它必须与NS2的模拟功能一起使用,否则会导致模拟器虚拟时间快于真实时间,使用实时调度器需在模拟脚本开始处作如下说明:

```
Set ns [new Simulator]
$ns use-scheduler RealTime
```

NS2的实时调度器在等待下一个事件计时器终止之前不能对内核执行控制。大多数操作系统仅仅执行一个较粗的调度器时间粒度(10 ms),由于这个限制,NS2调度器只能在10 ms过后才能恢复对内核的控制。为了使用一个更为合理的时间粒度来调度事件,本文采用忙等待方式,这种方式能够在时钟终止时立即对事件进行处理。

3.3 数据收发实现

为了将一个NS2分组从路由层发送到链路层,本文采用封装的方式,即将NS2分组作为一个UDP分组数据区进行封装,并交给无线网卡进行实际传输^[11]。在链路层通过Tap代理实现分组的嵌入和解嵌操作,应用网络对象获取链路层的帧以及把帧重新写到真实网络中。NS2分组中虚拟节点的地址被映射为一个实际节点的IP地址,该地址就是分组需要发往的目的地址。当收到搭载了NS2分组的UDP包后,接收节点将分组解封装并插入到本地的事件队列。LHEN分组传送逻辑执行过程如图3所示。

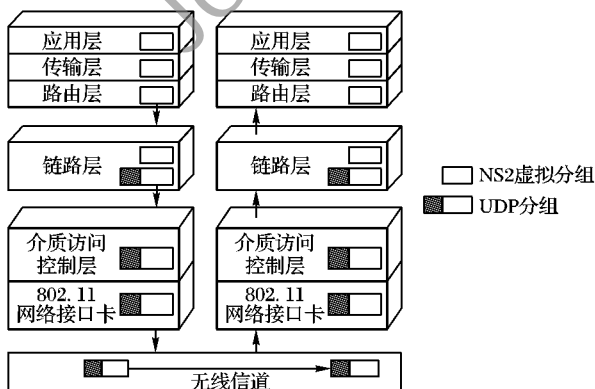


图3 LHEN 分组传送逻辑执行过程

3.4 节点移动性实现

相比于节点实际运动,模拟节点位置的连续变化具有一

定困难。因此在本设计方案中,忽略节点的平滑运动并假设拓扑变化最坏的情况,即信号强度的突然改变。与信号强度连续变化相比,这种假设同样具有现实意义,如节点被建筑物遮挡或发生类似的阻碍。

本文采用Agilent34970A数据采集/开关单元^[12]实现信号强度的控制。34970A是一个面向多任务的设备,能满足包括数据采集和信号控制在内的多种应用需求,并通过装载不同模块实现功能的扩展。对于本文的测试需要在具体实现中使用34905A双四通道RF多路复用器,该模块包含两个独立的1×4多路复用器,设计将经34970A衰减后的信号作为其输入,并在输出的四个端口添加4副天线,通过简单的天线切换模拟节点“移动”。

Agilent34970A搭载了HP-IB和RS-232两种接口用于远程控制,并提供Win32库文件,用户能够在Windows平台上对设备进行管理。使用Visual C++编写相应的天线切换脚本注释器,该注释器可以方便地编写脚本控制天线间的准确切换。

4 实验测试

以动态源路由(Dynamic Source Route, DSR)协议为例测试LHEN^[13]。采用分组投递率和平均端到端延时作为性能指标对混合模拟平台进行分析,这两项指标能够衡量路由协议传输准确性和传输时间效率^[14]。

实验共设置5台PC机,将其安放在一个4.5 m×2.3 m的实验台上,其中4台PC机作为移动模拟器,1台作为NS Server,并开启NS2模拟功能协议模式(Protocol Mode, PM),在该模式下模拟器能够解释和生成实时网络流量。考虑天线功率、天线间相互距离和室外干扰等因素,在天线脚本注释器中为每台PC机的四副天线设置的衰减因子依次为20 dB, 25 dB, 27 dB, 30 dB,每隔1 s进行随机切换。混合模拟场景参数^[15]如表1所示。

表1 混合模拟测试场景参数

参数变量	参数值
节点移动范围	1000 m×1000 m
节点个数	100, 200, 300, 400, 500
节点静止时间	1 s
仿真时间	500 s
数据发送速率	500 kbps

如图4所示,为DSR协议在仿真测试和混合模拟测试中,分组投递率与平均端到端延时随网络规模变化曲线。从图中可以看到,两条曲线变化规律基本一致,但混合模拟测试

结果明显劣于仿真结果,这说明由于真实环境中硬件处理速度、外界干扰、802.11b 多点碰撞、移动模拟器位置状态突变性等因素,影响 DSR 协议性能的发挥,反映了纯仿真测试与真实场景应用间的差异。

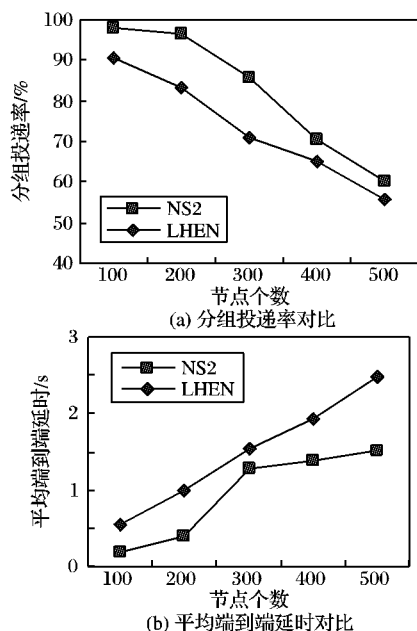


图4 实验结果性能比较

5 结语

本文设计了一种基于 NS2 的混合模拟测试方法 LHEN。运行 NS2 的模拟功能,通过 Tap 代理将实际网络通信流量引入到仿真器中,应用真实的无线网络接口和无线传播介质替换 NS2 中的链路层和物理层模型,弥补了仿真器固有模型的不足,提高了模型的完整性和实验的准确性。同时针对以往实验过程中节点移动不易管理、节点规模可扩展性差、移动过程难重复和实验成本较高等问题,通过信号衰减技术模拟节点的移动,使节点间的多跳能够在有限的区域内完成,大大降低了实验难度。最后通过实验验证了 LHEN 的有效性。

LHEN 在一定程度上克服了单一仿真实验或真实测试床实验带来的测试弊端,采用混合模拟的方式将“虚拟”与“真实”进行了融合,具有良好的实用性和通用性,为无线自组网协议测试奠定了良好的基础,也对其他领域的实验提供了一定参考。

参考文献:

- [1] 陈靖, 罗樵, 黄聪会, 等. 基于 DSR 的位置预测分簇算法研究 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2011, 12(1): 55-58.
- [2] ZENG X, BAGRODIA R, GERLA M. GloMoSim: a library for parallel simulation of large-scale wireless networks [C]// PADS '98: Proceedings of the Twelfth Workshop on Parallel and Distributed Simulation. Piscataway: IEEE Press, 1998: 154-161.
- [3] 刘军, 李喆, 岳磊. 自组织网络仿真平台的设计与实现 [J]. 计算机科学, 2008, 35(1): 24-30.
- [4] NGUYEN L T, BEURAN R, SHINODA Y. AEROMAN: a novel architecture to evaluate routing protocols for multi-hop Ad-Hoc networks [C]// Proceedings of the 19th International Conference on Computer Communication and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2010: 1-7.
- [5] FALL K R. Network emulation in the VINT/NS simulation [C]// Proceedings of the Fourth IEEE Symposium on Computers and Communications. Piscataway: IEEE Press, 1999: 244-250.
- [6] RETURNER D. NS2 中文手册 [EB/OL]. [2012-06-17]. <http://www.baisi.net/thread-60647-1-1.html>.
- [7] MALTZ D A, BROCH L, JOHNSON D B. Experiences designing and building a multi-hop wireless Ad-Hoc network testbed [R]. Pittsburgh: Carnegie Mellon University, School of Computer Science, 1999.
- [8] DE P, RANIWALA A, SHARMA S, et al. MiNT: a miniaturized network testbed for mobile wireless research [C]// Proceedings of the 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Piscataway: IEEE Press, 2005: 2731-2742.
- [9] AUDSIN D P, AGHVAMI A H, FRIDERIKOS V. An emulated IPv6 based self-configuring multi-hop mobile network testbed: architecture and performance analysis [C]// WCNC'09: Proceedings of the 2009 IEEE Conference on Wireless Communications and Networking Conference. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1-6.
- [10] Cisco Systems. Cisco aironet 350 series client adapter data sheets [EB/OL]. [2012-06-20]. http://www.cisco.com.cn/US/prod/collateral/wireless/ps6442/ps4555/ps448/product_data_sheet09186a0080088828.html.
- [11] COMERDE. 用TCP/IP进行网际互联——原理、协议与结构 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 107-113.
- [12] 吴天麟. Agilent 34970A 数据采集/开关单元产品综述 [EB/OL]. [2012-06-20]. <http://www.home.agilent.com/agilent/techSupport.jsp?pid=1000001313%3Aepsg%3Apro&pageMode=PL&t=79841.g.1&cc=CN&lc=chi>.
- [13] 郭一辰, 陈靖, 张黎, 等. 大规模 MANET 路由协议 SPDSR 在 Linux 中的设计与实现 [J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2012, 13(4): 80-85.
- [14] MATTHES M, BIEHL H, LAUER M, et al. MASSIVE: an emulation environment for mobile Ad-Hoc networks [C]// WONS 2005: Proceedings of the Second Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services. Piscataway: IEEE Press, 2005: 54-59.
- [15] 高振国, 温东新, 刘宏伟, 等. 构建无线自组织网仿真场景 [J]. 宇航学报, 2006, 27(4): 806-813.
- [8] WU F J, TSENG Y C. Distributed wake-up scheduling for data collection in tree-based wireless sensor networks [J]. IEEE Communications Letters, 2009, 13(11): 850-852.
- [9] 王雷, WEI R Z, 田子红. 无线传感器网络中一种基于分簇的节点调度算法 [J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(8): 1013-1023.
- [10] SU L, YANG Q, LI Q L, et al. Coverage algorithm and protocol in heterogeneous sensor networks [C]// Proceedings of the Third International Conference on Networking and Mobile Computing. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 53-63.
- [11] HAN X F, CAO X, LLOYD E L, et al. Fault tolerant relay node placement in heterogeneous wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2010, 9(5): 643-656.
- [12] WU Y W, LI X Y, LIU Y H, et al. Energy-efficient wake-up scheduling for data collection and aggregation [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2010, 21(2): 275-287.
- [13] 李猛, 丁代荣, 郭廷立. 一种无线传感器网络节点随机部署策略 [J]. 计算机工程, 2012, 38(5): 99-101.

(上接第100页)