

自组织网络仿真平台的设计与实现^{*})

刘 军 李 喆 岳 磊

(东北大学信息科学与工程学院 沈阳 110004)

摘 要 自组织网络凭借其独特的结构和广泛应用潜力,受到越来越多的关注。新协议实测的重要性和困难性使仿真成为研究工作必不可少的重要环节。本文基于集中控制、分布运行的设计思想实现了一种自组织网络仿真平台。平台分为控制中心和终端节点两大模块:控制中心提供用户接口,完成拓扑和业务流量控制,同时通过监测、统计终端之间的通信状况实现仿真数据分析,获得准真实环境下网络的实测性能;终端节点接收控制中心指令,通过对网络底层的设置,仿真自组织网络节点。平台提供一个准真实、高可控的自组织网络测试环境,可实现对协议栈网络层及以上各层协议的调试,提高研究效率。

关键词 自组织网络,网络仿真,虚拟拓扑,网络过滤

Design and Implementation of the Self-organization Network Simulation Platform

LIU Jun LI Zhe YUE Lei

(School of Information Science & Technology, Northeastern University, Shenyang 110004)

Abstract The self-organization network absorbs lots of concerns based on its special hierarchy and the potential of broad application. Simulation becomes essential link of the research for the importance and difficulty of real testing new protocols. A self-organization network simulation platform, which is based on the conception of central control and distributive operation, is designed. The platform is comprised of control-center and terminal nodes; the control-center provides the interface for the users to realize the control of topology and flow, at the same time it realizes the analysis of simulation data by monitoring and calculating the communication states and achieves the performance of the network in near-true environment. The terminal node simulates the self-organization network node through configuring lower layers of network in the controlling of the control center. The platform provides a near-true and higher control test way environment for self-organization network. It can realize the debugging of the network layer and upper layers in the protocol stack and improve the efficiency of research.

Keywords Self-organization network, Network simulation, Virtual topology, Network filter

1 引言

自组织网络是由无线节点组成的独立于固定基础设施并且采用分布式控制的网络,最常见有移动 Ad Hoc 网络^[1,2]和无线传感器网络。而随着无线通信技术的发展,在一些特殊领域的组网过程中,也形成了自组织形式的网络,如空间信息网。

目前,进行网络研究主要采用分析建模、网络模拟和实验测试等方法。

分析建模基于数学推导,为了计算的方便,常常采用了条件假定和理想模型等处理手段。由于自组织网络的复杂性和时变特性,对其性能进行理论评估极端困难。

网络模拟是利用软件技术构造网络拓扑、实现网络协议、测评网络性能的网络虚拟技术,如 NS-2^[3,4]、OPNET、Glomosim 等。虽然网络模拟在新协议的测试上发挥了重要作用,但由于模拟软件中采用的无线信道、终端特性、终端运动等模型与真实的网络环境相比均有一定的简化,模拟结果并不能完全反映算法在实际环境下的性能。

因此,国内外各研究机构纷纷采用实验测试方法,搭建自组网的实验平台^[5-8],例如仿真 Ad Hoc 网络的 CMU-DSR、

APE^[9]、EWANT^[10],在平台上对各种算法进行实际环境下的性能测试与分析。但实验平台有明显缺点:一是配置困难,费用很高;二是需要有志愿者在室外较大范围的移动,不易控制管理;三是测试的规模受限,且难以重复测试,对测试中发现问题难以再现。此外,高昂的造价和建造的复杂性使其无法应用于空间网络。

本文设计并实现了自组织网络仿真平台 SEP(Self-organization network Emulation Platform),在实际应用之前,为自组网的结构设计和网络协议算法性能的进一步测试、评估、优化提供准真实环境下的测试平台,对实际应用更具参考价值。该仿真平台基于分布运行并集中控制的思想:由终端实际运行网络协议仿真自组网节点,控制中心通过虚拟移动和虚拟拓扑管理来仿真复杂的网络环境,在一定程度上克服了模拟软件真实性上的缺陷和原始实验方式成本过高、配置复杂、难于控制管理的缺点。

2 设计思想

仿真平台搭建于局域网之上,由控制中心和多个分布式终端节点构成,结构如图 1 所示。控制中心通过用户接口模块完成对网络拓扑、测试业务的交互式设定,并按照用户要求对测试过程进行可视化演示和性能评估,通过调度中心对测

^{*})国家高技术研究发展计划项目(2003AA781011)。刘 军 博士研究生,主要研究方向为 Ad Hoc 网络和空间网络;李 喆 教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信与个人通信、卫星通信、宽带网络结构及关键技术。

试过程进行控制管理;终端节点按照控制中心设定的网络拓扑,根据模拟的信道特性,通过过滤器实现节点间多跳通信,仿真自组网节点,并通过数据采集模块记录本地测试信息。

2.1 终端节点

为了在局域网这种单跳共享网络中模拟多跳、复杂的无线自组网拓扑结构,在 SEP 每个终端节点网络协议栈的 LLC 子层之上、IP 层之下设计一个过滤器,主要功能是对本机接收的网络数据包进行截取处理,有选择地控制数据包的接收,可强制断开两个原本直接通信的终端节点,实现数据在节点间的中继转发,从而实现节点之间的多跳通信,这种机制定义为虚拟多跳。由这样的一些节点组成的网络拓扑称为虚拟拓扑。过滤器无缝地嵌入到协议栈中,对其他各层的协议和程序透明。

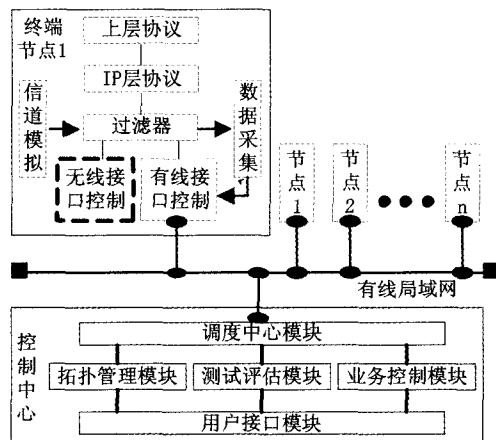


图1 SEP基本结构图

另外,终端节点中还包括信道模拟和数据采集模块。如果采用无线网卡,终端节点即可升级为自组网节点,用于实际组网。

2.2 控制中心

中心控制机制负责仿真的控制与调度,包括系统加载卸载、仿真启动终止等指令控制以及协议的选取,拓扑、业务流量等仿真参数设置等,通过远程控制机制实现对各终端信息的实时监控,但不参与路由和网络测试业务的处理。

控制中心维护一个虚拟网络拓扑,实时调度网络中的节点。当网络拓扑中的节点按内置或自定义规则移动之后,控制中心负责通知相关的终端节点更新自己的邻居节点 MAC 地址列表,用以控制数据的转发。控制中心在仿真结束后进行结果数据的统一收集与分析。

集中控制方式能够简化自组织网络测试时的繁琐操作,减少了测试中的人为因素,增强了仿真过程的可控性及可回放特性,有效地提高了仿真系统的效率、准确性和平台的实际可用性。

3 SEP 的设计与实现

仿真平台的硬件结构为普通 PC 机经交换机连接组成的局域网,节点采用 Linux 操作系统,使用 C 语言编程。

3.1 终端节点

终端节点的设计目标是利用局域网中的 PC 机仿真自组织网络无线节点,使路由协议和上层程序能够得到真正运行和处理,为协议的测试创建具有独立数据处理能力的准真实自组织网络节点。

在测试开始前,终端接收控制中心发送测试任务,设置测试参数。测试开始后,按照测试任务处理需要发出的数据包,同时监听网卡接收到的数据包并进行过滤处理,由数据采集模块记录下本节点收到和发出的每个包的信息,包括收(发)时间、包头信息、包长度等。在仿真结束时,将记录的信息发送控制中心,交由测试评估模块进行处理。

(1) 过滤器

终端节点的核心为过滤器,采用 Linux 内核的 Netfilter 机制实现,加载在网络协议栈的 LLC 子层之上、IP 层之下,截取网卡接收的网络数据包,有选择地控制数据包的接收。

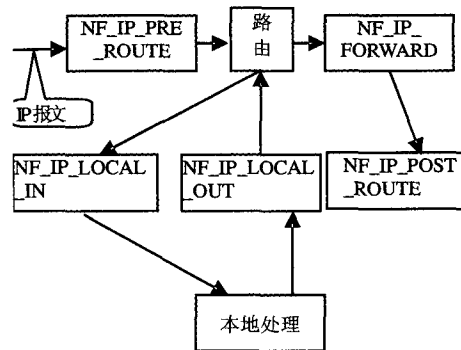


图2 Netfilter的实现流程

图2是Netfilter的实现流程,它通过5个可以扩展的钩子函数(hook),实现内核防火墙的基本框架;箭头标明了IP包在Netfilter框架的流向,IP包从最左端进入IP校验和版本检查后经过第一个挂载点NF_IP_PRE_ROUTING注册的钩子函数进行处理;经过路由选择,决定数据包需要转发还是发给本机;若该数据包是发给本机,则经过NF_IP_LOCAL_IN注册的钩子函数处理以后传递给上层协议;若需要转发,则传至NF_IP_FORWARD注册的钩子函数进行处理;所有需要发送的网数据包,无论是本机发出的还是转发的,都要经过最后钩子函数NF_IP_POST_ROUTING处理以后,才能发送。本地网络层以上产生的数据包通过NF_IP_LOCAL_OUT注册的钩子函数处理后,才可以进行路由选择,然后由NF_IP_POST_ROUTING处的钩子函数处理后发送到网络上。

数据包过滤在进入路由模块之前进行。路由协议没有收到数据包时,认为是在物理链路上出现了问题,这样就强制断开了局域网中直接相连的路径,实现虚拟拓扑。

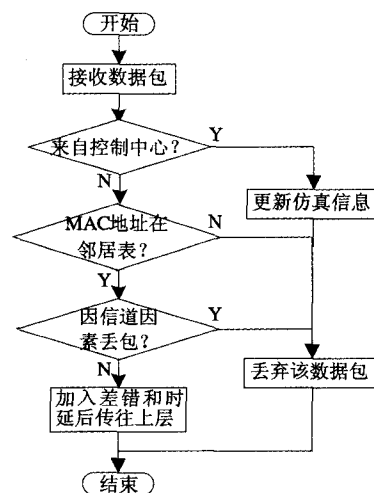


图3 数据过滤模块流程图

过滤器工作过程如图 3。当终端节点收到数据包时,若是来自控制中心的控制信息,则更新自身邻居表,否则通过对数据包的来源 MAC 地址的分析,对照邻居 MAC 地址表,然后根据信道模拟模块规则决定抛弃或者处理该数据包。

(2) 信道模拟模块

模拟自组网无线信道特性,根据收发节点的距离、移动速度等因素实时加入一定的延迟和适当分布的噪声及多径效应等,具体包括参差特性、时延抖动和拥塞特性等指标。但是无线信道具有复杂的时变性,影响因素较多,在仿真中难以实现对无线信道的准确模拟。目前平台对于无线信道特征和终端移动性的模拟都采取了非常简单的理想化假设,其仿真结果与实际情况也就存在一定的偏差。为弥补此不足,平台各终端节点可配置有无线双网卡,利用无线网卡在一定规模上进行无线组网实际测试,为研究自组织网络在真实环境下的系统性能提供良好的调试环境,并以此为依据调整信道模拟模块的参数。

3.2 控制中心

控制中心由用户接口、拓扑管理、业务控制、测试评估和调度中心 5 个模块组成。

(1) 用户接口模块

采用基于 Linux 图形库 Qt 实现一个可视化的图形界面仿真环境。所有仿真中常用的功能集成到用户接口界面上,包括仿真过程控制、终端控制、拓扑自定义、功能键、对话框、帮助功能等,并且把仿真的过程以动画的形式在控制中心界面展现出来,同时提供进度显示、节点状态显示等窗体,为用户提供一个友好与高可用性用户接口界面。用户接口模块的功能概括为以下几点:

- ①提供仿真过程所有控制功能接口和拓扑定制接口;
- ②提供仿真进度显示和仿真过程中节点状态查看功能;
- ③提供仿真过程的可视化演示功能;
- ④提供协议性能分析功能以及丰富的帮助信息。

(2) 拓扑管理模块

拓扑管理模块的功能是接收用户自定义拓扑信息,动态更新管理拓扑结构,实时分发拓扑信息给各终端节点。

拓扑管理模块主要包含虚拟节点的设计、虚拟拓扑的动态管理、虚拟拓扑场景的存储与回放。虚拟节点模型是虚拟拓扑场景实现的基础,虚拟节点的设计包含节点的 ID 号、节点的位置、节点的移动模型和节点的发送功率等;虚拟拓扑的动态管理完成虚拟拓扑的动态更新,实时产生虚拟节点信息并进行存储,为终端节点提供的网络行为提供实时的规则标准。

(3) 业务控制模块

产生测试任务,在传输任务列表中定义了整个测试过程中每组数据包的源节点、最终目的节点、数据包数量、发出时间,以精确地控制测试过程中网络的传输负荷。在仿真平台中流量产生器分为:在构建在 UDP 上的恒定流量产生器和构建在 TCP 之上应用型流量产生器。构建在 UDP 上的恒定流量产生器使用 UDP 协议产生恒定速率的数据包,供测试使用。构建在 TCP 之上应用型流量产生器则是通过仿真网络应用程序,如 FTP, Telnet 等,仿真网络应用程序在网络中产生的流量,供测试使用网络应用程序时网络性能使用。

(4) 测试评估模块

测试评估模块在运行过程中负责数据实时统计,测试结束后收集各个终端在测试过程中保存的收发包记录,根据测试开始前传输任务分配,统计分析、计算出相应的测试指标,

包括网络容量、节点平均吞吐量、数据包成功传输率、数据包平均传输延时、延时抖动、数据包传输路径平均跳数、系统路由开销等。

(5) 调度中心模块

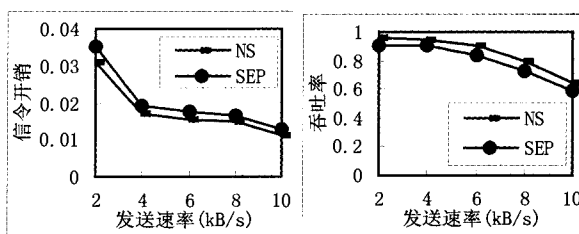
调度中心模块是整个控制中心的核心部分,它负责整个仿真过程的事件调度,与控制中心所有模块相关联。控制中心在启动后,调度中心就开始工作,之后的所有前台事件的相应和后台程序的执行都在调度中心的控制下完成。中心调度模块主要完成动态更新、协调控制中心时间,为拓扑管理提供时间标准,协调前后台程序的连接,协调控制中心与终端节点的通信,协调仿真结果的分析。

4 平台性能测试

以 Ad Hoc 网络 AODV 路由协议为例对仿真平台进行测试,并对网络平均吞吐率和路由开销两个衡量路由性能的重要指标进行分析。

网络平均吞吐率指的是网络中目的节点应用层成功接收的分组数(网络的吞吐量)与网络中信源节点应用层产生的分组数的比值,反映了网络处理、传输数据的能力,是路由算法可靠性、完整性、有效性和正确性的主要标志。

信令开销是指整个仿真过程中传送的路由控制分组的总数目与数据分组总数目的比值,即传输一个数据分组所需的控制分组的个数,用于衡量算法的可扩展性以及低带宽或拥塞情况下的网络性能和能耗效率。



(a) 信令开销

(b) 网络吞吐率

图 4 仿真平台性能

为仿真自组织网络多跳特性,场景设置为 1000m * 100m 的狭长区域,在其中设置 15 个终端节点,节点做最大移动速度为 28m/s 的随机运动,并在不同节点间随机设置 15 对 CBR 数据流,对发送速率为 2kB/s, 4kB/s, 6kB/s, 8kB/s, 10kB/s 五种情况分别进行仿真,并与完全相同情况下的 NS2 软件的模拟结果进行比较,如图 4 所示。二者曲线变化趋势一致,但存在少量偏差,反映出纯粹的软件模拟和仿真平台测试间的差异,也说明了仿真在协议验证阶段的重要性。

总结 本文介绍了一种自组织网络仿真平台 SEP,基于虚拟拓扑和虚拟移动的概念,通过控制中心和终端节点的配合作完成仿真的功能。该平台搭建在局域网之上,通过在每个节点设置网络过滤器,利用控制中心的拓扑信息,有选择地控制数据包的接收、转发,可强制两个原本直接通信的仿真节点必须经过其它仿真节点的路由才能进行通信,将单跳网络模拟成多跳网络。平台具有高度的通用性、灵活性和可扩展性,在无线自组织网络的网络层及其上各层算法协议调试、性能评估和优化等诸多方面均有独特的应用优势,使得自组织网络新协议在实施阶段的验证和调试更加轻松和方便,提高了研究效率。

(下转第 30 页)

802.11 分组延迟有明显的上升。最小化功率和跳数适当是一种均衡(trade-off),过长的链路在导致延迟上升的同时还存在着传输失败概率上升的问题,进而会导致重传,增加能量消耗;而过于严格的跳数控制又会影响到路由节省能量的效果。二者在何种层面达到均衡将是今后需要着重研究的问题之一。

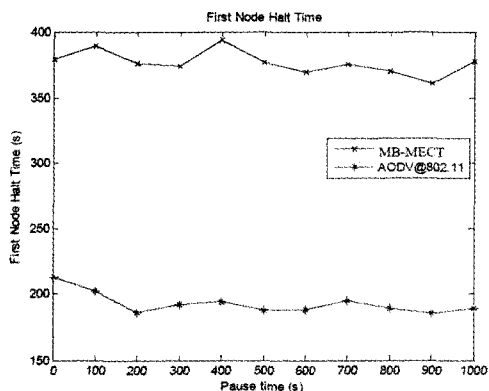


图4 第一个能量耗尽节点能量耗尽时间

图4为第一个节点能量耗尽时出现时间的比较。最小功率路由带来的能量节省和多信道降低碰撞几率减少了不必要的能量消耗,因此节点和网络的生存时间明显延长。

通过上面的仿真实验,可以看出相比不加功率控制的单信道 AODV@802.11 自组网,MB-MECT 明显延长了网络的生存时间,提高了成功递交分组量和分组率,取得了良好的节省能量效果。功率控制技术有效地降低了能量得消耗,功率调整带来的碰撞增加的问题,通过多信道的引入,有效地降低了分组间的碰撞,同样减少了重传等不必要的能量消耗。MB-MECT 的最小功率路由选择的多跳短距离路径却导致传输延迟明显上升,付出了一定网络性能的代价。

作为本文的后续工作,我们将研究如何减少最小功率路由时的端到端延时。本文也没有对信道分配问题进行深入分析,而多信道的分配问题也是自组网研究的热点问题。需要进一步的研究工作来确定合理有效的多信道分配策略,以在

有效增加信道利用率的同时,提高网络的复用性。

参考文献

- 1 英春,史美林. 自组网体系结构研究[J]. 通信学报, 1999
- 2 Gupta P, Kumar P R. The Capacity of Wireless Networks. Information Theory, IEEE Transactions on Publication, 2000, 46 (2):388~404
- 3 Stojmenovic I, Lin X. Power-aware localized routing in wireless network. IEEE Trans Parallel Distrib Syst, 2001. 1122~1133
- 4 Zhang Baoxian, Mouftah H T. Energy-aware on-demand routing protocols for wireless ad hoc networks Wireless Netw, 2006, 12: 481~494
- 5 Doshi S, Bhandare S, Brown T X. An on-demand minimum energy routing protocol for a wireless ad hoc network. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review, 2002, 6 (3):50~66
- 6 Jung E S, Vaidya N H. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. Wireless Networks, 2005, 11:55~66
- 7 Zhang Jun, Fang Z, Bensaou B. Adaptive power control for single channel ad hoc networks Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on May 2005, 5:3156~3160
- 8 Krunz M A, POWMAC M. a single-channel power-control protocol for throughput enhancement in wireless ad hoc networks Selected Areas in Communications. IEEE Journal on May 2005, 23 (5):1067~1084
- 9 Jung E S, Vaidya N H. A Power Control MAC Protocol for Ad Hoc Networks. 2002. MOBICOM'02, Atlanta, Georgia, USA. 2002. 23~28
- 10 Muqattash A, Krunz M. Power Controlled Dual Channel (PC-DC) Medium Access Protocol for Wireless Ad Hoc Networks. In: Proceedings of the IEEE INFOCOM Conference, 2003. 470~480
- 11 Wattenhofer R, Li L, Bahl P, et al. Distributed Topology Control for Power Efficient Operation in Multihop Wireless Ad Hoc Networks. In: Proc. IEEE INFOCOM 2001 Conference, Anchorage, Alaska, 2001. 22~26
- 12 Gomez J, Campbell A T, Naghshineh M, Bisdikian C. Conserving transmission power in wireless ad hoc networks. In: Proc. ICNP'01, 2001
- 13 Mo J, Wilson So H S, Walrand J. Comparison of multi-channel MAC protocols. In: Proceedings of the 8th ACM international symposium on Modeling, analysis and simulation of wireless and mobile systems, Oct. 2005

(上接第26页)

利用此平台已经成功地对 AODV、DSR、DSDV 等 Ad Hoc 路由算法以及实验室在项目研究中提出的 Ad Hoc 网络、空间信息网的路由和网络安全算法在多种实际网络环境参数下进行了调试,提高了测试精度,SEP 平台上调试成功的协议和算法在实际应用中均取得了良好效果,加快了开发速度,节省了实验费用。

参考文献

- 1 Toh C-K. Ad Hoc Mobile Wireless Networks: Protocols and Systems[M]. Prentice Hall PTR, 2002. 55~77
- 2 Baloch F, Strandmark C. AD-HOC Networks and layer 2 tunnels [J]. Computer Engineering, 2004, 5: 246~247
- 3 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003. 3~7, 26~30
- 4 王晓曦, 王秀利, 周津慧. NS2 网络仿真器功能扩展方法及实现 [J]. 小型微型计算机系统, 2004(6): 1009~1014
- 5 Nordstrom E, Gunnndberg P, Lundgren H. A Testbed and

Methodology for Experimental Evaluation of Wireless Mobile Ad hoc Networks[A]. In: Testbeds and Research Infrastructures for the Development of Networks and Communities[C], 2005. 100~109

- 6 Lundgrn H, et al. A large-scale tested for reproducible Ad Hoc protocol evaluations[A]. In: Proceedings of IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC 2002)[C]. Orlando Florida, Mar 2002
- 7 龚月荣, 林晓明. 移动自组网反应式路由协议在 Linux 中的实现 [J]. 计算机工程, 2006, 26(7): 98~100
- 8 钟晓峰, 杨帆, 王有政, 等. Ad hoc 网络多层混合实验系统的设计与实现[J]. 计算机应用, 2006, 30(5): 1560~1562
- 9 Haas Z J, Pearlman M R, Samar P. The Bordercast Resolution Protocol (BRP) for Ad Hoc Networks [Z]. In: IETF MANET Working Group INTERNET - DRAFT, 2001
- 10 Fall K. Network emulation in the VINT/ NS simulator [J]. In: Computers and Communications Proceedings. IEEE International Symposium, 2002, 7. 244~250.