

基于 NS-2 的多接口多信道仿真模型扩展研究

符 琦^{1,2}, 陈志刚¹, 蒋云霞²

(1. 中南大学信息科学与工程学院, 长沙 410083; 2. 湖南科技大学计算机科学与工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘 要: 基于现有 802.11x 系列标准对无重叠多信道技术的广泛支持, 分析以该系列标准为基础的多接口多信道(MIMC)无线网络在低层协议(数据链路层和物理层)的仿真需求, 阐述现有 NS-2 仿真软件对 MIMC 仿真模型支持的不足, 从现有扩展模型的实现方案中总结基于 NS-2 进行 MIMC 扩展的基本思路与要求, 对现有多接口多信道 NS-2 扩展研究进行分类, 并给出相关扩展模型的对比分析。

关键词: 网络仿真; 信道分配; 单接口多信道; 多接口多信道; NS-2 软件; OMNET++软件

Research on Multi-interface Multi-channel Simulation Model Extension Based on NS-2

FU Qi^{1,2}, CHEN Zhi-gang¹, JIANG Yun-xia²

(1. Institute of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. School of Computer Science and Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

【Abstract】 Based on the wide support of 802.11x series standards to orthogonal multi-channel technology, this paper introduces the simulation requirement in wireless networks, based on multi-interface multi-channel(MIMC), for lower layer(data link and physical layers) protocols. The simulation shortage for MIMC model support in NS-2 is summarized. Then the basic methods and principles for MIMC extensions to NS-2 are elaborated based on some existing schemes. The classification and analyses of extensions are illustrated and some contrastive analyses about MIMC models are given at length.

【Key words】 network simulation; channel assignment; Single-interface Multi-channel(SIMC); Multi-interface Multi-channel(MIMC); NS-2; OMNET++

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.04.027

1 概述

流间干扰和流内干扰的存在, 使得传统的单接口单信道(Single-interface Single-channel, SISC)无线网络(如 WLN、WMNs、MANET、VANET 等)的多跳节点容量随着网络规模的增大而急剧下降, 严重影响了网络的性能^[1-2]; 而单接口多信道(Single-interface Multi-channel, SIMC)的方案又因其需要将无线接口在信道间频繁地切换, 以充分利用多信道方案的优势而导致了毫秒级的切换延时^[3], 且不能保证良好的网络连通性, 无法对网络传输所需的容错和节点同步等功能提供很好的支持。与此同时, 无线接口硬件价格的迅速下降和 IEEE 标准对无重叠多信道的支持, 使节点的多个无线接口可同时工作在无重叠的多个信道中(如 IEEE802.11a 和 802.11b 分别支持 12 个和 3 个无重叠的信道等^[4]), 提升了网络性能(如高吞吐量、低延时等), 并使 MIMC

无线网络的部署及实现成为可能。由于使用网络仿真工具进行协议仿真是进行协议研究的一个重要手段, 随着上述网络在网络体系结构、硬件设备、节点角色功能、网络协议等方面的变化发展, 已有的仿真工具(如 NS-2、OMNET++、OPNet、GloMoSim 等)也应进行相应的功能扩展, 为研究人员所需各种新模型的仿真实验提供良好的扩展支持。

本文介绍现有 NS-2 在 MIMC 仿真扩展方面的缺陷、基本扩展思路与设计原则, 并对现有 MIMC 的 NS-2 扩展研究进行分类对比分析, 指出现有扩展在相关算法及接口调用等方面的不足, 为 NS-2 的 MIMC 扩展研究提供思路。

2 MIMC 的 NS-2 扩展研究

NS-2^[5]作为一种功能强大的开源软件, 因其丰富的协议组件、极强的可扩展性和高可信度等特点, 在网络仿真领

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“基于网络编码的无线 Mesh 网流媒体传输性能改进研究”(61073186)

作者简介: 符 琦(1975—), 男, 副教授、博士研究生、CCF 会员, 主研方向: 无线 Mesh 网络; 陈志刚, 教授、博士生导师; 蒋云霞, 副教授、硕士

收稿日期: 2012-05-08 **修回日期:** 2012-07-10 **E-mail:** jackiefq@163.com

域得到了广泛的应用。然而,现有的 NS-2 无线仿真模型并不提供 MIMC 模型的仿真能力(虽然 NS-2 的全新版本 NS3^[6]宣布提供 MIMC 的仿真模型,但自 2006 年启动的这一新开源项目仍在不断完善中)。在现有的 NS-2 中,无线节点的仿真主要是以 MobileNode 和 SRNode 这 2 种移动节点模型为核心,并附加各种支持特性而实现的。由于 SRNode 仅仅用于 DSR 协议,因此现有的 MIMC 扩展模型大多以 MobileNode 为基础进行扩展。

NS-2 的 MobileNode 移动节点模型如图 1 所示。

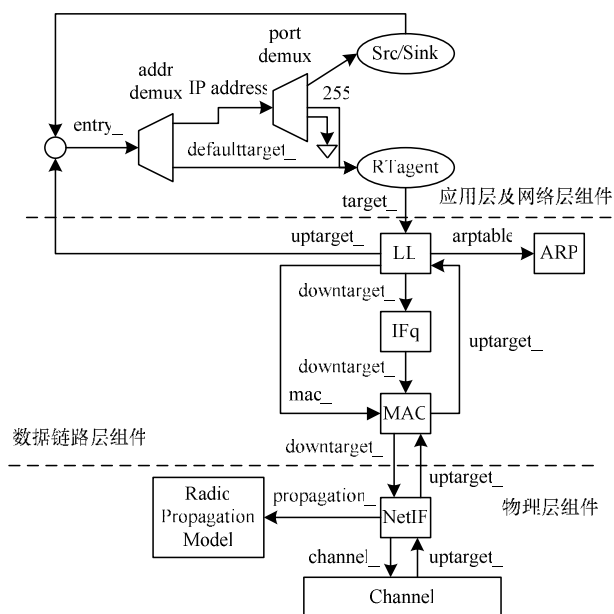


图 1 NS-2 的 MobileNode 移动节点模型

MobileNode 模型由多个组件构成,与信道仿真相关的主要有以下组件:

- (1)路由代理(RTagent,提供不同类型的路由算法)。
- (2)逻辑链路层+地址解析协议(LL+ARP,处理所有 IP 地址到 MAC 地址或者相反的地址转换,以及负责把数据包从 RTagent 转发给 IFq)。
- (3)接口队列(IFq,为路由协议数据包提供各种级别的队列服务)。
- (4)媒介访问控制(MAC,提供如 802.11/16 等服务)。
- (5)网络接口(NetIF,可看作是被移动节点用来访问物理信道的硬件接口)。
- (6)无线传输模型(Radio Propagation Model,提供特定的无线信号传输模型,以计算每个分组在到达接收节点时的信号强度)。
- (7)无线通信信道(Channel,连接移动节点的物理传输媒介)。

从图 1 可看出,移动节点模型只具备一条对外通信链路(RTagent→LL(ARP)→IFq→MAC→NetIF(RPM)→Channel,或反之),不存在信道切换问题,其相应的缓冲队列管理和包调度也是针对单信道设计的,导致由该移动节点组成的无线网络的 NS-2 仿真只能提供 SISC 的仿真功能,因而需

要研究人员根据应用的具体需求,从不同的层次(如 MAC、路由层、物理层等)对 NS-2 进行 MIMC 仿真模块的扩展,以适应不同类型网络的仿真测试。

2.1 MIMC NS-2 扩展的基本要求与思路

目前,大多数 MIMC 仿真模型均是以上述 NS-2 移动节点为基础,通过对其结构和组件进行改造和扩展而实现的^[7-14],并试图满足以下 MIMC 模型的基本要求:

- (1)特定应用场景中信道的数量应该是可定制的;
- (2)每个节点的接口数是可变的,同一场景中的所有节点的接口数不需要相同;
- (3)同一场景中每个节点能与不同数量的信道进行通信(也可事先预定);
- (4)路由代理能够利用改进后的 MIMC 模型进行 MIMC 的协议仿真,并保留 NS-2 原有的操作特性,以确保整合后的兼容性。

在上述原则的约束下,由于 NS-2 分别通过 TCL 和 C++ 来描述网络配置和处理仿真过程的实现,因此现有 MIMC 扩展模型在结构上虽然存在一定的差异,但在实现思路上有如下类似过程:

- (1)TCL 脚本改进:通过对 MobileNode 节点相关的 TCL 脚本进行修改,实现 LL(ARP)/IFq/MAC/NetIF(RPM)/Channle 等组件中全部或部分组件的复制,以构建具有多个对外通信链路的移动节点模型,从而实现 MIMC 功能。相关的 TCL 文件包括: ns-mobilenode.tcl(用于实现 MIMC 移动节点模型,并修改相关的过程,如改进 add-interface 过程以根据场景参数复制出一定数量的接口和信道), ns-lib.tcl(通过对 node-config、create-wireless-node 过程的改进,使仿真脚本能够定制每个节点的信道数量,同时添加 change-numifs、add-channel、get-numifs 等过程来提供一些多信道数量的访问入口), ns-packet.tcl(对新增加的数据包信息进行添加,如多信道 MAC 包头信息), ns-default.tcl(根据扩展模型的不同,需要在该文件中对模型涉及的相关 TCL 对象,如物理层、信道层及各种代理对象的相关参数进行初始化)。
- (2)C++源码改进: TCL 文件的改进为 MIMC 的定制提供了相关的过程,在此基础上,需要对 MIMC 的具体 C++ 实现源码进行改进,如 packet{.h/cc}、mac{.h/cc}、mobilenode{.h/cc}、channel{.h/cc}等相关头文件和功能实现源码,以实现具体的 MIMC 仿真功能,如信道状态的获取、MAC 状态的测试、定时器的实现等。

(3)相关协议整合:在上述 MIMC 的扩展实现的基础上,为了有效地利用 NS-2 的 MIMC 功能,在不破坏现有 NS-2 操作机制的基础上,需要在各种路由代理等组件(如 AODV、DSDV 等)的具体实现代码中(如 aodv.h/cc、aodv_packet.h/cc)添加相应的 MIMC 仿真代码,与 NS-2 的 MIMC 仿真功能相整合,并修改相关的跟踪函数(如 cmu-trace{.h/cc})以增加 MIMC 仿真信息的跟踪。

- (4)采取与上述(1)~(3)不相同的构建方案^[13-14],通过创

建通用的、可灵活配置的组件与现有 NS 相关模型(如 MobileNode、PropagationModel 等)进行集成, 以实现 MIMC 及多路径数据路由的仿真功能。

2.2 现有 NS-2 扩展的对比分析

目前已有的一些 MIMC 的 NS-2 扩展研究成果从不同的层次实现了对特定类型 MIMC 及相关协议的仿真支持。这些相关工作可以分成基于 MobileNode 节点模型和通用组件模型两大类。

2.2.1 基于 MobileNode 节点模型的 MIMC 扩展

MobileNode 节点模型扩展自 NS-2 的 Node 模型, 能够对无线节点的移动、无线数据收发、周期性位置更新等进行有效仿真, 基于此模型的经典 MIMC 扩展有:

(1) TeNS(The enhanced Network Simulator)^[7]模型

TeNS 主要针对 NS 早期版本 2.1b9 中 DSSS 版 802.11 协议的 MAC 层实现过于简单而进行的扩展。早期的 TeNS 版本通过修改 Tcl 源文件, 将与多信道相关的物理层组件(NetIF/RPM/Channel)复制了多份, 并修改了物理层的 C++ 源码, 以多路复用的方式实现了多接口模型, 然后在 TCL 脚本中为接口选择合适的信道编号。由于只有一个 MAC 组件, 最初的 TeNS 只实现了移动节点的 SIMC 仿真模型。最新的 TeNS1.2 已支持 MIMC 仿真, 并集成到 ns-allinone-2.1b9a-gcc32 版本中。新的 TeNS 增加了移动节点对多接口和定向天线的支持, 实现了共享信道的干扰及信道数量的定制, 以评估其 MIMC 利用情况; 同时添加了 ARP、静态路由和点到点链路等组件, 提供 802.11 相关协议参数的定制与速率自适应的支持。虽然 TeNS1.2 改进了 NS2.1b9a 中 AODV 协议的相关代码, 使其能支持 MIMC 仿真, 但其针对的 NS 版本太低, 且主要目标在于仿真出能够被 IEEE 802.11 协议使用的多个信道以及信道间的干扰, 其实现机制与 802.11 协议耦合紧密, 通用性一般, 不过该模型采用的修改 Tcl 源码在移动节点模型中复制并组合多信道相关

组件的方式对后续类似研究具有一定启发性。

(2) Hyacinth^[8]模型

与 TeNS 类似, 该模型最初也是针对 NS2.1b9a 进行的扩展, 并在 NS2.26/2.29 上得到了很好的移植^[9-11]。Hyacinth 模型主要是针对多信道无线 Mesh 网络的体系结构而设计的, 以便其使用 802.11x/16a 技术来构建稳定的无线多跳网络环境, 并实现多接口信道的分配与多信道数据路由的仿真, 因此, 其扩展时涉及的源码及协议层次比 TeNS 要复杂。该模型实现了一个特定的路由协议——手工路由协议(Manual Routing Protocol, MRP)以进行接口与信道的静态绑定。为此, 在模型中预先定义了 11 个无重叠信道, 并为每个节点复制 5 套 MIMC 相关组件(数据链路层和物理层的组件), 按照信道和接口的次序将它们连接在一起, 以此满足 MRP 协议的静态分配信道策略。虽然 Hyacinth 模型为 MIMC 的实现提供了一个新的思路, 也能在较高 NS 版本中进行移植, 但其信道分配策略太过单一, 且 MIMC 能力依赖于特定的路由协议, 其通用性很差, 不足以扩展为更通用的仿真模型, 只能对特定环境下的无线多跳 MIMC 网络进行有限的仿真。

(3) Ramon^[12]模型

Ramon 模型如图 2 所示, 该模型最初在 NS2.29 的基础上进行了 MIMC 扩展, 经过进一步的改进, 目前该模型已能与 NS2.3x 系列(如 2.30/32/33 等)版本兼容。与 Hyacinth 方法类似, Ramon 也是在移动节点的构建阶段复制数据链路层和物理层的所有组件(LL/IFq/MAC/NetIF/Channel 等)的方式来实现 MIMC, 不同的是: 这些组件连接到一个路由代理(RoutingAgent)上, 由其在路由算法中实现信道与接口的分配, 以仿真具有 MIMC 功能的路由协议。如图 2 所示, Ramon 模型具备了多组并行的 MIMC 相关组件, 并提供相关的 Tcl 脚本配置过程, 以便研究人员灵活地使用变量来记录信道数量和动态地生成网络接口。

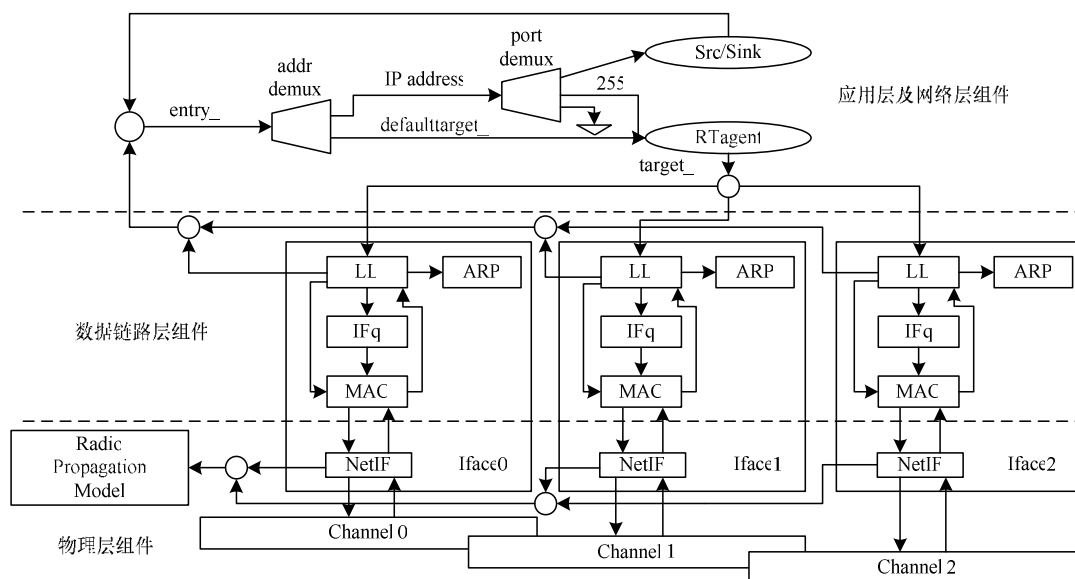


图2 Ramon 模型

虽然 Ramon 的接口与信道分配方式仍是固定的,不能满足需要在接口间进行信道切换的动态分配路由协议,也不能实现基于 MAC 的多信道协议的仿真,但其 MIMC 实现方式具有良好的可扩展性和灵活的参数配置能力,加之对网络层部分动态路由协议的支持,使其成为现有 MIMC 扩展的主流模型,目前的很多相关研究都是直接利用或扩展 Ramon 模型而来,且原型设计者 Ramom 在其网站上仍然提供最新修正版模型的技术文档(ucMultiIfaceSupport.pdf)下载,以便研究人员参考,从而得到更广泛的应用。

2.2.2 基于通用组件模型的 MIMC 扩展

该类扩展主要为使用者提供了一个仿真功能可定制的仿真框架,以满足不同仿真用户的需求,其经典的代表有:

(1) MW-Node 模型

与上述基于 MobileNode 模型进行 MIMC 扩展不同, MW-Node 模型^[13]采用一种可定制的、基于功能模块的通用网络层框架结构,并与现有 NS(2.30/34)的 Node 模型进行了有效的集成(而非扩展现有的 Node 模型),其主要目标是为了适应无线(移动)网络(如 WMNs、WSNs 等)所具有的多接口多信道、多路径路由等多样性特点的仿真要求,为节点提供可自行注册(或注销)的功能模块(如移动模块、能量

模块、转发策略管理模块、网络层管理模块等),为满足节点在不同类型的低层接口上实现各种路由、转发协议提供一个通用的实现框架。具体模型如图 3 所示。节点可以配置一个独立的带有转发策略管理组件(Manager Forwarding Policy)的网络层管理模块,结合邻居信息库(Neighbour Information Base, NIB)和转发信息库(Forwarding Information Base, FIB)相关信息来处理本地数据的产生和邻居数据的接收;同时网络层管理模块还可以结合网络信息库(Network Information Base, 用于存放网络中数据的路由/转发信息),通过配置一个或多个网络层单元(Network Layer Unit, 用于在一个或多个相同或不同类型的物理接口上实现路由/转发协议的相关操作)来处理数据路由与转发,而每个网络层单元模块又可以配置一个或多个网络接口模块(NetworkInterface2, 用于实现一个或多个有线/无线链路的仿真,如 WirelessInterface 和 PointToPoint NetworkInterface)来共同完成网络的多跳、多接口多信道和多路径选择的数据传输。由于 MW-Node 通用模型的实现没有改变现有 NS 的节点模型结构,因此具有很好的兼容性;同时,模型所提供的一组可与现有节点灵活集成功能模块使得 NS 仿真具有了更好的可扩展性,提高了 NS 仿真的通用性。

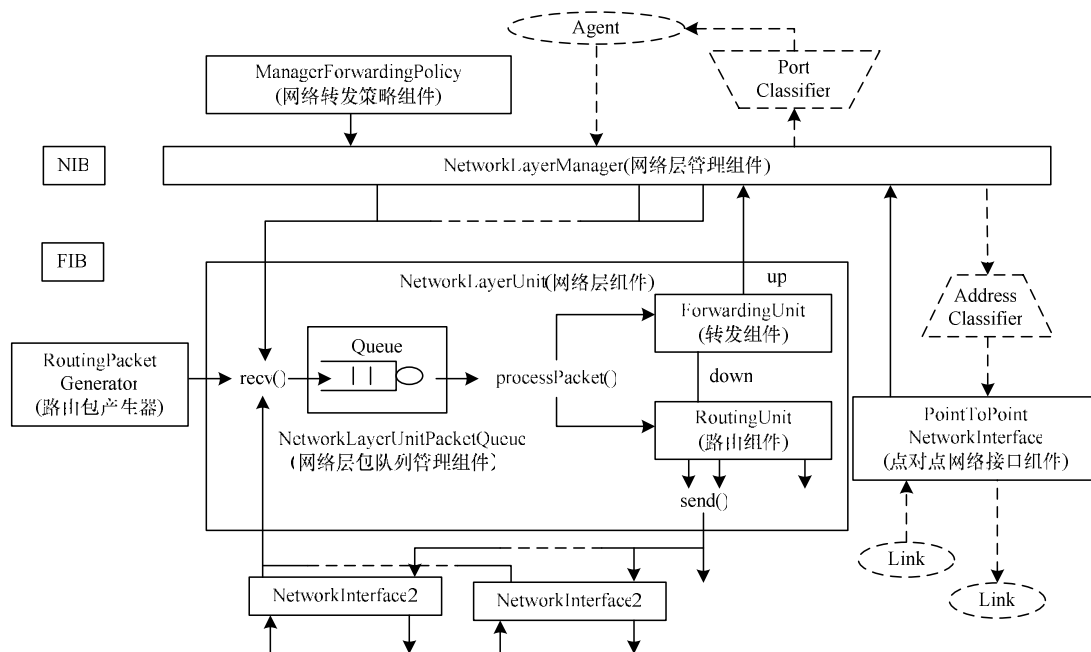


图3 MW-Node 模型

(2) CRCN^[14]模型

该模型主要针对认知无线网络(Cognitive Radio Network, CRN)的仿真需求(如频谱环境和节点能力的感知、物理层行为的及时响应——信道的改变、接口的切换、发射功率的改变等)而在现有 NS2.31 版本的基础上进行的多信道扩展。目前该模型提供 SIMC 和 MIMC(接口数与信道数相等/不等 2 种方式)两大类型的多信道仿真及相关的 CR 算法,可为路由层和 MAC 层协议提供动态频谱访问、信道利用率及干扰等各种相关历史及当前信息,以进行相应的

自适应配置;研究人员也可用自己设计的相关算法及路由/MAC 层协议取代相关的组件来检验其性能,其仿真框架如图 4 所示。同时该模型还提供了一个 GUI 工具来设置仿真的相关参数(如接口数、信道数、信道选择决定层:路由/MAC 等)和性能仿真结果数据的自动绘制程序(如平均吞吐量曲线图的绘制)。由于 NS2 已经具有了很多优秀的无线模型(如 802.11x/16/15.x 等)和拓扑、流量产生器等工具,因此研究人员可以充分利用该模型对多种 MIMC 无线网络进行有效的 NS 仿真。

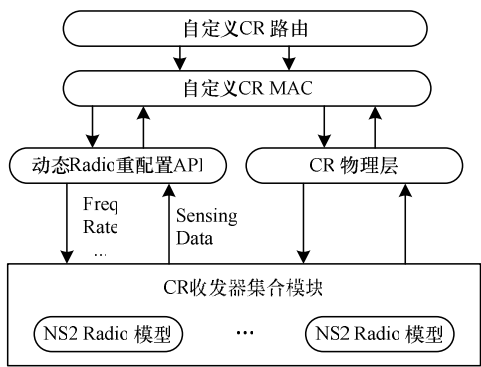


图 4 CRCN 仿真模型

3 MIMC 模型对比分析

目前基于 NS-2 的 MIMC 扩展研究已经有了很多研究成果, 这些成果从路由层/MAC 层、动态/静态配置、通用性等不同角度进行了有效的研究, 对上述代表性研究成果在不同方面的功能进行对比分析如表 1 所示。

以上分析说明, 基于通用组件模型的 MIMC 仿真扩展能更好地实现多信道多接口的相关功能(如信道接口数的定制、分配策略的灵活配置、跨层信息交换等用户仿真需求), 且支持高版 NS-2 的仿真扩展, 有利于用户将最新版 NS-2 的其他仿真模块进行融合, 以实现更多领域的仿真实验。

表 1 模型对比分析

模型类别	代表模型	NS2 版本	接口数量	信道数量	接口信道分配方式	信道分配决策层	通用性
基于 Mobile Node 模型	TeNS	2.1b9a	可定制	可定制	动态	MAC 层	一般
	Hyacinth	2.1b9/26/29	不可定制	不可定制	静态	路由层	较差
	Roman	2.29/2.3x	可定制	可定制	静态	路由层	较好
基于通用组件模型	MW-Node	2.30/2.34	可定制	可定制	动态	路由/MAC 层	较好
	CRCN	2.31	可定制	可定制	动态	路由/MAC 层	较好

4 结束语

本文分析现有 NS-2 网络仿真软件的无线接口及信道仿真功能, 针对现有 NS-2 在多信道多接口仿真功能支持方面的不足, 从传统 MoblieNode 模型扩展和通用对象模型扩展 2 个角度, 对比分析了现有 NS-2 环境下 MIMC 扩展功能模型的结构特性、优缺点及其应用特性。分析结果表明, 各种扩展模型能从网络低层较好地实现 MIMC 的相关功能(如信道利用率的计算、干扰的测量等), 完善了 NS-2 的无线网络仿真功能, 但缺少相关的分配算法及其上层(如应用层)调用接口, 不便于在应用层设置相关的 MIMC 参数及相关分配策略, 因此, 在进一步的研究中, 可以考虑将现有主流的分配算法加入已有模型中, 并提供相应的调用接口, 以提供不同层面的 MIMC 功能实现。

参考文献

[1] Chakchouk N, Hamdaoui B. Traffic and Interference Aware Scheduling for Multiradio Multichannel Wireless Mesh Networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(2): 555-565.

[2] Mohsenian-Rad A H, Wong V W S. Distributed Multi-interface Multichannel Random Access Using Convex Optimization[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2011, 10(1): 67-80.

[3] Ronasi K, Mohsenian-Rad A H, Gopalakrishnan V, et al. Delay-throughput Enhancement in Wireless Networks with Multipath Routing and Channel Coding[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(3): 1116-1123.

[4] 彭立阳, 周继鹏. MANET 中有利于信道重用的按需信道分配和路由协议[J]. 计算机应用, 2001, 31(2): 328-

331.

[5] UC Berkeley. The NS Manual[EB/OL]. (2011-11-04). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.

[6] Carneiro G. NS3[EB/OL]. (2010-04-20). <http://www.nsnam.org/documentation/presentations/>.

[7] Raman B. The Enhanced Network Simulator[EB/OL]. (2006-04-14). <http://www.cse.iitk.ac.in/users/braman/tens/>.

[8] Raniwala A. Hyacinth: An IEEE 802. 11-based Multi-channel Wireless Mesh Network[EB/OL]. (2004-11-12). <http://www.ecsl.cs.sunysb.edu/multichannel/>.

[9] Chereddi C, Kyasanur P, Vaidya N H. Design and Implementation of a Multi-channel Multi-interface Network[C]// Proceedings of ACM REALMAN'06. Florence, Italy: ACM Press, 2006: 23-30.

[10] Wang Dapeng. Make "Hyacinth" Run on Debian NS-2.29.2[EB/OL]. (2006-03-01). <http://my.opera.com/HenryFD/blog/show.dml/202861>.

[11] Wang Bo. NS2 Notebook: Mufti-channel Mufti-interface Simulation in NS2(2.29)[EB/OL]. (2005-08-08). <http://www.cse.msu.edu/~wangbol/ns2/nshowto8.html>.

[12] Ramon. Adding Multiple Interface Support in NS-2[EB/OL]. (2007-01-01). <http://personales.unican.es/aguero/r/>.

[13] Paquereau L, Helvik B E. A Module-based Wireless Node for ns-2[C]//Proceedings of the 1st Workshop on NS2: the IP Network Simulator(WNS2). Pisa, Italy: [s. n.], 2006.

[14] Zhong Jing, Li Jialiang. Cognitive Radio Cognitive Network Simulator[EB/OL]. (2006-08-10). <http://www.ece.mtu.edu/~ljialian/index.htm>.