

# 宽带无线网络系统级仿真分析

杨育波 蒋海平 石晶林 张小东

**摘要** 本文首先分析了无线网络的系统级仿真方法,主要包括无线链路仿真和协议栈仿真,然后对无线链路的建模和仿真进行了综述,并对主流的无线网络系统级仿真软件进行了介绍和对比分析。最后本文重点阐述了中科院计算技术研究所下一代互联网研究中心与上海无线通信研究中心联合研制的 IEEE 802.16e 系统仿真平台,特别是该系统的仿真实现机制。

**关键词** 网络仿真, 系统仿真, IEEE 802.16e, 无线网络, 无线信道建模

## 1 引言

在无线网络技术迅速发展的今天,研究人员一方面要不断思考新的网络协议和算法,为网络发展做前瞻性的基础研究;另一方面也要研究如何利用和整合现有的网络资源,使网络达到更好的性能。无论哪一方面的研究都需要对新的网络方案进行验证和分析。网络技术的研究手段大体有三种:分析方法、实验方法和模拟仿真方法。前两种方法都存在很大的局限性。分析方法受制于假设条件,尤其当系统复杂时,无法进行详细描述,有效性和精确性也得不到保证;实验方法受制于成本和灵活性,试验床的规模不容易做大,很难实现多种通信流量和拓扑的融合。而仿真模拟方法恰好可以弥补前两种方法的不足。网络仿真可以根据需要设计网络模型,用相对较少的时间和费用分析在不同条件下网络的各种特性,获得网络研究的大量有效数据。网络仿真提供了一个方便、高效的验证和分析方法,因此在现代通信网络设计和研究中的作用正变得越来越重要。

无线信道建模是无线网络仿真的关键,影响仿真的精确性。但是对于某些无线信道建模和仿真一直是系统仿真的难题,特别是最近发展的无线技术,比如OFDM<sup>1</sup>、MIMO<sup>2</sup>等。在系统级仿真中,链路仿真与协议栈结合比较难以解决,特别是在多小区、多种移动模型时,这是因为在这种情况下链路仿真计算周期比较长,数据量特别大,难以应用于系统级仿真,所以至今还没有完整的IEEE 802.16e仿真平台。本文将详细阐述中科院计算所在 2006 年完成的IEEE 802.16e仿真平台系统架构和仿真机制:本文第二部分主要介绍当前的无线信道建模;第三部分分析当前主流的网络仿真软件;第四部分重点介绍中科院计算所下一代互联网研究中心和上海无线通信研究中心完成的IEEE 802.16e仿真平台。最后做出总结。

## 2 无线信道建模

相比于其他信道,无线信道的稳定性较差。由于电波在无线信道传输时,在时域和空域上都会有较大的随机性波动和起伏,造成较大的路径衰落和损耗,同时还可能会产生随时变化的多径衰落和阴影效应。无线信道特性还会随着工作频率、传播方式(如视线无线链路、散射、绕射、卫星链路等)的变化而变化。

现有的传播模型主要有 3 类:统计性模型(经验模型)、半经验或半确定性模型和确定性模型。统计性模型(经验模型)是根据大量的测量结果统计分析后得出的图表和公式。确定性模型是对具体的现场环境直接应用电磁理论计算的方法。半经验或半确定性模型是基于把确

<sup>1</sup> Orthogonal Frequency Division Multiplexing, 正交频分多路复用

<sup>2</sup> Multiple Input Multiple Output, 多输入多输出(天线)

定性方法用于一般的市区或室内环境中导出的公式，有时为改善它们和实验结果的一致性，则根据实验结果对公式进行修正。现有的预测模型如表 1，可以根据仿真的目的和场景进行选择。

宏小区			微小区	室内经验模型
经验模型	半经验模型	其他模型		
Okumura-Hata	Ikegami	Anderson <sup>a</sup>	双射线	对数距离路径损耗模型
COST231-Hata	Walfish & Bertoni	Zhang <sup>a</sup>	多射线	衰减因子模型
Lee	Xie & Bertoni	Saunders <sup>b</sup>	多缝隙波导	Keenan-Motley 模型
Ibrahim & Parsons	COST231-Walfish-Ikegami	Bonar <sup>b</sup>	Lund 大学模型	软隔墙和混凝土墙衰减因子模型
McGeehan & Griffiths				多层墙模型 <sup>c</sup>
Atefi & Parsons				
Sakagami Kuboi				

注：a 为基于多次绕射的UTD<sup>3</sup>模式 b 为物理光学表达式 c 为对墙的多次GTD<sup>4</sup>反射+拐角处UTD绕射+地面GTD反射

表 1 无线信道预测模型

2.1 宏小区的路径损耗预测模型

1. Okumura-Hata 模型

Okumura-Hata模型可能是应用最简单，且可以区分人造建筑物的模型。该模型的经验数据是Okumura在东京测量整理的。Okumura-Hata模型是以载频  $150\text{MHz} \leq f_c \leq 1000\text{MHz}$ ，基站天线高度  $30\text{m} \leq h_b \leq 200\text{m}$ ，移动台天线高度  $1\text{m} \leq h_m \leq 10\text{m}$ ，基站和移动台间的距离  $1\text{km} \leq d \leq 20\text{km}$ 为基准条件得到的。该模型已在全世界范围内得到了广泛应用,为大多数人所熟知。

2. Lee 的区域到区域模型

Lee 的区域到区域模型用来预测平坦地形的路径损耗。如果实际地形不平坦，就会有很大的预测误差，Lee 的区域到区域模型需要两个参数：在 1.6km 拦截点上的功率和路径损耗指数。

2.2 室外微小区的路径损耗预测模型

1. COST231-Walfish-Ikegami 模型

COST231-Walfish-Ikegami模型是将视线和非实现传播分开来讨论。该模型对于载频范围  $800\text{MHz} \leq f_c \leq 2000\text{MHz}$ ，路径距离范围为  $0.02\text{km} \leq d \leq 5\text{km}$ 的情况是很准确的。

2. 双斜率模型

对于范围小于 500m 且天线低于 20m 的范围内，一些经验测量表明，沿城市街道视线传播电波的接收信号强度可以通过双斜率模型来描述。

3. 经验街道路径损耗模型

经验街道路径损耗模型假设在移动台没有到达街道拐角时都为视线传播。绕过街道拐角的非视线传播可以利用一个假设的发送端的视线传播模拟得到，该假设的发送端位于街道拐角处，它的发送功率和在该点所接收到的服务基站功率相等。

<sup>3</sup> Uniform theory of diffraction，一致性绕射理论  
<sup>4</sup> Geometrical Theory of Diffraction，几何绕射理论

#### 4. Turin 模型

该模型是一个基于实验结果的城市多径传播的统计模型。它说明超时延服从泊松分布，多径延迟扩展几乎完全取决于接收机周围的环境，而与收发机间的距离无关。

### 2.3 室内微小区的路径损耗预测模型

Saleh 和 Valenzuela 模型。Saleh 和 Valenzuela 对位于同层的办公大楼内 2 个垂直极化的全向天线收发机的情况进行了实地测量，结果表明在没有视距传输的情况下信道的冲激响应与收发天线的极化型式无关。此模型假设多径分量以多径簇的形式到达接收机，且服从泊松到达过程。

## 3 网络仿真软件

目前的网络仿真软件有很多种，有商用软件，提供了全面的建模和协议支持，但不开放；也有科研软件，虽在功能和界面上不如商用软件完善，但具有开放性。以下主要介绍几种常用的仿真软件，其中包括目前应用最为广泛的 OPNET 和 NS2。

### 3.1 OPNET 仿真软件

OPNET 最早是在 1986 年由麻省理工大学的两个博士创建的，1987 年发布了第一个商业化的网络性能仿真软件 Modeler，使得具有预测性的网络性能管理和仿真成为可能。

OPNET 的 Modeler 是专门用于可视化原型设计的软件，它的使用既方便了网络模型的建立，又减少了编程的工作量。Modeler 中提供多种编辑器帮助用户完成网络建模和仿真运行，包括网络编辑器(Network Editor)、节点编辑器(Node Editor)、进程编辑器(Process Editor)和分组格式编辑器(Packet Format Editor)。此外，OPNET 还提供了交互式的运行调试工具、功能强大的结果分析器和能够实时观察模型动态行为的动态观察器。用户可以在运行前设定运行中使用的参数，并且能随时中断运行。结果分析器用图形的方式显示仿真软件过程中得到的统计数据，还能将多次仿真的结果进行比较，为用户的决策提供有力的依据。

Modeler采用面向对象和阶层性的模拟方式。从协议间关系看，节点模型建模完全符合 OSI标准：业务层→TCP<sup>5</sup>层→IP<sup>6</sup>层→IP封装层→ARP层→MAC层→物理层。从网络物件层次关系看，提供了三层建模机制，最底层为进程模型，以状态机来描述协议；其次为节点模型，有相应的协议模型构成；最上层为网络模型。

Modeler 的仿真机制，可以从三个层次进行概括和描述：

1. 三层建模机制：Modeler 提供了网络层、节点层和进程层的三层建模机制，使得建模更加有条理，大大加快了研发速度。如图 1。
2. 事件驱动的仿真机制：采用离散时间驱动的模拟原理。
3. 基于包的通信机制：Modeler 中最重要的实体就是包，是为支持基于信息源通信而定义的数据结构。通过包在仿真模型中的传递来模拟实际物理网络中数据包的流动和节点设备内部的处理过程。包还可以用作模型中各个模块之间控制接口信息的描述方法。在建模中，可以根据需要生成、编辑各种格式的包。

---

<sup>5</sup> Transmission Control Protocol, 传输控制协议

<sup>6</sup> Internet Protocol, 互联网协议

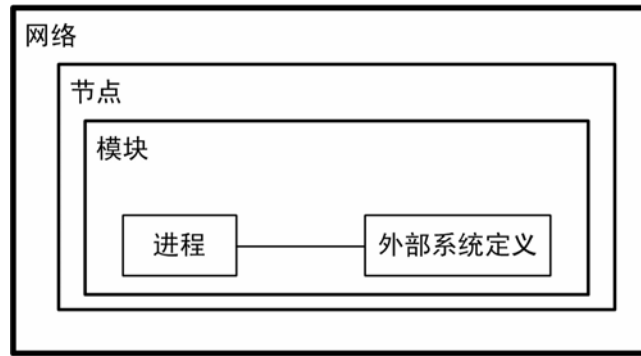


图 1 OPNET 建模机制框架图

### 3.2 NS2 仿真软件

NS2 (Network Simulator 2) 是一种无版权的用于网络研究的离散事件仿真器。NS2 为有线、无线网络上的TCP、路由、数据链路、组播协议以及网络服务质量 (QoS<sup>7</sup>)、各种队列等的仿真提供大量的支持,同时也提供了跟踪和显示仿真结果、网络拓扑生成等很多工具。

NS2 采用事件驱动的方式,事件调度是它的一个重要部件。事件是一种包,包中有独特的标号、启动时间和一个指针指向处理事件的对象。时间调度器负责监视仿真时间,在事件队列中的时间定义和响应时间启动这个事件,调用负责处理该事件的对象。

NS2 采用面向对象技术,由 C++和 Otcl 语言写成。NS2 将数据路径实现和控制路径实现分离,保证了可扩充性和重用性,提高了程序开发效率。对象的属性能够很容易地配置,每个对象属于相应的行为、功能和类。类可以继承其他类,也可以通过 C++定义新的类来满足用户自己特定的需求。

NS2 的模拟也分为两个层次:一个是基于 Otcl 编程层次,利用 NS 已有的网络元素实现模拟,无需对 NS 本身进行修改,只要编写 Otcl 脚本;另一个层基于 C++和 Otcl 编程的层次,如果没有所需的网络元素,就需要首先对 NS 进行扩展,添加所需要的网络元素,然后再编写 Otcl 脚本,整个模拟过程如图 2 所示。

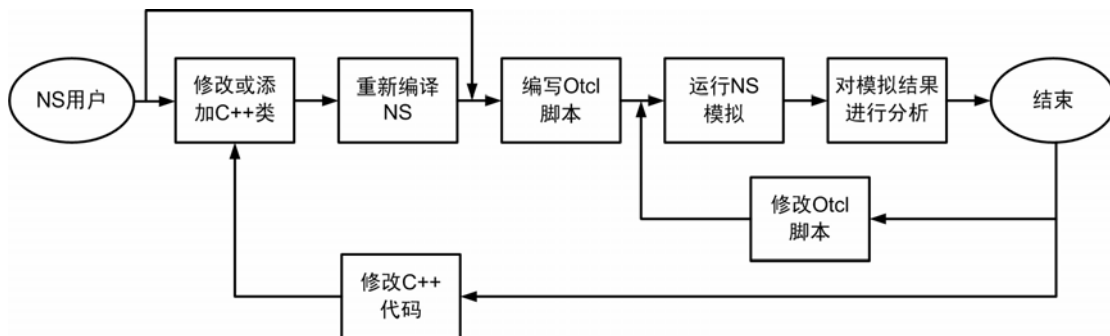


图2 利用NS进行网络模拟的过程

### 3.3 其他网络仿真软件及其对比分析

BONeS 是一种通用的面向图形的仿真语言,包括若干用于建立通信网络模型的功能,适用于无线通信、多媒体、网络、计算机体系结构以及其他电子系统。BONeS 软件包括两个软件包: BONeS DESIGNER 和 BONeS Satlab。BONeS DESIGNER 面向网络设计, BONeS Satlab 面向卫星通信设计。

COMNET III 是一种面向目标的局域网和广域网仿真器。它适用于从简单局域网到复杂企业级网络系统的性能分析和评估。

<sup>7</sup> Quality of Service

SSFNet 是一个 Internet 网络及其协议的模拟和建模环境，由基于 JAVA SSF（Scalable Simulation Framework）的组件构成，主要支持 IP 包级别上的细粒度模拟，其中链路层和物理层的协议模型以独立的组件方式提供。

表 2 对各种应用软件的各个方面进行了比较和分析，研究者可以选择适合自己的应用软件。

项目	OPNET	NS2	BONeS	COMNETIII	SSFNet
建模方式	面向对象	面向对象	面向对象	面向对象	面向对象
驱动方式	事件驱动	事件驱动	事件驱动	事件驱动	事件驱动
建模环境	图形化	命令符	图形化	图形化	命令符
模型扩展	修改已有模型或使用 C/C++ 语言编制	使用 C/C++ 语言编制新模型	使用 C/C++ 语言编制新模型	修改已有模型或购买新模型	使用 DML 配置
动态观察模拟过程	支持	支持	支持	支持	不支持
结果输出	结果分析器输出	图形显示器输出和标准输出报告	使用后处理器输出	产生标准输出报告	图形显示
适用范围	几乎所有的网络和网络技术	主要面向网络协议	无线通信 / 多媒体 / 网络 / 计算机体系结构	从简单的局域网到复杂的企业级网络系统	主要支持 IP 分组级别上的细粒度模型
运行环境	WinNT/2000/ Unix/solaris/ hp-ux	Unix/Linux/ Win9x/NT	HP-UX/SUN OS	Win95/NT /Solaris/HP-UX	WinNT/Solaris /Unix/Linux

表 2 各个应用软件的特性分析

## 4 IEEE 802.16e 仿真平台

### 4.1 IEEE 802.16e 标准介绍

20 世纪 90 年代，宽带无线接入技术得到了快速发展，主要产品有本地多点传输系统（LMDS<sup>8</sup>）和微波多信道多点传输系统（MMDS<sup>9</sup>），定位于家庭宽带、中小企业、城市商业中心等用户，尤其是中小企业和城市人口密集的高楼商业区应用的成本效益明显。为了制定统一的全球性宽带无线接入标准，1999 年 IEEE 成立了 IEEE 802.16 工作组，并最终于 2004 年完成了 IEEE 802.16 标准。IEEE 802.16e<sup>[8]</sup>标准是工作在 2~6GHz 频段支持移动性的宽带无线接入空中接口标准，目的是为了制定既能提供高速宽带数据业务又能提供移动性的无线宽带接入解决方案，被视为与 3G 竞争的下一代宽带无线技术。

IEEE 802.16e 标准描述了一个移动宽带无线接入系统的空中接口，包括媒体接入控制层（MAC，Media Access Control）层和物理层（PHY）两大部分。MAC 层可以支持多种物理层规范，以适合多种应用环境。IEEE 802.16e 协议栈框架如图 3 所示。

<sup>8</sup> Local Multipoint Distribute Service

<sup>9</sup> Multichannel Microwave Distribution System

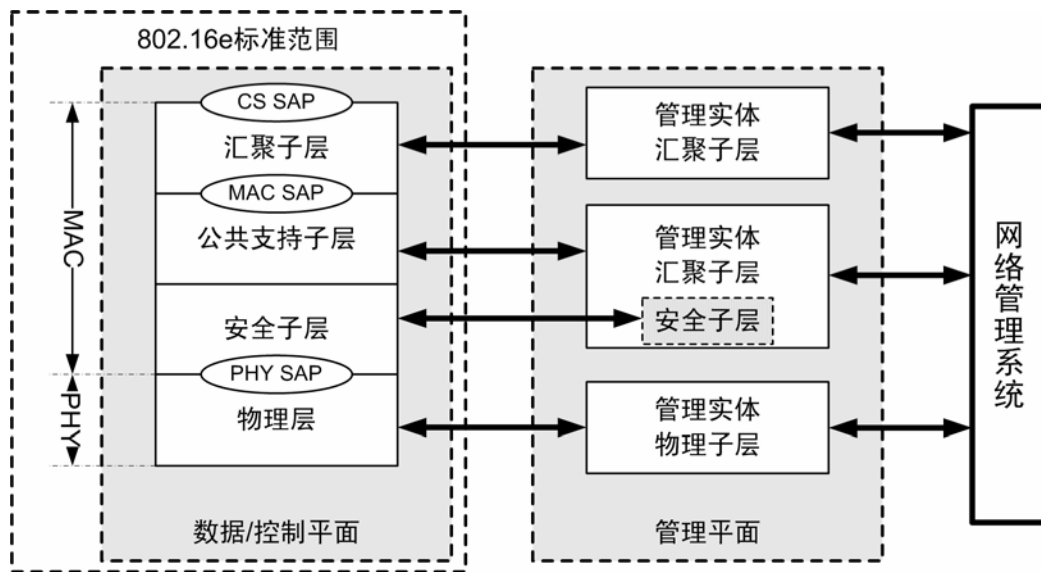


图 3 IEEE 802.16e 协议栈框架

MAC 层分为会聚子层、公共支持子层、安全子层。会聚子层提供上层业务数据和服务流的对应、数据包头压缩等功能。公共支持子层是 MAC 的核心，功能包括系统接入、带宽分配、服务流连接建立和连接维护、移动切换支持等。加密子层主要提供认证、密钥交换和加解密处理等功能。

IEEE 802.16e 仿真模块是研究该协议的重要工具，但是目前还没有提供完整功能的仿真模块，因此，在现有仿真工具基础上，我们开发了 802.16e 仿真平台。

## 4.2 仿真平台总体结构

802.16e 仿真平台总体结构如图 4 所示，由协议栈、中间结果汇集程序、链路仿真程序三部分组成。

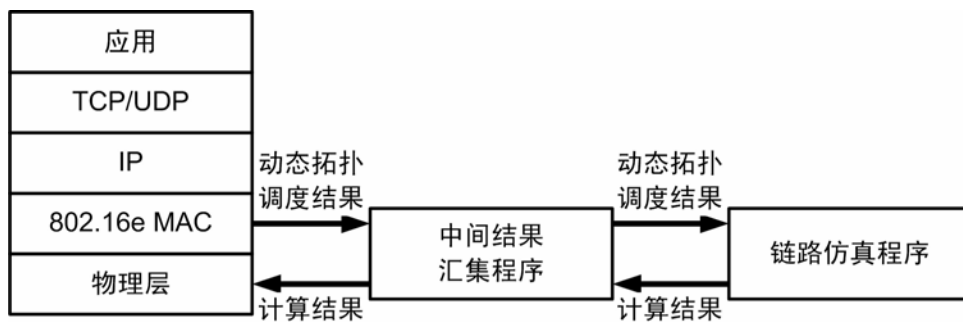


图 4 802.16e 仿真平台总体结构

协议栈由自主开发的 IEEE 802.16e MAC 和物理层以及仿真工具原有的协议栈共同组成。MAC 以及以上各层用来仿真网络设备各协议栈功能，物理层用来获得链路仿真程序的计算结果数据包发送/接收时的物理信道参数。链路仿真程序利用 MAC 层获得的网络动态拓扑和调度器的调度结果进行计算，求出所有基站（BS）和移动站（MS）间的信道信号噪声比（SNR）。中间结果汇集程序对协议栈和链路仿真程序间交互的数据进行缓存。在仿真过程中，MAC 层程序首先获得自己的位置信息，然后通过中间结果汇集程序反馈到链路仿真程序中，随后在本帧的末尾时间进行下一帧的调度过程，在调度完成后通过中间结果汇集程序输入到链路仿真程序中。链路仿真程序在获得完整的动态拓扑和计算结果后，根据设置

好的信道模型以及各节点收发包的时频资源进行计算，求出各节点间信道质量参数（SNR等）。在下一帧数据包进行发送时，物理层向中间结果汇集程序请求链路仿真的结果，利用这些计算结果以及调制编码方式即可计算该数据包是丢弃还是接收。

### 4.3 链路仿真

在IEEE 802.16 协议族中定义了SUI<sup>10</sup>信道仿真模型<sup>[10]</sup>，但是目前比较通用的是 3GPP的SCME链路仿真信道模型<sup>[9]</sup>，因此在我们的 16e仿真平台中采用SCME的信道模型。因为链路仿真程序是一个独立的程序，因此可以快速地更改其中的信道模型与仿真算法。

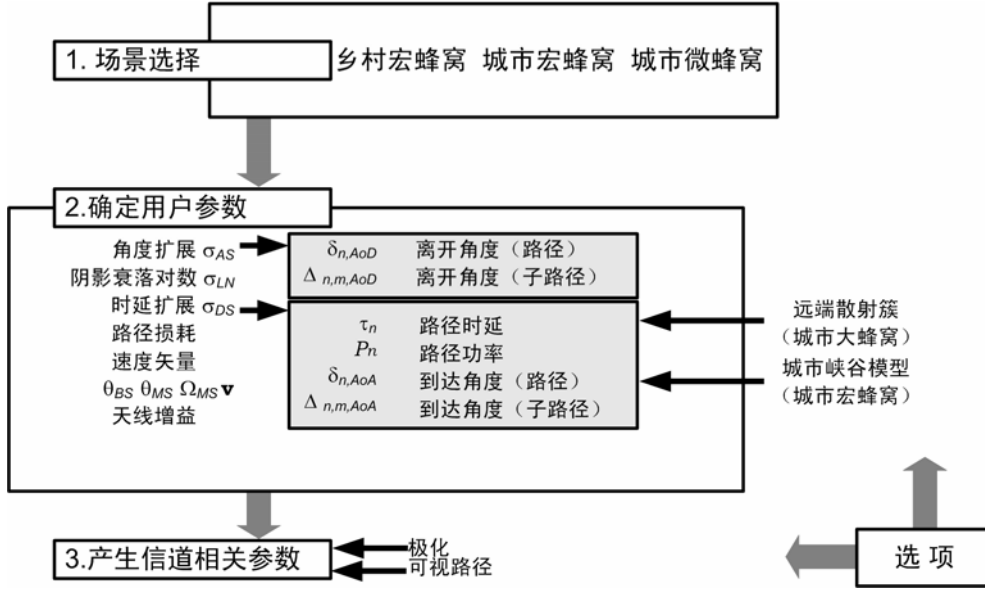


图 5 SCME 定义的仿真步骤

3GPP SCME 是为系统仿真和链路仿真而定义开发的，它是与空间信道模型相关的一系列参数和算法，详细定义了进行仿真的参数选择和步骤。SCME 定义的仿真步骤如图 5 所示。SCME 空间信道模型仿真共有以下步骤：场景选择、确定用户参数、产生信道系数矩阵、利用信道系数矩阵计算 SNR。

场景选择中，SCME 提供了乡村宏蜂窝、城市宏蜂窝和城市微蜂窝三种场景。宏蜂窝场景中基站间距离一般是 3 千米，微蜂窝场景中基站间距离是 1 千米左右。不同的场景具有不同的环境参数，包括多径效应参数、角扩散特性、时延扩散特性、路径损耗模型。宏蜂窝中的路径损耗模型采用改进的 COST231-Hata 传播模型，微蜂窝中的路径损耗模型采用 COST231-Walfish-Ikegami 非视距模型和街道峡谷模型。

在确定场景后，用户参数就可以根据场景进行选择。根据场景设置，基站和无线台之间的信道分为  $N$  条路径，每条路径又分为  $M$  条子径，从而可以精确地刻画多径效应。根据网络拓扑可以得到基站和无线台之间的距离、角度，利用环境参数中角度扩散特性和时延扩散特性随机产生每条路径中每条子径的角度扩散和时延扩散，以及每条路径中每条子径上的接收功率。在产生所有的用户参数后，可以利用下式产生信道系数矩阵  $\mathbf{H}_n(t)$ ：

<sup>10</sup> Stanford University Interim

$$h_{u,s,n}(t) = \sqrt{\frac{P_n \sigma_{SF}}{M}} \sum_{m=1}^M \left\{ \sqrt{G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})} \exp(j[kd_s \sin(\theta_{n,m,AoD})]) \times \right. \\ \left. \sqrt{G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})} \exp(jkd_u \sin(\theta_{n,m,AoA})) \times \right. \\ \left. \exp(jk\|v\| \cos(\theta_{n,m,AoA} - \theta_v)t) \right\}$$

其中  $P_n$  是第  $n$  个路径的功率， $\sigma_{SF}$  是阴影衰落参数， $M$  是子径的数目， $\theta_{n,m,AoD}$ 、 $\theta_{n,m,AoA}$  是第  $n$  条路径第  $m$  条子径的角度， $G_{BS}(\theta_{n,m,AoD})$ 、 $G_{MS}(\theta_{n,m,AoA})$  是基站、无线台天线增益， $d_s$ 、 $d_u$  是基站、无线台天线间距离， $\Phi_{n,m}$  是第  $n$  条路径第  $m$  条子径相位， $\|v\|$ 、 $\theta_v$  是移动台运动的速度大小和角度。

在计算得出一组信道系数  $H_n(t)$ ，进行傅立叶变换就可以得到频域的信道系数矩阵，利用该信道系数矩阵就可以得到所有基站和无线台之间信道在各个子载波上的信道特性，从而计算出在各个子载波上的信道 SNR 等信道参数。

#### 4.4 MAC 层模块

MAC层模块完成IEEE 802.16e标准MAC层的核心功能，主要分为汇聚模块（CS<sup>11</sup>）、物理层管理模块、核心数据维护模块、服务流管理模块、上行调度模块、下行调度模块、入网初始化模块、移动切换模块、信令处理模块、PDU<sup>12</sup>处理模块、ARQ模块等功能模块，如图6所示。

CS模块主要完成会聚子层功能，进行数据包和服务流的匹配，数据包头的压缩，根据需要发起建立、修改、删除服务流的操作，并激活服务流管理模块进行相应操作，与IP层模块的衔接。物理层管理模块根据PDU处理模块发来的PDU包和分配的时频资源打包成帧，根据调制编码方式计算物理层开销，发送到物理层，并对收到的物理层帧重新组合成PDU包发送到其他模块。核心数据维护模块主要维护核心数据结果，包括服务流与连接的信息、各服务流参数集、各移动台的状态信息、信道参数等信息，并提供其他模块查询、更新的接口。服务流管理模块处理来自本地、对端的服务流相关信令，并为各连接和服务流分配CID<sup>13</sup>、SFID<sup>14</sup>，维护各服务流与连接的状态机信息。上行调度模块进行上行调度操作，根据各个移动台信道信息、各移动台的带宽请求信息、各连接信息、PDU队列信息等进行上行资源的分配和调度，最终产生上行帧信道分配消息（UL-MAP）。下行调度模块进行下行调度操作，根据各个移动台信道信息、各连接信息、PDU队列信息等进行下行资源的分配和调度，最终产生下行帧信道分配消息（DL-MAP）。入网初始化模块完成仿真开始时各个模块的初始化，移动台入网时的信令交互和处理操作，竞争接入的处理等功能，以及进行初始测距、能力协商等入网功能。移动切换模块实现移动台的移动切换功能，处理和切换相关的信令，实现切换相关的算法，根据移动台的状态判断是否扫描、扫描类型、是否切换、切换类型，协调各个模块在移动台切换后的环境删除和重建。信令处理模块完成除专门模块处理的信令之外的其他信令的处理和生成，主要包括周期测距、DL-MAP、UL-MAP、UCD<sup>15</sup>、DCD<sup>16</sup>、信道

<sup>11</sup> Convergence Sublayer

<sup>12</sup> Protocol Data Unit, 协议数据单元

<sup>13</sup> Connection Identifier, 连接标识符

<sup>14</sup> service flow identifier, 业务流标识

<sup>15</sup> Uplink Channel Descriptor上行信道描述信息

<sup>16</sup> Downlink Channel Descriptor下行信道描述信息



质量信息的反馈等信令的生成和处理。PDU处理模块主要完成构建PDU包，解PDU包并生成SDU，配合ARQ<sup>17</sup>模块完成ARQ等功能，同时对未发送PDU包进行排队。ARQ模块完成对ARQ相关信令的处理和生成，进行数据包的自动重传等功能。

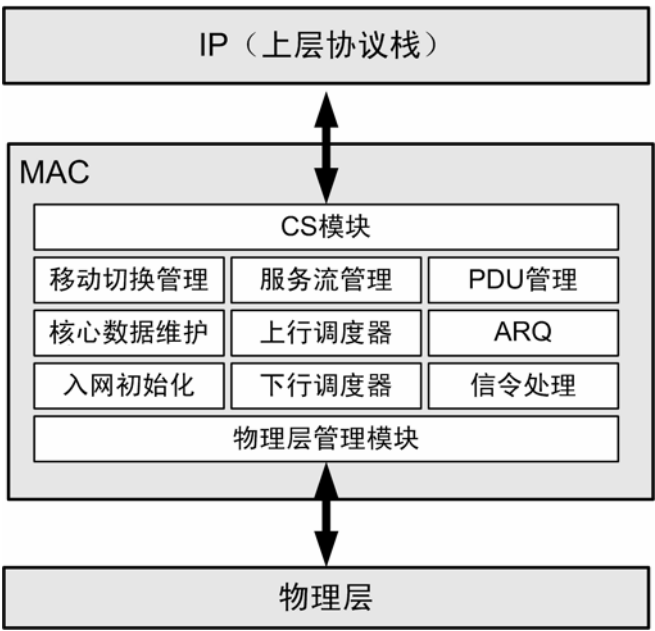


图 6 MAC 层核心功能模块

在开发的 IEEE 802.16e 仿真平台上，我们可以进行下面相关的研究：

1. ARQ 算法研究及性能评估；
2. HARQ<sup>18</sup>算法研究及性能评估；
3. 单小区带宽分配算法研究及性能评估；
4. 单小区分组调度算法及性能评估；
5. 单小区业务接纳控制算法及性能评估；
6. 竞争接入机制的参数优化及性能评估；
7. 自适应调制编码选择算法及性能评估；
8. 开环或闭环功率控制算法研究；
9. 测距过程中的信道参数调整算法研究；
10. 移动切换算法研究及性能评估；
11. 小区间联合调度算法研究；
12. 小区间负载均衡算法研究；
13. 小区间干扰协调算法研究。

#### 4.5 实现场景

IEEE 802.16e 仿真平台可以支持多小区、多种移动模型和多种业务模型的场景仿真，可以支持单小区分为三个扇区，支持小区间移动切换等 802.16e 特殊功能。场景拓扑如图 7 所示，其中，多个基站(BS0、BS1……)组成多个小区，每个小区分布有移动台(MS0、MS1……)，基站之间由路由器(Router0、Router1……)连接。路由器和右下角的有线网共同组成核心网，多个 BS 组成接入网，向移动台提供宽带接入服务。

<sup>17</sup> Automatic Repeat Request 自动重传请求

<sup>18</sup> Hybrid Automatic Repeat Request，混合重传请求

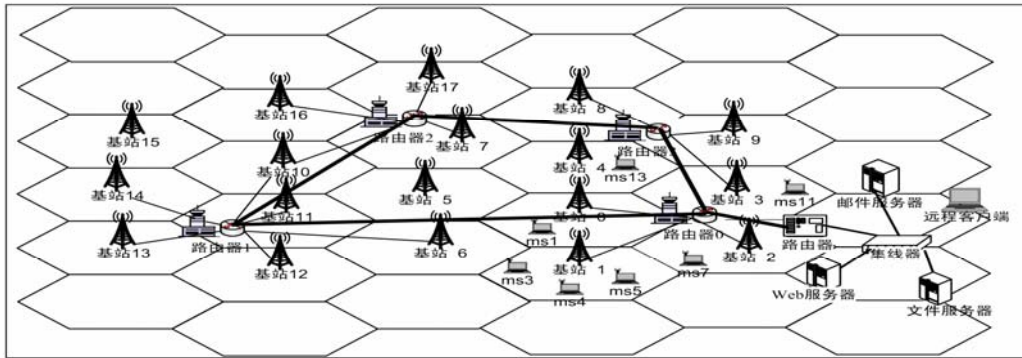


图 7 IEEE802.16e 仿真场景拓扑

## 5 结束语

网络仿真技术，特别是无线网络仿真技术，对于无线网络研究具有非常重要的作用，成为网络研究过程中不可或缺的重要手段。本文首先分析了网络仿真中的重要方法，然后综述了无线网络研究中占有重要地位的无线信道建模，特别是一些重要的信道模型，并分析了一些常用的网络仿真工具软件，尤其是目前主流的 OpNet 和 NS2 软件，并对比了他们的特性以便研究者选择。在此基础上，最后本文详细阐述了中科院计算所下一代互联网研究中心在现有的网络仿真工具之上搭建的 IEEE 802.16e 仿真平台，对整体结构、链路仿真和 MAC 层模块进行了分析，为进一步研究 IEEE 802.16e 各方面性能并进行组网奠定了坚实基础。

## 参考文献

- [1] EURO-COST-231 Revision 2, "Urban transmission loss models for mobile radio in 900 and 1800 MHz bands", Sept. 1991
- [2] V. Erceg et. al, "An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments," IEEE JSAC, Vol. 17, no. 7, July 1999, pp. 1205-1211
- [3] A. Neskovic, N. Neskovic, and G. Paunovic. Modern approaches in modeling of mobile radio systems propagation environment. IEEE Comm. Surveys and Tutorials, Third Quarter 2000.
- [4] OPNET Modeler 10.5 online documentation [ EB/OL ].
- [5] Turin G L, Clapp FF, Johnston TL, et al. A statistical model of urban multipath propagation[ J ]. Transactions on Vehicular Technology, 1972, 21: 1 - 9.
- [6] Saleh AAM , Valemela RL. A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation [ J ]. Journal on Selected Areas in Communications, 1987, 5 (2) : 128 - 137.
- [7] L. Greenstein et al "A New Path-Gain/Delay-Spread Propagation Model for Digital Cellular Channels," IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL. 46, NO.2, May 1997, pp.477-485.
- [8] IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems.
- [9] 3GPP TR25.996 V6.1.0 (2003-09), "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations," Release 6.
- [10] V. Erceg et al "Channel Models for Fixed Wireless Applications", IEEE 802.16. proposal 802.16.3c-01/29, 19.01.2001

作者简介：

**杨育波：** 中国科学院计算技术研究所下一代互联网研究中心 博士

**蒋海平：** 中国科学院计算技术研究所下一代互联网研究中心 客座研究生

**石晶林：** 中国科学院计算技术研究所下一代互联网研究中心主任 博士生导师

**张小东：** 上海无线通信研究中心，研究员，副总工程师