

# 无线网络系统建模综述

傅 韬 黄本雄

(华中科技大学电子与信息工程系 武汉 430074)

**摘 要** 建模是研究无线网络系统的一种重要手段,是仿真实验的基础核心,涉及系统各方面统计特征的模式描述、参数估计、建模算法的优化和各类模型组织等问题。首先简要介绍了常见的无线网络系统,归纳了衡量网络质量的性能指标体系,然后着重分析了反映系统信道、拓扑、流量和协议行为等特征的代表性数学模型,评价了主流仿真工具的优势与不足。最后对当前研究中存在的问题进行了总结,展望了未来发展趋势。

**关键词** 无线网络系统,信道,拓扑,流量,协议行为

**中图分类号** TP393 **文献标识码** A

## Research on the Modeling of Wireless Network System

FU Tao HUANG Ben-xiong

(E. I. Department of Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract** Modeling is one of the most important tools in wireless system research. It's the foundation of simulation experiment, and relates to many fields, such as statistical characteristics modeling, parameters estimation, optimization of the algorithm and organization of all the models. Firstly, this paper summarized the common wireless systems, and introduced the metrics. Secondly, channel, topology, traffic and protocols behavior were researched in details, mainstream tools were evaluated. Finally, existing problems and research trend were analyzed.

**Keywords** Wireless network, Channel, Topology, Traffic, Protocols behavior

无线网络系统建模是对无线网络的信道特征、拓扑结构、业务流量和通信协议进行数学描述,并用相应的软件或工具综合呈现的过程。它是无线系统研究的一种重要手段,是仿真实验的基础,能够使研究者花费较少的人力、财力的情况下获得对所研究的算法、协议或技术的正确评价。21 世纪以来,随着无线通信技术的不断进步和应用领域的不断增多,用户群越来越宽泛,网络结构趋于多样化,通信协议、业务类型和传输流量迅速增长,电波传播的环境复杂多变,这些都给无线网络系统建模的研究带来了挑战和机遇。

无线网络系统建模是一项庞杂的工程,涉及网络各方面统计特征的建模、模型参数估计、建模算法的优化,以及将这些模型以较好的架构组织起来,形成反映真实网络特征且性能优良的仿真工具。无线系统单方面特征研究的相关文献已经有很多,从大、小尺度衰落建模到拓扑控制算法生成、实体和群组随机移动轨迹合成,再到网络流量相关性刻画和通信协议行为分析,以美国宾州州立大学、密苏里大学、普渡大学、贝尔实验室和欧洲科学与技术合作组织(COST)为代表的国外著名高校和机构开展了许多工作,然而对于系统的整体特征归纳及综合性分析工作却相当少;在仿真工具研发方面,美国加州大学 LBNL 国家实验室和 MIL3 公司走在了世界前列。而强调自主知识产权、推进科技创新的我国,却迄今为止没有一款较有影响力的无线网络系统自主仿真工具。

本文首先简要介绍了常见的无线网络系统,对评价网络质量的重要工具——性能指标进行了归类,然后着重研究了描述系统信道、拓扑、流量和协议行为等特征的各类数学模型,并对两款主流的仿真工具——NS2 和 OPNET 的优缺点进行了详细分析,最后给出了总结及发展趋势。希望一方面能够促进现有工具在功能和性能上的完善,另一方面为我国自主开发具有全球先进水平的无线系统仿真工具提供参考。

## 1 无线网络系统概述

无线网络系统是对利用无线电技术进行通信的网络系统的总称。按照网络规模和采用的协议体系,一般将其划分为两大类:蜂窝网络系统和区域网络系统。此外,还有卫星通讯、数字电视广播等一些影响力相对较小的系统。

### 1.1 蜂窝网络系统

蜂窝网络是目前全世界应用最广、用户数最多的一类无线系统,从 20 世纪 70 年代的模拟蜂窝到 GSM、CDMA 系统,再到如今的 3G 网络,无线传输技术和业务架构发生了巨大变化。然而其网络结构却一直相对稳定,分为如下 3 个部分:用户设备(UE)、接入域(RAN)和核心域(CN)。其中 UE 和 RAN 共同构成无线传输部分,负责码元信号的交换和底层信令传输;CN 是有线部分,规范了整个系统的管理控制、业务和应用服务。

到稿日期:2009-09-25 返修日期:2009-12-17 本文受 863 国家重点项目(2007080504),国家自然科学基金(0002014014)资助。

傅 韬(1981-),男,博士生,主要研究方向为无线网络建模及模型应用,E-mail:9566911@qq.com;黄本雄(1966-),男,博士生导师,主要研究方向为下一代移动通信网络、网络建模。

RAN和UE的接口称为Uu,它规范了用户与网络通信的空中接口,是整个蜂窝系统的研究重心,采用了三层协议体系:物理层(L1)、数据链路层(L2)和网络层(L3)。物理层以信道集的方式向上层提供服务;数据链路层分为MAC,RLC,PDCP和BMC子层,分别实现逻辑信道控制、数据检测、分组数据汇聚和广播组播功能;网络层则由RRC和复制避免子层构成,负责无线资源控制和部分移动性管理。针对不同设备,蜂窝系统定义了不同的接口和协议体系,这一方面满足了业务、服务多样化的需求,另一方面也导致系统级仿真工具开发困难。

蜂窝网络系统的发展目前集中于空中接口技术的改进<sup>[1,2]</sup>、网络结构的简化和IP协议体系的统一等方面。

## 1.2 区域网络系统

区域网络系统是对无线个域网(WPAN)、无线局域网(WLAN)和无线城域网(WMAN)的统称。相比蜂窝网络,区域网络的覆盖范围较小,一般作为大型系统的子网或特殊应用存在。

802.11是无线局域网标准,为了满足不同地区、环境、传输速率和安全性需求,已先后衍生出多个研究小组和相应版本,目前最新成立的小组为802.11v。根据是否存在基础设施WLAN可分为两类:一类不包含固定设施,节点同时充当中继路由和终端,又称无线自组织或Ad Hoc网络;另一类则预设固定接入点(AP),APs组成平面结构的骨干网,节点通过AP接入网络,此类网络的代表性结构为Mesh。WLAN参考ISO协议体系,其绝大多数的研究集中于路由协议的改进,如拓扑控制算法、安全性问题和服务质量等。

802.15为无线个域网标准,有4个工作小组分别负责蓝牙底层协议、与802.11网络的协同、高速率多媒体应用和ZigBee标准的制定。ZigBee为短距离低速通信的网络标准,主要应用于无线传感器网络,设计目标为在满足基本传输速率(9.6kbit/s)的前提下尽可能降低功耗和生产成本。ZigBee的协议体系基于ISO体系简化了传输层,其研究不仅局限于AODVjr,Tree-AODVjr等路由协议的优化,也涵盖了大量的应用领域,如军事<sup>[3]</sup>、环保和农业<sup>[4]</sup>等。

802.16是WMAN标准,即WiMAX,目前主要采用的版本包括固定无线(802.16d)和移动无线(802.16e)标准。WiMAX网络结构分为点到多点(PMP)和Mesh两种。在协议架构上,802.16仅定义了物理层和MAC层。

目前随着异构网络的不断增加,IEEE还制定了802.21,希冀能在IP协议体系下实现3G,WPAN,WLAN和有线网络等在业务、应用、服务质量及安全性等方面的无缝融合。

## 1.3 系统性能指标

性能指标是评估无线网络性能的主要工具,它量化了无线系统运行过程中产生的各种统计信息,能使研究者把握整体网络质量,了解网络性能瓶颈,指导各方面工作的展开。

根据不同的协议体系,国内外目前对无线网络的性能指标研究集中于两个方向:一是针对GSM,TD-SCDMA等蜂窝网络,研究其接入和非接入层尤其电路域的各项指标;另一个方向是针对ISO协议体系,研究分组系统的各种度量。针对蜂窝网络各大电信运营商和制造商相继推出了各自的关键性能指标建议,但鉴于商业原因,这类系统的高端研究文献较少;而无线分组网络的指标大多借鉴有线系统,国际标准化组

织IETF<sup>[5]</sup>、ITU-T<sup>[6]</sup>和中国标准化通信协会(CCSA)<sup>[7]</sup>相继发表了一系列IP网络指标体系规范。此外,针对一些特定协议和应用领域,国内外学者还提出各种独特指标,如美国芝加哥大学的Han<sup>[8]</sup>为了衡量IP多播会议的接收质量,扩展了数据包时延和链路带宽的定义;伊朗科技大学的Saleh<sup>[9]</sup>为了评价Ad Hoc网络路由协议的安全性,提出了有效范围和最坏情景平均投递率。

根据测量规模,一般将无线网络的性能指标分为3类:

### 1) 网络节点相关

网络节点是网络中拥有唯一网络地址的设备。相关指标包括应用于电路域的载频TCH分配成功次数、载频平均通话时长、小区掉话率等;应用于分组网络的指标则有设备平均故障时间、节点连通度、IP包转发率等和平均拥塞时间等。

### 2) 传输路径相关

传输路径是网络中任意两节点之间通信的物理或逻辑通路。在电路域中,此类指标包括传输带宽、上行链路误码率、下行信道接收功率等;在分组网络中不仅关心物理层指标,更多的研究则针对数据链路层及以上,分析路径的连通性、链路误码率、IP包损失率、IP包传输时延及时延抖动等指标。

### 3) 整体网络相关

这类所指的整体网络是若干节点和路径构成的系统的总称。此类指标往往是对节点或链路的指标进行数学加权或求均值获得。在电路域中包括平均掉话率、平均每线话务量、平均信道误码率等;在分组网络中有节点平均连通度、平均丢包率、IP包平均传输时延、网络每小时吞吐量等。

此外,也有研究者根据不同的协议层次划分指标体系<sup>[10]</sup>,如无线分组网基于ISO模型,物理层的指标有信道容量、接收信号场强等和频带宽度等;数据链路层指标则包括误帧率、帧传输时延、帧吞吐率等。任何一个指标都只反映网络某一方面的特性,无法描绘系统全貌,也有依据指标表征的系统能力对性能指标分类并进一步建立指标评测体系,如ITU-T的SG13工作组针对分组网络定义了评价系统性能的4类参数:速度、精确性、可靠性和有效性<sup>[6]</sup>。

## 2 无线网络系统特征建模

无线网络特征建模是本文阐述的重点。相较有线网络系统,无线系统在信道、拓扑和协议行为等方面又具有很大的差异,但是具有相似的流量特征。这些特征结合起来,共同构筑成一个完整的无线网络系统模型。

### 2.1 无线传播信道建模

无线信道模型是对无线信道的输入与输出信号之间数学关系的描述,它可分为调制信道模型和编码信道模型,其中调制信道模型可用于描述无线接收信号幅度的变化情况,是无线系统建模中应用的主要模型类别之一,它又分为路径损耗模型和信道衰落模型两种。

#### 2.1.1 路径损耗模型

路径损耗模型关注的信道距离较长,一般在几百到几千米之间。由于传播环境复杂多变,研究目标主要是预测不同天气和地形条件下的信号衰减均值,建立的模型称为传播预测或传播模型。根据不同的传播距离,传播模型进一步分为宏蜂窝、微蜂窝和室内传播模型3种,相应也有3类建模方法:经验方法、半经验方法和确定性方法。

经验方法是对具有相似传播特性的地区进行测量,统计归纳出信号衰减的计算公式。此类模型包括著名的奥村哈特(Okumura-Hata), COST 231-Hata, LEE 等宏蜂窝模型,及对数距离路径损耗、衰减因子等室内传播模型。Okumura-Hata 模型源于 20 世纪 60 年代 Okumura 等人在日本东京进行的电波损耗测试,后来 Hata 依照不同地形对公式进行了修正。Linda<sup>[11]</sup>重新定义了发射天线高度,指出了基站天线高度、机架高度和基站距离地面平均高度三者之间的关系;Schneider<sup>[12]</sup>基于中等城市环境,建议引入新的 3 个地形因子:接收天线附近的建筑物密度、建筑物容积和街道方向角。为了简化计算,他还将街道方向角表示成与传播方向同向和正交的两个分量;COST 231-Hata 由欧洲科学与技术研究协会(EURO-COST)制定,改进了 Okumura-Hata 的频率衰减系数和路径损耗常数,以适应 3G 等更高频段通信技术的要求。

半经验方法借鉴经验方法的统计结果,结合电磁理论计算一些指定场景, Ikegami、Walfish-Bertoni 和 COST 231-WI 是这类模型的代表。COST 231-WI 是 COST 组织建议的蜂窝模型,区分了视距(LOS, Line of Sight)和非视距(NLOS, None Line of Sight)环境。在 LOS 环境中它认为信号衰减等价于自由空间的传播;在 NLOS 条件下则进一步考虑了屋顶到街道的衍射、散射和建筑物多屏绕射的影响:

$$L_{ms} = -16.9 - 10\lg w + 10\lg f + 20\lg \Delta h_{mobile} + L_{ori} \quad (1)$$

式中,  $L_{ms}$  为屋顶衍射和绕射相关损耗,单位为 db;  $w$  是街道宽度,单位为 m;  $f$  是频率,单位为 MHz;  $\Delta h_{mobile}$  为屋顶高度与移动台高度之差,单位为 m;  $L_{ori}$  是街道走向因子。

确定性方法是针对具体现场环境直接用理论公式计算的方法,射线跟踪法和时域有限差分法(FDTD)是其代表。对射线追踪法的研究目前集中于 3 个方面:第一是绕射区的损耗估计,宾州州立大学的 Luebbers<sup>[13]</sup>基于一致性绕射理论提出了一种广泛应用的启发式绕射系数公式,设理想导体的表面极化反射系数为 1,则有限电导率介质劈的绕射系数参考电介质的影响;第二是射线路径确定算法,常见的算法有镜像法、测试射线法和射线管法等;第三则为射线跟踪加速技术,Zhong<sup>[14]</sup>把当前各种加速算法思路归为 4 类:减少射线和模型在所用基元的相交费用,减少射线和基元相交测试的总数目,减少和环境相交的射线总数目,用一般的实体代替单独的射线;并给出了每类思路的典型算法。

### 2.1.2 信道衰落模型

信道衰落模型影响的范围较小,辐射半径往往在几个波长以内,但也有针对大尺度效应的描述。其研究目标关注于接收信号的场强波动的概率密度分布。电波在传播过程中受到地形和建筑物遮挡,产生折射、散射、透射和衍射等线性,形成多径效应,包括由于用户快速移动导致的多普勒频移、由于各地点衰落特性不一致引起的空间选择性衰落、由于信号发送带宽大于信道相关带宽引起的时延扩散;此外,受到天气和阴影效应影响,信号还将产生慢衰落现象。

平坦衰落又称非频率选择性衰落,描述一般采用瑞利(Rayleigh)分布或莱斯(Ricean)分布。平坦衰落信道的仿真方法包括确定性模型和统计模型两种。确定性模型采用有限个加权的正弦信号来生成有色高斯噪声,基于等距离法(MED)、等面积法(MEA)、蒙特卡罗法(Monte Carlo)或最小均方误差法(MSEM)决定模型的多普勒系数和离散多普勒频

率;统计模型则先产生独立高斯过程,然后通过具有特定冲激响应的窄带成型滤波器,这种方法比确定性模型能产生更加独立的衰落波形,但是结构相对复杂,常见的模型有 Clarke、Jakes 和改进的 Jakes 模型。Jakes 模型利用多普勒频移的对称性比 Clarke 模型减少了一半振荡器的数目,降低了仿真器的复杂度,但是产生的信号并不符合广义平稳特征。密苏里大学的 Chengshan<sup>[15]</sup>对此提出了一种改进版本:

$$Z_c(t) = \sqrt{\frac{2}{M}} \sum_{n=1}^M \cos(\omega_n t \cos a_n + \varphi_n) \quad (2)$$

式中,  $Z_c(t)$  为接收信号的同向分量;  $M = N/4$ ,  $N$  是路径数目;  $\omega_n$  为最大多普勒频移;  $\varphi_n$  为路径初始相位;  $a_n$  代表路径入射角,  $a_n = (2\pi n - \pi + \theta)/4M$ ,  $\theta$  服从  $[0, 2\pi]$  均匀分布。

随着信号传输带宽的提高,频率选择性衰落问题日益突出。抽头延迟线(TDL)模型及其扩展是此类信道的常见仿真方法。COST 259 工作组<sup>[16]</sup>测量了 UMTS 接入网系统在各种地形下的电波损耗,定义了 13 个适用于不同环境的 TDL 模型,并给出了各模型的功率延迟剖面和多普勒谱。Intel 公司的 Jeff 等人<sup>[17]</sup>提出了修正的 S-V 模型,假设 UWB 信道特性在一次发射脉冲信号的过程中保持恒定,信道由多个簇构成,每簇包含一定数量的路径,簇的衰落与环境建筑物的结构相关,路径的衰落与接收器邻近的物体相关,则路径的增益不再满足传统 Rayleigh 分布,而服从对数正态(Log Normal)分布。Xiongwen<sup>[18]</sup>采集了赫尔辛基市建筑物内大量载频为 5.3GHz 的冲激响应信号样本,建立 TDL 模型后指出:

①即便在 LOS 环境下,仍有一部分抽头服从 Rayleigh 分布;

②当信号强度很弱时,延迟最大的两径相关性较强,此外各径相关性很小;

③如果室内太宽敞,信号的延迟将非常大。

## 2.2 网络拓扑结构建模

网络拓扑模型描述了无线网络节点及其连通度。根据节点可否移动,网络拓扑可分为静态拓扑与动态拓扑两种。虽然其研究建模的目的都是为了分析网络的连通性、对称性、稀疏性、鲁棒性和吞吐率等能力,但是研究的角度和模型展现形式截然不同。

### 2.2.1 静态拓扑模型

当研究目标针对网络的某一时刻,或网络中所有节点皆固定,或节点的移动速度都非常慢时,网络拓扑可视为静态。此情况下,网络连通度将取决于节点的分布情况和信号覆盖半径,建模工作将集中于网络拓扑指标,如节点度分布、聚类系数、网络直径、目标熵和介数等的分析,以及基于这些指标的拓扑控制演化和生成算法。依照节点部署是否可控,静态拓扑又可分为可控网络与不可控网络。

对于部署可控的无线系统,建模目标是设计合理的节点位置,以满足系统预算和性能要求。采用的方法包括连续渗流理论、扩张图理论和占位理论等。连续渗流理论假定所有节点位于二维平面内,单位区域内的节点密度服从泊松(Poisson)分布;任意两节点之间的距离小于某值时便可认为相互连通,连通节点的集合称为组件,组件的节点个数称为阶;可证明网络的连通性同较大组件中的节点数目与节点总数的比率相关,且 Poisson 参数  $\lambda$  大于一定值时,以大概率存在一个最高阶的组件。Jiang<sup>[19]</sup>探讨了  $\lambda$  与两个节点之间产

生较短距离的概率的关系。

对于部署不可控的网络,拓扑可分为平面和层次两种结构,且形成了功率控制和睡眠调度两个拓扑控制研究方向。

最小生成树(MST)、相关邻近图(RNG)、Gabriel图(GG)和姚氏图(YG)是经典的基于图论的平面拓扑模型。其中MST能够在保证网络连通性的前提下获取节点平均度的最小值。由于拓扑发现和生成树的开销很大,实际往往使用局部MST或MST近似算法。以提高无线网络系统的抗毁性、吞吐率或降低信道干扰为目标,Chen<sup>[20]</sup>、Peng<sup>[21]</sup>和Guinian<sup>[22]</sup>也提出了各自的算法。Peng设计了一个流量感知模型TAP,假设节点周期性发送数据给邻居,数据最多经两跳到达目的地。运行时,节点不断探测网络流量,并根据流量大小和邻居数目的多少自主判断是否睡眠。Chen反其道而行之,适当增加节点以提高网络的鲁棒性。Guinian定义了链路和链路之间的干扰关系,将其量化为干扰系数,并根据系数对链路分组和排序,通过不断测试网络的连通性逐步保留干扰系数较少的组,直至到达图连通的临界点,此网的Gabriel图即为所求。

层次模型定义了两种或两种以上的节点:管理节点和非管理节点。相比平面结构,它具有更低的路由开销和信道干扰。蜂窝网络、MESH网络或分级AD HOC结构均属此类,一般借鉴平面模型算法来构造子网拓扑。Azadeh<sup>[23]</sup>提出应用于簇结构的DRNGC,节点邻居被定义为簇内相邻的节点,每簇用DRNG算法建模。

### 2.2.2 动态拓扑模型

当网络中运动节点的数量较多、移动速度较快、范围较广时,网络的拓扑结构将在短时间内急剧变化。此时不宜再采用静态观点构筑节点和链路的相关测度,应转而分析节点的移动轨迹和用户的运动规律,即移动模型。移动模型可分为两类:轨迹跟踪模型和人工合成模型。前者是临摹现实用户或仪器的移动轨迹;后者则是抽象用户或仪器的行为,产生随机数组,是目前最常用的一类模型,又分为实体移动和群组移动模型两种。

实体移动模型描绘了单个节点的运动特征,常见的模型包括随机路点(RWP)、随机方向(RD)、城市街道(City Street)和高斯-马尔科夫(Gauss-Markov)模型等。Jinthana<sup>[24]</sup>比较了RWP和Gauss-Markov模型对网络的吞吐率、传输时延和路由控制开销的影响。Bemd<sup>[25]</sup>为弥补轨迹跟踪与人工合成模型真实度的差异,提出了扩展的RD-LDP,将地图划分成多个无重叠区域,每个区域设置一个参数子集,决定各自的行走距离、移动速度和停留时间的均匀分布区间。街道方向角的概率密度函数是与吸引点有关的正态分布。

群组移动模型是对多个节点移动共性的刻画,队列(CM)、参考点组(RPGM)、游牧团体(NCM)和追逐(PM)模型都是其典型代表。Xue<sup>[26]</sup>定义了一种静态拓扑结构相对稳定的速率组移动模型(VGM),设 $r$ 为节点信号覆盖半径, $r$ 移动速度 $v_i=(v_x, v_y)^T$ , $i$ 为节点编号, $v_x$ 和 $v_y$ 是 $v_i$ 在 $x$ 和 $y$ 方向的速度分量,则VGM定义如下:

定义1 A和B构成临近组对(AGP),当

$$D(\bar{V}_A, \bar{V}_B) = |\bar{V}_A - \bar{V}_B| = \sqrt{(\bar{V}_{A,X} - \bar{V}_{B,X})^2 + (\bar{V}_{A,Y} - \bar{V}_{B,Y})^2} \quad (3)$$

为服从均值为 $\mu$ 、方差为 $\sigma^2$ 的正态分布。

定义2 A和B组成一个 $k$ 相关邻近组对( $k$ -AGP),如果存在 $k \geq 1$ 个节点 $C_1, C_2, \dots, C_k$ 使得 $AC_1, C_1C_2, \dots, C_kB$ 均为AGP,且随机变量 $D(\bar{V}_{C_i}, \bar{V}_{C_{i+1}})$ 的特征值相同。

定义3  $A_1, A_2, \dots$ 在同一个速度组中,当 $A_1, A_2, \dots$ 组成 $k$ -AGP。

由定义1—定义3可知,当AGP的相对速度均值 $\mu=0$ 、方差 $\sigma^2$ 较小时,同一组内的各节点位置相对变化较小,节点度分布趋于稳定。Xue还给出了VGM的产生算法。

## 2.3 通信业务流量建模

3GPP<sup>[27]</sup>根据QoS要求的不同定义了4种基本业务类型:会话类、流媒体、交互类和背景类。其它无线系统的业务也可据此划分。其中会话类业务承载于电路域,系统可不对呼叫进行排队处理,当前呼叫的到达并不对较长时间之后的呼叫到达数量产生明显影响,其流量描述可采用短相关(SRD)模型;流媒体、交互类和背景类业务则通过分组域传输,使用了重传、拥塞控制等机制,再加上文件大小分布的重尾特性,导致网络流量的突发性不随时间尺度变大而降低,往往用长相关(LRD)模型描述其流量。

### 2.3.1 短相关模型

定义4 对于广义平稳随机过程 $X=\{X_i, i \in Z\}$ ,其自相关函数 $R(k)$ ,若 $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} R(k) < \infty$ ,则称 $X$ 具有短相关(SRD)特性;若 $\sum_{k=-\infty}^{+\infty} R(k) = \infty$ ,则称 $X$ 具有长相关(LRD)性质。

可见,SRD序列的自相关性只在一定范围存在,且随着时间分辨率的降低,堆叠序列的方差将以反比于样本分段长度的速度衰减,单位时间内的呼叫数量将趋于白噪声。常见的SRD模型包括Poisson、Markov、自回归(AR)过程,以及衍生的半(Semi)Markov、MMPP、ARMA和ARIMA等。

MMPP将系统划为 $N$ 个状态( $N \geq 1$ ),其中任一状态 $i$ 对应的到达模型都是均值为 $\lambda_i$ 的Poisson过程。MMPP建模的关键是确定模型参数。文献[28-30]介绍了多种参数估计方法。在Daniel<sup>[28]</sup>提出的算法LMBDA中,设采样序列 $X=\{X_i, 1 \leq i \leq T\}$ ,各状态到达率 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N$ ,根据经验公式 $\lambda \pm a\sqrt{\lambda}$ ( $a$ 默认值为2,与样本分段长度有关),则最大到达速率 $\lambda_1 = (\sqrt{1+peak} - 1)^2$ ( $peak$ 是采样峰值), $\lambda_i = (\sqrt{\lambda_{i-1}} - 2)^2$ ,循环计算直至 $\lambda_{i-1} - 2\sqrt{\lambda_{i-1}} \leq 0$ ,此刻 $i$ 即为状态数 $N$ 的估计值。转移概率矩阵 $\{P_{ij}\}$ 可通过下式求解:

$$\lambda_j - a\sqrt{\lambda_j} < X_i < \lambda_j + a\sqrt{\lambda_j} \Rightarrow \varphi_i = j \quad (4)$$

式中, $\varphi_i$ 是第 $i$ 个样本对应的系统状态,将维持于 $i$ 状态的样本量除以转移至 $j$ 状态的样本量即为 $P_{ij}$ 。Amirpasha<sup>[29]</sup>在使用LMBDA算法仿真时,发现流量在开始和结束时段会产生异常;而减小样本分段长度 $a$ 能够提高仿真精度。

ARMA模型可描述平稳时间序列,自回归阶数 $p$ 和滑动平均阶数 $q$ 的估计是其建模的首要问题。AIC准则、BIC准则、F准则及利用自相关函数与偏相关函数的拖尾等都是常见的定阶方法。还有一些学者尝试结合神经网络或遗传算法<sup>[31]</sup>来提高预测精度。ARMA的自回归系数、滑动平均系数和新信息序列方差的估计则可采用矩法、最小二乘法和最大似然估计法等。ARIMA在ARMA的基础上增加了 $d$ 阶差分算子,可拟合非稳态序列,表示如下:

$$\Phi(B)\Delta^d X_t = \theta(B)\epsilon_t \quad (5)$$

式中,  $\Phi(B)$  为自回归项;  $\theta(B)$  为滑动平均项;  $\Delta = 1 - B$  代表差分算子;  $\epsilon_t$  为新信息序列。Suarez<sup>[32]</sup> 即采用此算法描述了 WI-FI 网络流量。

### 2.3.2 长相关模型

**定义 5** 对于广义平稳随机过程  $X = \{X(t), t \in T\}$ , 令  $\lambda > 0, 0 < 1 < H$ , 如果

$$X(\lambda t) = {}_d\lambda^H X(t), t \geq 0 \quad (6)$$

则  $X$  称为自相似过程, 其中  $=_d$  代表分布意义上的相等,  $H$  (Hurst) 称为自相似参数。

**定义 6** 对于广义平稳随机过程  $X = \{X(t), t \in T\}$ ,  $X^{(m)}$  为  $X$  中依次取出的  $m$  个元素均值构成的序列。如果对于  $m = 1, 2, 3, \dots$ , 其自相关函数  $\rho(k)$  满足

$$\rho^{(m)} = \rho(k) \sim k^{-\beta}, 0 < \rho < 1 \quad (7)$$

则称  $X$  为严格二阶自相似过程; 如果对于  $m \rightarrow \infty$ , 满足式 (8), 则称  $X$  是渐进二阶自相似过程, 式中  $\beta = 2 - 2H$ 。

由定义 5、定义 6 知,  $H$  参数是反映自相似特性的唯一参数。当  $0 < H < 0.5$  时,  $X$  具备 SRD 性质; 当  $0.5 < H < 1$  时,  $X$  具备 LRD 特性。目前对无线网络流量自相似性的研究集中于两个方面:  $H$  值估计算法和流量生成算法。方差-时间法 (V-T)、变标度极差绘图法 (R/S) 和 Whittle 估计器都是较好的  $H$  参数估计算法。流量生成方法则包括 ON/OFF 源叠加法、基于分形布朗运动 (FBM)、分形高斯噪声 (FGN) 和分形 ARIMA (F-ARIMA) 的相关算法等。

ON/OFF 源叠加法认为数据源在发送 (ON) 与不发送 (OFF) 数据的状态之间更迭, 状态持续时间的分布具有无限 (重尾分布) 或有限 (指数分布) 方差。设总共有  $M$  个数据源, 则时间区  $[0, T]$  内网络累积传送的数据包数量为:

$$W_M(T) = \int_0^T \left[ \sum_{m=1}^M W_m(t) \right] dt \quad (8)$$

式中,  $W_m(t)$  表示数据源  $m$  在时刻  $t$  发送的数据包数。可以证明: 当  $M, T \rightarrow \infty$  时,  $\{W_M(T), t \geq 0\}$  是渐进自相似的。Chu<sup>[33]</sup> 采用 Pareto 分布描述 ON 周期长度, 发现了  $H$  值的一些异常情况。他分析后指出: 1) 模拟流量的初始部分是非稳态的, 应当截断; 2) 采样频率需符合奈奎斯特准则。这与 Amirpasha<sup>[29]</sup> 的发现不谋而合。ON/OFF 源叠加法的优点是具备明确的物理意义, 缺点是需要大量源叠加, 算法复杂度达到  $O(n^2)$ 。

F-ARIMA 是 ARIMA 的分形扩展, 其  $d$  阶差分算子表示如下:

$$\Delta^d = \sum_{k=0}^{\infty} C_k^d (-B)^k \quad (9)$$

$$C_k^d = \Gamma(d+1) / \Gamma(d-k+1) \Gamma(k+1) \quad (10)$$

式中,  $\Gamma$  是 Gamma 函数;  $d \in (-0.5, 0.5)$ 。当  $k \rightarrow \infty$  时, 模型自相关函数  $\rho(k) \sim k^{2d-1}$ , 自相似系数  $H = d + 0.5$ 。在产生仿真序列时, 首先用 Hosking 法<sup>[34]</sup> 生成分形差分噪声  $Y(t)$ , 接着用  $Y(t)$  替换白噪声, 用 ARMA 序列的生成方法产生 F-ARIMA 序列。由于具备长短交织的相关函数结构, 此模型能更全面地描述实际网络业务, 但是分数积分器衰减缓慢, 算法复杂度仍达到  $O(n^2)$ 。

针对分组网络流量在小时间尺度上的局部奇异特性, 美国莱斯大学的 Rudol<sup>[35]</sup>、Kulkarni<sup>[36]</sup> 和贝尔实验室的 Feldmann<sup>[37]</sup> 还展开了多重分形测度的研究, 提出了一系列流量生

成算法, 如离散小波变换法、层叠 ON/OFF 模型、多尺度乘性瀑布模型等。Lee<sup>[38]</sup> 首先估计了流量的多分形谱和 Holder 指数, 然后用上述算法产生了仿真序列。

### 2.4 网络协议行为建模

目前描述无线网络的协议行为主要使用形式化模型, 它以集合论、代数、数理逻辑和图论等离散数学理论为基础, 比较具有相同思维模式的不同内容, 抽象出其共同的形式结构, 并引入符号语言和相关规则表达命题或推理, 在描述网络管理、数据传输和安全认证协议, 分析其有界性、活动性和安全性方面发挥了重要作用。基于不同的数学工具, 形式化模型分为如下 4 种:

#### 1) 基于一阶谓词逻辑与集合论

如 Z 语言、VDM 和 B 方法等, 它们定义了协议状态和对状态的操作, 可较好地表示协议流程, 但是对于并发性的表达能力不足。

#### 2) 基于非经典逻辑

包括模态逻辑和时序逻辑相关方法, 如 BAN 类逻辑、线性时序逻辑和分支时序逻辑等。它们通过推理证明协议具有预期的性能, 用来分析协议的底层规约、时序和可能性行为。其中 BAN 逻辑是著名的安全协议分析方法, 基本思想是利用协议的交互消息将最初信仰逐渐推理到与协议运行目标一致的最终信仰。GNY 逻辑、AT 逻辑和 SVO 逻辑扩展了 BAN 逻辑的概念和规则, 统称为 BAN 类逻辑。Li<sup>[39]</sup> 使用 SVO 逻辑描述 Yahalom 协议, 经详细分析, 修改了消息格式, 添加了新的握手消息。

#### 3) 基于进程代数理论

包括通信系统演算 (CSP)、通信顺序进程 (CCP) 和通信进程代数 (CCS) 等。它们采用代数演算来证明协议的能力。E-LOTOS 是 ISO 组织的 FDT 小组开发的形式化描述语言, 基于 CCS, 并加入了 CSP 的一些符号, 可以分析 ISO 各层的大部分协议与服务。其不足之处是缺乏异步通信机制。Noppadol<sup>[40]</sup> 提出了一种用 LOTOS 描述异步通信系统的方法, 将协议分解为一系列按照预定规则交互的进程实体的子功能, 定义了两个单向缓冲区构筑的媒介 (Medium), 协议实体通过媒介发送消息给另一实体, 并利用门径和媒介同步。这样, 异步行为被描述成两个服务之间所有行为的交集, 通过弱互模拟等价同时构建了协议规范和服务规范。

#### 4) 基于图论

有限状态机 (FSM) 和 PETRI 网为基于图论、集合论的方法。这类方法采用可达性分析和构造理论, 可描述协议的并发性或异步性, 但面对复杂协议时容易产生状态爆炸。PF-SM, EF-SM<sup>[41]</sup>, CF-SM 和 CEFSM 引入不确定性、变量和交互通道, 进一步提高了 FSM 的应用范围。PETEI 网方法则衍生出时间 PETRI 网、有色 PETRI 网、随机 PETRI 网和面向对象的 PETRI 网等。其中时间 PETRI 网赋予每个令牌一时间戳, 协议模型得以实现时间约束机制; 有色 PETRI 网则采用颜色标记区分令牌属性。Zhu<sup>[42]</sup> 结合二者对 Kerberos 协议进行了建模和性能评价。

### 3 现有仿真工具评述

目前国外开发的无线网络系统相关的仿真工具较多, 有针对网络单方面特征的模拟, 如信号覆盖规划工具 Wireless

Insite、Planet, 信号处理仿真软件 Simulink、SPW, 传感器网络仿真软件 Tossim 等; 也有能够构建多种无线系统, 涵盖电波衰减预测、流量生成、网络拓扑构造和常见协议行为描述的综合性工具, 其中以 NS2 和 OPNET 应用最为广泛。

### 3.1 NS2(Network Simulation v2)

NS2 是美国加州大学 LBNL 国家实验室开发的一款网络仿真平台, 基于离散事件驱动。在结构上, 它定义了节点、链路、队列和分组等一系列网络实体, 并设计了 Link Layer、ARP、队列接口和天线等构件组成移动节点。由于其免费和开源的优势, 个人和机构研究者不断完善其接口和协议, 然而目前仍然存在以下不足:

#### 1) 传播环境设置过于简单

NS2 定义了 3 个传播模型: Free Space、Two-Ray Ground 和 Shadowing, 且没有地形描述模块。如 3.1 节所述, 实际传播过程中, 不同地貌、天气与频率对信号的衰减速度影响很大, 快、慢衰落还将造成信号短期和长期的随机波动。显然, 目前软件的传播环境设置过于简单, 这将使节点活动范围、信道稳定度乃至网络的容量与真实系统存在较大差异。

#### 2) 仿真大型网络的效率偏低

软件记录了详细的数据包信息, 为计算网络的性能指标、分析网络性能瓶颈提供了便利; 但另一方面也导致实验产生的数据量过大, 仿真大规模网络节点效率偏低; 为此, 研究者们采取了各种办法, 如优化编译环境<sup>[43]</sup>、引入集群系统的分布式计算思想等, 但这些手段都存在性能提升幅度不高、成本较高等缺点, 目前还没有公认特别有效的方法。

#### 3) 移动模型构建困难

动态拓扑建模时, 直接使用 OTCL 语言编写移动模型脚本较困难, 需要另外设计脚本自动生成工具, 如 Giovanna<sup>[44]</sup>使用的 RD 模型生成器。但是这些生成器并没有集成到 NS2 标准版本中, 且往往局限于单一或有限几个模型, 而非提供一种统一的移动模型描述和生成机制。

#### 4) 仿真流量与实际流量的统计特征存在差异

软件包含了 4 种流量产生器: 1) EXPOO, 采用 ON/OFF 源叠加法, ON 周期服从指数分布, 产生的分组大小固定; 2) POO, 服从 Pareto 分布的 ON/OFF 模型; 3) CBR, 以固定的分组大小和速率产生流量; 4) Traffic Trace, 跟踪实际网络流量。对于前 3 种方法, 产生的流量过于理想化, 虽然此情况下容易对算法、协议和拓扑的理论性能进行分析, 但是难以评估协议的真实效果。西班牙瓦伦西亚大学的 Hugo<sup>[45]</sup>比较了铁轨监控网络与 NS2 环境的 MPLS 流量, 发现实际延迟要远大于仿真结果, 且其突发性更强。大多数研究者由于没有精力大规模采集、抽样实际系统的流量样本, 因此使用第四种方法也存在不便。

#### 5) 未提供协议行为分析工具

基于 NS2 环境的研究工作中, 有相当一部分是评价协议的安全性和传输效率, 但是该软件并没有提供协议行为分析工具, 往往需要借助第三方软件完成协议建模, 再将其转化为平台代码。若能提供一些辅助性工具, 将协议的形式化描述与代码实现相结合, 无疑将提高开发效率和目标性能。

### 3.2 OPNET(Optimized Network Engineering Tool)

OPNET 源于麻省理工学院的 Alain 和 Steven 博士在 1983 年开发的网络优化工具。1987 年该软件商业化, 之后逐

步加入对 IPv6, MPLS, Ad Hoc, WiMAX 和 UMTS 分组域传输等技术的支持。相比 NS2, 它具有更人性化的界面和更强大的功能, 表现在以下方面:

#### 1) 管道化信道建模

OPNET 将信道建模过程视为一个管道, 信道的每一种物理特征或性能指标被视为一个管道阶段, 完成各阶段的描述性算法和参数设定即实现了信道建模。在接收功率阶段, 可利用地形建模模块(TMM)导入电子地图, 结合 Rayleigh, Ricean, Longley-Rice 等信道模型精确预测路径损耗。

#### 2) 子网拓扑抽象化

对于大多数建模工具, 其运行效率将随着仿真节点数的增加呈线性下降。OPNET 从静态拓扑构造和业务生成两个角度较好地解决了此问题。构建网络静态拓扑时, 可将不需要详细询问的子网抽象为逻辑实体, 以 IP 云或节点表示, 实体具有丢包率、封包延时等属性, 简化了内部的数据包转发等行为, 提高了仿真效率。

#### 3) 移动方式可配置

用户可选择 trajectory 方式跟踪已有的用户运动轨迹, 也可以利用移动配置器导入随机移动模型。

#### 4) 多种业务生成方式

OPNET 也采用 ON/OFF 源叠加法产生自相似流, 但定义了更多 ON/OFF 时长分布, 如 Pareto, Weibull, Gamma 和 Log Normal 等。由于源叠加法的时间复杂度较高, 软件根据不同用户对性能和精度的需求提供了 3 种业务生成方式: ①完全精准的方式, 用源叠加法生成全部流量, 模拟每个数据包的发送、接收和处理过程, 此方式精确度最高, 但是效率最低; ②背景流方式, 产生一部分恒速流量替代自相似流, 忽略其上层处理, 为使恒速流产生突发性, 还可利用 micro simulation 技术使数据包的大小、发射速率抖动; ③链路背景业务方式, 生成分组大小一定的恒速流, 此方式最简单, 但精确度也最低。

#### 5) 协议行为规约化分析

OPNET 在进程域使用 FSM 描述协议行为, 用户可通过状态转换图直观了解协议的逻辑状态, 利用核心函数库屏蔽了数据包的提取、发送和销毁等行为细节。相比 NS2, 此结构可让用户集中精力于协议本身, 提升了开发效率和性能分析的有效性。

当然, OPNET 也存在一些不尽如人意的地方, 如:

#### 1) 传播模型受到争议

OPNET 默认的传播预测模型为 Longley-Rice, 近些年来其准确性受到质疑。Bendov 于 1999 年发表了一篇著名的文章<sup>[46]</sup>, 引用夏洛特和华盛顿等地实测的数据, 认为模型的接收天线高度和地球有效半径等因子与实际值存在较大差异。

#### 2) 缺乏对节点合群特性的描述

其移动配置器能描述单个节点的移动轨迹, 却难以刻画节点的合群特性, RPGM 等组移动模型并没有纳入配置器中。

此外, 高昂的售价和非开源性也是阻碍研究者们使用的重要因素。

**结束语** 无线网络系统建模是一项庞大的研究工程, 本文仅仅作了概要性分析。目前对无线系统各特征模型的研究还在深入, 还有许多尚待解决的问题。

在信道模型方面,射线跟踪法是目前精确度最高的传播预测方法。然而由于实际环境的高度复杂性,算法效率还需大幅度提高。如何将信道衰落与地形、气候和系统相结合,提高描述的真实性,也应是未来研究的热点。在拓扑控制方面,许多模型没有考虑实际应用的诸多困难,且缺乏对网络整体优化的明确定义,导致文献结论与一些读者验证的结果相差甚远。在动态拓扑方面,提出的移动模型很多,但目前还没有相关工作将这些模型的移动方式、速度、停留时间等因素对网络性的影响进行量化。在分组网络中,应用较多的流量模型是 ON/OFF 源叠加法,然而算法在小时间尺度上其复杂度居高不下,多重分形模型能更好地刻画分组流量的突发性,却不能精确表示其长相关性。描述协议行为的形式化方法也有不少,但是如何以更全局化、综合化的方法描述协议的综合性能,如何进行更精准的量化评估,这些问题都需要我们不懈研究。

此外,绝大多数仿真工具都针对无线分组系统,而蜂窝网络作为世界应用最广、影响力最大的一类系统,由于其协议体系和网络结构上的复杂性,目前并没有较好的全网级仿真工具,也应是未来主要的研究方向之一。

### 参 考 文 献

- [1] Chen L, Hu X L. Search on Peak-to-Average Power Ratio Reduction of an OFDM Signal[C]// International Conference on Neural Networks and Signal Processing. 2008
- [2] Li Y. Simplified Channel Estimation for OFDM Systems with Multiple Transmit Antennas[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2002, 1(1): 67-75
- [3] Zheng J, Lee M J, Anshel M. Toward secure low rate wireless personal area networks[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2006, 5(10): 1361-1373
- [4] Zhou H L, Chen X C, Liu X D, et al. Applications of ZigBee Wireless Technology to Measurement System in Grain Storage [C]// Computer and Computing Technologies in Agriculture II. 2009
- [5] IETF. RFC 2678 IPPM Metrics for Measuring Connectivity[S]. 1999
- [6] ITU-T. Y. 1540 IP Data Transport Service - IP packet transfer performance metrics[S]. 2002
- [7] 中国通信标准化协会. YD/T 1171-2001 IP 网络技术要求—网络性能参数与指标[S]. 北京: 人民邮电出版社, 2005
- [8] Gao Han, Papka M E, Stevens R L. Performance Metrics of IP multicast Sessions[C]// Proc. of 7<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Multimedia. 2005
- [9] Youself S, Fathy M. Metrics for Performance Evaluation of Safety Applications in Vehicular AD HOC Network[J]. Transport, 2008, 23(4): 291-298
- [10] 杨雅辉, 李小东. IP 网络性能指标体系的研究[J]. 通信学报, 2002, 23(11): 1-7
- [11] Lida A A, Noori N. Modification and Tuning of the Universal Okumura-Hata Model for Radio Wave Propagation Predictions [C]// Proc. of Asia Pacific Microwave Conference. Bangkok, 2007
- [12] Schneider P, Lambrecht F, Baier A. Enhancement of the Okumura-Hata propagation model using detailed morphological and building data[C]// IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Taipei, 1996
- [13] Sehuster J W, Luebbers R J. Comparison of GTD and FDTD predictions for UHF radio wave propagation in a simple outdoor urban environment[C]// IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium. 1997
- [14] Ji Z, Li B H, Wang H X, et al. Efficient ray-tracing methods for propagation prediction for indoor wireless communications[J]. IEEE Antenna and Propagation Magazine, 43(2): 41-49
- [15] Xiao C S, Zheng Y H R. A Statistical Simulation Model for Mobile Radio Fading Channels[C]// International Conference on Advanced Technologies for Communications. Hanoi, 2008
- [16] Asplund H, Glazunov A A, Molisch A F, et al. The COST 259 directional channel model - Part II: Macrocells[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(12): 3434-3450
- [17] Hao K, Gubner J A. Theoretical Performance Analysis of the IEEE 802. 15. 3a UWB Channel Model[C]// Proc. of the GLOBECOM 2007. Washington, 2007: 1771-1774
- [18] Zhao X W, Kivinen J, Vainikainen P. Tapped Delay Line Channel Models at 5. 3 GHz in Indoor Environments[C]// Vehicular Technology Conference. 2000
- [19] Jiang A X, Bruck J. Monotone percolation and the topology control of wireless networks[C]// Proc. of 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Miami, 2005
- [20] Hu P, Hong P L, Li J S, et al. TAP: Trac-aware topology control in on-demand ad hoc networks[J]. Computer Communications, 2006, 29(18): 3877-3885
- [21] Chen Y, Son S H. A fault tolerant topology control in wireless sensor networks [C] // Computer Systems and Applications. 2005: 57-68
- [22] Feng G, Fan P Y, Lie S C. Minimizing Interferences in Wireless Ad Hoc Networks Through Topology Control[C]// IEEE International Conference on Communications. Beijing, 2008
- [23] Forghani A, Rahmani A M. Multi State Fault Tolerant Topology Control Algorithm for Wireless Sensor Networks[C]// Proc. of 2nd International Conference on Future Generation Communications and Networking. Hainan, 2008
- [24] Ariyakhajorn J, Wannawilai P, Sathitwiriwong C. A Comparative Study Random Waypoint and Gauss-Markov Mobility Models in the Performance Evaluation of MANET[C]// International Symposium on Communications and Information Technologies. Bangkok, 2006
- [25] Gloss B, Scharf M, Neubauer D. Location-dependent Parameterization of a Random Direction Mobility Model[C]// Proc. of 63rd IEEE Vehicular Technology Conference. Melbourne, 2006
- [26] Xue G T, Jia Z Q, You J Y, et al. Group mobility model in mobile peer-to-peer media streaming system[C]// Proc. of IEEE International Conference on Services Computing. Shanghai, 2004
- [27] 3GPP TS 23. 207. End-to-end QoS concept and architecture[S]. Release 5. 0
- [28] Heyman D P, Lucantoni D. Modeling Multiple IP Traffic Streams with Rate Limits[J]. ACM Transactions on Networking, 2003, 11(6): 948-958
- [29] Shirazinia A, Safavi S M, Nafiseh S E. On the Performance of Matching MMPP to SRD and LRD Traffic Using Algorithm LAMBDA[C]// International Conference on Information and Communication Technologies. Damascus, 2008

关的节点,从而在完全分布式的 P2P 网络中获得类似 Google 的依据资源相关性排序显示及其“下一页”的效果。

## 参 考 文 献

- [1] Google[EB/OL]. <http://www.google.com>
- [2] Napster[EB/OL]. <http://www.napster.com>
- [3] Suh K, Figueiredo D R, Kurose J, et al. Characterizing and Detecting Skype-Relayed Traffic[C] // Proc. IEEE INFOCOM. Washington DC; IEEE, 2006; 1-12
- [4] Stoica I, Morris R, Karger D R, et al. Chord: A Scalable Peer-to-Peer Lookup Service for Internet Applications[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2003, 11(1): 17-32
- [5] Ratnasamy S, Francis P, Handley M, et al. A Scalable Content-Addressable Network[J]. Proc. ACM SIGCOMM. New York: ACM, 2001, 31(4): 161-172
- [6] Zhao B Y, Kubiatowicz J D, Joseph A D. Tapestry: A Fault-Tolerant Wide-Area Application Infrastructure[J]. Computer Communication Review, 2002, 32(1): 81
- [7] Tsoumakos D, Rousopoulos N. Analysis and comparison of P2P search methods [C] // Proc. of the 1<sup>st</sup> international conference on Scalable information systems. New York, USA; ACM, 2006; 25
- [8] Chawathe Y, Ratnasamy S, Breslau L, et al. Making Gnutella-Like P2P Systems Scalable[C] // Proc. ACM SIGCOMM. New York, USA; ACM, 2003; 407-418
- [9] Lv Q, Cao P, Cohen E, et al. Search and Replication in Unstructured Peer-to-Peer Networks[C] // Proc. of the 16<sup>th</sup> international conference on supercomputing. New York, USA; ACM, 2002; 84-95
- [10] Zhang Yi-ming, Lu Xi-cheng, Zheng Qian-bing, et al. PST: An efficient search algorithm for large-scale P2P systems[J]. Journal of Software, 2008, 19(6): 1473-1480
- [11] Yang B, Garcia-Molina H. Efficient Search in Peer-to-Peer Networks[C] // Proceedings of the 22<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS). Washington DC; IEEE, 2002
- [12] Abhishek K, Jun (Jim) X, Ellen W Z. Efficient and Scalable Query Routing for Unstructured Peer-to-Peer Networks[C] // Proc. of the IEEE INFOCOM. Washington DC; IEEE, 2005; 1162-1173
- [13] Carchiolo V, Malgeri M, Mangioni G, et al. Emerging Structures of P2P Networks Induced by Social Relationships[J]. Computer Communications, 2008, 31(3): 620-628
- [14] 朱桂明, 金士尧, 郭得科. IPSBSAR: 一种基于熟人关系的增量式 P2P 搜索算法[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(8): 1260-1269
- [15] Jelasity M, Montesor A, Jesi G P. The Peersim Simulator [CP/OL]. [2008-05-10]. <http://peersim.sf.net>
- 
- (上接第 46 页)
- [30] Andersson S, Ryden T. Maximum likelihood estimation of a structured MMPP with applications to traffic modeling[C] // ITC Specialist Seminar. Monterey, 2000
- [31] 陈果. 基于遗传算法的 ARMA 模型定阶新技术[J]. 机械工程学报, 2005, 45(1): 41-45
- [32] Suarez C A H, Parra O S, Martinez L F P. Traffic Model Based on Time Series to Forecast Traffic Future Values Within a WiFi Data Network[C] // Wireless Communications, Networking and Mobile Computing Conference. 2008
- [33] Chen C, Xu Y, Zhang L. Some Remarks on ON/OFF Network Traffic[C] // Proc. of Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System. Guangzhou, 2008
- [34] Jeong H D J, Lee J S R, McNickle D, et al. Suggestions of efficient self-similar generators[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2007, 15(3): 328-353
- [35] Hosking J R M. Fractional differencing [J]. Biometrika, 1981; 165-176
- [36] Kulkarni V, Marron J, Smith F. A cascaded on-off model for TCP connection traces[R]. UNC/OR/TR01-1. University of North Carolina, 2001
- [37] Feldmann W, Gilbert A C, Willinger W. Data network as cascades: investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic[C] // ACM SIGCOMM'98 Conference. Vancouver, BC, Canada, 1998
- [38] Lee I W C, Fapojuwo A O. Modeling Wireless TCP Connection Arrival Process[C] // GLOBECOM. Press by IEEE, 2006
- [39] Chen L, Jiang Z J, Zhu Y F. Design and Logical Analysis of Authenticated Key Exchange Protocol[C] // WiCOM, 2008
- [40] Maneerat N, Varakulsiripunth R. Composition Method of Communication System Specifications in Asynchronous Model and Its Support System[C] // ICON. 2001
- [41] Orset J M, Alcalde B, Cavalli R. An EFSM-based Intrusion Detection System for Ad Hoc Networks[C] // ATVA. 2005
- [42] Zhu L Z, Zhang L W, Li Q. Modeling and Evaluating of Net Protocol Based on Timed Colored Petri Net[C] // Proc. of Modeling and Simulation in Electronics. Chengdu, 2008
- [43] GNU gprof[EB/OL]. <http://www.cs.utah.edu/dept/old/texinfo/as>
- [44] Carofiglio G, Caretto M. Route Stability in MANETs under the Random Direction Mobility Model[J]. IEEE Transaction on Mobile Computing, 2009, 8(2): 1167-1179
- [45] Coll H, Lloret J, Francisco J S. Does NS2 really simulate MPLS network? [C] // International Conference on Autonomic and Autonomous Systems, 2008
- [46] Bendov O. On the Validity of the Longley-Rice (50,90/10) Propagation Model for HDTV Coverage and Interference Analysis[C] // Proc. of NAB Broadcast Engineering Conf. Las Vegas, NV, 1999