

## 基于多尺度虚拟化的卫星终端用户行为仿真

张光杰, 叶海洋, 王晓锋

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对天地一体化网络中用户数量多、并发通信高和时变性的特点, 基于多尺度虚拟化技术, 提出一种模型驱动的分布式卫星终端用户行为仿真方法。采用多尺度虚拟化技术解决仿真逼真性和计算开销间的矛盾, 实现卫星终端的大规模仿真。利用模型驱动的设计方法, 将理论模拟模型与网络仿真相结合, 实现用户行为特征的高逼真仿真。实验结果表明, 该方法可以实现 100 万用户在线、10 万并发通话的大规模仿真, 且能准确体现用户行为的时变规律。

**关键词:** 天地一体化网络; 网络仿真; 用户行为仿真; 模型驱动; 多尺度虚拟化

**中文引用格式:** 张光杰, 叶海洋, 王晓锋. 基于多尺度虚拟化的卫星终端用户行为仿真[J]. 计算机工程, 2019, 45(8): 165-172, 189.

**英文引用格式:** ZHANG Guangjie, YE Haiyang, WANG Xiaofeng. User behavior simulation in satellite terminal based on multi-scale virtualization[J]. Computer Engineering, 2019, 45(8): 165-172, 189.

### User Behavior Simulation in Satellite Terminal Based on Multi-scale Virtualization

ZHANG Guangjie, YE Haiyang, WANG Xiaofeng

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**[Abstract]** Aiming at the characteristics of large number of users, high concurrent communication and time-varying in the space-ground integrated network, a model-driven distributed satellite terminal user behavior simulation method is proposed based on multi-scale virtualization technology. The multi-scale virtualization technology is used to effectively overcome the contradiction between simulation fidelity and computational overhead, and large-scale simulation of satellite terminals are realized. Using the model-driven design method, the theoretical simulation model can be combined with network simulation to achieve high-fidelity simulation of user behavior characteristics. Experimental results show that the proposed method can accurately realize large-scale simulation of 1 million online users and 100 thousands concurrent calls, and can accurately reflect the time-varying features of user behavior.

**[Key words]** space-ground integrated network; network simulation; user behavior simulation; model driven; multi-scale virtualization

**DOI:** 10.19678/j.issn.1000-3428.0051757

#### 0 概述

随着航天技术的发展, 全球信息共享, 特别是天地一体化信息网络的构建引起广泛关注。空间网络覆盖面广, 组网灵活, 不受地理环境限制, 能与地面网络相互补充, 实现天地信息共享。这不仅符合未来技术的发展趋势, 也是国家重大战略需求。

然而, 天地一体化网络结构复杂, 具有高动态、分布式、自组织等特点, 解决其技术问题与难点将耗资巨大, 因此, 需要建立天地一体化网络的仿真平台<sup>[1]</sup>。

通信网络已渗透到日常生活中, 人们对天地一体化网络的远程通信需求越来越迫切。由于卫星通信网络的用户具有分布广、规模大、时变性强等特点, 因此需要对天地一体化网络中的用户行为仿真进行重点研究。

云计算平台可以为网络仿真提供逼真的仿真环境, 具有实验成本低、扩展高和实时仿真的优点。本文借助云平台技术, 研究多尺度虚拟化的用户行为仿真技术, 在保证逼真性的前提下实现高并发仿真。

**基金项目:** 国家自然科学基金(61672264); 国家重点研发计划(2016YFB0800305)。

**作者简介:** 张光杰(1993—), 男, 硕士研究生, 主研方向为网络仿真; 叶海洋, 硕士研究生; 王晓锋, 副教授, 博士。

**收稿日期:** 2018-06-06 **修回日期:** 2018-07-29 **E-mail:** 1325419614@qq.com

## 1 相关工作

天地一体化网络、卫星网络场景中的用户行为仿真主要包括仿真实验平台与用户行为仿真模型2个方面。

卫星网络仿真实验平台可分为测试实验床、网络模拟技术和网络仿真技术。测试实验床可实现高逼真的仿真<sup>[2]</sup>,但其成本较高且无法满足卫星网络大规模、结构复杂的仿真需求。网络模拟技术<sup>[3]</sup>可实现卫星网络大规模、高动态、分布式、自组织的仿真,其中有代表性的新型仿真软件 NS3,其仿真性较 NS2 有所改进,可模拟较真实的报文。文献[4]基于 NS3 对星间通信网络进行性能仿真。文献[5]利用 Opnet 和 STK 软件建立卫星网络模型,证明卫星网络具备自相似的特点。文献[6]利用 Qualnet 对卫星通信网络进行建模,并通过实验证明了网络模型的正确性。然而,网络模拟技术无法实现用户的现实操作和实际应用部署,其所构建的卫星网络存在逼真性不足的缺点。在网络仿真方面,文献[7]基于云平台对 LEO 卫星链路进行仿真,并通过实验证明基于 OpenStack 可构建实时、分布式、可扩展的仿真平台,并对链路特性进行精确控制,但是该方法只考虑了单条链路,且并未考虑高并发卫星用户行为的仿真。文献[8]基于云平台实现大规模集群仿真,并使用 LXC 容器的轻量级虚拟化技术来模拟单个节点。文献[9]通过大量实验证明 CloudNet 可扩展到 1 000 个节点网络上,构建轻量级、大规模的虚拟网络,但其未对天地网络通信中的用户行为仿真进行研究。

在用户行为仿真模型方面,文献[10]提出一种基于会话仿真的网络用户行为分析方法,利用蚁群优化算法对用户行为进行建模,提高模型的适应性,但是这种理论分析方法计算量大,训练过程较慢,不适用于行为仿真。文献[11]针对移动电话行为的社交网络进行建模,证明模型节点强度具备幂律分布的特性,并通过实验证明其拓扑特性与真实移动通信网络相符,但是该方法只针对通信网络中的通信拓扑进行研究,未对通信行为规律进行仿真。文献[12]证明流量数据的行为规律趋近于泊松分布。文献[13]基于 BISANTE 建立业务流量模型,并利用 Opnet 进行仿真,该模型较好地反映了用户行为对网络性能的影响,具有较高的可信度和应用价值。然而,由于 Opnet 仿真平台是商用平台,用户可自定义修改的部分较少,可扩展性差,仿真规模和流量较大时的仿真效率低。综上所述,当前卫星用户行为仿真的研究主要集中在模型的建立与分析上,仅停留在理论模型层面,基于模型进行逼真仿真的研究较少。

本文基于云计算技术支撑的仿真平台,以理论模型为依据,研究天地一体化网络中用户通信行为的仿真方法,并构建了天地一体化用户行为仿真体系。

## 2 用户行为仿真体系

卫星通信网络主要由通信链路和通信节点组成。仿真节点通过虚拟化技术实现。该技术能够在提供稳定安全服务的前提下,实现大规模用户行为的高并发仿真,解决计算开销与仿真逼真性的矛盾。

### 2.1 多尺度虚拟化技术

多尺度虚拟化技术主要包括全虚拟化技术 KVM (Kernel-based Virtual Machine) 和轻量级虚拟化技术 Docker 容器。

全虚拟化技术在虚拟机与硬件之间加了一个软件层 Hypervisor,即虚拟机管理程序 (Virtual Machine Monitor, VMM)。虚拟机上的操作系统通过 Hypervisor 来分享硬件,其拥有独立的操作系统,可分配独立内存、CPU 等资源,实现完全隔离,但是 KVM 虚拟化的方式资源需求量较大,在有限的硬件资源条件下无法实现大规模部署。

轻量级虚拟化 Docker 容器技术在操作系统层面实现虚拟化,直接复用本地主机的操作系统,共用 Kernel 资源,省去了虚拟操作系统层 Guest OS 与 Hypervisor,实现进程级别的隔离,资源损耗少、利用率高,可实现大规模快速部署,具有更好的可扩展性<sup>[14]</sup>。但是,该系统由于资源与宿主机共享,长时间的读写、管理员的不当操作等可能导致数据丢失,安全性存在缺陷。同时,由于资源按比重动态分配,存在资源竞争的问题,无法确保稳定的性能。

文献[15]对 KVM 与 Docker 容器的性能进行测试,证明 KVM 隔离性较好,可维持稳定的性能。文献[16]对资源占有进行实验,依次增加 Docker 容器与 KVM 的数量,证明相同规格下 Docker 容器更加轻量,占用资源较少,适用于大规模仿真。2 种虚拟化技术各有特点,可根据不同的使用场景选择合适的技术。由于虚拟机更擅长于彻底隔离整个运行环境,保证安全稳定的运行空间,因此本文采用 KVM 全虚拟化技术进行仿真,保证稳定安全的服务,又因为 Docker 容器适用于大规模的应用部署,所以采用 Docker 容器技术实现用户大规模并发仿真。

### 2.2 仿真架构

为融合多尺度的虚拟化技术,构建一种高性能的仿真实验平台,文献[17]对几种常用云平台的扩展性和高性能计算负载等进行评估,实验结果表明,OpenStack 在进行密集型的高性能应用时,表现出较好的性能。因此,本文选择 OpenStack 作为仿真平台,搭建大规模的卫星网络并考虑卫星通信网络中各条链路的状况,依据 STK 建模的数据对卫星链路的参数性质进行并发控制,保证仿真平台的逼真性。仿真节点采用自动化部署的方式使拓扑按需配置、动态可变。将仿真用户接入卫星通信网络,调用模型驱动仿真用户,以实现通信仿真。

基于 OpenStack 分布式架构,通过 NTP 协议保证各

个节点的同步服务,控制整个数据中心的大型计算、存储以及网络资源池。硬件仅包括多台主机(通用计算机)和一台或多台物理交换机。其中,控制节点负责镜像的上传、节点的生成和网络拓扑的规划管理,计算节点中的 Nova 提供虚拟资源的管理服务,负责虚拟节点的建立与运行,OVS(Open vSwitch)作为虚拟软件交换机,负责决定虚拟网卡的关联方式,仿真虚拟链路,管理仿真网络。网络节点中的 neutron 组件负责网络的管理,提供动态主机设置协议(Dynamic Host Configuration Protocol, DHCP)、外网接入等网络服务,还可以通过 namespace 传递远程配置文件,管理仿真节点。在网络节点部署采集汇总模块,实时统计并分析虚拟站节点 Station Node 的通信服务信息;部署用户建模服务,创建用户模型库;部署行为管控模块,协调并控制用户仿真节点 User Node 等。

本文为实现多尺度、可扩展的用户行为仿真,计

算节点采用全虚拟化技术,在信关站仿真节点中集成通信服务与采集模块。部署通话管理、注册认证管理、数据存储等模块,提供通信仿真的终端服务;部署采集模块,对通信仿真的效果与资源占用等情况进行信息采集与分析,并设计对外接口服务(I/F),便于统计数据的采集与传输。信关站采用全虚拟化的技术,保证独立、安全、稳定的仿真环境。由于该技术占用资源较多,为提高可扩展性和降低资源利用率,本文通过在云计算平台中融合 Docker 容器轻量级虚拟化技术,实现大规模卫星终端用户的仿真。在用户终端节点部署通信库、通信控制规则、仿真客户端模块等,通过行为模型驱动仿真客户端模块,逼真复现卫星终端用户的通信仿真行为。仿真节点受行为管控模块的协调和控制,实现用户行为的分布式、高并发仿真。基于云平台的用户行为仿真架构如图 1 所示。

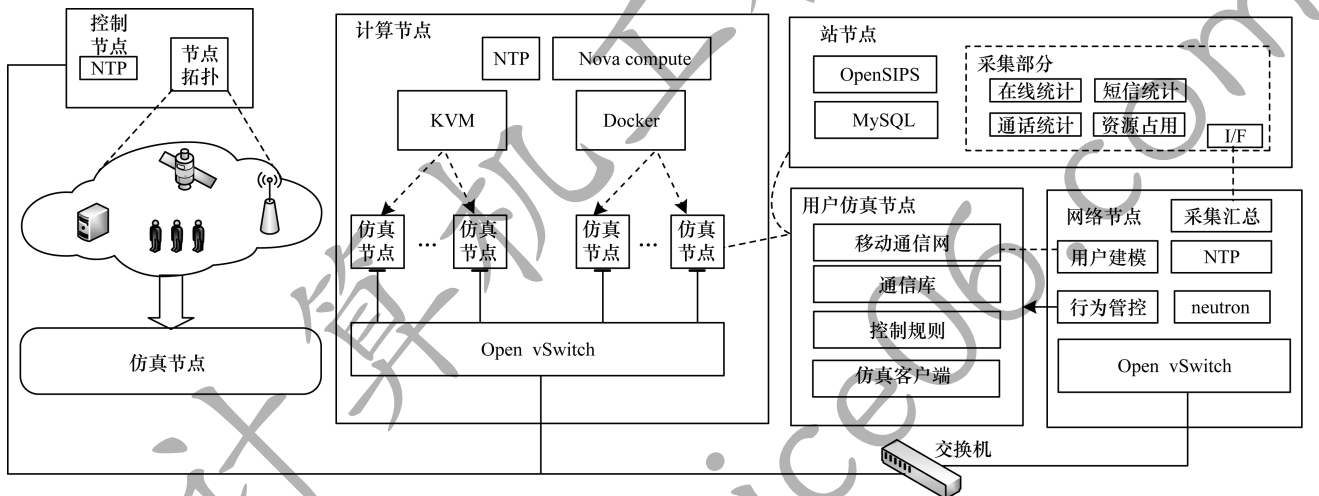


图 1 基于云平台的用户行为仿真架构

### 3 多样化卫星用户行为仿真

目前,关于用户行为数字模拟的研究主要集中在理论模型方面,对用户行为进行复现仿真的研究较少。为解决理论模型与逼真仿真相结合的问题,本文基于多尺度用户行为仿真平台,研究模型驱动的用户通信行为仿真方法。用户行为仿真的实现,首先要对模型架构与用户模型分别进行分析。本节所探讨的多样化卫星用户行为仿真方法各关键问题与技术关系如图 2 所示。

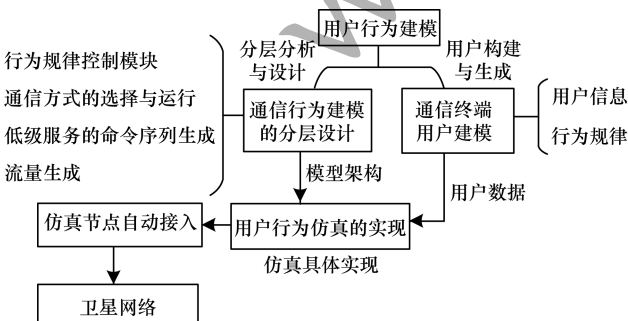


图 2 多样化卫星用户行为仿真方法研究架构

#### 3.1 用户行为建模

##### 3.1.1 通信行为建模的分层设计

通信行为的底层流量受用户行为偏好的影响,传统的 ON/OFF 业务流量方法难以完成各种类型的卫星终端行为<sup>[13]</sup>,因此,需要构建统一的模型架构,以实现多种行为仿真的统一调度。本文采用 BISANTE (Broadband Integrated Satellite Network Traffic Evaluations) 模型进行通信行为建模的分层设计,不仅可实现不同终端行为的统一化描述,且各个层次相互独立,便于组合。

在卫星通信中,卫星用户主要存在 3 种用户行为:在线注册,通话和发送短信。其中,在线注册是实现通话与短信的前提。本文基于 BISANTE 模型对用户通信行为的驱动进行抽象建模,模型架构由不同层组成,自上而下分别是负载生成层、会话层、应用层、服务层和资源层。下层提供高层次的服务,用户的行为控制模型在顶层控制,可触发并选择下一层相关的服务,直到流量在底层生成,以此仿真基于流量特征的业务流模型的用户行为。服务层与资源层面向底层操作,受用户行为的影响较

小,因此,本文主要研究会话负载生成层、会话层与应用层。

负载生成层用于控制用户行为,其与单个仿真节点的多个用户相关,负责把控用户行为仿真节点群的通信方式与行为规律,限制通话的长度与频率,选择指定用户节点触发行为。会话层负责控制应用层所选应用服务的行为与规律,并向应用层提供应用发起者的信息,即用户档案。具体的模型架构及建模思路如图3所示。

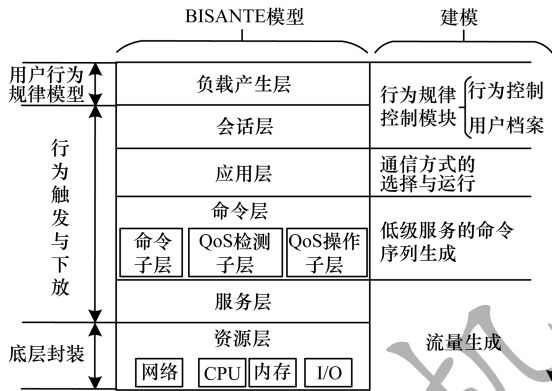


图3 BISANTE模型架构及建模思路

### 3.1.2 通信终端用户建模

当前,卫星用户行为仿真的理论模型研究已取得一定的成果,但无法驱动通信终端的实时仿真。为此,需要以算法理论模型为基础,通过提取用户信息数据及行为规律,形成行为仿真描述脚本,驱动以虚拟化技术为基础的仿真进程。

用户是通信仿真的基础部分,对具体的终端用户进行建模分析,主要是对通信双方的具体信息,通信业务关系产生的时间、规律,反映通信关系的通信拓扑等进行研究。数据挖掘方法的模型适应性不强,训练过程较慢,不适合大规模的用户行为仿真<sup>[18]</sup>。复杂网络<sup>[19]</sup>把个体作为节点,个体之间的关系作为边,用点集  $V$  和边集  $E$  组成的图  $G = (V, E)$  来表述通信网络,该方法可动态、大规模、高逼真度仿真。基于复杂网络对业务关系建模的具体过程如下:

#### 1) 移动通信网 (Mobile Call Graph, MCG) 生成

根据通信网络中用户的动态时变性,通信网络的增长性和无标度的特点,采用 BA 无标度网络模型生成 MCG 网络。将用户间的通信关系看作网络中的边,将用户看作通信网络中的点,其具体实现过程分3个步骤。

(1) 初始化网络。建立一个具有  $m_0$  个节点的联通网络。

(2) 增长性实现。每次引入一个新节点  $N$ ,并将其连接到已经在网络中存在的  $m$  个节点上,新节点  $N$  和已存在的节点  $j$  相连的概率为  $p$ ,其与节点  $j$

的度数  $k_j$  成正比,具体如下:

$$p_j = k_j / \sum_{i=0}^n k_i, m < n$$

(3) 无标度性实现。无标度性是指通信网络具有严重的异质性,即经常打电话的人接下来发生打电话的概率越大,其各节点之间的连接状况(度数)的不均匀分布越严重,也就是说,网络中少数节点拥有较多的连接,而大多数节点只有少量的连接。MCG 网络经过 BA 模型算法一段时间的演化后,最终生成反映通信业务关系的通信网络描述文件,文件中的用户节点的度满足幂律分布,从而实现通信网络的无标度特性。

#### 2) 持续动态时变通话网络的实现

根据生成的反映通信关系的网络描述文件,构造通信记录库。通话状态会随时间变化而变化,因而通话是一个动态变化<sup>[20]</sup>的网络。假设用户  $A$  在  $T$  时刻呼叫用户  $B$ ,则  $A$  和  $B$  之间就产生了一条通话记录  $(A, B: T)$ 。假设每条记录之间是不相关的,那么通信网络中就由多条这样的通信记录所构成,将第1步中生成的 MCG 网络保存在通信快照中,并按照固定的时间步长来划分,就能得到一系列连续的通信快照  $[k_1, k_2, \dots, k_n]$ ,每个通信快照都记录了时间  $\Delta T$  内的通信记录。

#### 3) 符合话务理论的业务流量生成

根据经典话务理论中的统计规律,通话的到达过程满足泊松分布。以经典话务理论为指导,可以较为逼真地复现通信过程。由于用户发起呼叫具有随机性,用户间的关系具有独立性、无关性等特点,相等时间间隔  $\Delta T$  内发起呼叫的用户数量满足泊松分布,本文基于 MCG 网络创建的用户模型,以通话数据库的方式存储通话记录。将经典话务规律作为控制规则,生成通话流量如下:

$$Traffic = \sum_{i=0}^n Seq_i$$

其中,  $Seq_i$  为第  $i$  个仿真用户的业务量,  $Traffic$  为总的业务量。最终通过用户群仿真节点  $Usr\ Node$  输出通话业务包。模型分析及建立的过程如图4所示。

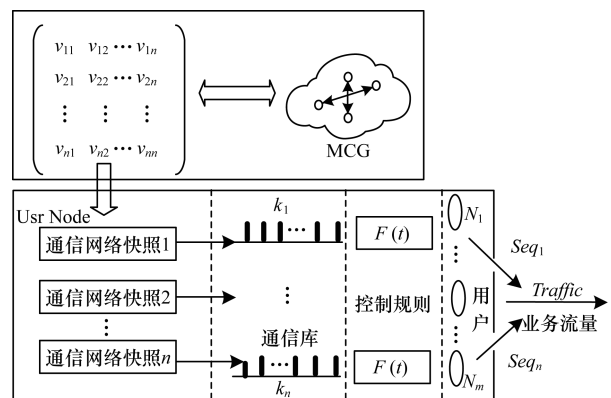


图4 业务流量模型构建过程

### 3.2 用户行为仿真实现

基于第 3.1 节中通信行为建模的分层设计与通信终端用户建模,将理论模型所生成的用户数据、行为规律等与分层设计的模型架构相结合,实现用户行为仿真的整个流程。本文设计并创建了用户分配模块(UsrCre)、用户终端仿真模块(SiPp)、控制模块(Control)等,主要模块的功能介绍如下:

#### 1) 控制模块

控制模块位于最上层,是整个仿真实现过程的控制中心,下层模块为其提供服务。控制模块用于控制用户分配模块和终端仿真模块,传递行为指令,决定通信方式、通信频率等。

#### 2) 用户分配模块

用户是卫星用户行为仿真中的基础,为实现多用户的真实仿真,本文设计了用户分配模块。以第 3.1.2 节建立的通话记录为基础,将通话记录的数据库看作一个用户池,其中每一行记录代表一个用户实体。用户以用户 ID 作为区分标准,即用户池中的主键。为了保证用户的逼真性,将每个用户的 IP 地址也保存在用户池中。用户属性还包含用户名、用户密码、被呼叫方 ID 等,具体见表 1。用户分配模块可以获取用户池中的用户名、密码、被叫 ID 等信息,传递给用户仿真终端模块。

表 1 用户信息

属性	描述
ID	用户主键唯一标示
被叫 ID	被叫用户的标示
用户名	用户姓名,用于认证
密码	用户密码,用于认证
IP	用户实体的模拟 IP 地址

#### 3) 场景匹配模块

场景文件控制通信流程,在线注册、短信、通话的通信过程都由场景文件来控制。本文通过场景匹配模块控制仿真终端的通信方式及通信过程。

#### 4) 用户终端仿真模块

用户终端仿真模块是通信模拟模块,本文采用满足 SIP 协议标准的可配置流量生成工具 SiPp 进行通信模拟。通过配置文件可以实现高效的事件驱动,对用户代理(User Agent, UA)进行仿真。采用 open-loop 模式生成可控呼叫。在接收处理部分利用 epoll 模型,该模型没有最大连接限制,其效率不随 FD 数目的增加而线性下降,与 select/poll 等模型相比,效率大幅提升。仿真终端通过读取通信场景文件,调用呼叫管理模块与速率控制模块,生成通信报文,下放给下层,形成底层流量。

模块间的调用过程如图 5 所示。

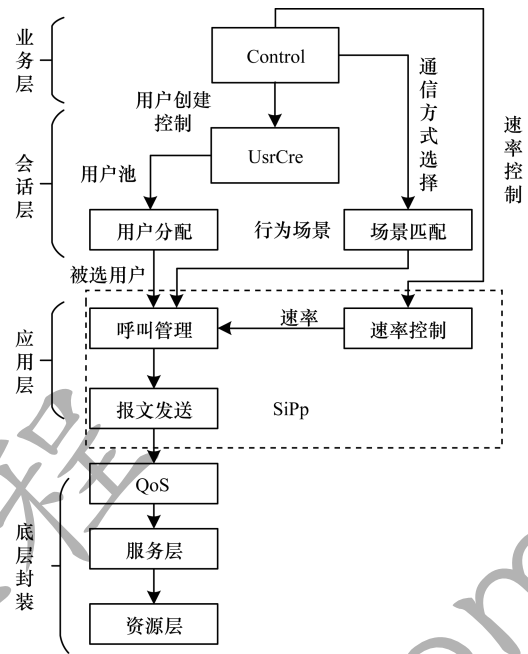


图 5 仿真模块调度示意图

具体调用步骤如下:

**步骤 1** 控制模块创建虚拟 IP,这是实现单节点多用户逼真仿真的前提条件,保证仿真用户拥有自己独立的 IP 地址。

**步骤 2** 控制模块调用用户分配模块和场景匹配模块,分配并管理用户池与通信场景文件。用户池保存用户的信息,通信场景文件控制通信的方式与行为的选择。

**步骤 3** 启动用户终端仿真模块 SiPp,通过从用户池中随机选取用户,选择场景文件,对 UA 进行仿真,模拟用户终端。

**步骤 4** 控制模块生成控制脚本并发送控制信息,控制用户终端仿真模块的行为,主要包括 3 个方面。

1) 向用户终端仿真模块发送注册流程控制信息与行为控制脚本,UA 向模拟服务节点发送注册请求,仿真终端在线行为。

2) 向用户终端仿真模块发送呼叫流程控制脚本与呼叫控制信息,建立用户终端仿真模块仿真呼叫。

3) 向用户终端仿真发送 Message 流程控制脚本与控制信息,向用户终端仿真模块仿真短消息。

**步骤 5** 终端仿真模块完成消息的创建,调用呼叫管理模块,生成通信报文。速率控制模块控制报文的频率、时间等行为。底层对报文进行封装,保证服务质量并最终生成仿真流量。

### 3.3 仿真节点的自动化接入

为保证仿真过程灵活机动,实验环境可动态配置,本文基于多尺度仿真架构,根据终端用户的特点提出自动化部署方案,设计信息读取模块与部署模块,并创建节点拓扑文件。文件包含终端节点和网

络信息。其中,终端节点主要包括用户群节点、信关站节点等。具体实现步骤如下:

**步骤 1** 按需配置节点信息与网络信息,并将信息存储于对应的库文件中。

**步骤 2** 设计信息读取模块,调用节点库、网络库及节点配置文件,并将信息传递给部署模块。

**步骤 3** 部署模块读取信息并调用 OpenStack 的 Nova 与 neutron 组件。

**步骤 4** Network 组件获取从部署模块传递过来的网络信息,创建生成子网。Nova 组件获取从部署模块传递过来的节点信息、网络信息,创建对应的轻量级用户群节点、全虚拟化信关站节点及路由节点,并将节点分配到相应的已建网络。各模块间的关系和执行过程如图 6 所示。

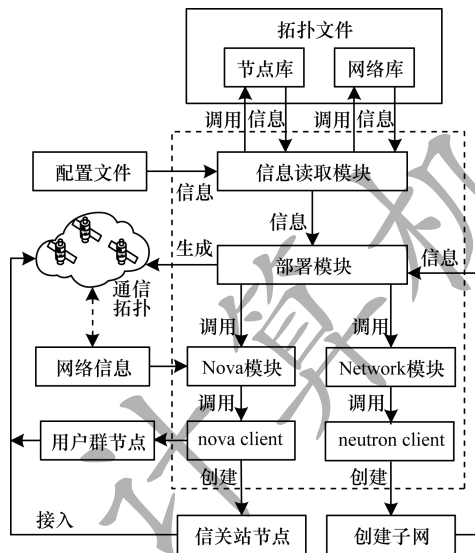


图 6 用户行为仿真节点动态部署

## 4 实验分析与评估

运用本文方法构建低开销、支持大规模仿真的实验环境,以 OpenStack 分布式架构作为仿真平台。控制节点处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v4 × 2,内存 64 GB;网络节点处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2609 v3 × 2,内存 16 GB;计算节点 1 处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-4607 v2 × 4,内存 32 GB;计算节点 2 处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2 × 2,内存 32 GB;计算节点 3 处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v3 × 2,内存 32 GB;计算节点 4 处理器为 Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v3 × 2,内存 16 GB。操作系统均采用 CentOS 7.2, OpenStack 的版本是 Mitaka。

在节点 1、节点 3、节点 4 集成 KVM 的虚拟化方式,节点 2 融合轻量级虚拟化 Docker 容器技术。在节点 1 部署卫星仿真节点,在节点 3、节点 4 部署信关站仿真节点,其中,在节点 3 中部署 8 个信关站仿真节点,在节点 4 部署 2 个信关站仿真节点。卫星仿真节

点采用透明转发的方式完成卫星的中继转发功能,地面站仿真节点中集成通信管理服务。在节点 2 中部署 20 个用户群仿真节点。采用自动化部署方案,将仿真节点接入仿真网络,构建实验拓扑。采用链路仿真的方式仿真卫星链路。根据卫星网络中用户群的地域分布特点,假定一个卫星负责一个区域,对应区域内部署相应的仿真用户群,具体的网络组成如图 7 所示。其中, GEO1、GEO2、GEO3 为高轨卫星, LEO1 ~ LEO7 为低轨卫星, Station 为信关站, USR 代表用户仿真节点群。卫星节点、信关站节点采用 KVM 虚拟化技术,用户节点采用轻量级虚拟化 Docker 容器技术。在自动化分配资源时,卫星节点分配 1 个虚拟处理器、1 GB 内存,信关站节点分配 2 个虚拟处理器、2 GB 内存,用户仿真节点分配 1 个虚拟处理器、1 GB 内存。

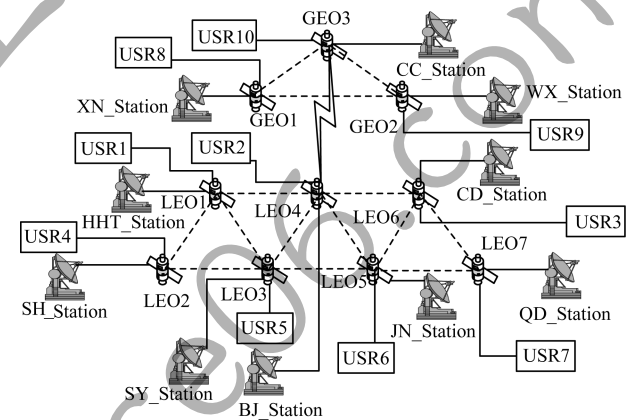


图 7 大规模实验拓扑

### 4.1 行为仿真可行性与逼真性实验

为验证用户行为仿真方法的逼真性,本文在信关站 (Station) 中集成成熟的通信管理服务 OpenSIPS<sup>[21]</sup>,以验证本文方法的可行性。选取图 7 拓扑中用户群仿真节点 USR1、USR7 和信关站 HHHT\_Station、QD\_Station 进行验证。其中,在 USR1 中处于同一卫星负责范围的本地用户 Client1 与 Client2 在 HHHT\_Station 中登记在册,USR7 中的仿真用户 Client3、Client4 与 Client1、Client2 处于不同卫星覆盖范围,为跨域用户,在 QD\_Station 中登记在册。USR1 与 USR7 分别属于 net1:72.19.0.0/16 与 net7:72.37.0.0/16,其用户属性如表 2 所示。

表 2 仿真用户属性

ID	用户名	密码	IP
1	Client1	1234	72.19.0.3
2	Client2	1234	72.19.0.4
3	Client3	1234	72.37.0.3
4	Client4	1234	72.37.0.4

激活用户实体,与服务节点通信,以测试用户行为的注册、通话与短信功能。在服务器侧统计在

线用户与通信详情,保证仿真的可行性与真实性。因为 Client1 与 Client2 是 HHHT\_Station 中的用户,所以在 HHHT\_Station 中在线成功,而 Client3 是 QD\_Station 中的用户,所以在 HHHT\_Station 中认证失败,在 QD\_Station 中在线成功。只有在线成功的用户才有权限知道呼叫方的详细地址,享受通话、短信等服务,将 Client1、Client2、Client3 在线注册,而将 Client4 作为离线用户,测试结果如表 3、表 4 所示。

表 3 注册测试结果

用户名	服务节点	在线结果
Client1	HHHT_Station	在线成功
Client2	HHHT_Station	在线成功
Client3	HHHT_Station	认证失败
Client1	QD_Station	认证失败
Client2	QD_Station	认证失败
Client3	QD_Station	在线成功

表 4 通话测试结果

用户名	被呼叫名	通话结果
Client1	Client 2	接通
Client1	Client 3	接通
Client2	Client 3	接通
Client1	Client4	失败

短信的测试分为离线与在线测试,注销 Client2,确定 Client1 与 Client3 在线,分别测试在线短信与离线短信。因为 Client2 离线,服务节点不知道 Client2 的短信转发位置,所以将其暂存在服务节点的数据库中。由于 Client2 不在线,其无权与其他用户通信,因此短信发送失败,具体测试结果如表 5 所示。由上述结果可知,仿真具有逼真性,证明了本文仿真方法的可行性与真实性。

表 5 短信测试结果

用户名	被呼叫名	短信结果
Client1	Client2	离线,服务节点暂存
Client1	Client3	收到短信
Client2	Client3	失败

### 4.2 行为模型驱动实验

基于 3.1 节的用户行为建模,创建用户行为模型,驱动仿真节点,实现场景复现的功能。通过采集精确的通话数据集,统计分析每时每刻呼叫到达的数量和通话详情,并对其进行建模,驱动仿真在线通信过程。由于隐私策略和访问权限的限制,短时间内难以采集大规模的真实通信网络数据,本文采用 BA 算法生成反映通信关系的网络文件,并基于泊松分布的规律控制规则,证明模型驱动的可实现性。

为便于观察,本文创建一个较小规模的场景,生成包含 200 个用户节点的拓扑文件,如图 8 所

示。节点的大小反映了节点度的大小,节点越大代表与它联系的人越多,节点间的连线代表存在的通信关系。图 9 给出节点试探统计图。由图 9 可以看出,通过算法创建的用户模型,其节点的度满足幂率分布,具备无标度的特性。

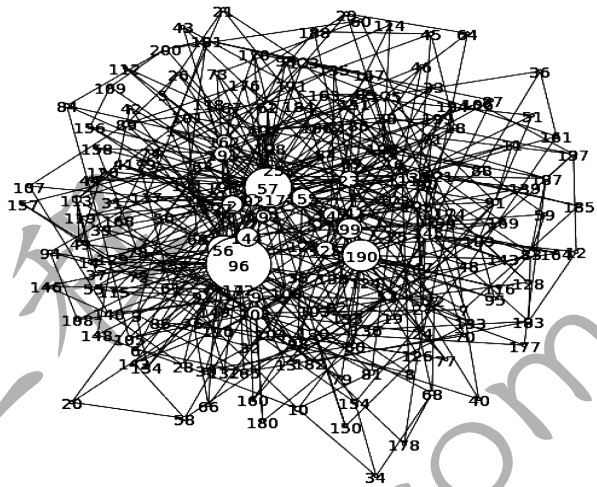


图 8 通信网络描述示意图

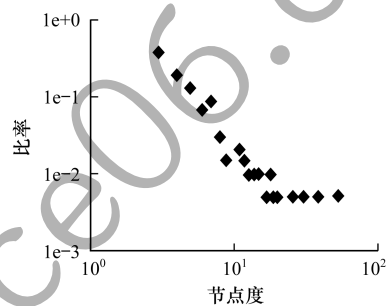


图 9 节点度统计结果

根据生成的反映通信关系的文件,大约存在 600 条通话记录,本文针对生成的通信描述文件进行通话行为仿真。令呼叫到达服从均值为 10 的泊松分布,每隔 1 s 采集呼叫到达的用户数,共仿真 60 s。图 10 为采集到的呼叫到达的测试结果,图 11 为图 10 的统计直方图。由图 10、图 11 可知,用户到达的整体分布与模型一致,具有泊松分布的特性。上述结果表明,用户行为模型可以很好地驱动仿真节点,实现行为仿真,复现通信行为。

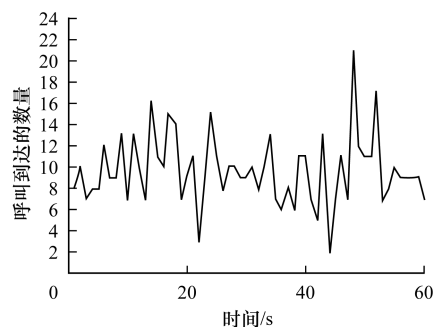


图 10 呼叫到达数的测试结果

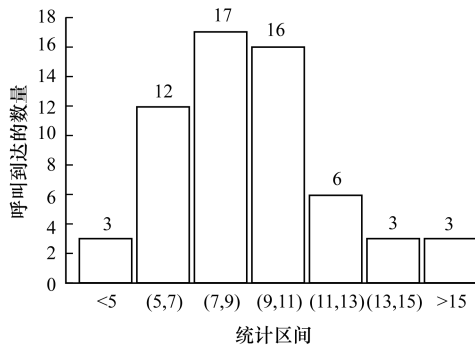


图 11 呼叫到达数的统计直方图

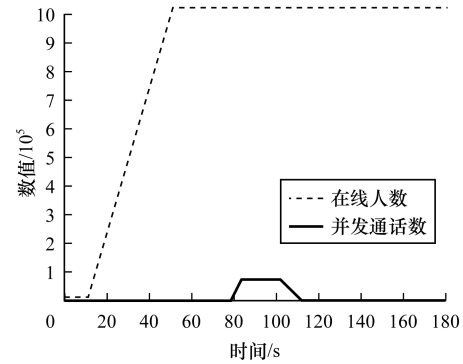


图 13 在线人数与并发通话的曲线

### 4.3 注册与通话的高并发实验

现实环境中的通信系统需要向大规模用户提供服务,为天地一体化建设提供实验支撑,因此,仿真平台应具备大规模实验的能力。本文针对注册与通话行为进行压力测试。基于图 7 搭建的仿真拓扑,创建分布式大规模仿真用户,为便于并发测试的统一调度与统计,每个卫星负责 10 万个用户,1 万对并发通话。其中,注册用户按照划分的用户群组,在线用户和并发通话的增长速度均为每个节点每秒增加 1 000 个,通话时长为 30 s。通过统一驱动,触发仿真模型并进行仿真。

采集汇总模块每 2 s 采集一次数据,实验结果如图 12、图 13 所示。在图 12 中,内存曲线由 2 个部分组成,分别对应于用户的登记在线过程和会话的建立过程。第 1 部分曲线呈现线性增长的趋势,然后到达平稳状态。这个过程与图 13 中在线人数曲线的趋势一致,反映出在线人数与内存的正相关关系,用户数到达 100 万后,曲线趋于平缓,每 1 万用户的资源占用平均值为 6.58 MB。内存曲线的第 2 部分由 2 段抛物线组成,这一部分与会话的建立与释放过程相对应,通过 INVITE 等确立会话关系的过程与第 1 段抛物线相对应。2 段抛物线间的平稳曲线,反映了信道资源的占用情况,每 1 万并发通话的平均占用值为 36.27 MB,通过 BYE 等结束会话的过程与第 2 段抛物线相对应,会话结束后释放资源,曲线趋于平缓并与会话前的曲线高度保持一致。上述实验结果表明,本文设计的方法可以实现 100 万用户在线和 10 万并发通话。

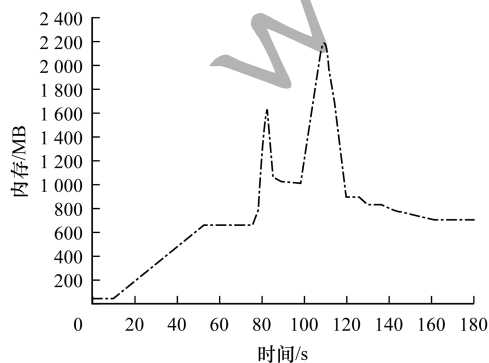


图 12 采集汇总模块的内存曲线

## 5 结束语

本文借助云平台技术,提出多尺度虚拟化的用户行为仿真方法。通过多尺度虚拟化技术和基于模型驱动的设计方法,实现高逼真性的大规模仿真。实验结果表明,该方法能够实现大规模用户行为的高并发仿真。下一步将对天地一体化网络中用户的空间移动模型进行研究。

### 参考文献

- [1] 张乃通,赵康健,刘功亮. 对建设我国“天地一体化信息网络”的思考[J]. 中国电子科学研究院学报,2015,10(3):223-230.
- [2] SIATERLIS C, GARCIA A P, GENGE B. On the use of emulab testbeds for scientifically rigorous experiments[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials,2013,15(2):929-942.
- [3] 袁晓,蔡志平,刘书昊,等. 大规模网络仿真软件及其仿真技术[J]. 计算机技术与发展,2014,24(7):9-12.
- [4] KANG Hailong, JIANG Xiujie, XIONG Weimin. Protocol simulation of inter-satellite communication for satellite formation network based on 802.11[J]. Electronic Design Engineering,2016,24(1):82-85.
- [5] 魏德宾,潘成胜,韩睿. 卫星网络业务自相似特性分析[J]. 计算机科学,2013,40(5):67-69.
- [6] 郑艺,王玉文,孟凡计. 卫星通信网建模与仿真方法研究[J]. 计算机仿真,2013,30(7):64-67.
- [7] LI Haifeng, ZHOU Huachun, ZHANG Hongke, et al. EmuStack: an OpenStack-based DTN network emulation platform[C]// Proceedings of 2016 International Conference on Networking and Network Applications. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2016:387-392.
- [8] ZEHE D, KNOLL A, CAI Wentong, et al. SEMSim cloud service: large-scale urban systems simulation in the cloud[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2015,58(2):157-171.
- [9] DUTTA A, GNAWALI O. Large-scale network protocol emulation on commodity cloud [C]// Proceedings of IEEE Global Communication Conference. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014:1114-1119.

(下转第 189 页)

(上接第 172 页)

- [10] LOYOLA P, ROMÁN P E, VELÁZQUEZ J D. Clustering-based learning approach for ant colony optimization model to simulate web user behavior [C]//Proceedings of IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2011:457-464.
- [11] 朱敏, 胡访宇. 基于移动通话行为的动态社交网络建模电子技术[J]. 电子技术, 2013(5):10-13.
- [12] DOMBRY C, KAJ I. The on-off network traffic model under intermediate scaling[J]. Queueing Systems, 2011, 69(1):29-44.
- [13] 宋涛, 李志强, 何家富, 等. 基于 BISANTE 用户行为模型的 DVB-RCS 宽带卫星网络仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(1):190-193.
- [14] XAVIER M G, NEVES M V, ROSSI F D, et al. Performance evaluation of container-based virtualization for high performance computing environments [C]//Proceedings of Euromicro International Conference on Parallel, Distributed and Network-Based Processing. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013:233-240.
- [15] 肖桂荣, 肖荣生. 面向 PaaS 云平台的轻量级虚拟化性能测试研究[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2017, 45(6):840-845.
- [16] CHAE M S, LEE H M, LEE K. A performance comparison of linux containers and virtual machines using Docker and KVM[J]. Cluster Computing, 2017(4):1-11.
- [17] 李春艳, 张学杰. 基于高性能计算的开源云平台性能评估[J]. 计算机应用, 2013, 33(12):3580-3585.
- [18] 方滨兴, 贾焰, 李爱平, 等. 网络空间靶场技术研究[J]. 信息安全学报, 2016, 1(3):1-9.
- [19] 刘胜久, 李天瑞, 洪西进, 等. 基于矩阵运算的复杂网络构建方法[J]. 中国科学信息科学, 2016, 46(5):610-626.
- [20] 李全刚, 刘峤, 秦志光. 基于主题模型的通信网络建模与仿真[J]. 计算机研究与发展, 2016, 53(1):206-215.
- [21] OpenSIPS 3.0 stable release [EB/OL]. [2018-05-21]. <http://www.opensips.org/>.

编辑 樊丽娜