

基于模板解析的天地一体化信息网络用户行为流量回放技术

薛青松, 王晓锋

(江南大学人工智能与计算机学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 面向行为复杂与协议多样的天地一体化信息网络用户行为仿真需求, 设计一种基于云计算与虚拟化技术的天地一体化信息网络用户行为流量回放架构。进一步研究基于深度报文解析的用户行为流量自动解析与模板生成技术, 以及基于流量模板的天地一体化信息网络用户行为流量回放技术, 实现各类用户行为流量的统一、自动化和逼真仿真。构建具有6颗天基骨干网卫星、66颗天基接入网卫星的天地一体化信息网络仿真场景, 宽带用户行为与窄带用户行为协议流量模板生成与流量回放实验验证表明, 该方法能够实现多样化的用户交互行为的仿真, 可为天地一体化信息网络仿真提供有效支撑。

关键词: 天地一体化信息网络; 用户行为仿真; 流量回放; 流量模板; 云计算

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021032

User Behavior Traffic Replay Technology for Space-Integrated-Ground Information Network Based on Profile Analyzing

XUE Qingsong, WANG Xiaofeng

School of Artificial Intelligence and Computer Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: Faced the needs of user behavior emulation of the space-integrated-ground information network with complex behaviors and diverse protocols, an architecture based on cloud computing and virtualization technologies for replaying user behavior traffic in the space-integrated-ground information network was designed. Furthermore, a user behavior traffic automatic analysis and traffic profile generation technology based on deep packet inspection, and a user behavior traffic replay technology of the space-integrated-ground information network based on traffic profile were researched, to achieve unified, automated, and realistic simulation of miscellaneous kinds of user behavior traffic. An emulation scenario of a space-integrated-ground information network with 6 space-based backbone network satellites and 66 space-based access network satellites was constructed. The experimental verification of protocol traffic profile generation and traffic replay of the broadband user behavior and narrow-band user behavior showed that the emulation of diversified user interaction behaviors could provide effective support for the emulation of the space-integrated-ground information network.

Keywords: space-integrated-ground information network, user behavior emulation, traffic replay, traffic profile, cloud computing

1 引言

随着航天技术的发展, 全球信息共享, 构建天地网络融合的天地一体化信息网络引发了广泛关注。在维护国家安全方面, 天地一体化信息网络是具有重大战略意义的基础信息设施。同时, 人们的日常生活越发依赖通信网络, 对于天地一体化信息网络的远程通信需求也日益增加^[1]。

天地一体化信息网络由天基骨干网、天基接入网、

地基节点网、地面互联网、移动通信网等多种异构网络互联互通而成, 其网络规模庞大、结构复杂、高度动态, 技术体制多样, 要解决大量技术难点耗时耗资巨大, 因此, 有必要建立天地一体化信息网络仿真实验平台, 对各类新技术与安全防御策略进行试验验证^[2]。天地一体化信息网络包括天基、空基、陆基、海基等用户, 接入方式包括窄带接入与宽带接入等, 其具有用户规模庞大、行为复杂、

收稿日期: 2021-07-12; **修回日期:** 2021-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61972182); 国家重点研发计划项目 (No. 2016YFB0800305)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No. 61972182), The National Key R&D Program of China(No. 2016YFB0800305)

协议多样的特点。针对天地一体化信息网络上述特点带来的挑战,有必要重点研究用户行为仿真技术,从而有效支撑天地一体化信息网络的新技术验证与安全评测。

当前,云平台具有高可扩展、实时仿真的优势^[3],可为天地一体化信息网络用户行为仿真提供高性能、高灵活度的基础仿真环境,而虚拟化技术^[4]在资源的有效利用、动态调度和稳定性能等方面具有巨大的优势,因此,基于云计算、虚拟化技术的天地一体化信息网络仿真成为主流^[5]。在用户行为仿真方面,流量回放方法具有高逼真性的优势,近年来在真实网络模拟、网络测试评估等领域受到更多关注^[6]。

2 相关工作

目前围绕面向天地一体化信息网络用户行为仿真的相关工作主要分为两个方面:天地一体化信息网络仿真和仿真流量生成。

在天地一体化信息网络仿真方面,一些仿真软件如NS2、NS3、OPNET,面对复杂网络场景时无法模拟运行真实用户业务流量,难以支撑天地一体化信息网络仿真平台的安全验证。参考文献[7]描述卫星互联网仿真场景,面向天地一体化信息网络仿真场景多样化、高逼真的特点,提出一种云计算环境中卫星链路仿真方法。参考文献[8]融合OpenStack云平台与卫星工具包(Satellite Tool Kit, STK)的优势,通过模型驱动的用户行为仿真方法,再现了大规模、多协议、高并发的宽带用户通信行为。参考文献[9]面向天地一体化信息网络中移动通信用户,采用了多尺度的虚拟化技术,使用模型驱动窄带用户终端,实现仿真通信行为。从上述天地一体化信息网络仿真相关工作来看,当前云计算与虚拟化技术能够为天地一体化信息网络仿真提供平台支撑,相较于仿真软件有着一定的优势。

在仿真流量生成方面,主要有流量模型与真实流量回放这两种生成方式。参考文献[10]介绍了互联网流量模型发展历程与研究成果。参考文献[11-12]基于流量模型方法,设计了根据真实网络流量中流量的数学特征建立模型生成仿真流量的方法。由于真实网络场景复杂多变,建立的流量模型的逼真性无法保证,因此该方法存在一定的局限性。相比于流量模型,流量回放方法采用真实流量复现的方式,更加符合天地一体化信息网络中用户行为仿真的高逼真需求。参考文献[13]提出了一种交互式的流量回放的方法与系统TCPOpera,通过现有的流量文件判定TCP/IP会话状态,并以此进行TCP流量回放。参考文献[14]提出了一个针对网络设备进行压力测试的开源工具TCPReplay,能够重放捕获的流量并按照客户端与服务端分类。参考文献[15]提出了一个C/S架构的流量回放工

具TCPCopy,客户端与服务端之间通过TCP连接,在捕获测试机器真实流量后,转移到客户端,使得回放更加真实。上述文献中提及的基于流量回放的仿真流量生成方法,能够在使用真实流量保证数据真实性与可靠性的前提下,满足特定真实网络场景下的实验需求。但是这些工具存在一定的不足,生成的流量较为单一,难以满足天地一体化信息网络行为多样的特点和需求。

3 天地一体化信息网络用户行为流量回放体系

3.1 天地一体化信息网络场景与用户行为分析

天地一体化信息网络由包括天基骨干网、天基接入网和地基节点网在内的天基网络、地面互联网、地面移动通信网等多种异构网络互联、融合而成^[16]。其中天基骨干网由高轨卫星节点联网组成,负责天基网络通信;天基接入网通过高轨卫星移动接入网、低轨星座接入网等为用户提供网络接入服务;地基节点网包括关口站、一体化网络互联节点等地基节点,实现天基网络与地面互联网、移动通信网的互联功能。

在天地一体化信息网络用户行为仿真网络中,天基骨干网以高轨卫星为通信卫星,天基接入网由低轨卫星星座、Ka星座与Ku星座组成,地基节点网中的信关站节点通过Ka星座、Ku星座接入天基骨干网。地面互联网与移动通信网中的通信经过信关站后使用卫星通信链路传送,经由卫星仿真节点转发,实现跨网域、跨空域通信。地面互联网与移动通信网分别连接宽带接入用户与窄带移动接入用户,相应的用户行为分析如下。

(1) 宽带用户行为分析

在天地一体化信息网络的地面互联网中,宽带接入用户作为通信用户的重要组成部分,其行为由大量占用带宽资源、频繁使用数据传输的网络活动构成。与传统互联网中的宽带用户行为类似,天地一体化信息网络的地面互联网中接入的宽带用户行为具有范围广泛、规模庞大、行为多样的特点。在宽带用户行为产生的流量中包含了多种应用类型的协议,可以按照行为分为网页浏览、文件传输、电子邮件、社交娱乐等。如何从复杂的宽带行为流量中分类出各种应用类型的协议流量,是宽带用户行为流量回放的研究关键。

(2) 窄带用户行为分析

天地一体化信息网络中的移动通信网接入窄带移动用户,基础设施部署广泛,接入限制相对较少,窄带移动通信用户接入时间随机,接入次数频繁,这也导致了用户的动态性和接入行为的不确定性^[17]。其用户行为种类多样,包含在线注册、短信、通话等^[18]。在对窄带用户行为流量回放研究中,主要对在线注册、短信以及通话3种窄

带行为进行流量分类与回放,并通过回放3种真实的窄带通信数据报文实现对在天地一体化信息网络中窄带移动通信行为的仿真。

面向上述天地一体化信息网络仿真场景,针对宽带互联网用户行为与窄带移动通信网中用户行为多样化的特点,本文建立了基于云平台的天地一体化信息网络用户行为流量回放仿真体系。

3.2 天地一体化信息网络用户行为流量回放架构

随着云平台和虚拟化技术不断发展,已经可以提供对可扩展与高逼真虚拟网络的支持,基于云平台和虚拟化的网络仿真已经成为一种新兴的研究趋势^[19-20]。OpenStack云平台^[21]融合了软件定义网络(Software Defined Network, SDN)^[22]、全虚拟化技术(Kernel-Based Virtual Machine, KVM)、轻量级虚拟化(Docker)等先进技术,已经成为业界最前沿的主流云平台,具有高效、稳定等特点。因此本文选取OpenStack作为天地一体化信息网络用户行为流量回放仿真平台。

用户行为流量回放架构如图1所示。基于OpenStack云平台,结合STK仿真优势,搭建大规模卫星网络,通过STK/MATLAB接口对卫星链路的参数实现动态控制,保证仿真平台的逼真性。天地一体化信息网络用户行为流量回放仿真平台采用分布式架构,由控制节点、网络节点及若干计算节点组成。架构中所有节点采用网络时间协议(Network Time Protocol, NTP),以控制节点为基准,从而保证仿真网络中各个节点流量回放时的同步性。控制节点通过Glance组件提供架构平台中用户回放节点镜像管理,负责构建天地一体化信息网络中用户行为流量回放网络拓扑。计算节点通过Nova组件创建并运行虚拟节点,采用全虚拟化技术与轻量级虚拟化技术,为虚拟节点与仿真网络提供稳定的服务,同时,利用虚拟交换机OpenvSwitch连接虚拟节点网卡,实现仿真网络管理。网络节点中采用Neutron组件提供动态主机配置协议(Dynamic Host Configuration Protocol, DHCP),并通过命名空间(Namespace)下发控制命令,管理仿真节点并采集流量运行数据。基于图1的天地一体化信息网络用户行为流量回放架构描述如下。

(1) 用户行为统一模板库构建

用户行为统一模板库负责用户行为流量模板的生成、配置和下发工作。通过流量采集模块中的流量捕获工具从真实网络中抓取数据包保存为原始流量文件。流量预处理模块在对原始流量文件进行非法数据包过滤后生成待分类的流量文件并传输到深度报文解析模块。根据预先构建的协议流量规则库,分类不同种类应用协议并生成协议

流量模板,最后将协议流量模板入库实现用户行为统一模板库的构建。

(2) 仿真任务执行

在一次天地一体化信息网络用户行为流量回放仿真任务执行流程中,试验人员通过节点管控端下发流量回放任务。用户仿真节点通过行为控制模块、模板解析模块、回放配置模块和回放执行模块4个功能模块组合运行,从而执行完整的天地一体化信息网络用户行为流量回放流程。

行为控制模块接收来自管控端的控制命令与回放参数。回放控制命令包括流量启动与停止,暂停与更新等;回放参数中指定了协议流量模板,实现不同行为流量的回放,模拟宽带用户、窄带移动通信用户的用户行为,实现天地一体化信息网络中用户行为仿真。

模板解析模块接收应用协议流量模板库下发的回放参数中的流量模板,解析得到协议类型、报文个数、报文源/目的地址、报文交互次序等流量信息,并传递给回放配置模块。

回放配置模块接收来自模板解析模块的流量模板信息,执行用户行为流量回放的准备工作,生成配置文件,确定流量回放的卫星链路。

回放执行模块通过解析流量模板信息确定回放类型,然后构造数据包报文并在设置报文发送速率、时间等参数后,交由报文发送程序在目标网络的卫星链路中回放。

4 用户行为流量回放关键技术研究

基于上述体系构建面向天地一体化信息网络用户行为流量回放,研究应用协议流量分类、协议流量模板生成和解析模板的流量回放方法,具体关键技术如下。

4.1 用户行为统一模板库构建

天地一体化信息网络流量包含多种应用协议,为了构建用户行为统一模板,提升应用协议覆盖率,本文提出了一种基于深度报文解析的协议流量模板生成方法,详细流程如图2所示。

(1) 流量文件解析流程:首先读取网络流量文件中的数据包,按序执行数据链路层、网络层、传输层、应用层的分析。根据数据包五元组信息标识一条网络流,如果数据包报文负载内容符合相应解析规则,则设置网络流的协议识别结果为对应的协议;读入下一个数据包,重复以上步骤,直到流量文件的最后一个数据包结束,返回所有网络流对应的协议名称作为协议解析结果。

(2) 协议流量生成:根据协议解析结果,再次分析输入流量文件,匹配当前数据包所属网络流的解析协议名称,保存至以协议名称命名的流量文件,继续读取后续数据包,

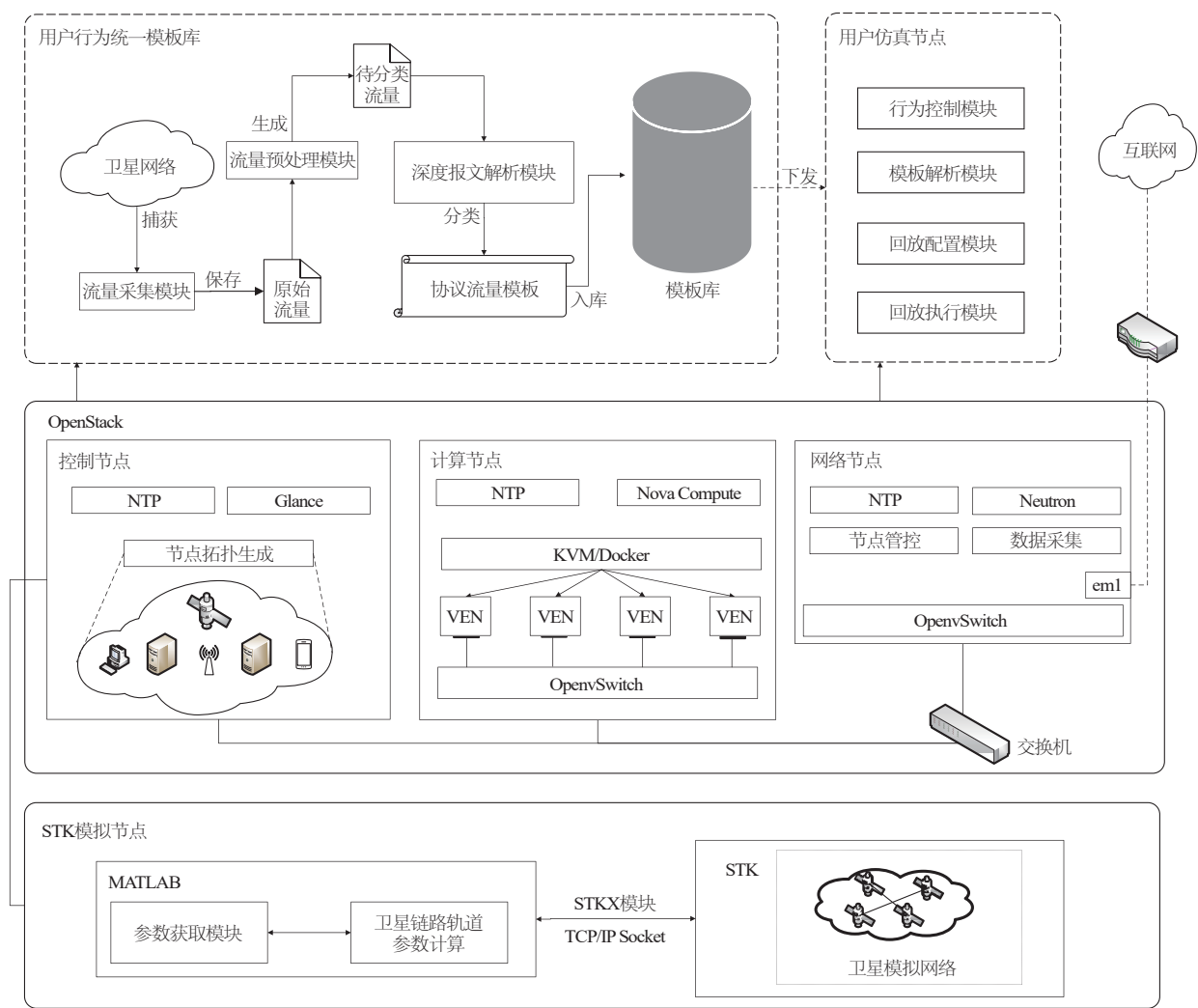


图1 天地一体化信息网络用户行为流量回放架构

将所具有相同协议名称的网络流组合得到协议流量文件。

(3) 协议模板生成：执行模板转换程序，读取协议流量文件中的数据包，记录报文类型、报文源/目的地址等参数，并以Base64格式编码保存数据包负载，将一个数据包转换成JS对象简谱（JavaScript Object Notation, JSON）格式并保存，循环处理所有数据包的信息后，导出所有的协议流量模板。

协议流量模板生成后，根据流量模板的协议类型，进行宽带用户行为与窄带用户行为的分类，分别保存不同类型用户行为的流量模板入库。对于互联网宽带用户行为，常见的用户行为（如网页浏览、文件传输、电子邮件、视频）产生的协议流量分类为宽带流量模板，具体入库信息见表1。

对于窄带移动用户行为，选取通话、短信等协议流量文件，进行文件读取与特征提取，得出包括用户标识

ID、用户名、IP地址等信息，生成窄带流量模板，具体入库流量模板信息见表2。

4.2 基于模板解析的流量回放方法

在用户行为统一模板库构建完成后，用户仿真节点请求下发应用协议模板，交由节点中的回放执行模块进行

表1 宽带用户行为流量模板入库信息

ID	源文件名	协议类型	流量类型	大小	路径
流量编号	分类的源文件	宽带应用协议名称	TCP/UDP	模板占用字节数	协议模板存放路径

表2 窄带用户行为流量模板入库信息

ID	源文件名	协议类型	用户标识ID	用户名	IP地址
流量编号	分类的源文件	窄带应用协议名称	标识唯一用户	用于用户认证	模拟用户的IP地址

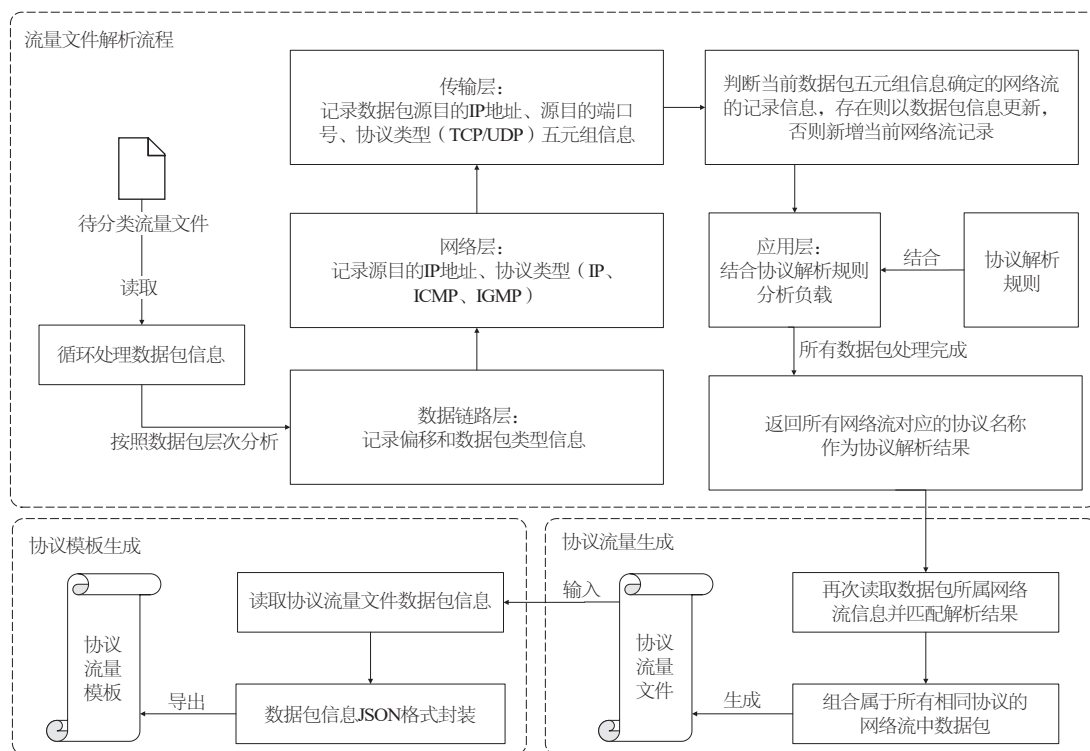


图2 协议流量模板生成流程

流量回放操作。首先，读取输入流量模板文件中存储的JSON对象，对于每一个数据包的JSON格式，解析报文类型、报文源/目的地址等数据包的信息参数。然后，数据包构造程序将接收参数并按照数据链路层、网络层、传输层、应用层的顺序逐层填充数据包信息，同时为了生成与真实流量数据包相同的负载，通过Base64解码数据包负载，进行应用层填充。循环执行所有数据包JSON格式对象后，完成通过解析协议流量模板生成数据包。

由于基于流量模板的回放方法在回放时需要确保数据包交互时间次序与原始流量文件相同，从而确保整个协议流量回放状态不被破坏，因此，从协议流量模板中第一个数据包报文开始到最后一个数据包报文结束，计算相邻数据包时间间隔并保存。为了防止原始流量文件生成的模板中某两个相邻数据包间隔过小从而容易造成回放顺序错乱的情况，确定了一个数据包间隔时间最小值 $T_{\min}$ ，如果出现当前数据包间隔 $T_{\text{cur}} < T_{\min}$ ，则将 T_{cur} 的值设置为 $T_{\min}$ 。在流量回放时，当前流量模板中的第一个数据包报文发出后，后续数据包报文则需按照已保存的时间间隔发送。

5 实验与结果分析

5.1 天地一体化信息网络用户行为实验场景

本文提出的天地一体化信息网络用户行为流量回放

架构，基于OpenStack的Mitaka版本与STK11搭建。实验环境中，控制节点处理器为Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v4×2，内存为64 GB；网络节点处理器为Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2×3，内存为64 GB；所有计算节点处理器均为Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2620 v2×3，内存为64 GB；采用虚拟交换机OpenvSwitch提供虚拟网络；所有节点的操作系统均为CentOS 7.5。

天地一体化信息网络用户行为流量回放实验场景主要包括天基骨干网、天基接入网和地基节点网。基于3.2小节的仿真架构，通过STK卫星仿真模块，生成拓扑描述文件，控制节点解析拓扑描述文件，部署天地一体化信息网络用户行为流量回放仿真场景。计算节点1部署天基骨干网节点；计算节点2部署天基接入网节点，共有66颗低轨卫星以及Ka、Ku卫星节点；计算节点3部署地基节点网，主要由信关站、地面用户节点及地面互联网组成。天地一体化信息网络用户行为流量回放场景如图3所示。

天基骨干网由双轨道同步卫星星座构成，图3中6颗高轨卫星分别命名为GEO1, GEO2, ..., GEO6；天基接入网中，Ka卫星和Ku卫星分别命名为KA、KU，负责用户接入天基骨干网，低轨卫星分布在6个轨道上面，主要为地面移动用户提供电话、短信等服务；地基节点网中，

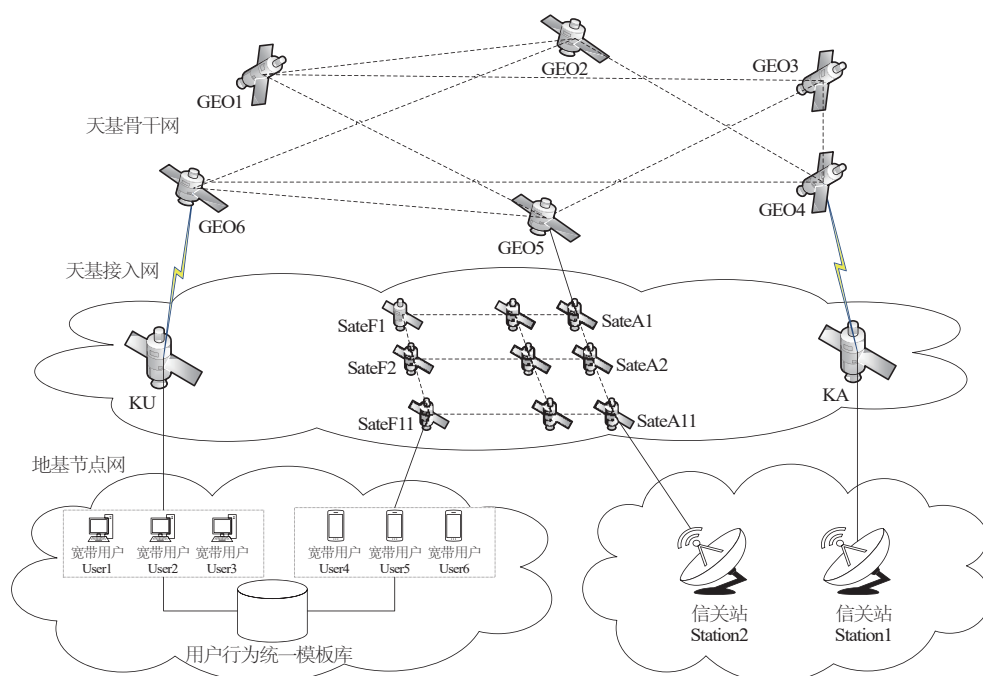


图3 天地一体化信息网络用户行为流量回放场景

地基用户节点分为宽带用户行为回放节点与窄带用户行为回放节点，通过调用模板库中不同的行为模板，以流量回放的方式实现与地基节点网中信关站的通信行为。

5.2 天地一体化信息网络用户流量模板生成的有效性

天地一体化信息网络规模庞大，用户行为多样，网络流量协议种类繁多复杂。为了验证本文提出的模型库构建方法的有效性，测试数据集采用了应用互联网数据分析中心CAIDA^[23]网站中提供的Telescope Educational。该数据集通过在当地互联网服务提供商（Internet Service Provider, ISP）处，构建流量监测系统，捕获经过监测系统后的互联网中用户行为所产生的流量，最后生成数据集文件example.pcap。

由于整个数据集文件过大，使用example.pcap的前100万个数据包作为流量输入文件。在图3的实验场景中，地基节点网中设置统一模型库节点，输入流量文件中的报文个数依次为前1 000个、1万个、10万个、50万个、100万个，对本文所提出的天地一体化信息网络用户行为统一模型库构建方法进行有效性实验评估。本文方法与开源工具解析协议数目对比，由图4可知，随着报文数目的增加，本文所提出的协议解析方法识别出的协议数目不断增加，而其他两个开源流量识别工具OpenDPI和L7-filter^[24]在识别能力上则逐渐减弱。

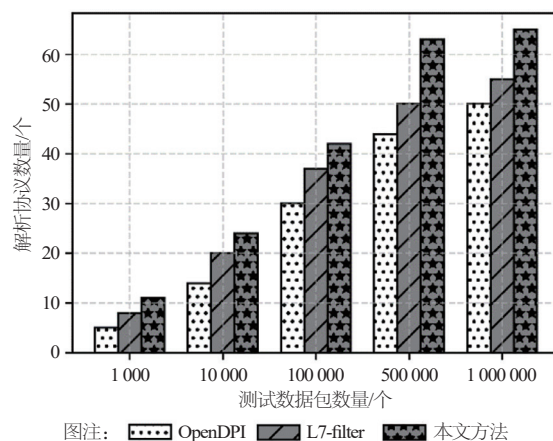


图4 本文方法与开源流量识别工具解析协议数量对比

本文模板库构建方法中使用的基于深度报文解析的协议流量模板生成方法，能够识别出较多常见的网络行为用户流量，确保生成应用协议流量模板的有效性。图5为整个输入流量文件生成的具体模板类型，可以看出，宽带互联网用户行为流量中，网页浏览行为、文件传输行为、电子邮件行为、社交娱乐行为入库的协议流量模板数量分别为19种、12种、9种、19种；窄带移动用户行为中，注册与短信入库1种协议流量模板，通话行为入库4种类型的协议流量模板。

5.3 宽带用户行为流量回放

为了验证本文提出的模板流量回放技术,在图3的拓扑中,选取互联网宽带用户节点中的User1、User2、User3,进行用户行为流量回放实验。宽带用户节点流量模板分配见表3, User1、User2、User3节点接收用户行为统一模板库下发的网页浏览协议模板、文件传输协议模板、电子邮件协议模板,基于流量模板生成真实流量。用户节点按照顺序通过卫星节点回放到地基节点中的信关

站Station1,并在信关站Station1中安装tcpdump进行流量抓包。在所接收的用户行为流量中,分别对源IP地址为宽带用户节点User1、User2、User3的数据包进行过滤,捕捉到对应行为的宽带流量。将宽带用户行为模板回放次数设置为10次,回放速度分别设置为500、300、100,单位为每秒数据包数(Packet Per Second, PPS)。信关站Station1的抓包分析结果如图6所示。实验表明,宽带用户节点通过Ku卫星节点,向地基信关站节点回放流量,在经过地基

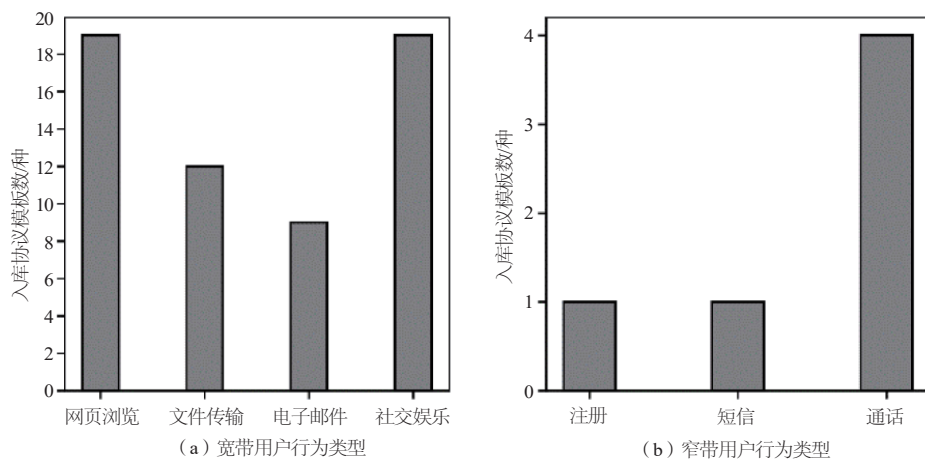


图5 整个输入流量文件生成的具体模板类型

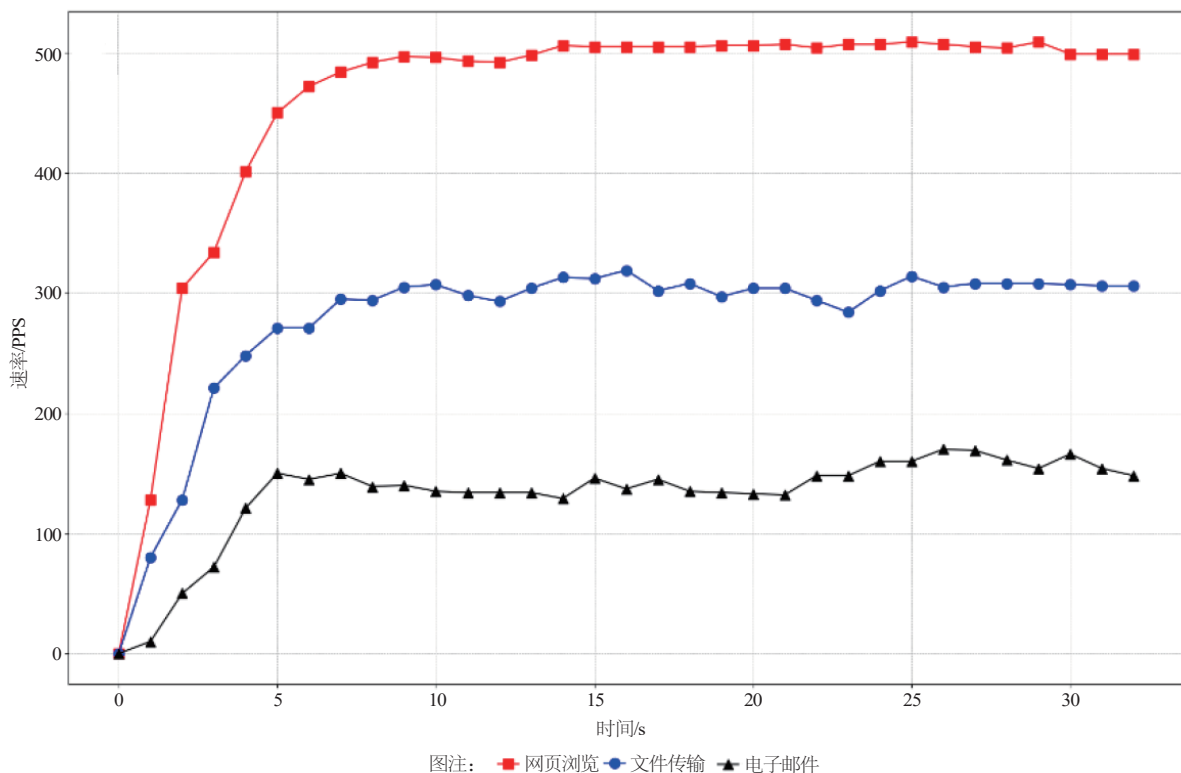


图6 信关站Station1的抓包分析结果

骨干网转发后，目的信关站均收到用户的请求数据，成功完成流量回放；用户节点成功进行网页浏览、文件传输、电子邮件的行为流量发送，并且3种行为的发包速率在不断增长后，逐渐稳定在预设速率值左右。因此，本文的用户行为流量回放方法可以进行逼真宽带用户流量仿真，生成基于真实流量的交互通信行为。

表3 宽带用户节点流量模板分配

宽带用户节点	协议流量模板	目标回放节点
User1	网页浏览行为	Station1
User2	文件传输行为	Station1
User3	电子邮件行为	Station1

5.4 窄带用户行为流量回放

天地一体化信息网络还包含窄带用户行为场景，在图3的拓扑中，选取窄带通信用户节点 User4、User5、User6作为流量回放节点。窄带用户节点流量模板分配见表4，分别收到来自用户行为统一模板库下发的窄带注册流量模板、窄带短信流量模板以及窄带通话流量模板。窄带行为模板包含了具体用户信息，通过流量回放在窄带通信用户节点回放模板与信关站节点Station2进行通信行为交互。信关站Station2通过开源软件OpenSIPS^[25]，搭建SIP注册服务器/代理服务器，提供基本的SIP代理功能，对窄带移动通信用户行为流量回放进行验证。本次实验中，对注册、短信、通话3种窄带用户行为实施100组重放，并在信关站节点Station2搭建

的OpenSIPS通信代理服务器中统计成功接收的窄带通信行为数量。如图7所示，3种成功到达的窄带移动通信行为数量以线性增长，符合预设的行为速率。实验表明，通过对窄带用户行为流量模板回放生成的流量，能够通过代理服务器的交互通信，并成功实现注册、短信和通话用户行为。

5.5 模板解析的流量回放方法逼真性实验

为了验证本文所提出的基于模板解析回放方法的有效性，这里设置了一组对比实验。取图3拓扑中地基宽带用户节点User1以及卫星仿真节点KU，选取一个包含1 400个报文的流量模板并由User1向KU回放，在KU上启动监听程序捕获报文。本文通过对比TCPReplay回放方法进行实验验证，计算两种回放方法产生报文之间的时间戳误差值与模板报文之间时间戳误差值的大小，实验结果如图8所示。从图8可以看出，回放同一个流量模板，随着报文数量的增加，TCPReplay回放方法所产生的报文时间戳误差值呈现不断增长的趋势，而本文提出的方法所产生的报文时间戳误差在10 ms左右，并且回放报文数量的增加不会对回放的时序性产生影响。

表4 窄带用户节点流量模板分配

窄带用户节点	协议流量模板	用户ID	IP地址	目标回放节点
User4	注册	1586160xxxx~ 1586160xxxx	12.4.1.1~ 12.4.1.100	Station2
User5	短信	1586161xxxx~ 1586161xxxx	12.6.1.1~ 12.6.1.100	Station2
User6	通话	1586162xxxx~ 1586162xxxx	12.8.1.1~ 12.8.1.100	Station2

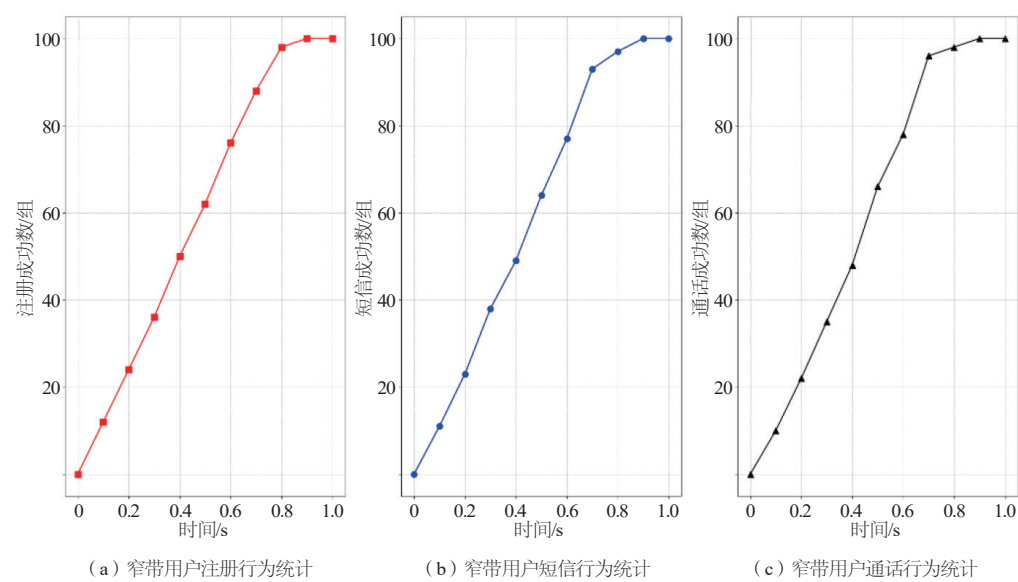


图7 信关站节点统计窄带用户行为成功数

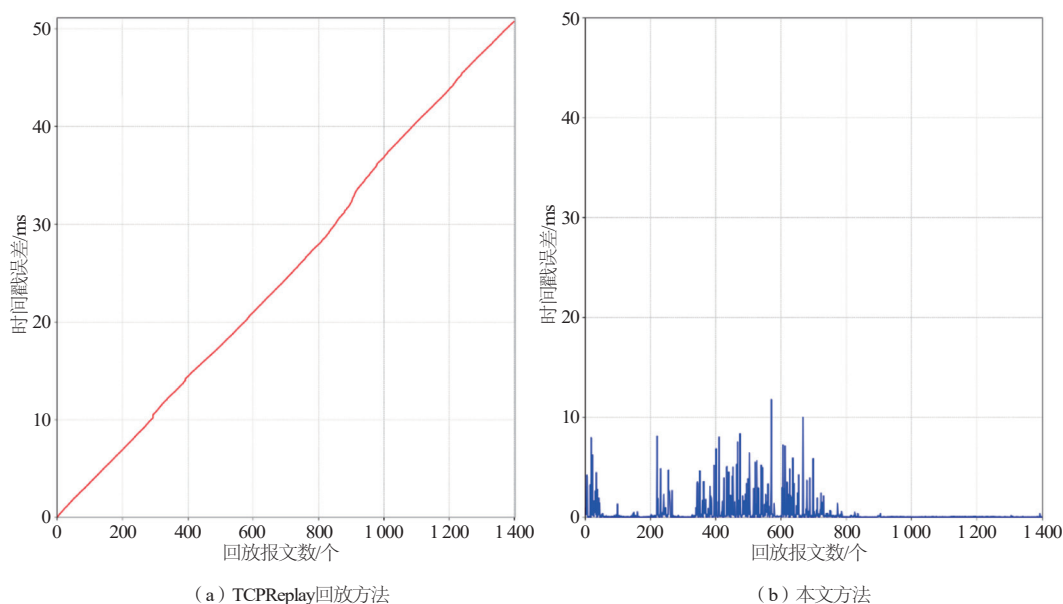


图8 本文方法与TCPReplay回放方法的时间戳误差对比

6 结束语

面向天地一体化信息网络的用户行为流量回放技术,实现了多协议用户行为流量模板的生成,同时能够基于协议流量模板生成高逼真的回放流量。本文提出的用户行为统一模板库构建方法支持解析多种天地一体化信息网络用户行为流量;高逼真主要体现在基于真实流量模板形式的流量回放,可以完整地体现用户在网络中的交互通信行为,以及数据包报文交换的时间细节。在下一阶段的工作中需要对天地一体化信息网络中的恶意用户行为进行统一搜集与回放,为天地一体化信息网络中恶意用户行为识别与安全防护提供技术支持。

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.
ZHANG N T, ZHAO K L, LIU G L. Thought on constructing the integrated space-terrestrial information network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 10(3): 223-230.
- [2] 秦智超, 张平, 范鑫鑫, 等. 面向天地一体化信息网络的安全验证平台设计[J]. 网络与信息安全学报, 2016, 2(8): 39-47.
QIN Z C, ZHANG P, FAN X X, et al. Design of security verification platform for the integrated space-ground network[J]. Chinese Journal of Network and Information Security, 2016, 2(8): 39-47.
- [3] 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.
- LI C Y, ZHANG X J. Performance evaluation on open source cloud platform for high performance computing[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(12): 3580-3585.
- [4] FELTER W, FERREIRA A, RAJAMONY R, et al. An updated performance comparison of virtual machines and Linux containers[C]//Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Performance Analysis of Systems and Software (ISPASS). Piscataway: IEEE Press, 2015: 171-172.
- [5] WANG X F, CHEN X Y, YE H Y, et al. Cloud-based experimental platform for the space-ground integrated network[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2020: 1-20.
- [6] WU H, LIU H R, WANG B L, et al. Accurate traffic replay based on interactive sequence and timestamp[C]//Proceedings of 2017 IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks (ICCSN). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1107-1110.
- [7] 刘渊, 张浩, 叶海洋, 等. 面向天地一体化信息网络的卫星链路仿真研究[J]. 通信学报, 2018, 39(4): 56-67.
LIU Y, ZHANG H, YE H Y, et al. Research on satellite link emulation for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(4): 56-67.
- [8] 蒋姝丽, 刘渊, 王晓锋. 天地一体化信息网络宽带用户行为仿真技术[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(10): 75-82.
JIANG S L, LIU Y, WANG X F. Broadband user behavior emulation technology for space-ground integrated information network[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(10): 75-82.

- [9] 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.
ZHANG G J, YE H Y, WANG X F. User behavior simulation in satellite terminal based on multi-scale virtualization[J]. Computer Engineering, 2019, 45(8): 165-172, 189.
- [10] 方熙, 曾剑平, 吴承荣. 背景流量生成模型综述[J]. 计算机应用, 2019, 39(S1): 124-131.
FANG X, ZENG J P, WU C R. Summary of background traffic generation model[J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39(S1): 124-131.
- [11] 焦久隆. 基于流量矩阵的背景流量建模与生成技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
JIAO J L. Research on background traffic modeling and generation method based on traffic matrix[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [12] 张华川, 田杰, 许静. 自相似网络流量模拟的分布式系统的设计与实现[J]. 电子学报, 2009, 37(S1): 31-35, 30.
ZHANG H C, TIAN J, XU J. The design and implementation of distributed system for self-similar network traffic simulation[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(S1): 31-35, 30.
- [13] HONG S S, WU S F. On interactive Internet traffic replay[M]//Lecture Notes in Computer Science. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006: 247-264.
- [14] HUSSAIN A, PRADKIN Y, HEIDEMANN J. Replay of malicious traffic in network testbeds[C]//Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Technologies for Homeland Security (HST). Piscataway: IEEE Press, 2013: 322-327.
- [15] 林秀. 基于TCPCopy的在线引流压测通用架构设计[J]. 电信技术, 2014(11): 30-33.
LIN X. General architecture design of online drainage pressure measurement based on TCPCopy[J]. Telecommunications Technology, 2014(11): 30-33.
- [16] 李凤华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息网络安全保障技术研究进展及发展趋势[J]. 通信学报, 2016, 37(11): 156-168.
LI F H, YIN L H, WU W, et al. Research status and development trends of security assurance for space-ground integration information network[J]. Journal on Communications, 2016, 37(11): 156-168.
- [17] WU L H, LI Y, ZHOU C, et al. Statistic analysis of data access behavior in the mobile internet[C]//Proceedings of 2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 89-93.
- [18] VERKASALO H. Analysis of smartphone user behavior[C]//Proceedings of 2010 Ninth International Conference on Mobile Business and 2010 Ninth Global Mobility Roundtable (ICMB-GMR). Piscataway: IEEE Press, 2010: 258-263.
- [19] LI H F, ZHOU H C, ZHANG H K, et al. EmuStack: an OpenStack-based DTN network emulation platform[C]//Proceedings of 2016 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). Piscataway: IEEE Press, 2016: 387-392.
- [20] LI Y, HUI P, JIN D P, et al. Delay-tolerant network protocol testing and evaluation[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 258-266.
- [21] KUMAR R, GUPTA N, CHARU S, et al. Open source solution for cloud computing platform using OpenStack[J]. International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 2014, 3(5): 89-98.
- [22] ZHANG S H, MENG X X, WANG L H. SDNForensics: a comprehensive forensics framework for software defined network[C]//Proceedings of the International Conference on Computer Networks and Communication Technology (CNCT 2016). Paris, France: Atlantis Press, 2017.
- [23] SHIRAVI A, SHIRAVI H, TAVALLAEE M, et al. Toward developing a systematic approach to generate benchmark datasets for intrusion detection[J]. Computers & Security, 2012, 31(3): 357-374.
- [24] SHEN C F, HUANG L J. On detection accuracy of L7-filter and OpenDPI[C]//Proceedings of 2012 Third International Conference on Networking and Distributed Computing. Piscataway: IEEE Press, 2012: 119-123.
- [25] GONCALVES F E, IANCU B A. Building telephony systems with OpenSIPS[M]. Birmingham: Packt Publishing Ltd, 2016.

[作者简介]



薛青松 (1998-), 男, 江南大学人工智能与计算机学院硕士生, 主要研究方向为流量仿真、网络仿真。



王晓锋 (1978-), 男, 博士, 江南大学人工智能与计算机学院教授, 主要研究方向为网络安全、网络仿真。