

面向天地一体化信息网络的卫星链路仿真研究

刘渊^{1,2}, 张浩^{1,2}, 叶海洋³, 李剑锋^{1,2}, 王晓锋³, 张桂珠³

(1. 江南大学数字媒体学院, 江苏 无锡 214122;

2. 江苏省媒体设计与软件技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;

3. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 针对天地一体化信息网络规模庞大且技术多样, 需要依托逼真的卫星网络场景来验证各类方案, 提出一种云计算环境中卫星链路仿真方法。详细分析了影响卫星链路特性的关键因素, 融合 OpenStack 和 STK 构建天地一体化信息网络仿真平台, 通过对链路进行建模与计算, 基于流表规则和队列管理规则动态实时切换卫星链路的间歇性、时延、误码率。为提高卫星链路的吞吐量, 卫星节点具备动态路由学习能力, 卫星链路可灵活构建与重构。实验结果表明, 所提方法能够准确地对卫星链路进行仿真, 有效保证卫星链路仿真的逼真性和周期性, 有利于卫星网络场景的科学研究。

关键词: 云计算; 天地一体化; 融合仿真; 卫星链路

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-436x.2018071

Research on satellite link emulation for space-ground integration information network

LIU Yuan^{1,2}, ZHANG Hao^{1,2}, YE Haiyang³, LI Jianfeng^{1,2}, WANG Xiaofeng³, ZHANG Guizhu³

1. College of Digital Media, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

2. Jiangsu Key Laboratory of Media Design and Software Technology, Wuxi 214122, China

3. College of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

Abstract: Aiming at the large scale and diverse technologies of the space-ground integration information network, it was necessary to rely on realistic satellite network scene to verify the various schemes. A method of satellite link emulation in cloud computing environment was proposed. The critical factors that affect the characteristics of satellite link were analyzed, OpenStack and STK were integrated to build an emulation platform for space-ground integration information network. Through the link modeling and calculation, the intermittence, delay and bit error rate of satellite link based on flow table rules and queue management rules can be toggled dynamically in real time. In order to improve the throughput of satellite link, satellite nodes have dynamic routing learning ability. Satellite links can be flexibly constructed and reconstructed. The experimental results show that the method can accurately emulate the satellite link, effectively guarantee the fidelity and periodicity of satellite link emulation, and facilitate the scientific research of satellite network scene.

Key words: cloud computing, space-ground integration, fusion emulation, satellite link

收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2018-03-01

基金项目: 国家重点研发计划基金资助项目 (No.2016YFB0800305); 国家自然科学基金资助项目 (No.61672264); 国家科技支撑计划基金资助项目 (No.2015BAH54F01)

Foundation Items: The National Key R&D Program of China (No.2016YFB0800305), The National Natural Science Foundation of China (No.61672264), The National Key Technology R&D Program of Science and Technology of China (No.2015BAH54F01)

1 引言

天地一体化信息网络可以分为天基骨干网、天基接入网、地基节点网、地面互联网，包含卫星节点、地面站节点、卫星链路等多类型元素，具有网络拓扑切换快、异构网络互联、时空跨度大、业务种类多等特点。天地一体化信息网络需要建立大规模、真实的、可控的网络仿真平台，支撑安全保障技术^[1]的研究以及新的卫星网络协议与技术研究。

天地一体化信息网络仿真平台包含控制平面与数据平面，控制平面管理卫星节点和卫星链路，数据平面完成仿真场景的映射^[2]。卫星节点需要满足节点数量、拓扑变化、轨道高度的仿真要求，卫星链路包含星间链路和星地链路，星间链路又分为同轨和异轨星间链路。同轨卫星之间的链路持续通信时间、链路距离基本不随时间变化，异轨卫星之间的链路建立相对复杂，链路空间几何参数与性能参数呈周期性变化，星间链路主要受自由空间传播损耗的影响。星地链路除了会受自由空间传播损耗的影响外，还会受大气吸收损耗、雨衰的影响。

目前，卫星链路仿真的相关研究主要集中在基于理论建模的数字仿真、基于离散事件驱动的网络模拟、基于链路特性的参数仿真与新兴网络技术^[3,4]融合等方面。文献[5,6]研究了卫星链路计算数学模型，分析了星间链路空间几何特性、星地链路时延与误码率的动态变化规律，为卫星链路仿真提供了理论基础。文献[7]基于 NS3 模拟卫星链路，基于 TCP 通信协议测试了不同链路特性下卫星链路吞吐量的变化。文献[8]提出了动态卫星链路数据交互的联合仿真方法，通过逼真的星地信道衰落情况来确定满足链路约束条件的卫星天线增益等关键参数。文献[9]提出了基于共享缓冲区的超高速链路仿真方法 TLEM，由多个独立线程实现的管道体结构，线程间通过有限的交互实现高性能转发，但其存在内存复制开销的瓶颈，并且仅能适用于支持 netmap 的系统。文献[10]提出了基于 dummynet 的数据链路层仿真方法，通过拦截指定链上的数据帧实现，在 PlanetLab 实物测试床中验证了其仿真性能。文献[11]提出了基于 IP 级 KauNet 仿真器的卫星链路仿真方法，结合 LMS 卫星信道模型，给出传统网络中复现卫星链路时延与丢失分组的系统实现。文献[12]提出了大规模时延容忍网络仿真平台，基于 netem 实现单层低轨卫星网络中卫星链路仿真，对

星地链路的带宽、时延等进行仿真分析。大多数卫星链路仿真方法基于单一的卫星工具包^[13] (STK, satellite tool kit) 和模拟器 (NS2、NS3、OPNET 等)，无法运行真实的业务流量，难以支撑安全仿真验证。实物测试床 (PlanetLab、OneLab 等) 通过真实的软硬件环境来保障实验网络的真实性，但其存在投入成本高、灵活性差的问题。链路仿真器 (TLEM、dummynet、KauNet 等) 能够为卫星链路仿真提供支撑，但其自身都存在一定的局限性。少部分卫星链路仿真方法可承载真实的业务流量，融合了新兴网络技术，但缺乏考虑卫星链路的逼真性和周期性。

本文提出了一种云计算环境中卫星链路仿真方法，基于虚拟化技术仿真不同轨道高度的卫星节点，基于软件定义网络 (SDN, software defined network) 技术仿真可重构的卫星链路，基于 STK 模拟真实的卫星网络场景，对卫星链路进行建模与计算，获取链路持续通信时间、距离、误码率等数据。根据卫星网络场景，可自动化部署卫星网络拓扑，可动态配置差异化的卫星节点与卫星链路，为天地一体化信息网络中各类技术的验证与评估提供一套原型系统。

2 卫星链路性能参数分析

采用连通图 $G=(V,E,D)$ 对卫星网络建模，其中， $V=\{v_i | i \in (1,2,\dots,n)\}$ 表示卫星节点和地面站节点集合， $E=\{e_{ij} | i,j \in (1,2,\dots,n)\}$ 表示卫星链路集合， $D=\{d_{ij} | i,j \in (1,2,\dots,n)\}$ 表示卫星链路的长度。

2.1 链路间歇性

卫星链路的间歇性是指链路通断随着时间周期性地动态切换。在卫星接收机的功率满足可以正常接收发射信号的条件，当卫星链路被其他天体在物理位置上阻隔时，链路会无法通信，当卫星运动到某一个无天体阻隔的位置时，链路又可以继续通信。因此，造成了卫星链路的间歇性。

卫星链路的物理可见性取决于卫星间、卫星与地面站间的相对位置，如图 1 所示。

当 2 颗卫星运动到卫星 v_i 与卫星 v_j 的位置时，空间位置关系上满足^[14] $H_{ij} \geq R_e$ ， H_{ij} 为地球球心 O 到星间链路 e_{ij} 的距离， R_e 为地球半径，卫星之间物理可见，星间链路可以通信。当 2 颗卫星运动到卫星 v_i 与卫星 v_k 的位置时，其空间位置关系满足

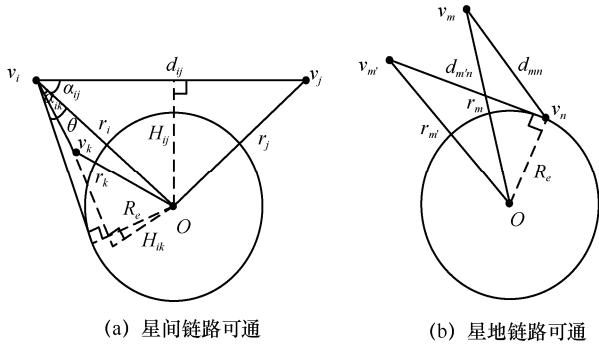


图 1 卫星链路可通约束条件

$(H_{ik} < R_e) \wedge (\alpha_{ik} < \theta)$, α_{ik} 为链路 e_{ik} 与 $v_i O$ 的夹角, θ 为卫星 v_i 与地球相切时的夹角, 卫星之间物理可见, 星间链路可以通信。因此, 星间链路可以通信的约束条件为

$$(H_{ij} \geq R_e) \vee ((H_{ij} < R_e) \wedge (\alpha_{ij} < \theta)) \quad (1)$$

当卫星 v_m 运动到 $v_{m'}$ 位置时, 星地链路 $e_{m'n}$ 与地面站 v_n 所在位置相切, 星地链路长度达到最大值, 星地链路可以通信的约束条件为

$$D \leq d_{m'n} \quad (2)$$

2.2 链路时延

卫星链路时延与链路长度 D 有关, 时延仿真的前提条件是链路必须可通, 即物理可见, 时延的计算式为

$$\begin{cases} D = f(t), t \in T \\ t_d = \frac{D}{c} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $f(t)$ 为时变函数, T 为链路长度变化周期, 链路时延 t_d 在周期 T 内动态变化, c 为电磁波在自由空间的传播速度。

2.3 链路误码率

卫星链路误码率与信号的调制方式有关, 误码率仿真也必须满足链路可通, 在二进制相移键控 (BPSK, binary phase shift keying) 调制方式下, 误码率的计算式为

$$BER = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (4)$$

其中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为互补误差函数, $\frac{E_b}{N_0}$ 为每比特信号能量 E_b 与噪声的功率谱密度 N_0 之比, 其与信道的载噪比 $\frac{C}{N}$ 密切相关, 计算式为

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{B_n C}{R_b N} \quad (5)$$

其中, R_b 为比特率, B_n 为噪声带宽, 载噪比 $\frac{C}{N}$ 可由式(6)进行推算。

$$\frac{C}{N} = \frac{P_t G_t G_r}{k T_s B_n L_f L_a} = \frac{EIRP G_r}{k B_n T_s L_f L_a} \quad (6)$$

其中, P_t 为发射机发射功率; G_t 为发射机天线增益; G_r 为接收机天线增益; k 为波尔兹曼常量; T_s 为接收机系统噪声温度; L_f 为自由空间传输损耗; L_a 为其他损耗, 包含大气吸收损耗、雨衰等; $EIRP$ 为有效全向辐射功率。根据这些参数值, 可以推算出卫星链路的误码率。

3 天地一体化信息网络仿真平台

天地一体化信息网络仿真平台采用融合仿真的思想, 由 STK 负责仿真平台的数据平面, 由 OpenStack 云计算环境负责仿真平台的控制平面, 如图 2 所示, 包含了一个控制节点、一个 STK 节点、若干个计算节点。控制节点负责整个平台的资源调度, 包含计算、存储、网络等资源以及自动化部署卫星网络拓扑, STK 节点提供丰富的可视化界面, 负责构建卫星网络场景, 设计星座结构、卫星轨道、地面站、发射机、接收机等, 并对链路持续通信时间、链路距离、链路误码率等数据进行计算, 计算节点负责承载多粒度卫星节点、构建卫星链路、加载卫星链路性能参数, 实时检测并动态切换卫星链路的间歇性、时延、误码率。

3.1 星座结构设计

在 STK 节点中采用 Walker 星座构建卫星网络, 轨道平面的升交点沿赤道等间距排列, 每个轨道的卫星等间距分布, 可以使覆盖面积达到最优, 缩短重访时间。假设有 P 个轨道平面, 每个轨道平面上的卫星个数为 N , 卫星总数为 $T = P \times N$, 轨道平面的角距为 $360^\circ / P$, 卫星的角距为 $360^\circ / N$, 相邻轨道平面卫星间的相位因子为 $F = 1, 2, \dots, P-1$, 相位角为 $360^\circ F / T$ 。通常可以用 $\delta : T / P / F$ 来描述一个 Walker 星座, δ 为轨道平面倾角。

3.2 卫星与地面站节点仿真

低轨 (LEO, low earth orbit) 卫星的轨道高度一般在 500~2 000 km, 单颗 LEO 卫星的覆盖范围很小, 可持续通信时间也很短, 覆盖全球通常需要数

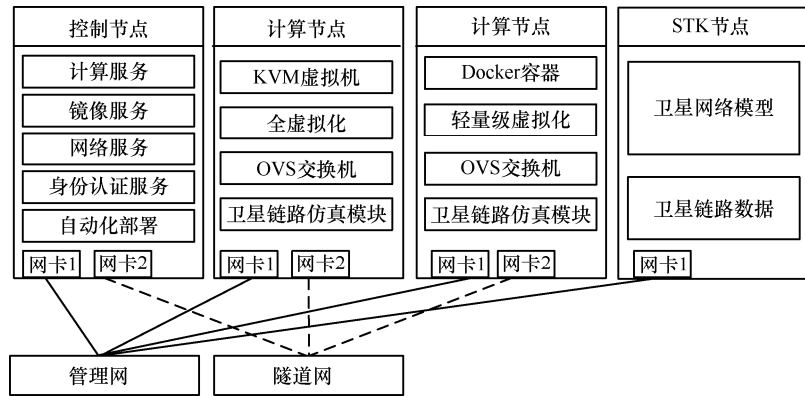


图 2 天地一体化信息网络仿真平台

十颗，因此，采用基于轻量级虚拟化的 Docker 容器来仿真 LEO 卫星节点，其直接运行在宿主机的操作系统之上，占用物理资源少，启动速度快，可以满足数量较多的 LEO 卫星节点需求。地面站用于向卫星发射信号，并接收其他地面站经卫星转发过来的信号，考虑到其数量需求也很多，同样采用 Docker 容器来仿真地面站节点。中轨(MEO, medium earth orbit)卫星的轨道高度一般在 10 000~20 000 km，覆盖全球通常需要几颗至十几颗；地球同步轨道(GSO, geosynchronous orbit)卫星的轨道高度为 35 786 km，包含地球静止轨道(GEO, geostationary orbit)卫星和倾斜地球同步轨道(IGSO, inclined geosynchronous orbit)卫星，3 颗即可覆盖全球。在选择 GSO 或 MEO 卫星作为骨干节点时，拓扑结构变化相对较慢、数量较少，因此，采用基于全虚拟化的 KVM 虚拟机来仿真 GSO 和 MEO 卫星节点，全虚拟化提供了较好的隔离性和安全性。一个计算节点(Dell R730)可以仿真的 LEO 卫星节点数量在 45 个左右，可以仿真的 GSO 或 MEO 卫星节点数量在 6 个左右。

OpenStack 云计算环境中基于 qrouter 实现 3 层网络的互联互通，其只支持静态路由，并且需要跨宿主主机通信。为提高卫星链路的吞吐量，卫星节点基于路由软件 quagga 实现动态路由协议，默认的路由协议为 OSPF，可通过配置接口切换 RIP 或 BGP 协议。卫星节点在启动过程中对所接入的虚拟网络进行探测，完成路由协议的配置和对整个卫星网络的路由学习，无需手动配置，有利于卫星网络拓扑的快速部署。

3.3 卫星网络场景自动化部署

根据 STK 节点所构建的卫星网络场景，基于 XML 形式化描述卫星网络拓扑，形成指定格式的

配置文件，如图 3 所示，标签元素从左至右处于不同的层次结构，第一层根标签为卫星网络拓扑，第二层并列的子标签包含卫星节点、星历时间、卫星链路，地面站节点与卫星节点信息基本类似，卫星节点中的 3 层子标签包含卫星名称、轨道高度、路由协议、网卡集合，卫星链路中的 3 层子标签包含链路类型、源节点、目的节点、间歇性、带宽、时延、分组丢失率，在天地一体化信息网络仿真平台中自动化部署卫星网络拓扑。

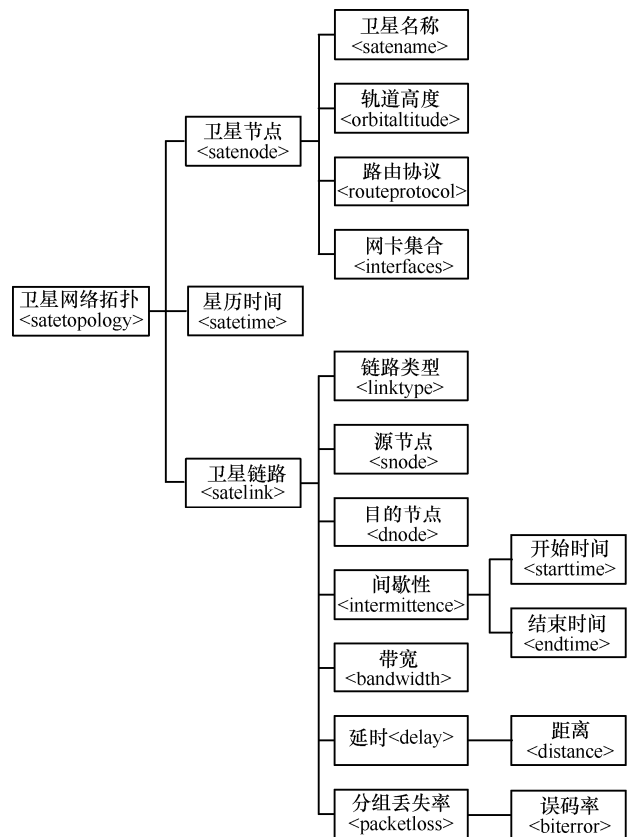


图 3 基于 XML 的卫星网络拓扑描述

在控制节点中，需先通过身份认证服务 keystone 识别用户有无权限部署卫星网络，再根据卫星轨道高度从镜像服务 glance 中获取卫星节点镜像。然后，通过网络服务 neutron 给卫星节点分配端口、地址等信息。最后，计算服务 nova 会根据每一台计算节点的 CPU、内存、磁盘容量等信息完成卫星节点的资源调度与分配，对于需要使用 GPU 资源的卫星节点，通过设备透传（PCI passthrough）进行分配。

在计算节点中，通过卫星链路仿真模块，可以配置卫星链路的固定带宽，加载卫星链路性能参数，包含链路的间歇性、时延、误码率，实时检测并动态切换卫星链路状态。

4 卫星链路仿真实现

基于 OpenvSwitch(简称 OVS)软件交换机构建天地一体化信息网络，OVS 交换机分为普通二层交换机和 OpenFlow 交换机，如图 4 所示，天基骨干网、天基接入网、地基节点网连接至二层交换机，跨节点的通信由二层交换机连接至 OpenFlow 交换机，地面互联网连接至底层物理交换机，实现天地一体化信息网络的互联互通。相对于传统网桥 LinuxBridge，OVS 可基于通用路由封装（GRE, generic routing encapsulation）实现 overlay 覆盖网络，并且支持 vlan 和 OpenFlow 协议，可有效支撑卫星链路的灵活构建与重构。

数据分组从卫星节点发出后，先经过一个普通的二层交换机，如果数据分组的目的地址为该二层交换机上的某一个卫星节点，则直接转发给该卫星节点。如果该二层交换机上未能寻找到数据分组的目的地址，则转发给 OpenFlow 交换机，其根据流表规则来匹配数据分组执行相关操作，将数据分组的 vlan 标签去除后，进行隧道封装，数据分组获得一个唯一的隧道号，经过底层物理链路，到达远端的 OpenFlow 交换机再进行拆分，打上 vlan 标签后，转发给二层交换机，最终传输到卫星节点。对于流表的生成、下发和维护交由 SDN 控制器处理，在 OpenStack 中，neutron 充当默认的控制角色。

4.1 卫星链路间歇性仿真

针对卫星链路的间歇性仿真，需要实时检测并动态切换卫星节点到 OVS 的链路状态，链路状态包含正常通信状态、硬中断状态、软中断状态，初始链路状态由 STK 节点中的卫星网络场景所决定，

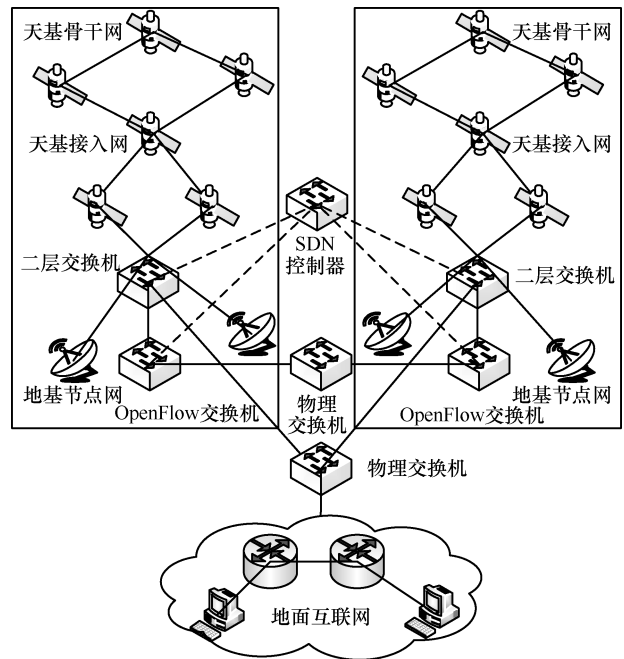


图 4 基于 SDN 的天地一体化信息网络

后续链路状态由链路标识符所决定。卫星链路间歇性仿真包含链路计算模块、链路检测模块、链路切换模块，如图 5 所示。

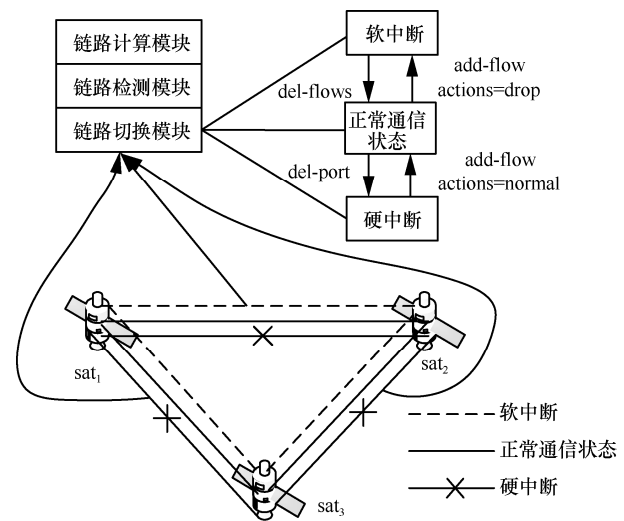


图 5 卫星链路间歇性仿真

链路计算模块主要由仿真平台中的 STK 节点负责，根据 2.1 节中卫星链路可以通信的约束条件，计算卫星链路通信的开始时间、结束时间，仿真平台中的计算节点计算出卫星链路的持续通信时间，并存放到相应的日志文件中。

链路检测模块主要基于网络时间协议（NTP, network time protocol）将控制节点作为统一的时间轴，检测当前仿真时间是否在星历时间范围内，

如果超出星历时间范围，则会自动结束链路间歇性仿真，如果在星历时间内，则继续根据该时间是否在链路计算模块的时间范围内来设置链路标识符。链路标识符一方面可以表明当前链路状态，另一方面可以避免对链路的频繁操作，减少系统的性能开销。

链路切换模块主要完成链路正常通信状态到中断状态间的相互切换操作，需要与虚拟机监视器 VMM 建立连接，获取卫星节点的虚拟网卡对信息，虚拟网卡对是指卫星节点的虚拟网卡连接至 OVS 的 tap 设备，包含了地址信息、vlan 标签、内部端口 in_port 等信息。链路从正常通信状态切换到硬中断状态时，通过 del-port 接口断开卫星节点到 OVS 的链路，对应的 vlan 标签、流表规则等会被级联删除，链路将无法传输任何数据分组，当链路从硬中断状态切换回正常通信状态时，除了需要通过 add-port 接口重新建立链路，还需要通过 add-flow 接口建立匹配 ARP 和 IP 分组的流表规则，主要包含规则 1~规则 4，用于检测数据分组中地址信息与卫星节点地址的一致性。链路从正常通信状态切换到软中断状态时，通过 add-flow 接口建立丢弃链路中指定数据分组的流表规则 5，图 5 中卫星 sat₁ 和 sat₂ 间建立软中断时，该条链路无法传输卫星 sat₁ 到 sat₂ 的数据分组，但仍然可以传输卫星 sat₁ 到 sat₃ 的数据分组，当链路从软中断状态切换回正常通信状态时，通过 del-flows 接口删除与源、目的地址相对应的报文丢弃流表规则。

规则 1 table=0,priority=10,dl_type=0x0806,in_port=IN_PORT,actions=resubmit(,24)

规则 2 table=0,priority=9, in_port=IN_PORT, actions=resubmit(,25)

规则 3 table=24,priority=2,dl_type=0x0806,in_port=IN_PORT,arp_spa=IP_ADDR,actions=resubmit(,25)

规则 4 table=25,priority=2, in_port=IN_PORT, dl_src=SRC_MAC,actions=normal

规则 5 table=0,priority=8, dl_src=SRC_MAC, dl_dst=DST_MAC,actions=drop

上述规则中 table 表示流表编号，priority 表示优先级，dl_type 表示协议类型，arp_spa 表示源 IP 地址，dl_src 表示源 MAC 地址，dl_dst 表示目的 MAC 地址，actions 表示具体的动作，resubmit 为跳转动作，normal 为正常转发动作，drop 为丢弃动作。

4.2 卫星链路时延仿真

针对卫星链路的时延仿真，需要实时检测并匹配卫星链路的距离，计算出当前链路时延后，动态切换链路时延，其仿真流程如图 6 所示。

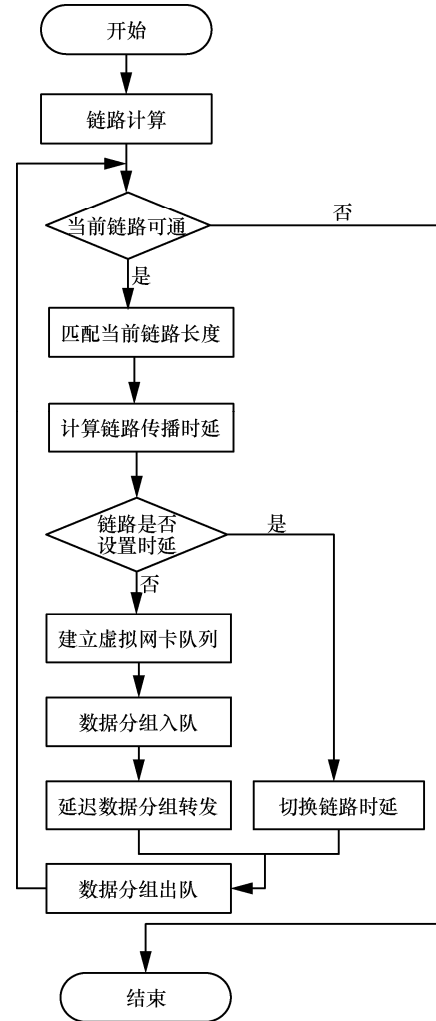


图 6 卫星链路时延仿真流程

链路计算由 STK 节点根据卫星节点的空间几何位置关系，计算出卫星链路的距离，距离长度具有周期性。当前链路可通是卫星链路时延仿真的必要条件，与 4.1 节中的链路检测模块一致。

当前链路长度 D_{cur} 由仿真时间 T_{emu} 与链路距离所对应的时间 T_n 所决定，根据两者的差值 Δt 进行匹配，匹配规则为

$$\begin{cases} \Delta t = T_{emu} - T_n \\ D_{cur} = D_{T_n}, \Delta t \in [0, T_{step}] \end{cases} \quad (7)$$

区间 $[0, T_{step}]$ 的右端点 T_{step} 由 STK 节点中的时间步长所确定，根据电磁波在自由空间的传播速

度，计算出卫星链路的传播时延为 t_d 。

检测链路是否设置时延主要是为了在卫星节点的虚拟网卡上建立队列，缓存数据分组，通过轮询的方式发送数据分组，假设数据分组入队的时刻为 T_{arrive} ，则实际数据分组的发送时刻为

$$T_{send} = T_{arrive} + t_d - t_{phy} + t_{deviation} \quad (8)$$

其中， t_{phy} 为底层物理链路的时延，该时延由卫星节点跨计算节点通信所引入，可通过数据分组拦截与重构计算所得， $t_{deviation}$ 为链路时延切换所造成的误差。如果当前卫星链路已经设置过时延，则直接切换时延 t_d 即可，无需再次建立队列。

4.3 卫星链路误码率仿真

针对卫星链路的误码率仿真，其仿真流程与时延仿真相似，链路计算根据 2.3 节中影响误码率的相关参数，可将链路误码率控制在指定的阈值范围内，获取卫星链路误码率参数，根据误码率与分组丢失率的转换关系，计算出卫星链路的分组丢失率为

$$P_{Loss} = 1 - (1 - BER)^L \quad (9)$$

其中， L 为数据分组的长度， BER 为链路误码率。在卫星节点的虚拟网卡上建立队列，数据分组入队后，通过随机损坏一定数量的数据分组来实现卫星链路的误码率仿真，如果当前链路已经设置时延或分组丢失率，则不需要再次建立队列，假设卫星节点间传输的数据分组总数为 N_{total} ，损坏的分组数为 N_{damage} ，则该条链路的分组丢失率为

$$P_{Loss} = \frac{N_{damage}}{N_{total}} - P_{phy} \quad (10)$$

其中， P_{phy} 为底层物理链路的分组丢失率，通过数据分组计数动态感知物理链路的丢失分组，对误码率仿真进行补偿，实现物理链路的分组丢失率检测主要包含数据分组构造、数据分组收发、数据分组解析。数据分组构造按照 IP 分组格式进行构造，使用 UDP 协议进行传输，涉及 UDP 分组头的构造、IP 分组头的构造、数据部分的构造，UDP 分组头需要指明计算节点在物理链路上通信的源、目的端口，IP 分组头需要指明物理链路所连接的源、目的 IP 地址、生存时间、传输协议类型，计算出数据分组的长度，数据部分添加标识字段表明当前是构造的第几个数据分组。数据分组发送通过 OpenFlow 交换机连接的物理网卡进行发送，数据分组接收根据过滤规则在接收端的物理网卡上进行嗅探，过滤

规则为 UDP 协议和源 IP 地址。数据分组解析按照 IP 分组格式对数据分组进行解析，获取数据分组的数据部分字段，通过记录前一个和当前数据分组的标识字段，统计出物理链路丢失分组的数量，根据数据分组构造的总数，计算出物理链路的分组丢失率。

4.4 卫星链路带宽仿真

卫星链路的带宽仿真与间歇性、时延、分组丢失率仿真有所不同，其不具备周期性，通常是一个固定的数值，也就不需要动态切换，但是需要能够支持差异化的配置，满足天地一体化信息网络中骨干网络、接入网络、终端用户的带宽需求。

基于 OVS 的 QoS 机制实现卫星链路的带宽仿真，屏蔽不同轨道高度下卫星节点的异构性，提供管制 Policing 和整形 Shaping 这 2 种限速策略，Policing 控制虚拟网卡的 maximum 数据分组接收速率和突发流量大小，Shaping 采用队列缓存和调度数据分组，2 种策略相比，前者的实现方式更为简单，后者的精确性更高。从卫星链路带宽仿真的逼真度考虑，主要采用 Shaping 策略，其实现方式如图 7 所示，首先，在卫星节点的虚拟网卡对 tap 设备上建立网卡根队列；然后，在根队列上建立根分类，并设置卫星链路的最大带宽 B_{max} ；随后，在根分类上划分出多个子分类，设置子分类上卫星链路的带宽 B_i ，其需要满足式(11)的约束条件；最后，为每个子分类上的卫星节点添加流表规则，指明卫星节点的地址、端口，执行“enqueue:port:i”排队动作，port 为 tap 设备在 OVS 上的内部端口号， i 为子分类号。

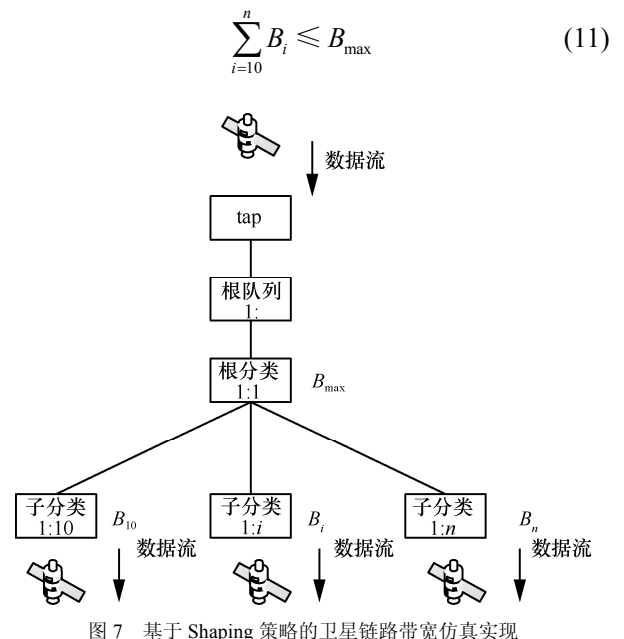


图 7 基于 Shaping 策略的卫星链路带宽仿真实现

5 仿真实验与结果分析

在天地一体化信息网络仿真平台的 STK 节点中构建如图 8 所示的 GSO+LEO 卫星网络场景，包含 5 颗 GEO 卫星 (GEO11-GEO15)，一个轨道平面，3 颗 IGSO 卫星 (IGSO11-IGSO13)，3 个轨道平面，48 颗 LEO 卫星 (LEO11-LEO16、LEO21-LEO26、LEO31-LEO36、LEO41-LEO46、LEO51-LEO56、LEO61-LEO66、LEO71-LEO76、LEO81-LEO86) 组成的全球星，8 个轨道平面，轨道参数如表 1 所示，一个位于中国北京的地面站，经度为 116.228°，纬度为 40.117 2°，高度为 38 m，发射机、接收机的参数如表 2 和表 3 所示，星历时间为 7 Mar 2018 00:00:00.000 到 8 Mar 2018 00:00:00.000，步长为 60 s。

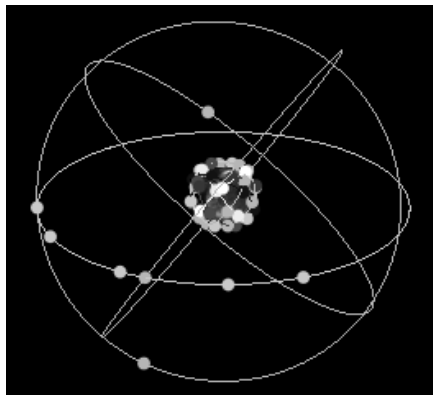


图 8 GSO+LEO 卫星网络场景

表 1

卫星轨道参数

参数	GEO 卫星	IGSO 卫星	LEO 卫星
半长轴/km	42 164.1	42 164.1	7 792.14
偏心率	0	0	0
轨道倾角/°	0	55	52
近地点幅角/°	0	0	0
升交点与零分点的角度/°	58.75E,80E,110.5E,140E,160E	118E	0,45,90,135,180,225,270,315
平近点角/°	0	0,120,240	0,60,120,180,240,300 7.5,67.5,127.5,187.5,247.5,307.5 15,75,135,195,255,315 22.5,82.5,142.5,202.5,262.5,322.5 30,90,150,210,270,330 37.5,97.5,157.5,217.5,277.5,337.5 45,105,165,225,285,345 52.5,112.5,172.5,232.5,292.5,352.5

表 2 发射机参数

频率/GHz	有效全向功率/dBW	数据传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	调制器
14.5	17(星地),38(星间)	10	BPSK

表 3 接收机参数

频率/GHz	品质参数	解调器
14.5	20	BPSK

在仿真平台中，控制节点加载图 8 中的卫星网络场景，自动化部署虚拟卫星网络拓扑，计算节点加载链路持续通信时间、链路距离、链路误码率数据，开启卫星链路仿真模块。

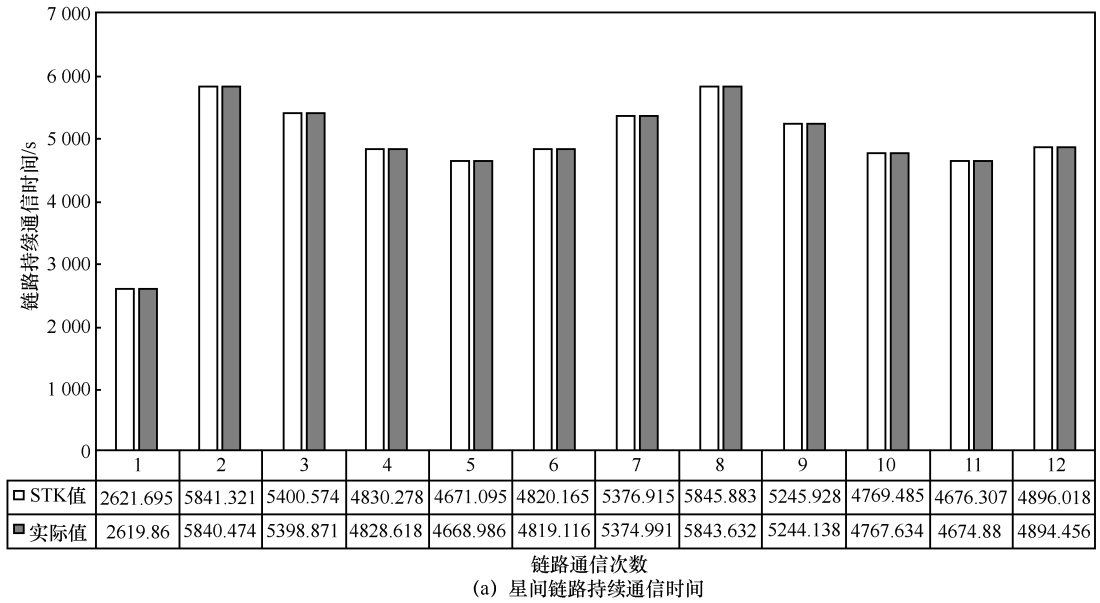
5.1 间歇性测试

以卫星节点 GEO15 与 LEO71 的星间链路、卫星节点 LEO71 与地面站节点 BJStation 的星地链路为例，测试链路连通，并记录链路持续通信时间，其与 STK 计算值对比，如图 9 所示。

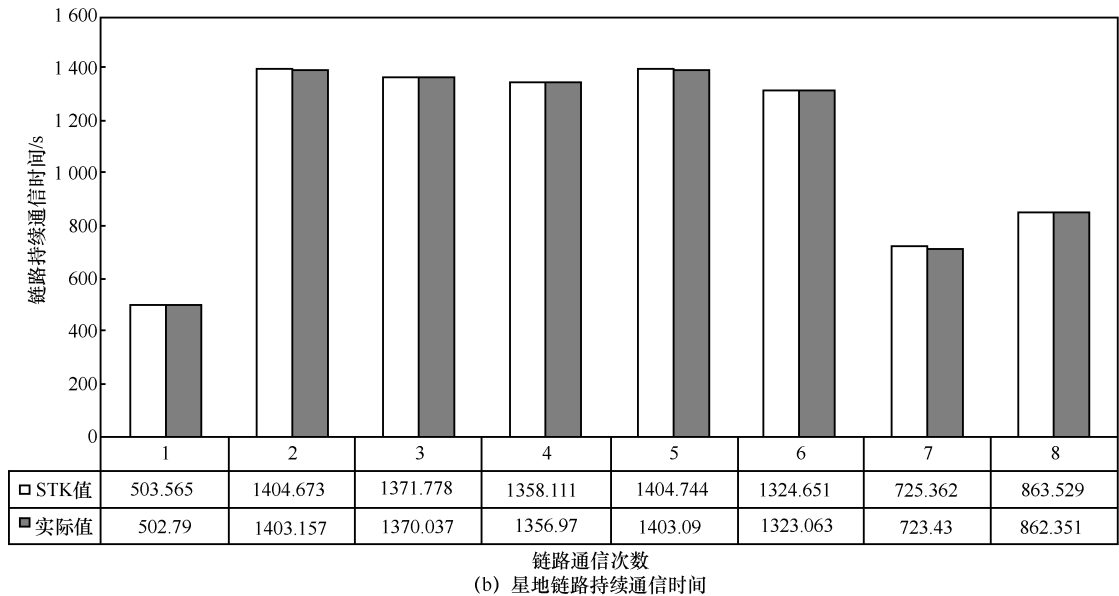
从图 9 可以看出，星间链路间歇性仿真的最大误差为 2.251 s，星地链路间歇性仿真的最大误差为 1.932 s，星间链路的误差略高于星地链路，都小于文献[14]中间歇性仿真的最大误差。该误差主要来源在切换链路状态时存在着一定的时间损耗，基本可以满足卫星链路间歇性仿真的需求。

5.2 时延测试

以卫星节点 GEO15 与地面站节点 BJStation 第一次建立通信为例，测试链路时延，星间链路、星



(a) 星间链路持续通信时间



(b) 星地链路持续通信时间

图 9 卫星链路持续通信时间

地链路时延变化如图 10 所示。

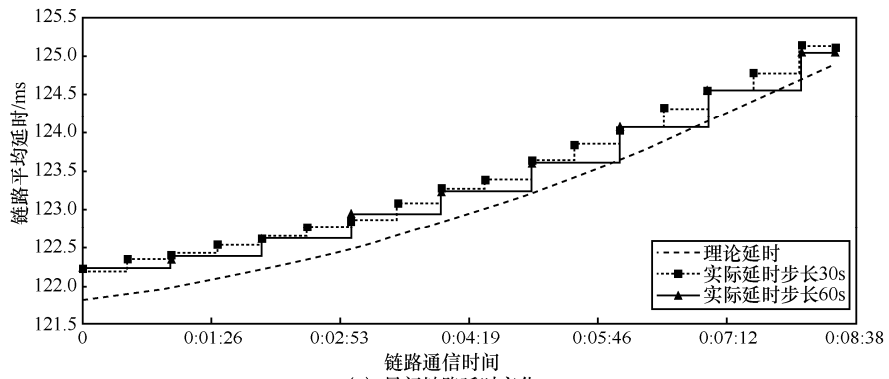
从图 10 可以看出，卫星链路时延仿真的最大误差为 0.44 ms，整体误差在 0.4 ms 周围波动，小于文献[15]中卫星链路时延仿真误差。该误差主要来源卫星节点的处理时延和卫星链路的固定时延损耗。默认的时延仿真步长为 60 s，链路实际时延呈阶梯形动态变化，当仿真步长为 30 s 时，匹配的链路长度更加精确，能够有效提高卫星链路仿真的逼真度。仿真步长越小，时延变化曲线越平滑，适用于多粒度卫星网络场景。

5.3 分组丢失率测试

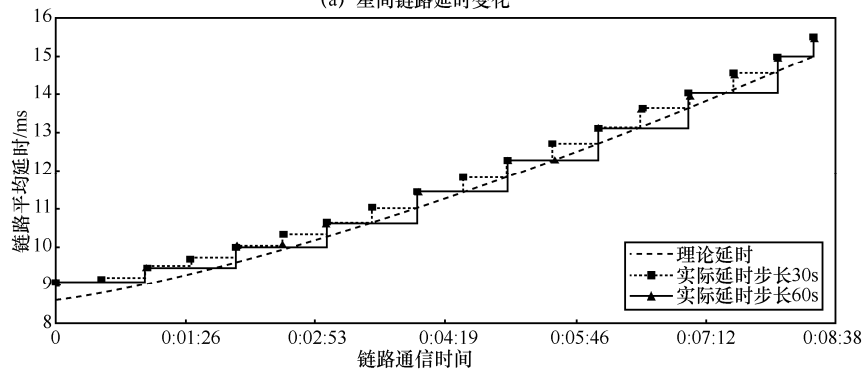
以卫星节点 GEO15 与地面站节点 BJStation 第

一次建立通信为例，使用 Iperf 网络性能测试工具测试卫星链路分组丢失率，其发送数据分组的速度为 2 Mbit/s，数据分组的长度为 100 B，总共发送的分组数量为 150 000，星间链路、星地链路分组丢失数量变化如图 11 所示。

从图 11 可以看出，平均分组丢失数量误差约为 10 个，利用统计的方式来定义分组丢失这一随机的过程具有较好的准确性，优于文献[10]中基于 dummynet 的静态分组丢失率仿真，卫星链路实际分组丢失数量呈阶梯形动态变化，受链路信噪比变化的影响，当仿真步长越小时，实际分组丢失数量越接近理论曲线，匹配的链路误码率越精确，逼真度就越高。

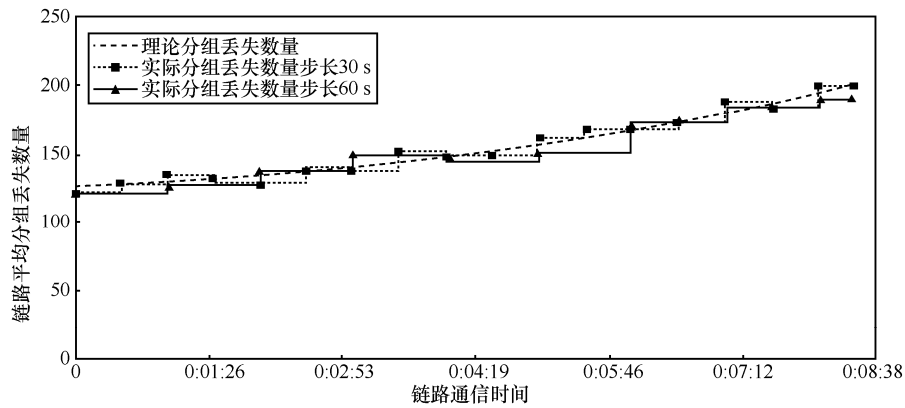


(a) 星间链路延时变化

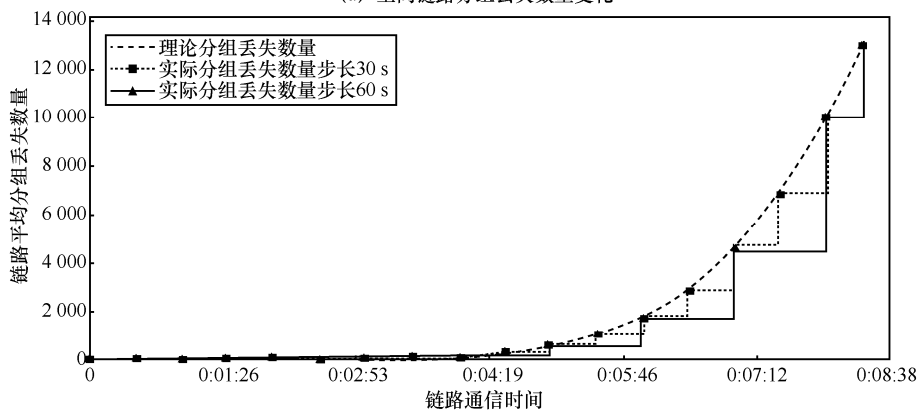


(b) 星地链路延时变化

图 10 卫星链路延时变化



(a) 星间链路分组丢失数量变化



(b) 星地链路分组丢失数量变化

图 11 卫星链路分组丢失数量变化

5.4 带宽测试

将卫星节点 GEO15 到 LEO71、LEO43 的下行星间链路最大带宽设置为 50 Mbit/s, 分配给 LEO71、LEO43 的链路带宽为 20 Mbit/s、30 Mbit/s。地面站节点 BJStation 到 LEO71、LEO43 的上行星地链路最大带宽设置为 10 Mbit/s, 分配给 LEO71、LEO43 的链路带宽为 1 Mbit/s、9 Mbit/s, 使用 Netperf 网络性能测试工具并发测试卫星链路带宽, 星间链路、星地链路带宽测试结果如图 12 所示。

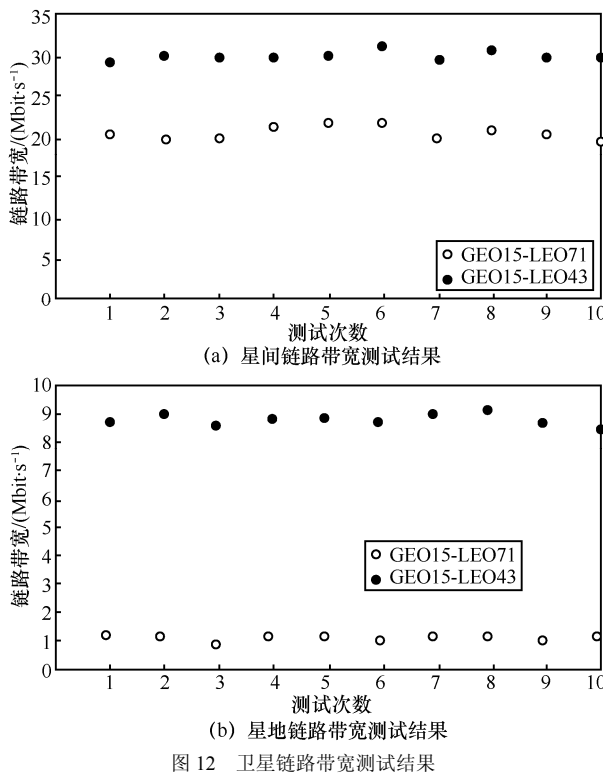


图 12 卫星链路带宽测试结果

从图 12 可以看出, 星间链路 GEO15-LEO71 与 GEO15-LEO43 的带宽比值近似于 2:3, 星地链路 BJStation-LEO71 与 BJStation-LEO43 的带宽比值近似于 1:9, 符合预期的链路带宽分配, 星间链路平均带宽总和为 50.25 Mbit/s, 星地链路平均带宽总和为 9.91 Mbit/s, 总体误差小于文献[15]中卫星链路带宽仿真误差。

6 结束语

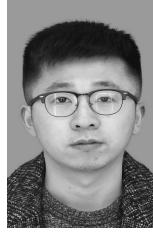
天地一体化信息网络是未来的发展趋势, 其各种技术方案必须经过严格的验证与评估。本文提出了一种云计算环境中卫星链路仿真方法, 对卫星链路的性能参数进行了分析, 给出了详细的计算模型与方法, 融合 OpenStack 和 STK 构建天

地一体化信息网络仿真平台, 基于 SDN 技术仿真卫星链路, 实现卫星网络场景的自动化部署, 不同轨道高度的卫星节点具备动态路由学习能力, 卫星链路性能参数可动态实时切换。实验结果表明, 本文方法能够准确地对卫星链路性能参数进行仿真, 仿真粒度可按需求灵活选择, 不仅有效解决了卫星链路仿真的逼真性和周期性问题, 并且还能支撑实际应用部署。

参考文献:

- [1] 李风华, 殷丽华, 吴巍, 等. 天地一体化信息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.
- [2] 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 CAEIT, 2015, 10(3): 223-230.
- [3] LI T, ZHOU H, LUO H, et al. Using SDN and NFV to implement satellite communication networks[C]//2016 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). 2016: 131-134.
- [4] BAO J, ZHAO B, YU W, et al. OpenSAN: a software-defined satellite network architecture[C]//ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2014: 347-348.
- [5] 王亮, 张乃通, 刘晓峰. 低轨卫星通信网络星间链路几何参数动态特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(2): 184-187.
WANG L, ZHANG N T, LIU X F. Dynamic characters of inter-satellite links in LEO networks[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2003, 35(2): 184-187.
- [6] 尹艳平, 刘波, 赵宝康, 等. 星地链路建模与分析[J]. 小型微型计算机系统, 2012, 33(10): 21-23.
YIN Y P, LIU B, ZHAO B K, et al. Modeling and analysis of satellite-ground link[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2012, 33 (10): 21-23.
- [7] 余腾, 刘志敏. 基于 NS-3 的卫星链路 TCP 仿真研究[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(22):90-94.
YU T, LIU Z M. Study on TCP simulation of satellite link based on NS-3[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(22):90-94.
- [8] 李博, 叶晖, 张宏伟, 等. 基于 STK/Matlab 接口的卫星通信链路研究[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(6): 37-40.
LI B, YE H, ZHANG H W, et al. Dynamical satellite link budget analysis based on STK/Matlab interface[J]. Radio communication technology, 2016, 42 (6): 37-40.
- [9] RIZZO L, LETTIERI G, MAFFIONE V. Very high speed link emulation with TLEM[C]// 2016 IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN). 2016: 1-6.
- [10] BECKE M, DREIBHOLZ T, RATHGEB E P, et al. Link emulation on the data link layer in a Linux-based future internet testbed environment[C]//The 10th International Conference on Networks (ICN). 2011: 92-98.
- [11] PÉRENNOU T, BOUABDALLAH A, BRUNSTROM A, et al. IP-level satellite link emulation with KauNet[C]// International Workshop on Satellite and Space Communications. 2009: 349-353.

- [12] LI H, ZHOU H, ZHANG H, et al. EmuStack: an openstack-based DTN network emulation platform[C]// 2016 International Conference on Networking and Network Applications (NaNA). 2016: 387-392.
- [13] QI J, LI Z, LIU G. Research on coverage and link of multi-layer Satellite Network based on STK[C]//2015 10th International Conference on Communications and Networking in China (ChinaCom). 2015: 410-415.
- [14] 丁红勇. 卫星通信链路连通性仿真模型设计[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(4): 713-715.
DING H Y. Design of connectivity simulation model of satellite communication link[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(4): 713-715.
- [15] 陶静, 王宝生, 王涛, 等. 分布式卫星链路仿真系统的设计与实现[J]. 计算机工程与科学, 2009, 31(11): 145-148, 152.
TAO J, WANG B S, WANG T, et al. Research and implementation of a distributed satellite link simulation system[J]. Computer Engineering and Science, 2009, 31 (11): 145-148, 152.



叶海洋 (1993-), 男, 江苏南通人, 江南大学硕士生, 主要研究方向为卫星网络。



李剑锋 (1993-), 男, 江苏盐城人, 江南大学硕士生, 主要研究方向为网络仿真。

[作者简介]



刘渊 (1967-), 男, 江苏无锡人, 江南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为网络安全、网络仿真。



王晓锋 (1978-), 男, 江苏无锡人, 博士, 江南大学副教授, 主要研究方向为网络仿真、网络安全。



张浩 (1993-), 男, 江苏丹阳人, 江南大学硕士生, 主要研究方向为网络仿真、卫星网络。



张桂珠 (1962-), 女, 江苏无锡人, 江南大学副教授, 主要研究方向为数据挖掘、并行计算。