



空间延迟容忍网络半物理仿真平台的设计和实现

张思耀, 吴静, 江昊, 相煜帆

(武汉大学电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 空间延迟容忍网络(DTN)架构通过“存储—携带—转发”等功能可以有效地支持具有长时延、高误码率、链路频繁通断等特性的深空通信网络。由于深空通信方面应用的实验不易搭载测试, 于是, 搭建准确可信的半物理仿真平台对深空通信任务的设计进行仿真论证是非常必要的。提出了支持各种特定的深空通信任务仿真的空间 DTN 半物理仿真平台。本仿真平台为深空通信新理论、技术等提供地面仿真与验证, 为开展深空通信应用研究提供了分析工具以及测试手段。

关键词: 延迟容忍网络; 深空通信; 半物理仿真平台; SDN

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2016187

Design and implementation of semi-physical simulation platform in space delay tolerant network

ZHANG Siyao, WU Jing, JIANG Hao, XIANG Yufan

School of Electronics and Information, Wuhan University, Wuhan 430072, China

Abstract: The architecture of space delay tolerant networking can effectively support a deep space communication network with long delay, high error rate and on-off frequently link characteristics through “store-carry-forwards” and other features. Due to the experiment of application of deep space communication is not easy to carry, so building an accurate and reliable semi-physical simulation platform for simulating and making an argumentation of the design of deep space communication tasks was very necessary. A space DTN semi-physical simulation platform was proposed which supported a variety of specific deep space communication tasks simulation. The simulation platform provided new theory and technology for ground simulation and verification, and provided analysis tools and test instruments for carrying out deep space communication application study.

Key words: delay tolerant network, deep space communication, semi-physical simulation platform, SDN

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-07-07

基金项目: 中国电子科技集团公司第 54 研究所高校合作基金资助项目“空间信息网络 SDN 关键技术研究及效能仿真验证”; 中央高校自主科研项目(No.2042014gf020, No.2042014kf0256); 湖北省自然科学基金面上项目(No.2014CFB716, No.2011CDA042); 国家自然科学基金资助项目(No.61371126)

Foundation Items: Higher Education Cooperation Foundation of the 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation “the Key Technology Research and Performance Simulation in Spatial Information Network and SDN”, Autonomous Science Research Project in Central Affiliated University(No. 2042014gf020, No. 2042014kf0256), Natural Science Foundation of Hubei Province of China(No.2014CFB716, No.2011CDA042), The National Natural Science Foundation of China(No.61371126)

1 引言

随着空间通信方面的需求日益增加,空间通信逐渐趋向网络化发展,而且这种趋势已成为空间通信研究的主流。空间网络具有时延长、误码率高、网络拓扑不断变化、链路通断频繁等特点,使得在报文传输的过程中,收发两端不能稳定地保持端到端的路径。DTN (delay tolerant network, 延迟容忍网络)可以提供跨越间歇、中断、动态网络的可靠消息传递,适合应用于空间网络这类受限网络,为空间网络互联提供有效连接方式。空间 DTN 将 DTN 结构^[1]引入空间网络体系中。

空间 DTN 在深空通信方面已有许多研究。NASA (美国国家航空航天局)开展了大量的空间 DTN 互联研究。在国际空间站的应用环境中,也进行了相应的 DTN 应用验证实验^[2],空间站上进行的生物实验生成的实验数据被成功地传回地面控制中心。在基于 DTN 体系结构的深度撞击航天器中进行了数据传输飞行验证^[3],项目将 300 幅图像从地面传到深度撞击航天器后成功传回,对基于 DTN 的空间网络数据传输的许多环节(数据束的生成、传输、获取、动态路由计算、拥塞控制等)进行了验证。灾难检测星座是由一些近地轨道卫星组成的星座,在这个星座中也开展基于 DTN 的数据传输飞行验证实验^[4],对地面遥测的数据先保存,等到适当的时机再通过地面站传回控制中心。参考文献[5]描述了在 NASA 的空间网络环境中按需提供快速上行数据服务的方案。该方案提出了一种动态的、按需服务的方式:通过使用 DTN 协议栈,以一种清晰、简洁的方式满足服务的数据传输需求。ESA (European Space Agency, 欧洲航天局)资助的“扩展 Internet 到太空”^[6]是一个研究开发项目,在一个实验平台主体上实现 CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems, 国际空间数据系统咨询委员会)和 DTN 的许多协议。DTN 为 SIS 提供了有效的解决方案,但是目前太空中已经部署了大量各种类型的资产,不可能一步到位地在其中部署 DTN 协议。为此 CCSDS 提出了 DTN 体系与现有的协议体系共存,并最终发展到以 DTN 为主的体系结构演进方案^[7]。

我国空间信息网络建设起步比较晚,在 DTN 方面的研究主要集中在移动无线传感器网络、无线移动自组网的路由算法等细节技术层面,并没有在系统层面上提出可靠的解决方案,而且也没有具体的异构网络互联的可操作性规范,在航天领域尤其是在深空通信中的应用研究仍是

空白。深空通信面临着与传统地面无线通信截然不同的通信难题,不仅对技术要求高,同时具有高成本、高风险的特点,研究代价大,因此,在深空通信任务进行前,建立准确、可靠的仿真平台进行前期的仿真论证是必要的

国内外面向 DTN 设计实现的仿真平台主要有 NS2、OMNeT++、DTNsim 和 ONE 等。NS2 和 OMNeT++主要针对通用的网络,对 DTN 不具备良好支持,而且需要用户自己开发特定模块,如果要进行深空通信网络仿真,效果不好,而且开发起来比较困难;DTNsim 和 ONE 仿真器都是针对 DTN 开发的模拟器,然而 DTNsim 只是集中在路由的模拟,不符合本文的要求,而 ONE 具有模拟分析多种 DTN 协议的能力,在 DTN 模拟中具备很强大的优势,但是 ONE 仿真的环境缺少物理层和链路层的支持,换句话说,只是在软件层面对 DTN 进行仿真,只能模拟传输虚拟数据,不能进行真实的数据传输。为了能够直观、真实、系统地仿真深空通信网络,基于用户特定的深空通信场景,本文搭建了空间 DTN 半物理仿真平台,在深空通信载体对应的 PC 间模拟深空通信网络中真实的数据传输。利用流量控制工具 Netem 模拟深空通信网络的长时延、高分组丢失率、高误码率等特性,而链路的频繁通断则基于 SDN (software defined networking)架构来实现,从而达到与深空通信场景相对应的网络拓扑。通过实验证明,本平台仿真模拟的空间链路灵活性好、参数全面可配置,而且是对深空环境的真实模拟;在 HLA 架构下,采用联邦管理各联邦成员,成员之间互不影响,仿真平台扩展性以及重用性好。

2 仿真平台设计与实现

仿真平台应实时反映出深空通信环境,对相应参数(传输时延、误码率、链路状态等)进行实时的自动更新。深空通信过程复杂,需要仿真平台具备多个子系统来同步模拟,采用 HLA/RTI 时间管理技术可以使各个子系统分别保持数据中时间逻辑同步以及各子系统间的信息和数据交互同步。整个平台包含 3 个子模块:数据中心模块、深空环境仿真模块和通信节点模块。平台整体结构如图 1 所示,RTI (run-time infrastructure) 为运行支撑环境。

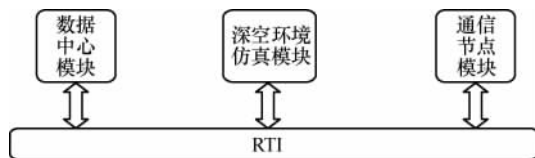


图 1 仿真平台结构示意图



2.1 通信节点模块

真实的深空通信场景可以通过 STK (satellite tool kit) 卫星工具软件包来模拟仿真,但真实的数据流动则必须由对应的通信节点设备实现,所以得采用硬件设施(电脑)来模拟通信节点设备。在数据传输过程中,各节点能完整地模拟数据的保管传输、存储转发和间断连接等特性。在实现中,为了节省资源,采用虚拟化的方式在一台主机上模拟多个网络节点,这就对虚拟机(VM)的 I/O 性能有很高的要求。虚拟机操作系统多数情况下是通过 VMM(virtual machine monitor, 虚拟机监视器)来与硬件进行通信,由 VMM 来决定其对系统上所有虚拟机的访问,而 VMM 工作运行则会进一步增加服务器处理器的负载。这里采用 Intel 虚拟化技术(VT),直接分配物理 I/O 设备给 VM,这个模型下,VM 内部的驱动程序直接和硬件设备直接通信,只需要经过少量或者不经过 VMM 的管理,这个模型几乎完全消除了 VMM 中运行驱动程序的需求,从而大大提升了虚拟化的 I/O 性能。具体的实现是:每台主机上通过 KVM 虚拟机虚拟出 4 个节点,每个节点拥有两块网卡:虚拟网卡(管理网卡)和 PCIe 物理网卡(通信网卡),前者用于与数据收集调度分析模块交互,接收配置命令,后者用于通信仿真中 Bundle 分组传输。

根据已经发布的 DTN 协议,DTN 研究小组已经用 C++ 语言实现了 DTN 协议的原型——DTN2 软件,DTN2 中实现了 Bundle 协议中的几乎全部关键功能,如 Bundle 分组的托管传输、Bundle 路由以及数量众多的汇聚层实现,可以直接用于实际的部署。直接将 DTN2 编译安装在 VM 上。外部主机主要用于管理 VM,包括创建、分配资源、启动和停止等操作,内部 VM 则运行 DTN 协议栈和通信应用,模拟真实的 DTN 通信。在每台电脑上搭建的虚拟化平台如图 2 所示。

2.2 深空环境仿真模块

模拟深空通信真实场景可以为仿真平台提供实时链路信息,主要包括空间 DTN 中各个通信设备间的链路实时通断情况、链路质量(时延、上下行带宽比)、链路传输

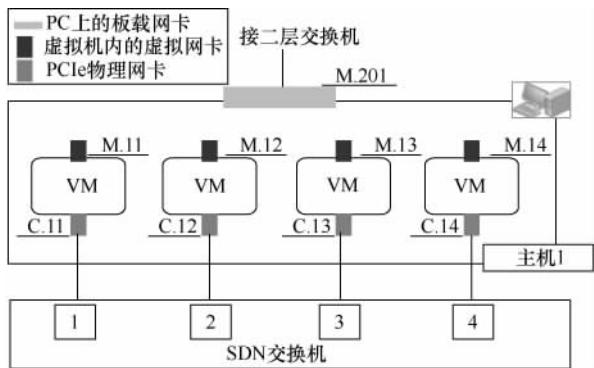


图 2 节点软硬件平台示意

性能等。STK 中的仿真功能可以实时提供所需的各种仿真参数。需要将这些仿真参数反馈到真实的通信链路上。在通信过程中,通信节点之间的链路传输性能(时延、误码率、分组丢失率),可以通过 Linux 系统下的 Netem 模块实现,通过 Netem 设置带宽限制、分组丢失率和时延等参数,以达到真实的空间链路效果。使用到的主要命令及其功能见表 1。

深空通信中的网络拓扑是在不断变化的,链路通断频繁。这里采用 SDN 的思想模拟深空通信中的各个通信节点间链路的通断,通过流表控制 SDN 交换机以达到链路通断目的。Floodlight 控制器是开源的 SDN 控制器,提供 REST API 编程接口,通过 REST API 可以使用 HTTP 的 get/post/delete 方法实现对流表的信息获取、添加、删除等操作,见表 2。图 3 所示为利用 Floodlight 控制 SDN 交换机的示意,工作过程如下:控制程序利用 STK 提供的 connect 命令,通过执行命令获取各个 STK 对象之间的 access 信息;在可见性的 starttime 和 endtime 时间点调用 Floodlight 提供的 REST API,进行流表修改,即可控制通信节点之间的通断。而在通信过程中,拓扑是动态变化的,链路的通断也不断变化,所以利用 Floodlight 下发的流表应该实时更新。在控制程序中设计了一个算法,由于对象之间的可见性都有间隔,于是每隔 0.1 s 获取当前 STK 场景里的时间,然后判断是否在某一段可见性时间内,基本的算法流程如图 4 所示,这样就实现了链路动态变化。

表 1 Netem 命令及其功能

命令	功能
tc qdisc add dev eth0 root cbq bandwidth 10 Mbit/s avpkt 1000 cell 8 mpu 64	带宽为 10 Mbit/s,分组平均大小为 1 000 byte,分组间隔发送单元的大小为 8 byte,最小传输分组大小为 64 byte
tc qdisc add dev eth0 root netem loss 10%	分组丢失率 10%
tc qdisc add dev eth0 root netem delay 50 ms	时延 50 ms

表 2 本平台常用的 REST API

作用	HTTP 方法	URI	数据参数(JSON 格式)
获取已连接的交换机信息	get	/wm/core/controller/switches/json	无
增加流表	post	/wm/staticflowentrypusher/json	流表实体描述
删除流表	delete	/wm/staticflowentrypusher/json	流表实体描述
清除所有流表	get	/wm/staticflowentrypusher/clear/<switch id>/json	无
获取指定交换机的流表信息	get	/wm/staticflowentrypusher/list/<switch id>/json	无

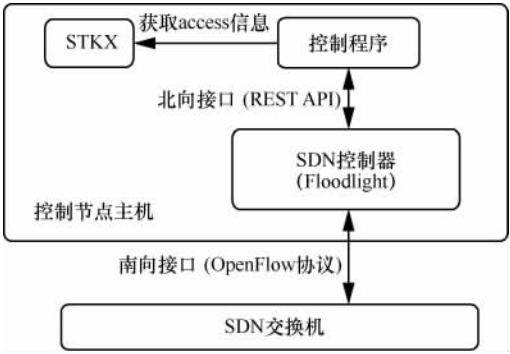


图 3 Floodlight 控制 SDN 交换机示意

2.3 数据中心模块

数据中心模块主要有 3 个功能:数据采集、数据处理分发和数据分析。

(1)数据采集

采集当前深空通信场景仿真的实时数据和仿真过程中真实数据流的统计信息。

(2)数据处理分发

依据这些采集的数据进行评判,然后分发给各个通信节点,保证节点根据参数模拟通信链路,从而保证数据有效运行。

(3)数据分析

分析数据流的统计信息,将这些信息提供给指标函数进行更新计算。

在数据传输以及接收的过程中,数据中心模块通过 RTI与 VM(通信节点)的 dtnd(delay tolerant network daemon, dtn 守护进程)通信,获取所需的性能参数,并进行计算得到要求的性能指标。指标计算的大体工作过程是:按固定间隔发送命令,获取统计信息,将统计信息提供给各指标的计算函数进行更新计算,将计算结果呈现在图表中,其工作流程如图 5 所示。数据中心模块程序通过 Telnet 协议连接位于 VM 中的 dtnd 进程,发送统计命令以获取统计信息。

已实现的指标有 5 个:队列长度、平均成功交付率、报文传输比、网络平均时延、网络开销比。

(1)队列长度

假设在仿真时刻 t , 节点 i 上缓存的 Bundle 报文数量为 M_i ,则节点 i 在时刻 t 的队列长度为 M_i 。

(2)平均成功交付率

假设在仿真时间 $[0,t)$ 内,共有 N 个节点生成并发送了 Bundle 报文。对于节点 $i \in [1,N)$,将它发送的 Bundle 报文

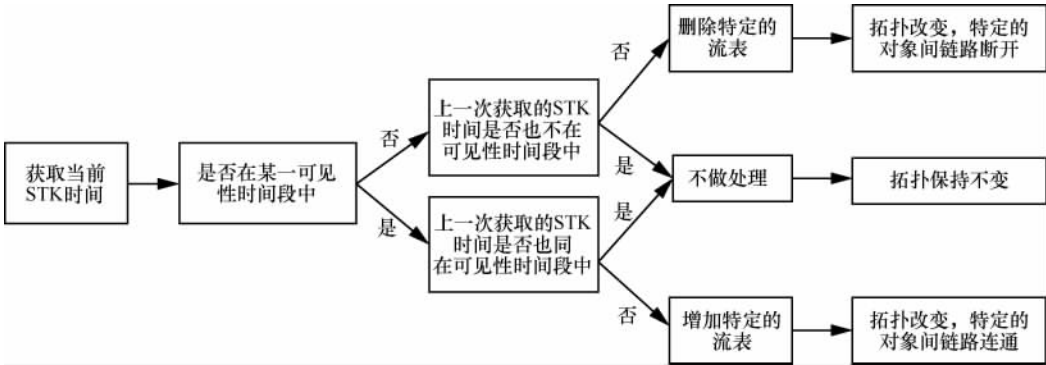


图 4 动态下发流表的算法流程

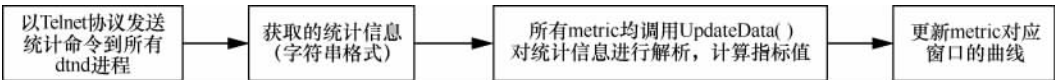


图 5 指标计算显示的流程



总数记为 x_i ; 将 x_i 个 Bundle 报文中, 成功到达目的节点的 Bundle 报文数量记为 y_i , 那么在仿真时间 $[0, t]$ 内, 平均成功交付概率可以定义为:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^N y_i / x_i}{N} \quad (1)$$

(3) 报文传输比

在仿真时间 $[0, t]$ 内, 将各网络节点新生成的 Bundle 报文总数记为 X (不包含由于路由策略不同, 而产生的 Bundle 报文复制); 将 X 个 Bundle 报文中, 成功传送到目的节点的数量记为 Y , 则报文传输比可以定义为:

$$pd = \frac{Y}{X} \quad (2)$$

(4) 网络平均时延

在仿真时间 $[0, t]$ 内, 将各网络节点新生成的 Bundle 报文总数记为 X 。对于 Bundle 报文 $i \in [1, X]$, 将它从源节点开始, 到达目的节点为止, 所花费的时间记为 t_i , 则网络平均时延可以定义为:

$$na = \frac{\sum_{i=1}^X t_i}{X} \quad (3)$$

(5) 网络开销比

在仿真时间 $[0, t]$ 内, 将已经开始传送, 但最终没有到达目的节点的 Bundle 报文总数记为 Q , 将已经开始传送, 并最终成功到达目的节点的 Bundle 报文总数记为 P , 则网络开销比可以定义为:

$$m = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

前文分别介绍了 3 个模块的设计及实现, 整个平台的具体部署结构如图 6 所示, 4 个 Linux 主机实现通信节点模块, 控制程序中 DTN 路由及链路的配置、数据传输服务配置、链路参数的配置、交换机控制各个 DTN 节点链路属于深空通信环境模块, 而数据采集分析及处理和虚拟机的管理程序则属于数据中心模块。平台的工作流程如图 7 所示。STK 仿真程序先建立仿真场景, 计算节点轨迹、覆盖性等并保存。控制台从 STK 获取场景文件等, 送给 STKX 进行场景演示。控制台将场景信息经过转换后生成 SDN 控制器可识别的指令, 由 SDN 控制器执行并对 SDN 交换机进行链路配置。控制台将链路状况信息发送给节点模拟设备的 Netem 模块, Netem 模块根据这些信息进行节点的链路配置。全部信息配置好后, 系统开始运行, STKX 实时显示 2D、3D 场景, 节点模拟设备的 DTN2 根据链路情况控制业务源发送业务数据。节点模拟设备将状态信息实时回送给控制台程序进行同步显示。

3 仿真平台测试与分析

根据深空通信的特性, 此处采用了一种比较典型的月球信息采集场景, 数据源为环月卫星 A, 中继节点为拉格朗日点的卫星 B 和地球同步卫星 C, 地面站为数据接收端。仿真场景如图 8 所示。在通信过程中, 环月卫星 A 围绕月球飞行时不断采集信息, A 不能时刻保持与 B 的通信链路, 它将需要传送的消息进行缓存, 当 A 移动到 B 的通

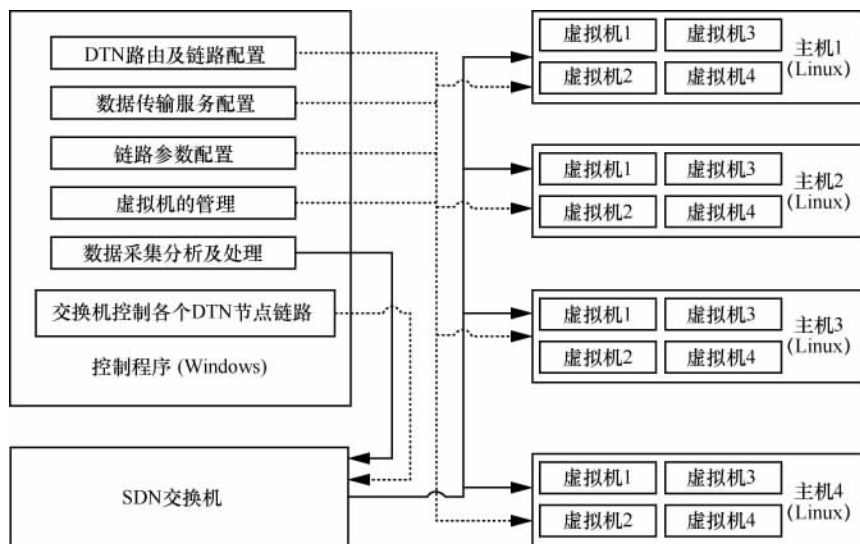


图 6 平台具体部署结构

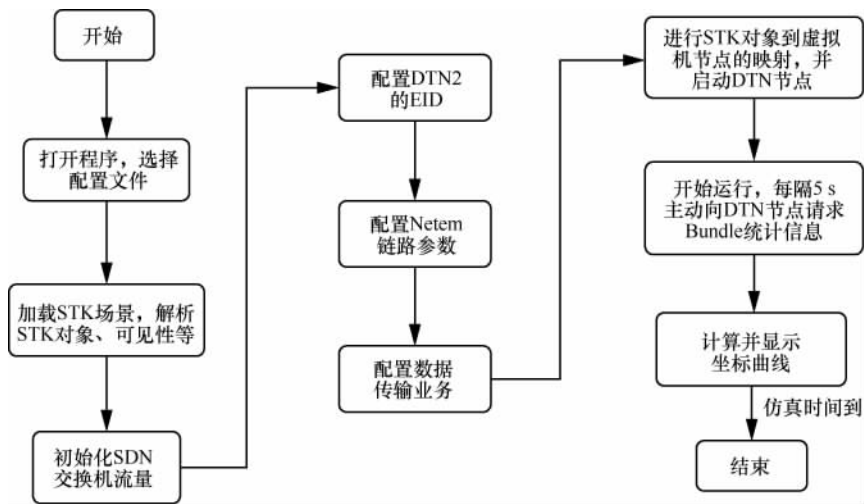


图 7 平台工作流程

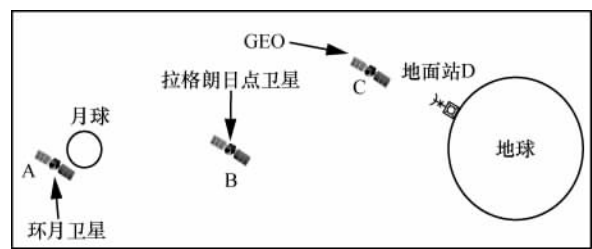


图 8 仿真场景

信范围内时,向 B 交付消息。B 收到消息后可能与卫星 C 也没有直接的通信链接,必须对消息进行缓存,待 C 运动到 B 的通信范围内时,B 与 C 建立通信连接,B 将消息发送给 C,C 将消息最终交付给 D。

此场景选用图片作为传送数据,选用图片的优势是:在通信过程中,根据图片的同步接收及显示情况可以直观地反映出深空通信环境的变化对数据传输的影响及所设计的深空通信任务方案的可行性。在仿真过程中可以得到各指标曲线,图 9 为队列长度曲线,队列长度曲线可以很直观地反映出通信过程中,通信节点缓存 Bundle 分组数量的变化情况,所以这里主要分析队列长度曲线。

在最初阶段,环月卫星和地面站的视频流是连通的,所以环月卫星和拉格朗日点卫星的缓存队列为 0,随着卫星的运转,拉格朗日点卫星和地球同步卫星 GEO 的链路断开,这时拉格朗日点的卫星仍在继续接收环月卫星传来的数据,且将这些数据缓存在 Bundle 层里面,所以曲线在不断上升。在环月卫星和拉格朗日点卫星的链路断开之后,环月卫星开始缓存数据,曲线开始上升,而拉格朗日点缓存的数据上升速率会有变化,主要由拉格朗日点和 GEO

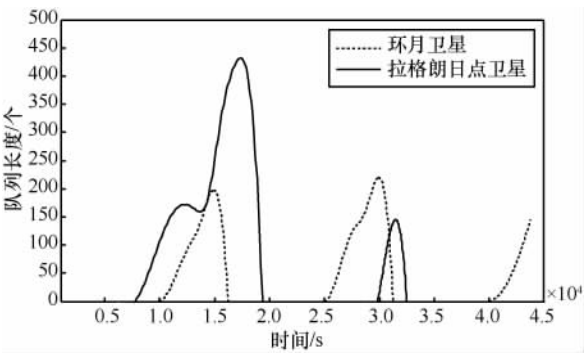


图 9 队列长度曲线

之间的链路通断引起。后面的情况也如此。队列长度曲线如预期的变化也验证了仿真平台在模拟深空通信过程方面的可行性。图 10 分别为其余 4 个指标的曲线。

由图 10 可以看出,报文传输比和平均成功交付率以及网络开销比的曲线形状大致相似,从式(1)、式(2)、式(4)来分析,平均成功交付率类似于报文传输比的平均值,都是到达的 Bundle 分组在所发出的 Bundle 中的比例,所以曲线相似,而网络开销比就是未收到的 Bundle 分组与收到的 Bundle 分组的比值,所以也与报文传输比、平均成功交付率的曲线类似。图 10(a)、图 10(b)中曲线的下降阶段,表示抵达的 Bundle 分组的速率对比发出的 Bundle 分组速率直线下降,而这个时段正是链路断开,Bundle 分组不断产生的时候;而曲线上升则表示链路连通,Bundle 分组会不断地到达目的接收端,与 STK 中运行中的场景正好对应。图 10(c)中曲线的高低分别对应未抵达 Bundle 分组的多少,由于场景正在运行中,在不断地产生 Bundle 分组,而产生 Bundle 分组的速率比到达

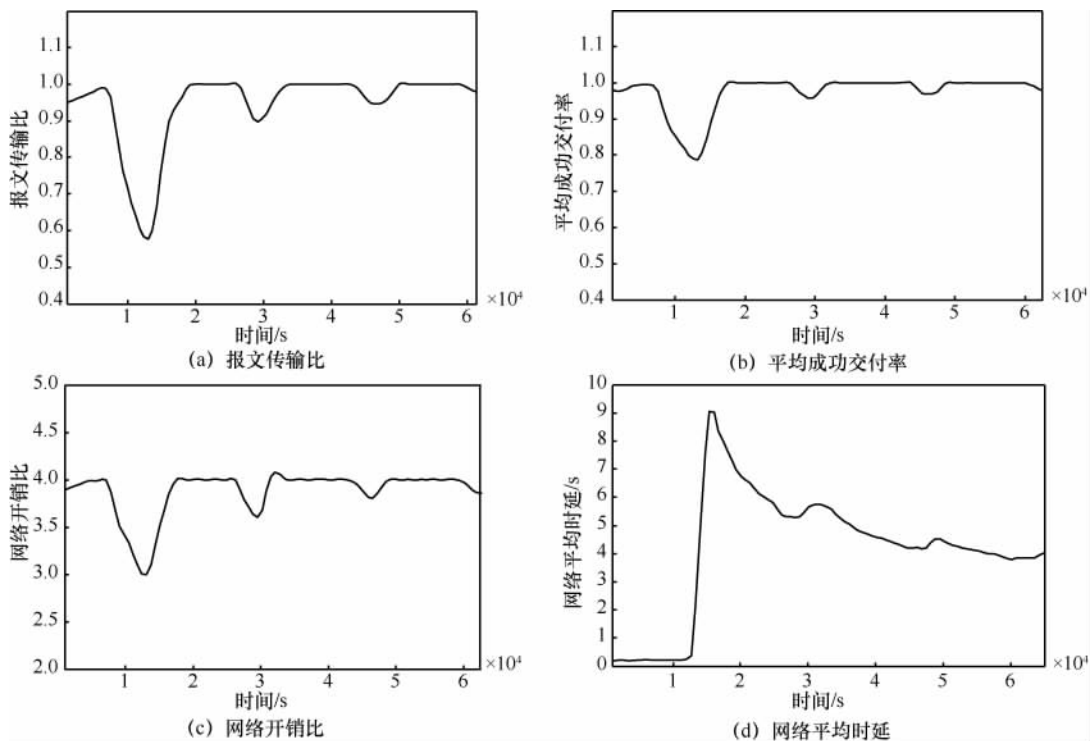


图 10 仿真平台指标曲线

目的地的 Bundle 分组的速率快, 所以未到达目的地的 Bundle 分组很多, 但是在通信过程的后期, 发出分组的速率变小或者分组越来越少时, 未到达的分组比例会变少, 曲线会一直下降, 直到一个合适的比例。图 10(d) 中曲线上升阶段正是目的接收端与数据转发节点端链路断开的阶段, 所以这个时候时延会一直上升, 时延比较大, 而一旦链路连通时, 时延会急速下降, 与 STK 中运行的场景相对应。

4 结束语

本文实现了一套实时性好、可扩展重用以及互操作性好的分布式空间延迟容忍网络半物理仿真平台。通过 STK 软件仿真空环境系统, 把真实的空间环境实时地映射到平台中。通过虚拟化的方式在资源占用率低的情况下模拟出多个通信节点, 而且运用 SDN 的方法以及流量控制工具, 解决了模拟深空通信环境中链路的动态变化难题, 实现与空间环境同步的 DTN 通信仿真。在特定的场景模拟了真实的数据传输, 完成了本平台上的仿真, 同时也验证了本平台设计实现的可行性。该平台能够为相关通信技术提供切实可行的验证手段和实现分析方法。但是本平台还有些许不足, 比如 SDN 控制器目前只部署在模拟地面站

节点中, 这会导致在地面站对卫星不可见的时候, SDN 控制器会失去控制效果。而对于深空通信环境的模拟, 深空通信环境远比想象复杂, 比如磁暴、宇宙噪声、电波的传输损耗等对链路传输质量带来的影响在本平台中并未考虑。后期的工作重点会放在 SDN 控制器在飞行器的部署和 SDN 控制器的集群以及使用卫星链路仿真器 (satellite link emulator, SLE) 来模拟真实链路上。

参考文献:

- [1] CERF V, BERLEIGH S, HOOKE A, et al. Delay-tolerant networking architecture [EB/OL]. (2013-05-07) [2016-03-24]. <http://tools.ietf.org/html/rfc4838>.
- [2] JENKINS A, KUZMINSKY S, GIFFORD K K, et al. Delay/disruption-tolerant networking: flight test results from the international space station[C]//2010 IEEE Aerospace Conference, March 6-13, 2010, Big Sky, MT, USA. New Jersey: IEEE Press, 2010: 1-8.
- [3] WYATT J, BURLEIGH S, JONES R, et al. Disruption tolerant networking flight validation experiment on NASA's EPOXI mission[C]//2009 First International Conference on Advances in Satellite and Space Communications, July 20-25, 2009, Colmar, France. New Jersey: IEEE Press, 2009: 187-196.
- [4] WOOD L, IVANCIC W, EDDY W, et al. Use of the

delay-tolerant networking bundle protocol fromspace [EB/OL]. (2008-06-03) [2016-03-24]. https://www.researchgate.net/publication/228598657_Use_of_the_Delay-Tolerant_Networking_Bundle_protocol_from_space.

- [5] ISRAEL D J, DAVIS F, MARQUART J. A DTN-based multiple access fast forward service for the NASA space network [C]// 2011 IEEE Fourth International Conference on Space Mission Challenges for Information Technology (SMC-IT), Aug 2-4, 2011, Palo Alto, CA, USA. New Jersey: IEEE Press, 2011: 61-65.
- [6] DISCOS: distributed information storage and communication in outer space [EB/OL]. (2013-05-17) [2016-03-24]. <http://www.intersys-lab.org/pages/projects.php>.
- [7] CCSDS. CCSDS 734, 0-G-1 rationale, scenarios, and requirements for DTN in space[S]. 2010.

[作者简介]



张思耀(1990-),男,武汉大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为无线网络、DTN、SDN等。



吴静(1981-),女,武汉大学电子信息学院副教授,主要研究方向为网络管理和性能优化、网络路由技术。



江昊(1976-),男,武汉大学电子信息学院教授、博士生导师,主要研究方向为无线网络、移动互联网、大数据分析挖掘、空间综合信息网络等。



相煜帆(1992-),男,武汉大学电子信息学院硕士生,主要研究方向为无线网络、DTN、SDN等。