

1-3-2019

## Design of Real-time Digital Baseband Simulator for Spatial Information Networks

Jianfeng Liu

*1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, Chengdu 611731, China; ;*

Ma Shang

*1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, Chengdu 611731, China; ;*

Zeguo Yang

*1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, Chengdu 611731, China; ;*

lixiang Liu

*2. Institute of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design of Real-time Digital Baseband Simulator for Spatial Information Networks

## Abstract

**Abstract:** The commonly used channel simulators always focus on the characteristics of RF signals at the receiver. However, they are costly in real-time simulation for spatial information network with multi-link and dynamic topology change. In this paper, *a scalable simulator architecture for spatial information network, a simulation method for dynamic topology and channel propagation characteristics based on baseband data packages* are presented. Based on this, *a real-time spatial information networks simulation platform is designed and implemented*. The platform can simulate the channel propagation delay, bit error, and dynamic topology changes for spatial information network. It supports 16 to 256 emulated nodes and up to 1024 links with dynamic topology change for spatial network. The delay and bit errors rate (BER) ( $1e-3$  to  $1e-9$ ) can be configured for each link independently. When the data rate is 100 kbps, the propagation delay range can be configured from 1 millisecond to 20 minutes.

## Keywords

spatial information networks, digital baseband simulation, dynamic topology of network, transmission delay, bit errors

## Authors

Jianfeng Liu, Ma Shang, Zeguo Yang, lixiang Liu, and Jianhao Hu

## Recommended Citation

Liu Jianfeng, Ma Shang, Yang Zeguo, Liu lixiang, Hu Jianhao. Design of Real-time Digital Baseband Simulator for Spatial Information Networks[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(5): 1755-1762.

## 实时空间信息网络数字基带仿真平台设计

刘剑锋<sup>1</sup>, 马上<sup>1</sup>, 杨泽国<sup>1</sup>, 刘立祥<sup>2</sup>, 胡剑浩<sup>1</sup>

(1. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731; 2. 中国科学院软件研究所 北京 100190)

**摘要:** 传统的信道模拟器侧重于对空口信号的传播特性进行仿真, 在多链路动态拓扑变化的空间信息网络实时仿真中无能为力。针对现代空间信息网络的特点, 提出了一种可扩展空间信息网络模拟器架构, 以及基于基带数据包处理的信道传播特性和拓扑动态变化仿真方法。设计并实现了一种基于数字基带的实时空间信息网络仿真平台, 实现空间信息网络各链路的精准延时、实时误码插入及动态拓扑变化仿真。平台支持 16~256 个仿真端口及多达 1024 条链路, 可配置误码率范围为  $1e-3$  到  $1e-9$ , 数据率为 100 kbps 时传输延时可配置范围为 1 ms~20 min。

**关键词:** 空间信息网络; 数字基带仿真; 动态网络拓扑; 延时; 误码

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 05-1755-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201805017

## Design of Real-time Digital Baseband Simulator for Spatial Information Networks

Liu Jianfeng<sup>1</sup>, Ma Shang<sup>1</sup>, Yang Zeguo<sup>1</sup>, Liu Lixiang<sup>2</sup>, Hu Jianhao<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, Chengdu 611731, China;

2. Institute of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The commonly used channel simulators always focus on the characteristics of RF signals at the receiver. However, they are costly in real-time simulation for spatial information network with multi-link and dynamic topology change. In this paper, a scalable simulator architecture for spatial information network, a simulation method for dynamic topology and channel propagation characteristics based on baseband data packages are presented. Based on this, a real-time spatial information networks simulation platform is designed and implemented. The platform can simulate the channel propagation delay, bit error, and dynamic topology changes for spatial information network. It supports 16 to 256 emulated nodes and up to 1024 links with dynamic topology change for spatial network. The delay and bit errors rate (BER) ( $1e-3$  to  $1e-9$ ) can be configured for each link independently. When the data rate is 100 kbps, the propagation delay range can be configured from 1 millisecond to 20 minutes.

**Keywords:** spatial information networks; digital baseband simulation; dynamic topology of network; transmission delay; bit errors

## 引言

空间信息网络是以卫星为载体, 空、天、地一



收稿日期: 2016-08-01 修回日期: 2016-12-09;  
基金项目: 国家自然科学基金(61571083), 中央高校基本业务费(ZYGX2014J009);  
作者简介: 刘剑锋(1989-), 男, 江西, 硕士生, 研究方向为通信信号处理、大规模 FPGA 设计等; 马上(1978-), 男, 四川, 博士, 副教授, 研究方向为数字信号处理。

体化的网络系统, 作为一种重要的战略基础设施, 深入研究和发展空间信息网络具有重要的意义, 现已在全球范围内得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。由于空间节点连接关系变化快速导致空间信息网络拓扑处于高动态实时变化状态; 不仅如此, 不同的收发端所处空间环境不同造成各链路信道特性不同。这些因素是空间信息网络规划、体系结构及软硬件平台设计

<http://www.china-simulation.com>

• 1755 •

的主要考虑因素。然而,实际试验与测试复杂度很高且信道时变性导致测试无法重复等情况,建立实时空间信息网络仿真平台有着非常重要的意义。

自从空间信息网络概念提出开始,就受到了世界各国极大的关注。美国在空间信息网络领域的研究处于国际领先地位,而中国对空间信息网络的研究正在进入一个高速发展阶段。截止2016年1月,已有1381颗在轨卫星在活动中,美国持有其中568颗,几乎是其他国家拥有量的总和;中国在轨卫星数目已经超过俄罗斯,位列世界第二<sup>[2]</sup>。空间信息网络仿真研究的关键之一在于对卫星星地及星际链路的模拟,目前已有许多较为成熟的信道传输模型,例如C.Loo<sup>[3]</sup>, Corazza<sup>[4]</sup>和Lutz模型<sup>[5]</sup>等,这些模型描述的是卫星移动通信过程中信号的传输特性,包括多普勒频移、多径效应、阴影遮蔽等<sup>[6-8]</sup>。基于这些传输模型的实时信道仿真器已有研究<sup>[9]</sup>,广泛应用的商用产品包括GLOCOM公司设计的SCATT2000, dBM公司设计的SLE900等。然而,它们关注的重点在于空间信号在传播过程中的衰落、延时及多普勒特性<sup>[10]</sup>。这种方式虽然可以实现较为精确的信道传输特性模拟,但是在多链路高动态拓扑变化的空间信息网络实时仿真中无能为力,且成本昂贵,例如芬兰伊莱比特公司的F8在2通道配置下就需要几百万人民币。另一方面,在构建空间信息网络的研究中,其重点往往是对网络拓扑的实时变化特征进行模拟<sup>[11]</sup>,实际上,在任何数字通信过程中,信道中的各种干扰、衰落最终都将表现为接收端的基带误码,通信中断等现象<sup>[12]</sup>。基于数字基带的实时仿真平台避免了昂贵复杂的射频、中频模拟电路设计,可以显著降低整个系统的复杂度和成本,特别适合对多链路高动态拓扑变化的实时仿真。

本文针对高动态、多链路的空间信息网络,设计并实现了一种基于数字基带的实时空间信息网络仿真平台,重点模拟空间网络拓扑的高动态变化、基带残留误码特性以及传输时延变化。系统由控制平台和实时仿真平台构成。控制平台使用业界

广泛使用的STK软件模拟卫星运动轨迹,动态仿真卫星网络的拓扑连接、延时、误码等信息,并下发给实时仿真平台。实时仿真平台由大规模FPGA及嵌入式处理器构成,根据控制平台下发的各种信息实时改变链路参数和网络拓扑结构。整个系统采用了可扩展架构设计,可针对不同的应用灵活配置仿真规模,最多可支持256个仿真节点的空间信息网络实时仿真,其中每个节点可同时建立最多8条物理链路,每条链路可独立配置误码和延时,误码率配置范围为 $1e-3$ 到 $1e-9$ ;当数据率为100 kbps时,传输延时可从1 ms~20 min。

## 1 系统架构

### 1.1 可扩展实时仿真平台结构

由于空间信息网络中卫星数量繁多,连接场景多变,因此往往采用全软件方式进行系统仿真。但这一方法实时性较差,也不便于空间信息网络规划和核心软件的设计验证。而传统的信道模拟器往往着重于对空间传输信号的细致刻画,很难做到大规模实时仿真。因此,考虑到空间信息网络仿真的实时性和仿真规模,特别是拓扑动态变化要求,本文采用如图1所示的可扩展系统平台结构,以应对复杂多变的仿真场景。

系统采用软硬件结合的方式实现,控制平台核心部件为STK软件,它完成人机交互、星座设计和链路参数设计等工作,并每隔时间 $\Delta T$ 时更新空间网络拓扑,链路参数等。 $\Delta T$ 决定了模拟空间信息网络网络拓扑、各节点状态的更新速度。使用STK软件保证了空间网络模拟的运行状态的准确性,每隔 $\Delta T$ 时刻,控制平台将所有链路参数和网络拓扑状态通过转换函数进行计算,然后下发至硬件实时仿真平台当中。最终下发的参数为各节点之间的连接矩阵、延时矩阵和误码矩阵。实时仿真平台由1~4台仿真子系统构成,根据不同的仿真规模灵活配置。每台仿真子系统包含1~4个仿真单元,每个仿真单元16个仿真节点,因此本系统最大可支持256个仿真节点。为了实现灵活的仿真规模配

置, 在单个仿真子系统配置下控制平台直接同该子系统专门的配置/交换单元连接; 在多个仿真子系统配置下, 控制平台同专门的中央交换子系统连接, 各子系统之间的通过光纤与中央交换子系统连接实现仿真数据的交互。

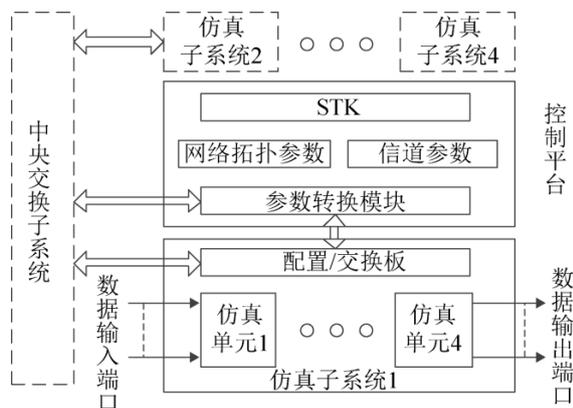


图 1 系统整体结构(最大仿真配置模式)

Fig. 1 Simulator architecture(Maximum simulation configuration mode)

## 1.2 系统关键参数设计

### 1.2.1 时钟设计

合理的时钟设计是系统工作的前提, 时钟设计包括两方面, 其一是时钟速率及稳定性, 其二是子系统内的时钟同步问题。对于后者, 由于各仿真子系统和子系统内的各仿真单元之间由高速 GTX 接口实现数据的异步收发, 同时系统所有的数据以数据包方式进行, 因此在时钟速率相同的情况下无需特别考虑时钟同步问题。系统内部工作时钟与系统的吞吐率直接相关, 本系统中每个仿真子系统的仿真单元中处理数据位宽为 32 bit, 时钟为 150 MHz, 因此最大吞吐率可达 4.8 Gbps, 远大于每个仿真单元 1.6 Gbps 的数据速率。

### 1.2.2 存储单元容量及速率计算

本文采用 DDR SDRAM 来模拟空间信息传输中的路径延时, 结合实际空间网络中的最大路径延时, 每个仿真单元使用 4 片 512 MB DDR 存储器实现 16 个仿真节点的路径延时仿真, 1 片 DDR 存

储器实现四个仿真节点的路径延时仿真。由于每个端口都可同时与其它任意 8 个端口实现连接, 因此 4 个仿真端口最大可能存在 32 条链路连接, 故每条链路的存储深度为  $512/(4 \times 8) = 16$  MB。本系统对以太网 MAC 包直接进行处理, 其最大包长为 1 526 字节, 最小为 64 字节。可实现的最大延时  $T_d$  为:

$$T_d = LN/S \quad (1)$$

式中:  $L$  为数据包长度;  $N$  为存储的数据包个数;  $S$  为传输速率。例如, 在 100 kbps 平均通信速率下, 可以实现长达 20 min 的路径延时仿真。

另一方面, 由于在每个仿真单元中每 4 路端口使用 1 片 SDRAM, 对应输入/输出峰值速率为 400 Mbps, 因此 DDR 存储器的端口速率应大于 800 Mbps。

### 1.2.3 GTX 传输带宽设计

单个仿真子系统中首先将数据包发往配置/交换板, 再由配置/交换板根据配置信息发往对应的仿真单元实现仿真节点之间的信息交互。每个仿真单元有 16 个 100 Mbps 的以太网口, 其峰值速率为 1.6 Gbps。因此, 仿真子系统内的用于数据交换的 GTX 速率 > 1.6 Gbps 即可, 本系统选择选择 GTX 线速率为 6.25 Gbps。而对于仿真子系统之间的数据交互, 则通过专门的中央交换子系统实现, 考虑到每个仿真子系统最多 4 个仿真单元, 因此单个子系统仿真数据的峰值速率可达 6.4 Gbps, 采用两条 6.25 Gbps 的光纤链路进行连接。

## 2 系统逻辑架构与核心功能单元设计

本文所设计的空间信息网络仿真平台重点在于对拓扑动态变化的模拟, 并反映数字基带上信道特性, 包括路径延时和实时信道误码插入。

### 2.1 系统逻辑架构

信息网络仿真平台的核心为各仿真子系统, 子系统含两种类型不同的单元: 仿真单元和配置/交换

单元, 其逻辑框图及两者的连接关系如图2所示。

配置/交换单元完成两个主要功能, 其一是完成子系统内不同仿真单元之间以及与其它子系统之间的仿真数据交互, 这是它的核心功能。其二是与控制平台连接, 控制平台每间隔 $\Delta T$ 时间给出当前空间网络各卫星状态, 并计算出当前的网络拓扑(连接关系)、信道延时、误码等参数, 通过交换控制单元发送到各仿真子系统。

仿真子单元实现各链路的路径延时、实时误码插入和数据交换等功能。所有仿真都基于MAC数据包进行, 各仿真端口与仿真终端通过100 Mbps以太网连接。为了实现灵活的网络动态拓扑仿真, 本文对每个MAC数据包进行单独处理。实现动态拓扑仿真关键在于根据控制平台信息, 在数据包输入后进行成帧处理, 为每个MAC包添加源端口号、目的端口号等必要信息。路径延时由高速DDR存储组件完成, 误码插入在数据包输出时完成, 延时和误码参数由控制平台实时更新。控制平台对底层的仿真系统完全可控, 包括对所有仿真端口号、仿真节点的映射关系、各链路的误码率、延时信息, 甚至每条链路所指定的存储空间位置信息等的配置。因此, 不同的仿真场景仅在控制平台上运行的软件部分进行设计即可, 便于系统的后续升级。

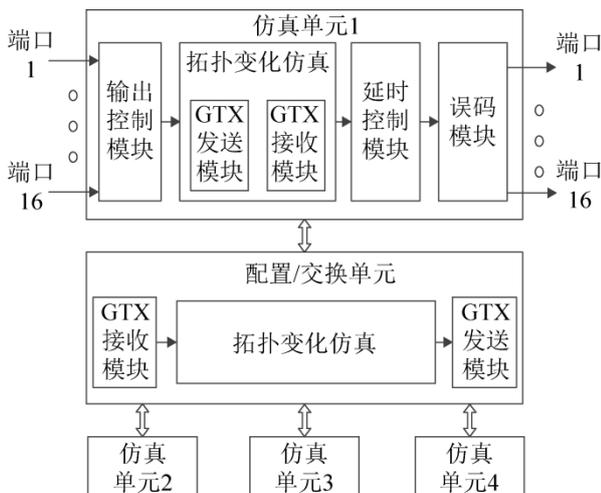


图2 仿真子系统逻辑架构

Fig. 2 Subsystem architecture of simulation module

## 2.2 动态拓扑仿真

为了实现多链路及动态拓扑的仿真, 本文所设计的仿真平台全部基于对MAC层的数据包进行处理。所有从仿真端口输入的数据包首先根据连接关系进行成帧处理, 添加必要的帧头信息, 数据包格式如图3所示。



图3 用于动态拓扑仿真的数据包格式

Fig. 3 Frame format for dynamic topology simulation

各仿真单元根据对应参数为MAC包添加源端口和目的端口信息, 一个源端口和目的端口对表示了一条连接链路, 该信息是实现网络拓扑动态变化的关键, 由仿真控制平台在每个 $\Delta T$ 时间提供。后续处理则根据每个包的源端口、目的端口信息进行分发处理, 若目的端口在本仿真单元内则直接送至路径延迟模拟模块, 否则通过GTX接口送至配置/交换单元; 配置/交换单元同样根据源端口和目的端口号进行数据分发, 决定将数据包送至本子系统内的某个仿真单元或者送至其它仿真子系统。由于用于控制仿真数据传输路径的矩阵(即源端口与目的端口号)由仿真控制平台更新, 因此这一数据交换过程即可实现仿真节点间的网络连接拓扑动态变化。

## 2.3 基于数据包的高精度路径延时方法

空间信息网络中各节点位置高动态变化导致了链路之间的延时也随之改变, 节点之间传播延时仿真应尽可能做到高精度、大范围的要求。1.2.2中已指出每一片用于路径延时仿真的DDR存储空间被划分为32个子空间, 仿真控制平台根据实际链路情况动态分配这32个存储空间以实现更大的链路延时模拟。

延时单元根据控制平台下发的存储空间指派信息将对应源端口和目的端口(代表了一条链路)

的数据包存储到相应的存储空间内,同时针对每条链路单独设计一个计时器。系统开始时,每个预留的延时空间均为空,一旦第一个数据包开始输入到该存储空间则开始计时,当计时时间到达设定阈值(由控制平台计算)时开始读出第一个数据包。一旦该条链路存储空间为空时,则将计时器复位。由于仿真端口的数据包以 100 Mbps 突发速率进行收发,数据包长度和间隔决定了仿真节点实际的平均速率。为了提高延时精度,仿真节点进行数据收发时应进行流量控制并以较均匀的包速率发出数据,延时控制单元对输入的数据包间隔时间做统计平均得到读出各数据包顺序读出的时间间隔  $\bar{\tau}$ ,在每读出一个数据包后若该链路存储空间不为空,则等待  $\bar{\tau}$  时间后再读取下一个数据包,其状态转换过程如图 4 所示。因此,经延时模块的处理,每个数据包的延时误差直接和仿真节点所发出的数据包间隔与平均数据包间隔相关。而计时器和存储单元读写控制单元工作在较高频率下(200 MHz),其所引入的误差在 1  $\mu$ s 以下,可忽略不计。

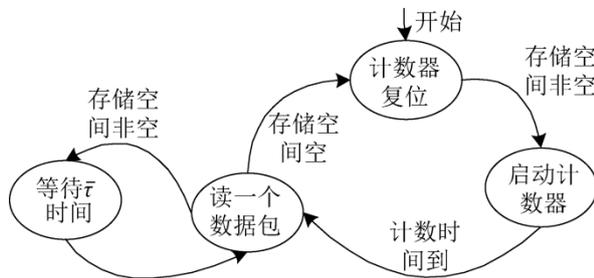


图 4 高精度数据包延时处理状态机

Fig. 4 State machine for high precision delay controlling

## 2.4 基带误码插入

除传播延时外,另一个在基带部分反映出来的重要特性是接收端经解调、解交织、信道解码等处理后的基带残留误码。控制平台在每个仿真时刻计算各链路的误码率,实时仿真平台则根据该参数对各链路进行独立的误码插入。在本系统中基带误码的实时仿真有两个核心问题:其一是高效的误码生成和插入方式,由于在单片 FPGA 中最多支持 128 条链路,因此随机误码的生成应尽可能简单,以减

小硬件资源消耗;其二是误码插入应符合实际通信中信道误码的分布特性,即在一定统计周期内误码的持续时间和发生次数应接近实际情况。

针对以上两个问题,本文提出了一种硬件资源消耗少且可实现精确误码插入的方法,如图 5 所示。首先,利用 4 个长周期伪随机序列生成均匀分布随机数,然后根据中心极限定理将它们相加生成高斯随机序列。然后,针对每条链路根据高斯随机序列的累计分布函数,可以求得序列输出值低于阈值  $v$  的概率  $p$ ,阈值  $v$  作为链路误码率  $p$  的控制参数,当高斯序列输出  $v_{gauss}$  小于  $v$  时生成一个误码,如式(2)所示。

$$x = \begin{cases} 0 & v_{gauss} \geq v \\ 1 & v_{gauss} < v \end{cases} \quad (2)$$

最后,将比较器输出值与输入数据进行异或,完成对数据的误码添加。

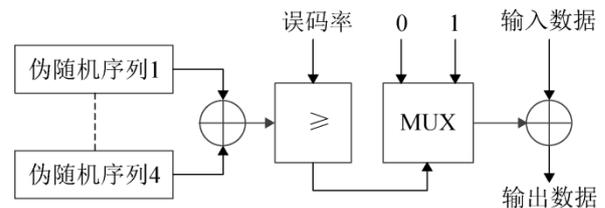


图 5 基带误码插入

Fig. 5 Error bit insertion for baseband signal

文献[12]指出在高斯信道下的基带误码统计特性,会受到信道编码方式、交织方式和调制方式等产生的影响。在对各信道参数条件下的误码统计特性进行拟合后可以发现,虽然不同的信道其对应的误码率变化很大,但其误码持续期发生次数和误码持续期长度大体一致。图 6 为误码率为  $1.66 \times 10^{-3}$ ,序列长度为 65535 时误码持续期发生次数与误码持续期长度仿真图,可见在持续期内误码发生次数呈负二项分布,而误码长度集中在 1~2 比特,这与文献[12]的讨论结果一致。由于伪随机序列仅需循环移位寄存器即可实现,因此对于单个误码生成硬件资源消耗较少,可以支持本系统在片 FPGA 内多达 128 路的误码插入。

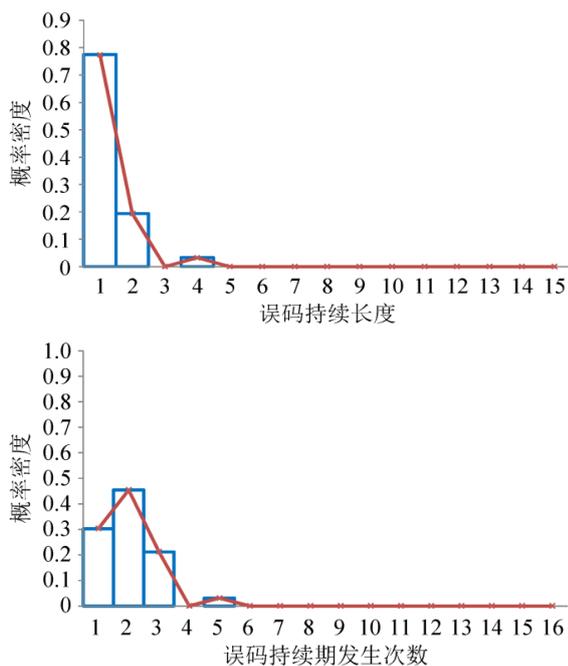


图6 基带误码统计特性  
Fig. 6 Statistical property of error bit

### 3 系统测试及性能对比

为了测试整个平台的工作模式及其仿真精度，本文中构建了一个 Walker 星座，仿真控制平台将该 Walker 星座运行时的拓扑变化及对应各链路参数下发到仿真子系统中以测试平台的各项性能。

#### 3.1 测试设置

Walker 星座可用 5 个参数  $T/P/F:h:i$  来表示， $T$  为星座的卫星综述； $P$  为星座的轨道面数量； $F$  为相位因子，用来确定相邻轨道相邻卫星的初始相位差； $h$  和  $i$  分别为卫星的轨道高度和倾角。

在测试实例中使用的 Walker 星座标识为 9/3/1:10355:43。从该标识中可以得出该星座拥有 9 颗卫星，并可知该星座所有卫星的初始轨道参数。上位机将初始轨道参数转化为连接矩阵、误码矩阵和延时矩阵发送到仿真平台当中进行仿真。

连接矩阵由 Walker 星座中各卫星的距离决定，当两颗卫星之间没有遮挡时，则判定两颗卫星之间存在连接；当卫星的连接路数超过 8 条时，取其中最短的 8 条链路为存在连接链路。

延时矩阵也由 Walker 星座中各卫星的距离决定，当两颗卫星之间距离为  $d$  km 时，延时  $\tau$  为：

$$\tau = \frac{d}{c} \quad (3)$$

式中： $c$  为光速，单位为 km/s。

误码矩阵由 Walker 星座中各卫星的信道模型决定，测试中链路的调制方式为 QPSK，此时生成的误码率  $p$  由信噪比决定：

$$p = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \sqrt{\frac{E_b}{2n_0}} \right) \quad (4)$$

#### 3.2 测试结果

由于卫星网络中每颗卫星在测试当中的地位相同，因此本文选取了卫星一作为测试样本。表 1 给出了在该测试实例中的某一仿真时刻，卫星一与其它卫星的连接关系、误码及路径延时的理论计算值及实际仿真结果。在表 1 中，第二、三和四列“/”左边部分为测试实例下的理论计算值，右边内容为实际测试结果。

表 1 卫星一仿真参数与测试结果

Tab. 1 Test result for satellite I

连接关系	理论误码/误码测试结果	理论延时/延时测试结果	连接性/测试结果
卫星一~卫星二	2.3e-4/2.34e-4	86 ms/85 ms	√/连通
卫星一~卫星三	6.8e-5/6.92e-5	75 ms/74 ms	√/连通
卫星一~卫星四	N/A / N/A	N/A / N/A	N/A/不通
卫星一~卫星五	N/A / N/A	N/A / N/A	N/A/不通
卫星一~卫星六	6.1e-4/6.06e-4	107 ms/106ms	√/连通
卫星一~卫星七	1.3e-5/1.33e-5	63 ms/63 ms	√/连通
卫星一~卫星八	7.2e-5/7.31e-5	92 ms/91 ms	√/连通
卫星一~卫星九	N/A / N/A	N/A / N/A	N/A/不通

测试中, 利用 Wincap 编写了底层统计程序来对仿真数据进行精确的误码率和路径延时统计, 以验证系统仿真的精确性。该程序将输入到仿真平台中的数据包与输出数据包进行逐比特对比统计, 计算出误码率; 将输入数据包的时间戳与输出数据包的时间戳进行对比, 计算出路径延时; 在对应的输入输出捕捉数据包是否连通, 统计链路的连接关系。

由表 1, 观察其中卫星一和卫星二之间的测试结果, 此时误码测试结果为  $2.34e-4$ , 而理论误码值为  $2.3e-4$ 。它们之间存在的微小误差是由于系统运行时间并未达到误码生成周期所导致。卫星一与卫星二之间理论延时为 86 ms, 而测试结果为 85 ms, 两者之间的差异主要是因为数据包在系统中需要经过其他模块处理, 引入了误差。

从表 1 中结果可以看出, 仿真结果与配置参数之间存在的误差较小, 在系统的可接受范围以内, 能够正确的反映 STK 中卫星状态, 是一种行之有效的仿真方法。

### 3.3 性能对比

目前, 大多数信道模拟器均在模拟射频或中频上对卫星信道特征进行模拟, 它们主要目的在于刻画空口信号的变化情况, 用于收发信机的设计和开发, 但缺少对卫星网络拓扑变化及其延时误码特性进行仿真的信道模拟器。本文在考虑应用需求的情况下, 提出了基于数字基带信号的信道模拟器。作为对比, 本文选择了 dBm 公司出品的 SLE9250 这款信道模拟器, 它是目前可以查阅到的最新一款具有多通道仿真功能并作为产品出售的信道模拟器。表 2 为本文提出的信道模拟器与该产品进行的比较, 参数来自于网络可查的最新结果。

由表 2 中可知, 本文提出的信道模拟器主要用来刻画卫星在拓扑上的变化, 因此卫星通道数可最多支持 256 路, 并支持多节点间的互相连接, 这是传统的卫星信道模拟器所无法实现的功能。而且本文提出的信道模拟器数据源来源于网口, 与传统的

信道模拟器数据来源于信号源发生器有着巨大的差异, 因此可以将本文提出的信道模拟器与上位机进行联合仿真, 具有极大的便利性。

表 2 本文仿真平台与 SLE9250 对比  
Tab. 2 Comparison with SLE9250

参数	dBm 公司 SLE9250	本文仿真平台
仿真接口	射频	以太网口
信号类型	射频信号	基带信号
通道数	4 路	16-256 路
延时	最大 890 ms	1-1 200 000 ms
信道噪声	有	有
多节点连接	不支持	支持
动态拓扑	不支持	支持

## 4 结论

本文设计并实现了一种基于数字基带的空间信息网络实时仿真平台, 该平台具有实时、可扩展等优点, 可支持多达 256 个仿真节点及 1 024 条链路的空间信息网络仿真, 力求对空间信息网络拓扑的变化、链路的延时和误码进行接近实际情况的仿真。并提出了一种基于数据包的精确延时方法及高效的多链路误码生成及插入方法, 使得本系统可以支撑较大规模的空间信息网络半实物仿真。测试结果表明, 该仿真平台能够实时反映空间信息网络拓扑变化、能准确反映链路延时和误码特性, 空间信息网络相关研究具有重要的应用价值。

### 参考文献:

- [1] JESSICA M R. Challenges of integrating NASAs space Communication networks[C]// Systems Conference, 2013 IEEE International. USA: IEEE, 2013: 475-482.
- [2] UCS Satellite Database. UCS Satellite Database 1/1/16. [DB/OL]. (2016-07-25) [2015-12-31] <http://www.ucsusa.org/nuclear-weapons/space-weapons/satellite-database>.
- [3] LOO C. A statistical model for a land satellite link[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 1985, 34(3): 122-127.
- [4] CORRAZA G E. A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit system[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 1994, 43(3): 738-742.

(下转第 1771 页)