

6-14-2018

Real-time Simulator for Spatial Information Networks based on Analog IF Signal Processing

Zeguo Yang

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;;

Diaopeng Huang

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

Jianhao Hu

1. National Key Laboratory of Science and Technology on Communication, Chengdu, 611731, 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 Original Article 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.

Real-time Simulator for Spatial Information Networks based on Analog IF Signal Processing

Abstract

Abstract: To solve the problem of real-time simulation of spatial information network with high dynamic network topology, *a real-time simulator based on the IF signal processing is proposed*. Compared with traditional channel simulator, it supports both the channel transmission characteristics like channel fading, Doppler shift, noise, and path delay, *and the real-time simulation of dynamic network topology changes*. The simulator *supports 8~128 70 MHz IF (0~20 MHz signal bandwidth) emulated nodes with flexible link type configuration*. The maximal fading depth is 100 dB, the maximal Doppler shift is 2 MHz, and the maximal path delay can reach up to 2 s. It is a powerful tool in the spatial information networks design and research.

Keywords

spatial information networks, dynamic network topology, analog IF signal processing, propagation characteristics, scalable architecture

Authors

Zeguo Yang, Ma Shang, Diaopeng Huang, Jianhao Hu, and Lixiang Liu

Recommended Citation

Yang Zeguo, Ma Shang, Huang Diaopeng, Hu Jianhao, Liu Lixiang. Real-time Simulator for Spatial Information Networks based on Analog IF Signal Processing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2153-2161.

基于模拟中频的空间信息网络仿真平台设计

杨泽国¹, 马上¹, 黄雕鹏¹, 胡剑浩¹, 刘立祥²

(1. 电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 四川 成都 611731; 2. 中国科学院软件研究所 北京 100190)

摘要:传统的信道模拟器关注于射频信号传输的细致刻画,但在具有高动态网络拓扑的空间信息网络实时仿真中无能为力。为解决该问题,提出了一种基于模拟中频信号处理的空间信息网络仿真平台,在模拟中频仿真链路衰落、多径、多普勒、噪声、路径时延等信道特性的同时实时仿真网络拓扑的动态变化。平台支持8~128个最大20 MHz信号带宽的70 MHz模拟中频仿真节点,可灵活配置各链路类型,最大衰落深度100 dB,最大多普勒2 MHz,最大传播延时2 s。可作为空间信息网络设计规划的有力支撑工具。

关键词:空间信息网络; 动态网络拓扑; 模拟中频处理; 信道传播特性; 可扩展架构

中图分类号: TN927

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2153-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806019

Real-time Simulator for Spatial Information Networks based on Analog IF Signal Processing

Yang Zeguo¹, Ma Shang¹, Huang Diaopeng¹, Hu Jianhao¹, Liu Lixiang²

(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: To solve the problem of real-time simulation of spatial information network with high dynamic network topology, a real-time simulator based on the IF signal processing is proposed. Compared with traditional channel simulator, it supports both the channel transmission characteristics like channel fading, Doppler shift, noise, and path delay, and the real-time simulation of dynamic network topology changes. The simulator supports 8~128 70 MHz IF (0~20 MHz signal bandwidth) emulated nodes with flexible link type configuration. The maximal fading depth is 100 dB, the maximal Doppler shift is 2 MHz, and the maximal path delay can reach up to 2 s. It is a powerful tool in the spatial information networks design and research.

Keywords: spatial information networks; dynamic network topology; analog IF signal processing; propagation characteristics; scalable architecture

引言

空间信息网络在国民经济、现代军事中具有举足轻重的作用,它以卫星为信息处理节点,具有高动态网络拓扑、较大的传播时延及星地链路传播特

性复杂等特点。在进行空间信息网络设计与规划、信息传输体制设计等工作中,空间信息网络仿真平台不可或缺,它可以进行接近真实环境下的实时仿真,预先确定系统参数,从而大大提升空间信息网络设计的效率,并显著降低成本。

针对无线信号传输的实时信道仿真平台,目前绝大多数商用或专用信道仿真设备均关注于对射频空口接收信号进行细致刻画,这对于收发信机的研制具有重要作用^[1-6]。例如, dBM 公司最新研发



收稿日期: 2016-08-01 修回日期: 2016-11-14;
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: 杨泽国(1994-), 男, 陕西, 硕士生, 研究方向为通信信号处理、大规模 FPGA 设计等。

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

• 2153 •

升级的信道链路模拟器 SLE900 基于瑞利与莱斯衰落分布, 可以提供更宽的信号仿真与可持续改变的动态参数调整^[1]。电子科技大学设计并实现了一个基于三状态马尔科夫链的卫星信道模拟器, 该信道模拟器结合 Loo 分布和多普勒频移, 完成实时卫星信道仿真^[2]。然而, 对于空间信息网络的实时仿真, 不仅需要结合具体星座运行情况对每条链路的信道传输特性, 如多普勒频移、路径时延、衰落和噪声影响等进行模拟, 还需要重点反映网络拓扑的动态变化情况。后者是空间信息网络与传统信道模拟器之间的显著区别。针对多链路动态拓扑逻辑变化的信道仿真, 哈尔滨工业大学设计了一种用于 L/S 波段的中频等效低轨道卫星信道模拟器, 利用六个独立衰落通道仿真 3 颗卫星与 3 个用户之间的上下行链路, 并可以切换通道给不同用户^[3]。但对于构建更为复杂的空间信息网络仿真无能为力。另一方面, 商用的信道模拟器即使单通道配置下售价往往也达数百万人民币, 购置成本高昂且不支持动态拓扑变化仿真。针对现代空间信息网络的复杂性和研究现状, 本文基于模拟中频信号结合空间信息节点传播特性设计并实现了一种空间信息网络实时仿真平台, 采用模拟中频信号进行仿真的原因在于它可以在反映空口信号传播特性的同时极大简化系统设计, 使得大规模的多链路空间信息网络实时仿真成为可能。

该仿真平台实现 2 个主要功能: (1) 基于模拟中频信号实现各链路的传播特性仿真; (2) 是动态网络拓扑仿真。对于信号的传播特性, 常用的信道模型包括 C.Loo 模型^[7]、Corazza 模型^[8]和 Lutz 模型等^[9], 这些模型描述了卫星通信过程中, 通信节点间的噪声、多普勒、多径效应及阴影衰落等特性。其中, 多径及阴影衰落主要用于描述星地链路的衰落特性。在实际的卫星通信系统中, 由于星地链路传输的特殊性, 在终端不进行高速移动时多径及阴影衰落效应影响较小, 而大量的空间信息节点之间的信号传播则基本上仅有噪声和多普勒的影响。正是基于此, 本文对信号的传播特性进行了适当简

化, 设计并实现了一种基于 Corazza 模型的中频信号空间信息网络仿真平台。另一方面, 由于节点间的高速运动导致网络拓扑高动态变化, 节点之间的通信链路呈现实时的通断及大动态时延变化, 这是空间信息仿真的重点之一。为了实现这些实时仿真功能, 整个仿真系统由仿真控制平台和实时仿真平台构成, 仿真控制平台采用 STK(Satellite Tool Kit) 软件实现空间各信息处理节点之间的连接关系、信道参数计算, 实时仿真平台根据这些参数实现网络动态拓扑仿真及各信道的传播时延、多径、阴影衰落、多普勒频移、噪声等传播特性仿真。本文主要介绍实时仿真平台的设计与实现, 为满足多达上百个通信节点的仿真需求, 平台采用了灵活的可扩展硬件架构, 支持 8~128 路 70 MHz 模拟中频信号的实时仿真; 最大信号带宽 20 MHz; 输入输出功率 0~-60 dBm; 可灵活配置各仿真节点类型并模拟各链路之间的衰落特性, 最大衰落深度可达 100 dB; 支持最大多普勒 2 MHz; 最大传播延时 2 s。

1 系统架构与动态拓扑仿真

1.1 系统架构

对于现代空间信息网络, 仅空间中卫星数量就可能达到几十上百个, 例如 GPS 多达 24 颗卫星, 而北斗系统则达到了 35 颗卫星。若仅针对某类特定系统设计实时仿真系统, 则对于空间信息网络的建设和没有实际意义。因此, 对于空间信息网络的实时仿真平台的设计, 首先应具有高度的开放性和可配置性。另一方面, 系统应支持复杂的星座设计以支持不同空间信息网络的规划和设计。此外, 考虑到反映空间信息网络的链路连接及时延变化情况并结合目前的设计手段, 系统慢变化过程可以在普通计算机平台实现, 而对于链路的传播特性细致刻画、传输波形信号处理及大动态时延变化的精确仿真则可以由实时硬件仿真平台来实现。基于空间信息网络仿真的以上特点, 本系统采用如图 1 所示的系统结构。系统由仿真控制平台和实时仿真子系统构成。

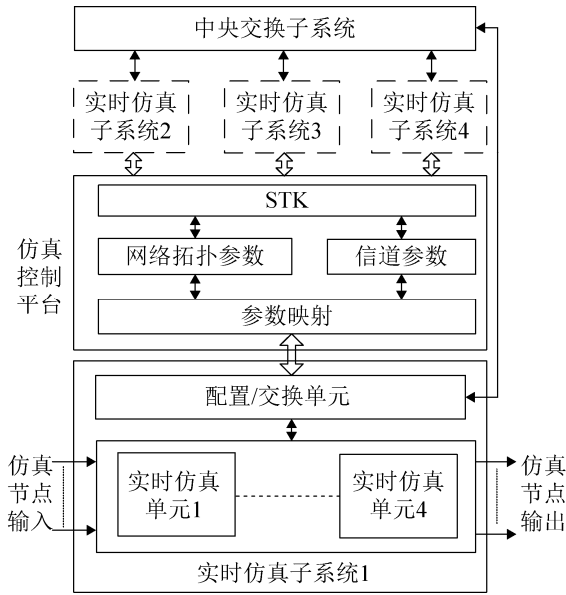


图 1 系统整体架构

Fig. 1 System architecture for the simulator

仿真控制平台运行 STK 软件, 它完成卫星星座设计, 模拟卫星运动轨迹、计算空间信息网络拓扑; 根据这些信息控制平台对卫星运行参数及信道特性参数进行计算, 并完成信道参数到实时仿真平台的映射, 每隔 ΔT 仿真时间将当前空间拓扑结构和信道参数下发至实时仿真平台。仿真控制平台控制通过设置 ΔT 的长短来实现不同粒度的系统仿真, 作为业界使用最多的 STK 仿真套件, 它可以

支持每 ΔT 的空间信息网络状态的实时更新。在每个更新节点, 实时仿真平台的各仿真单元则根据当前的空间信息网络特征, 在 ΔT 时间内为每条链路添加实时的信道传播特性及传播延时, 并改变链路连接关系。为了支持灵活的仿真规模配置, 每个子系统含有一个专门的配置/交换单元, 它主要有两个功能: 第一, 接受来自控制平台发送的空间信息网络数据, 该数据在每个 ΔT 时间进行一次更新; 第二, 完成同一子系统内不同仿真单元及不同仿真子系统间的仿真数据交互, 子系统之间通过光纤进行连接。

整个系统最大支持 4 个实时仿真子系统, 每个子系统最大支持 4 个实时仿真单元, 每个单元支持 8 个仿真节点, 因此每个仿真子系统支持 32 路模拟中频仿真节点, 整个系统支持最大 128 个仿真节点。

1.2 动态网络拓扑仿真

由于空间节点处于高速运动状态, 因此网络拓扑复杂、具有高动态性。动态拓扑的核心是完成各仿真单元、仿真子系统之间信号交换, 以仿真空间信息网络中各节点之间的实时连接关系, 其逻辑连接关系如图 2 所示。

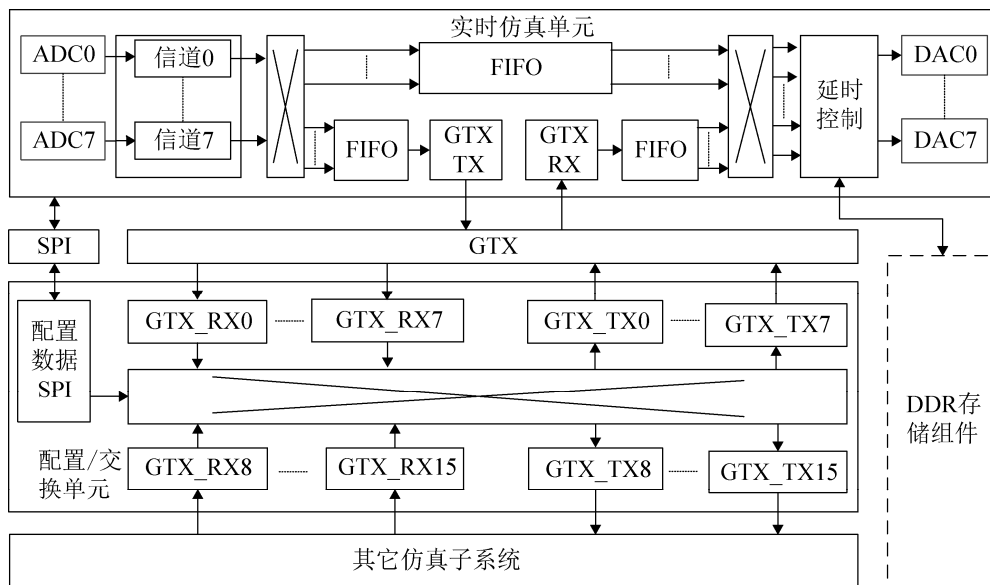


图 2 用于动态网络拓扑仿真的逻辑连接关系

Fig. 2 Block design for dynamic network topology simulation

每个实时仿真单元支持 8 路中频信号的输入输出, 中频信号经 ADC 采集后分别进入信道仿真模块, 添加信道特性后进行动态拓扑仿真。仿真控制平台实时计算当前网络拓扑信息, 并下发至实时仿真子系统。实时仿真单元判断网络拓扑信息, 若发送节点与接收节点在同一仿真单元内则通过片内的交叉连接矩阵发送至相应节点, 否则信号通过 GTX 接口发送至配置/交换单元, 配置交换单元通过判断信号接收节点位置, 选择发送到本子系统内的其它仿真单元或仿真子系统。经交叉连接的数据送至路径延时模块添加路径延时, 该模块主要由 DDR 和延时寄存器构成。最后, 信号由 DAC 进行输出。

2 信道传播特性实时仿真

2.1 信号传播特性设计

对于空间信息网络, 其通信链路可分为两类: 其一是空间信息处理节点之间的信号传播, 它们极少受到干扰、衰落等因素的影响, 因此一般用加性高斯白噪声描述其传播特性; 而对于星地链路则相对复杂, 本文采用 Corazza 模型^[8]描述星地链路的传播特性。

Corazza 模型于 1994 年由 GE Corazza 在文献[8]中提出, 该模型适用于所有卫星通信信道环境(开阔地、乡村、郊区和城市), 且信号中的 LOS 分量及多径分量都受到了阴影衰落影响。

根据全概率公式, 可得接收信号 r 的概率密度函数为:

$$p_r(r) = \int_0^{\infty} p(r|S)p(S)dS \quad (1)$$

为了描述卫星通信系统中信号所受的多径效应及阴影衰落的影响, 信道概率 $p(r|S)$ 服从莱斯分布, $p(S)$ 服从对数正态分布, 那么:

$$p_S(S) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h\sigma S} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln S - \mu}{h\sigma}\right)^2\right] \quad (2)$$

$$p(r|S) = 2(K+1)\exp\left[-(K+1)\frac{r^2}{S^2} - K\right] \times$$

$$I_0\left(2\frac{r}{S}\sqrt{K(K+1)}\right)\frac{r}{S^2} \quad (3)$$

式(2) μ 和 σ 为 $\ln S$ 的均值及标准差, 式(3)中 I_0 表示修正的 0 阶第一类贝塞尔函数, K 表示莱斯因子。将式(2)和式(3)代入到式(1)中, 可以得到 Corazza 模型的理论公式。Corazza 模型刻画了卫星通信系统中, 信号所受的莱斯分布的快衰落与对数正态分布的阴影衰落的影响。

此外, 信号在传输过程中存在噪声干扰, 因此应引入高斯白噪声。同时, 在很多情况下, 空间信息节点之间的相对高速运动导致了接收端受到多普勒频移的影响。

综合考虑以上因素, 为了准确地描绘空间信息网络中信道的传播特性, 采用了图 3 的设计结构, 信道特性仿真主要包括对数正态分布描述的慢衰落、多径效应导致的快衰落、多普勒频移、高斯白噪声及路径延时。

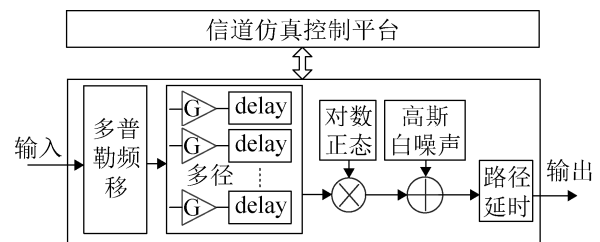


图3 信道实时仿真结构

Fig. 3 Architecture for channel characteristics simulation

信道仿真控制平台根据空间信息网络链路类型, 星座特点、卫星仰角、信道环境、卫星相对速度等参数, 实时计算得到信道的多普勒频移 f_d 、莱斯因子 K 、对数正态分布均值方差、路径损耗以及信道信噪比 SNR 等参数并映射到实时仿真平台, 实时仿真平台根据这些参数实时地为各链路添加信道特性。

2.2 概率分布的硬件实现

由图 3 可见, 各种符合一定分布特性的随机数发生器是对信道实时仿真的基础, 它们直接决定了信道仿真平台的仿真特性及系统性能。因此, 高质量的随机数生成器是信道仿真中的重点。

2.2.1 均匀分布序列生成

由于高斯分布以及对数正态分布的生成都依赖于均匀分布随机数, 同时为了仿真实际情况下各信道传播特性之间的统计独立性, 因此独立、高效的均匀分布随机数生成方法是整个系统仿真的基础。

线性同余法具有快捷简单的特点, 可以在一维空间中产生较好的随机数。生成 $[0, m)$ 之间的均匀随机分布的递推公式为

$$x_{i+1} = (Ax_i + C) \bmod m \quad (4)$$

式中: A 乘性因子; C 为增量, 第一时刻的 x_0 为种子; m 为模数, 以上数值应非负, 当满足下列参数条件时随机序列达到满周期^[10]:

$$\begin{cases} m = 2^L \\ A = 4\alpha + 1 \\ C = 2\beta + 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: α 和 β 均为任意正整数; x_0 为任意非负整数。

线形同余法速度快, 随机数的均匀程度好, 实现复杂度低, 但是生成随机数的周期较短。为了提升线性同余法的性能, 这里采用了一种改进型的线性同余法, 即在传统的线性同余法的基础上, 通过每隔一定时间 T 更换一个种子 x_{i+1} 的输入, 来扰乱序列, 即:

$$\begin{cases} x_{i+1} = x_i' & t = nT \\ x_{i+1} = (Ax_i + C) \bmod m & \text{others} \end{cases} \quad (6)$$

根据仿真测试可以得出, 采用这种办法可以使序列周期明显提升。

使用不同的 A, C 及 x_0 参数值, 通过仿真筛选, 得到了大量质量较高的均匀分布序列。以这些均匀分布作为基础随机数, 可以进一步产生高斯分布以及对数生态分布。

2.2.2 高斯分布序列的生成

本文利用中心极限定理来产生高斯分布随机序列来仿真信道的高斯白噪声(AWGN):

$$\xi = \frac{\sum_{i=1}^n X_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \sim N(0,1) \quad (7)$$

其中, $X_i \sim U(0,1)$ 且相互独立。对于相互独立的分布 $X_i \sim U(\mu, \sigma^2)$ 来说, 当 n 足够大时 $\sum_n X_i \sim N(n\mu, n\sigma^2)$ 。

大量仿真测试表明采用 3 路独立同分布的均匀分布序列相加即可得到性能良好且资源占用少的高斯白噪声随机序列, 并利用后续的加法器和乘法器对其均值和方差进行控制。

2.2.3 对数正态分布序列生成

对数正态分布反映了信道的慢衰落特性, 令随机变量 $\xi > 0$, 若 $y = \ln \xi \sim N(\mu, \sigma^2)$, 其中 $N(\mu, \sigma^2)$ 是均值为 μ , 方差为 σ^2 的正态分布, 则称随机变量 ξ 服从对数正态分布 $\xi \sim LN(\mu', \sigma'^2)$, 对数正态分布的概率密度函数为:

$$P(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \xi^{-1} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln \xi - \mu)^2}, \xi > 0 \quad (8)$$

其中, 均值 μ_1 和方差 δ_1 分别为

$$\begin{cases} \mu_1 = \exp(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2) \\ \delta_1 = \exp(2\mu + \sigma^2)[\exp(\sigma^2) - 1] \end{cases} \quad (9)$$

因此, 为了得到均值为 u_1 , 方差为 δ_1^2 的对数正态分布, 对应的正态分布的均值和方差分别为

$$\mu = \ln \left[\frac{u_1^2}{\sqrt{\delta_1^2 + u_1^2}} \right] \quad (10)$$

$$\delta^2 = \ln \left[\frac{\delta_1^2 + u_1^2}{u_1^2} \right]$$

根据式(8), 对正态分布随机序列作指数运算即可得到对数正态分布随机序列, 这里的指数运算通过查找表实现。同时, 利用式(10), 通过控制正态分布的均值和方差即可生成特定均值和方差的对数正态分布随机序列。

2.3 传播时延仿真

空间信息网络中各节点间的相对高速运动导致链路之间延时也随之改变, 因此节点之间的延时应满足高精度, 大范围的要求。本文采用 DDR SRAM 结合延迟寄存器组的方式实现空间信息传输中的路径延时仿真。采样信号首先通过延迟寄存器组进行较高精度的路径延时。延时寄存器组采用

抽头延迟线对输入数据进行寄存,最小传播延迟为 $1/f_s$ (f_s 为系统时钟频率)。而 DDR 存储器的容量则决定了最大时延,根据系统的采样率和 DDR 容量,每条链路的最大路径延时约为 2 s。

DDR 采用 burst 方式进行读写,设数据位宽为 x bit, DDR Cache Line 为 y bit,那么 DDR 每次读出的一个 burst 的数据点为 y/x 个采样点。DDR 的输入和输出 FIFO 用于跨时钟域转换。图 4 为 DDR 控制状态机,系统开始时,DDR 所有 Cache Line 为空,一旦写入以第一组数据,则对计数器进行复位,并开始计数,当延时计数值达到阈值(该值由仿真控制平台配置)时,开始读出第一组数据,直到该 Cache Line 读空,再进行下一组数据的写入。

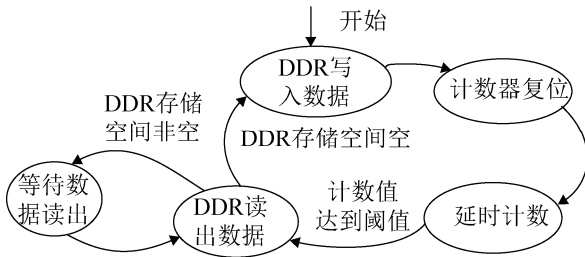


图4 DDR 控制状态机
Fig. 4 DDR control state machine

2.4 快衰落仿真

信号在传播过程中,同一码元经过不同路径到达接收端进行随机叠加导致接收端信号的快衰落变化,每条径都有不同的到达角度差,可认为它们的频率在与 LOS 分量存在频率差 f_i ,且在 $[-\Delta f, \Delta f]$ 内呈均匀分布。

另一方面,由于收发端的高速相对位移,导致接收端明显的多普勒频移,该频移量表示为:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cos \theta \quad (11)$$

式中: v 为发射机与接收机的相对速度; λ 为载波波长; θ 为发射机与接收机的夹角^[11]。

将多普勒频移 f_d 和多径频率差 f_i 叠加,可得到如图 5 所示的多普勒和多径衰落的实现框图。图中, G 为每条径的增益, DELAY 为每条径的抽头延时器用于仿真每条径的时延。仿真控制平

台计算多普勒频移 f_d 及每条多径信号的最大频率偏移量 Δf , 实时仿真单元将两者叠加实时产生总体的频移量 $f_d + f_i$, 显然它是在 $[f_d - \Delta f, f_d + \Delta f]$ 之间的均匀分布,实时仿真单元通过式(12)的计算实现多普勒频移和多径衰落仿真表示。

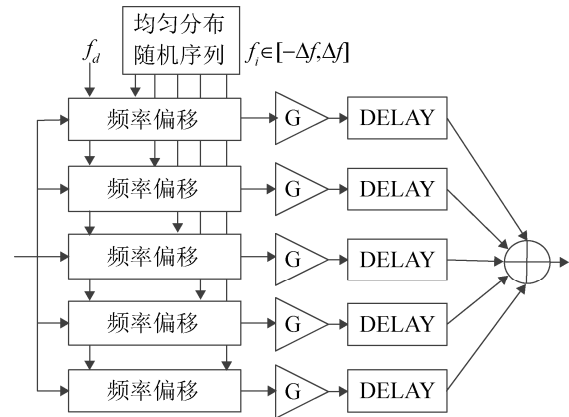


图5 快衰落模块原理图
Fig. 5 Block design for fast fading simulation

$$S_{out}(n) = S_{in}(n) e^{j2\pi(f_d + f_i)n} \quad (12)$$

式中: S_{in} 和 S_{out} 分别为输入输出的 IQ 信号。这种将接收信号多普勒频移和多径衰落结合的方式降低了复杂度,减小了硬件开销。

3 系统测试及性能对比

对于本文所提出的空间信息网络实时仿真系统,主要仿真在多节点高动态实时变化下的网络拓扑结构及链路传播特性。而对于网络动态拓扑的变化测试较为简单,通过信号源和示波器观察链路连接与仿真控制平台所设计星座的运行情况是否相符即可。为此,在本小节将着重介绍决定实时传播特性仿真的随机数生成和在实际仿真链路配置下的信道传播特性。最后给出与性能对比分析。

3.1 随机分布测试

信道仿真单元是整个系统的基本组成部分,其分布特性直接决定了链路的仿真性能。为了便于统计分析,采用 Simulink 和 Modelsim 联合仿真方式来测试序列的分布特性。MATLAB 产生测试所需的激励,送入实时仿真平台的 HDL 实现模块,并

利用 MATLAB 对其输出进行统计分析。

测试内容包括高斯分布以及对数正态分布随机数发生器的统计特性分析。表 1、表 2 分别为高斯分布和对数正态分布随机数生成模块的输出均值和标准差统计结果, 其中 μ 和 σ 分别为均值和标准差的理论值, μ' 和 σ' 为硬件实现对应的结果, 统计样本点数均超过 5 万点。两种序列分别使用了 3 组数据进行测试, 由测试结果得知, 两种序列均值和标准差的误差较小, 可满足实时仿真要求。

表 1 高斯分布仿真结果

Tab. 1 Simulation result for Gaussian distribution

序列	μ	σ	μ'	σ'
1	0	51.28	-0.21	51.77
2	-3	81.12	-3.28	81.24
3	2	101.98	1.53	102.27

表 2 对数正态分布仿真结果

Tab. 2 Simulation result for lognormal distribution

序列	μ	σ	μ'	σ'
1	3.565	0.321	3.483	0.302
2	6.656	0.316	6.732	0.309
3	5.485	0.283	5.086	0.210

3.2 信道特性测试

信道特性测试旨在模拟真实卫星信道下, 信道仿真平台的综合仿真能力。这种测试方式下, 使用 STK 工具模拟卫星信道连接关系及相关信道参数, 通过仿真控制平台配置实时仿真系统。该测试环境采用信号发生器(HPE4432B)作为信号源, 并使用频谱仪(Keysight N9913a)观察其信号衰落特征, 使用示波器(Tektronix DPO 2024)测试信号延时情况。

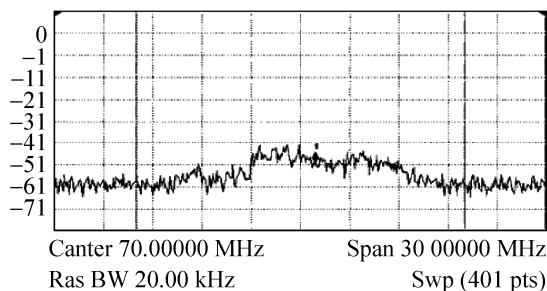
表 3 中仿真参数 1 和 2 分别为仿真控制平台所设计星座中某时刻一对星地链路和星际链路的具体参数。对于接收机, 信号经路径损耗表现为最终的信噪比, 因此系统采用了指定输入、输出及噪声功率的方式来模拟信道的路径损耗。在接收端它们的瞬时频谱如图 6 所示。可见仿真参数 1 的瞬时频谱具有明显的衰落情况, 而经测试仿真参数 2 的宽带功率与信道参数一致。

表 3 测试仿真参数

Tab. 3 Simulation parameters

测试项目	参数 1	参数 2
测试链路类型	星地链路	星际链路
收发机距离	72 000 km	3 000 km
信号带宽	12 MHz	12 MHz
中心频率	70 MHz	70 MHz
衰落模式	对数正态+瑞利	无
输入功率	0 dBm	0 dBm
信号衰落	10 dB	0 dB
噪声功率	-30 dBm	-40 dBm
多普勒频移	300 kHz	90 Hz

参数 1 频谱图



参数 2 频谱图

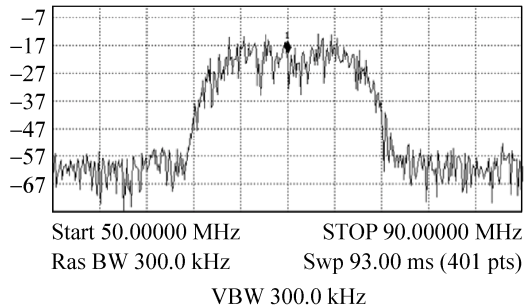


图 6 信道特性测试频谱图

Fig. 6 Spectrum of channel characteristics test

图 7 为仿真参数 1 信号延迟测试图, 根据两个通信节点之间的距离可计算得到传播时延约为 240 ms, 示波器测试结果为 242 ms, 这是由于示波器存储深度的限制, 在长时延测试中具有一定的误差。而对于多普勒的测试, 我们采用了点频信号进行测试, 满足信道配置。

3.3 性能对比

表 4 为本文提出的仿真平台性能及与国内外典型信道仿真平台的性能对比结果, 表 4 中关于其它平台的性能参数来自可查阅的公开报道和文献。

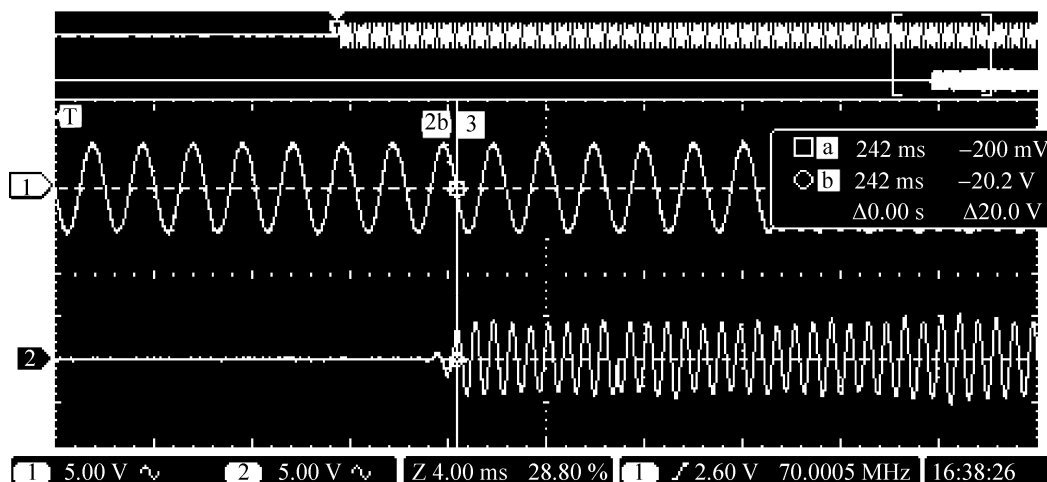


图7 参数1信号延迟测试图

Fig. 7 Channel delay test of parameter 1

表4 本文仿真平台与其它仿真平台对比

Tab. 4 Performance comparison

	dBm 公司 SLE 型信道模拟器 ^[1]	哈尔滨工业大学信道模拟器 ^[3]	本文提出的仿真平台
信道模型	Rayleigh, Rician	两状态模型	Corazza 模型
输入信号中频	70 MHz/140 MHz	70 MHz	70 MHz
输入/输出信号最大功率	0 dBm/0 dBm	-10 dBm/-10 dBm	0 dBm/0 dBm
信号带宽	72 MHz	2.5 MHz	20 MHz
最大多普勒频移	±3 MHz	±2 MHz	±2 MHz
输入通道数	4	3	8~128 路
最大传输延迟	1 400 ms	17 ms	2 s
多通道切换	无	有, 切换路径较少	有, 128 路相互切换
信道噪声	有	有	有

可见,在仿真规模、传播延时、特别是动态拓扑仿真方面,本文提出的空间信息网络仿真平台具有巨大优势。为了满足在现有技术条件下支持大规模实时仿真,本文针对空间信息网络无线信号的传播特点,对信道传播特性,特别是多径衰落做了合理简化。因此,本文所设计的空间信息网络实时仿真平台较商用设备的信号带宽和传播特性刻画细致度方面有一定不足。这也是我们与传统信道模拟器针对仿真对象不同做出的合理折衷的结果。灵活的可扩展结果可支持多达 128 路中频信号实时仿真与信道切换,因此相比其他卫星信道仿真器,在进行大型空间信息网络仿真应用时,有显著优势。

4 结论

本文设计并实现了一种基于模拟中频信号的

空间信息网络信道仿真平台,该平台由仿真控制平台和实时仿真子系统构成,结合现有技术手段和空间信息网络信道传播特点采用了简化的 Corazza 信道模型,针对空间信息网络中网络拓扑动态变化及信道传播特性进行实时仿真。该平台采用可扩展硬件架构设计,最多支持 128 路模拟中频信号进行实时仿真,具有可扩展、实时性强,仿真精度高等特点。测试结果表明,该平台可以实时的反映空间信息网络的拓扑变化,并支持多种特性的信道模拟及仿真,对空间信息网络技术和应用的研发有着重要的应用价值。

参考文献:

- [1] dBmCorp. Satellite Link Emulator-SLE900[EB/OL].
<http://dbmcorp.com/satellite-link-emulator/>.

- [2] 马上, 胡剑浩, 王剑. 基于三状态 Markov 链的卫星信道模拟器设计与实现[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 3961-3965.
Ma S, Hu J H, Wang J. Design and implementation of satellite channel simulator based on three-state Markov chain[J]. Journal of System Simulation, 2007. 19(17): 3961-3965.
- [3] 杨明川. 卫星移动信道衰落特性模拟研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010: 106-113.
Yang M Ch. Research on fading characteristic simulation in mobile satellite channel[D]. Ha'erbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 106-113.
- [4] 李荣美. 一种信道模拟器的实现方法[J]. 通信对抗, 2015, 1: 50-52.
Li R M. A Design of Radio Channel Simulation[J]. Communication Countermeasures, 2015, 1: 50-52.
- [5] 陆许明, 戴建强, 谭洪舟. 高效的多径衰落信道仿真及其硬件实现[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(1): 197-201.
LU Xu-Ming, Dai J Q, Tan H Z. Efficient Emulation of Multipath Fading Channels and Its Hardware Implementation[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(1): 197-201.
- [6] Sharma V, Kaur A. Modeling and simulation of long reach high speed inter-satellite link (ISL)[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics (S0030-4026), 2014, 125(2): 883-886.
- [7] Loo C. A statistical model for a land mobile satellite link[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 1985, 34(3): 122-127.
- [8] Corazza G E, Vatalaro F. A statistical model for land mobile satellite channels and its application to nongeostationary orbit systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 1994, VT-43(3): 738-742.
- [9] Lutz E, Cygan D, Dippold M, et al. The land mobile satellite communication channel-recording, statistics, and channel model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology (S0018-9545), 1991, 40(2): 375-386.
- [10] 符宁. 均匀随机数的线性同余生成方法[D]. 长春: 吉林大学, 2007: 3-4.
Fu N. The methods for generating the random numbers : linear congruence generator[D]. Changchun: Jilin University, 2007: 3-4
- [11] 姜泉江, 刘会杰. 低轨卫星多波束接收的多普勒频移统计特性及应用[J]. 宇航学报, 2014, 35(6): 720-725.
Jiang Q J, Liu H J. Statistical Characteristics and Application of Doppler Shift Received by Low Earth Orbit Multi-Beam Satellite[J]. Journal of Astronautics, 2014, 35(6): 720-725.

《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”证书

由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社与清华大学图书馆联合成立的中国学术文献国际评价研究中心, 发布了 2017 版《中国学术期刊国际引证年报》, 《系统仿真学报》荣获“2017 中国国际影响力优秀学术期刊”。

《年报》(2017 版)采用的统计源期刊为 20192 种, 涵盖 WoS 收录的 SCI 期刊 8874 种、SSCI 和 A&HCI 期刊 4645 种, ESCI 期刊 5578 种; 增补期刊 1762 种。参照中外文学术期刊总被引频次、影响因子、半衰期等各项国际引证指标, 计算期刊影响力指数(CI), 对国内 6210 种学术期刊排序, 遴选了人文社科、自然科学与工程技术两个类别的 TOP10% 为国际影响力品牌学术期刊。TOP5% 以内的期刊为“最具国际影响力学术期刊”、TOP5-10% 之间的为“国际影响力优秀学术期刊”。