

卫星通信网络分布式仿真技术研究

杨海涛, 杨露, 何宇, 赵东杰

(装备指挥技术学院,北京 101416)

摘要 针对卫星通信网络仿真问题及需求,首先,从卫星通信网络的特点出发,分析了仿真系统基本需求,提出了目前较为可行的仿真系统实现方案和途径;其次,从仿真方法、建模环境、适用范围和仿真粒度4个方面分析了当前主要仿真技术及工具,丰富了卫星通信网络分布式仿真技术研究思路;最后,基于分布式仿真思想,提出了一种分布式卫星通信网络仿真系统设计方案,系统采取“两级三类”体系结构,可实现多层次、多粒度仿真,最小仿真粒度达bit级,为卫星通信网络的设计与优化奠定了基础。

关键词 卫星通信;分布式;多粒度

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2011.02.014

中图分类号 TN927+.23 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2011)02-0067-05

通信卫星利用星间链路(Inter Satellite Link, ISL)进行组网,为地面用户提供方便快捷的全球性通信服务^[1]。各种新理论、新技术在卫星通信网络建设中的运用,给卫星通信网络建设提供了新的机遇,同时也提出新的挑战。在网络建设前通过仿真了解预期的性能和参数可以最大限度地降低网络性能评估的费用,缩短研制的周期,并且可以对多种候选技术进行评估或者开发自己的新技术,从而实现对网络的优化设计。目前,尽管在卫星通信网络仿真方面已有一些研究成果^[2-9],但现有技术及其成果仍不能全面满足卫星通信网络仿真需求,本文构建了一种能够满足多粒度仿真的分布式卫星通信网络仿真系统。

1 仿真对象特点及需求

卫星通信网络仿真的对象是卫星组网通信,这里的卫星不仅限于通信卫星,也包括具有通信载荷的其他应用卫星,这些卫星之间通过星间链路或星地链路将业务相关的各类节点有效地连接在一起,从而构成一个数据传输和共享网络。其特点和需求主要包括:

1)通信时延大。通信延迟主要取决于信号传输距离。LEO卫星通信的延迟为几十ms,而地球同步卫星(GEO)为0.24s,深空探测卫星通信系统甚至可以达到几s。这要求仿真系统能够实现ms到ms级的时延仿真,并能保证在不同仿真粒度下时延仿真的置信度。

2)误码率高。误码率取决于信道噪声状况。地面通信误码率一般较低,光纤通信可低于 10^{-12} ,而星地微波通信的误码率在 10^{-6} 左右。这要求仿真系统能够合理的运用等效原则反映出误码率,如采用丢包等手段。

3)多普勒频移大。多普勒频移取决于通信节点间的相对速度和载波频率。卫星通信网络中,卫星的高速运动以及采用高频段载波,造成通信节点往往面临几十kHz,甚至上MHz的多普勒频移。这要求仿真系统能够正确计算和仿真多普勒频移的同时,还要能反映出多普勒频移的影响,如对误码率的影响,对处理时延的影响等。

* 收稿日期:2010-09-15

基金项目:国家“863”计划资助项目(2008AA7010211)

作者简介:杨海涛(1979-),男,山东莱州人,博士,主要从事电子信息装备体系综合论证评估研究。

E-mail: yanght@ yahoo. com. cn

4) 天线对准难。星间链路的天线对准需要实时计算并实时调整天线方向图。卫星通信网络,尤其是卫星间通信由于距离非常大,接收方信号微弱,因此天线多采用窄波瓣以提高增益。但由于卫星的高速运动,同时路由的频繁切换,造成卫星组网通信的天线对准非常难。这要求仿真系统既能仿真卫星天线指向,又能反映天线对不按时通信所受到的影响。

5) 拓扑变化快。卫星通信网络必然涉及拓扑问题,其拓扑变化取决于卫星运行速度与卫星动态接入(包括离开和切换)。虽然拓扑收敛可采用静态方法,但由于不规则网络拓扑、彼此独立的卫星网络可能无法预知下一时段的网络拓扑,因此卫星也必须具备动态拓扑计算能力。这要求仿真系统能够仿真出节点的高速运动造成网络拓扑的急剧变化。

6) 节点数量大。卫星通信最大特点是覆盖范围广,而广大的覆盖区域内往往分布着数量众多的用户节点和接入节点,另一方面,仿真中只有设置大量的用户节点和接入节点才能够较为准确的仿真出卫星通信网络的性能。这需要仿真系统能够具备管理和分析大量仿真实体的能力。

从这几个特点可以得出卫星通信网络仿真基本需求为时延需求、误码需求、频移需求、天线需求、拓扑需求和规模需求。

2 实现方案分析

针对卫星通信网络仿真几项基本需求,分析仿真系统可用的实现方案:

1) 时延需求要求采用高精度的时间运行系统,如 GPS 授时等,仿真系统至少需要提供 ms 级的仿真精度,通常可信精度应为 ms 级或 10 ms 级。而通常的操作系统时间精度仅为 ms 级,因此,采用全数字仿真往往无法完全满足时延需求。

2) 误码需求的最直接体现是能够进行 bit 级的仿真,这对仿真系统来说通常是不现实的,一般实现方案是采用变分辨率仿真方法。一种方法是对数据报文采用虚拟报文形式,仿真粒度为报文级;同时将控制信息引入仿真,对控制信息采用真实报文形式,仿真粒度为 bit 级。另一种方法是对一定比例的报文采用真实报文形式,其余报文采用虚拟报文,这种方法在 OPNET 等仿真软件有所应用。

3) 频移需求在仿真系统中体现出多普勒频移对产生误码率、丢包率影响,其实现方案一是采用半物理仿真方法,利用射频设备产生微波信号通过调制、解调过程模拟卫星通信信号多普勒频移及其对通信的影响;另一种方案是通过低通等效原理,利用仿真软件实现对微波信号多普勒频移后信噪比的模拟,通过 Matlab 等软件产生信噪比与误码率曲线获取误码率,从而在仿真中引入误码和丢包表现出对多普勒频移的影响。

4) 天线需求在仿真中体现出通信终端在天线存在一定指向夹角情况下通信效果,一般的实现方案是建立天线方向图数据库,通过轨道模型和天线指向模型计算天线方向图指向角度,然后查询天线方向图数据库得到天线指向损耗并折算到信噪比,最后将其影响反映到误码率和丢包率中。

5) 拓扑需求在仿真中体现出卫星通信网络的拓扑高速变化,一般的实现方案是通过轨道动力学理论计算网络节点的轨道坐标(包括地面节点),通过链路连接关系判断而生成网络拓扑结构,其关键在于计算量的处理方法,在规模较大的网络中轨道计算量和链路连通性计算量都非常大,这种情况下可采用适当选择计算周期、计算模型以及计算设备。

6) 规模需求在仿真中能够实现对大量节点、链路和业务的管理和分析,主流的实现方案包括面向对象方法、多 Agent 方法、分布式仿真方法等,这些方法的目的是提高仿真实体管理的效率,在处理上也存在对部分节点采用统计分析的方法。虽然集中式仿真可采用高端计算设备和虚拟仿真节点的方法提高仿真规模,但天然的瓶颈仍是不可避免的,因此分布式仿真成为解决仿真规模需求的较好解决方案。

综上相关实现方案,可以发现,误码需求、频移需求、天线需求在集中式仿真和分布式仿真均可有效实现;但其它需求中,集中式仿真方案由于不用考虑同步问题,可以较好地解决时延需求,但对拓扑需求和规模需求则存在瓶颈;分布式仿真可以较好解决拓扑需求和规模需求,但在时延需求的解决上却存在一定困难。

3 主要仿真技术分析

卫星通信网络仿真技术可大体上分为数字仿真、半物理仿真和物理仿真几类。

其中物理仿真主要是利用射频、处理器设备装置来模拟卫星通信系统中的链路、星载处理器等,但一般不单独研究,通常配合软件系统构建的卫星通信环境系统进行联合仿真。因此较为广泛研究的是半物理仿真和数字仿真。

半物理仿真主要是在仿真环路中引入实际设备或装置,以代替无法建模的设备,这里的实际设备或装置主要包括仿真对象系统的子系统实物或其替代设备,其仿真置信度主要来自于引入的实物设备以及数字仿真系统的置信度。例如星地链路的仿真系统,既可采用数字仿真也可采用半物理仿真,其中数字仿真一般是利用低通等效原理来分析、预测星地微波链路性能;而半物理仿真的思路则是在数字仿真系统中采用信号发生器、分析仪等设备直接引入微波信号,形成信道模拟器,与其它部分数字仿真系统共同完成仿真分析。

数字仿真主要利用仿真软件对数学模型、概念模型等系统仿真模型进行推演计算,对系统的性能、行为等进行分析和预算,其仿真置信度的保证来自于仿真数据与实际数据的一致性。数字仿真的基础是仿真软件。

目前,卫星仿真领域的软件主要分为商业软件和开源软件 2 种,这 2 种软件大多为路由协议仿真器。在商业软件中应用较为广泛的有 OPNET^[2]、MLDesigner (BONes)^[3]、COMNET^[4]、CASSAP^[5]、SPW^[5]、QualNet (GloMoSim)^[6]等,在开源软件中最有影响的是 UC Bakery 开发的 NS2^[7] 仿真软件,另外,还有 SSFNet^[8]等。相关软件比较见表 1。

表 1 主要仿真软件比较
Tab. 1 The compare of main software

	OPNET	MLDesigner	COMNET	CASSAP	SPW	QualNet	NS2	SSFNet
仿真方法	离散事件驱动	多种驱动方式	离散事件驱动	数据流驱动	—	离散事件驱动	离散事件驱动	离散事件驱动
建模环境	C/C++	C/C++	C/C++	DSP 语言	C/HDL	C/C++	TCL/C/C++	DML
适用范围	几乎所有网络	无线通信、多媒体、互联网、计算机体系结构	各种规模互联网	数字信号处理、网络通信	无线/有线载波通信、多媒体、网络	无线、有线以及混合动态网络	多种网络协议	互联网
仿真粒度	报文级	报文级	报文级	信号级	信号级	报文级	报文级	报文级

由表 1 可以知:

1) 目前大多数网络仿真软件采用报文级的仿真粒度以及离散事件仿真驱动机制,这是为了提高仿真速度,因此比较适用于网络协议的仿真。从卫星通信网络仿真的需求看,由于传输的大误码和长时延特点,卫星通信网络仿真系统往往要考虑一些信号特征,同时要考虑拓扑交互信息、测控信息等实义信息对网络至关重要,因此卫星网络仿真粒度最好能够达到数据级或 bit 级。显然,以上仿真软件对于卫星通信网络的仿真,在仿真粒度方面存在一定的局限性。

2) 目前网络仿真软件大多采用面向对象的方法,通过建立节点和链路对象实例来管理整个仿真,这对于小规模的网络仿真非常方便的。但从设计思想上看,这些仿真软件的出发点都是集中式的仿真,这对于仿真计算机的性能提出了很高的要求,尤其是进行大规模网络的仿真时,这一问题将更加突出,这时采用分布式仿真能够更有效率。

3) 从长远看,分布式或并行仿真是一种仿真技术趋势,虽然部分仿真软件提供了 HLA 接口(OPNET 和 QualNet 等),但商业软件的价格因素制约了其分布式仿真的发展和应用。因此,在网络仿真管理和维护方面,这些仿真软件也存在一定的局限性。

总之,现行的大多数卫星通信网络仿真软件无法全面满足时延需求、误码需求、频移需求、天线需求、拓扑需求和规模需求等基本需求,但其部分仿真思想可以借鉴。

4 一种分布式卫星通信网络仿真系统

通过上述分析可知,目前还没有现成的软件或设备能够全面满足卫星通信网络仿真需求,但可借鉴相关软件,综合利用多种实现方案,构建一种分布式卫星通信网络仿真系统。

系统采用多台计算机构成分布式仿真系统,利用 GPS 时统信号作为全网同步时间基准。每台计算机可

仿真多个节点。节点类型包括通信卫星、侦察卫星、气象卫星和地面站等。系统采取“两级三类”体系结构,所谓“两级”是指在每台计算机上均包括本地仿真控制程序和本地仿真终端程序,由仿真控制程序根据仿真实想定调用仿真终端程序;所谓“三类”是指系统开发的程序除了仿真控制、仿真终端外,还包括一套信息综合显示终端,用来完成对当前仿真的网络拓扑、数据报文的路由信息等信息的综合显示。

仿真流程如下:首先,每台参与仿真的计算机运行一个仿真总控程序;其次,各个仿真总控程序从仿真实想定数据库获取各自被分配的仿真节点的名称、ID、端口、仿真开始时间等信息,根据这些信息以及GPS时统信号启动相应的进程,每个进程即为一个仿真节点;最后,仿真节点全部启动后,即可开始仿真。

1) 仿真实想定数据库提供仿真节点的仿真ID,节点名称,卫星节点的半长轴、离心率、轨道倾角、右升节点、近地点幅角和真近点角等六个初始轨道根数,地面站节点的初始经度、纬度、高程和最小仰角,节点通信参数编码方式、调制方式、信道模型、载波频率、带宽、等效全向辐射功率和接收机品质因数等,节点仿真的IP地址和端口以及仿真开始时间等配置信息。

2) 本地仿真总控是运行于某台仿真计算机上仿真节点的控制程序,负责按照数据库中的配置启动分配于本机的仿真节点,同时在开始仿真前利用GPS时统信号对参与仿真计算机的本地时间进行时间校准。此外,本地仿真总控还可以对仿真实想定进行及时修改,主要包括卫星节点的轨道根数、地面节点的经纬度高程、节点的通信参数配置以及仿真参数配置等。其中,通信参数可以设置当前节点的“编码方式”、“调制方式”、“星座尺寸”(仅对MPSK、MQAM、MDPSK、MPAM等调制方式有效)、“信道模型”、“最小仰角”、“载频(GHz)”、“带宽(MHz)”、“EIRP(dB/W)”、“G/T(dB/K)”等。仿真参数用来配置该节点仿真的计算机IP、仿真使用的通信端口(4个)以及仿真开始时间。

3) 仿真节点是仿真系统的最小仿真实体,负责完成各种仿真内容。仿真节点既可仿真单一网络节点,也可仿真多个虚拟网络节点(图中标识为“虚拟仿真节点”),虚拟仿真节点类似于OPNET中的虚拟节点概念,可实现多个网络节点的仿真管理,每个节点不会产生数据报文,但会影响拓扑结构和网络带宽。每个仿真节点可实时显示拓扑状态和通信状态,便于仿真人员了解其仿真状态。

4) 拓扑状态是指当前节点所维护的可见性拓扑、可通性拓扑等信息,并记录流经的数据报文的下一跳路由信息。可见性拓扑是对节点间交换的拓扑信息整理而得,显示当前节点所获取的所有节点的可见性关系。可通性拓扑是指当前节点对其它节点的可通性评价,主要依据误码率和丢包率等指标。系统在生成可见性拓扑后,对当前节点可见的节点进行可通性计算,从而形成可通性拓扑。另外,拓扑状态页面还显示业务流的当前路由信息,主要是经过当前节点转发的数据报文的历史路由信息及其下一跳节点。

5) 通信状态主要包括星座图、信噪比、误比特数、误码率等信息。

6) 信息综合显示终端负责在仿真过程中实时记录仿真状态信息,并结合配置信息完成态势显示。最重要的是记录和显示数据报文端到端传输采用的路由信息,同时对当前的网络拓扑进行分析,利用Dijkstra算法以最小时延为代价指标来计算该时刻该数据报文理论最优路由,并分别给出了这2种路由的代价。

该系统能够满足卫星通信网络仿真的时延需求、误码需求、频移需求、天线需求、拓扑需求和规模需求,支持多层次多粒度仿真,能够仿真多种类型空间轨道(低、中、高轨等)的卫星,具有仿真过程和结果的可视性好、可扩展性好等特点。

5 结束语

通过对卫星通信网络仿真特点、仿真需求及实现方案分析,借鉴相关网络仿真软件设计思想,设计了一种分布式卫星通信网络仿真系统,该系统可实现多层次多粒度仿真,最小仿真粒度可达比特级,为深入研究卫星网络的通信和路由协议与技术奠定了基础。

参考文献:

- [1] Ercetin O, BallM O, Tassiulas L. Next generation satellite systems for aeronautical communications [J]. International journal of satellite communications and networking, 2004, 22(2):157-159.
- [2] OPNET Technologies, Inc. Introduction to modeler[M/CD]. [S. l.]: OPNET technologies inc, 2008.
- [3] MLDesign Technologies Inc. MLDesigner documentation[EB/OL]. (2003-02-01)[2010-09-15]. ftp://ftp.mldesign.

com/.

- [4] Matthias Falkner. Introduction to the network simulator COMNET III [M/OL]. (2003-02-01)[2010-09-15]. ftp://ftp.mldesign.com.
- [5] 周翔. 关于当前若干主流网络仿真软件的综述及实例应用分析[EB/OL]. (2006-09-01)[2010-09-15]. http://www.cisconet.cn/news/2006/0904/article_1643.html.
- [6] 赵玉亭,戴冠中,徐浩,等. 基于 QualNet 仿真器的 Ad Hoc 路由协议比较研究[J]. 计算机仿真,2005,22(Z1):326-329.
ZHAO Yuting, DAI Guanzhong, XU Hao, et al. The comparison study of routing protocols for Ad Hoc networks in QualNet simulator[J]. Computer simulation, 2005,22(Z1):326-329. (in Chinese)
- [7] 杨海涛,赵洪利. 星际链路天线的建模与仿真[J]. 系统仿真学报,2005,17(11):2586-2588.
YANG Haitao, ZHAO Hongli. Modeling and simulation of antenna of intersatellite link[J]. Journal of system simulation, 2005,17(11):2586-2588. (in Chinese)
- [8] 赵东杰,杨海涛,赵洪利. 基于 NS2 和 STK 的卫星动态组网仿真与演示的研究[J],舰船电子工程,2006,26(2):67-70.
ZHAO Dongjie, YANG Haitao, ZHAO Hongli. Research on the simulation and demonstration of the dynamic buildup of satellite network based on NS2 and STK[J]. Ship electronic engineering, 2006, 26(2):67-70. (in Chinese)
- [9] 张生,岳廷高,徐敬. 基于 STK 的卫星通信链路对抗仿真分析[J]. 电子对抗,2008,31(2):12-15.
ZHANG Sheng, YUE Tinggao, XU Jing. Research on the simulation of ECM to the satellite communication links based on STK [J]. Electronic warfare, 2008,31(2):12-15. (in Chinese)
- [10] 雷擎,王行刚. 计算机网络模拟方法与工具[J]. 通信学报,2001,22(9):84-90.
LEI Qing, WANG Xinggang. Overview of the network simulation methodologies and tools[J]. Journal on communications, 2001,22(9):84-90. (in Chinese)

(编辑:徐楠楠)

Research on Distributed Simulation Technology for Satellite Communication Network

YANG Hai-tao, YANG Lu, HE Yu, ZHAO Dong-jie

(The Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: Aimed at the problems and requirements of the simulation of satellite communication network, this paper firstly analyzes the basic requirement of the simulation system from the characteristics of satellite communication network and presents the feasible method and approach at the present time. Then, the paper again analyzes the current simulation technology and tools from the simulation method, modeling environment, applicability and simulation granularity, which enriches and expands the idea of distributed simulation technology of satellite communication network; finally, proposes a distributed simulation system design for satellite communication network based on the idea of distributed simulation. The simulation system is composed of two-level and three-category system framework, by which the multi-level and multi-granularity simulation can be implemented; and its minimal simulation granularity reaches bit grade, which provides a foundation for both design and optimization of satellite communication network, and is of great value in theory and application.

Key words: satellite communication; distributed; multi-granularity