

# 基于 NS-2 的航空器通信仿真模块的设计与实现

叶晓国,肖 甫,孙力娟,王汝传

(南京邮电大学 计算机学院,江苏 南京 210003)

**摘 要:**网络仿真器 NS-2 在空间通信网络研究中得到越来越多的应用。深入分析了 NS-2 中卫星网络结点和卫星链路仿真模块的特性。在分析卫星网络基本仿真原理和方法的基础上,以航空器通信仿真为例,给出了 NS-2 核心仿真模块的扩展方法,实现了航空器通信仿真模块。仿真实验研究分析了航空器的飞行对航空器与卫星之间链路切换特性的影响,证明了航空器通信仿真模块扩展方法的可行性和有效性。

**关键词:**卫星网络;航空器;仿真;NS-2;Tcl/Tk

**中图分类号:**TP391.9

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2009)07-0028-04

## Design and Implementation of Aircraft Communication Simulation Module Based on NS-2

YE Xiao-guo, XIAO Fu, SUN Li-juan, WANG Ru-chuan

(College of Computer, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Network simulator version 2 (NS-2) is used more and more widely for research on space communication network. The simulation modules of satellite network nodes and links are analysed in detail. A method of extending NS-2 kernel module is proposed based on analysis of satellite network simulation principle and approach. As an example, the aircraft communication simulation module is designed and implemented. Simulation results show that flight of aircraft has effect on the link handoff characteristic, and show that the proposed extension method is feasible and effective.

**Key words:** satellite network; aircraft; simulation; NS-2; Tcl/Tk

### 0 引 言

空间通信网络以地球同步轨道卫星 GEO 为主干结点,包括中轨卫星 MEO、低轨卫星 LEO、航空器、地面站以及地面移动台等通信结点,在空间科学实验、跟踪与数据中继等应用领域具有越来越重要的作用。对空间通信网络协议仿真方法的研究是一个重要研究课题<sup>[1,2]</sup>。如何更好地测试和验证提出的新协议和新算法,是亟需解决的问题。运用仿真的方法对于网络系

统特别是空间通信网络的研究,具有重要作用<sup>[3,4]</sup>。

目前已经有多种网络仿真工具,如 NS-2<sup>[5,6]</sup>、OPNET<sup>[7]</sup>等,具有一定的空间通信网络仿真能力。NS-2 网络仿真器源代码公开,仿真器结构具有良好的开放性和可扩展性,因而在网络研究领域备受青睐,得到广泛使用。

对 NS-2 网络仿真器的卫星仿真模块进行了深入分析,重点介绍了卫星网络结点和卫星链路的仿真模块特性,包括空间几何特性仿真和网络协议特性仿真。在介绍卫星网络基本仿真原理和方法的基础上,以航空器通信结点仿真为例,给出了 NS-2 核心仿真模块的扩展方法,实现了航空器通信仿真模块。仿真实验研究分析了航空器的飞行对航空器与卫星之间链路切换特性的影响。结果证明了航空器通信仿真模块扩展方法的可行性和有效性。

### 1 NS-2 卫星网络仿真模块

NS-2 网络仿真器提供了基本的卫星网络仿真模块,在仿真模块中采用了与实际复杂环境近似的卫星

收稿日期:2008-10-04;修回日期:2009-03-02

基金项目:国家自然科学基金(60573141,60773041);国家高科技863计划项目(2006AA01Z201,2006AA01Z219,2007AA701301,2007AA701302);江苏省高技术研究计划(BG2006001);现代通信国家重点实验室基金(9140C1105040805);江苏省高校自然科学基金计划(07KJB520083);江苏省博士后基金(0801019C);南京邮电大学引进人才基金(TZ206012)

作者简介:叶晓国(1975-),男,安徽桐城人,博士,讲师,研究方向为高性能网络体系结构及协议等;肖 甫,博士,讲师,研究方向为多媒体卫星通信网络等;孙力娟,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为演化计算、计算机网络;王汝传,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机软件、计算机网络和信息安全。

网络信道模型。NS-2 提供了地球同步轨道卫星 GEO、极轨道低轨卫星 LEO、地面站结点以及星地/星间链路的仿真,可用来仿真卫星网络数据链路层及其上各层的协议,如卫星信道 MAC 协议、数据链路传输控制协议、网络层、运输层以及应用层协议。卫星网络结点中接口协议栈仿真模型如图 1 所示。

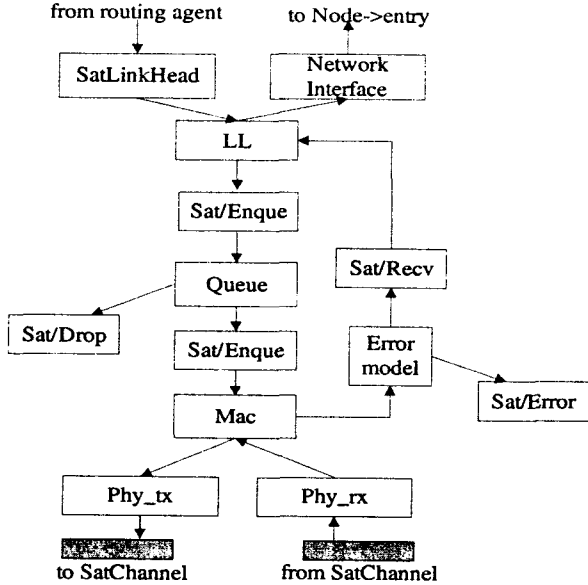


图 1 卫星网络结点中接口协议栈仿真模型

图 1 中底层协议实体 Phy\_tx, Phy\_rx 分别为物理层发送协议实体和接收协议实体,分别与发送信道和接收信道相关联,提供了对面向卫星信道的收发数据的能力。协议实体 MAC 主要负责对卫星无线信道的访问控制,其上是队列管理策略仿真模块以及链路传输控制仿真模块。

## 2 卫星网络结点和链路的基本构造方法

NS-2 提供了地球同步轨道卫星 GEO、极轨道低轨卫星 LEO、地面站结点以及星地/星间链路的仿真,可用来仿真卫星网络数据链路层及其上各层的协议。

### 2.1 基本构造方法

对于一颗地球同步轨道卫星 GEO 与若干个地面站相连的网络的仿真,为了清晰地给出卫星网络各类型结点的构造方法,给出用 Tcl/Tk 语言<sup>[8]</sup>描述的卫星网络 NS-2 仿真场景配置示例如图 2 所示。

图 2 中,第 1~10 行是将卫星网络所使用的协议、链路带宽和队列等参数,放到全局变量 opt 中,便于随后的仿真配置语句使用。第 11~19 行是配置结点的仿真参数,其具体类型视不同仿真场景而设定。第 20 行是调用“\$ns node”语句生成指定类型的卫星网络结点。第 21 行是设定卫星网络结点的位置信息。第 22~26 行是设置两个地面站结点。第 28,29,31,32

行,设置两个地面站结点与 GEO 卫星之间的地星链路,并配置链路接口采用的物理层、链路层协议,以及带宽、队列、物理信道等参数。

```
1 global opt ; # 仿真参数
2~10 ..... ; # 具体配置协议参数
11 $ns node-config -satNodeType geo \ ; # 配置结点的类型
    为:GEO
12 -llType $opt(ll) \ ; # 并设定其它参数
13 -ifqType $opt(ifq) \
14 -ifqLen $opt(qlim) \
15 -macType $opt(mac) \
16 -phyType $opt(phy) \
17 -channelType $opt(chan) \
18 -downlinkBW $opt(bw-down) \
19 -wiredRouting $opt(wiredRouting)
20 set geo0 [ $ns node ] ; # 生成 GEO 卫星结点 geo0
21 $geo0 set -position 105 ; # 设定 GEO 的经度
22 $ns node-config -satNodeType terminal ; # 配置结点类型
    为:地面站
23 set T0geo [ $ns node ] ; # 生成地面站类型结点 T0geo
24 $T0geo set -position 40 116 ; # 设定地面站 T0geo 的纬度
    和经度
25 set T1geo [ $ns node ] ; # 生成地面站类型结点 T1geo
26 $T1geo set -position 26 119 ; # 设定地面站 T1geo 的纬度
    和经度
27 # 配置地星链路 T0geo-geo0
28 $T0geo add-gsl geo $opt(ll) $opt(ifq) $opt(qlim) $opt
    (mac) $opt(bw-up) \
29 $opt(phy) [ $geo0 set downlink- ] [ $geo0 set uplink- ]
30 # 配置地星链路 T1geo-geo0
31 $T1geo add-gsl geo $opt(ll) $opt(ifq) $opt(qlim) $opt
    (mac) $opt(bw-up) \
32 $opt(phy) [ $geo0 set downlink- ] [ $geo0 set uplink- ]
33 # 然后设定路由协议机制、运输协议代理以及应用流量场景
    等
.....
```

图 2 卫星网络 NS-2 仿真场景配置示例

若需要设定差错模型,则需要在相关的卫星结点的相应接口上增加以下配置语句,可在图 2 中紧随第 32 行之后添加语句:

```
$geo0 interface -errormodel $val(err) 0 ; # 在
geo0 的接口 0 上设定差错模型 val(err)
```

### 2.2 卫星轨道参数设定

仿真平台中,卫星的高度和周期遵循开普勒第三定律即轨道周期定律。

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{\mu}} \quad (1)$$

式(1)中,  $T$  为卫星轨道周期,单位为 s,  $r$  为轨道半径(即半长轴),单位为 km,  $\mu$  为开普勒常数,取值

$398601.2 \text{ km}^3/\text{s}^2$ ,  $\pi$  圆周率, 取值  $3.1415926535897$ 。轨道半径  $r$  等于地球半径与卫星高度之和, 地球半径取值  $6378 \text{ km}$ 。

对于地球同步轨道卫星 GEO, 其周期等于地球自转周期  $86164 \text{ s}$ , 由公式(1)可以计算得到其轨道半径, 从而计算出 GEO 卫星的高度为  $35786 \text{ km}$ 。对于其它类型的卫星结点, 如低轨卫星 LEO 和中轨卫星 MEO 的轨道参数设定, 可在卫星结点创建时, 根据卫星高度计算出周期。这些空间几何特性参数将为地星链路仰角、链路切换、地星/星间链路传播时延的计算提供依据<sup>[9-11]</sup>。

### 3 航空器通信仿真模块的扩展

在 NS-2 网络仿真器中, 基于卫星网络仿真模块, 以航空器通信结点为例, 实现了航空器通信仿真模块的 NS-2 扩展。主要从结点、链路和仿真接口三个方面进行了扩展。为描述方便起见, 将航空器通信结点定义为 AC(Air Craft)结点。

#### 3.1 结点扩展

在结点扩展方面, 与 GEO、LEO 和地面站 Terminal 类型相对应, 基于卫星结点基类 SatPosition, 参照 LEO 卫星仿真模块, 对航空器通信结点设计了一个新的结点类 ACSatPosition, 添加在文件  $\sim/\text{ns}-2.29/\text{satellite}/\text{satposition.h}(.cc)$  中。航空器通信结点位置属性包括高度、轨道倾角、经度、纬度、轨道平面、飞行速度等。其中, 轨道倾角用来表示航空器的航线和方向, 航空器通信结点位置信息类定义如图 3 所示。

```
class ACSatPosition : public SatPosition {
public:
    ACSatPosition(double = 20, double = 90, double = 0, double = 0,
        double = 0, double = 3);
    virtual coordinate coord();
    void set(double Altitude, double Lon, double Alpha, double inclination, double MH);
    bool isascending();
    ACSatPosition * next() { return next-; }
    int plane() { return plane-; }
protected:
    int command(int argc, const char * const * argv);
    ACSatPosition * next-; // Next intraplane node
    int plane-;
    double inclination-;
};
```

图 3 航空器通信结点类的定义

在构造函数 ACSatPosition() 中, 设定航空器的高

度、轨道倾角、经度、纬度、轨道平面、飞行速度等位置/轨道信息。通过航空器的飞行线速度计算航空器的运行周期, 计算公式如下:

$$\text{period-} = 2 * \text{PI} * \text{initial-} . r / (\text{SOUND} * \text{MH});$$

// seconds (2)

其中,  $\text{PI}$  为圆周率,  $\text{initial-} . r$  为设定的初始轨道半径, 等于地球半径与航空器高度之和,  $\text{SOUND}$  为声音速度,  $0.34 \text{ km/s}$ 。MH 为设定的航空器飞行线速度的马赫数。

#### 3.2 链路扩展

在链路扩展方面, 定义了航空器 AC 结点与地面站, AC 结点之间, 以及 AC 结点与卫星间的链路等多种链路类型, 与地星链路、星间链路类似, 可以实现链路的 MAC 协议、链路控制协议、队列管理、带宽等特性的配置。还设计和实现了对双向不对称链路参数的配置。

#### 3.3 仿真接口扩展

在仿真接口的扩展方面, 用 Tcl/Tk 语言设计和扩展了仿真模块的接口部分。相反, 如果不对仿真接口部分进行扩展, 尽管内部核心仿真模块已用 C++ 实现, 则仍然无法通过 Tcl 仿真脚本将参数传入核心仿真模块。

### 4 仿真实验

设定的仿真环境包括 66 颗低轨卫星的铱星星座、一个航空器通信结点 AC0、地面站 T0 和 T1。其中, T0 与低轨卫星建立地星链路, T1 与航空器 AC0 直接建立通信链路。选用低轨卫星星座的原因是, 低轨卫星较地球同步轨道卫星的覆盖范围小, 能较好地反映出航空器飞行过程中的链路切换。具有航空器通信结点 AC 的卫星网络仿真拓扑如图 4 所示。

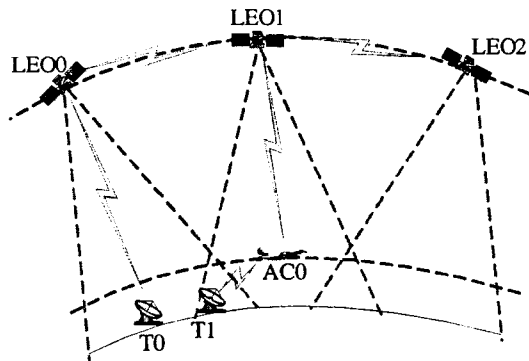


图 4 具有 AC 结点的卫星网络仿真拓扑

为了清晰地仿真航空器飞行导致与地面站结点间的链路变化, 还在地面站结点 T1 与航空器 AC0 之间建立通信链路。地面站与卫星、地面站与航空器, 以及

航空器与卫星之间链路传输控制协议采用选择重传 ARQ 协议,保证链路传输可靠性。设定航空器通信结点 AC0 以 CBR/UDP 流量发送视频流信息给地面站结点 T0,同时,T0 以 TELNET/TCP 流量发送控制指令给航空器通信结点 AC0。仿真时长为 2000s。地面站结点 T0 和 T1 位于经度 116°、纬度 40°。航空器飞行高度为 20km,初始位置在经度 116°、纬度 40°,轨道倾角为 30°,以马赫数 3(即  $3 \times 0.34\text{km/s}$ ) 的速度飞行。

仿真得到结点 AC0 与地面站结点 T0 之间的 CBR 流量的时延性能如图 5、6 所示。

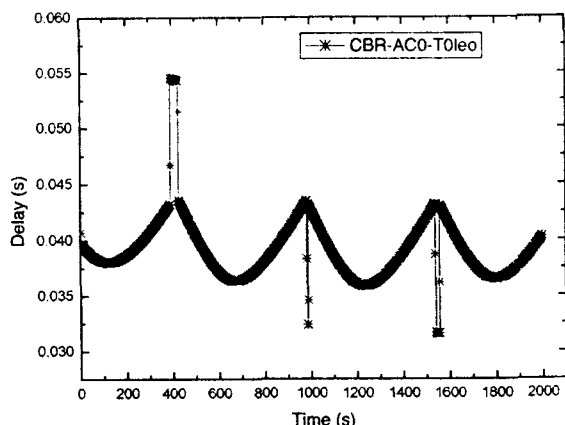


图 5 误码率为 0 情况下的 CBR 流量时延性能

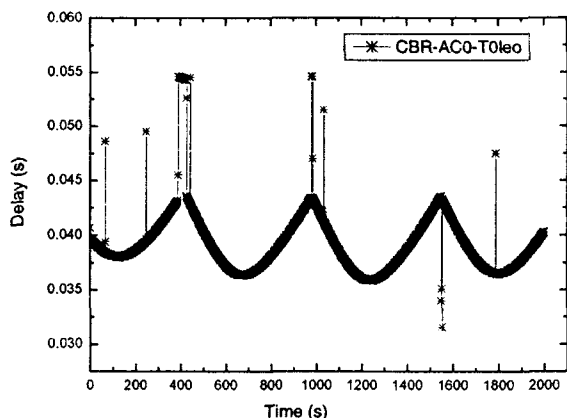


图 6 误码率为  $10^{-6}$  情况下的 CBR 流量时延性能

图 5 反映了理想信道即误码率为 0 情况下的 CBR 流量的时延性能。因为采用的通信卫星星座为低轨卫星铱星星座,有着较小的时延特性。但在 2000s 时间内,时延具有明显的规律性波动现象。这是因为航空器通信结点 AC0 的运动以及铱星星座的运行引起卫星链路的切换所致。其中,航空器通信结点 AC0 与卫星之间的链路发生切换的时刻为:389.783s、986.840s、1556.625s。地面站结点 T0 与卫星之间的链路发生切换的时刻为:421.915s、423.709s、981.503s、984.145s、1538.430s、1539.869s。仿真得到的切换规

律与时延特性相吻合。

图 6 反映了误码率为  $10^{-6}$  情况下的 CBR 流量时延性能。可以看出,除了链路切换引起时延的波动以外,信道误码还引起链路时延的瞬时增加。仿真结果表明,在 2000s 时间内,航空器通信结点 AC0 向地面站结点 T0 共发送 19991 个数据帧,其中有 5 个数据帧发生差错,误帧率为 0.025%。数据帧的差错和重传导致时延的增加。

## 5 结束语

对 NS-2 中卫星网络仿真模块的特性进行了深入分析,在此基础上,以航空器通信仿真为例,给出了 NS-2 核心仿真模块的扩展方法,实现了航空器通信仿真模块。仿真实验研究分析了航空器的飞行对航空器与卫星之间链路建立和切换特性的影响,证明了航空器通信仿真模块扩展方法的可行性和有效性。

## 参考文献:

- [1] Tomaso D C, Mario M. Performance analysis of data transfer protocols over space communications[J]. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, 2005, 41(4): 1200 - 1234.
- [2] Hadjitheodosiou M, Zeng H, Nguyen A, et al. Flexible access for a space communications network with IP functionality[J]. Computer Networks, 2005, 47: 679 - 700.
- [3] 唐荣富, 易东云, 罗强, 等. LEO 卫星可见性的快速仿真算法[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(18): 4850 - 4853.
- [4] 蒋太杰, 高丽娟, 赵洪利. 卫星网络的数学模型和路由算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(8): 1574 - 1578.
- [5] McCanne S, Floyd S. The LBNL network simulator, ns-2 [EB/OL]. 1997-10-01[2007-05-18]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [6] 徐雷鸣, 庞博, 赵耀. NS 与网络模拟[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [7] OPNET online documentation 10.0. C[R]. Washington DC, USA: OPNET Technologies, Inc. 2004.
- [8] Tcl/Tk Developer Site[EB/OL]. 2008. <http://www.tcl.tk/>.
- [9] 王文广, 孙现有, 许永平, 等. 基于 HLA 的卫星轨道机动仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(1): 89 - 93.
- [10] 刘通, 谢剑斌, 丁文霞, 等. 飞行仿真实验中飞机飞行参数与坐标系变换[J]. 计算机技术与发展, 2006, 16(10): 191 - 193.
- [11] 吴云华, 曹喜滨, 郑鹏飞, 等. 基于 Multi-Agent 的编队飞行卫星体系结构研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4284 - 4287.