

基于 OPNET 的低轨卫星网络仿真平台

申建平, 虞红芳, 章小宁, 王海燕

(电子科技大学宽带光纤重点实验室, 成都 610054)

摘要: 为研究适用于低轨卫星网络的协议与算法, 在 OPNET 中搭建仿真平台, 包括卫星网络拓扑的设计、节点模型、进程模型以及链路模型的建立。该平台能模拟低轨卫星网络路由表的建立和数据包选路等过程。依据卫星网络运动的规律性, 采用拓扑快照方式的静态路由策略, 对低轨卫星网络进行路由仿真, 验证了平台的有效性。

关键词: 卫星网络; OPNET 技术; 仿真

OPNET Based Low Earth Orbit Satellite Network Simulation Platform

SHEN Jian-ping, YU Hong-fang, ZHANG Xiao-ning, WANG Hai-yan

(Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

【Abstract】 To study protocols and algorithms for Low Earth Orbit(LEO) satellite networks, a platform is built based on OPNET. The platform introduces the key points including topology design, node models, process models, link models and etc. It can simulate the procedures of routing table generation and packets routing in LEO satellite networks. Since satellite networks run regularly in the space, topology snapshot based static routing strategy is adopted, packets routing is simulated in an example satellite network, and the validity of the platform is proved.

【Key words】 satellite network; OPNET; simulation

1 概述

卫星通信系统具有全球覆盖能力、内在的广播特性、灵活的带宽按需分配能力, 可支持移动性, 实现全球 Internet 互联, 已成为下一代网络(NGN)的重要组成部分^[1]。全球覆盖能力使得卫星通信系统适用于航空、海运以及缺乏基础通信设施的偏远山区。同时, 由于自然灾害的因素(地震、洪水等), 卫星通信系统可以作为地面网络失效后保持通信的重要后备方案。与 GEO(Geostationary Earth Orbit)卫星和 MEO(Medium Earth Orbit)卫星系统相比, 低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)卫星由于其传输延时短、往返时延小(20 ms~25 ms)、路径损耗小、对地面基站或终端要求低, 因此成为当前卫星移动通信系统研究的重点。

与地面网络相比, LEO 卫星系统的通信链路具有高延时、高误码率和上/下信道不对称等特点, 并且其网络拓扑具有显著的动态性, 因此, 许多适用于 Internet 网络的协议不能很好地适用于卫星网络。为了方便对 LEO 卫星网络的性能分析、设计适用于基于 IP 交换的 LEO 卫星系统的协议和算法, 本文选择在 OPNET 基础上搭建 LEO 卫星网络仿真平台。

由于 OPNET 并没有提供任何低轨卫星标准模块, 因此基于 LEO 卫星网络协议仿真存在一定的困难。文献[2]提出利用有线链路将陆地网络节点连接, 通过离散化其有线链路的通断, 近似模拟 LEO 卫星网络中的切换以及拓扑结构变化。这种方法需要在仿真之前针对特定的 LEO 卫星网络进行复杂的运算得到卫星网络拓扑具体的时变特性, 不具有通用性。本文通过分析 LEO 卫星拓扑设计, 在 OPNET 上搭建了具有星上处理/星上交换能力(OBP/OBS)、基于 IP 交换的 LEO 卫

星网络协议仿真平台。

2 仿真平台设计

2.1 网络拓扑

网络拓扑设计包括卫星网络拓扑和星地链路的建立。在卫星网络中, 顺行轨道面上的每颗卫星建立 4 条星际链路: 2 条轨内链路和 2 条轨间链路。轨内前后卫星连接关系保持不变。本文建立星间链路的策略为: 对任意 2 个相邻的轨道平面(除了极/近极轨道星座中的逆行轨道面之外), 找出任意 2 颗卫星间的星间距离, 然后找出星间距离最短的 2 颗卫星建立轨间链路, 并以这 2 颗卫星的轨间链路为基准, 同轨道面上的其他卫星依次平行顺序建立轨间链路。根据该策略建立卫星的星间链路后, 卫星拓扑随时间的改变而呈周期性变化。

由于 2 个逆行轨道面上的卫星间的相对运动角速度很快, 目前天线的跟踪和瞄准技术难以达到要求, 逆行轨道面间的卫星不建立轨间链路。在近极地区时, 卫星的密度较大, 信号间的干扰严重, 同时考虑到极地区用户数量较少, 对于进入极地区的卫星, 关闭其轨间链路以保留其能源。根据本文的策略产生各颗卫星的轨间链路连接关系后, 此对应关系将保持不变。任一卫星进入极地区后, 与其连接的轨间链

基金项目: 国家“973”计划基金资助重点项目(2007CB307104 of 2007CB307100); 教育部博士点基金资助项目(200806141004)

作者简介: 申建平(1983-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 卫星网络协议、算法及仿真; 虞红芳, 副教授、博士; 章小宁, 讲师、博士; 王海燕, 硕士研究生

收稿日期: 2009-01-05 **E-mail:** shen@uestc.edu.cn

路将被关闭,只有存在轨间链路连接关系的2颗卫星同时在极地区外,轨间链路才恢复连接状态。

除了星间链路以外,还须考虑星地链路的建立。通常,在一个卫星网络中,一个地区可能会被多颗卫星多重覆盖,这时,须考虑选择哪个卫星作为服务卫星。选择的策略通常包括最短距离优先(最小仰角优先),最长服务时间优先^[3]等。在仿真平台中,本文实现了这2种策略。

2.2 路由协议的设计

基于卫星轨道的周期性和可预见性,卫星网络拓扑可被认为是由等时间间隔或不等时间间隔的几乎静态的网络拓扑快照组成。在每一个拓扑快照中,卫星网络拓扑是近乎静态的,即每种拓扑快照中轨间链路的通/断情况是固定的,只有星际链路的距离发生变化。因此,卫星网络中的许多路由算法都是基于静态方式进行的,如常用的有限状态机(FSA)、快照方式等。

本文的仿真方案路由协议基于“快照方式”算法,将卫星拓扑变化看作一系列的相对静态的拓扑集合,在每个拓扑内,卫星间的连接关系不变,变化的只是星间距离,利用最短路算法可以算出每个拓扑下2点间的最短距离,然后将路由表存储在卫星中,并定时切换。由于快照系列和FSA的路由方案的主要差别只在于一个周期内拓扑的划分方式不一样,因此很容易在仿真平台中实现两者之间的转换。同时,本文在OPNET中将路由功能模块化,所以也可以按需要扩展到动态路由协议上。

2.3 网络模型

2.3.1 节点模型

网络节点主要包括地面节点和卫星节点,同时考虑到LEO卫星周期短,相对终端的服务时间可能只有几分钟,卫星相对终端以及卫星相对卫星之间切换比较频繁,本文利用全局中心节点简化了IP移动性的问题。卫星中心节点模型实现的功能包括:

- (1)切换管理。存储地面站或终端与卫星的映射关系,供卫星节点星上路由时查询。
- (2)计算路由。在静态路由方式下收集全局网络拓扑并计算出最短路,将路由由算法模块化,以比较不同的路由算性能;动态路由方式下不使用。
- (3)配置业务信息。对网络中源目的节点业务以及可能的卫星失效等信息进行配置。

卫星节点的建立和实现是仿真中的重点和难点,其实现的功能包括:

- (1)导入STK(Satellite Tool Kit)生成的卫星轨道文件。
- (2)接收路由由地面网关发送来的数据包,根据目的地在卫星中心节点获取目的卫星的映射转发数据包到目的卫星,并进一步将数据包送到目的地。
- (3)网络协议平台,在其上实现非面向连接的路由协议。在使用基于“快照”的静态路由方式下,需要在中心节点获取路由表以转发数据包。采用动态路由协议时,需要参与路由表的生成。
- (4)星间链路和星地下行链路的无线链路特性。

在OPNET中建立的卫星节点模型如图1所示。卫星上共有5对收发机和天线,前4对收发机和天线用于建立星间链路,为定向天线,最后一对收发机和天线用于和地面通信,为全向天线。卫星收到的数据包由mac层交由route模块处理,route模块决定下一跳并从相应的收发机发送出去。在链

路总带宽一定的情况下,星际链路和星地链路都设置了多个信道,可以根据不同的策略来分配这些信道。由于OPNET基于离散事件来推进仿真,需要使用ant_point模块定时更新定向天线的指向,以保证卫星间的定向天线指向。QT模块主要接收数据包并发送到合适的信道上,因此,负责收集信道信息,进行信道分配等。

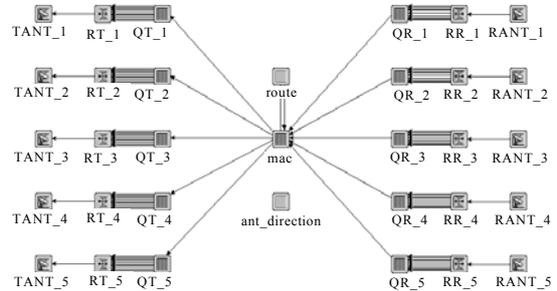


图1 卫星节点模型

卫星节点模型的mac进程如图2所示。

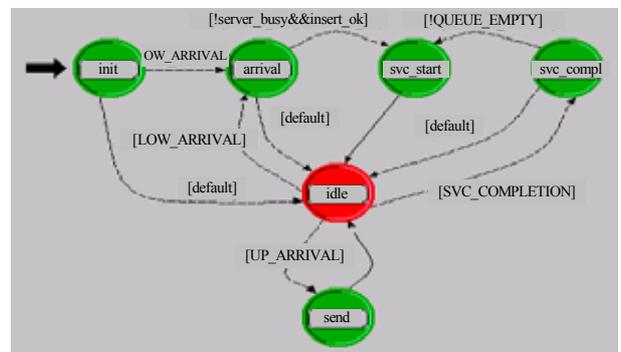


图2 卫星节点模型的mac进程

当收信机接收到数据包时,mac进程模型将数据包放入队列,经过路由器设置处理速度决定延时后送到process模块处理。此处的队列设计为FIFO队列,也可以按需要设计为其他带权重类型的队列模型。

2.3.2 链路模型

卫星无线链路的仿真实现是卫星网络仿真实现的基础。卫星网络的链路模型应反映星间与星地链路动态变化特点,实现链路建立、保持和断开的过程。OPNET将无线传输过程用前后连贯的14个管道阶段(pipeline stage)来描述,因此,需要通过实现这些管道阶段来实现卫星链路的仿真。其中主要需要设置卫星收发信机的channel参数,并在无线管道模型中实现卫星间的连通特性(rxgroup/closure model)以及天线增益(tagain/ragain model)、空间自由传输损耗(power model)和误码计算(error model)等无线传输模型。按照不同的网络设计要求,卫星链路可以采用不同的频段、传输比特率、调制方式以及多址方式。为了支持多用户接入,本文使用扩频码来区分不同的信道。每颗卫星有多个信道,各个信道的频段相同,但是具有不同的扩频码,信道分配给用户,用户按照相应的扩频码接入卫星。本文采用的卫星链路性能指标如表1所示。

表1 卫星链路性能指标

链路参数	星间链路参数	星地链路参数
工作频率/GHz	23	23
传输比特率/(Gb·s ⁻¹)	1.2	1.2
调制方式	QPSK	QPSK
多址方式	CDMA	CDMA

确定这些指标后,卫星发射机的参数可按照指标进行相应设置。卫星网络的连通特性在卫星发射机管道模型的 closure 阶段实现。卫星网络的连通特性一般包括:

(1)最小仰角特性:最小仰角是指在卫星节点链路通信范围内所能达到的最小的仰角。其特性是卫星只能与仰角超过最小仰角的地面节点建立链路。

(2)十字链路特性:每颗卫星只和相同轨道的前后卫星以及左右相邻轨道卫星相连,即轨内的星际链路和轨间星际链路,每颗卫星的链路呈十字形。

(3)极地关闭特性:当卫星处于高轨地区时,关闭该卫星所有的轨间链路。

天线增益通过 OPNET 的天线模型编辑器来创建三维天线模型。卫星链路空间传输损耗采用自由空间模型计算,在不考虑大气影响的情况下,自由空间传输损耗(Transmission Loss, TL)计算方法为

$$TL = \frac{1}{4\pi \times D^2} \times \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

其中, D 表示传输距离; $\lambda = \frac{C}{Bandwidth}$, C 表示光速。

3 仿真验证

3.1 网络仿真模型

本文在类全球星网络的基础上对仿真模型进行了验证。全球星(Globalstar)系统没有采用星际链路,卫星采用透明转发方式而没有星上处理和信号路由功能,因此,只有在移动用户和信关站同时处于同一颗卫星的覆盖区时,才能在移动用户与固定网络之间建立通信链路。类全球性网络是指卫星星座和全球性网络一样包括 48 个 LEO 卫星节点,同时还具有星际链路,卫星具有星上路由功能。48 颗 LEO 卫星节点分布在 8 条低轨道平面上,每条轨道面有 6 个卫星节点;每个 LEO 节点与相邻的 4 个 LEO 节点相连,包括同一轨道前、后以及相邻左右相邻轨道面上相邻的左、右 4 颗卫星,其轨道参数如表 2 所示。

表 2 球星星座轨道参数

参数名	参数值
轨道高度/km	1 414
倾角/(°)	52
轨道周期/s	6 845.4
最小仰角/(°)	10
轨道面数	8
卫星数/轨道面	6
卫星总数	48
轨道面间隔/(°)	45
星际链路数量	4
星地最小仰角/(°)	10

本文仿真采用的业务模型为:从华盛顿(北纬 34.05°,西经 118.24°)覆盖的地面子网内终端往北京(北纬 40°,东经 116°)覆盖的地面子网内终端发送数据包,数据经由华盛顿的地面站到达卫星网络,再经卫星网络转发,到达北京的地面站,最终达到地面终端。数据包大小固定为 128 Byte,数据包发送时间间隔为恒定的 1 s,即业务源是恒定的,业务开始时间为 100 s,为业务传输分配的星地链路带宽为 1 Mb/s,仿真观测时间为 3 600 s。

3.2 仿真结果及分析

当通信的双方的星地链路都采用最大仰角服务时间(最

短距离)策略时,在上述的网络仿真场景下测试得到时延统计曲线如图 3 所示。

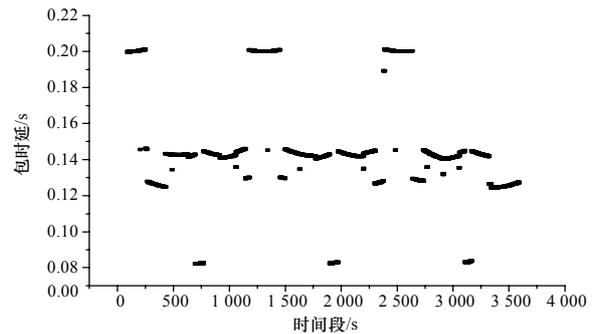


图 3 无卫星失效时数据包传输的端到端时延

时延的波动原因有 2 个:(1)由于卫星的移动,轨间链路(ISL)距离增加,导致时延相对平缓的变化;(2)由于服务卫星发生切换,导致时延的突变。引起抖动的原因是网络卫星节点间相对位置不断变化导致的动态路由改变和传输时延改变,由此验证了通信模型是合理的。

在卫星网络中,设备或太空的不可测因素可能会导致卫星失效,对通信服务的影响体现在 2 个方面:(1)失效卫星覆盖的区域可能会出现通信服务盲区;(2)星上路由时延增加。服务盲区与星座设计有关,具体可以使用 STK 软件和 MATLAB 软件分析。当指定卫星失效后,重新测试数据包时延,并得到数据包路由路径。时延统计曲线如图 4 所示。

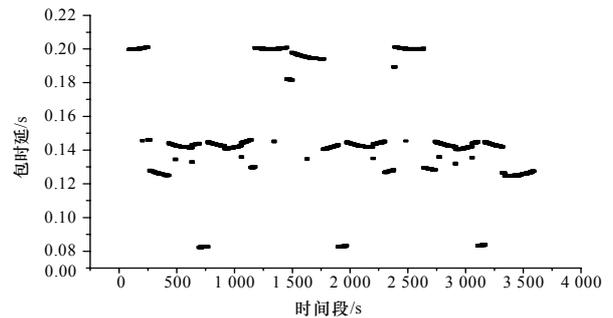


图 4 单颗卫星失效时数据包传输的端到端时延

对比图 3 未失效前的结果,可以看出,由于卫星失效,1 511 s~1 777 s 时间段内时延差别相当明显,数据包星上路由跳数增加导致时延增大。

4 结束语

本文阐述了卫星网络拓扑的建立、仿真进程在 OPNET 建立时的节点模型以及链路模型的设计。该平台支持基于 IP 的卫星网络协议及算法研究,支持多用户接入,便于扩展并适用于多种星座结构,是一个实时、动态、连续的仿真平台。

参考文献

- [1] Hu Yurong, Li V O K. Satellite-based Internet: A Tutorial[J]. IEEE Communication Magazine, 2001, 39(3): 154-162.
- [2] 苑喆,张军,柳重堪.一种简化的移动卫星网仿真方案[J].系统仿真学报,2005,17(1): 207-209.
- [3] 吴诗其,胡剑浩,凌翔.低轨卫星移动通信系统接入方案[J].电子学报,2000,28(7): 55-58.

编辑 顾姣健