

基于SNS3的低轨卫星通信系统网络仿真

吴奉微, 刘 川, 尚 丹, 耿 敏

(成都中科微信息技术研究院有限公司, 四川 成都 610054)

摘 要: 在卫星网络仿真平台 SNS3 的基础上, 通过构建准确的卫星轨道模型、物理层链路模型以及网络协议模型, 提出并设计一种适用于 LEO 卫星通信系统的天线模型, 搭建适用于低轨卫星通信的网络仿真平台, 实现对低轨卫星通信网络的全面仿真, 解决 SNS3 仅支持单颗 GEO 卫星多点波束卫星网络的模拟而无法对 LEO 卫星通信系统进行仿真的问题。对关键模型进行仿真验证, 仿真结果表明了所提模型的有效性; 对 LEO 卫星通信系统端到端时延、网络吞吐量等关键指标进行仿真, 仿真结果表明了所提模型应用于 LEO 通信系统能够有效模拟低轨卫星通信网络的运行过程, 并评估不同网络参数和协议性能, 为低轨卫星通信系统协议体制建设和关键技术的仿真验证提供借鉴和参考。

关键词: 低轨卫星通信系统; SNS3; 网络仿真

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024040

Network Simulation of Low Earth Orbit Satellite Communication System Based on SNS3

WU Fengwei, LIU Chuan, SHANG Dan, GENG Min

Chengdu ZhongKeWei Information Technology Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610054, China

Abstract: On the basis of SNS3, by constructing an accurate satellite orbit model, physical layer link model and network protocol model, an antenna model suitable for LEO satellite communication system was proposed and designed, and a network simulation platform suitable for low-orbit satellite communication was built, which realized the comprehensive simulation of low-orbit satellite communication network. Solved the problem that SNS3 only supports the simulation of a single GEO satellite multipoint beam satellite network, but cannot simulate the LEO satellite communication system. In this paper, the key models were simulated and verified, and the simulation results showed that the effectiveness of the proposed model was valid. The simulation results showed that the model could effectively simulate the operation process of the LEO satellite communication network and evaluate the performance of different network parameters and protocols. It provided a reference for the construction of protocol system and the simulation and verification of key technologies of low-orbit satellite communication system.

Keywords: LEO communication system, SNS3, network simulation

0 引言

卫星通信具有覆盖区域广、受地貌影响小、不受自然灾害影响等特点, 与地面网络形成优势互补, 对构建卫星互联网具有重大意义^[1-2]。相对于高轨卫星, 低轨卫星通信系统具有传输时延小、链路损耗低、终端小型化、容量大、可靠性高、成本低、可实现全球覆盖等优

势^[3-4]。近年来超低轨道技术的快速发展, 加上超低轨道具有部署成本低、信息传输效率高、对地观测分辨率高等优势, 使得低轨卫星通信成为未来发展方向。

国外以 OneWeb 公司和 SpaceX 公司为代表的星座计划发展最为迅速, 而国内以星网、垣信为代表的企业加入中国星座的建设中。虽然低轨卫星拥有众多优势, 但需要更多颗卫星才能完成与高轨卫星同样的覆盖。卫星

数量的增加,意味着网络更加复杂,通过卫星发射之后去验证网络性能的方式成本较高且不易实现,因此如果能够在卫星发射完成前在地面完成网络系统仿真,为卫星星座设计、网络协议验证、网络容量规划等关键技术提供依据,将是一种简单且有效的方法^[5-10]。可见设计一种适合低轨卫星的网络仿真平台将为LEO卫星通信系统协议体制的完善、网络规划及建设提供有力支撑。

目前国内低轨卫星通信系统拟采用的标准体制有两个:一个是基于5G-NTN标准^[11-12](3GPP标准),另一个是基于标准数字视频广播(Digital Video Broadcasting, DVB)体制修改的适用于低轨卫星通信的体制(G60卫星星座通信系统所采用体制)。本文基于DVB相关体制背景,解决目前仿真平台仅SNS3具备DVB仿真能力,但无法进行低轨卫星组网仿真的问题。

为此本文通过构建准确的卫星轨道模型、物理层链路模型以及网络协议模型,提出并设计了一种适用于低轨卫星通信的天线模型,以实现低轨卫星移动过程中对地面的连续覆盖,并基于设计的仿真平台对关键指标进行了仿真验证。

1 卫星网络仿真平台 SNS3

SNS3是一款基于NS3仿真工具扩展的卫星网络仿真平台/模块^[13-14]。SNS3模拟了一个具有GEO卫星和透明弯管有效载荷的完全交互式多点波束卫星网络,该卫星网络工作在Ka频段,由72个覆盖欧洲的点波束组成的1颗GEO卫星、5个信关站及若干终端组成,实现了数字视频广播前向链路DVB-S2、反向链路DVB-RCS2的标准规范。此外,SNS3还受益于众多现有的NS3模型和功能,如各种地面空中接口(LTE、Wi-Fi)、网络和传输层模型、应用程序模型、实时仿真支持和直接代码执行。

2 低轨卫星网络仿真平台

2.1 总体架构

本文采用分层设计思想,以模块化解耦合为原则,基于SNS3设计了低轨卫星网络仿真平台^[15-16],对各层功能进行逻辑划分,如图1所示,包括统计分析、应用业务、功能实体、协议体制、平台支撑等5部分。其中平台支撑^[17]为仿真提供调度、跟踪、队列等基本机制。协议

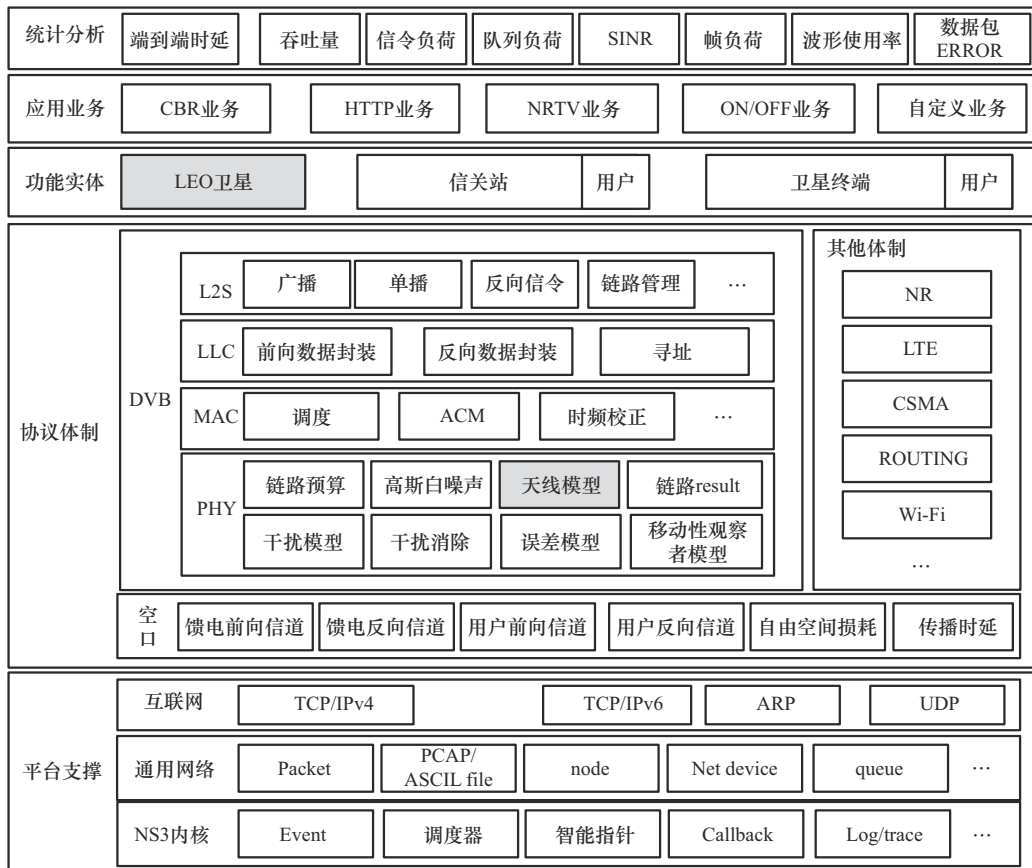


图1 仿真平台系统架构

体制主要实现功能实体通信行为,本文采用DVB通信体制,设计了物理层(PHY)、低层信令(Lower Layer Signalling, L2S)、逻辑链路控制(Logical Link Control, LLC)、MAC等网元模型,也可灵活选用其他通信体制。功能实体主要指的是通信节点实体,主要包括LEO卫星、信关站、卫星终端及信关站/卫星终端下挂用户(下文如未做特殊说明,用户均指卫星终端/信关站下挂用户);应用业务主要包括恒定比特率(Constant Bit Rate, CBR)业务、HTTP业务、NRTV业务、ON/OFF业务,也支持用户自定义业务,从而辅助用户进行网络性能的测试。统计分析主要用于对仿真过程产生的数据进行记录、计算、展示数据及数据信息统计,支持根据仿真需求对网络模拟数据进行分析。

基于该仿真平台进行仿真时,平台支持模块为仿真提供基础平台支撑,创建功能实体LEO卫星、信关站、卫星终端,信关站及卫星终端安装DVB协议栈、应用层、统计分析,LEO卫星安装数据接收模块,在支撑平台提供的调度机制下进行网络仿真。

2.2 网元模型

功能实体包括卫星、信关站、卫星终端及用户,为实现各功能实体间的通信,对功能实体进行建模,即网元模型。为了实现对LEO卫星通信系统的仿真,本文对卫星模型进行适配修改,使其可按设置的轨道参数进行运动。

网络仿真系统通过各网元模型的相互配合以完成模拟通信功能。物理层网元模型包括链路预算、高斯白噪声等模型,以完成对数据的收发。LEO卫星的高速移动,使得与波束绑定的天线增益模型已不再适用,为此本文设计了一种适用于LEO卫星通信的天线模型,同时增加移动性观察者模型,以实时观察地面节点与卫星的相对位置。MAC网元主要完成调度、ACM、时频校正功能。LLC网元模型主要完成前向链路的GSE封装/解封装及反向链路的RLE封装/解封装。L2S网元主要完成控制面信令流程。

2.3 关键模型的设计

2.3.1 低轨卫星模型

SNS3模拟的是一个GEO卫星通信系统的网络仿真,因此卫星的位置相对于地面保持静止,而LEO卫星通信系统中卫星高速移动,致使SNS3中卫星模型无法满足低轨卫星通信的需求,为此需对原有卫星模型进行适配修改以满足低轨卫星高速移动的需求。

(1) 低轨卫星轨道模型

计算卫星轨道时通常需要美国国家海洋和大气管理

局APT预测公告或两行元素(Two-Line Element, TLE)轨道报,TBUS提供的卫星参数较多且精度较高,但只有应用较为广泛的卫星才会发布TBUS,因此本平台采用TLE^[18],TLE轨道报计算卫星轨道需要用到NORAD开发的SGP4/SDP4模型。

(2) SGP4/SDP4模型

SGP4模型是由Cranford在1970年开发的,用于近地卫星,该模型是对Lane和Cranford(1969年)广泛解析理论的简化,这些模型需考虑地球非球形引力、日月引力、太阳辐射压及大气阻力等摄动力的影响。SGP4即简化常规摄动模型,可以应用于轨道周期小于225 min的近地地球物体。SDP4即简化深空摄动模型^[19],应用于远离地球或者轨道周期大于225 min的物体。所选卫星轨道高度940 km,运动周期约1 h43 min,小于225 min,因此选用SGP4模型。将TLE轨道报代入SGP4模型,可以成功地对空间目标进行预测,求解出目标物体在任意时刻的位置和速度。

(3) TLE轨道报计算

在卫星节点创建完成之后,将导入的多颗LEO卫星的TLE逐个解析,创建SGP4模型,将该卫星对应的TLE导入SGP4模型,将SGP4模型与该卫星节点进行关联,同时将该SGP4模型关联至地面设备。地面设备可以实时根据SGP4模型获得卫星的位置与速度,从而进行链路时延或接收信号强度的计算。TLE轨道计算流程示意如图2所示。

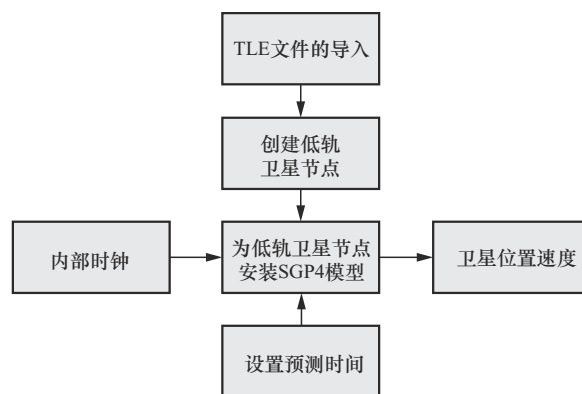


图2 TLE轨道计算流程示意

2.3.2 天线模型

天线模型也即天线增益模型,主要用于在卫星通信过程中,根据不同的地面坐标选择不同的天线增益,保证仿真链路的功率与覆盖的完整性和真实性。

(1) SNS3 天线模型

SNS3 提供了一种较为简单的天线建模方法。通过天线增益模型模拟单个波束的实际覆盖区域,同时通过波束覆盖范围内不同区域对应不同的天线增益模拟单个波束的真实覆盖特性。如图 3 所示为 SNS3 系统中 72 个波束的天线增益情况,单个波束的天线增益以“纬度、经度、增益”的布局进行设置,纬度与经度均以 0.25° 的颗粒度递进,越靠近覆盖区域中心增益越大,越靠近波束覆盖区域边沿天线增益越小。

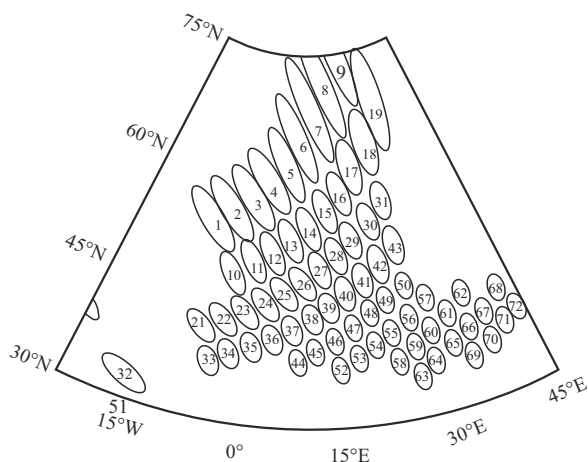


图 3 SNS3 系统天线增益示意

由于低轨卫星相对于地球高速运动,其波束覆盖的区域随时间发生变化,从而实现对地面区域的连续覆盖,而天线增益与波束、地理区域绑定无法满足低轨卫星移动的通信需求,为此,提出并设计了一种适用于低轨卫星通信的天线模型。

(2) 低轨卫星天线模型设计

基于 LEO 卫星高速移动的特性,为实现地面区域的连续覆盖,天线模型总体设计方案如图 4 所示。

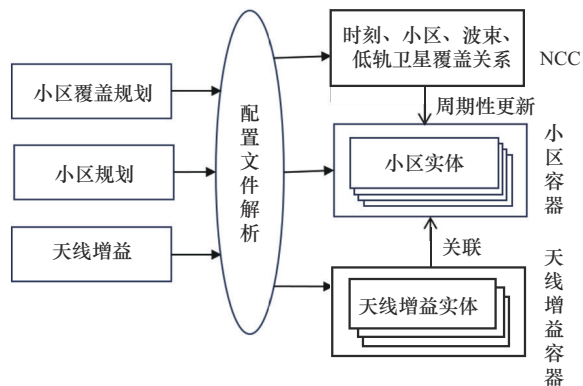


图 4 天线模型总体设计方案

将地面小区按一定直径划分成多个小区,通过仿真工具对小区按经度、纬度进行仿真得到天线增益,然后根据卫星运动轨迹合理规划卫星、波束、天线增益、地面小区之间的关系,从而实现对地面的连续覆盖。

1) 地面小区

为实现地面区域的连续覆盖且更好地模拟天线增益,将地球表面按一定规则划分成连续的区域(如直径 100 km),并为这些小区规划好唯一的索引编号,如图 5 所示。

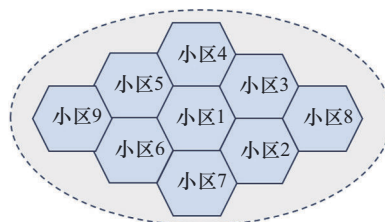


图 5 地面小区划分示意

2) 天线增益

每个小区按一定的规则(如经度、纬度按一定的步进)划分成多个样本点,并给这些样本点进行编号,如图 6 所示。

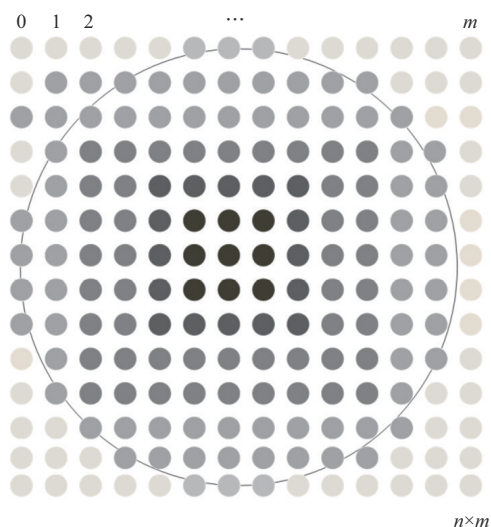


图 6 天线增益与小区内位置划分示意

其中 m 为列数, n 为行数,图中颜色较深部分表示天线增益大,颜色浅的部分表示天线增益小。该小区不管由哪颗卫星服务,相同 (n, m) 位置所对应的天线增益均相同,从而将天线增益与波束解绑,以满足低轨卫星的通信需求。

小区位置 (n, m) 所对应的天线增益可通过链路仿真

软件进行仿真，以外部输入的方式导入该仿真系统，具体见表1，天线增益仅与地理位置有关，与波束无关。

表1 小区内位置编号与天线增益的对应关系

位置编号	0	1	...	$n \times m$
天线增益	gain0	gain1	...	gain $n \times m$

在计算地面终端接收功率时，根据地面终端的位置信息，找到该终端在小区中距离最近的位置编号，与位置编号对应的天线增益即为卫星发射天线的增益。

3) 波束覆盖

为简化仿真过程的复杂度，本文模拟了一个简化网络控制中心（Network Control Center, NCC），用来负责预先规划卫星的波束服务的小区信息，使卫星能够在指定的时间指向所规划的小区。

NCC按一定的算法周期性地规划时刻、服务地面小区、服务相应小区对应的卫星、所使用卫星的波束关系表，以4个小区、每颗低轨卫星2个波束为例，可按表2所示方法规划。如表2所示，T1时刻由LEO1卫星的波束1服务小区0、波束2服务小区1，LEO2卫星的波束1服务小区2、波束2服务小区3；T2时刻LEO2卫星的波束1服务小区0、波束2服务小区1，LEO3卫星的波束1服务小区2、波束2服务小区3。按类似方法，通过NCC规划每个小区与波束及低轨卫星的映射关系，从而实现低轨卫星对地面小区动态连续的覆盖。

表2 小区、低轨卫星、波束及服务时刻示意

时刻	小区编号	LEO卫星编号	波束编号
T1	0	1	1
	1	1	2
	2	2	1
	3	2	2
T2	0	2	1
	1	2	2
	2	3	1
	3	3	2
...	...	...	...

2.4 仿真步骤

(1) 参数配置

首先根据用户的仿真需求，将仿真场景配置、网络规划配置、仿真行为配置、协议参数配置、统计参数配

置等参数加载到对应的节点模型、通信协议体制及算法模型，进而构建并生成具体的仿真任务。

(2) 通信节点加载

通信节点包括LEO卫星、卫星终端、信关站，具体步骤如下。

a) 根据网络规划中配置的卫星的规模生成LEO卫星节点，将TLE文件中相应的卫星轨迹、仿真场景中配置的波束、小区规划等参数存至卫星节点，并为LEO卫星节点创建馈电、用户接收实体。

b) 根据网络规划中配置的终端参数生成卫星终端节点，加载DVB协议体制，并配置协议参数、运动轨迹、业务模型、统计配置，然后将终端节点部署在规划的小区，仿真开始后，根据一系列仿真事件触发整个仿真过程的行为。

c) 与卫星终端的加载方式基本类似，根据网络规划的信关站的配置生成信关站节点，加载DVB协议体制，配置协议参数、NCC配置、统计配置、无线资源分配算法等参数，将信关站部署在规划的小区，仿真开始后，根据一系列仿真事件触发整个仿真过程的行为。

(3) 仿真结果分析

仿真参数配置和节点加载成功后，即可进行仿真，将按仿真行为配置中的参数执行，然后可以对仿真生成LOG进行分析。

2.5 通信节点及数据流

LEO卫星网络仿真平台中通信节点包括卫星终端、LEO卫星、信关站。各通信节点模型及数据流向如图7所示。

以卫星终端到信关站为例，来自卫星终端的上层数据，经过分类，存至LLC的容器，然后通过MAC层的调度器在分配的时隙将传输机会调度到LLC层，经LLC封装后发送至物理层，物理层通过反向用户信道发送给低轨卫星；低轨卫星在反向用户信道上接收来自用户的数据，结合干扰模型、信噪比-ACM-误码率、天线模型等计算反向用户接收功率、干扰及反向用户SINR，经过馈电接收后进行放大转发至信关站；信关站接收模块结合干扰模型、信噪比-ACM-误码率、天线模型等计算反向用户接收功率、误码率，将达到一定门限的数据报发送至MAC，MAC经过寻址将本信关站的数据发送至LLC，由LLC进行解封装后丢至上层。信关站到卫星终端的数据流与卫星终端到信关站的类似。



图7 各通信节点模型及数据流向

3 仿真平台验证

3.1 仿真场景

仿真验证时，本文选取了全球多媒体卫星贝塔实验A/B卫星星座。

该星座由KL-BEAT-A和KL-BEAT-B两颗卫星组成，轨道高度920 km，卫星采用透明转发工作模式，每颗卫星4个波束，工作在Ka频段，每个波束凝视覆盖直径为100 km的小区，每个小区下部署2个固定位置的卫星终端，每个卫星终端/信关站下挂3个用户以实现业务端到端的通信。导入时刻为起始时刻，将基站、终端部署在恰好可见卫星的位置。仿真过程中主要参数见表3。

表3 主要仿真参数

参数		值	
卫星模型	卫星类型	低轨卫星	
	轨道高度	920 km	
	工作模式	透明转发	
	卫星波束	4个	
	工作频段	Ka	
业务模型	业务模式	CBR业务	
	负载情况	轻负载	重负载
		8×10^4 bit/s	2.4×10^5 bit/s
	业务持续时间	2 s	
协议体制	前向	DVB-S2	
	反向	DVB-RCS2	
MAC参数	前向/反向链路	前向链路	反向链路
	超帧时长	10 ms	30 ms
	每个时隙的符号数	—	1 616个
	带宽	2 GHz	250 MHz
系统参数	LEO卫星数量	2颗	
	每颗卫星波束数量	4个	
	每个波束终端数量	2个	
	每个终端用户数量	3个	
	信关站数量	2个	
仿真时间		600 s	

3.2 仿真结果分析

3.2.1 关键模型的验证

(1) 低轨卫星运动模型验证

使用本文选用的低轨卫星运动模型，仿真的卫星终端、信关站及低轨卫星运动轨迹相对位置关系如图8所示。

卫星轨道高度920 km，最大星地距离^[20]为： $d = \sqrt{R_e^2 (\sin \phi_e)^2 + 2hR_e + h^2} - R_e \sin \phi_e \approx 2\,316$ km，其中 R_e 为地球半径， h 为卫星轨道高度， $\phi_e = 15^\circ$ 为观察点最小仰角。仿真结果显示，当星地距离大于2 316 km时，卫星不再服务卫星终端，验证了该低轨运动模型选择及实现的正确性。

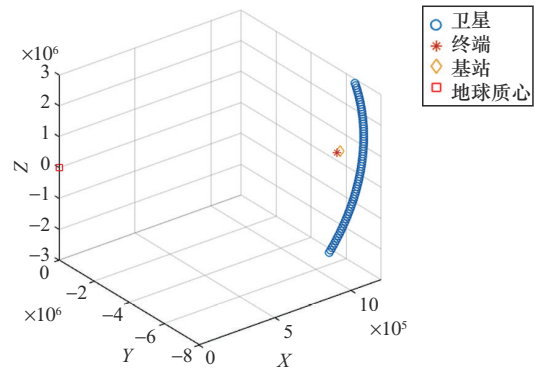


图8 卫星终端、信关站及低轨卫星运动轨迹相对位置关系

(2) 天线模型验证

使用本文设计的天线模型，以包时延为例进行仿真，仿真结果如图9所示。根据仿真结果可知随着卫星离终端越来越近，端到端时延越来越小，300 s左右端到端时延达到最小，约6 ms，此时终端位于星下点；随后，随着卫星远离终端，端到端时延随之增大，在450 s左右发生了切换，切换至目标卫星后链路通畅且端到端时延小于原卫星，实现了由低轨卫星移动引起的连续覆盖，且仿真结果与理论一致，验证了该低轨天线模型的正确性。

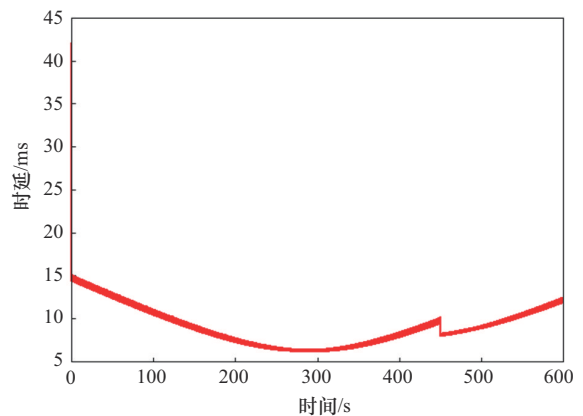


图9 带切换的包时延仿真结果

3.2.2 仿真平台的验证

网络性能仿真主要包括端到端时延、吞吐量、信道

利用率、丢包率等。下面以时延和吞吐量为例对低轨卫星网络仿真平台进行仿真及分析。

(1) 端到端时延仿真分析

端到端时延即从源节点发送数据包到目的节点接收到数据包之间所用的时间。为了对端到端时延、仿真架构对业务的承载能力进行验证,分别对轻负载和重负载下端到端时延进行了仿真,仿真开始时,卫星刚好对终端可见,仿真结果如图 10~图 11 所示。

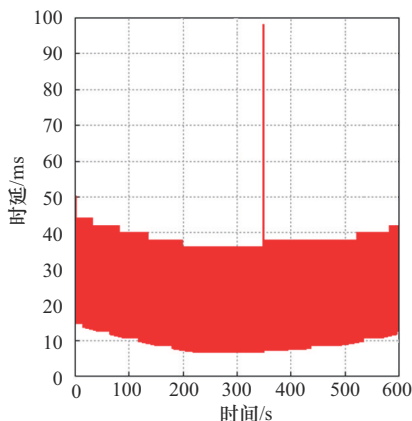


图 10 轻负载下时延仿真结果

理论上,端到端传输时延 $\tau = \frac{2d_{[20]}}{c}$, 其中, c 为光速。因此最大端到端时延 $\tau \approx 15.2$ ms, 最小端到端时延 $\tau \approx 6.1$ ms。由仿真结果可知,由于仿真开始时,卫星刚好对终端可见,仿真开始时端到端时延为 15 ms 左右,随着 LEO 卫星离终端越来越近,时延逐渐变小,直到 300 s 左右,时延达到最小,约 6 ms,此时终端应位于星下点;随着 LEO 卫星的远离,时延渐渐变大,600 s 左右达到最大,约 15 ms。仿真结果与理论一致,验证了该低轨卫星网络仿真平台的有效性。

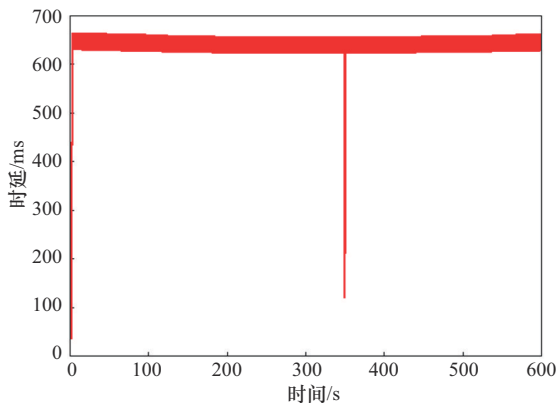


图 11 重负载下时延仿真结果

由仿真结果可知,在同一时刻,最大时延差 30 ms 左右,这是由于反向链路超帧^[21]时长 30 ms,可用资源最大相差 30 ms,仿真结果与协议设计一致。

由仿真结果可知,仿真开始时,端到端时延 40 ms 左右,随着时间的推移、数据包的堆积,重负载下的仿真时延远远大于轻负载下的时延,一方面是数据包排队等待时延,另一方面是等待信关站分配资源的时延。重负载下端到端时延趋势与轻负载下一致。

(2) 吞吐量仿真分析

系统吞吐量指的是系统在单位时间内可处理的事务的数量,是用于衡量系统性能的重要指标,为此本文对 SNS3 仿真系统在轻/重负载下的吞吐量进行了仿真,仿真结果如图 12 所示。

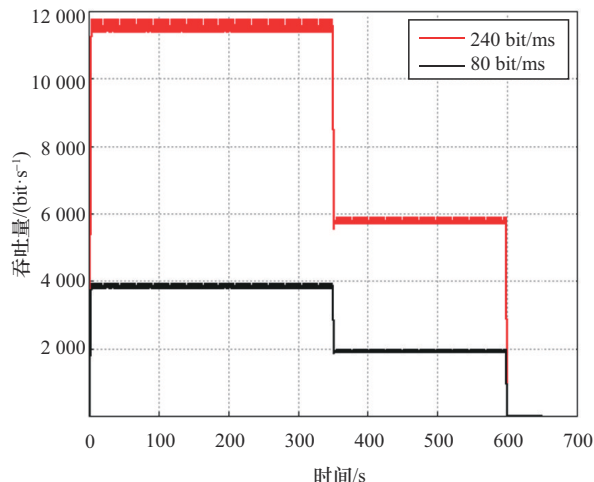


图 12 轻/重负载下吞吐量仿真结果

以轻负载为例,该网络有 2 个信关站,1 个信关站由 4 个波束覆盖,1 个波束下接入 2 个卫星终端,1 个卫星终端下挂 3 个用户,用户的业务速率为 8×10^4 bit/s,则整个网络吞吐量约为 $8 \times 10^4 \times 3 \times 2 \times 4 \times 2 = 3.84 \times 10^6$ bit/s;当用户业务速率为 2.4×10^5 bit/s,则整个网络吞吐量约为 $2.4 \times 10^5 \times 3 \times 2 \times 4 \times 2 = 1.15 \times 10^7$ bit/s。由仿真结果可知,重负载下的吞吐量基本为轻负载的 3 倍,与理论推导一致。由仿真结果可以看出,350 s 的时候吞吐量下降至原来的 1/2,原因是低轨卫星的运动引起的切换致使部分终端无法服务。

用户速率与网络吞吐量关系仿真结果如图 13 所示。由图 13 可知,由于该系统为链路带宽受限系统,当用户速率达到 4.8×10^5 bit/s 后,网络吞吐量不再随用户速率增大而增大。

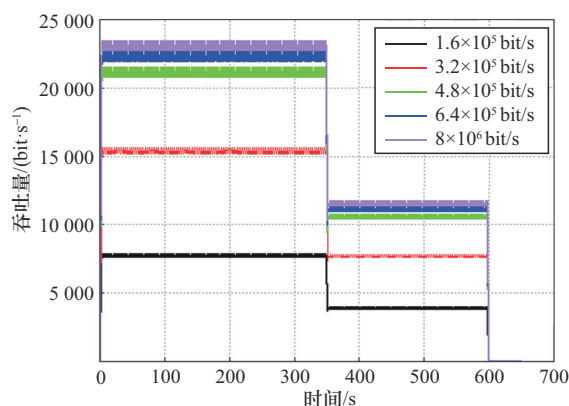


图13 用户速率与网络吞吐量关系仿真结果

4 结束语

随着低轨卫星通信技术的发展,组网方式会变得更为复杂,平台拟在更复杂的卫星组网、多波束+跳波束等方向继续进行研究,为协议合理性验证、协议性能、系统网络规划等方面提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] 刁兆坤, 杨丽, 王振章. 6G空天地一体化网络架构及其构建[J]. 通信世界, 2024(4): 36-39.
DIAO Z K, YANG L, WANG Z Z. 6G integrated network architecture of space, space and earth and its construction[J]. Communications World, 2024(4): 36-39.
- [2] 李小卓. 基于OPNET的卫星通信系统仿真设计及性能分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
LI X Z. Simulation design and performance analysis of satellite communication system based on OPNET[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2018.
- [3] 郑爽, 张兴, 王文博. 低轨卫星通信网络路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2022, 3(3): 97-105.
ZHENG S, ZHANG X, WANG W B. Survey of low earth orbit satellite communication network routing technology[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2022, 3(3): 97-105.
- [4] 曲桦, 栾智荣, 赵季红, 等. 基于软件定义的以用户为中心的5G无线网络架构[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 42-46.
QU H, LUAN Z R, ZHAO J H, et al. Software defined user centric 5G wireless network framework[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(5): 42-46.
- [5] 王平, 刘晓峰, 顾学迈. 基于OPNET的LEO卫星网络协议仿真平台研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(26): 4-6.
WANG P, LIU X F, GU X M. Simulation system for network protocol in LEO satellite based on OPNET[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(26): 4-6.
- [6] 李永斌, 徐友云, 许魁. 基于Iridium系统卫星网络路由算法的OPNET建模与仿真[J]. 通信技术, 2017, 50(4): 707-713.
LI Y B, XU Y Y, XU K. Iridium system-based OPNET modeling and simulation of satellite network routing algorithm[J]. Communications Technology, 2017, 50(4): 707-713.
- [7] 吴承洲, 苏泳涛, 刘剑锋, 等. 面向卫星移动通信的系统级仿真平台设计与实现[J]. 通信技术, 2020, 53(4): 890-897.
WU C Z, SU Y T, LIU J F, et al. Design and implementation of system level simulation platform for satellite mobile communication[J]. Communications Technology, 2020, 53(4): 890-897.
- [8] 宋娜, 刘群. 基于OPNET的卫星网络仿真平台设计[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(4): 158-160.
SONG N, LIU Q. OPNET based scheme of satellite network simulation platform realization[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(4): 158-160.
- [9] 胡宸华, 黄圣春, 王玲, 等. 基于OPNET的低轨卫星星座通信系统仿真研究[J]. 通信技术, 2018, 51(10): 2382-2388.
HU C H, HUANG S C, WANG L, et al. OPNET-based simulation of LEO satellite communication system[J]. Communications Technology, 2018, 51(10): 2382-2388.
- [10] 申建平, 虞红芳, 章小宁, 等. 基于OPNET的低轨卫星网络仿真平台[J]. 计算机工程, 2009, 35(18): 237-239.
SHEN J P, YU H F, ZHANG X N, et al. OPNET based low earth orbit satellite network simulation platform[J]. Computer Engineering, 2009, 35(18): 237-239.
- [11] 刘瑞军. 基于NS3的多波束卫星通信仿真系统设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2021.
LIU R J. Design and implementation of multi-beam satellite communication simulation system based on NS3[D]. Xi'an: Xidian University, 2021.
- [12] 蒋长林, 李清, 王羽, 等. 天地一体化网络关键技术研究综述[J]. 软件学报, 2024, 35(1): 266-287.
JIANG C L, LI Q, WANG Y, et al. Survey on key technologies in space-ground integrated network[J]. Journal of Software, 2024, 35(1): 266-287.
- [13] PUDDU R, POPESCU V, MURRONI M. An open source satellite network simulator for quality based multimedia broadband traffic management[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB). Piscataway: IEEE Press, 2022: 1-7.
- [14] SORMUNEN L, PUTTONEN J, KURJENNIEMI J. System level modelling of DVB-S2X in high throughput satellite system[C]//Proceedings of the 36th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2018). London: IET, 2018: 1-4.
- [15] PUTTONEN J, RANTANEN S, LAAKSO F, et al. Satellite model for network simulator 3[C]//Proceedings of the Seventh International Conference on Simulation Tools and Techniques. ICST,

- 2014.
- [16] PUTTONEN J, RANTANEN S, LAAKSO F, et al. Satellite model for network simulator 3 workshop on simulation for European space programmes(SESP)[Z]. 2014.
- [17] 茹新宇, 刘渊. 网络仿真器 NS3 的剖析与探究[J]. 计算机技术与发展, 2018, 28(3): 72-77.
- RU X Y, LIU Y. Analysis and research on network simulator 3[J]. Computer Technology and Development, 2018, 28(3): 72-77.
- [18] KELSO T S. Two-line element Set Format[Z]. 2023.
- [19] 刁宁辉, 刘建强, 孙从容, 等. 基于 SGP4 模型的卫星轨道计算[J]. 遥感信息, 2012, 27(4): 64-70.
- DIAO N H, LIU J Q, SUN C R, et al. Satellite orbit calculation based on SGP4 model[J]. Remote Sensing Information, 2012, 27(4): 64-70.
- [20] 代健美, 文泓斐. Starlink 星地链路性能仿真分析与启示[J]. 通信技术, 2022, 55(12): 1589-1596.
- DAI J M, WEN H F. Simulation and enlightenment of starlink satellite ground link performance[J]. Communications Technology, 2022, 55(12): 1589-1596.

- [21] ETSI TR 101 545. Digital video broadcasting(DVB): second generation DVB interactive satellite system(DVB-RCS2)[Z]. 2014.

[作者简介]



吴奉微 (1986-), 女, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为低轨卫星通信设备、通信系统网络仿真。

刘川 (1988-), 男, 硕士, 主要研究方向为无线通信系统和设备。

尚丹 (1980-), 男, 中级工程师, 主要研究方向无线通信和卫星通信。

耿敏 (1990-), 男, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为通信与信息系统。