

基于 EXata 的 5G 融合低轨卫星网络协议仿真与验证平台

何磊^{1,2}, 刘占军^{1,2}, 梁承超^{1,2}, 官思佳^{3,4}, 陈前斌^{1,2}

(1. 重庆邮电大学通信与信息工程学院, 重庆 400065;

2. 重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室, 重庆 400065;

3. 中国航天科工集团空间工程总体部, 北京 100854;

4. 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 针对当前缺乏 5G 融合低轨卫星网络协议仿真与验证平台的问题, 基于 EXata 仿真平台实现了 5G 融合低轨卫星网络系统级仿真平台, 支持对接入与切换等关键流程的仿真。经过系统级的仿真验证, 该平台可有效模拟 5G 融合低轨卫星网络的端到端通信与移动性管理信令流程, 并给出接入时延、吞吐量等关键性能指标, 为 5G 融合低轨卫星网络协议仿真与研究提供支撑。

关键词: 5G; 卫星网络; 系统级仿真; EXata

中图分类号: TN927+.23

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025007

Simulation and Verification Platform for 5G-Integrated Low Earth Orbit Satellite Network Protocols Based on EXata

HE Lei^{1,2}, LIU Zhanjun^{1,2}, LIANG Chengchao^{1,2}, GUAN Sijia^{3,4}, CHEN Qianbin^{1,2}

1. School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

2. Chongqing Key Laboratory of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China

3. CASIC Space Engineering Development Co., Ltd., Beijing 100854, China

4. School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

Abstract: In response to the current lack of simulation and verification platforms specifically designed for 5G-integrated LEO network protocols, a system-level simulation platform for 5G-integrated LEO satellite networks had been implemented based on the EXata simulation platform. This platform supports the simulation of critical processes such as access and handover. Through system-level simulation verification, the platform effectively simulates the end-to-end communication and mobility management signaling processes of 5G-integrated LEO satellite networks, and provides key performance indicators such as access delay and throughput. This platform offers support for research and simulation of 5G LEO satellite network protocols.

Keywords: 5G, satellite network, system-level simulation, Exata

0 引言

5G 融合低轨卫星网络是面向卫星通信和低空通信等新应用场景的重要演进技术, 标志着 5G 从地面走向空间, 5G 融合低轨卫星网络基于 3GPP 标准^[1], 可实现卫星

通信与地面通信体兼容, 借助手机直连, 可以充分利用和分享地面 5G 的产业链和规模的经济效益, 快速扩增卫星通信的产业规模。

与传统地面网络相比, 5G 融合低轨卫星网络具有多方面的优势^[2]。

收稿日期: 2024-12-01; 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 重庆市科技创新重大研发资助项目 (No. CSTB2023TIAD-STX0025)

Foundation Item: Science and Technology Innovation Key Research and Development Program of Chongqing (No. CSTB2023TIAD-STX0025)

更广泛的连接：作为地面网络的补充，卫星可以提供额外的容量和覆盖范围，特别是在地面网络无法覆盖到的偏远地区。

抗灾能力：卫星网络运行在距离地面几百千米的高空，不太容易受到地面灾难或网络中断的影响。5G融合低轨卫星网络协议可以无缝集成卫星，以提高地面网络的冗余。

无缝漫游/切换：低轨（Low Earth Orbit, LEO）卫星网络相比于地球静止轨道（Geostationary Earth Orbit, GEO）卫星网络更接近地面，具有更低的时延，基于LEO的卫星网络可以实现网络终端无缝漫游与无缝切换。

成本：与专有的卫星网络相比，具有5G架构的5G融合低轨卫星网络可以利用现有地面5G网络的规模经济来降低成本。

标准化与兼容性：5G融合低轨卫星网络协议可以允许卫星网络利用现有的3GPP网络标准，并与地面网络进行互操作，这样可以避免不同异构网络间的不兼容。通过采用现有5G协议，卫星通信可以避免在协议标准化方面的大量工作，以更快地实现全球兼容性和互操作性。同时这意味着专为地面使用而设计的设备也可以通过卫星进行通信，而无需进行重大修改。

虽然将低轨卫星集成到5G现有网络中具有重大好处，但是为了应对低轨卫星网络带来的挑战，如高往返时延、低信号强度、重传和频繁切换等，在低轨卫星网络中对5G协议栈进行适应性修改并不容易。虽然3GPP已经针对5G融合低轨卫星场景提出众多解决方案，但在5G融合低轨卫星网络进行商业化部署前还需要进行大量仿真验证，从经济与效率的角度出发，搭建仿真平台对5G融合低轨卫星网络进行研究具有重要的现实意义和工程应用价值。

当前对于低轨卫星仿真系统的研究，大多关注终端到卫星的单点通信，星地间单一通信流程以及简单的星地融合网络，几乎没有针对5G融合低轨卫星完整网络架构的系统级全流程仿真验证。参考文献[3]提出了一个基于NS-3（Network Simulator 3）的5G非地面网络（Non-Terrestrial Network, NTN）的卫星仿真平台，该平台针对GEO卫星，对5G NTN集成的不同频率重用方案、传播时延、信道模型等进行了仿真验证，但该平台没有考虑5G卫星场景下的信令流程以及对LEO场景的仿真模拟。参考文献[4]使用开源5G-NR协议栈Open Air Interface 5G开发了5G LEO卫星仿真系统，并针对LEO卫星信道对5G协议栈进行了适应性修改，评估了5G融合低轨卫星通信网络在多普勒频移、时间同步等方面的性能，但未考虑到核心网网元，仅对终端到卫星的端到端通信

进行了模拟。参考文献[5]基于OPNET网络仿真器开发了一套低轨卫星移动性管理仿真平台，针对低轨卫星的运行特点，从工程实现的角度设计了一套基于接收信号强度测量的硬切换方案，该平台可以模拟低轨卫星通信系统工作状态，并输出相关数据参数，但是该平台主要针对低轨卫星的移动性管理进行仿真，缺乏对星间通信、星间路由等方面的考虑。参考文献[6]基于SDN搭建了一套星地综合网络仿真平台，采用STK模拟卫星轨道与区域覆盖情况，利用Mininet对端到端时延以及分组丢包率进行了验证分析，但该系统中心星仅为交换机，只有处理流表转发的功能，没有实现基站以及核心网的功能。参考文献[5]基于SpaceSim仿真平台进行卫星通信链路预算的仿真，并设计了基于OSPF协议的星间路由算法，但是该平台未能进行对实际的通信协议流程的模拟。

EXata是一款基于离散事件驱动的网络仿真软件，系统的操作是通过一组按时间顺序的事件来驱动的。它能够逼真地对大型有线、无线以及混合动态网络进行快速而且精准的仿真，对复杂的网络行为和性能表现进行预测。用户可以通过EXata来创建一个与真实网络一模一样的虚拟网络，网络人员可以通过EXata以仿真的方式对网络进行设计和评估，以缩短网络建设周期，避免构建真实网络的成本开销^[7]，但当前EXata平台缺乏针对5G融合低轨卫星网络的相关功能模块。

综上所述，当前的大多数研究都没有针对5G融合低轨卫星网络的系统级全流程进行仿真验证，未涵盖5G融合低轨卫星网络的信令流程，以及对核心网网元的仿真，缺少对星间通信以及星间路由的考虑，同时缺乏对低轨卫星网络仿真的指标输出与性能分析^[6]。因此，本文基于EXata网络仿真平台，构建全新的5G融合低轨卫星网络仿真平台，该平台具有模拟程度高、实时性强、检验效果好等特点，且涵盖从接入网到核心网的完整5G融合低轨卫星网络的通信流程，还包括了复杂的移动性管理流程以及性能指标的仿真输出，为5G融合低轨卫星通信系统中的网络规划、协议验证、性能分析等提供了一个贴近实际的仿真环境。

1 基于EXata的5G融合低轨卫星网络仿真平台

1.1 仿真平台架构设计

5G融合低轨卫星网络仿真平台需要模拟5G卫星通信系统的工作流程与关键技术，验证5G融合低轨卫星通信系统性能和接入与移动性管理策略等，本文设计的5G融合低轨卫星网络仿真平台总体架构如图1所示，采用模块

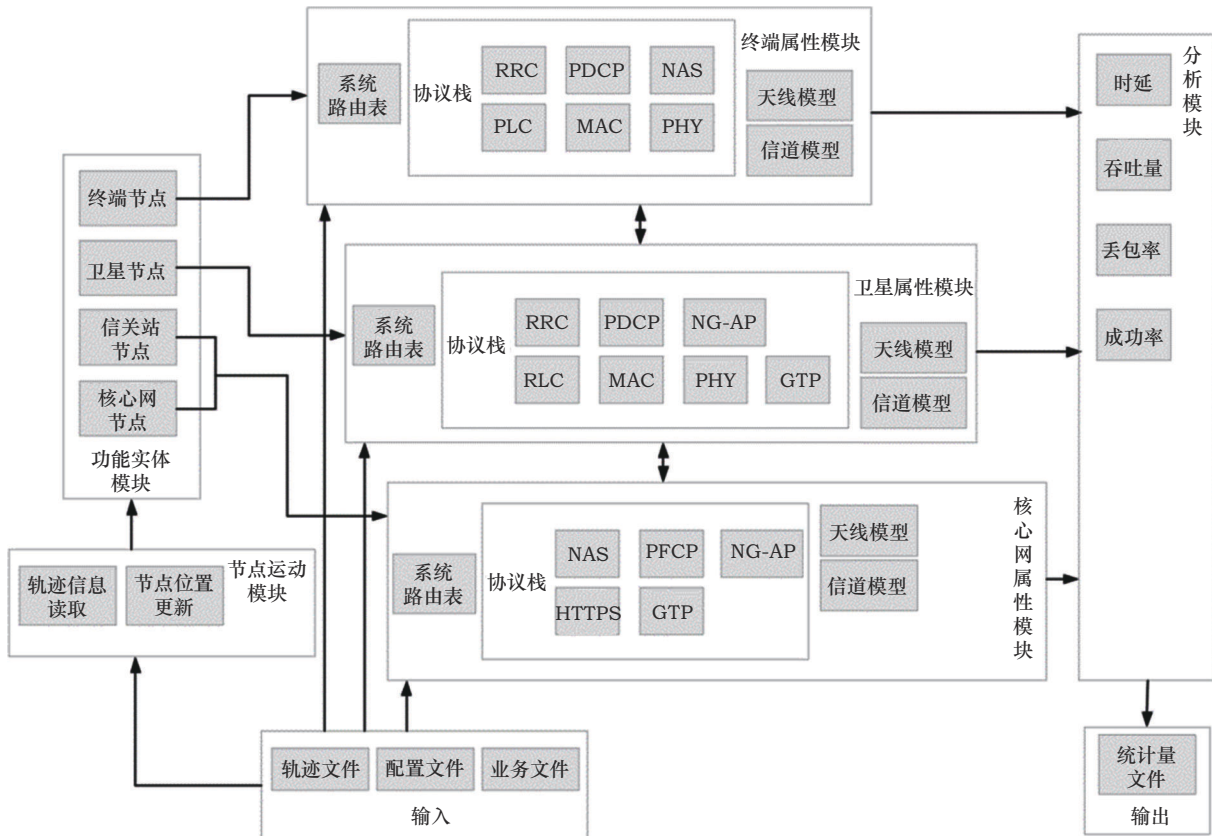


图1 5G融合低轨卫星网络仿真平台总体架构

化的设计，包括功能实体模块，节点运动模块，终端、卫星、核心网节点的属性模块，以及分析模块，每个模块根据配置的信息实现相应的功能，并可以在EXata软件GUI中显示运行情况。

功能实体模块，主要用于承载各个网络节点上的配置，包括终端、卫星、信关站与核心网节点，可以通过配置文件与轨迹文件设置各节点的状态，包括协议栈的配置、运行轨迹设置。

节点运动模块用于模拟仿真系统中各个节点的运动情况，通过输入的节点轨迹文件，获取节点的初始位置信息，并实时地在仿真平台中更新节点的位置。

分析模块，负责对整个仿真系统的运行情况进行统计与分析，对特定配置下的系统运行情况进行统计，并输出相应的统计量结果，根据不同的仿真需求，可添加或删除统计量。

1.2 卫星网络拓扑设计

该仿真平台的核心网架构需要支撑终端节点的初始注册、切换决策、数据路径管理等功能，参考3GPP^[8]标准，需要设计的核心网网元有：接入与移动性管理功能

(Access and Mobility Management Function, AMF)、认证服务功能 (Authentication Server Function, AUSF)、会话管理功能 (Session Management Function, SMF)、统一数据管理 (Unified Data Management, UDM) 功能、用户面功能 (User Plane Function, UPF) 与卫星节点 (S-gNB)。

5G核心网采用基于服务的架构 (Service-Based Architecture, SBA)，在该架构下核心网网元之间的接口为基于服务的接口 (Service-Based Interface, SBI) 采用HTTP协议传输信令，用户面与控制面之间采用NGAP协议传输信令，PFPCP用于用户面数据包的转发控制，控制数据包的转发与路由，GTP则是用于用户数据传输的协议，在5G网络中进行用户数据的传输^[9]。网元间协议层级如图2所示。

本平台基于5G融合低轨卫星的星上处理架构进行开发，卫星载荷为再生有效载荷，支持基于星上的基站基带处理、高层协议处理、交换和路由等功能。在该场景中，地面移动用户通过采用Uu接口的用户链路与卫星相连，同时卫星通过采用卫星无线电接口 (Satellite Radio Interface, SRI) 的馈电链路与信关站进行通信，之后信关站再接入核心网。卫星之间可通过星间链路 (Inter-Sat-

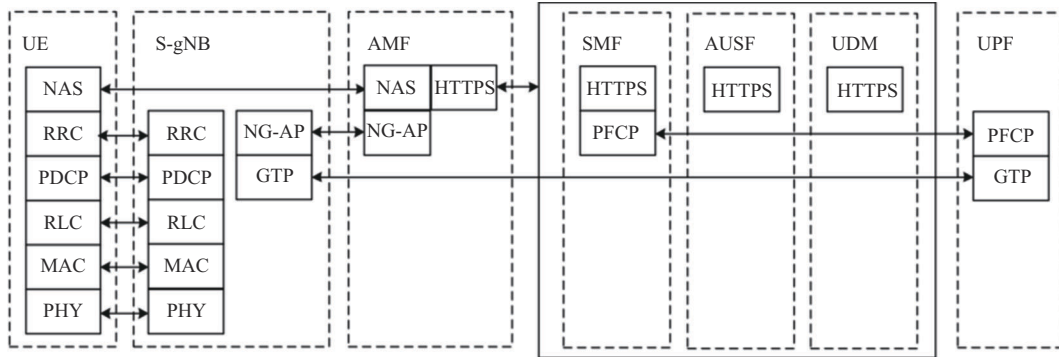


图2 网元间协议层级

ellite Link, ISL) 进行通信。

本文的5G融合低轨卫星通信系统采用典型的卫星移动通信系统架构设置，由空间部分和地面部分组成，采用星地网的结构，存在星间链路，在地面进行全球布站组网，为兼容地面的5G移动通信网络，使用5G标准。

空间段即5G融合低轨卫星群，具有可靠的星间链路，通过星间链路，将相关的信息传递到其他的卫星处。

地面段由地面用户与地面核心网组成，用户可以是移动用户也可以是固定用户，地面站连接地面核心网与空间段卫星，地面核心网连接地面站与互联网，地面核心网网元包括UPF、AMF、SMF、AUSF、UDM。仿真平台的总体网络架构如图3所示。

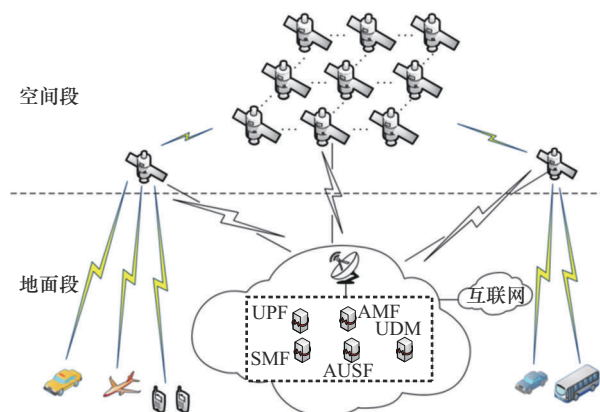


图3 仿真平台的总体网络架构

1.3 卫星网络关键流程设计

在本仿真平台中，终端需要进行初始注册流程后才可以发起后续的会话请求，初始注册流程如下。

(1) 终端与基站建立RRC连接后，将通知基站RRC连接建立完成，该通知消息中包含初始注册消息，发送初始注册信息后，注册信息到达AMF，建立起UE到AMF的通道。

(2) 初始注册时，AMF中无对应UE的身份信息，AMF会发起NAS身份认证请求，由基站转发至终端处。

(3) UE接收后回复认证响应，响应中包含自身的身份信息。

(4) 收到响应后AMF完成UE的身份认证，添加UE的信息，同时为用户选择AUSF，然后向AUSF发送鉴权请求，同时添加UE的信息，AUSF收到请求后向UDM发送鉴权请求，UDM返回鉴权请求响应后，AUSF向AMF发送鉴权响应。然后由AMF向UE发送NAS鉴权请求，该信令由基站转发至UE，基站接收UE返回的NAS鉴权信息转发响应至AMF，初始的注册过程完成。

完成初始注册后，AMF会为终端发起初始会话建立请求，初始会话建立后，终端才可以进行业务数据的传输，初始会话建立的流程如下：

(1) AMF接收到NAS鉴权响应后，为UE选择SMF，然后向SMF发送创建分组数据单元(Packet Data Unit, PDU)会话请求；

(2) SMF收到后添加UE的连接信息，为UE选择UPF，并向UPF发送分组转发控制协议(Packet Forwarding Control Protocol, PFCP)会话建立请求；

(3) UPF添加UE的信息，并为UE添加数据路由，然后向SMF返回会话建立响应；

(4) SMF收到响应后，向AMF发送建立响应，AMF通知卫星基站初始会话建立请求，基站接收到之后返回响应消息，初始会话建立过程完成。

由于低轨卫星的移动速度快，终端与卫星连接的时间较短，为了保证终端业务服务的连续性与稳定性，对卫星通信网络实施有效的移动性管理至关重要。移动性管理旨在为网络提供移动性支持，并满足相关的QoS指标，例如切换时延、丢包率、阻塞率以及信令开销等。将移动性管理分为切换管理与位置管理，本平台主要研究切换管理。

本平台的切换管理采用基于信号强度的切换，切换流程如下：

- (1) UE 侧测量接收到的卫星的信号强度，上报到源基站；
- (2) 源基站根据测量报告判决是否进行切换，若信号强度差达到设定的阈值，则触发切换；
- (3) 源卫星向目标卫星发送 Xn 切换请求；
- (4) 目标基站接收到 Xn 切换请求后，目标基站进行 UE 的准入控制，判断该切换请求是否接收，若接收该切换请求则设置相应的 UE 到 UPF 的路由，同时获取 UE 的连接配置，并设置相关的定时器，然后发送 Xn 切换请求确认到源卫星；
- (5) 源卫星接收到确认消息后，开始向目标卫星转发 UE 数据，并向 AMF 发送会话转移请求；
- (6) AMF 将删除源基站与目标基站的连接信息，然后发送路径切换请求到 SMF，以更新 SMF 的会话；
- (7) SMF 接收到请求后，更新 UE 的 PDU 会话信息，并发送 PFCP 会话更新请求到 UPF；
- (8) UPF 接收到请求后，设置更新 UE 的 PFCP 会话信息，更新 UE 的路由信息，同时向源基站发送 End marker 结束标识，并向 SMF 返回响应消息；
- (9) SMF 收到响应后向 AMF 发送 PDU 会话更新响应，AMF 收到后向目标卫星发送会话路径切换响应；
- (10) 目标卫星接收到响应后向源卫星发送 UE 上下文释放消息；
- (11) 源卫星接收到后，删除 UE 相关的连接信息与路由信息。

1.4 卫星网络场景设计

本文在网络场景设计中，采用 STK 软件搭配 EXata 仿真平台的设计方式，STK 是当前国际主流的卫星星座仿真软件，可进行卫星星座和轨道的可视化设计^[10]，本文

使用 STK 进行星座仿真，生成仿真场景的卫星节点轨迹文件，并导入 EXata 仿真平台中。本文仿真场景的网络拓扑使用 Walker Delta 倾斜轨道星座，以卫星数量为 108 颗，轨道面数量为 12 个，卫星高度为 1 150 km，轨道倾角为 50° 的低轨卫星星座为例，其在 STK 中生成的星座仿真图如图 4 所示。

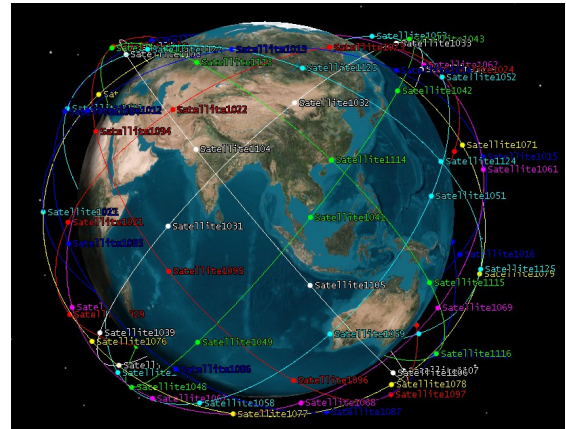


图 4 星座仿真图

仿真场景中除了 108 颗 5G LEO 卫星外，还包括了 5G 核心网中的 AMF、SMF、AUSF、UDM、UPF、DN，以及若干终端与地面站。在该仿真平台中，终端与卫星，卫星与地面站之间为无线连接，核心网网元之间、核心网与地面站、核心网与 DN 之间为有线连接。卫星的信令都通过地面站传递至地面核心网。EXata 中的仿真场景如图 5 所示。

2 仿真平台验证

2.1 仿真参数设置

在本仿真平台的实验验证中，以 5G NTN 相关标准和参考文献[1]作为参考设定仿真参数。表 1 为仿真时设定的相关参数。星间网络以及地面网络采用 EXata 平台的默认路由算法 BellmanFord 算法^[7]。

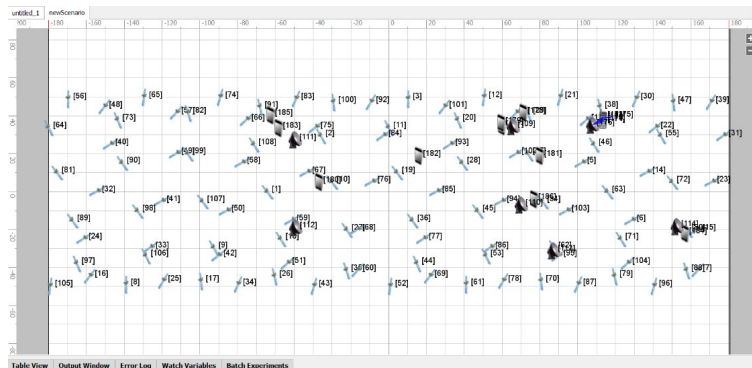


图 5 EXata 中的仿真场景

表 1 仿真参数

参数名称	数值
通信频率	2.4 GHz
卫星发射功率	65 dBm
卫星天线类型	全向天线
终端发射功率	40 dBm
终端天线类型	全向天线
子载波间隔	15 kHz

2.2 仿真平台关键流程验证

本节主要对该仿真平台的关键流程进行展示，包括终端随机接入、初始注册、终端会话申请与切换管理流程。在本仿真场景中，配置终端、卫星与核心网节点，终端在仿真开始后随机接入卫星，然后通过卫星向核心网发起接入请求，接入成功后，发起会话请求，经过一段时间的仿真后，由于低轨卫星的移动，星地距离变化，信号接收强度发生变化，触发 A3 事件，源卫星向目标卫星发起切换请求，最终终端切换至目标卫星。

随机接入流程仿真信令输出结果如图 6 所示，终端节点为 177 号节点，仿真开始后成功接入 10 号卫星节点，

耗时 10 ms。随机接入完成后，终端向核心网发起初始注册请求与初始会话申请，仿真信令输出结果如图 7 所示。终端节点随机接入成功后，向核心网发送初始注册请求，由卫星转发至核心网网元 AMF，AMF 向卫星发起认证请求，终端返回认证请求响应，AMF 收到响应向 AUSF 发起终端的鉴权请求，由 UDM 网元处理后返回终端的鉴权响应。开始终端的初始会话申请流程如图 8 所示，AMF 接收到终端的鉴权响应后，为终端选择 SMF，然后向 SMF 发送创建 PDU 会话请求，SMF 向 UPF 发送 PFCP 会话建立请求，UPF 添加终端数据路由后向 SMF 返回 PFCP 会话建立响应，SMF 向 AMF 发送会话建立响应，初始会话建立过程完成。初始的源卫星经过一段时间的移动后，与终端之间的星地距离逐渐变大，终端不断发起测量，并上报源卫星。当源卫星检测到相邻卫星的信号强度大于自身信号强度后发起切换请求，目标卫星对终端进行准入控制后，向源卫星发送切换请求响应。然后源卫星开始通知终端重随机接入目标卫星，并开始用目标卫星转发数据，通知核心网终端的数据路径更新，信令输出流程如图 9 所示。

```

Node 177 start random access at 8.610044s
Uu:Node 177 transmit random access preamble at 8.610044s
UE 177 select SAT-NodeB 10 at 8.610044s
Node 177 phy start transmitting signal in establishment at 8.611000s
Uu:Sat-NodeB 10 send Random access grant to UE 177 at 8.611844s
Uu:Node 177 mac notify received random access grant at 8.620044s
Uu:UE 177 send random access complete to Sat-NodeB 10 at 8.620044s

```

图 6 随机接入流程仿真信令输出

```

Uu:UE 177 send random access complete to Sat-NodeB 10 at 8.620044s
Sat-NodeB 10 select AMF 170 for UE 177 at 8.830000s
N2:Node 10 send message Initial UE 177 to amf at 8.830000s ← 发送注册请求
InitialUEMessage-mobileIdentity : 177
InitialUEMessage-locInfo.nrCgi : 10
N2:Node 170 send ue 177 Nas Identity request to Sat-NodeB 10 at 8.888509s ← 认证请求
-NasIdentityRequest-ueRnti : 177
Nu:Node 10 forward Nas Identity request to UE 177 at 8.945311s
Nu:Node 10 forward Nas Identity reponse to UE 177 at 8.960000s
Uu:Node 10 received rrc notify identity response at 8.960000s ← 认证请求响应
AMF 170 select AUSF 171 for UE 177 at 9.018464s
AKA:AMF 170 - UE 177 :createNausfUeAuthenticationRequest at 9.018464s
-NausfUeAuthenticationRequest-suci : 177
-NausfUeAuthenticationRequest-snid : 170
Namf:AMF 170 send nausf ue 177 authentication request to AUSF at 9.018464s ← 鉴权请求
AMF Node 170 process ue 177 Nas Identity response at 9.018464s
AKA:AMF 170 - UE 177 createNudmUeAuthenticateGetRequest at 9.020632s
-NudmUeAuthenticateGetRequest-suci : 177
-NudmUeAuthenticateGetRequest-snid : 170
Nausf:AUSF 171 send Nudm ue 177 authenticate get request to udm at 9.022799s
AKA:Node 177 createNudmUeAuthenticateGetResponse at 9.022799s
-NudmUeAuthenticateGetResponse-ueRnti : 177
Nudm:UDM 172 send Nudm ue 177 authenticate get response to Ausf at 9.022799s
Nausf:AUSF 171 send nausf ue 177 authentication response to amf at 9.024954s
AKA:Node 177 createNausfUeAuthenticationResponse at 9.024954s
-NausfUeAuthenticationResponse-ueRnti : 177
N2:Node 170 send ue 177 Nas authentication request message to Sat-NodeB 10 at 9.027108s
-NasAuthenticationRequest-ueRnti : 177
Nu:Node 10 forward Nas Identity reponse to UE 177 at 9.083907s
N2:Node 10 forward ue 177 Nas Authentication Response to amf at 9.100000s
Uu:Node 10 rrc notify authentication response at 9.100000s
AKA:Node 177 createUeAuthenticationResponse at 9.158461s
-AuthRequest-ueRnti : 177
Namf:AMF 170 send nausf ue 177 authentication request to ausf at 9.158461s
Nausf:AUSF 171 send ue 177 authentication response to amf at 9.160616s ← 鉴权响应
AKA:Node 177 createUeAuthenticationResponse at 9.160616s
-AuthResponse-supi : 177
AKA:Node 177 createUeAuthenticationResponse at 9.160616s
AMF 170 select SMF 173 for UE 177 at 9.162777s
Namf:AMF 170 send ue 177 nsmf creat sm context request to SMF at 9.162777s

```

图 7 初始注册请求与初始会话申请仿真信令输出结果

```

Namf:AMF 170 send nausf ue 177 authentication request to ausf at 9.158461s
Nausf:AUSF 171 send ue 177 authentication response to amf at 9.160616s
AKA:Node 177 createUeAuthenticationResponse at 9.160616s
-AuthResponse-supi : 177
AKA:Node 177 createUeAuthenticationResponse at 9.160616s
AMF 170 select SMF 173 for UE 177 at 9.162777s
Namf:AMF 170 send ue 177 nsmf creat sm context request to SMF at 9.162777s ← 会话请求
-CreateSmContextRequest-mobileIdentity : 177
-CreateSmContextRequest-locInfo.nrCgi : 10
-CreateSmContextRequest-amfRnti : 170
SMF 173 select UPF 174 for UE 177 at 9.164957s
N4:SMF 173 send ue 177 pfcsp session establishment request to upf at 9.164957s
-PfcspSessionEstablishRequest-locInfo.nrCgi : 10
-PfcspSessionEstablishRequest-mobileIdentity : 177
-PfcspSessionEstablishRequest-smfRnti : 173
N3:UPF 174 get gNodeB rnti at 9.166044s
N4:UPF 174 send ue 177 pfcsp session establishment response to SMF at 9.166044s
SMF 173 process ue 177 pfcsp session establishment response from Upf at 9.167119s ← 会话请求响应
Nsmf:SMF 173 send ue 177 Nsmf create sm context response to amf at 9.167119s ← 会话请求响应
-CreateSmContextResponse-ueRnti : 177
-CreateSmContextResponse-upfRnti : 174
N2:Node 170 send initial ue 177 context set up request message to Sat-NodeB 10 at 9.169286s
-InitialContextSetupRequest-ueRnti : 177
-InitialContextSetupRequest-upfRnti : 174
N2:Node 10 send initial ue 177 context set up response message to amf at 9.240000s
N2:Node 10 forward ue 177 Nas Registration Complete to amf at 9.250000s
Uu:Node 10 received nrc notify registration complete at 9.250000s

```

图8 初始会话申请流程

```

current Sim Time[s] = 66.000000000 Real Time[s] = 72 Completed 333
Uu:UE 177 send measurement report to srcGnb 10 at 66.220013s ← 测量报告
Xn:srcGnb 10 send ue 177 handover request to tgtGnb 1 at 66.220013s ← 切换请求
Node 1 process handover request at 66.235002s
handoverrequestack-ueRnti:nodeid=177,interfaceid=0
handoverrequestack-srcGnbRnti:nodeid=10,interfaceid=4
handoverrequestack-tgtGnbRnti:nodeid=1,interfaceid=3
handoverrequestack- hoType is HANDOVER_TYPE_Xn
Xn:tgtGnb 1 send HandoverRequestAck message to srcGnb 10 at 66.235002s
Node 10 process handover req ack at 66.250524s
Uu:gNodeB 10 send reconfiguration to handovering UE 177 at 66.250524s
Xn:srcGnb 10 send SnStatusTransfer message to tgtGnb 1 at 66.250524s ← 数据路径转移请求
hand over finish time = 30.51 ms
Node 1 process sn status transfer at 66.265535s
Node 177 start random access at 66.270078s
Uu:Node 177 transmit random access preamble at 66.270078s
Node 177 phy start transmitting signal in establishment at 66.271000s ← 随机接入
Uu:Sat-NodeB 1 send Random access grant to UE 177 at 66.271882s
Uu:Node 177 mac notify received random access grant at 66.280082s
Uu:UE 177 send random access complete to Sat-NodeB 1 at 66.280082s
Sat-NodeB 1 select AMF 170 for UE 177 at 66.390000s
N2:tgtGnb 1 send ue 177 path switch request message to amf at 66.390000s
Namf:AMF 170 send nsmf ue 177 update sm context request to smf at 66.462319s
SMF 173 process ue 177 Nsmf update sm context request at 66.464506s
N4:SMF 173 send ue 177 pfcsp session modification request to upf at 66.464506s
N3:UPF 174 get gNodeB rnti at 66.465596s
N4:UPF 174 send ue 177 pfcsp session modification response to SMF at 66.465596s
N3:UPF 174 send end marker to srcGnb 10 at 66.465596s
Nsmf:SMF 173 send ue 177 Nsmf update sm context response to amf at 66.466687s
N2:Node 170 send ue 177 path switch request ack to Sat-NodeB 1 at 66.468874s
Xn:srcGnb 10 send end marker message to tgtGnb 1 at 66.520405s
Xn:tgtGnb 1 send UE context release message to srcGnb 10 at 66.538935s ← 会话释放
Node 10 process ue context release at 66.553916s

```

图9 切换信令输出流程

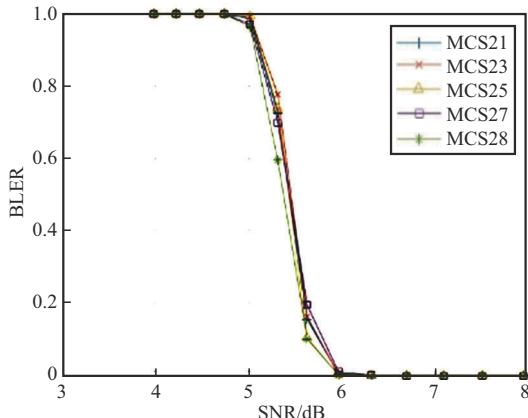
2.3 仿真平台性能验证

2.3.1 平台链路自适应性能测试

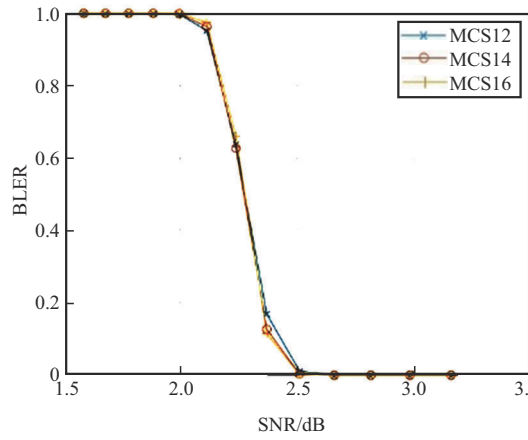
链路自适应技术指系统可以根据当前的信道条件，自适应地调整系统的调制与编码方案 (Modulation and Coding Scheme, MCS) 参数，以克服信道实时性变化带来的影响。MCS 定义了一个符号内的可以携带的有用比特数，MCS 依赖无线链路中的信号质量，如果信号质量好，则一个符号中可以用于传输的比特数就越多；如果信号质量差，则 MCS 参数越低，那么一个符号中能用于传输数据的比特数就越少，增加的冗余比特数就越多，有效数据越少，链路资源的利用率就越低，但是纠错能

力越强，抗干扰能力越强，对信号质量的要求越低。MCS 的值取决于 SNR 值，SNR 值越高，意味着信号质量越好，可以选择更高阶的调制方式，链路自适应算法通常会将块误码率 (Block Error Rate, BLER) 的阈值定义为 10%，为了在不同的 SNR 环境下保持 BLER 不超过该值，基站会根据链路自适应算法分配一个 MCS^[11]。不同编码方式的 MCS 性能不同。本仿真平台针对系统级仿真进行设计，系统编码方式使用 Turbo 码，Turbo 码在任意信道条件下都有很强的适应性和鲁棒性，在信噪比低的信道中性能好是它的优势之一，它还拥有十分强的抗干扰性能。Turbo 码可以作为卫星通信中的编码方案之一，具有很好的优势^[12]。

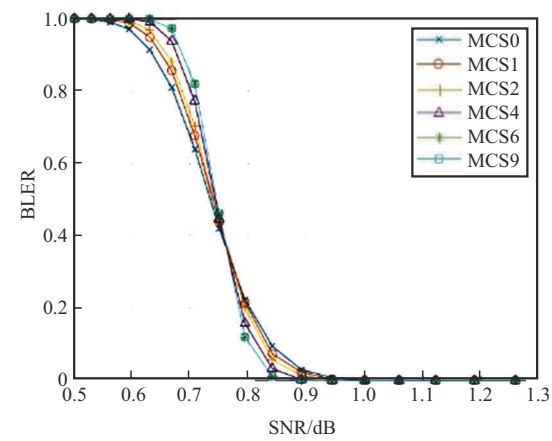
本平台采用BLER参考曲线来模拟链路级过程，例如Turbo码的编码/解码、穿孔、速率匹配、调制/解调、OFDM/SC-FDMA、SC-FDMA信号生成和软组合缓冲区，这些曲线是从预先的链路级仿真中得出的，并与系统映射模型相联系^[13]。本平台使用的BLER-SNR曲线如图10、图11所示。



(a) 上行64QAM BLER-SNR曲线

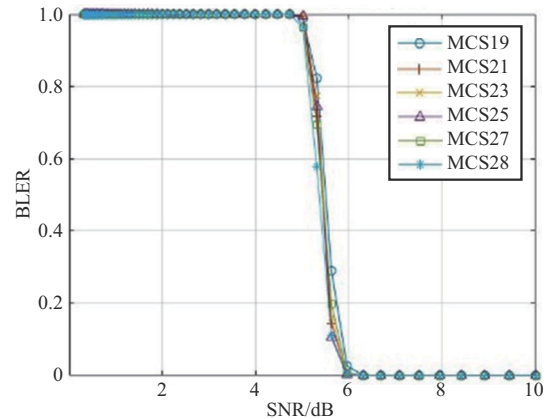


(b) 上行16QAM BLER-SNR曲线

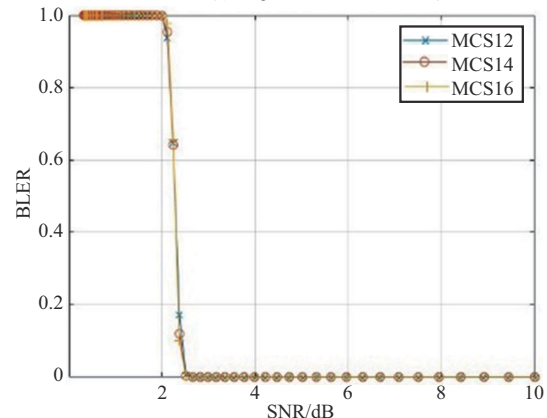


(c) 上行QPSK BLER-SNR曲线

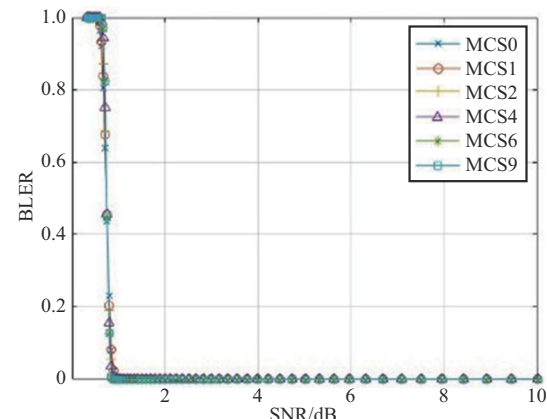
图 10 上行BLER-SNR曲线



(a) 下行64QAM BLER-SNR曲线



(b) 下行16QAM BLER-SNR曲线

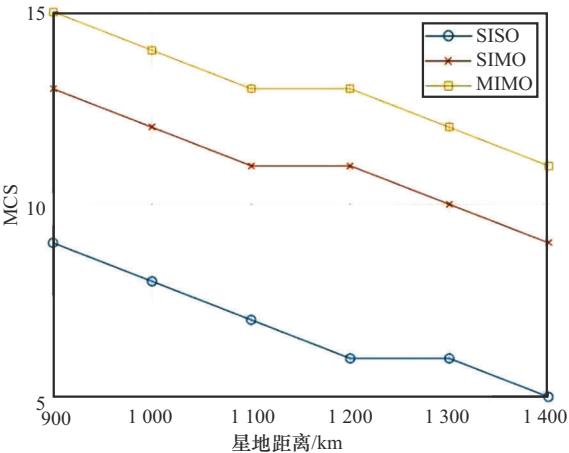
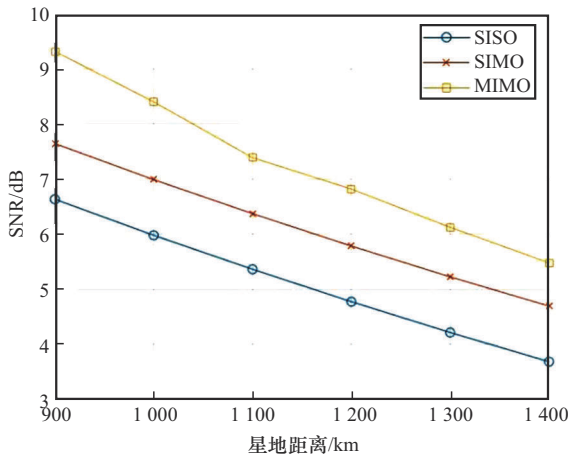


(c) 下行QPSK BLER-SNR曲线

图 11 下行BLER-SNR曲线

BLER-SNR曲线给出了在不同SNR环境下，不同MCS的BLER性能情况。在上行链路中，随着信噪比的增大，可用MCS等级也在不断增大。当信噪比大于5.6时64QAM调制方式可用，信噪比大于2.3时16QAM可用，信噪比大于0.8则只可使用QPSK。而在下行链路中，信噪比大于0.9，且当信噪比提高到一定程度后，BLER均迅速下降，表明此时通信链路的可靠性显著提高。

为了对本仿真平台的链路自适应算法进行测试，在仿真场景中，设置不同的星地距离值，并在终端与卫星之间配置不同的天线收发模式，对不同星地距离下不同收发模式的 SNR 与 MCS 进行了测试，测试结果如图 12 所示，其中单输入单输出 (Single Input Single Output, SISO) 模式终端与卫星收发天线数都设置为 1；单输入多输出 (Single Input Multiple Output, SIMO) 模式终端与卫星的接收天线数量为 2，发送天线数量为 1；多输入多输出 (Multiple Input Multiple Output, MIMO) 模式下天线配置采用 2 发 2 收。



(b) MCS随星地距离变化的仿真结果

图 12 平台链路自适应性能仿真

图 12 的仿真结果表明随着星地距离的增加，路径损耗不断增大，SNR 逐渐变小，而发射分集由于收发天线数量多，有效地提高了信噪比，SNR 性能最好。随着 SNR 的逐渐变小，MCS 的选择值也在不断调整，以适应 SNR 的变化。该结果表明，该平台能在通信链路环境变化时，自适应地调整 MCS，以满足 BLER 要求。

且在信噪比性能方面，MIMO 最优，其次是 SIMO 和 SISO，这说明 MIMO 通过两天线端口的发射分集思想，可以有效提高信噪比，用于抗衰落，提高链路可靠性和可用性。

2.3.2 平台时延测试

为了对平台的接入时延仿真进行测试，分别采用星地距离为 900 km、1 150 km、1 300 km 的星座进行测试，不同的星座由于星地距离以及星间链路距离的不同，时延表现不同。为了对平台的接入时延进行测试，在仿真场景中设置不同的星座，仿真开始后，终端开始接入卫星，接入信令由终端发往卫星然后通过星间链路到达地面网络，然后统计不同星间路由跳数情况下的时延情况。接入时延考虑终端从随机接入完成后，到成功完成地面 5G 核心网注册，并开始传输业务数据包的这段时间内，接入信令经过卫星传递至地面核心网，经过处理后返回卫星，并通知终端接入成功。仿真结果如图 13 所示，结果表明，随着随机路由跳数的增加，时延累积现象明显，不同星座高度的接入时延都相应增加，从 1 跳路由到 7 跳路由时延均增加 100 ms 左右，即当信号需要经过更多卫星转发时，每一跳都会增加传输的总时延，增加的时延包括信号的传播时延，以及中继卫星的路由转发时延^[11]。

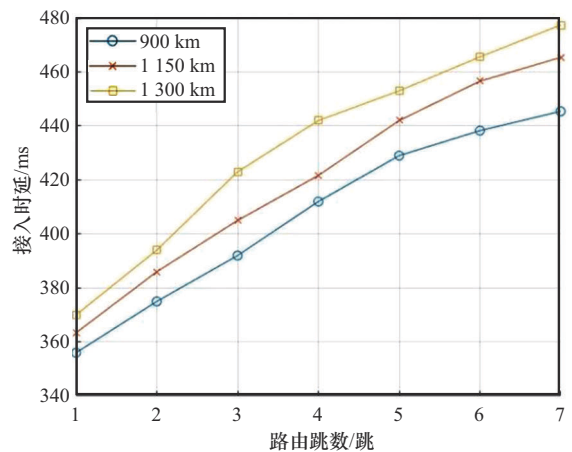


图 13 接入时延与路由跳数的关系

终端在切换时，若源卫星与目标卫星之间无直接的星间链路，则需要通过星间链路来传递切换信令，为了对平台的切换时延进行仿真测试，分别让终端在具有不同星间路由跳数的卫星之间进行切换。统计切换时延的情况，这里的切换时延为源卫星发送切换请求到源卫星收到切换请求确认的时延，该时延包含切换

信令从源卫星到目标卫星，经过目标卫星处理后再到达源卫星的时间，仿真场景采用星地距离为 1 150 km 的卫星星座。切换信令时延开销与星间路由跳数的关系如图 14 所示，表明随着星间路由跳数的增加，切换信令时延也随之增长。当跳数为 1 跳时，时延大约为 30 ms，而在跳数增至 6 跳时，时延上升至约 180 ms。在没有直接星间链路的情况下，切换信令需要通过更多的卫星进行传递，每增加一跳，都会增加总体的传输时间，对切换造成影响。

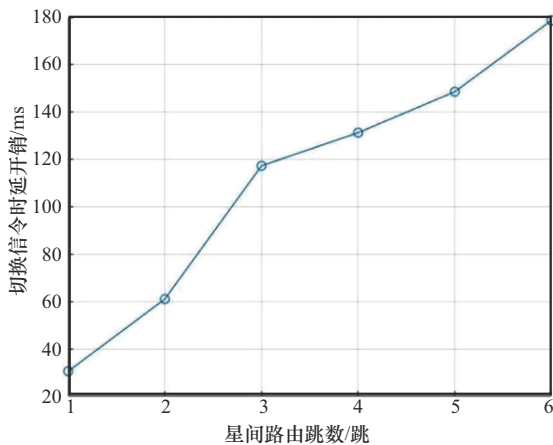


图 14 切换信令时延开销与星间路由跳数的关系

2.3.3 平台吞吐量性能测试

为了测试该 5G 融合低轨卫星仿真平台中发包大小对星地链路吞吐量的影响，本文在单对收发卫星的场景下，设置了多种数据包发包速率以及多种星地链路带宽来进行仿真测试。在仿真场景中设置一个终端一个卫星节点，星地距离为 1 150 km，配置终端用户到地面网络的 CBR 业务，CBR 业务单个数据包大小设置为 40~1 500 B 每包，发包间隔设置为 1 ms，对应的业务速率为 40~1 500 kbit/s，星地链路带宽分别设置为 10 MHz、15 MHz、20 MHz。仿真结果如图 15 所示，表明随着业务速率的不断增大，网络吞吐量不断增大，带宽设置为 10 MHz 时，最大吞吐量为 1 200 kbit/s 左右；带宽设置为 15 MHz 时，最大吞吐量为 1 900 kbit/s 左右；带宽设置为 20 MHz 时，最大吞吐量为 2 300 kbit/s 左右。在带宽设置为 20 MHz 时，随着业务速率的增大，吞吐量达到 2 300 kbit/s 后逐渐趋于稳定，而 20 MHz 带宽下的实际吞吐量应该为 2 500 kbit/s，该结果表明当前情况下已到达平台的性能极限，当业务量较少时卫星节点可以及时处理收到的业务数据，然而随着业务量的增大，卫星节点

的处理能力有限，部分数据无法得到及时处理。同时当业务速率相同时，带宽越大，吞吐量越大，说明星地链路带宽对吞吐量有较大的影响。

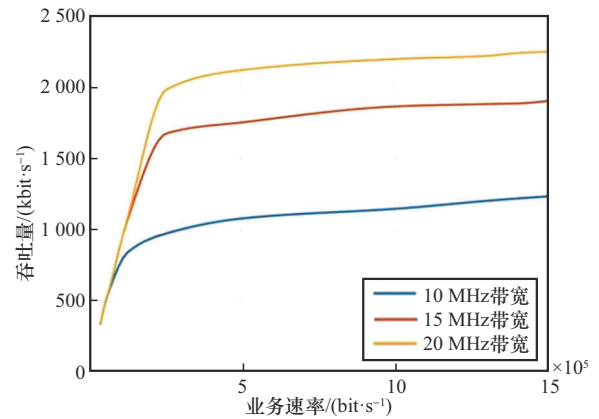


图 15 业务速率与系统吞吐量的关系

2.3.4 切换性能测试

本平台采用基于信号强度触发的 A3 事件切换，通过设置不同的 A3 偏置值，可以调整切换触发灵敏度，即只有当信号强度的差值大于 A3 偏置值时才会触发切换，如图 16 所示，在 t_0 时刻卫星 A 与卫星 B 信号强度相同，当信号强度差值大于 A3 偏置值时，即 t_1 时刻才会触发切换。

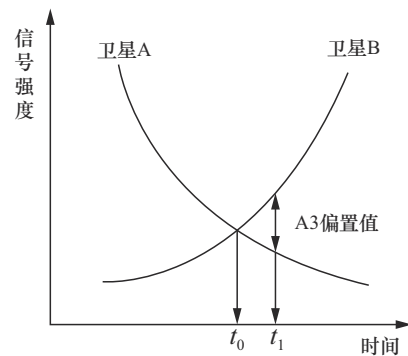


图 16 切换触发条件

在仿真场景中配置 100 个终端节点，不同 A3 偏置值下的总切换次数仿真结果如图 17 所示。从仿真结果来看，相同 A3 偏置值设置下，随着仿真的进行，总切换次数不断增加，不同的 A3 偏置值配置下，随着 A3 偏置值增大，总切换次数逐渐变小，A3 偏置值的引入降低了切换触发的灵敏度，减少了切换的次数，该仿真结果与实际 A3 偏置值对切换次数的影响相符合。

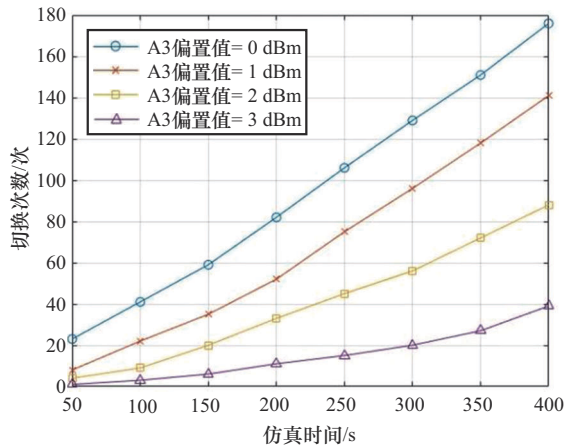


图 17 不同条件下切换总次数仿真结果

3 结束语

本文基于 EXata 设计并实现了一个针对 5G 融合低轨卫星网络的系统级仿真平台,该平台能够全面模拟接入网和核心网功能,支持接入、切换信令流程的详尽仿真,以及低轨卫星的实时工作状态模拟。通过系统级的仿真验证,本文展示了该平台在模拟 5G 融合低轨卫星通信系统端到端通信流程以及在评估关键网络性能指标方面的有效性,例如接入时延、吞吐量和移动性管理等。仿真结果证明,该平台能够准确模拟 5G 融合低轨卫星网络端到端各通信流程,为 5G 融合低轨卫星通信协议的研究和未来商业化部署提供了有力支持。

参考文献:

- [1] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR38.821 v16.2.0.[S]. 2023.
- [2] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [3] PUTTONEN J, SORMUNEN L, MARTIKAINEN H, et al. A system simulator for 5G non-terrestrial network evaluations[C]//Proceedings of the 2021 IEEE 22nd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoW-MoM). Piscataway: IEEE Press, 2021: 292-297.
- [4] KUMAR S, SHEEMAR C K, QUEROL J, et al. 5G NTN LEO based demonstrator using OpenAirInterface5G[C]//Proceedings of the 40th International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC 2023). London: IET, 2023: 69-75.
- [5] 高林涛. 低轨通信星座弹性路由设计与效能评估技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [6] 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.
- [7] 曹晖, 陈前斌, 梁承超, 等. 低轨卫星移动性管理仿真平台研究及实现[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 912-920.
- [8] CAO H, CHEN Q B, LIANG C C, et al. Research and implementation of simulation platform for LEO satellite mobility management [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2021, 33(6): 912-920.
- [9] LI K X, GUO B L, HUANG S G, et al. A simulation platform for software defined integrated space ground network[C]//Proceedings of the 2019 IEEE 11th International Conference on Advanced Information Technology (ICAIT). Piscataway: IEEE Press, 2019: 118-123.
- [10] MA J, ZHENG P J, LIU X, et al. Integrated positioning and communication via LEO satellites: opportunities and challenges[EB]. 2024.
- [11] 杨勋. 基于 EXata 的离散事件半实物仿真方法研究[J]. 长江信息通信, 2022, 35(9): 157-159.
- [12] YANG X. Research on hardware in the loop simulation method of discrete events based on exata[J]. Changjiang Information & Communications, 2022, 35(9): 157-159.
- [13] 3GPP. NR and NG-RAN Overall description; Stage-2: TR38.300 v17.5.0. [S]. 2023.
- [14] 3GPP. System architecture for the 5G System(5GS): TS23.501 v18.1.0.[S]. 2023.
- [15] 吴奉微, 刘川, 尚丹, 等. 基于 SNS3 的低轨卫星通信系统网络仿真[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(4): 75-84.
- [16] WU F W, LIU C, SHANG D, et al. Network simulation of low earth orbit satellite communication system based on SNS3[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(4): 75-84.
- [17] 王腾达. 基于 EXATA 和 STK 的空间通信网络仿真平台设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- [18] WANG T D. Design and implementation of space communication network simulation platform based on EXATA and STK[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [19] 胡晓月, 康凯, 钱骅, 等. 基于 LSTM 的 LEO 卫星链路自适应算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(1): 237-243.
- [20] HU X Y, KANG K, QIAN H, et al. Link adaptation algorithm based on LSTM network for LEO satellite[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(1): 237-243.
- [21] 朱进蓉. 用于卫星通信的 Turbo 译码器设计[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- [22] ZHU J R. Design of turbo decoder for satellite communication[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [23] 陈发堂, 谢璘珂. LTE 系统中 Turbo 编译码仿真与性能分析[J]. 电视技术, 2011, 35(7): 81-84.

CHEN F T, XIE L K. Simulation and performance analysis of LTE turbo coding and decoding[J]. Video Engineering, 2011, 35(7): 81-84.

[作者简介]



何磊（1999-），男，硕士生，主要研究方向为无线网络传输技术、卫星通信仿真技术。

刘占军（1975-），男，博士，教授，主要研究方向为无线网络、下一代移动通信。

梁承超（1988-），男，教授，博士生导师，主要研究方向为移动通信、卫星互联网等。

官思佳（1989-），男，工程师，主要研究方向为轨道设计与任务规划、频率兼容性技术、卫星通信系统等。

陈前斌（1967-），男，教授，博士生导师，主要研究方向为个人通信、多媒体信息处理与传输、下一代移动通信网络、空地一体化网络等。