

分类号	TN927	密级	公开
UDC	621.39	学位论文编号	D-10617-308-(2021)-01013

重庆邮电大学硕士学位论文

中文题目	低轨卫星通信移动性管理研究及仿真平台设计
------	----------------------

英文题目	Research on Mobility Management and
	Design of Simulation Platform for
	LEO Satellite Communication

学 号	S180101013
-----	-------------------

姓 名	曹 晖
-----	------------

学位类别	工学硕士
------	-------------

学科专业	信息与通信工程
------	----------------

指导教师	陈前斌 教授
------	---------------

完成日期	2021 年 5 月 20 日
------	------------------------

摘要

低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星通信系统因其卫星体积小、造价低、可批量生产、传输延迟小等特点,受到了越来越多的关注。目前,LEO 卫星通信系统的移动性管理技术大多停留在理论阶段,无法满足实际运行需求,且缺乏具有完整体系的仿真平台。因此,本文针对 LEO 卫星通信的移动性管理和仿真平台设计等问题,进行了深入研究和实现。主要研究工作如下:

针对当前缺乏 LEO 卫星移动性管理仿真平台的问题,设计并实现了一个基于 OPNET 的 LEO 卫星通信仿真平台。首先,通过分析仿真平台的功能需求,提出了仿真平台的整体架构,包括功能实体模块、卫星属性模块、网络管理模块、卫星运行模块和分析模块。然后,设计了用户终端(User Equipment, UE)、低轨卫星、移动交换中心(Mobile Switch Center, MSC)和网络控制中心(Network Control Center, NCC)的节点功能,对分别其节点模型和相应的进程模型进行了建模。接着,研究了卫星的多波束天线模型并进行了建模实现,通过部署移动地面节点接收卫星信号的方式进行仿真,结果验证了卫星多波束天线的覆盖范围和增益大小能够满足设计需求。最后,搭建系统场景,对仿真平台的各项功能进行了测试。结果表明,该卫星仿真平台能对 LEO 通信移动管理系统的移动性管理过程进行仿真,并能输出切换成功率、切换次数、吞吐量等各项指标。

针对 LEO 卫星通信系统的切换管理问题,提出了两种卫星切换方案。首先,分析了 LEO 卫星通信系统的切换阶段,包括切换测量、切换决策、切换准备和切换执行。然后,提出并设计了一种基于信号强度测量的硬切换方案,包括单卫星内跨波束的用户切换、跨卫星间的用户切换以及切换失败的用户重置三个部分。接着,分析了 LEO 卫星特有的反向缝问题,针对卫星反向缝间存在的切换时间长、成功率低等问题,提出了一种通过 UE 节点代替部分 NCC 节点功能,减少星间链路跳数的卫星反向缝间切换方案。最后,通过搭建的 LEO 卫星通信仿真平台,对两种切换方案进行仿真和对比。仿真结果表明,反向缝间切换方案的切换时延更低,切换成功率更高。

关键词: 低轨卫星, 移动性管理, 仿真平台, 反向缝

Abstract

The low Earth orbit (LEO) satellite communication system has attracted more and more attention because of its small size, low cost, mass production, and low transmission delay. At present, the mobility management technologies of LEO satellite communication systems mostly stay in the theoretical stage, which cannot meet the actual operational requirements, and it also lacks a simulation platform with complete system. Therefore, in this thesis, the author conducted in-depth researchs and implements of the mobility management and simulation platform in LEO satellite communication. The main research work is as follows:

Aiming at the current lack of LEO satellite mobility management simulation platform, a LEO satellite communication simulation platform is designed and implemented based on OPNET. First, by analyzing the functional requirements of the simulation platform, this thesis proposes the overall architecture of the simulation platform, including functional entity modules, satellite attribute modules, network management modules, satellite operation modules and analysis modules. Then, the node functions of User Equipment (UE), LEO satellites, Mobile Switch Center (MSC), and Network Control Center (NCC), with modeling the node model and process model are designed. Then, the author researches the multi-beam antenna model of the satellite and implements the model, and simulates the antennal model by deploying mobile ground nodes to receive satellite signals. The results verify that the coverage and gain of the satellite multi-beam antenna can meet the design requirements. Finally, a system scenario is built to test various functions of the simulation platform. The results show that the satellite simulation platform can simulate the mobility management process of the LEO communication mobility management system, and can output various indicators such as handover success rate, handover times, throughput and so on.

Aiming at the handover management of the LEO satellite communication system, two satellite handover schemes are proposed in this thesis. First, this thesis analysis the handover phase of LEO satellite communication system, including handover measurement, handover decision, handover preparation and handover execution. Then, a hard handover scheme based on signal strength measurement is proposed and designed, including three parts: cross-beam user handover in a single satellite, cross-satellite user handover, and user

reset when handover fails. Then, this thesis analyzes the unique reverse seams problem of LEO satellites. Aiming at the long handover time and low success rate between satellite reverse seams, a handover scheme between satellite reverse seams is proposed by replace part of the NCC's function in UE node to reduce inter-satellite links. Finally, this thesis simulates and compares the two handover schemes through the built LEO satellite communication simulation platform. The simulation results show that the reverse seams handover scheme has lower handover time and higher success rate.

Keywords: LEO satellite, mobility management, simulation platform, reverse seams

目 录

图录.....	IX
表录.....	XIII
注释表.....	XV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 移动性管理和卫星仿真平台的研究现状.....	3
1.2.1 移动性管理的研究现状.....	3
1.2.2 仿真平台的研究现状	4
1.3 当前存在的主要问题和论文研究思路.....	6
1.3.1 当前存在的主要问题	6
1.3.2 论文研究思路.....	7
1.4 论文结构	7
第 2 章 切换管理及 OPNET 建模基础.....	9
2.1 切换管理基础.....	9
2.1.1 4G/5G 网络的切换流程	9
2.1.2 低轨卫星系统的切换分类	11
2.1.3 低轨卫星系统的切换目标选择	12
2.2 OPNET 建模基础.....	13
2.2.1 OPNET 简介.....	13
2.2.2 OPNET 仿真建模过程	15
2.3 本章小结.....	16
第 3 章 基于 OPNET 的低轨卫星仿真平台设计.....	17
3.1 仿真平台需求分析.....	17
3.2 仿真平台的总体框架设计	18
3.2.1 仿真平台整体架构	18
3.2.2 仿真平台网络拓扑.....	20

3.2.3 仿真平台节点功能	21
3.3 仿真平台节点模型与进程模型设计	24
3.3.1 用户终端节点模型	25
3.3.2 低轨卫星节点模型	29
3.3.3 移动交换中心节点模型	39
3.3.4 网络控制中心节点模型	45
3.4 仿真平台卫星多波束天线模型设计	46
3.4.1 卫星多波束天线几何模型	46
3.4.2 基于 OPNET 的卫星多波束天线建模	47
3.4.3 卫星多波束天线模型仿真分析	50
3.5 本章小结	51
第 4 章 低轨卫星移动性管理切换方案研究	52
4.1 低轨卫星通信系统的切换阶段	52
4.2 基于信号强度测量的硬切换方案	54
4.2.1 单卫星内跨波束间的用户切换方案	54
4.2.2 跨卫星间的用户切换方案	59
4.2.3 切换失败的用户重置方案	61
4.3 卫星反向缝间的用户切换方案	65
4.3.1 卫星反向缝简介	65
4.3.2 卫星反向缝对用户切换的影响	66
4.3.3 卫星反向缝间用户切换方案	69
4.4 本章小结	71
第 5 章 基于 OPNET 低轨卫星仿真平台的测试及分析	72
5.1 仿真平台的基本配置	72
5.2 仿真平台功能测试	73
5.2.1 参数配置及仿真流程	73
5.2.2 局部统计量仿真	75
5.2.3 全局统计量仿真	77
5.3 切换管理仿真及结果分析	78

5.3.1 不同参数对切换的影响	78
5.3.2 卫星反向缝间不同切换策略对切换结果的影响.....	81
5.4 本章小结.....	83
第 6 章 总结与展望.....	84
6.1 论文工作总结	84
6.2 未来工作展望.....	85
参考文献.....	86
致 谢.....	90
攻读硕士学位期间从事的科研工作及取得的成果.....	91

图 录

图 1.1 论文结构安排	7
图 2.1 4G 网络基本架构	9
图 2.2 用户切换类型	12
图 2.3 OPNET 管道阶段模型	15
图 2.4 OPNET 仿真建模流程图	16
图 3.1 仿真平台总体架构	19
图 3.2 仿真平台网络拓扑	20
图 3.3 “铱星”星座系统	20
图 3.4 用户终端节点功能模型	21
图 3.5 低轨卫星节点功能模型	22
图 3.6 移动交换中心节点功能模型	23
图 3.7 网络控制中心节点功能模型	24
图 3.8 用户终端节点模型	25
图 3.9 用户接收机参数	25
图 3.10 用户发送机参数	26
图 3.11 用户终端节点处理器进程模型	26
图 3.12 用户天线参数	29
图 3.13 低轨卫星节点模型	30
图 3.14 卫星—用户发送机参数	30
图 3.15 卫星—用户接收机参数	31
图 3.16 低轨卫星节点波束进程模型	31
图 3.17 低轨卫星节点处理器进程模型	34
图 3.18 低轨卫星节点星间链路进程模型	36
图 3.19 低轨卫星节点馈电链路进程模型	38
图 3.20 馈电链路接收机参数	39
图 3.21 馈电链路发送机参数	39

图 3.22 星间链路接收机参数.....	39
图 3.23 星间链路发送机参数.....	39
图 3.24 移动交换中心节点模型.....	40
图 3.25 MSC—卫星接收机参数	40
图 3.26 MSC—卫星发送机参数	41
图 3.27 移动交换中心节点 MSC—卫星进程模型.....	41
图 3.28 移动交换中心节点 MSC 处理器进程模型.....	43
图 3.29 网络控制中心节点模型.....	45
图 3.30 网络控制中心节点进程模型.....	45
图 3.31 卫星多波束天线覆盖示意图.....	47
图 3.32 天线模型坐标.....	47
图 3.33 EMA 天线建模流程图.....	49
图 3.34 OPNET 天线模型.....	49
图 3.35 OPNET 天线模型仿真场景.....	50
图 3.36 卫星波束覆盖图.....	50
图 3.37 接收信号增益图.....	51
图 4.1 切换阶段定义	52
图 4.2 切换触发条件	53
图 4.3 单卫星内跨波束切换流程图.....	54
图 4.4 跨卫星间切换流程图.....	59
图 4.5 切换失败时用户重置流程图.....	62
图 4.6 卫星反向缝示意图.....	65
图 4.7 “铱星”星间路由架构	66
图 4.8 反向缝间切换流程图.....	69
图 5.1 仿真平台界面	72
图 5.2 切换仿真流程图.....	74
图 5.3 用户接收信号强度.....	75
图 5.4 用户驻留卫星	75
图 5.5 用户驻留波束	76

图 5.6 用户 CQI 强度 76

图 5.7 用户业务中断时间 77

图 5.8 网络接收数据包数 77

图 5.9 网络数据比特吞吐量 78

图 5.10 不同 TTT 取值对切换成功率的影响 79

图 5.11 不同 TTT 取值对平均切换次数的影响..... 79

图 5.12 不同 TTT 取值对平均乒乓切换次数的影响..... 80

图 5.13 不同 A3 偏置取值对切换成功率的影响 80

图 5.14 不同 A3 偏置取值对平均切换次数的影响 81

图 5.15 不同 A3 偏置取值对平均乒乓切换次数的影响 81

图 5.16 不同轨道间切换时延对比 82

图 5.17 不同轨道间平均切换成功率对比..... 82

表 录

表 3.1 用户节点处理器进程模型的转移条件.....	27
表 3.2 测量信号强度比较算法	28
表 3.3 低轨卫星节点波束进程模型的转移条件.....	31
表 3.4 卫星导频产生及发送算法	32
表 3.5 低轨卫星节点处理器进程模型的转移条件.....	35
表 3.6 低轨卫星节点星间链路进程模型的转移条件.....	36
表 3.7 最近卫星选择算法	36
表 3.8 低轨卫星节点星间链路进程模型的转移条件.....	38
表 3.9 移动交换中心节点 MSC—卫星进程模型的转移条件.....	41
表 3.10 移动交换中心节点 MSC 处理器进程模型的转移条件.....	43
表 3.11 网络控制中心节点进程模型的转移条件.....	46
表 3.12 波束位置判断及增益设置算法.....	48
表 4.1 测量控制报告消息格式	55
表 4.2 测量报告消息格式	55
表 4.3 切换需求报告消息格式	56
表 4.4 频率询问报告消息格式	56
表 4.5 频率询问回复报告消息格式	56
表 4.6 切换命令报告消息格式	57
表 4.7 CQI 报告消息格式	57
表 4.8 CQI 回复报告消息格式	57
表 4.9 切换确认报告消息格式	58
表 4.10 切换通知报告消息格式	58
表 4.11 资源释放报告消息格式.....	58
表 4.12 切换请求报告消息格式	60
表 4.13 切换请求回复报告消息格式	60
表 4.14 连接命令报告消息格式	63

表 4.15 连接接入报告消息格式.....	63
表 4.16 连接频率报告消息格式.....	63
表 4.17 连接认证报告消息格式.....	64
表 4.18 用户登记报告消息格式.....	64
表 4.19 用户删除报告消息格式.....	64
表 4.20 路由寻址算法.....	67
表 4.21 用户切换需求报告消息格式.....	69
表 4.22 用户切换回复报告消息格式.....	70
表 5.1 仿真参数配置	73

注释表

3GPP	3rd Generation Partnership Project, 第三代合作伙伴计划
4G	4th Generation Mobile Networks, 第四代移动网络
5G	5th Generation Mobile Networks, 第五代移动网络
CQI	Channel Quality Indicator, 信道质量指示
DCI	Downlink Control Information, 下行控制信息
EMA	External Model Access, 外部模块访问
GW	Gateway, 网关
GEO	Geosynchronous Earth orbit, 静止轨道卫星
HM	Handover Management, 切换管理
ICI	Interface Control Information, 接口控制信息
LEO	Low Earth Orbit, 低轨道卫星
LTE	Long Term Evolution, 长期演进
MM	Mobility Management, 移动性管理
MME	Mobile Management Entity, 移动性管理实体
MN	Main Node, 主基站
MSC	Mobile Switch Center, 移动交换中心
NCC	Network Control Center, 网络控制中心
NCMP	Network Coding-based Multi-Path, 网络编码的多径路由
PDCCH	Physical Downlink Control Channel, 物理下行控制信道
PM	Position Management, 位置管理
PRACH	Physical Random Access Channel, 物理随机接入信道
QoS	Quality of Service, 服务质量
RRC	Radio Resource Control, 无线资源控制
RSRP	Reference Signal Receiving Power, 参考信号接收功率
SN	Secondary Node, 辅基站
TDMA	Time Division Multiple Access, 时分多址
TTT	Time To Trig, 触发时长
UE	User Equipment, 用户终端

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

随着 5G 时代的来临,人们对于通信的需求越来越大,低时延、海量连接以及高可靠通信成为了这个时代的主题。5G 技术在高带宽、高速率方面拥有无可比拟的优势,但由于过高的传输频率,导致单个运行基站的覆盖范围只有几百米,要实现大面积的覆盖需要付出很大的代价。人们希望在地球的任何一个角落都能够拥有高速通信的能力,传统的传输媒介因其地域的局限性,已经很难适应人们不断增长的需求。越来越多的人将目光转移到不受地域限制的卫星通信。

传统的静止轨道移动通信卫星(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)位于地球上空 35786 千米高空,单颗卫星能覆盖 42.4% 的地球表面,仅用 3 颗 GEO 卫星就可以对两极纬度 76° 以下的地区进行全面覆盖^[1],为人类的跨区域通信提供了巨大的帮助。但 GEO 卫星因其固有特性,也存在一些很难克服的缺点,例如:运行轨道高、传播路径长,导致数据传输增加,不适宜进行突发通信和高速通信;静止轨道资源紧张;单星制造和发射成本高,后期维护复杂;在两极地区存在盲点,无法实现真正的全球覆盖。而低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)因其相对于同步轨道卫星拥有更低的时延和大范围的覆盖范围而愈发受到人们的青睐,成为世界各国争相发展的重点。

目前,包括三星、SpaceX、OneWeb 和 Leosat 等国际巨头企业在内,都在布局自身的 LEO 通信系统,意图抢占未来的通信网络高地^[2]。OneWeb 计划构造由数百颗运行在 1200km 高度的 LEO 卫星组成 OneWeb 星座,通过与地面网络融合,提供无线网络覆盖,同时允许多种设备进行接入^[3]。SpaceX 致力于打造“星链(Starlink)”计划,目标是在 2019~2024 年间发射 1.2 万颗 LEO 卫星,为全球用户提供无线互联网服务^[4]。

与 GEO 卫星通信系统采用的大卫星不同,LEO 卫星通信系统一般使用运行在 500km~1500km 高度的小卫星。与 GEO 卫星通信系统相比,LEO 通信系统的优势是卫星体积小、重量轻、造价低、制造周期短、可批量生产;卫星之间互为备份、损失较小;地面终端设备简单,造价低廉,便于携带;由于轨道高度低,可以消除使用 GEO 工作时存在的传输延迟等问题;能覆盖两极地区,实现全球无缝隙个人移动通信^[5]。

然而, 由于 LEO 卫星通信系统的运行需要大量卫星作为支撑, 网络架构复杂, 且需要包括地面站和移动终端的高度配合, 因此对星座的设计和仿真提出了极高的要求。鉴于实际卫星的设计和制造成本, 如果将卫星发射到轨道再进行测试, 由于空间的复杂环境, 一旦卫星失控很难进行纠正, 会造成巨大的损失和浪费。通过在地面搭建整个卫星平台的方式进行卫星仿真, 同样开销巨大, 且因测试条件无法与空间保持一致, 效果有限。因此, 目前星座的设计、网络的构造大多通过建立仿真平台的方式进行^[6]。通常, 在卫星通信系统的设计中, 需要先制定卫星星座的拓扑架构, 满足卫星的覆盖率和可见性等指标, 然后设计各类节点模块, 配置网络功能, 对系统进行测试仿真。

在 LEO 卫星通信系统中, 移动性管理(Mobility Management, MM)是最主要也是最重要的难点。移动性管理分为切换管理(Handover Management, HM)和位置管理(Position Management, PM)两个部分^[7], 通过对移动终端的位置信息、安全性以及业务连续性等方面进行管理, 使得终端与网络的通信状态达到最佳, 从而保证各种网络服务顺利进行。高效的移动性管理技术对于在网络之间提供无缝连接和会话连续性至关重要^[8]。

与 GEO 卫星系统相比, LEO 卫星通信系统的特点是覆盖范围广、服务终端多、卫星相对地面终端运动速度快等, 必然导致卫星和终端之间的切换非常频繁, 也使得网络结构经常发生变化。此外, LEO 卫星由于自身功率和体积较小等因素限制, 无法进行大规模的运算。因此, 相对 GEO 卫星系统, LEO 卫星通信系统中的移动性管理更具困难性和挑战性^[9]。

在移动性管理技术中, 切换管理是一个关键点。切换是指在移动通信过程中, 在保证通信不间断的前提下, 通信信道从一个无线信道转换到另一个无线信道, 这是移动通信系统不可缺少的重要功能。本文主要研究移动性管理中的切换管理。

当前, 随着国际竞争的日益加剧, 各国都在努力抢占太空领域的制高点, 我国也需要投入科研力量, 去争取和维护自身的轨道和频谱权益^[10]。经过几十年的不断探索, 我国已在 GEO 卫星通信技术上取得了重大突破, 与欧美等发达国家的差距逐渐缩小。但由于各种因素的限制, 我国在 LEO 卫星通信技术上仍旧与发达国家存在巨大差距, 需要进行奋力追赶。因此, 从经济高效的角度出发, 搭建仿真平台对 LEO 卫星通信系统的移动性管理进行研究具有重要的现实意义和工程应用价值。

1.2 移动性管理和卫星仿真平台的研究现状

1.2.1 移动性管理的研究现状

在 4G 时代, 根据网络组成和区域覆盖的不同, 移动终端的移动被分为宏观移动和微观移动两大类。宏观移动(也叫作域间或系统间移动)是指用户在各个地理区域中的不同网络域之间移动, 也就是在不同的骨干网、网络协议或者服务供应商之间移动。微观移动(也叫作域内或者系统内移动)是指用户在同一网络域中的不同子网间移动, 其移动管理技术基于类似的网络协议和接口^[11]。

到了 5G 时代, 随着技术的不断发展, 5G 移动性管理的技术主要分为测量与报告技术、下行同步技术、随机接入技术和链路失败与重新接入技术^[12]。此外, 3GPP 在 Release 12^[13]中引入了双连接的概念, 即终端可在无线资源控制(Radio Resource Control, RRC)连接状态下, 同时利用主基站(Main Node, MN)与辅基站(Secondary Node, SN)的物理信道进行并行传输。双连接扩展了载波聚合的应用, 可以有效提升频谱效率并实现负载均衡^[14-16]。文献[17]针对 5G 双连接切换中辅基站不变的场景, 利用辅基站在切换过程中传输数据, 以降低传统切换方式中因完全断开双连接导致数据传输中断所引起的时延。

在 LEO 卫星通信系统的移动性管理中, 由于卫星具有移动速度快、用户驻留时间短等特点, 采用的技术与传统的 4G/5G 通信网络不同。从协议层的角度看, 链路层、网络层和传输层是 LEO 卫星通信网络的移动性管理的研究重点。在链路层中, 主要的目标是实现无缝覆盖以及用户高速在移动下的连续通信, 典型技术包括非优先切换^[18]、排队优先切换^[19]、预留信道^[20]等。网络层的特点是只与链路层相联系, 不关心底层接入技术和物理传输媒介。同时, 网络层对上层协议和应用呈透明状态, 典型技术包括 MIPv6 及其扩展协议、MCoA 等。传输层的特点是基于端到端链路, 移动性支持仅由端点负责, 不依赖网络设备, 典型技术包括 SIGMA、mSCTP、MSOCKS 等。

文献[21]从 LEO 卫星通信网络的结构和特点入手, 阐述了 LEO 卫星通信网络中移动性管理的分类, 分析了相比地面移动无线网络的特殊性。针对 LEO 相对地面传输时延较大, 吞吐量较小的问题, 文献[22]提出了一种基于位置信息的时隙分配协议。协议中卫星通过获取浮标位置信息来控制时隙分配的起点, 实现时隙离散分配,

增大可用传输时隙长度,同时降低传输时延。文献[23]提出了一种通过优化 LEO 卫星星座网络中内容放置的缓存算法将其简化为 2 个不相交集的覆盖问题,使用户终端的内容访问延迟最小。文献[24]提出了一种基于空基云的数据存储基础设施的分层体系结构,将数据存储在基于卫星的数据中心,减少了传输次数。文献[25]提出了一种基于网络编码的多径路由算法(Network Coding-based Multi-Path, NCMP),以提高两层卫星网络的吞吐量和延迟性能。

在切换管理方面,文献[26]使用无缝切换成功概率和错误切换启动概率来评估最优覆盖决策算法。文献[27]针对天地一体化网络中卫星接入点频繁切换问题,提出了 2 种无缝切换机制以确保用户通信的连续性。文献[28]在综合考虑卫星切换中消耗的网络资源,包括带宽资源和信令资源,提出动态概率路由优化方案。文献[29]在充分考虑地面用户随机分布特性的基础上,建立了卫星和波束对随机用户的覆盖时间统计模型,推导了星间切换及波束间切换平均次数下限值的计算方法。

1.2.2 卫星仿真平台的研究现状

目前,低轨卫星星座往往由成百上千颗卫星组成,能满足同时规划几十上百个卫星轨道的卫星设计软件在市面上并不多见。按照开发及维护的目的进行分类,这些软件可以分为商业软件和开源软件。目前,FreeFlyer、STK 和 SaVi 是公开资料较多、应用较为广泛的三款软件。

FreeFlyer 是一款进行商业航天器任务设计和分析的软件,由美国 A.i.solutions 公司进行开发和维护^[30]。该软件能够解决各类天体动力学问题,同时对多个航天器进行设计和仿真。FreeFlyer 在星座设计方面同样功能强大,能对卫星和星座的规划提供精确的轨道建模和可视化分析。

STK 是一款进行商用航天、卫星设计及仿真的工具软件,由美国 Analytical Graphics 公司研发^[31]。STK 软件拥有基于物理特性的几何仿真引擎,能够以真实时间或者仿真时间为单位,精确地对陆海空天中的各类目标进行实时显示和分析。在卫星设计方面,STK 能够进行卫星星座和轨道的可视化设计,是目前国内应用最为广泛的卫星仿真软件。

SaVi 是一款基于 Linux 的卫星仿真软件,最初由明尼苏达大学开发,因经费问题,如今由萨里大学负责进行维护^[32]。Savi 能够通过可视化的方式,对卫星的轨道、

运行和覆盖进行模拟观测,在教育领域和商用领域都有应用。但由于 SaVi 只能进行轨道建模,无法对星座进行设计和优化,且缺乏更新力度,因此多用于进行学术科研,开发和设计难度较高。

在星座设计仿真软件确定了卫星的拓扑和轨道之后,需要在网络仿真软件中模拟卫星的环境,实现相应的星间网络协议,以便对卫星网络进行评价和改进。网络仿真也称为网络模拟,是一种网络研究工具,既可以取代真实的应用环境得出可靠的运行结果和数据,也可以模仿一个系统过程中的某些行为和特征。网络仿真能方便快捷地建立网络模型,并且便于修改模型,可以对网络模型迭代改进^[33]。

主流的网络仿真软件都采用离散事件模拟技术,并提供丰富的网络仿真模型库和高级语言编程接口,可分为商用软件和免费公开软件 2 大类。软件公司开发的商用软件一般价格较昂贵,但能提供较为全面的建模和协议支持,适合于工程项目。公开软件免费且具有开放性,但模块一般不太健全,对软件开发能力要求较高,因此更适合网络方面的研究。在当前卫星星座仿真环境中,能够适用的几款网络仿真软件,包括 OPNET、NS-2、NS-3 和 OMNeT++。

从开发的难易程度及资料的丰富程度上考虑,OPNET 是上述仿真软件中更适合进行卫星仿真平台的快速开发。由于 OPNET 支持 HLA 接口,能够和其他平台交互进行分布式仿真,因此,可以导入 STK 轨道模型,使卫星节点在仿真过程中按照 STK 中设定的参数运行^[34],更适合在工程实践中运用。目前,基于 OPNET 进行卫星通信系统仿真研究的文献较多,具有较高的参考应用价值。

文献[35]基于 OPNET 搭建了一个低轨道卫星星座移动通信系统仿真平台,其中网络拓扑参考了考铱星星座系统,包含有 66 颗 LEO 卫星、用户终端(User Equipment, UE)、地面网关(Gateway, GW)和核心网的地面段。文献在设计的仿真平台上使用了一种自主设计的基于 IP 寻址的星座通信协议进行仿真。此平台主要仿真 LEO 星座通信系统中寻呼、建链、切换等通信过程,特点是能够通过星间链路和地面网关 GW,实现用户终端 UE 在不同通信链路间的灵活切换。

文献[36]为了考察装配指向性星间链路的导航卫星系统性能,基于 OPNET 设计了一种导航卫星系统通信性能通用仿真模型。该系统采用时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的通信体制进行通信,即卫星通过在不同时刻切换天线指向来实现与其余多颗卫星的通信。为了达成这一目的,作者在模型中采用 OPNET 基

于包的通信机制，上传信息和下传信息封装成包，以包的形式在不同节点间传输信息，并依据导航系统真实的需求产生特定格式的包，同时控制包生成的频度进行业务建模。

为了探究卫星无线信道特性和多波束天线辐射特性影响接收信号的质量，文献[37]在分析卫星信道特性、设计单波束天线模型、计算多波束天线覆盖模型的基础上，利用 OPNET 软件对影响接收信号功率的信道模型和多波束天线模型进行仿真研究。作者利用 OPNET 的仿真内核调用天线模型，根据收发机所在位置的坐标，计算收发机向量与天线轴线向量的夹角，查找存储的离散增益值，以此得到卫星天线增益值。同时，作者通过移动数据观测器，收集不同的位置信息和接收信号功率，仿真得到多波束天线覆盖区域下，任意一点接收功率受随机信道变化的大小。

1.3 当前存在的主要问题和论文研究思路

1.3.1 当前存在的主要问题

1. 已有的 LEO 移动性管理技术无法满足实际运行需求

目前，移动性管理技术在电信网中比较成熟，功能强大，但是与底层技术、物理传输介质等因素相关，不具备统一的技术标准。然而，在当前的无线通信系统中，各种网络制式是并存的，LEO 卫星通信系统在通信时也应考虑与网络制式的兼容性。同时，由于 LEO 卫星通信网络与传统的地面通信网络存在很大差异，直接套用 4G 和 5G 的移动性管理技术也存在诸多问题，主要包括：

(1) 由于 LEO 卫星的移动速度快，与用户连接的时间短，无法保证通信的稳定性，因此，切换的频率将远远大于地面通信网络；

(2) 由于 4G 和 5G 通信所用波段频率高、衰减快，无法进行长距离传输，因此，单一基站的有效覆盖范围小，无法适应卫星通信长距离传输的要求；

(3) 由于 LEO 卫星与地球的相对运动，卫星和地面信关站的拓扑关系处于变化状态，因此，在考虑与用户通信的同时，还需要考虑卫星自身的切换。

2. 当前已有 LEO 通信仿真平台缺乏完整的体系架构

当前，大部分 LEO 通信仿真平台都是以某个指标参数为目标搭建的，只考虑了卫星某个阶段的工作情况，没有一套完整的卫星运行流程。一个完整的卫星通信架

构应该包含：终端与卫星的连接、用户的数据更新与存储、业务数据的发送和接收、卫星的切换等过程。同时，由于 LEO 通信系统大多由多颗 LEO 卫星共同组成，因此，星间干扰也是需要考虑的问题，而目前的 LEO 仿真平台，大多以单颗卫星的运行情况作为仿真结果，忽略了实际情况中的干扰问题。

1.3.2 论文研究思路

本文基于中国航天科技集团下属东方红卫星移动通信有限公司的“低轨星座系统切换管理仿真平台”项目，针对当前 LEO 移动性管理技术中存在切换时间长、切换成功率低等问题，以 4G 和 5G 移动性管理技术为参考，对切换流程进行分析，并与 LEO 通信系统架构进行对比。在此基础上，通过对地面通信网络切换流程进行改进，提出一种新的适用于 LEO 通信系统的切换策略。

考虑到研发时间与开发难度等因素，本文选择 STK 与 OPNET 软件相结合的方式，设计并搭建一个低轨卫星移动性管理仿真平台。在该仿真平台中，通过配置特定场景及参数，对平台功能进行检验，并对提出的切换策略的时延、切换成功率等参数进行仿真。

1.4 论文结构

本文的组织结构如图 1.1 所示。

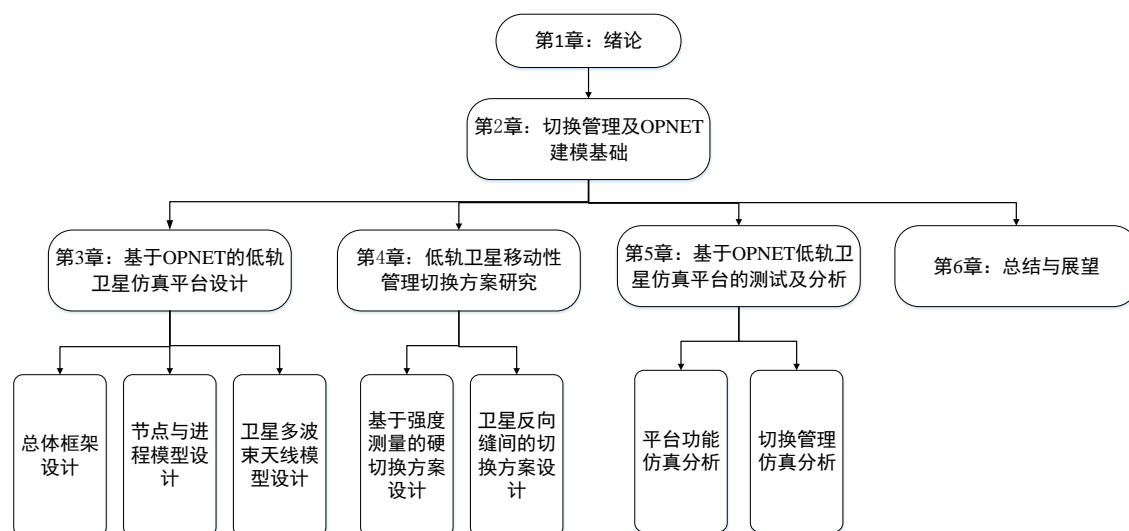


图 1.1 论文结构安排

第 1 章：绪论。首先阐明论文的研究背景和意义，综述移动性管理和卫星仿真平台的研究现状，然后提出当前存在的主要问题和论文的研究思路，最后说明论文的结构安排。

第 2 章：切换管理及 OPNET 建模基础。首先介绍移动性管理中切换管理的相关知识，包括 4G/5G 网络的切换流程和低轨卫星通信系统的切换分类和目标。然后对 OPNET 软件的基本特点和仿真建模过程进行阐述。

第 3 章：基于 OPNET 的低轨卫星仿真平台设计。首先对该仿真平台进行需求分析，然后给出仿真平台的整体架构和网络拓扑模型，明确各节点的功能。接着分别描述网络中各节点的节点模型和进程模型。最后对卫星多波束天线模型的设计和仿真过程进行介绍，通过搭建仿真场景的方式对天线模型的覆盖范围及增益大小进行仿真。

第 4 章：低轨卫星移动性管理切换方案研究。首先对低轨卫星通信系统的切换阶段进行总结，提出切换仿真需要关注的参数。然后介绍基于强度测量的硬切换方案设计过程，包括单卫星内跨波束间的用户切换和跨卫星间的用户切换流程及其消息格式。最后分析卫星反向缝轨道切换成功率偏低的问题，在此基础上提出一种卫星反向缝间的切换方案，该方案通过用户节点代替部分网络控制中心功能方式，减少星间链路跳数，能够减少降低时延并提升成功率。

第 5 章：基于 OPNET 低轨卫星仿真平台的测试及分析。首先介绍仿真平台的基本配置。然后通过配置参数对仿真平台的功能进行测试，结果用局部统计量和全局统计量进行展示。最后对切换管理部分进行仿真，分析和总结不同参数以及不同切换策略对切换结果产生的影响。

第 6 章：总结与展望。对全文工作进行总结，然后分析目前工作中还存在的问题与不足，提出下一步的工作安排。

第2章 切换管理及 OPNET 建模基础

切换管理作为移动性管理的重要组成部分，对低轨卫星通信系统的顺利运行起到了关键性的作用。本章首先介绍切换管理的相关知识，包括传统的 4G/5G 网络的切换流程及低轨卫星通信系统的切换分类和切换目标选择策略。然后，介绍 OPNET 的建模基础，包括 OPNET 基本特点和通过 OPNET 进行建模的主要步骤。

2.1 切换管理基础

切换管理作为低轨卫星移动性管理的重要组成部分，是保证用户能够通过低轨卫星进行稳定通信的关键。目前，有关低轨卫星切换管理的资料很少，因此，需要通过深入分析和研究传统 4G/5G 网络的切换管理技术，以此为基础，进而对低轨卫星通信系统的切换管理进行更深入的研究。

2.1.1 4G/5G 网络的切换流程

4G 系统是一个异构网络，它以 IP 为基础，同时具有差异化的业务传输平台。图 2.1 为 4G 网络的基本架构，其中，与切换有关的节点为用户端(UE)、基站(eNodeB)和移动性管理实体(Mobile Management Entity, MME)。4G 网络有两个主要特征，即业务类型与业务 QoS 需求的多元化。针对 4G 需求，系统的动态特征出现比较剧烈的起伏是源于高速率的消费者，同时也会导致切换时期中与切换后的输送功能受到破坏^[38]。因此，4G 网络切换技术的优劣将对整个系统的性能有着深刻的影响。

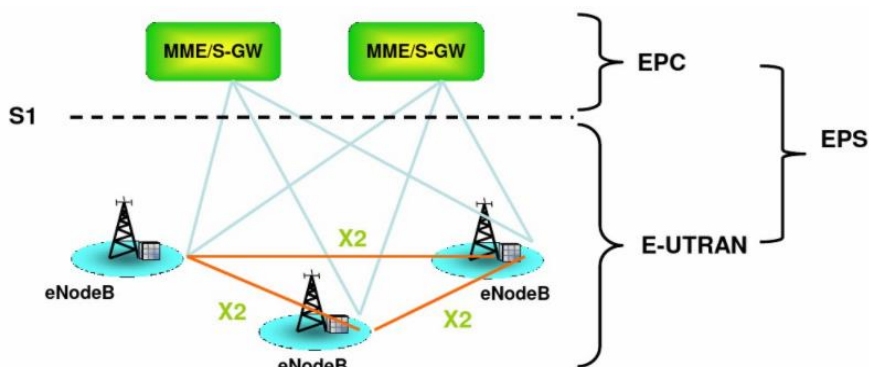


图 2.1 4G 网络基本架构

4G 网络切换包含四个不同阶段：测量和报告阶段、准备切换阶段、切换执行阶段和切换完成阶段。

1. 测量和报告阶段

在本阶段中，UE 对邻区进行测量，并将结果报告给服务 eNodeB，由 eNodeB 判断是否满足切换条件。在实际的应用中，UE 根据测量配置向 eNodeB 上传测量报告。按照测量的时机分类，UE 的测量上报分为 UE 周期性的测量上报和事件性的测量上报。在基于事件的测量上报中，系统内的事件包括 A1~A5 事件，他们分别是：

A1 事件：服务小区质量高于一个绝对门限，用于关闭正在进行的频间测量；

A2 事件：服务小区质量低于一个绝对门限，用于打开频间测量；

A3 事件：同优先级邻区比服务小区质量高于一个绝对门限，用于频内/频间基于覆盖的切换；

A4 事件：邻区质量高于一个绝对门限，主要用于基于负荷的切换；

A5 事件：服务小区质量低于一个绝对门限，且邻区质量高于一个绝对门限，用于频内/频间基于覆盖的切换。

通过 UE 上报的事件内容，源 eNodeB 判断是否进行切换。

2. 准备切换阶段

在本阶段中，当 eNodeB 判断目前满足所有的切换条件时，就开始为 UE 选择目标 eNodeB。根据切换的源小区和目标小区的不同，可以将切换分为站内切换、X2 切换和 S1 切换三种，不同类型的切换信令流程也不一样。当 UE 进行切换的源小区和目标小区都属于同一 eNodeB 时，发生的切换为站内切换；当 UE 进行切换的源小区和目标小区属于不同 eNodeB 处时，发生的切换为 X2 切换；当 UE 进行切换的小区和目标小区属于不同 eNodeB，同时两个 eNodeB 之间不存在 X2 接口或者 X2 接口被禁用时，发生的切换为 S1 切换。源 eNodeB 和目标 eNodeB 之间进行信令交换的目的是在新小区内进行资源准入。只有当资源准入成功后，目标 eNodeB 才能为 UE 的接入分配空口资源，源 eNodeB 也才能把 UE 交给目标 eNodeB。

3. 切换执行阶段

在本阶段中，当选定好目标 eNodeB 后，当前 eNodeB 会告知 UE 切换进行的

时刻,以及其它一些接入目标 eNodeB 时需要得到的消息。由于 UE 和目标 eNodeB 之间的链路没有建立,UE 会采用随机接入的方式来接入目标 eNodeB^[39]。

4. 切换完成阶段

在本阶段中,源基站进行资源和链路的释放,删除用户信息。该阶段的主要目的是告知 UE 已经接入新的小区,并且在新的小区能够进行业务通信,要求释放在源小区所占用的资源。

与 4G 网络不同,5G 移动通信系统通过融合多种无线接入技术,而不再采用某种特定技术接入单一通信网络的方式,成为了一个综合的异构无线网络。接入 5G 系统的网络,除了现有各种制式的 2G/3G/4G 网络外,还包括蓝牙系统、无线局域网 WiFi 系统等,因此,5G 网络能够适应不同条件下的环境,满足不同的业务类型需求。

从切换发起的网络实体方面看,5G 网络的移动性管理可以分为网络控制切换和终端自动控制切换两种方式。虽然两种切换方式发起的网络实体不同,但均包括以下关键步骤:终端用户在源小区进行测量,并报告测量数据;终端用户断开与源小区的连接,并与目标小区进行同步;终端用户接收目标小区的系统参数,通过随机接入的方式与目标小区连接;切换过程中链路失败检测、恢复与重建,回传链路传输。

在网络控制的切换方式中,源小区与目标小区的切换准备过程发生在终端用户向目标小区发起接入之前,源基站在切换准备过程中请求目标基站预留随机接入资源,再通过切换命令通知终端用户。

在终端自动控制的切换方式中,终端用户负责评估链路质量并自主选择目标小区进行切换。由于用户在目标小区发起随机接入过程之前,没有机会请求目标小区预留随机接入资源,终端用户只能采用基于竞争的随机接入方式,向目标小区发送切换请求。因此,相比非竞争的随机接入方式,该方式面临更大的切换失败风险。

2.1.2 低轨卫星系统的切换分类

在低轨卫星移动通信系统中,由于卫星时刻围绕地球进行高速运动,它的波束覆盖区域也会随之发生高速移动。由于用户在地面的移动速度远小于波束覆盖区域的移动速度,因此,在低轨卫星移动通信系统中,切换主要是由于卫星波束移动

引起的^[40]。

本文按照切换的目标进行分类,用户的切换分为两种形式,分别为单卫星内跨波束间的用户切换和跨卫星间的用户切换,如图 2.2 所示。

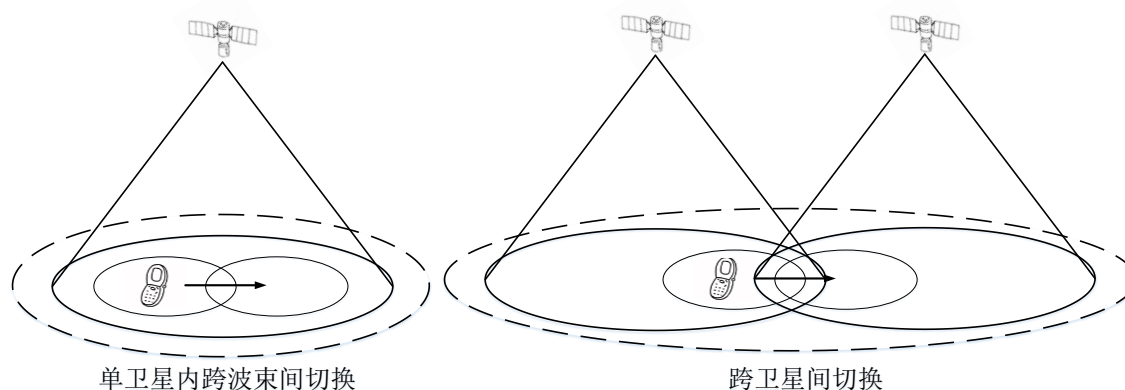


图 2.2 用户切换类型

单卫星内跨波束间的用户切换,又被称为蜂窝切换或星内切换,是指同一颗卫星覆盖区域内,链路在相邻波束间的切换;跨卫星间的用户切换,又被称为卫星切换,是指一个链路在相邻卫星间的切换。

2.1.3 低轨卫星系统的切换目标选择

一般而言,在低轨卫星系统中,根据不同的切换类型会采用不同的目标选择策略。在单卫星内跨波束间切换中,采用的目标选择策略主要有:非优先切换策略、排队优先切换策略和预留信道策略。

非优先切换策略:该策略通过固定信道分配的方式,将固定的信道数量分配给每个小区或每类业务。该策略虽然简单,但由于不能适应网络业务量的动态变化,因此系统的资源利用率偏低,一般需结合其他策略来使用。

排队优先切换策略:该策略由排队技术演变而来,通过排队的方式进行各种类型的呼叫或者请求。通过这种方式,能够更加合理地进行网络资源分配。如果在波束中不存在空闲信道时有新的呼叫或切换请求到达,卫星会将该呼叫或请求放入单独设置的队列中进行等待。如果有空闲信道在系统设定的时间内出现,则该呼叫或请求会被网络接受,否则进行强制中断处理。在同一个队列中,资源分配的原则按照呼叫或者请求发生的先后顺序进行。在不同队列之间,可以通过设定不同优先级的方式,使得优先级高的队列获得更多网络资源。

预留信道策略：该策略采用了设置保护信道的方式，在每个小区中为切换服务设立专门的保护信道。采用策略的关键是如何设定合适的阈值，能否在满足信道资源使用的情况下，不对网络资源造成浪费。一般来说，预留信道采用的阈值既可以是一个固定值，也可以是一个动态值，该值随着网络的不断变化而进行动态调整，能够使网络资源的利用率得到提升。

而在跨卫星间的用户切换中，选择卫星的准则主要有：最小负荷准则、最小距离准则、最长可视时间准则、最强信号准则等。

最小负荷准则：该方式让用户在所有可见卫星中，选择负荷最小的卫星。通过这种方式，能够减少掉线率和阻塞率，使得系统资源利用率得到提升。但采用该方式的缺点是可能会选择距离较远的卫星，导致出现传输时延较长，服务质量(Quality of Service, QoS)较差的问题。

最小距离准则：该方式通过计算用户与卫星的距离，选择离用户最近的卫星。但通过这种方式选择的卫星，由于距离最短，因此通信仰角最大，会导致切换的时间间隔很短，不适合进行长时间通信（例如多媒体业务）。

最长可视时间准则：该方式通过计算卫星的覆盖时间，选择能够为用户提供最长服务时间的卫星。通过这种方式选择的卫星能够在一定程度上降低用户切换的频率，但缺点是计算要求较高。

2.2 OPNET 建模基础

OPNET 作为一款商用的网络仿真软件，能够准确分析复杂网络的性能和行为，能为用户提供一系列的仿真模型库，在电信、军事、航天航空、系统集成、咨询服务、大学、行政机关等领域广泛应用。因此，通过 OPNET 进行仿真建模，能够降低学习成本，提高仿真效率，对仿真平台的搭建具有非常重要的帮助。

2.2.1 OPNET 简介

OPNET 的全称是 OPNET Modeler，是一款用于网络通信仿真的计算机软件，由 OPNET 公司开发^[41]。OPNET 公司成立于 1986 年，总部位于马里兰州的 Bethesda。公司提供高级的解决方案和技术支持，主要有网络建模和仿真分析、系统性能分析网络建设工程和运营等。

与市面上的其它网络仿真软件不同, OPNET 采用层次化、模块化的面向对象的建模机制, 有图形化用户界面, 易于操作、建模和部署拓扑。在 OPNET 中, 采用了网络域、节点域和进程域的三层建模机制, 用于实现层次化的建模目标^[42]。网络域主要是从高层设备对系统进行规范, 节点域提供设备内部功能所需要的硬件和软件资源, 进程域从节点内部的进程进行规范, 包括决策进程和算法。同时, OPNET 对卫星网络的支持也很完善, 能够提供卫星节点、无线链路、天线和卫星轨道设置等功能。作为一款商用软件, OPNET 也提供了免费的教育版本, 虽然功能受限, 但主要的功能模块都可以使用。同时, 因为大量的研究人员和工程项目参与使用该软件, 因此该软件的学习资源、现有的项目和模型非常丰富, 能够为本项目的完成提供强大的技术支持。

为了对网络状态进行仿真, OPNET 采用了四大通信仿真机制进行建模^[43]。

离散事件仿真机制: OPNET 采用离散事件驱动的方式进行模拟仿真。在 OPNET 中, “事件”的定义为网络状态发生变化。也就是说, 模拟机的工作状态只会出现在网络状态发生变化时。如果网络状态稳定, 模拟机会保持静默状态, 不进行任何操作。因此, 从计算的效率方面看, 采用离散事件驱动的方式比采用时间驱动的方式更有优势。

基于包的通信: 在 OPNET 中, 模拟包在网络设备中的流动和处理过程是通过基于包建模的方式完成的。同时, 通过该方式, 能够提供系统自带的调试功能对任意的包格式进行生成或编辑, 用于模拟实际网络协议中的组包和拆包过程。在进行模拟的过程中, 通过调试功能的方式, 还能够对特定包的包头和净荷等内容进行检查。

使用接口控制信息进行通信: 与基于包的通信机制类似, 基于接口控制信息 (Interface Control Information, ICI) 也采用了类似于包的数据结构。但是, 由于 ICI 数据结构仅包含用户自定义的域而不需要进行封装, 因此, 与包数据结构相比, ICI 数据结构更简单。基于 ICI 的通信对任何事件都能够适用, 并且常和流事件一起使用。尽管流事件由包的传输演变而来, 但是当需要传输流事件以外的信息而又不想使用包本身时, 可以通过 ICI 进行通信。

点对点和总线管道阶段: 在 OPNET 中, 总共支持 3 种链路形式, 包括点对点链路、总线链路和无线链路。为了描述它们物理特性上的特点, 采用了一系列管道

阶段来进行模拟。为了尽量真实地模拟数据帧在信道中的传输过程，在 OPNET 的无线仿真中，将管道分为 14 个阶段，这些管道阶段首尾相接，如图 2.3 所示。首先，将一些肯定无法被的物件在传输之前圈定出来。然后，计算传输时延并将接收主询中的每个物件复制一份封包。接着，进行链路闭锁计算，检查该信号的参数能否完全匹配信道。若能够完全匹配，则将该信号判定为有效信号，如果只有部分匹配，则将该信号判定为噪声进行处理。传播延时的计算结束后，接收器内部会产生一个中断，对每一个可能接收的信道分别进行 6~13 阶段的计算。由于在 6~13 阶段中的任意阶段都有可能对包产生影响的干扰，因此，需要对每一段都进行单独地计算。如果该包是有效包，则对其计算误码率；如果是噪声，则需要考虑对有效包产生的影响。通过一系列步骤之后，得到包的总误码率，最后决定是否丢包。

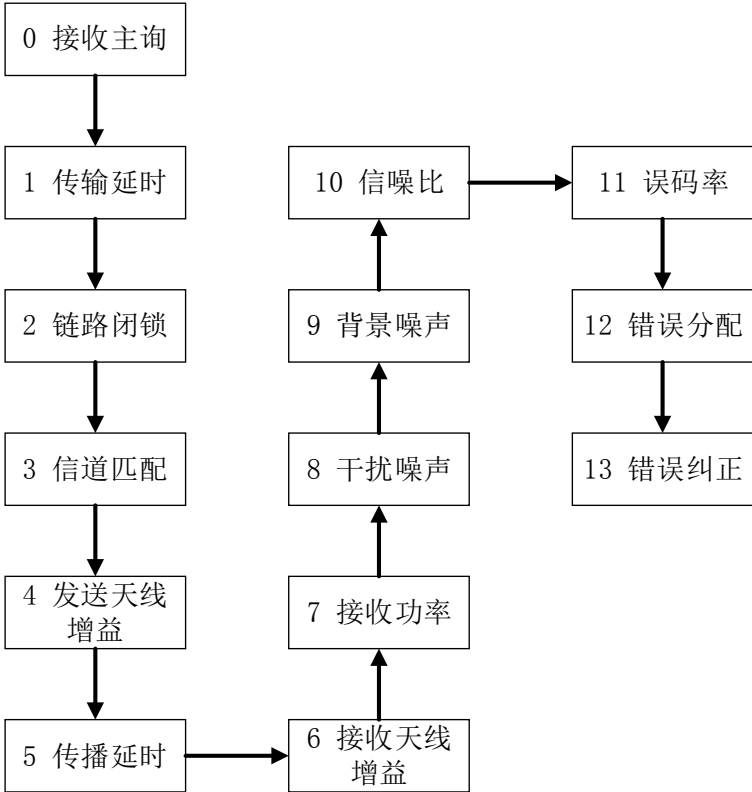


图 2.3 OPNET 管道阶段模型

2.2.2 OPNET 仿真建模过程

OPNET 的仿真建模过程大致可分为 5 个阶段，分别为系统分析、系统模型设计、分析、模型改进或重新设计^[44]，如图 2.4 所示。

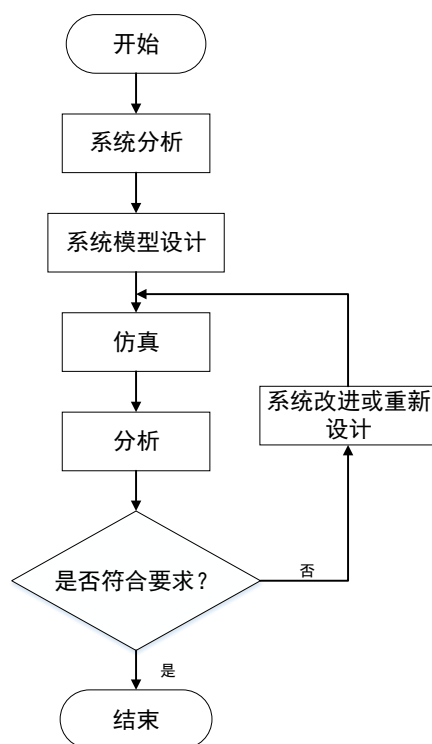


图 2.4 OPNET 仿真建模流程图

各阶段简要描述如下：

系统分析阶段：对需要研究的网络、协议等系统进行分析，写出系统描述。

系统模型设计阶段：将实际系统进行分解，对系统的各个功能进行构建。

仿真阶段：通过序列编辑器对仿真序列进行设计。

分析阶段：仿真结果进行分析。如果结果符合要求，结果进行发布，否则对产生问题的因素进行分析，考虑改进模型或重新设计模型。

模型改进或重新设计阶段：检查当前的系统模型，思考是否因忽略了某些重要因素而出现问题。如果是，将存在的问题进行定位，然后将系统模型的部分模块进行改进或重新设计系统模型，重新进行仿真分析。

2.3 本章小结

本章首先介绍了切换管理的相关基础知识，包括 4G 和 5G 网络的切换流程，在此基础上，介绍了低轨卫星通信系统的切换分类和切换目标选择策略，为低轨卫星通信系统的切换流程设计提供参考思路。然后，介绍了 OPNET 网络仿真软件的相关知识，包括 OPNET 软件的基本特点和仿真建模的基本步骤，为后文仿真平台的搭建奠定了基础。

第3章 基于 OPNET 的低轨卫星仿真平台设计

通过建立低轨卫星仿真平台，可以模拟低轨卫星通信系统的运行和工作状态，验证系统性能，对研究低轨卫星通信系统具有重大的理论和实际价值。本章首先对低轨卫星仿真平台进行需求分析。然后阐述低轨卫星仿真平台的总体框架，包括平台的整体架构、网络拓扑和节点功能。接着具体介绍包括用户终端、低轨卫星、移动交换中心和网络控制中心的节点模型和进程模型。最后介绍卫星多波束天线的几何模型以及建模设计过程。

3.1 仿真平台需求分析

低轨星座网络是当前卫星通信发展的趋势和热潮，许多国家正在规划或部署低轨星座通信系统。低轨星座系统卫星的波束运动特点（快速运动、波束密集覆盖、波束覆盖区域小等），为低轨用户终端的切换管理带来大量问题。因此，需要研究低轨星座系统点波束高速运动和密集点波束覆盖下的切换管理，寻找应对方案以保证服务质量和用户的业务连续性，需要搭建面向低轨星座系统的切换管理仿真平台。仿真平台在 OPNET 网络仿真环境下开发，模拟低轨卫星通信系统的工作流程和关键技术，验证低轨卫星通信系统的通信性能、接入、移动性管理策略，为低轨卫星通信系统中的无线资源管理策略的研究、网络规划、协议验证等提供一个贴近实际的仿真环境。根据验证系统工作流程、仿真分析系统移动性管理和无线资源管理策略等开发目的，结合 OPNET 软件的仿真机制，搭建的仿真平台主要应实现以下功能：

1. 仿真平台采用模块化设计，各模块间相对独立，通过预留的程序接口相互调用，加入新模块时不需要修改原有模块，具备良好扩展性；
2. 仿真平台具有良好的输入功能，能够集中配置不同的网络参数，灵活搭建不同的仿真场景；
3. 仿真平台应具有良好的输出功能，能根据仿真的需求输出多种仿真结果，并能以不同的方式呈现；
4. 根据星历数据和点波束方向图构造低轨星座系统卫星及波束运动场景；

5. 波束状态场景的构造除了要考虑星地相对运动场景外,还要考虑因波束状态改变(波束开关闭调整、波束频率动态调整等)触发的切换情况;
6. 支持批量终端模拟(均匀分布、随机分布、密集分布、分散分布);
7. 支持地面终端多种移动模型下的切换仿真(卫星高速运动,终端的移动模型常忽略);
8. 支持不同链路失败等异常状况的模拟和仿真;
9. 具备节点处理时延和链路传输时延的建模;
10. 终端接入情况仿真(接入拒绝终端数量、接入成功终端数量);
11. 终端切换情况仿真(切换次数、切换波束、切换间隔);
12. 能够针对仿真结果优化切换管理技术,给出合理和可行的切换管理方案,提高切换性能,保障低轨波束切换过程中服务质量和业务连续性。

3.2 仿真平台的总体框架设计

低轨卫星移动性管理仿真平台,不仅要模拟卫星和地面终端的移动轨迹,还应支持和模拟各种通信和网络协议,并且具有对后续服务提供更新升级的潜力。为此,需要对仿真平台的总体框架进行设计,以满足上述需求。

3.2.1 仿真平台整体架构

为了使所搭建的低轨卫星仿真平台具有充足的灵活性和可拓展性,本平台采用模块化的设计思路,整体架构如图3.1所示。

如图3.1所示,本仿真平台包括5大模块,分别为功能实体模块、卫星通信协议模块、网络管理模块、卫星运行模块和分析模块。每个模块具体实现某些特定功能,并通过输入、输出窗口完成对整个低轨卫星通信系统的仿真。

1. 功能实体模块

本模块主要用于模拟具体的物理节点,包括用户终端、卫星、移动交换中心(Mobile Switch Center, MSC)和网络控制中心(Network Control Center, NCC)。通过设置各节点的状态,仿真在各种场景下的系统运行情况。其中,可以手动或自动设置用户终端的速率和轨迹,以此仿真用户在低速或者高速运动下的通信状态。而卫星的运行轨迹则可以自行编辑或通过外部轨道文件进行导入。

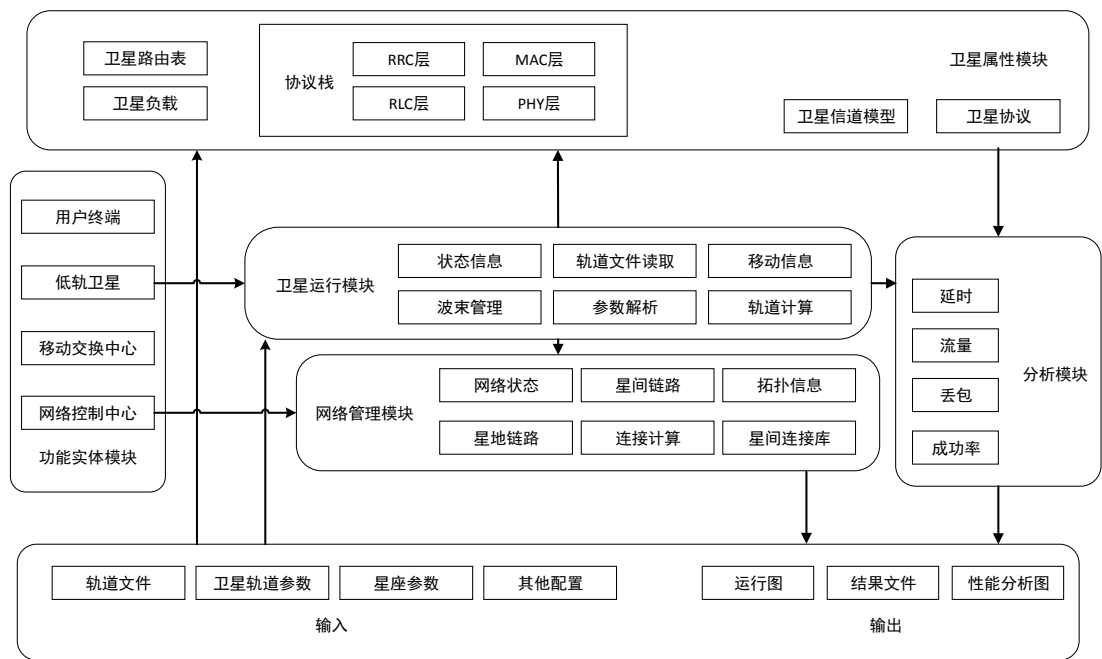


图 3.1 仿真平台总体架构

2. 卫星属性模块

本模块用于设置协议以支持仿真卫星和卫星之间、卫星和地面之间的通信。在仿真平台中，通过将不同的通信模块作为不同的网络接口的方式，能够实现不同节点间的相互通信，同时避免冲突产生。本模块中，只关心物理层和链路层等低层协议栈的运行，而不关心网络层和应用层等高层协议栈的状况。在模块中还可以编辑卫星的信道模型，用于模拟各种复杂的自然环境。同时，单独将其列为一个模块，也具有很强的灵活性，能够很容易地修改现有模块或添加新的模块，以拓展仿真平台的功能。

3. 网络管理模块

本模块用于构建整个低轨卫星通信系统的网络拓扑。通过此模块，能够模拟包括星间链路和星地链路在内的网络架构，以评估网络性能。仿真者通过修改该模块，可以修改或添加新的链路通道，从而更新整个网络状态。

4. 卫星运行模块

本模块用于仿真卫星自身的运行状态，通过获取卫星运行的轨道文件，实时更新卫星在虚拟网路中的位置。本模块也负责管理卫星中波束的运行状态，包括设置波束的信道数、频率等参数。

5. 分析模块

本模块负责对整个 LEO 通信系统的运行情况进行分析统计。通过对设定的参

数进行计算,统计在不同参数条件下的性能。此模块具有极大的灵活性和可拓展性,仿真者可根据自身的需求添加和删减感兴趣的统计量,以满足各种仿真需求。

3.2.2 仿真平台网络拓扑

低轨卫星通信系统由空间部分和地面部分组成,其中,空间部分由围绕地球旋转的 LEO 星座组成,地面部分则由负责提供控制和处理信息的 MSC、NCC 以及使用低轨卫星通信服务的 UE 组成,如图 3.2 所示。

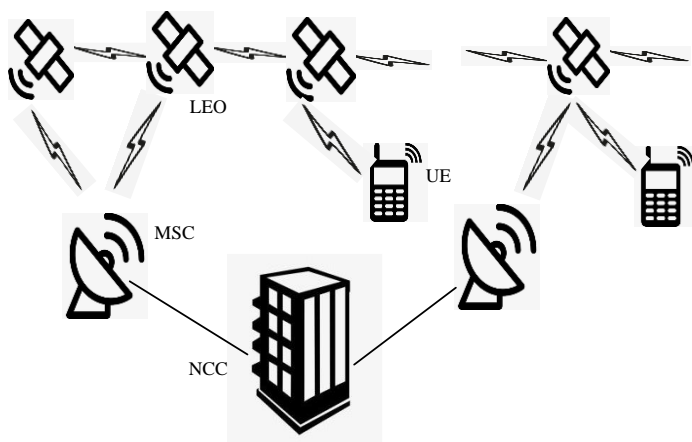


图 3.2 仿真平台网络拓扑

在低轨卫星星座部分,由于本项目采用的“鸿雁”星座各项参数处于保密状态,本仿真平台中的星座参数搭建参考“铱星”星座系统。“铱星”星座由 66 颗卫星组成,分布在 6 个轨道面上,每个轨道面均匀分布 11 颗卫星,如图 3.3 所示。

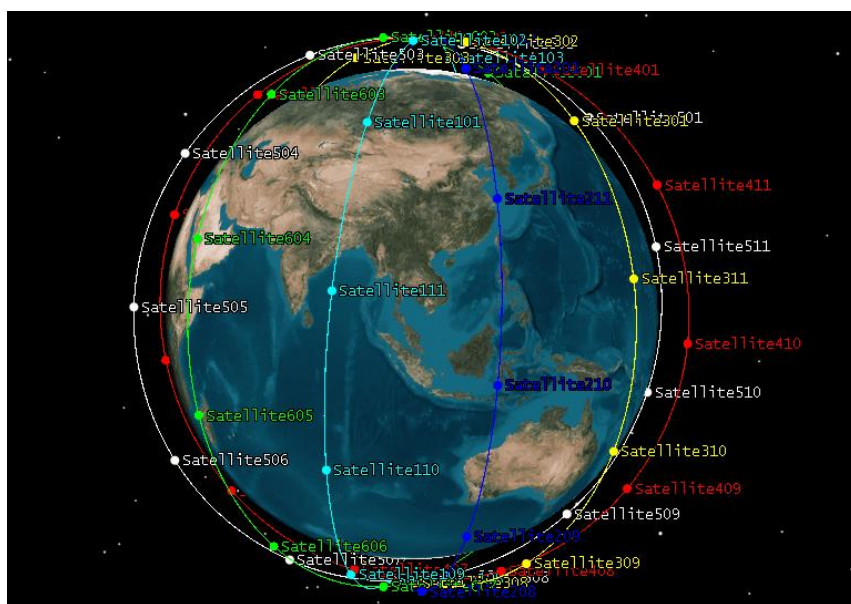


图 3.3 “铱星”星座系统

如图 3.3，该星座中每颗卫星轨道高度 781km，轨道倾角 86.4° ，相邻轨道面间隔为 30° ，相邻轨道面间卫星的相位差为 16.36° 。星座中的每颗卫星拥有 4 条星间链路，分别与同轨道面前后两颗卫星和相邻轨道面左右相邻卫星间有星间链路连接。反向缝两侧轨道面上的卫星只有 3 条星间链路，分别与同轨道面前后两颗卫星和非反向缝一侧相邻轨道面卫星间有星间链路连接。

3.2.3 仿真平台节点功能

本文设计的仿真平台中，共分为用户终端、低轨卫星、移动交换中心和网络控制中心等 4 类节点，通过部署不同节点实现不同的功能，共同实现仿真平台的运行。

1. 用户终端节点

该节点从功能层面看，可以分为接入控制进程模块、分组收发进程模块、收发机模块和天线模块 4 个模块，如图 3.4 所示。

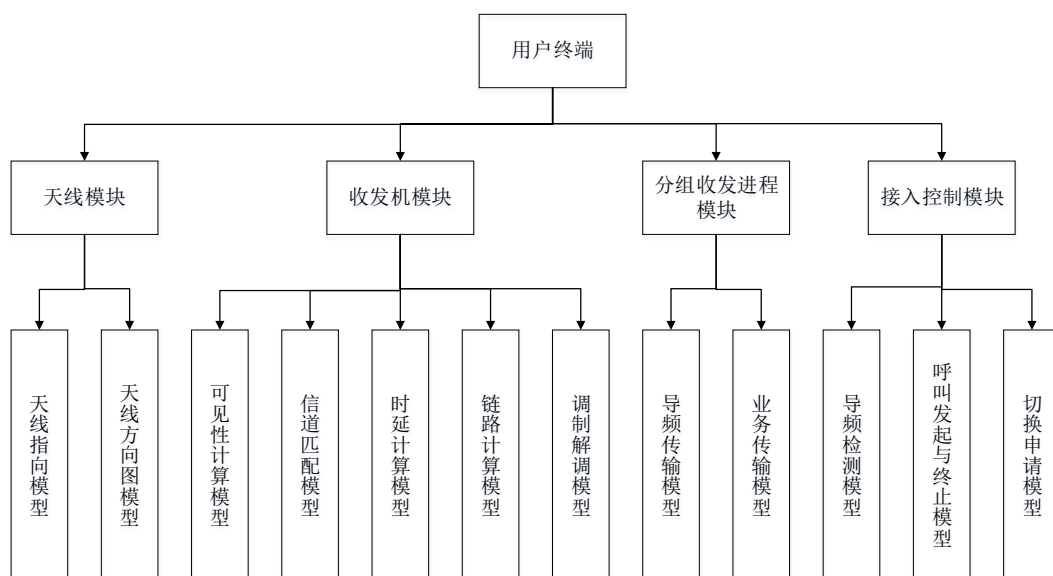


图 3.4 用户终端节点功能模型

天线模块：该模块划分为天线指向模型和天线方向图模型。天线指向模型决定天线正中心的指向位置；天线方向图模型决定天线在三维坐标轴下每个方位的增益大小。

收发机模块：该模块划分为可见性计算模型、信道匹配模型、时延计算模型、链路计算模型以及编译码调制解调模型。可见性计算模型计算是否与接收目标处

于可视范围内；信道匹配模型从频率、带宽等方面判断接收目标是否能够接收该种数据包；时延计算模型计算数据包从发送端到接收端花费的时间；链路计算模型计算数据包在物理信道中的信号衰减；调制解调模型在发送端对数据包进行调制，在接收端进行解调。

分组收发进程模块：该模块分为导频传输模型和业务传输模型。导频传输模型负责实现导频包的接收和发送，用于接入低轨卫星通信系统；业务传输模型负责实现业务包的接收和发送，用于进行数据通信。

接入控制模块：该模块分为导频检测模型、呼叫发起与终止模型和切换申请模型。导频检测模型负责检测低轨卫星发来的导频信号；呼叫发起与终止模型负责用户数据包的随机生成；切换申请模型负责生成向卫星发送的切换报告。

2. 低轨卫星节点

仿真平台中，低轨卫星节点采用星上处理转发的通信方式，将用户终端的信令与数据信息通过星间链路转发至目的卫星。卫星节点模型主要由用户链路模块、卫星转发处理模块、馈电链路模块、多波束天线管模块和星间链路模块 5 个模块组成，如图 3.5 所示。

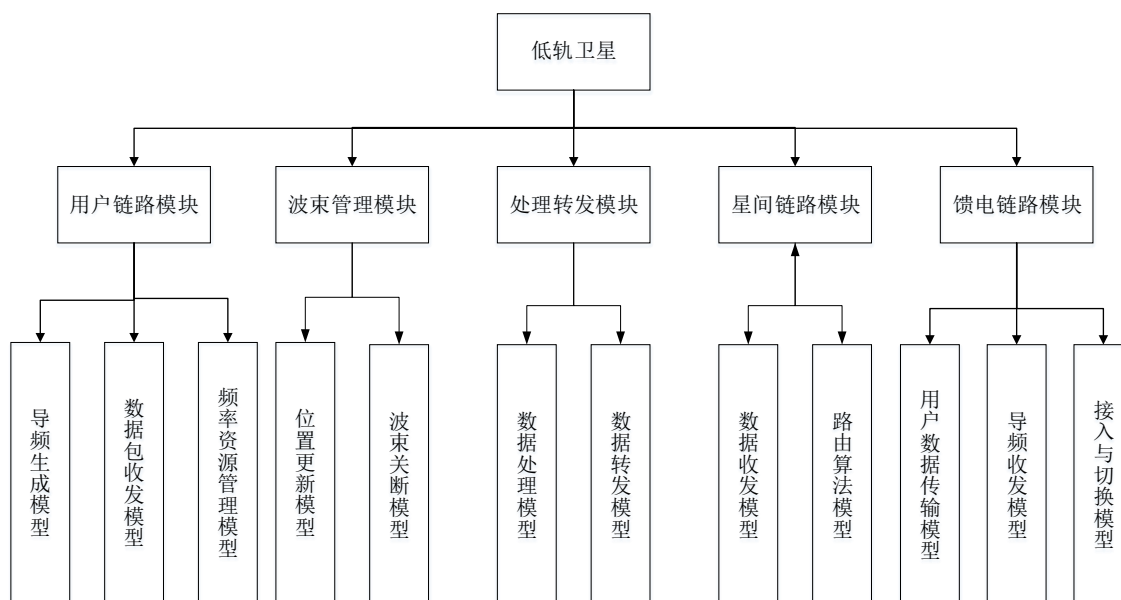


图 3.5 低轨卫星节点功能模型

用户链路模块：该模块分为导频生成模型、数据包收发模型和频率资源管理模型。导频生成模型负责生成卫星导频信号；数据包收发模型负责接收和发送用户的数据业务；频率资源管理模型负责设置接收和发送信号的频率。

波束管理模块：该模块分为位置更新模型和波束关断模型。位置更新模型负责周期性的更新卫星当前位置，用于天线对准；波束关断模型负责在高纬度地区关闭部分波束，减少波束重叠产生的干扰。

处理转发模块：该模块分为数据处理模型和数据转发模型。数据处理模型负责对数据进行分类和处理；数据转发模型负责将不同类别的数据包发往馈电链路或星间链路。

星间链路模块：该模块分为数据收发模型和路由算法模型。数据收发模型负责接收和发送来自星间链路的数据包；路由算法模型负责根据特定的算法计算路由的下一跳地址。

馈电链路模块：该模块分为用户数据传输模型、导频收发模型和接入与切换模型。用户数据传输模型负责与移动交换中心交换用户数据包；导频收发模型负责接收和发送移动交换中心的卫星导频信息；接入与切换模型负责处理馈电链路的建立、切换和释放。

3. 移动交换中心节点

移动交换中心节点是连接卫星和地面网络的枢纽，其物理层实现既能和卫星通信，又能和地面网络通信。移动交换中心节点模型由馈电链路模块和收发信机模块组成，如图 3.6 所示。

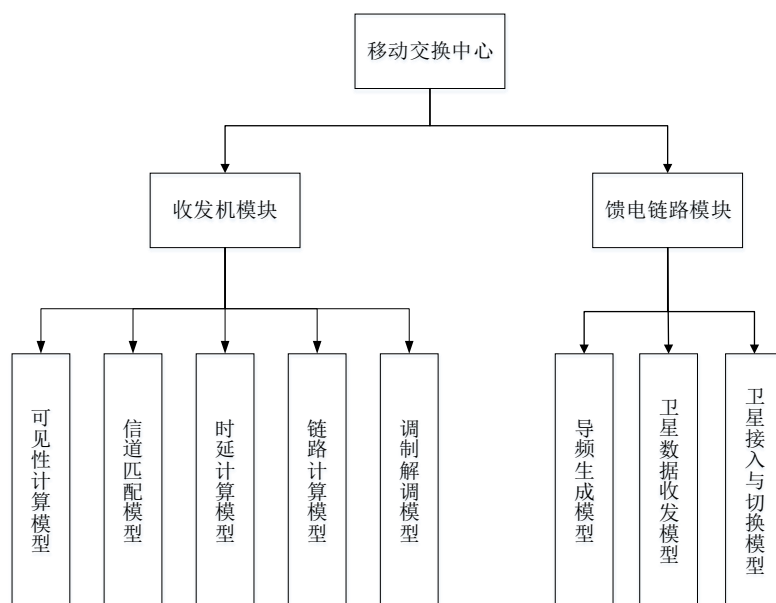


图 3.6 移动交换中心节点功能模型

收发信机模块：同用户终端节点收发信机模块。

馈电路径模块：该模块分为导频生成模型、卫星数据收发模型和卫星接入与切换模型。导频生成模型负责生成卫星导频信号，用于卫星与移动交换中心的馈电路径建立；卫星数据收发模型负责接收与发送卫星的数据包；卫星接入与切换模型负责管理卫星馈电路径的建立、切换和释放。

4. 网络控制中心节点

网络控制中心节点主要负责处理移动性管理过程有关问题和用户信息存储，以及对卫星的信道资源及频率资源进行管理，包括数据处理模块和资源管理模块，如图 3.7 所示。

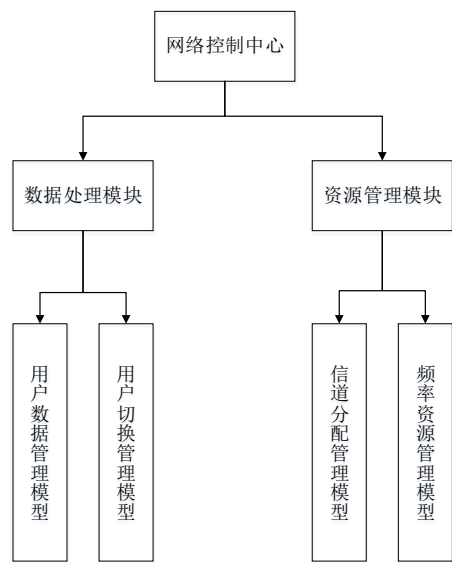


图 3.7 网络控制中心节点功能模型

数据处理模块：该模块分为用户数据管理模块和用户切换管理模块。用户数据管理模块负责存储用户的数据及相关信息；用户切换管理模块负责对用户进行移动性管理。

资源管理模块：该模块分为信道分配管理模型和频率资源管理模型。信道分配管理模型负责分配卫星的信道资源，用于对卫星负载进行均衡；频率资源管理模型负责分配卫星的频率资源，最大化频谱效率。

3.3 仿真平台节点模型与进程模型设计

本仿真平台中的节点包括用户终端节点、低轨卫星节点、移动交换中心节点和网络控制中心节点，每个节点由节点模型和进程模型组成，节点模型负责展示该节

点具有的硬件和软件资源，进程模型负责实现每个具体的功能。

3.3.1 用户终端节点模型

用户终端节点模型由接收机模块、发送机模块、处理器模块和天线模块组成，如图 3.8 所示。用户终端节点主要执行移动性管理、无线资源管理等功能。同时，此节点也负责呼叫管理，仿真用户切换请求的产生、切换过程与卫星的交互、读取新的无线资源等功能。



图 3.8 用户终端节点模型

1. 接收机模块

此模块用于完成无线信道接收，共有 12 个广播接收信道、12 个下行控制信道和 1 个下行共享信道，如图 3.9 所示。其中，广播信道用于接收导频信号，下行控制信道用于接收下行控制信息(Downlink Control Information, DCI)，共享信道用于接收部分信令和数据。

	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code
0	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,615	disabled
1	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,616.875	disabled
2	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,617.75	disabled
3	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,618.625	disabled
4	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,619.5	disabled
5	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,620.375	disabled
6	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,621.25	disabled
7	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,622.125	disabled
8	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,623	disabled
9	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,623.875	disabled
10	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,624.75	disabled
11	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
12	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
13	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
14	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
15	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
16	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
17	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
18	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
19	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
20	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
21	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
22	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
23	1,920,000	leo_connect_m...	43.75	1,625.625	disabled
24	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.1	disabled

图 3.9 用户接收机参数

在该模块的 25 个信道中，前 24 个信道因为要接收来自不同卫星的信号，因为频率通常情况下保持不变，除非后期要更改广播信道和物理下行控制信道(Physical Downlink Control Channel, PDCCH)的频率。而第 25 号（编号 24）信道为

下行共享信道，其频率会根据调度的信息进行灵活调整。

2. 发送机模块

此模块负责完成无线信道的发送，每个终端有 3 个物理发送信道，如图 3.10 所示。其中，第 0 个信道为物理随机接入信道(Physical Random Access Channel, PRACH)，主要完成接入过程，其频率值通过波束的导频消息获取。由于每个波束的 PRACH 频率不同，手动输入较为麻烦，因此，本平台通过代码配置的方式对其频率进行设置。

(channel) Table							
	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)	bit capacity (bits)
0	1,920,000	LE_Control, L...	1,000	1,615	disabled	2.5	infinity
1	1,920,000	LE_Control, L...	10	35.1	disabled	2.5	infinity
2	1,920,000	LE_Control, L...	10	35.1	disabled	2.5	infinity

图 3.10 用户发送机参数

3. 处理器模块

该模块为用户终端节点的核心部分，负责处理来自各方面的数据，其进程模型如图 3.11 所示。

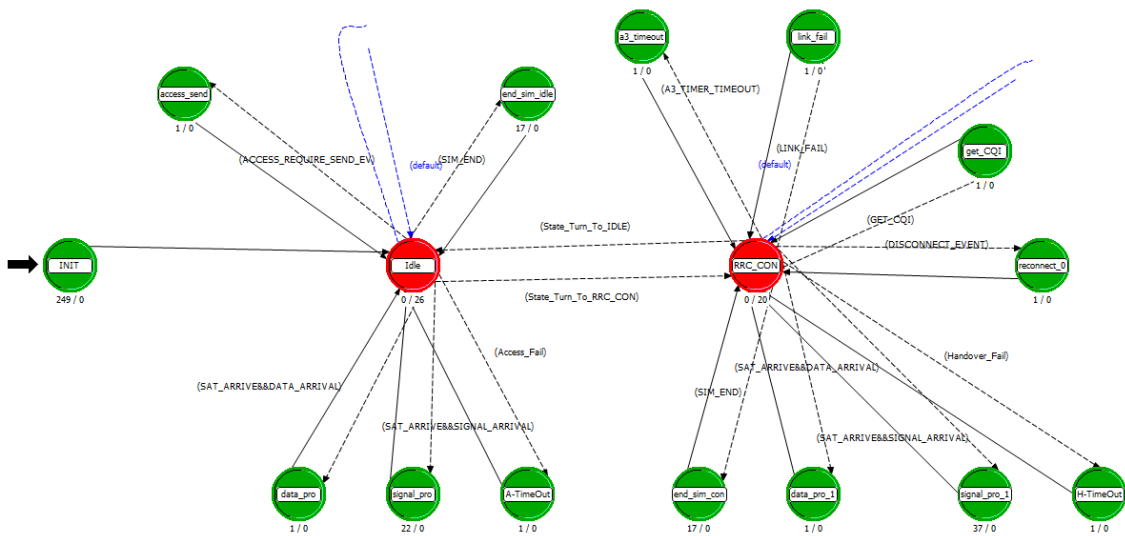


图 3.11 用户终端节点处理器进程模型

该进程模型中共包含 3 个基本状态，分别为初始化状态，IDLE 状态以及 RRC_CON 状态。初始化状态为仿真开始时的状态，用于进行各种参数的初始化。IDLE 状态为用户终端被激活但未与任何卫星连接时的待机状态。RRC_CON 状态为用户终端与卫星成功连接后进行数据通信时的状态。各状态的转移条件如表 3.1

所示。

表 3.1 用户节点处理器进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
RRC_CON	IDLE	状态回退自中断触发（由切换过程链路失败、资源不足或者传输过程链路失败引起）
	a3_timeout	TTT 内持续满足 A3 事件，导致 A3 计时器超时
	link_fail	数据传输阶段链路失败
	get_CQI	CQI 定时器超时（自中断触发）
	reconnect_0	重连计时器到时
	H_TimeOut	切换过程链路失败（切换准备过程、切换执行过程）
	signal_pro_1	RRC 连接状态时，收到非数据类型的包
	data_pro_1	RRC 连接状态收到数据类型的包
	end_sim_con	仿真结束
	RRC_CON	接入和重连成功
IDLE	signal_pro	非数据类型的包到达
	A-TimeOut	接入阶段链路失败，计时器超时
	data_pro	数据类型的包到达
	access_send	接入请求发送自中断触发
	end_sim_idle	仿真结束

a3_timeout 状态：向当前接入的卫星波束发送测量报告。

link_fail 状态：用户状态返回到 IDLE。

get_CQI 状态：根据下行链路的 RSRP 值进行 CQI 上报。

reconnect_0 状态：用户掉线，重新进入 IDLE 状态，初始化并开启测量。

H_TimeOut 状态和 **A-TimeOut** 状态：用户链路失败，进行重新接入。

signal_pro_1 状态和 **signal_pro** 状态：对信令包进行处理。

data_pro_1 状态和 **data_pro** 状态：接收下行数据包，进行统计和销毁。

end_sim_con 状态和 **end_sim_idle** 状态：进行仿真结果汇总。

access_send 状态：向目标卫星波束发送接入请求报告。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static void UserStateReset()**：完成用户接入信息的初始化，在用户重新接入时调用。

(2) **static int A3_enter_into(double rsrp)**: 判断该接收功率是否进入 A3 事件。

(3) **static int A3_out(double rsrp)**: 判断该接收功率会不会离开 A3 事件。

(4) **static void measurement_window_update(int sat_id,int beam_id,double power)**: 更新测量窗口, 当存在多个切换目标的时候可以调用该函数。

(5) **static void Link_Fail_Pro()**: 对切换过程链路失败的处理, 当切换失败的时候可以调用。

(6) **static void ue_reconnect()**: 非切换阶段链路失败, 调用重连。

(7) **static void get_csi()**: 获取 CQI(Channel Quality Indication, 信道质量指示), 当没有收到业务信道的包时该 CQI 为参考信号的 CQI。

(8) **static void RRC_CON_data_pro(Packet *pkptr)**: 下行数据包的处理, 主要是统计和销毁数据包。

(9) **static void MR_Send()**: 测量报告上传, 当 TTT 定时器超时, 且 A3 时间保持一段时间可以调用, 用以发起切换请求。

(10) **static void Access_Require_Send()**: 接入请求发送, 当第一次收到导频开始等待一定时间, 在这段时间选择最佳波束进行接入, 降低切换概率。

(11) **static void reference_signal_pro(Packet *pkptr)**: 参考信号处理, 在 IDLE 态和 RRC 连接态都可以调用该函数, 分别用于接入和切换, 以及断线定时器重置。其中, 测量信号强度比较的算法如表 3.2 所示。

表 3.2 测量信号强度比较算法

测量信号强度比较

```

1: Input: pilot_signal    //输入导频信号
2: if sat_id==best_sat && beam_id==best_beam    //如果当前导频来自自己接入的卫星波束
3:   rec_power=rx_power    //更新自身信号强度
4: end if
5: else    //如果当前导频不是来自自己接入的卫星波束
6:   if rx_power>rec_power    //如果当前导频信号强度大于自身信号强度
7:     A3_enter_into(rx_power)    //开始进入 A3 事件
8:   end if
9: end else

```

(12) **static void Access_Information_pro(Packet *pkptr)**: 接入信息处理, 获取 PDCCH、PUCCH、PDSCH 和 PUSCH 的频率, 当收到接入信息后, 如果频率不为

-1.0 则开始进行 CQI 上报以获取调度信息。

(13) **static void Handover_Command_pro(Packet *pkptr):** 切换命令处理，规则同函数 12，当频率为-1.0 时回退到 IDLE 状态。

(14) **static void Traffic_Configuration_Information_pro(Packet *pkptr):** 传输配置信息处理，即 CQI 报告的反馈，确定调制解调以及编码策略。

4. 天线模块

在本仿真平台中，为了使用户终端能够接收到来自不同方位的卫星的信号，同时尽可能的降低仿真的复杂度以增加仿真效率，用户终端的收发机都使用系统默认自带的全向天线 isotropic，该天线呈球状分布，在整个空间范围里的增益均为 0dB，如图 3.12 所示。

Attribute	Value
name	a_0
pattern	isotropic
pointing ref. phi	0.0
pointing ref. theta	180
target latitude	0.0
target longitude	0.0
target altitude	0.0
icon name	antenna

图 3.12 用户天线参数

3.3.2 低轨卫星节点模型

低轨卫星由卫星—用户收发机模块、波束模块、卫星处理器模块、星间链路模块、馈电链路模块、馈电链路收发机模块和星间链路收发机模块组成，节点模型如图 3.13 所示。

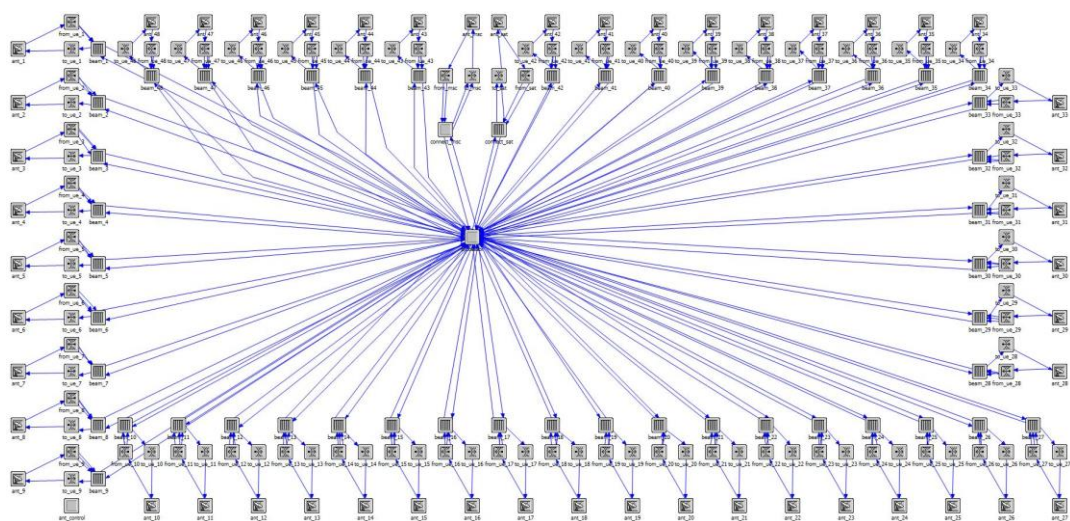


图 3.13 低轨卫星节点模型

1. 卫星—用户收发机模块

在卫星—用户发送机模型中，信道总共为 3 个，其中 0 号信道为随机接入信道，1 号信道为上行控制信道，第 3 个信道为上行共享信道，包含剩下的 78 个逻辑信道，能够支持 78 个用户的同时通信，如图 3.14 所示。信道中的配置在仿真过程中可以任意改动，通过使用 `op_ima_obj_attr_set(down_channel_id[0], "min frequency", xmit_freq[0])` 函数进行修改。

(channel) Table						
	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	pro (dB)
0	1,920,000	leo_connect_m...	1,000	1,615	disabled	char
1	1,920,000	leo_connect_m...	10	35.25	disabled	char
2	1,920,000	leo_connect_m...	10	35.5	disabled	char

图 3.14 卫星—用户发送机参数

在卫星—用户接收机模块中，信道共为 80 个，如图 3.15 所示。其中，第 0 号信道为广播信道，第 1 号信道为下行控制信道，剩下 78 个为下行共享信道（只有当终端接收机频段与该信道频段完全相同时才能接收，否则为无效包或噪声包）。

(channel) Table							
	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)	bit capacity (bits)
0	1,920,000	leo_connect_m...	10	31	disabled	100	infinity
1	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.25	disabled	100	infinity
2	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
3	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
4	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
5	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
6	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
7	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
8	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity
9	1,920,000	leo_connect_m...	10	30.5	disabled	100	infinity

图 3.15 卫星—用户接收机参数

2. 波束模块

波束模块管理包括导频信号发送在内的与用户直接通信的相关功能，进程模型如图 3.16 所示。

在该进程模型中，仅包含一个非强制的 IDLE 状态，表示卫星长时间处于的状态。当有数据包到达或者自中断触发时，进程核心会短暂跳到其他状态进行处理，然后马上跳回 IDLE 状态，等待下一个事件。各状态的转移条件如表 3.3 所示。

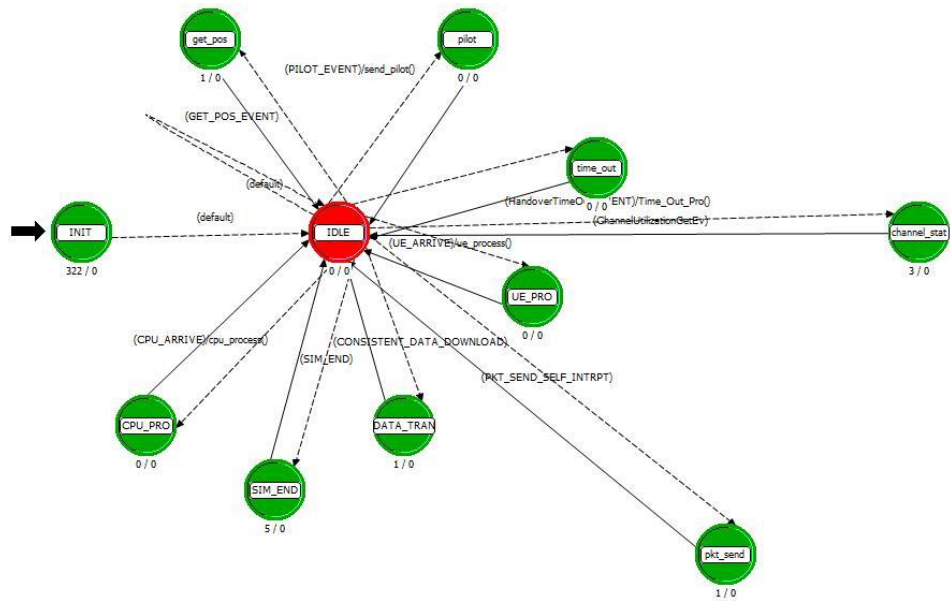


图 3.16 低轨卫星节点波束进程模型

表 3.3 低轨卫星节点波束进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
IDLE	pilot	导频自中断触发（每隔一个周期触发一次）
	get_pos	位置扫描自中断触发（每隔一个周期触发一次）
	time_out	用户切换相关计时器超时

channel_stat	信道统计自中断触发（每隔一个周期触发一次）
pkt_send	PDCCH 包发送自中断触发
UE_PRO	收到来自用户的包
CPU_PRO	收到来自卫星 CPU 的包
SIM_END	仿真结束

pilot 状态：向用户发送导频信息。

get_pos 状态：获取当前卫星的位置。

time_out 状态：释放用户占用资源。

channel_stat 状态：统计当前波束信道占用情况。

UE_PRO 状态：处理来自用户终端节点的数据。

pkt_send 状态：通过 PDCCH 发送数据包。

CPU_PRO 状态：处理来自处理器进程的数据。

SIM_END 状态：进行仿真结果汇总。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static void send_pilot()**：导频发送函数，通过导频相关的自中断事件触发而调用，函数末尾会再度重置自中断，实现周期发送导频的机制。其中，卫星导频产生及发送的主要算法如表 3.4 所示。

表 3.4 卫星导频产生及发送算法

卫星导频产生及发送	
1: Input: pilot_event	//导频自中断触发
2: pkptr = op_pk_create_fmt ("leo_ue_connect_command")	//创建卫星导频包
3: op_pk_nfd_set(pkptr, "TYPE", CON_UE)	//主类型为用户连接
4: op_pk_nfd_set(pkptr, "Sub_TYPE", UE_CONNECT_COMMAND)	//子类型为连接请求
5: op_pk_nfd_set(pkptr, "SAT_id", sat_id)	//写入当前卫星序号
6: op_pk_nfd_set(pkptr, "Beam_id", beam_id)	//写入当前波束序号
7: op_pk_nfd_set(pkptr, "PRACH_Fre", up_channel_fre[0])	//写入当前信道接收频率
8: op_pk_nfd_set(pkptr, "PBCH_Fre", down_channel_fre[0])	//写入当前信道发送功率
9: op_pk_deliver(pkptr,xmit_id,0)	//通过 0 号公共信道发送
10: pilot_event = op_intrpt_schedule_self(op_sim_time()+1.0, 0)	//设置下次导频自中断时间

(2) **static char* get_name(Objid id)**：获取对象的名称，输入参数为对象 id，通过 op_id_类型核心函数获取的对象 id。

(3) **rate_map_from_SINR_ShannonEquation(sinr)**: 通过香农公式将信干噪比映射为信道容量的函数, 并把信道容量当做链路速率。

(4) **static int Area_covered(double area_longitude, double area_latitude)**: 判断当前时刻, 地面上某个点是否在本波束的覆盖范围之内, 输入参数为该地面点的经纬度, 返回值为 1 时表示被覆盖, 为 0 表示不在覆盖范围内。

(5) **static int search_for_down_channel()**: 为用户寻找一个下行信道, 当信道没有被用户占用且没有被关闭时可以被输出, 如果没有找到则输出-1。

(6) **static int search_for_up_channel()**: 查找上行信道, 输出值为 2-79。

(7) **static int search_for_channel(int ue_id, int *up_channel_index, int *down_channel_index)**: 为用户寻找频率资源, 只有同时找到一个空闲的上行信道和一个空闲的下信道时才能算作找到资源, 否则输出-1。

(8) **static void Time_Out_Pro()**: 切换过程-星上计时器超时处理。

(9) **static void Initialize_User_TrafficConfigurationInformation(int index)**: 用户传输配置初始化, 用户信息被删除或释放时调用此函数以释放配置空间。

(10) **static void ue_process()**: 处理来自用户节点的信息, 主要是接入过程和切换过程的信令、CQI 上报的处理以及转发业务请求。

(11) **static void Frequency_management_new()**: 实现频谱管制的函数, 每过一段时间(系统默认 5s, 通过改变 get_sat_position()函数自中断时间进行调整)查询本波束是否进入被管制区域。如果进入, 则关闭响应频率; 如果用户正在使用该频率, 则发起波束内信道切换; 如果离开管制区域则重新打开被管制的频率。

(12) **static void cpu_process()**: 处理从卫星 CPU 即 processor 来的包, 主要包含移动性管理的信令处理和转发, 数据包的缓存和发送, 用户队列子进程的创建、删除、唤醒, 用户上下文的删除和创建, 频谱管制信息的写入和删除, 以及卫星频率控制信令的执行。

(13) **static void User_Data_Transfer(int ue_id, Packet *pkptr)**: 包发送函数, 将数据包插入到用户对应的队列, 等待发送。

(14) **static void User_ChildProcess_Create(int ue_id)**: 用户子进程创建, 查询一个空余的用户业务进程对象, 将用户 ID 写入这个对象的 ue_id 元素, 并且把对象中的进程句柄进行创建, 创建用户对应的子进程, 用 ue_id 来标志这个子进程,

每个用户使用不同的子进程。

(15) **static void User_ChildProcess_Free(int ue_id):** 删除用户子进程，一般是用户重新接入后，由 NCC 发起对存有该用户信息的卫星进行缓存清除。

(16) **static void User_ChildProcess_Free_With_Data_Forward(int ue_id, Packet *pkptr):** 用于当下发切换命令 HANDOVER_COMMAND 时，源卫星停止下行数传，并且开启数据前传，将数据前传给目的卫星，当数据前传完毕后，释放进程空间，通过数据前传降低丢包率。

(17) **static void PDCCH_packet_send(Packet *pkptr):** 将 PDCCH 发送的包放到其专属队列中，等待传输。

(18) **static void packet_send(int subq_index):** 队列发送函数，以 index 作为队列索引，如果队列非空，则将队列头部取出，进行发送，并且具有传输时延功能。

(19) **static void down_channel_utilization_get():** 每隔一段时间查询一次下行信道的使用率和占用数。

(20) **static void up_channel_utilization_get():** 每隔一段时间查询一次，上行信道的使用率和占用数。

3. 处理器模块

该模块主要用于完成数据包的处理，进程模型如图 3.17 所示。

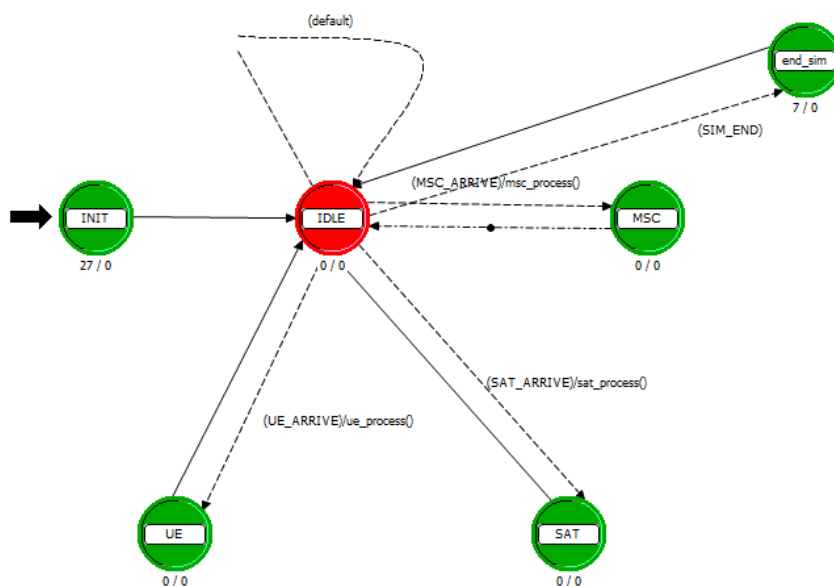


图 3.17 低轨卫星节点处理器进程模型

在该进程模型中，仅有一个非强制状态，主要完成用户的注册，同时记录用户

的波束。当有用户的数据包到达的时候，找到用户驻留的波束，将其发送给响应的波束模块，状态转移条件如表 3.5 所示。

表 3.5 低轨卫星节点处理器进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
IDLE	MSC	收到来自于 MSC 模块的包
	UE	收到来自波束模块的包
	SAT	收到来自星间链路模块的包
	end_sim	仿真结束

MSC 状态：处理来自馈电链路进程的数据。

UE 状态：处理来自波束进程的数据。

SAT 状态：处理来自星间链路进程的数据。

end_sim 状态：进行仿真结果汇总。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static int min_distance(int sat1, int sat2):** 判断本卫星和两颗目的卫星的距离，选择更近的一颗。

(2) **static void msc_process():** 从 MSC 来的数据包的处理，获取连接到 MSC 的卫星信息，包含信令的处理，信令和数据包的路由（查询用户属于哪个波束），删除或者写入用户驻留的波束信息，频谱管制广播信息的控制。

(3) **static void sat_process():** 从 SAT 来的数据包的处理，大致与上个函数相同，只不过数据包经历了多跳卫星而不是直接来自于 MSC。

(4) **static void ue_process():** 前传数据包的转发，将波束模块发来的前传数据包发送目的波束或者发送到星间链路模块。进行移动性管理数据包的处理和转发，如用户注册，切换确认包的处理以及业务请求，资源释放，上下文删除，跨卫星站切换请求等。

(5) **static int Count_User_in_Beam(int ue):** 计算驻留在本卫星下的用户数量，用于统计量的搜集。

4. 星间链路模块

星间链路模块用于完成星间路由，进行星间信令包和数据包的传输。此模块的进程模型和状态转移条件分别如图 3.18 和表 3.6 所示。

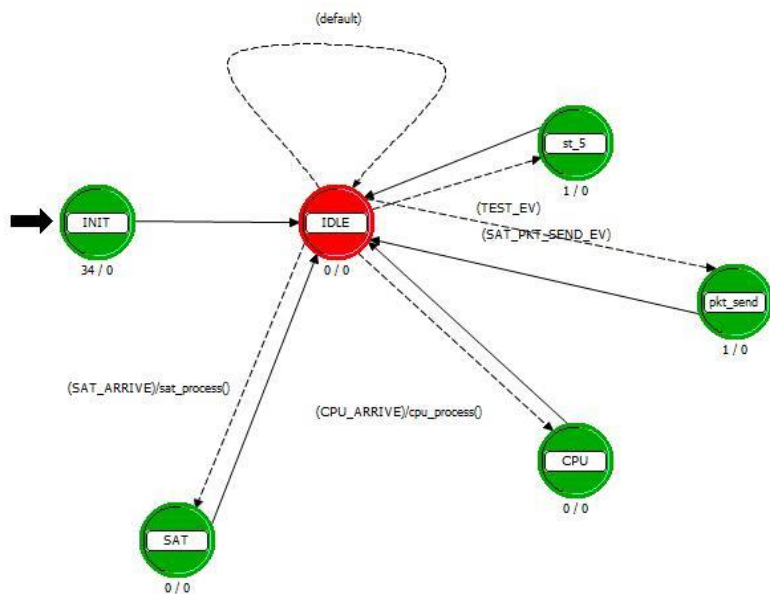


图 3.18 低轨卫星节点星间链路进程模型

表 3.6 低轨卫星节点星间链路进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
IDLE	pkt_send	队列机制下，发包的自中断触发
	CPU	收到来自卫星 CPU 模块的包
	SAT	收到来自星间链路的包

pkt_send 状态：通过队列进行数据包发送。

CPU 状态：处理来自处理器进程的数据。

SAT 状态：处理来自其它低轨卫星节点的数据。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static int min_distance(int sat1, int sat2)**: 计算两颗卫星中距离最近的卫星，该函数的算法如表 3.7 所示。

表 3.7 最近卫星选择算法

最近卫星选择
1: Input: sat_1 , sat_2 //输入两颗卫星的序号
2: $d_1 = \text{pow}(\text{node_orbit_num} - sat_1 / 100, 2) + \text{pow}(\text{node_serial_num} - sat_1 \% 100, 2)$ //计算当前卫星距离卫星 1 的大小
3: $d_2 = \text{pow}(\text{node_orbit_num} - sat_2 / 100, 2) + \text{pow}(\text{node_serial_num} - sat_2 \% 100, 2)$ //计算当前卫星距离卫星 2 的大小
4: if $d_1 < d_2$ //如果距离卫星 1 更近
5: return sat_1 //返回卫星 1 的序号

```
6: end if
7: else    //如果距离卫星 2 更近
8:     return sat2    //返回卫星 2 的序号
9: end else
```

(2) **SatPacketTransfer()**: 将数据进行排队传输, 防止输出的数据包和信令包拥塞。无论是数据包还是信令包, 都需要先判断当前队列中是否存在正在进行传输的包。若有包在传输中, 则将新到达的包插入对应的信道队列队尾中进行排队; 若无正在进行传输的包, 则将包插入队列队尾, 并调用 `packet_send_ev` 事件进行数据发送。

(3) **SatPacketSend()**: 与 `SatPacketTransfer()` 函数配合实现队列数据发送。首先判断队列是否为空, 若队列不为空, 则从队列头部取出包进行发送。同时, 分别计算数据包和信令包的传输时延 (利用包大小及信道传输速率计算), 在下一次调用 `packet_send_ev` 事件时的仿真时间中加入传输时延, 保证上一个包一定发送完成, 防止信道拥塞。

(4) **sat_process()**: 判断目的卫星 id 是否为当前卫星。若是, 则转发包至 CPU 态进行处理; 否则, 通过 `routing()` 路由函数进行下一跳卫星地址计算, 加入队列后进行发送。

(5) **cpu_process()**: 将从 CPU 进程中发来的包通过星间路由转发至目的卫星。

(6) **routing()**: 路由寻址。

5. 馈电链路模块

馈电链路模块负责完成低轨卫星和移动交换中心之间链路的建立和保持, 以及两者之间信令和数据的传输。当某颗卫星接入移动交换中心时, 为了使整个卫星网络获取当前已更新后的状态, 该模块负责对其它全部卫星发起广播通告, 进程模型和状态转移条件分别如图 3.19 和表 3.8 所示。

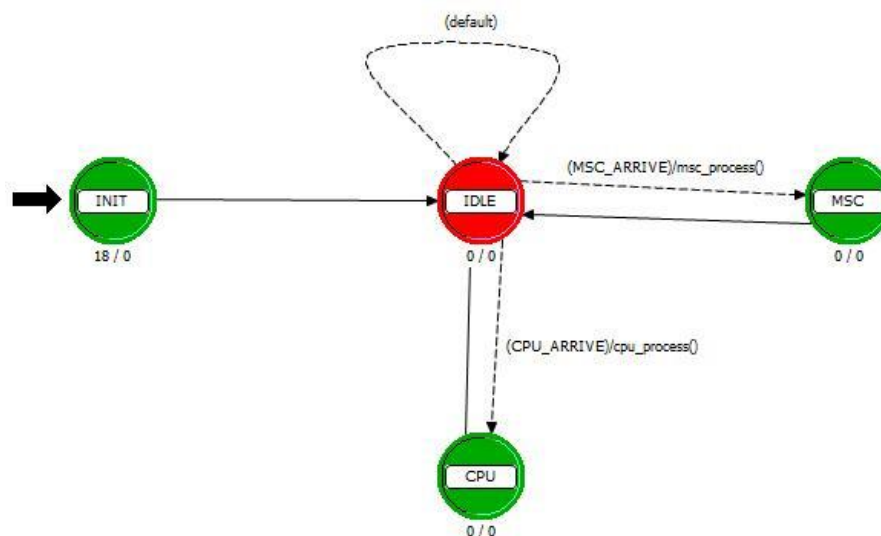


图 3.19 低轨卫星节点馈电链路进程模型

表 3.8 低轨卫星节点星间链路进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	转移条件
IDLE	MSC	收到来自于 MSC 的包
	CPU	收到来自于卫星 CPU 的包

MSC 状态：处理来自移动交换中心节点的数据。

CPU 状态：处理来自处理器进程的数据。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static void msc_process()**: 从 MSC 到来的包处理函数，如果是 CON 类型的包，表示为 MSC 和卫星连接类型的数据包，本模块将其处理； 将其他包传给 CPU 模块，并对星间链路传输的包将“HOP_NUM”值设置为 1，表示星间链路跳数。如果当卫星接入到 MSC 时发起广播，在“SN”字段写入广播序列号，防止广播风暴。

(2) **static void cpu_process()**: 从 CPU 到来的包处理函数，通过馈电链路转发给 MSC。

6. 馈电链路收发机模块

在该模块中，接收机共分为两个信道，0 号信道为低轨卫星与移动交换中心间的导频信道，1 号信道为控制、数据信道，如图 3.20 所示。发送机同样分为两个信道，与接收机相对应，如图 3.21 所示。

	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	processing gain (dB)
0	19,200,000	leo_connect_m...	10	45	disabled	channel bw/dr
1	19,200,000	leo_connect_m...	10	45.5	disabled	channel bw/dr

2 Rows Delete Insert Duplicate Move Up Move Down Details Promote ☒ Show row labels OK Cancel

图 3.20 馈电链路接收机参数

	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)	bit capacity (bits)	pk capacity (pks)
0	19,200,000	leo_connect_m...	10	50	disabled	100	infinity	1,000
1	19,200,000	leo_connect_m...	10	50.5	disabled	100	infinity	1,000

2 Rows Delete Insert Duplicate Move Up Move Down Details Promote ☒ Show row labels OK Cancel

图 3.21 馈电链路发送机参数

7. 星间链路收发机模块

在该模块中，接收机中共有两个信道。0 号信道为卫星间的控制信道，用于传输卫星自身的数据。1 号信道为数据信道，用于传输用户的数据，如图 3.22 所示。发送机中同样也包含两个信道，各信道功能分别与接收机的两个信道相对应，如图 3.23 所示。

	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	processing gain (dB)
0	19,200,000	leo_connect_m...	10	40	disabled	channel bw/dr
1	19,200,000	leo_connect_m...	10	41	disabled	channel bw/dr

2 Rows Delete Insert Duplicate Move Up Move Down Details Promote ☒ Show row labels OK Cancel

图 3.22 星间链路接收机参数

	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)	bit capacity (bits)	pk capacity (pks)
0	19,200,000	leo_connect_m...	10	40	disabled	100	infinity	1,000
1	19,200,000	leo_connect_m...	10	41	disabled	100	infinity	1,000

2 Rows Delete Insert Duplicate Move Up Move Down

图 3.23 星间链路发送机参数

3.3.3 移动交换中心节点模型

移动交换中心节点作为管理低轨卫星运行并且与网络控制中心相连接的节点，

主要由 MSC—卫星收发机模块、MSC—卫星模块、MSC 处理器模块 4 部分组成，节点模型如图 3.24 所示。

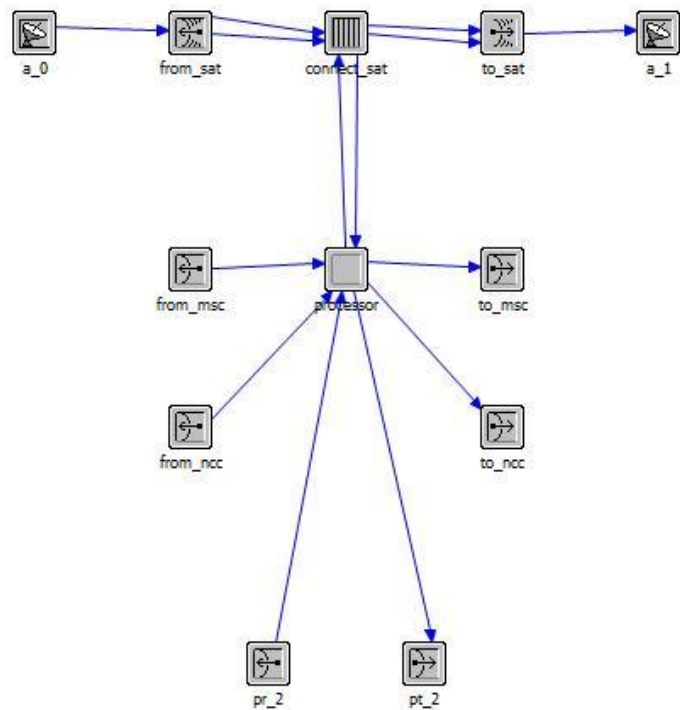


图 3.24 移动交换中心节点模型

1. MSC—卫星收发机模块

在 MSC—卫星接收机模块中，包括 2 个接收信道，其频率和带宽固定，如图 3.25 所示。其中，第 0 号信道用于 MSC 和卫星建立连接和保持连接（如接收广播信号和导频信号），第 1 号信道用于 MSC 和卫星之间传输信令和数据。MSC—卫星发送机模块与接收机相同，所有用户的数据和信令都在第 1 号信道中发送，如图 3.26 所示。

(channel) Table

	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)	bit capacity (bits)	pk capac
0	19,200,000	leo_connect_m...	10	45	disabled	100	infinity	1,000
1	19,200,000	leo_connect_m...	10	45.5	disabled	100	infinity	1,000

2 Rows

DeleteInsertDuplicateMove UpMove Down

DetailsPromoteShow row labels

OKCancel

图 3.25 MSC—卫星接收机参数

(channel) Table								
	data rate (bps)	packet formats	bandwidth (kHz)	min frequency (MHz)	spreading code	power (W)	bit capacity (bits)	pk capac
0	18,200,000	leo_connect_m...	10	45	disabled	100	infinity	1,000
1	18,200,000	leo_connect_m...	10	45.5	disabled	100	infinity	1,000

图 3.26 MSC—卫星发送机参数

2. MSC—卫星模块

MSC—卫星模块负责建立和维护馈电链路，采用队列发送机制发送和用户相关的信令和数据。在数据包传输时，该模块能够依靠路由，找到用户当前时刻的归属卫星，进程模型如图 3.27 所示。

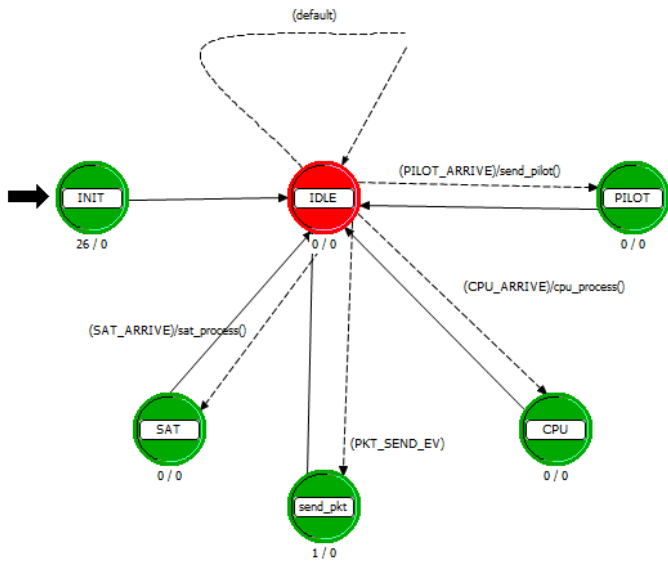


图 3.27 移动交换中心节点 MSC—卫星进程模型

该进程模型分为初始化和 IDLE 两个状态，状态转移条件如表 3.9 所示。其中，IDLE 状态负责数据包的传输，完成队列机制，以及单信道的情况下的轮询调度。

表 3.9 移动交换中心节点 MSC—卫星进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
IDLE	SAT	从馈电链路上收到来自低轨卫星的包
	CPU	收到来自于 MSC 的处理器模块的包
	send_pkt	队列机制下，发包自中断触发

PILOT

馈电链路导频信号发射事件到来

SAT 状态：处理来自低轨卫星节点的数据。

CPU 状态：处理来自处理器进程的数据。

send_pkt 状态：通过队列发送数据包。

PILOT 状态：向低轨卫星发送导频信息。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static void send_pilot()**: MSC 向卫星发射导频信号，建立连接和保持连接。

(2) **static void sat_process()**: 处理来自卫星节点的数据，包括完成和卫星的连接建立和切换、信令和数据包的透明传输、在用户的业务请求包经过时创建用户的链路信息。

(3) **static void cpu_process()**: 处理来自 CPU 模块的数据，包括信令和数据的透明传输、获取 NCC 发来的路由修改信息、更改用户的驻留卫星信息使数据包能够正确地知道用户当前时刻的驻留卫星。

(4) **static int Query_routing(int ue_id)**: 通过星间路由寻找用户终端当前连接的卫星序号。

(5) **static void PKT_transfer(Packet *pkptr)**: 将收到的信令包或数据包存入队列当中。

(6) **static void PKT_SEND()**: 将数据包从队列中发送出去，该发送方式为轮询调度，并且信令包相对于数据包拥有更高的发送优先级。

3. MSC 处理器模块

该模块主要完成用户和网络控制中心之间信令的传输，以及用户端和服务端之间的数据传输。该模块也能够发起对卫星的频率及路由控制，以及发送对地面区域频谱管制信息，进程模型如图 3.28 所示。

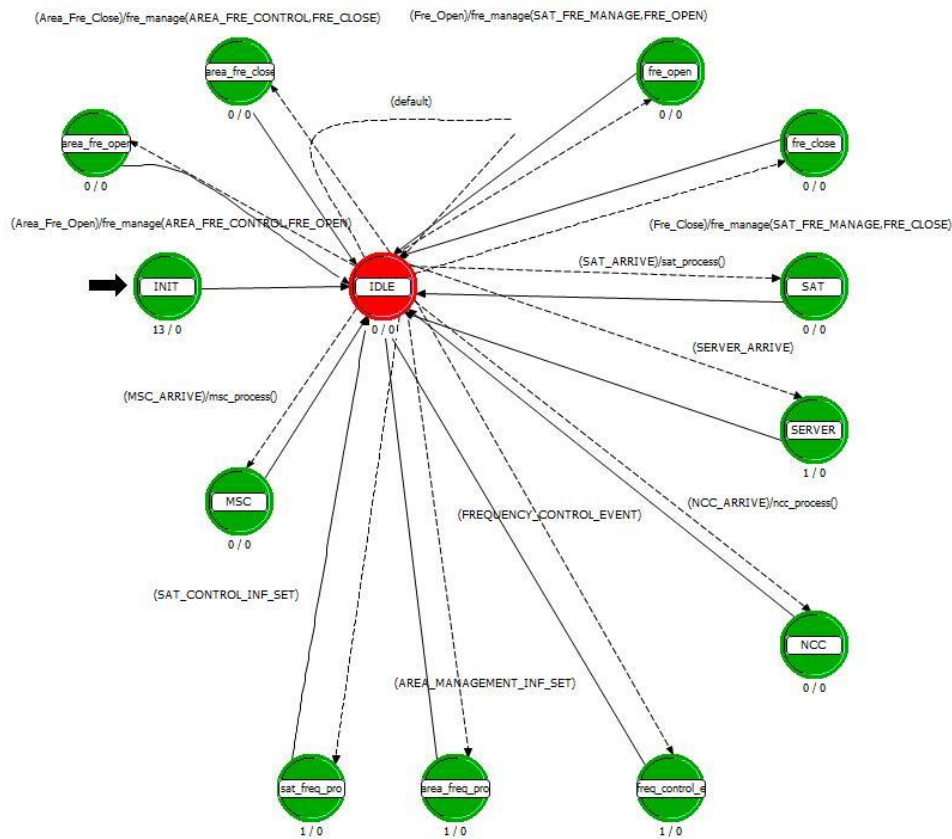


图 3.28 移动交换中心节点 MSC 处理器进程模型

该进程模型同样分为初始化和 IDLE 两个状态,状态转移条件如表 3.10 所示。其中, IDLE 状态主要负责进行数据包的传输,以及发送频谱管制信息和卫星频率控制信息。

表 3.10 移动交换中心节点 MSC 处理器进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
IDLE	area_fre_open	频谱管制信息删除事件到达
	area_fre_close	频谱管制信息写入事件到达
	fre_open	卫星波束频率打开事件到达
	fre_close	卫星波束频率关断事件到达
	SAT	收到来自馈电链路模块的包
	SERVER	收到来自 server 的数据包
	NCC	收到来自 NCC 的信令包
	freq_control_ev_come	频率管控事件到达
	area_freq_pro	频谱管制事件触发
	sat_freq_pro	卫星频率控制事件触发
	MSC	收到来自另一个 MSC 发来的包

area_fre_open 状态：通过广播打开某一地区卫星波束。

area_fre_close 状态：通过广播关闭某一地区卫星波束。

fre_open 状态：打开某一频率的卫星波束。

fre_close 状态：关闭某一频率的卫星波束。

SAT 状态：处理来自 MSC—卫星进程的数据。

SERVER 状态：处理来自服务器端的数据。

NCC 状态：处理来自网络控制中心节点的数据。

freq_control_ev_come 状态：进行卫星波束频率管理。

area_freq_pro 状态：进行某一地区的卫星波束管理。

sat_freq_pro 状态：进行卫星波束的频谱管制和外部信息写入。

MSC 状态：处理来自其它移动交换中心节点的数据。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static void sat_process()**：来自卫星的包处理函数。

(2) **static void ncc_process()**：来自 NCC 的包处理函数。

(3) **static void fre_manage(int type,int operation)**：在 MSC 处理器模块配置的频率管理函数,type 为枚举值,为 SAT_FRE_MANAGE 时表示对卫星的频率管理,打开或者关闭某个特定卫星特定波束的特定频率,为 AREA_FRE_CONTROL 时,表示频谱管制功能,对某个经纬度的部分频率进行管控.Operation 取值为枚举值,为 FRE_OPEN 时表示打开卫星频率或者删除频谱管制信息,FRE_CLOSE 表示关闭卫星频率或者写入频谱管制信息。

(4) **static void server_pro()**：来自服务器端的数据包处理函数。

(5) **static void sat_freq_control_ici_pro()**：通过程序间接口获得外部节点配置的卫星频率控制信息,并根据事件的起止时间自动设置自中断,在指定的时间关闭某卫星频谱和重开频谱。

(6) **static void area_management_ici_pro()**：通过程序间接口获得外部节点配置的区域频谱管制信息,并根据事件的起止时间自动地设置自中断,并在指定的时间给全网写入频谱管制信息和删除频谱管制信息。

(7) **static void Frequency_Control_Event_Pro()**：执行上述事件的函数,根据保存的配置信息对频率管理包进行设置并发送。

3.3.4 网络控制中心节点模型

网络控制中心节点是整个系统的控制核心，主要负责进行移动性管理、用户信息注册及保存，帮助移动交换中心进行卫星路由更新，节点模型和进程模型分别如图 3.29 和 3.30 所示。

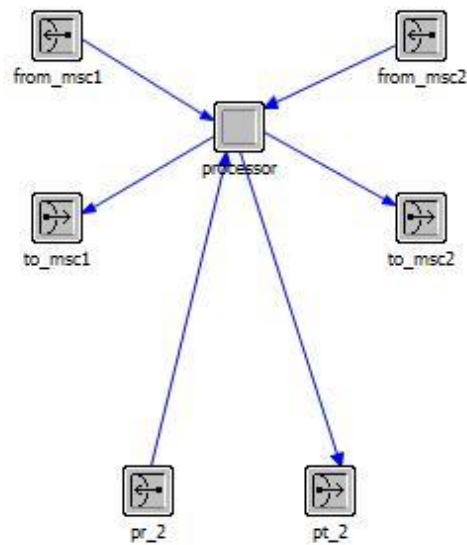


图 3.29 网络控制中心节点模型

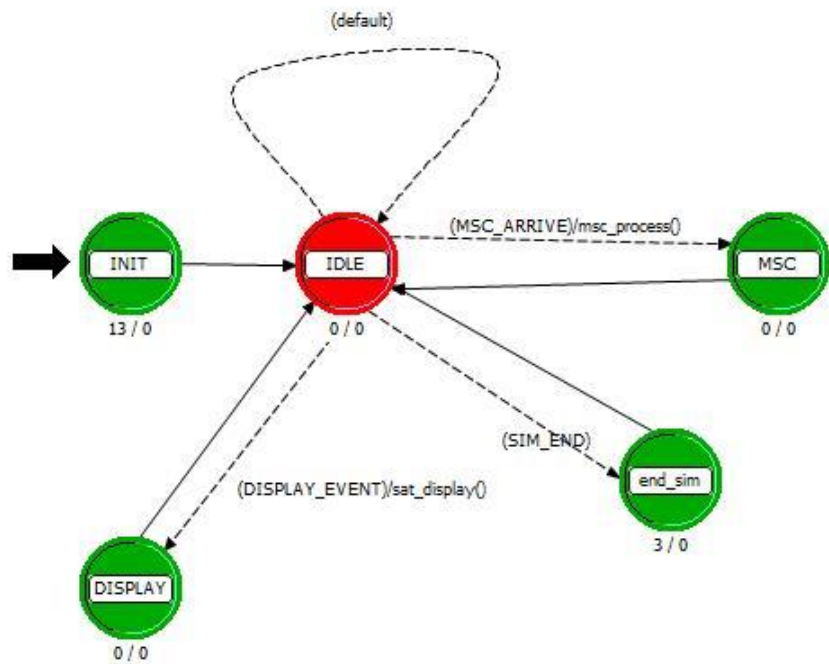


图 3.30 网络控制中心节点进程模型

该进程模型分为初始化和 IDLE 两个状态，状态转移条件如表 3.11 所示。其中，初始化状态负责完成统计量注册，IDLE 状态执行移动性管理功能，负责为移动交换中心修改用户的路由信息。

表 3.11 网络控制中心节点进程模型的转移条件

源状态机	目的状态机	触发条件
IDLE	MSC	收到从两个 MSC 发来的信令包
	End_sim	仿真结束
	DISPLAY	显示自中断触发

MSC 状态：处理来自移动交换中心节点的数据。

End_sim 状态：进行仿真结果汇总。

DISPLAY 状态：显示当前的卫星信息。

以下为该进程模型使用的关键函数说明：

(1) **static void sat_display():** 显示卫星状态。

(2) **static void msc_process():** 来自 MSC 节点的信息处理，主要是移动性管理功能，包含用户数据写入，用户路由变更，以及帮助完成卫星间切换。

3.4 仿真平台卫星多波束天线模型设计

多波束天线是随着近代卫星通信容量的快速增长及多目标区域通信的发展需求而出现的，它向空间辐射的电磁波由多个点波束组成，每个波束都有一个对应的输入（输出）通道。为了满足低轨卫星系统的通信需求，对其进行合理设计是十分必要的。

3.4.1 卫星多波束天线何模型

为了与采用的低轨卫星星座相统一，在本仿真平台中，也采用了“铱星”通信系统的卫星波束模型。在该模型中，每颗卫星有 48 个波束，分布于不同方位，用于实现对不同地区的覆盖，如图 3.31 所示。到目前为止，由于“铱星”系统的卫星天线增益值依然处于保密状态，本仿真平台中的天线增益值采用了近似拟合的方式，即以-3dB 作为天线中心到边缘的分界点。本文采用的波束增益函数模型如下：

$$G(\theta) = \begin{cases} G_m - 3 \times \frac{\theta}{\theta_m}, 0 \leq \theta \leq \theta_m \\ -100, \theta > \theta_m \end{cases} \quad (3.1)$$

其中, G_m 表示天线增益的最大值 (dB), θ_m 表示半波束角。

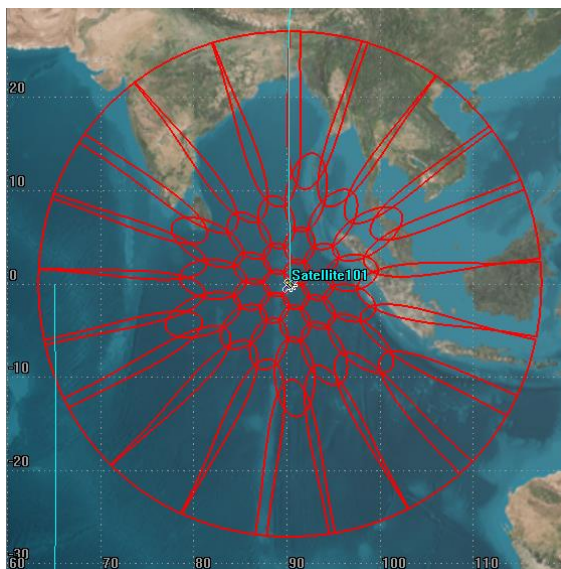


图 3.31 卫星多波束天线覆盖示意图

3.4.2 基于 OPNET 的卫星多波束天线建模

在 OPNET 中，一个天线模型的表示可以分为球面角 **phi** 和 **theta** 两部分值。常量值 **phi** 代表大致的二维圆锥表面，该表面被映射到笛卡尔坐标中，并用一个称为片或层的二维函数来描述。对于每一个二维片，函数的横坐标为 **theta**，纵坐标为相应的增益值。三维天线模型函数可示成一个二维层的集合，如图 3.32 所示。

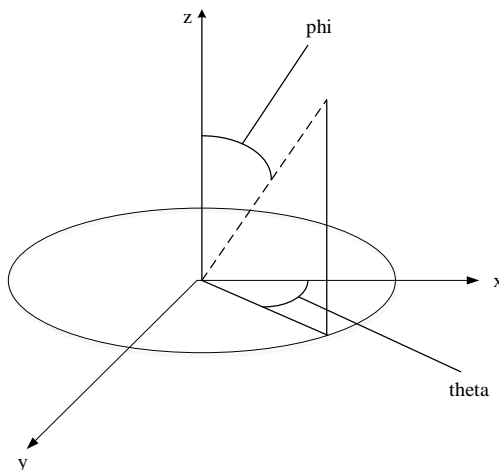


图 3.32 天线模型坐标

OPNET 的天线建模分为图形化建模和文本方式建模两种方式。图形化建模的方式简单方便,但有时不能满足需求,比如要刻画几千个点,或者需要刻画出很精密的概率分布函数调制曲线天线模型。因此,为了进行更精确的进行天线模型建模,本文采用外部模块访问(External Model Access, EMA)方式,通过文本方式建模,使用循环语句来刻画多个特定规格的节点。通过这种方式,能够获得更精确的模型。

在卫星节点中,通过设置多个单波束天线的不同指向,即可实现卫星多波束天线的覆盖。本文的天线建模过程,设计流程如图 3.33 所示。首先根据波束的拓扑排列确定各波束中心点的坐标 (φ_0, θ_0) 和半波束角 ϕ ; 然后计算同一球面上其余各点与波束中心点的夹角 ϕ' ; 根据 ϕ' 和 ϕ 的值判定该点是否处于波束内部; 如果处于波束内部则根据天线辐射角模型计算增益值, 否则增益值设为-100; 最后通过 EMA 机制生成 OPNET 中的天线模型。其中, 波束位置判断及增益设置的算法如表 3.12 所示。

表 3.12 波束位置判断及增益设置算法

波束位置判断及增益设置

```

1: Input:  $\varphi, \theta$  //输入球面上任一点上的坐标
2: Output:  $G(\theta)$  //输出波束增益值
3: Initialization:  $\varphi_0, \theta_0, \phi$  //初始化波束中心坐标和半波束角
4: while( $0 \leq \varphi \leq \pi$ )
5:   while( $0 \leq \theta < 2\pi$ ) //设置球面坐标的取值范围
6:     Calculate  $\phi' = \angle \{(\varphi, \theta), (\varphi_0, \theta_0)\}$  //计算该点与波束中心点的夹角
7:     if( $\phi' < \phi$ ) //如果夹角小于半波束角
8:       Calculate  $G(\theta)$  //根据天线辐射角模型计算增益值
9:     else //如果夹角大于半波束角
10:       $G(\theta) = -100$  //增益值设为-100dB
11:     end if
12:      $\theta = \theta + 0.1$  //设置  $\theta$  循环的步长为 0.1
13:   end while
14:    $\varphi = \varphi + 0.1$  //设置  $\varphi$  循环的步长为 0.1
15: end while

```

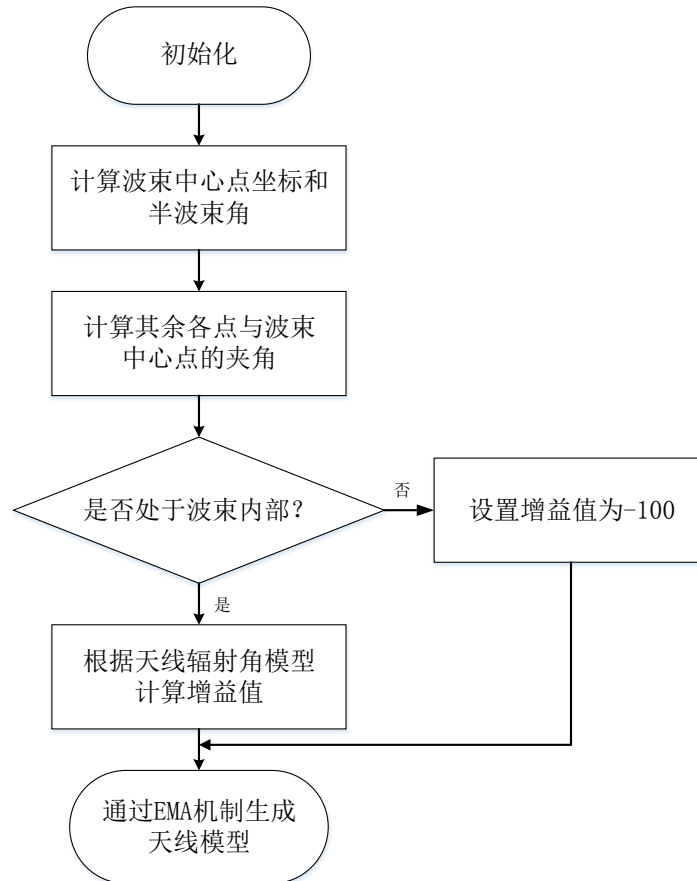


图 3.33 EMA 天线建模流程图

通过上述方式求得每个坐标点的增益值后，即可使用 OPNET 的 EMA 机制生成需要的天线模型，如图 3.34 所示。重复上述步骤，即可生成单颗卫星上的 48 个不同波束。

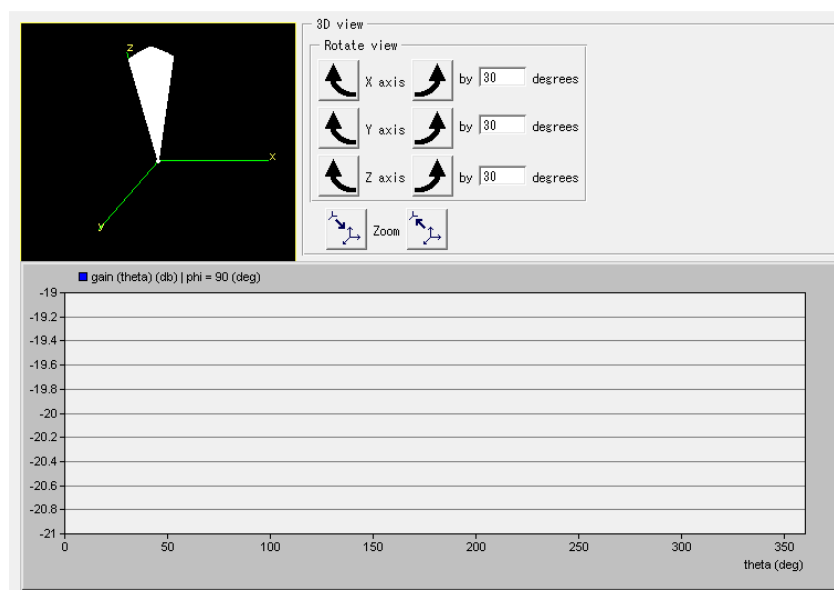


图 3.34 OPNET 天线模型

3.4.3 卫星多波束天线模型仿真分析

为了测试所设计的天线模型是否满足仿真平台的需求，同时也为了获取卫星多波束天线覆盖的任意一点的增益情况，本文基于 OPNET 的 EMA 机制搭建了如图 3.35 所示的仿真场景。

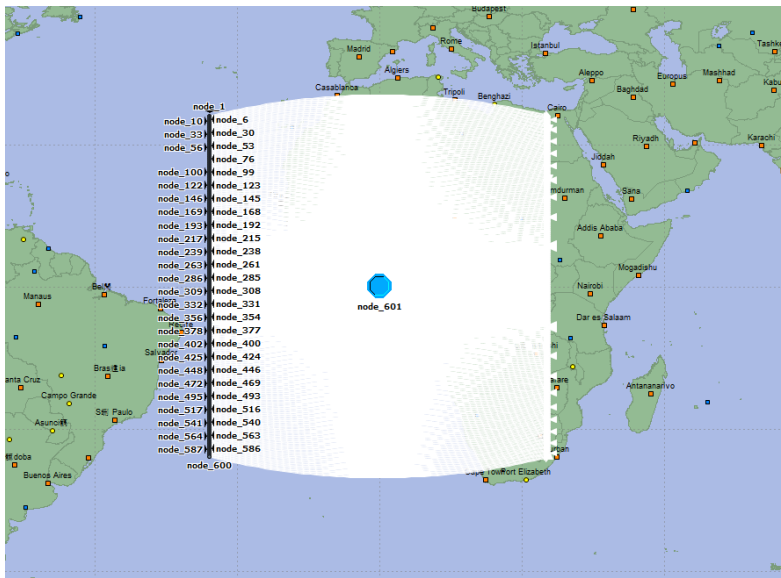


图 3.35 OPNET 天线模型仿真场景

在该场景中，卫星节点被配置在坐标 $(0^{\circ}, 0^{\circ})$ ，高度 781km 的位置并保持不变，每 6 秒通过所有 48 个波束向地面发送数据包。同时，向在西经 30° 且高度为 0km 的位置上，从北纬 30° 到南纬 30° 间以 0.1° 为间隔均匀放置了 600 个移动节点。每个移动节点以每分钟 1° 的速度沿纬线向东运动，通过在不同地区接收卫星信号，得出以下的卫星覆盖区域及接收信号增益图，分别如图 3.36 和图 3.37 所示。

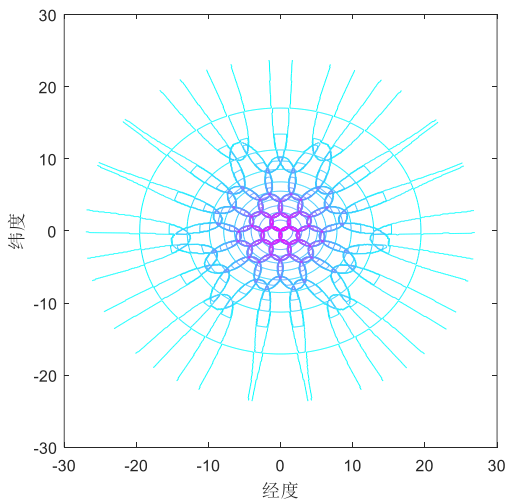


图 3.36 卫星波束覆盖图

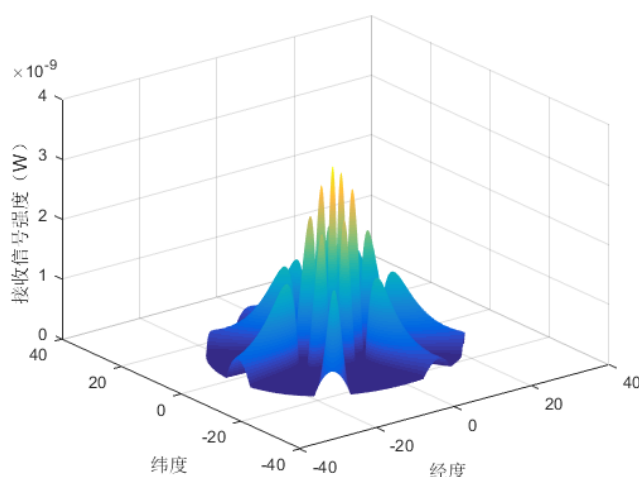


图 3.37 接收信号增益图

从图 3.36 中可以看出，单颗卫星的覆盖范围是一个半径约为 27 个经度（约 2999.7km）的圆形，与图 3.31 中的卫星波束覆盖范围大致相同，表明设计的卫星波束达到了预期设想。同时，从图 3.37 中可以看出，接收信号的增益值由大到小从中心区域向外部递减，也与波束增益函数模型相符。综上所述，本文设计的多波束天线模型能满足该低轨卫星仿真平台的仿真需求。

3.5 本章小结

本章首先对低轨卫星仿真平台进行了需求分析。然后提出了仿真平台的总体框架，包括整体架构和网络拓扑。在此基础上设计了仿真平台中的用户终端、低轨卫星、移动交换中心和网络控制中心等各个节点的节点模型和进程模型，并对每个节点的关键部分进行了说明。最后，通过 OPNET 的 EMA 机制，对低轨卫星节点的多波束天线模型进行了设计，通过搭建仿真场景对设计的多波束天线的覆盖和增益情况进行了仿真。仿真结果表明，设计的多波束天线模型能满足仿真平台的需求。

第4章 低轨卫星移动性管理切换方案研究

低轨卫星通信系统的切换是用户实现连续稳定通信的基础和保障，不同情况下应采取不同的切换方案。本章首先介绍低轨卫星通信系统切换管理的大致阶段，在此基础上，提出并设计一种基于信号强度测量的硬切换方案，包括单卫星内跨波束切换、跨卫星切换和切换失败时用户重置的具体流程和信令格式。然后，论述普通的切换方案在卫星反向缝间传输的局限性，提出并设计一种卫星反向缝间的切换方案。

4.1 低轨卫星通信系统的切换阶段

与地面通信网络不同，由于低轨卫星通信系统的功率较大且信道资源紧张，因此，不适宜采用对用户设备要求过高和占用信道较多的软切换策略。

本文中 UE 的切换流程设计采用硬切换策略，大致分为四个阶段，分别为切换测量、切换决策、切换准备和切换执行，如图 4.1 所示。当切换测量的结果满足切换决策的条件时，就会触发切换准备然后执行切换，最终使用户转移到新的波束或卫星下。在本仿真平台中，用户默认采用参考信号接收功率(Reference Signal Receiving Power, RSRP)的判决方式进行切换。

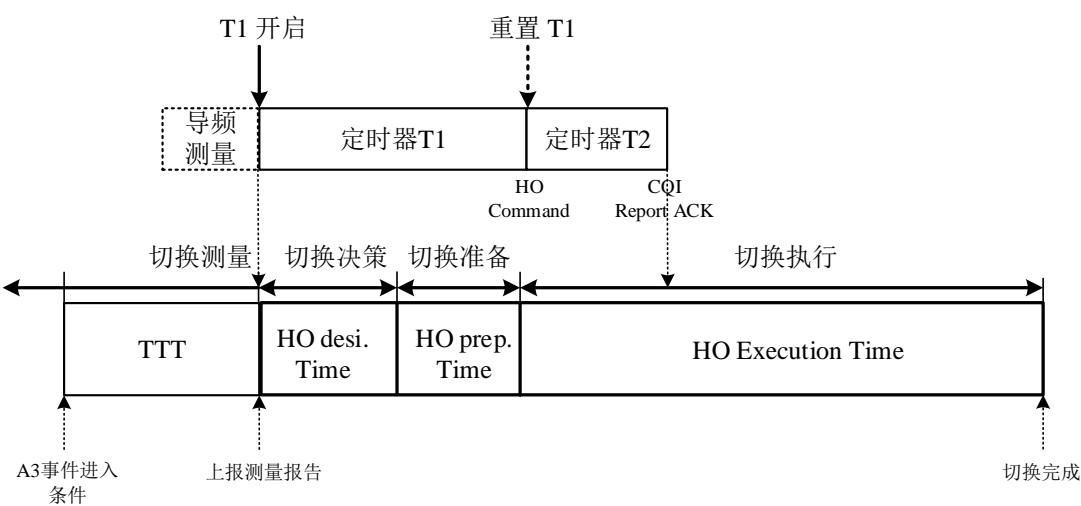


图 4.1 切换阶段定义

在切换测量阶段中，用户周期测量当前使用波束和邻近波束的导频信号或广播信道的信号强度变化以及测量数据信号、邻区干扰信号、噪声信号等，并生成测

量报告以便确定它是否正在穿越相邻波束之间的边界或者处于相邻波束的重叠区内。

在切换决策阶段中,卫星根据用户提供的测量报告,选择合适的目的卫星和目的波束,选择依据包括基于当前波束小区服务质量、基于当前波束小区覆盖情况和基于当前波束小区负载。

在切换准备阶段中,用户通过卫星发送信令至需要切换到的波束或卫星以请求切换,该波束或卫星根据接收到的信息中包含的用户信息,执行接纳控制和无线资源预留,并将该信息传递回用户,确认切换准备完成。

在切换执行阶段中,用户在收到切换命令后能够通过切换接入信息访问新的无线资源。该过程完成后,用户发送切换成功信息,并使源波束删除用户切换前的数据,从而结束整个切换过程。

同时,在地面网络切换过程中,由于存在信道不稳定的因素,导致用户接收到的信号强度存在误差,从而引起乒乓切换。为了解决这一问题,LTE网络中采用了增加TTT(Time To Trig,触发时长)和A3偏置的办法。其中,TTT的作用是保持切换触发状态的稳定,只有当触发切换的条件在TTT内都能够满足时,切换才会发生。而A3偏置的来源是LTE切换中的A3事件,目的是减少因无线信号波动带来的误差,只有当外部信号RSRP值大于当前接入信号的RSRP值加上A3偏置值时才会触发切换。由于本仿真平台中的切换流程也参考了LTE的切换流程,因此也引入了上述两个参数,如图4.2所示。只有当外部波束的导频信号RSRP值大于接入波束的RSRP值加上A3偏置且保持了TTT后,用户才会发起切换。

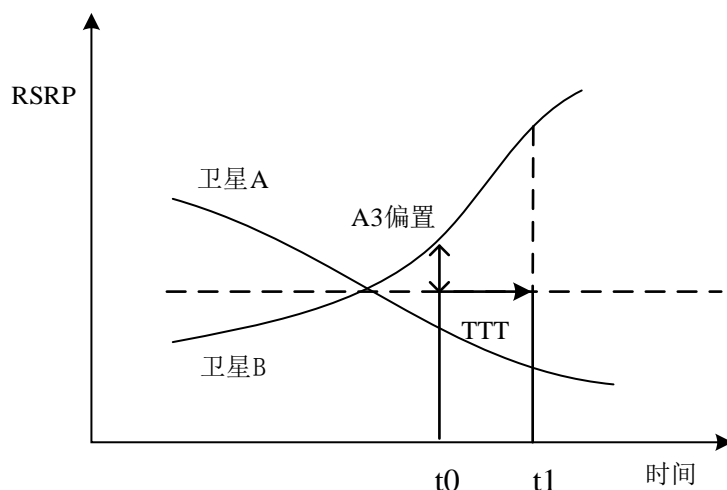


图 4.2 切换触发条件

4.2 基于信号强度测量的硬切换方案

尽管低轨卫星通信系统的切换选择方案有很多,但从实用角度出发,采用最强信号准则进行目标选择最为方便,也能够将单卫星内跨波束间切换和跨卫星间的切换进行统一。同时,由于存在包碰撞等问题,可能导致切换出现失败,还需要对用户进行切换失败重置。

4.2.1 单卫星内跨波束间的用户切换方案

在单卫星内跨波束间的切换中,用户终端只在单颗卫星的不同波束中进行切换,所有的切换决策过程都在单一卫星中完成,不需要通过星间链路和网络控制中心进行用户数据的转发。因此,一次成功的单卫星跨波束间切换的流程如图4.3所示。

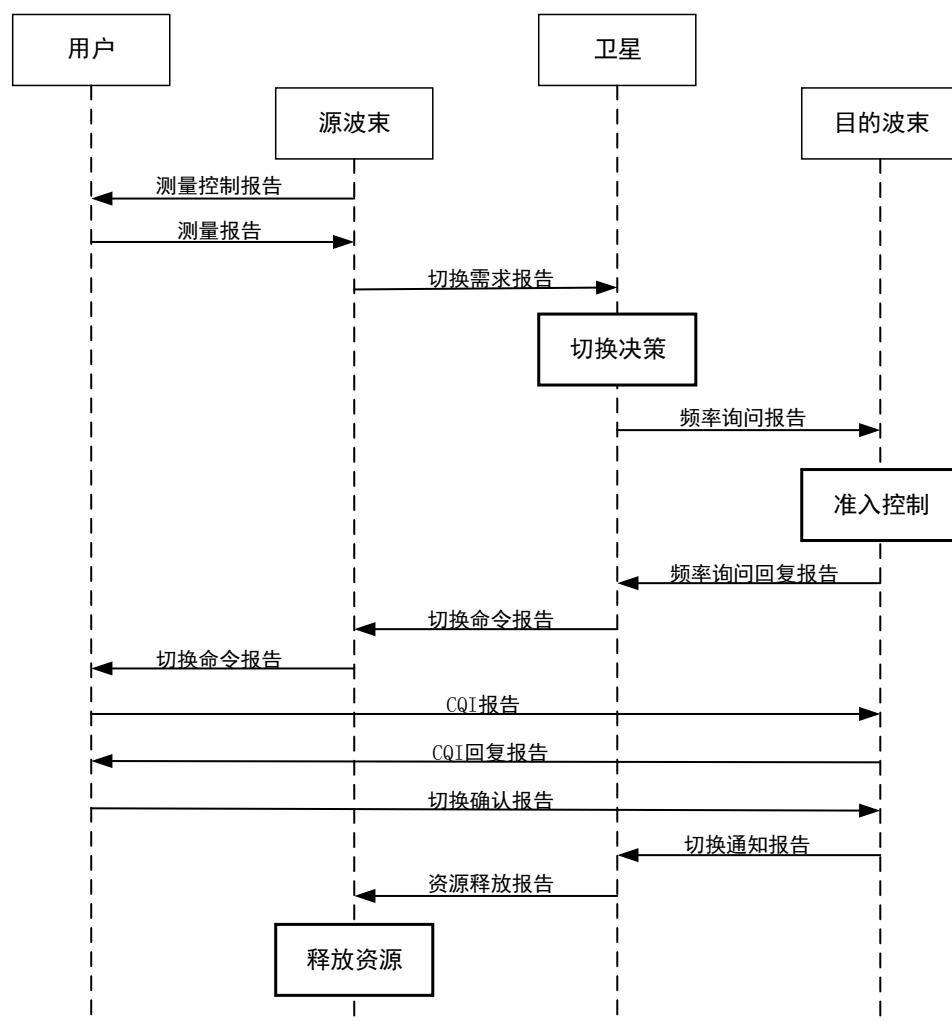


图 4.3 单卫星内跨波束切换流程图

切换流程的详细描述如下：

(1) 卫星的源波束和目的波束周期性的向用户发送测量控制报告，消息格式如表 4.1 所示。用户通过测量此报告的 **RSRP** 值来对源波束和目的波束的信号强度大小进行比较。

表 4.1 测量控制报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	MEASUREMENT_CONTROL	16bit
Sat_id	卫星 id	8bit
Beam_id	波束 id	8bit

其中，“TYPE”字段指明了该消息为移动性管理消息中的切换管理消息(Mobile Management Handover)；“Sub_TYPE”字段指明了该消息的具体种类为测量控制；“Sat_id”为发出该消息的当前卫星 ID 号；“Beam_id”为发出该消息的当前波束 ID 号。

(2) 当用户检测到目的波束的 **RSRP** 值大于当前接入的源波束的 **RSRP** 值时，会触发切换发起的条件，向源波束发送测量报告，报告的消息格式如表 4.2 所示。用户通过此报告发起切换请求。

表 4.2 测量报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	MEASUREMENT	16bit
UE_id	用户 id	8bit
SRC_Sat	源卫星 id	8bit
SRC_Beam	源波束 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

其中，“UE_id”为用户的 ID 号；“SRC_Sat”为源卫星的 ID 号；“SRC_Beam”为目的波束的 ID 号；“DST_Sat”为目的卫星的 ID 号；“DST_Beam”为目的波束的 ID 号。在单卫星内跨波束间切换中，由于切换的源卫星和目的卫星都是同一颗，因此“DST_Sat”的值与“SRC_Sat”的值相同。

(3) 源波束收到来自用户的测量报告后，生成切换需求报告，并向本卫星的中

央处理器发送，报告中包含用户的 ID 及目的波束的 ID 号，消息格式如表 4.3 所示。

表 4.3 切换需求报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	HANDOVER_QEQUIRED	16bit
UE_id	用户 id	8bit
SRC_Sat	源卫星 id	8bit
SRC_Beam	源波束 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

(4) 中央处理器收到源波束发来的报告后，生成频率询问报告并向目的波束发送，消息格式如表 4.4 所示。报告中含有用户的 ID 号，要求目的波束进行资源预留。

表 4.4 频率询问报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	INF_FREQUENCY_ASK	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

(5) 目的波束收到中央处理器发来的消息后，检测当前波束是否存在空闲信道。若存在空闲信道，则将此信道以用户的 ID 号进行锁定，并生成频率询问回复报告。报告中写入此信道的发射频率和接收频率，消息格式如表 4.5 所示，然后向中央处理器进行发送。

表 4.5 频率询问回复报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	INF_FREQUENCY_REPLY	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit
XMIT_FREQ	上行频率	8bit
RCVR_FREQ	下行频率	8bit

其中，“XMIT_FREQ”为当前预留信道的发送频率；“RCVR_FREQ”为当前预留信道的接收频率。

(6) 中央处理器获取到目的波束的回复后，生成切换命令报告，消息格式如表 4.6 所示。中央处理器在报告中写入目的波束的信道发射频率和接收频率，并通过源波束向用户发送。

表 4.6 切换命令报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	HANDOVER_COMMAND	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit
XMIT_FREQ	上行频率	8bit
RCVR_FREQ	下行频率	8bit

(7) 用户收到切换命令报告后，将自身的发射频率和接收频率分别改为报告中信道的接收频率和发射频率，并向目的波束发送 CQI 报告，报告消息格式如表 4.7 所示。用户在此报告中写入自身的 ID 号及该信道的信道质量指示(Channel Quality Indicator, CQI)值。

表 4.7 CQI 报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	CQI_REPORT	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	目的卫星 id	8bit
Beam_id	目的波束 id	8bit
CQI	cqi 值	8bit

其中，“CQI”为当前信道的 CQI 值。

(8) 目的波束收到用户发来的 CQI 报告后，检测当前用户所在环境的信道质量，若质量符合传输要求，则向用户返回 CQI 回复报告，允许用户进行传输通信，消息格式如表 4.8 所示。

表 4.8 CQI 回复报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit

表 4.8（续）

字段名称	取值	长度
Sub_TYPE	CQI_REPORT_ACK	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	目的卫星 id	8bit
Beam_id	目的波束 id	8bit

(9) 用户收到 CQI 回复报告后，生成切换确认报告，消息格式如表 4.9 所示。用户将该报告发往目的波束，以完成用户端的切换过程。

表 4.9 切换确认报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	HANDOVER_CONFIRM	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

(10) 目的波束收到用户发来的切换确认报告后，如果确认报告中用户与预留信道中用户的 ID 一致，则允许 UE 进行接入，生成切换通知报告，消息格式如表 4.10 所示，同时将此报告发往中央处理器。

表 4.10 切换通知报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	HANDOVER_NOTIFY	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

(11) 当中央处理器接到目的波束发来的通知报告后，向源波束发送资源释放报告，在报告中写入用户的 ID 号，要求源波束释放用户所占的信道资源，消息格式如表 4.11 所示。

表 4.11 资源释放报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	RELEASE_RESOURCES	16bit

表 4.11（续）

字段名称	取值	长度
UE_id	用户 id	8bit
SRC_Sat	源卫星 id	8bit
SRC_Beam	源波束 id	8bit

(12) 当源波束收到资源释放报告后，会根据报告中的内容删除对应用户的通道占用信息，将信道清空用于新用户的接入。至此，整个单卫星内跨波束间的切换流程完成。

4.2.2 跨卫星间的用户切换方案

跨卫星间的用户切换方案与上节单卫星内跨波束的用户切换大体相同，不同之处是跨卫星间的切换由于涉及不同的卫星，因此需要 NCC 作为中转站来对用户数据进行转发，切换流程如图 4.4 所示。

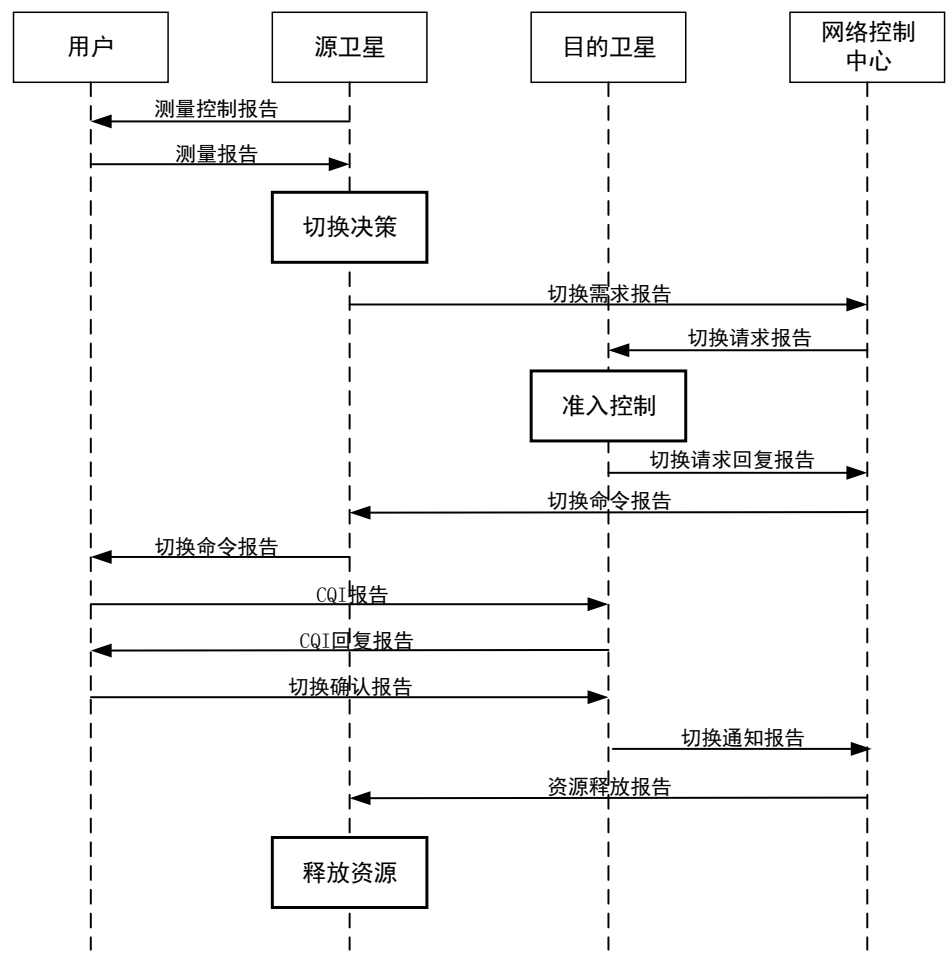


图 4.4 跨卫星间切换流程图

该切换流程的详细描述如下：

(1) 源卫星波束和目的卫星波束周期性的向用户发送测量控制报告，报告消息格式与表 4.1 相同。用户通过测量此报告的 **RSRP** 值来对源卫星波束和目的卫星波束的信号强度大小进行比较。

(2) 当用户检测到目的卫星波束的 **RSRP** 值大于当前接入源卫星波束的 **RSRP** 值时，向源卫星发送测量报告，报告中含有用户的 **ID** 号和目的卫星及波束的 **ID** 号，报告的消息格式与表 4.2 相同。

(3) 源卫星收到用户发来的测量后，根据其内容生成切换需求报告，同时向网络控制中心发送。报告中包含用户的 **ID** 号和目的卫星及波束的 **ID** 号，消息格式与表 4.3 相同。

(4) 网络控制中心收到源卫星的切换需求报告后，生成切换请求报告同时向目的卫星发送。报告中含有用户的 **ID** 号，用于要求目的卫星进行资源预留，消息格式如表 4.12 所示。

表 4.12 切换请求报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	HANDOVER_REQUEST	16bit
UE_id	用户 id	8bit
SRC_Sat	源卫星 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

(5) 目的卫星收到网络控制中心发来的消息后，执行 3.1.1 节中步骤 4 和步骤 5 的操作，获取并锁定空闲信道的资源。然后，目的卫星生成切换请求回复报告同时向网络控制中心进行发送。报告的消息格式如表 4.13 所示，。

表 4.13 切换请求回复报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	HANDOVER_REQUEST_ACK	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

表 4.13（续）

字段名称	取值	长度
XMIT_FREQ	上行频率	8bit
RCVR_FREQ	下行频率	8bit

(6) 网络控制中心获取到目的卫星的切换请求回复后，生成切换命令报告，消息格式与表 4.6 相同。网络控制中心将报告发往源卫星，再由源卫星通过用户当前接入的波束转发给用户。

(7) 用户收到切换命令报告后，将自身的发射频率和接收频率分别改为报告中信道的接收频率和发射频率，同时向目的卫星波束发送 CQI 报告。报告消息格式与表 4.7 相同。

(8) 目的卫星波束收到用户发来的 CQI 报告后，检测当前用户所在环境的信道质量，若质量符合传输要求，则向用户返回 CQI 回复报告，允许用户进行传输通信。报告消息格式与表 4.8 相同。

(9) 用户收到 CQI 回复报告后，生成切换确认报告，消息格式与表 4.9 相同。用户将报告发往目的卫星波束，以完成用户端的切换过程。

(10) 目的卫星收到用户发来切换确认报告后，如果确认报告中用户与预留信道中用户的 ID 号一致，则允许用户进行接入，同时向网络控制中心发送切换通知报告，消息格式与表 4.10 相同。

(11) 当网络控制中心收到目的卫星发来的通知报告后，向源卫星发送资源释放报告，要求源卫星释放用户所占资源，消息格式与表 4.11 相同。

(12) 当源卫星收到资源释放报告后，根据报告中的内容命令用户当前占用的波束删除对应用户的信道占用信息，将信道清空用于新用户的接入。至此，整个跨卫星间的切换流程完成。

4.2.3 切换失败的用户重置方案

由于各种因素可能会导致切换失败，这时需要将用户的连接信息进行重置。本节提出切换失败的用户重置方案。

引起切换失败的原因主要分为以下两种情况：

- 1. 用户在接入新的卫星波束时，由于用户的数目过多，波束中不存在空闲信

道，用户无法获取新的卫星波束的无线资源，导致切换失败。

2. 由于低轨卫星时刻移动，会出现在切换进行的过程中卫星波束的覆盖范围移出了用户的所在位置的情况，导致卫星的切换消息无法送达用户端，从而引起切换失败。

在第一种情况下，由于用户依旧处于波束覆盖范围中，能够继续与当前的卫星波束进行通信，因此会继续停留在当前的卫星波束下，等待下一次导频信号的到来，再次准备进行切换。在第二种情况下，用户无法与当前的卫星波束进行数据传输，会进入离线模式，清空当前连接数据，并尝试与新的卫星重新进行连接，重置流程如图 4.5 所示。

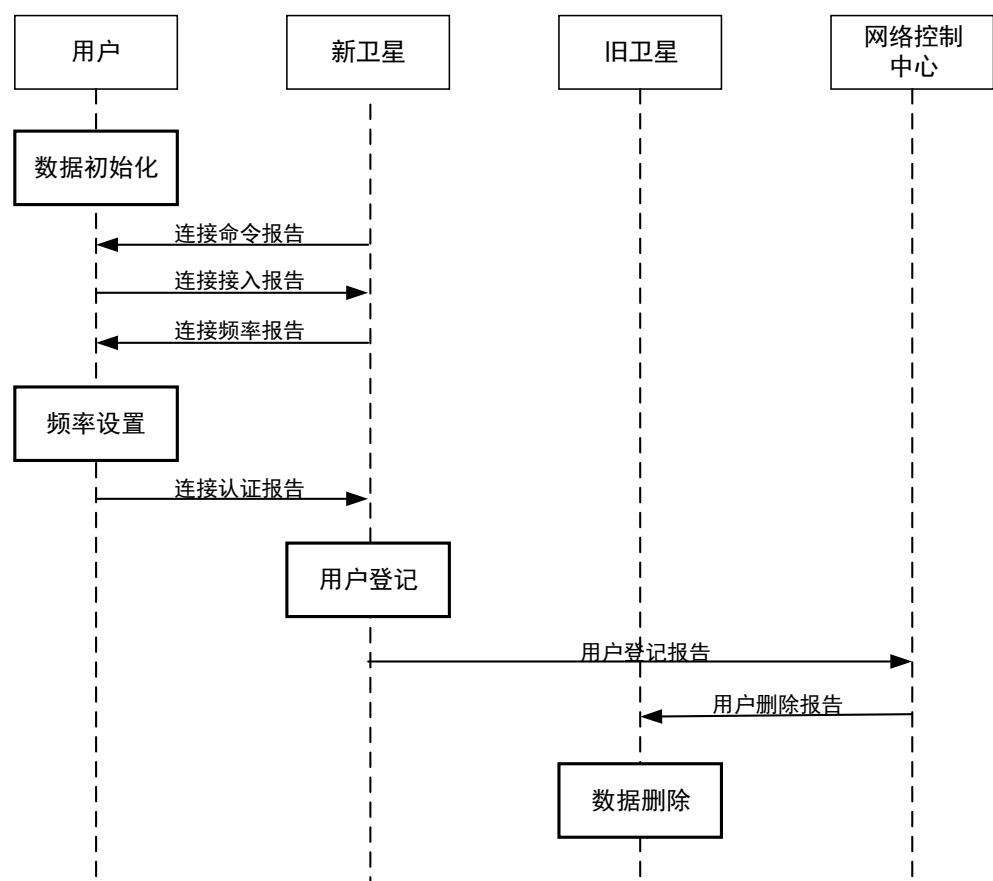


图 4.5 切换失败时用户重置流程图

- 该重置流程的详细描述如下：
- (1) 用户检测到与当前接入的旧卫星波束断开连接时，清除当前的连接信息，包括接入卫星号、接入波束号、信号强度值等，恢复初始化状态。
 - (2) 每个卫星波束周期性通过公共信道向用户发送连接命令报告，在报告中中写入自身的卫星号及波束号，消息格式如表 4.14 所示。

表 4.14 连接命令报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	CON	8bit
Sub_TYPE	CONNECT_COMMAND	16bit
Sat_id	卫星 id	8bit
Beam_id	波束 id	8bit

其中，“TYPE”字段中的 CON 指明了该消息为移动性管理消息中的连接消息(Connect)。

(3) 用户比较多个波束信号的 RSRP 值，选择其中强度最大的信号，通过公共信道向此信号所对应的新卫星波束发送连接接入报告，报告中写入本用户的 ID 号，报告的消息格式如表 4.15 所示。

表 4.15 连接接入报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	CON	8bit
Sub_TYPE	CONNECT_ACCESS	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	卫星 id	8bit
Beam_id	波束 id	8bit

(4) 新卫星收到用户发来的连接接入报告后，检索当前波束是否存在空闲信道，如存在空闲信道，则将此信道的发射频率和接收频率写入连接频率报告中，报告的消息格式如表 4.16 所示。新卫星将该报告发送至当前用户，同时将此信道锁定，以防止被别的用户占用。

表 4.16 连接频率报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	CON	8bit
Sub_TYPE	CONNECT_FREQUENCY	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	新卫星 id	8bit
Beam_id	新波束 id	8bit
XMIT_FREQ	上行频率	8bit
RCVR_FREQ	下行频率	8bit

(5) 用户收到连接频率报告后，根据报告中的内容，将自身的数据信道频率改

为与报告中的信道频率相同,并通过数据信道向新卫星波束发送连接认证报告,报告的消息格式如表 4.17 所示。

表 4.17 连接认证报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	CON	8bit
Sub_TYPE	CONNECT_ AUTHORIZATION	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	新卫星 id	8bit
Beam_id	新波束 id	8bit

(6) 新卫星波束收到用户发来的连接认证报告后,对比报告中用户的 ID 号,若与所占用信道的 ID 号相匹配,则认证成功,将此用户的 ID 号进行登记,同时向网络控制中心发送用户登记报告,在报告中写入用户的 ID 号及本卫星的 ID 号,报告的消息格式如表 4.18 所示。

表 4.18 用户登记报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	CON	8bit
Sub_TYPE	CONNECT_ AUTHORIZATION	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	新卫星 id	8bit

(7) 网络控制中心收到用户登记报告后,根据报告中信息的更新用户的接入消息,同时生成用户删除报告,报告的消息格式如表 4.19 所示。网络控制中心将报告发往旧卫星,通知旧卫星删除用户的信息。

表 4.19 用户删除报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	CON	8bit
Sub_TYPE	UE_ DELETE	16bit
UE_id	用户 id	8bit
Sat_id	旧卫星 id	8bit

(8) 旧卫星收到网络控制中心发来的用户删除报告后,根据报告中的内容查找该用户的信息存储位置,删除占用信息并将其占用的信道资源释放。至此,整个切换失败的用户重置流程完成。

4.3 卫星反向缝间的用户切换方案

通常情况下,上节所述的用户切换方案都能够适用,但在卫星的反向缝轨道间,卫星的状态相对于别的地区有很大的差别。在这一地区若用相同的切换方案,可能会产生与别处不同的结果。因此,在进行用户切换管理时,必须对此种情况进行单独分析。

4.3.1 卫星反向缝简介

与中、高轨卫星不同,低轨卫星由于距离地球近、单颗卫星覆盖面积小等原因,在仅部署少数几颗卫星的情况下难以进行组网通信。因此,目前的低轨卫星通信系统都采用了大数量、广覆盖的方式进行部署。以“铱星”系统为例,在轨运行总共66颗卫星,以每11颗为一个单元平均分布在六个轨道面上。卫星在轨道上运行时,大部分的运行方向都与相邻轨道上的卫星一致。与此同时,也会出现两条特殊的轨道,如“铱星”系统的第一轨道和第六轨道,两条轨道是相邻轨道,但在这两条轨道上运行的卫星运动方向却是相反的。从南极点观测,轨道左侧的卫星是由南向北运动,轨道右侧的卫星是由北向南运动。由于这种现象的存在,这两条轨道之间的地区就被称为反向缝(reverse seam)^[45],如图4.6所示。卫星反向缝是低轨卫星,特别是极轨道卫星才会出现的一种现象。

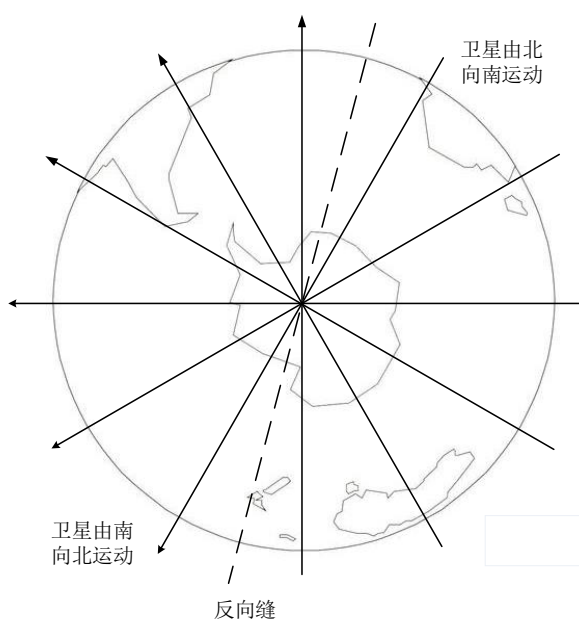


图 4.6 卫星反向缝示意图

4.3.2 卫星反向缝对用户切换的影响

目前,几乎所有的极轨道或类极轨道低轨卫星系统都采用反向缝两侧的卫星分别进行星间路由而忽略直接进行通信的策略。包括文献[46]和文献[47]都提到了卫星反向缝的概念但都没有考虑在反向缝间进行数据传输,而是将整个卫星系统以反向缝为分界线分别在两边进行路由传输。以本文搭建的卫星仿真平台所参考的“铱星”星座为例,该星座同样采用了卫星反向缝轨道两侧的卫星分别进行路由的方式。图4.7为“铱星”系统的星间路由架构。

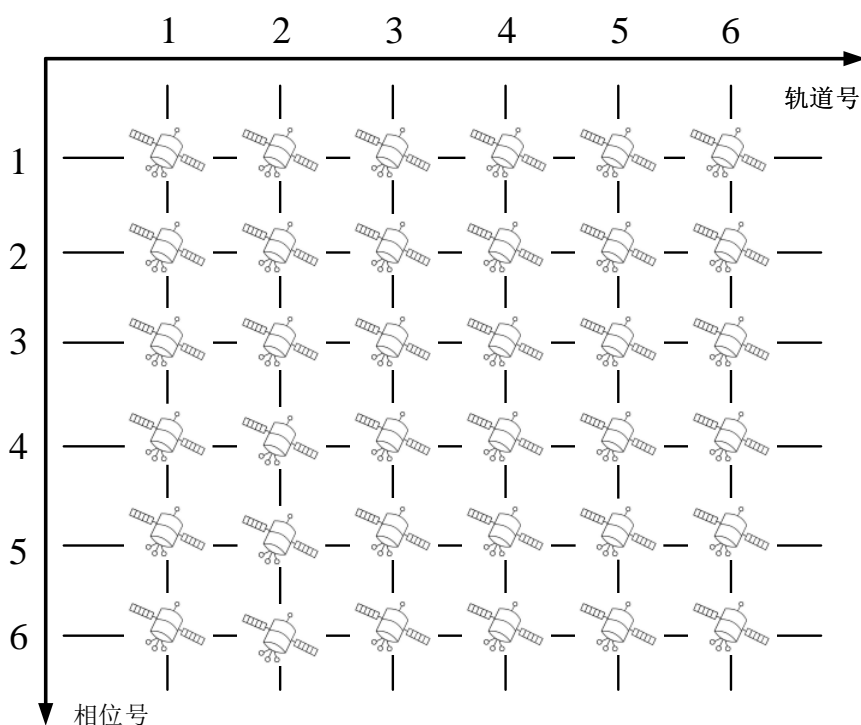


图4.7 “铱星”星间路由架构

如图4.7所示,在该星座中,每颗卫星都与前后左右四颗卫星建立四条星间链路。为了表示每颗卫星在系统中的位置,用一个三位的地址来对每颗卫星进行编制。其中,第一位表示卫星的轨道号(范围是1~6),第二位和第三位表示卫星的相位号(范围是1~11)。例如,第一轨道上的第一颗卫星的编号为101,第六轨道上的第十一颗卫星的编号为611。

当要进行星间路由时,当前卫星会根据自身的卫星序号和目的卫星序号决定下一跳卫星的序号。首先卫星根据轨道号进行横向路由(即决定下一跳卫星的轨道号),然后根据相位号进行纵向路由(即决定下一跳卫星的相位号)。同时,为了

尽可能的减少路由的跳数，卫星会判断纵向路由的方向，即依据距离的远近选择顺时针方向（从1号经5号到11号）或者逆时针（从11号经5号到1号）方向进行路由。该路由寻址算法如表4.20所示。

表4.20 路由寻址算法

路由寻址	
1: Input:	<i>dst_sat</i> //输入目的卫星序号
2: Output:	<i>next_sat</i> //下一跳卫星序号
3: if	<i>node_orbit_num</i> != <i>dst_sat</i> / 100 //如果当前卫星与目的卫星不在同一轨道面
4: if	<i>node_orbit_num</i> < <i>dst_sat</i> / 100 //如果当前卫星轨道面序号更小
5:	<i>next_sat</i> = <i>sat_id</i> + 100 //下一跳卫星为当前卫星序号加100
6: end if	
7: else	//如果当前卫星轨道面序号更大
8:	<i>next_sat</i> = <i>sat_id</i> - 100 //下一跳卫星为当前卫星序号减100
9: end else	
10: end if	
11: else	// 如果当前卫星与目的卫星在同一轨道面
12: if	<i>sat_id</i> - <i>dst_sat</i> < 11 - <i>sat_id</i> - <i>dst_sat</i> //如果不通过1号与11号卫星链路距离更近
13:	if <i>sat_id</i> > <i>dst_sat</i> //如果当前卫星序号更大
14:	<i>next_sat</i> = <i>sat_id</i> - 1 //下一跳卫星为当前卫星序号减1
15: end if	
16: else	//如果当前卫星序号更小
17:	<i>next_sat</i> = <i>sat_id</i> + 1 //下一跳卫星为当前卫星序号加1
18: end else	
19: end if	
20: else	//如果通过1号与11号卫星链路距离更近
21: if	<i>sat_id</i> > <i>dst_sat</i> //如果当前卫星序号更大
22:	if <i>node_serial_num</i> == 11 //如果当前卫星相位号为11
23:	<i>next_sat</i> = <i>sat_id</i> - 10 //下一跳卫星为当前卫星序号减10
24: end if	
25: else	//如果当前卫星相位号不为11
26:	<i>next_sat</i> = <i>sat_id</i> + 1 //下一跳卫星为当前卫星序号加1

表 4.20（续）

路由寻址	
27:	end else
28:	end if
29:	else //如果当前卫星序号更小
30:	if node_serial_num == 1 //如果当前卫星相位号为 1
31:	next_sat = sat_id + 10 //下一跳卫星为当前卫星序号加 10
32:	end if
33:	else //如果当前卫星相位号不为 1
34:	next_sat = sat_id - 1 //下一跳卫星为当前卫星序号减 1
35:	end else
36:	end else
37:	end else
38:	end else

通过这种方式进行的星间路由，能够保证系统中任何两颗卫星都能够进行通信，但也存在一些问题。以本仿真平台使用的“铱星”系统为例，该系统中每颗卫星的轨道周期约为 100 min，飞行速度约为 7.52 km/s，每个波束的直径大约 400 km，卫星的覆盖直径大约 4500km。在这种情况下，如果保持用户终端的位置固定，平均每隔 1 min 用户就要进行一次波束间切换，每隔 9 min 用户就要进行一次星间切换^[48]。

在该星座的同一轨道面上，前后两颗卫星之间的星间链固定距离为 4033 km，时延为 13.4 ms。而在相邻轨道面上，两颗星的最远距离大约 3579 km，时延大约为 11.9 ms^[49]。由于反向缝轨道两侧的卫星无法直接通信，导致虽然轨道 1 到轨道 2 的距离和轨道 1 到轨道 6 的距离大致相当，但数据的传播时延在前者与后者间相差 5 倍。

由于类极轨道卫星通信系统的特点，反向缝两侧的卫星无法直接进行数据传输。因此，当用户进行切换的源卫星和目的卫星分别位于反向缝两侧时，两颗卫星需要通过整个星间路由网络进行数据传输。通过这种方式，不但会增加传输时延，还会出现切换流程还未全部结束时，卫星波束已经移出用户接收范围的情况，导致切换成功率降低。

4.3.3 卫星反向缝间用户切换方案

为了解决卫星反向缝间的用户切换时间过长和成功率偏低等问题，本文提出一种新的卫星反向缝间用户切换方案。该方案在每个地区的切换过程相似，能不受卫星反向缝的影响，切换流程如图 4.8 所示。

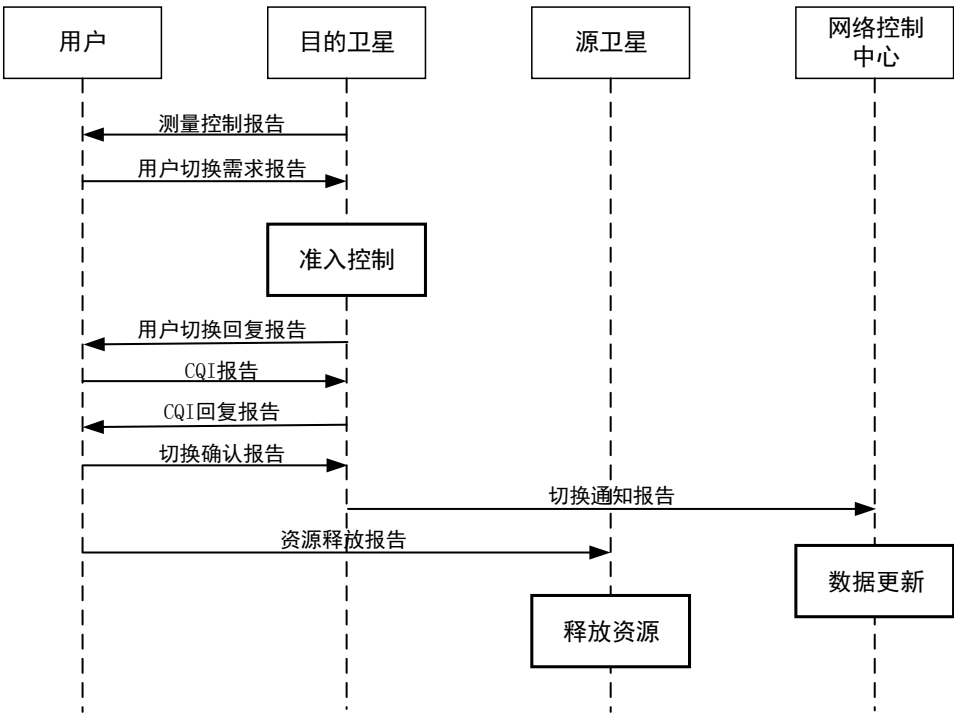


图 4.8 反向缝间切换流程图

切换流程的详细描述如下：

- (1) 源卫星波束和目的卫星波束周期性的向用户发送测量控制报告，报告的消息格式与表 4.1 相同。
- (2) 当用户检测到目的卫星波束的 **RSRP** 值大于当前接入源卫星波束的 **RSRP** 值时，向目的卫星发送用户切换需求报告，报告中含有用户的 **ID** 号和目的卫星及波束的 **ID** 号，报告的消息格式如表 4.21 所示。

表 4.21 用户切换需求报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	UE_HANDOVER_QEQURIED	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit

(3) 目的卫星收到用户发来的消息后,执行 4.2.1 节中步骤 4 和步骤 5 的操作,获取并锁定空闲信道的资源。然后,目的卫星生成用户切换回复报告通过公共信道向用户进行回复,报告的消息格式如表 4.22 所示。

表 4.22 用户切换回复报告消息格式

字段名称	取值	长度
TYPE	MM_H	8bit
Sub_TYPE	UE_HANDOVER_ACK	16bit
UE_id	用户 id	8bit
DST_Sat	目的卫星 id	8bit
DST_Beam	目的波束 id	8bit
XMIT_FREQ	上行频率	8bit
RCVR_FREQ	下行频率	8bit

(4) 用户收到用户切换回复报告后,将自身的发射频率和接收频率分别改为报告中信道的接收频率和发射频率,同时向目的卫星波束发送 CQI 报告。报告的消息格式与表 4.7 相同。

(5) 目的卫星波束收到用户发来的 CQI 报告后,检测当前用户所在环境的信道质量,若质量符合传输要求,则向用户返回 CQI 回复报告,允许用户进行传输通信。报告的消息格式与表 4.8 相同。

(6) 用户收到 CQI 回复报告后,将自身的配置进行更新,然后生成切换确认报告,消息格式与表 4.9 相同。用户将此报告发往目的卫星波束,用于确认该用户已经成功接入该卫星波束。

(7) 目的卫星收到用户发来切换确认报告后,如果确认报告中用户与预留信道中用户的 ID 号一致,则允许用户进行接入,同时向网络控制中心发送切换通知报告。报告的消息格式与表 4.10 相同。

(8) 用户在向目的卫星发送切换确认报告后,向源卫星发送资源释放报告,要求源卫星释放用户所占资源。报告的消息格式与表 4.11 相同。

(9) 源卫星收到资源释放报告后,根据报告中的内容命令用户当前占用的波束删除对应用户的信道占用信息,将信道清空用于新用户的接入。至此,整个切换流程完成。

与 4.2.2 节的跨卫星间的用户切换方案相比,该方案减少了切换步骤,降低了

切换信令的总开销。该方案的最大优势在于,以用户终端节点代替了部分网络控制中心的节点功能。按照常规的切换方案,在进行跨卫星反向缝间的切换时,源卫星与目的卫星的信息交换需要经过整个卫星网络进行路由,会造成切换时延的增加。而本方案以用户终端为载体,直接与两颗卫星进行交互,从而减少了通过星间链路再到网络控制中心进行切换信令转发的过程,降低了时延,提升了切换成功率。

4.4 本章小结

本章首先介绍了低轨卫星通信系统的切换阶段划分,然后提出并设计了单卫星内跨波束间的用户切换方案、跨卫星间的用户切换方案以及切换失败的用户重置方案,给出了各方案的流程图及信令消息格式。接着,简要介绍了卫星的反向缝及其给切换带来的影响。最后,提出并设计了一种新的适应于卫星反向缝间切换的方案,该方案能够降低切换时延并提升切换成功率。

第5章 基于 OPNET 低轨卫星仿真平台的测试及分析

本章根据第3章基于 OPNET 的低轨卫星仿真平台进行仿真测试分析, 首先介绍本仿真平台的基本配置, 包括采用的软件版本和放置的节点类型。然后配置仿真场景和仿真参数, 对仿真平台进行功能测试, 通过局部统计量和全局统计量进行查看。最后基于上述配置对仿真平台的切换管理进行仿真测试, 验证和分析不同参数对切换的影响和卫星反向缝间不同切换方案的影响。

5.1 仿真平台的基本配置

本低轨卫星仿真平台的搭建, 采用了 Windows10 操作系统, 其中, 用来生成低轨卫星星座并导出为轨道文件的软件为 STK, 版本号为 11.0。本仿真平台采用的 OPNET 软件版本为 14.5, 编译器为 Visual Studio 2013。本文的仿真结果通过 OPNET 的仿真器导出, 然后通过 MATLAB 软件进行数据整理。搭建的低轨卫星仿真平台界面如图 5.1 所示。

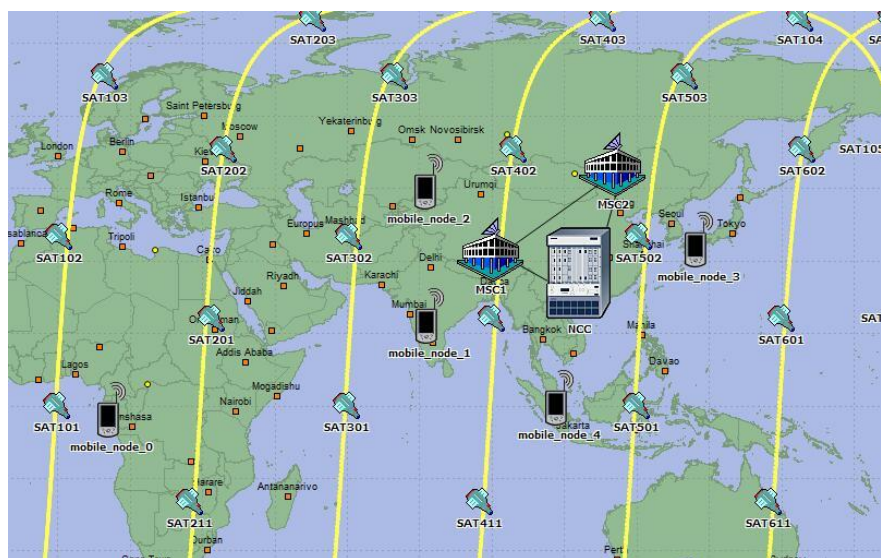


图 5.1 仿真平台界面

如图 5.1, 本仿真平台中除了依照“铱星”星座放置的 66 颗 LEO 卫星之外, 还设置了 2 个移动交换中心、1 个网络控制中心以及若干个用户终端。其中, 用户终端与卫星、移动交换中心与卫星之间均为无线连接。移动交换中心之间、移动交换中心与网络控制中心之间为有线连接。

5.2 仿真平台功能测试

为了验证仿真平台的正确性，判断能否实现设计目标，需要配置参数对仿真平台的各种功能进行仿真。在 OPNET 网络仿真软件中，仿真结果由局部统计量(local statistics)和全局统计量(global statistics)进行展示。局部统计量是对单个对象收集统计量，用于查看特定对象节点的状态。全局统计量是对整个网络收集统计量，用于查看整个网络的性能。

5.2.1 参数配置及仿真流程

由于当前测试低轨卫星移动性管理的资料较少，为了对仿真平台的性能进行评测，本文以 LTE（Long Term Evolution，长期演进）网络中的相关标准^[50]和文献[51]中的仿真参数作为模型进行参照。表 5.1 为本章仿真的各项参数，参数来源为“铱星”星座系统和项目方要求，包括场景配置和数据通信的相关参数。如不特殊说明，余下仿真均采用该参数

表 5.1 仿真参数配置

参数	数值
卫星数目	66 个
移动交换中心数目	2 个
网络控制中心数目	1 个
用户数目	30/60/90/120 个
用户状态	静止
仿真时间	1h
数据传输速率	19200bps
频率	1.66GHz
带宽	10MHz
发射功率	40dBm
单卫星波束数	48 个
单波束信道数	80 个
导频周期间隔	1s
卫星天线类型	定向天线
卫星天线增益	40dB

表 5.1 (续)

参数	数值
用户天线类型	全向天线
用户天线增益	0dB
切换触发时间	0s
切换触发偏置	0dB

图 5.2 为本仿真平台的切换仿真流程。首先输入仿真配置参数，平台根据这些参数初始化仿真端，接收并测量导频信号的 RSRP 值。初始化完成后，网络仿真器 Simulator 开始进行离散事件仿真。开始仿真后，卫星周期性向 UE 发送本卫星的导频信号，UE 根据切换算法设置的测量配置，当 UE 检测到 RSRP 值到达阈值时，向卫星上报测量结果。若卫星判断满足切换条件，则执行切换并输出切换性能指标，否则等待下一个测量周期。

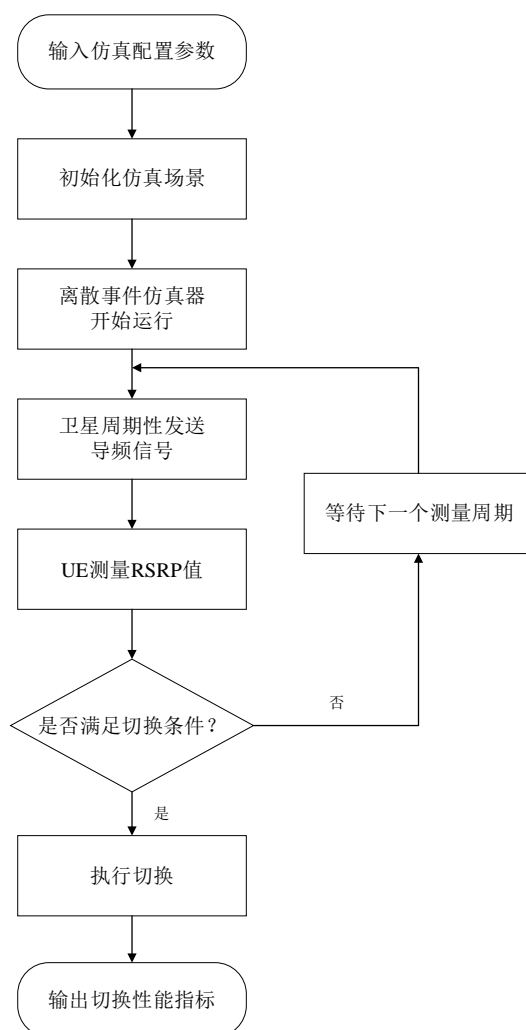


图 5.2 切换仿真流程图

5.2.2 局部统计量仿真

为了观测本仿真平台的个体功能运行情况，本文从所有用户终端节点中随机选取了某一个节点采集的结果进行统计，统计结果如图 5.3-5.7 所示。

图 5.3 为用户终端接收信号强度。从图中可以看出，卫星与用户的相对位置随着时间不断改变，导致用户接收到的信号强度呈周期性变化。当接收信号强度过小时，用户会向卫星发起切换申请。

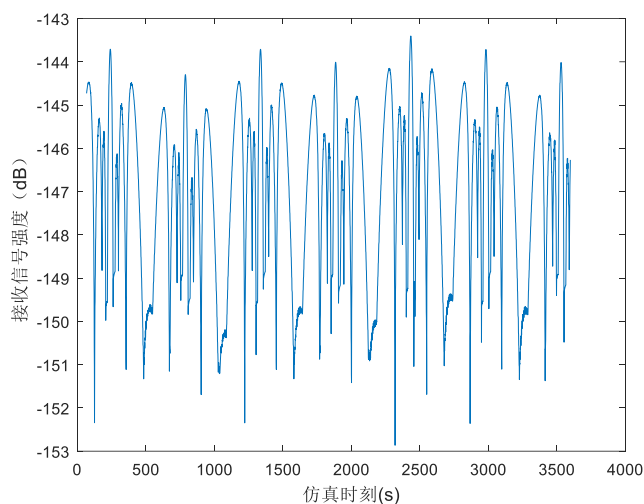


图 5.3 用户接收信号强度

图 5.4 为用户终端当前驻留的卫星。当序号为 501 时，表明用户位于第 5 轨道的 1 号卫星；当序号为 411 时，表明用户位于第 4 轨道的 11 号卫星。由于本文选取的节点位于第四和第五轨道间，因此用户的驻留卫星在这两个轨道中来回切换。

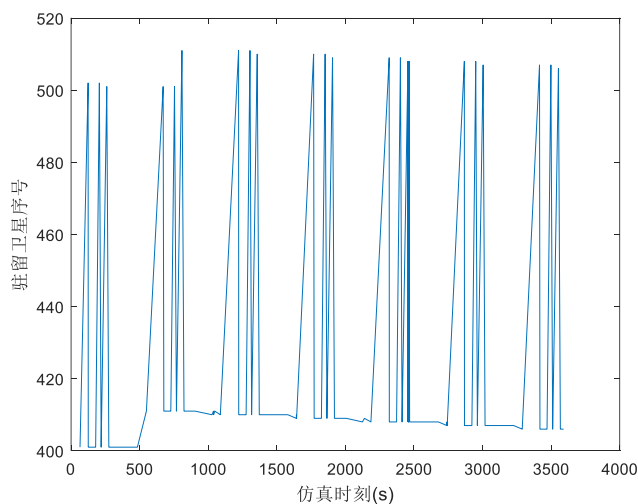


图 5.4 用户驻留卫星

图 5.5 为用户终端当前驻留的波束。在本文设计的卫星多波束天线中，每颗卫星中 48 个波束的序号排列位置都保持一致。因此，由于用户经历的卫星几乎朝同一方向运动，该用户驻留的波束序号也呈周期性变化。同时，当用户在同一颗卫星中进行波束切换时，波束的序号从里到外依次增加，基本为顺序变化；在进行跨卫星切换时，会出现序号的跳变。

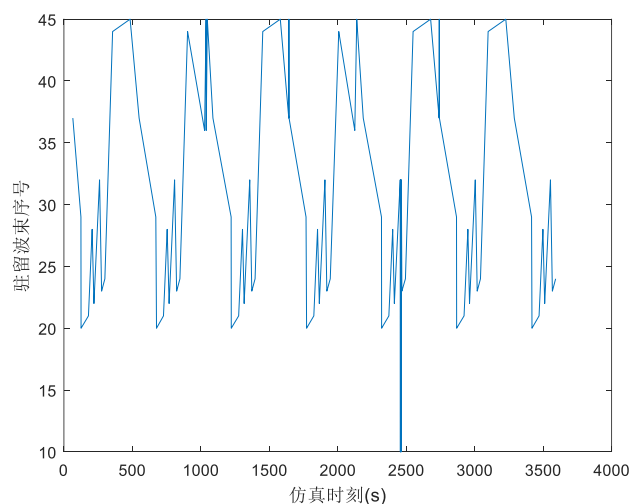


图 5.5 用户驻留波束

图 5.6 为用户终端 CQI 强度。该结果主要用于观测用户信道质量，对用户的切换及数据传输有很大的影响，CQI 强度越大表明用户的环境越好。当 CQI 强度过小时，卫星判断该用户处于较为嘈杂的环境，会减少甚至停止对用户的通信支持以节约信道资源。

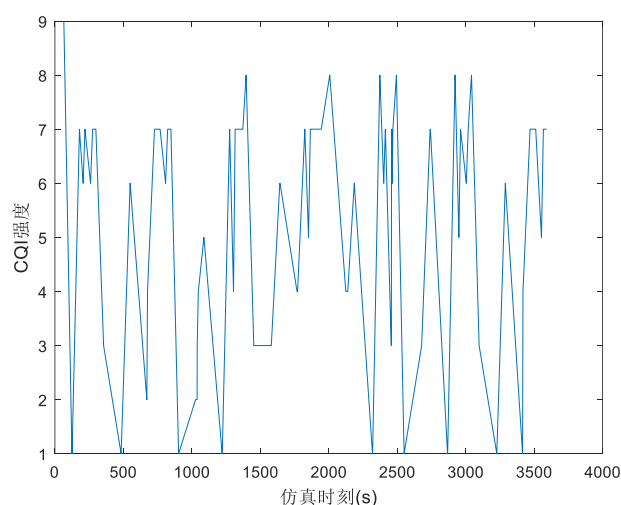


图 5.6 用户 CQI 强度

图 5.7 为用户终端业务中断时间。业务中断时间指用户因为切换而导致业务数据传输中断的时间。可以看到，当用户切换到距离自身较远的卫星时，由于传输的延时增大，导致业务中断的时间随之增加；当用户切换到较近的卫星时，中断时间会减小。

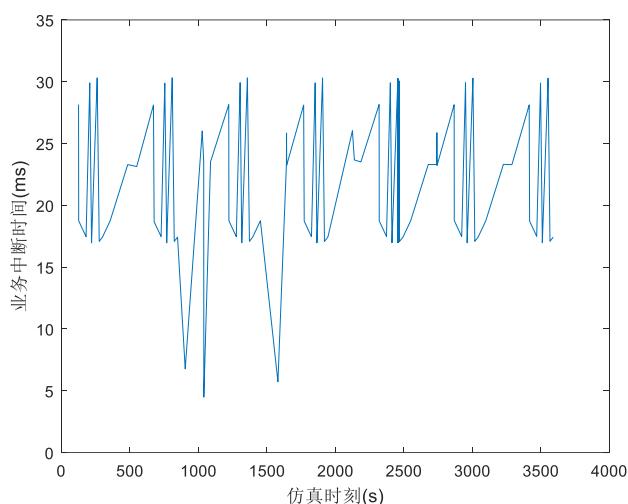


图 5.7 用户业务中断时间

5.2.3 全局统计量仿真

该平台也能通过全局统计量仿真来获取卫星通信网络中的整体运行状况。本节的统计范围为所有 30 个用户终端节点，统计结果如图 5.8-5.9 所示。

图 5.8 为网络接收数据包数，用于统计网络中所有用户在当前时刻已经接收到的数据包的数量，判断网络当前的拥塞量。

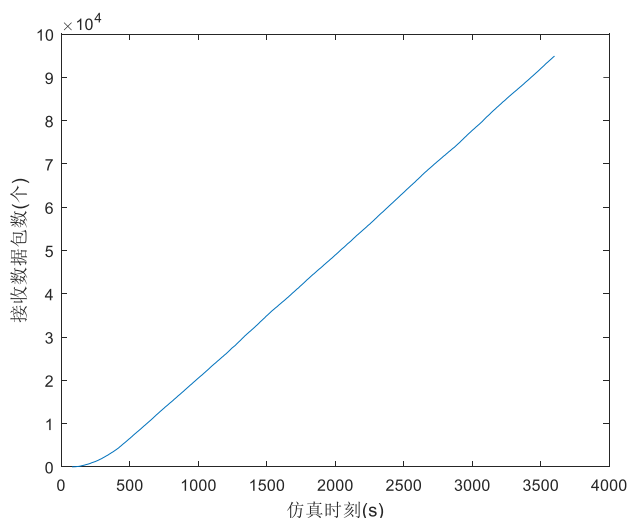


图 5.8 网络接收数据包数

图 5.9 为网络数据比特吞吐量,用于统计网络中所有的用户在当前时刻每秒收到的包比特量。通过对该项数据进行统计,能够分析出网络系统的整体负载量,对网络中的资源进行合理调度和分配,实现网络负载均衡。

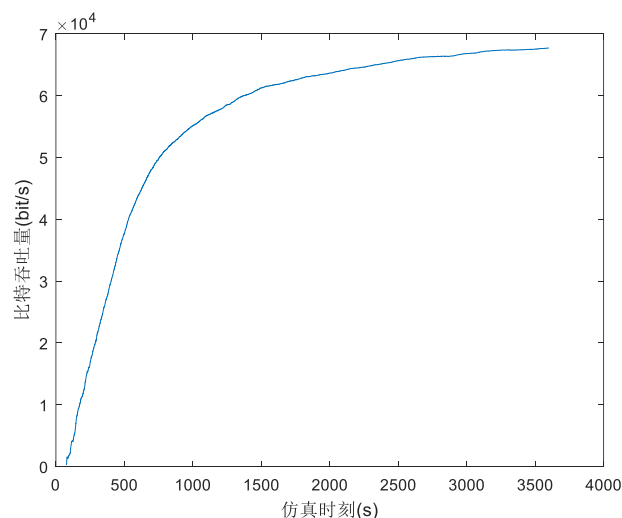


图 5.9 网络数据比特吞吐量

5.3 切换管理仿真及结果分析

在低轨卫星仿真平台的搭建过程中,能否通过仿真的形式正确模拟低轨卫星通信系统的移动性管理过程,是判断本仿真平台能否达到预期目标的重要标准。因此,需要对本仿真平台的切换管理功能进行测试和分析。

5.3.1 不同参数对切换的影响

在本仿真平台中,影响切换结果的主要因素为 TTT 和 A3 偏置。本文主要从切换成功率、平均切换次数和平均乒乓切换次数三个方面分别探究上述两个参数对切换的影响。其中,平均切换次数定义为所有用户在仿真时间内,每分钟发生的星间切换次数与波束间切换次数之和。平均乒乓切换次数定义为所有用户在仿真时间内,每分钟发生的在相同的两个波束间来回切换的次数之和。

1. TTT 对切换的影响

图 5.10 为在不同 TTT 情况下的切换成功率对比。从仿真结果中可以看出,当 TTT 的取值为 0s 时,切换成功率最高,达到了 95.65%。随着 TTT 的值逐渐增大,切换成功率随之逐渐减小,当 TTT 达到 4s 时,切换成功率只剩有 80.37%。造成这

一结果的原因：是当增大 TTT 值时，触发测量报告的时间也相应增加，导致测量上报不及时。此时，切换进行过程中的卫星波束覆盖范围，可能已经移出了用户终端能够接收的区域，造成切换过程中的链路失败，切换成功率降低。

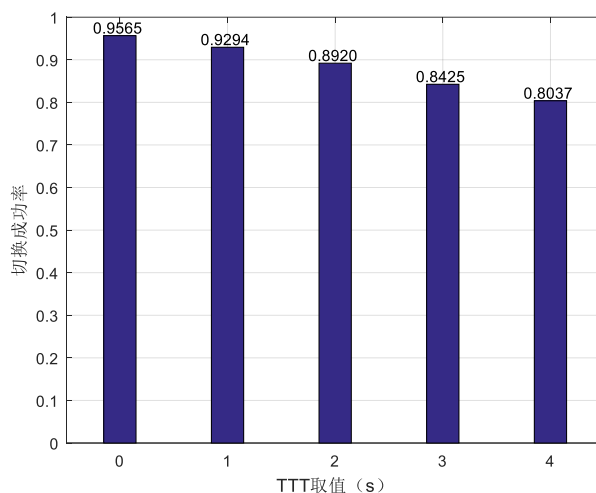


图 5.10 不同 TTT 取值对切换成功率的影响

图 5.11 和图 5.12 分别为在不同 TTT 情况下的平均切换次数和平均乒乓切换次数对比。从仿真结果中可以看出，当 TTT 的取值为 0s 时，平均切换次数最高，为 1.2027 次/min。但此时，平均乒乓切换次数也达到了 0.1333 次/min，同样为最高值。该结果表明，在这种情况下，因为出现了大量的无效切换，导致切换的总次数增加。随着 TTT 不断增加，平均切换次数和平均乒乓切换次数的值都逐渐下降，且平均乒乓切换次数下降更为明显。特别是当 TTT 由 0s 增加到 1s 时，平均切换次数降低了 23.33%，远高于平均切换次数的降幅比例。因此，可以得出结论：当 TTT 设置较长时，切换成功率会降低，但能减少无效切换的次数，遏制乒乓切换的产生。

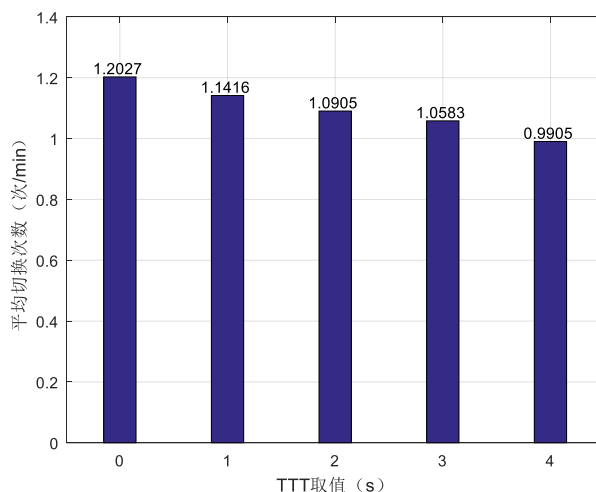


图 5.11 不同 TTT 取值对平均切换次数的影响

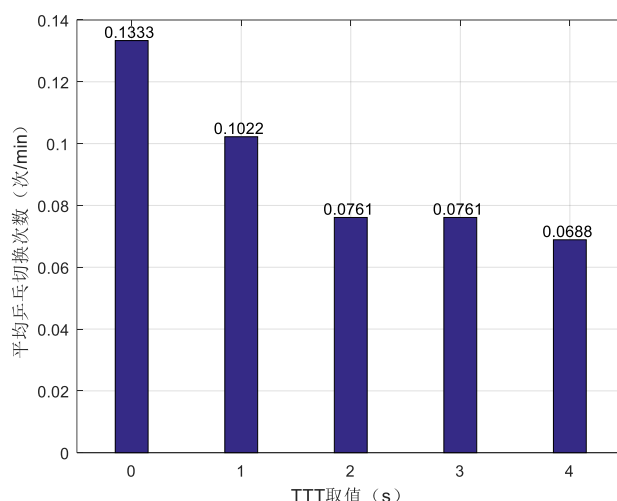


图 5.12 不同 TTT 取值对平均乒乓切换次数的影响

2. A3 偏置对切换的影响

图 5.13 为在不同 A3 偏置情况下的切换成功率对比。从结果中可以看出,与 TTT 对切换的影响相似,随着 A3 偏置的取值从 0dB 逐渐增长到 4dB,切换的成功率从 95.65% 逐渐下降到 85.36%,下降了 10 个百分点。造成这一结果的原因是增大 A3 偏置后,增加了 A3 事件的进入难度和保持难度,使切换发生更加困难,造成切换不及时,切换过程容易发生链路失败,降低切换成功率。

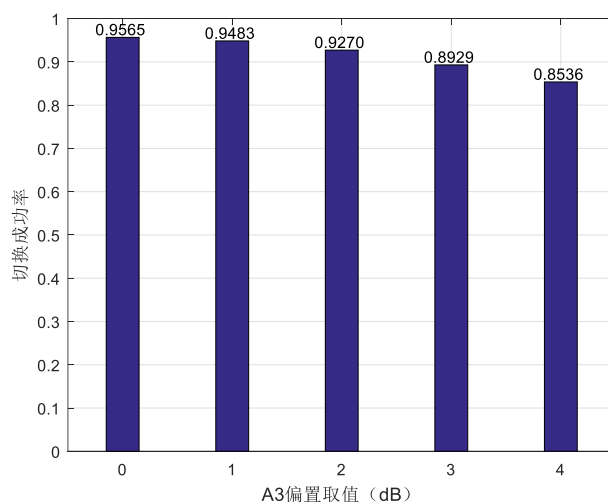


图 5.13 不同 A3 偏置取值对切换成功率的影响

图 5.14 和图 5.15 分别为在不同 A3 偏置情况下的平均切换次数对比和平均乒乓切换次数对比。从仿真结果中可以看出,随着 A3 偏置的取值从 0dB 逐渐增大到 4dB,平均切换次数从 1.2027 次/min 下降到了 0.940 次/min,同时平均乒乓切换次数也从 0.1333 次/min 下降到了 0.0305 次/min。因此,与 TTT 对切换的影响相同,通过增大

A3 偏置的方式也能在一定程度上减少乒乓切换。

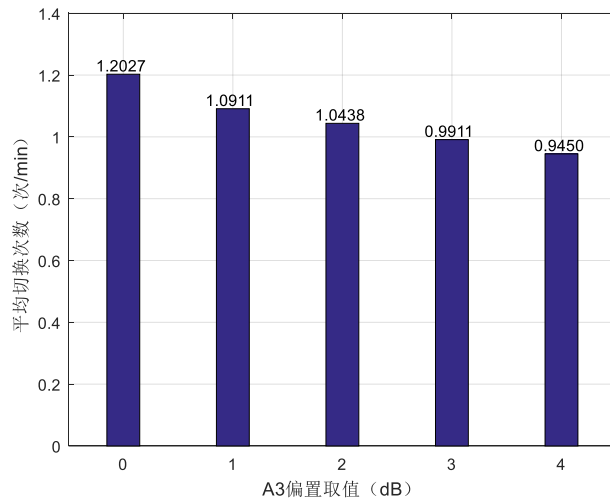


图 5.14 不同 A3 偏置取值对平均切换次数的影响

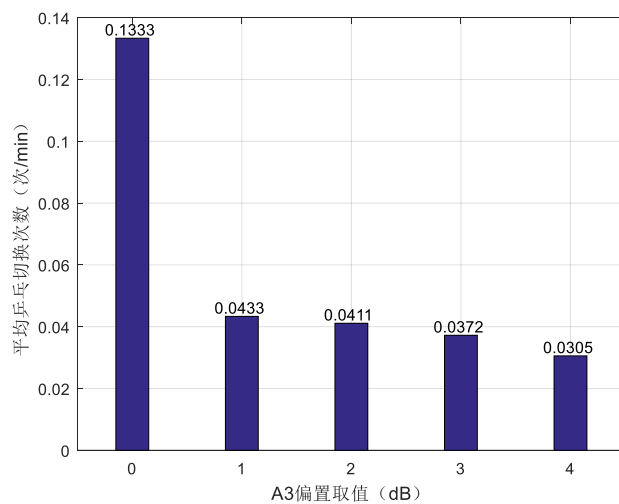


图 5.15 不同 A3 偏置取值对平均乒乓切换次数的影响

显然，无论是 TTT 还是 A3 偏置，在仿真平台的仿真结果表现与 LTE 相关标准文献中的趋势相同，表明本仿真平台能够较为准确地对不同参数条件下低轨卫星通信系统的切换过程进行仿真。

5.3.2 卫星反向缝间不同切换策略对切换结果的影响

为了探究 4.3.3 节提出的切换方案与 4.2.2 节提出的方案在卫星反向缝间的表现差异，本文通过搭建对照组对用户终端的切换时延和平均成功率进行仿真。首先进行不同卫星轨道间的切换时延比较。共设置三组情况进行对照，分别为用户处

于第一和第二卫星轨道间、用户处于第五和第六轨道间、用户处于第六和第一轨道间。仿真结果如图 5.16 所示。

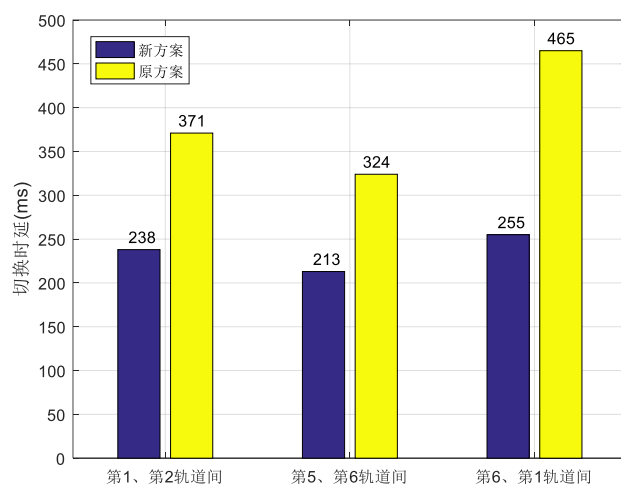


图 5.16 不同轨道间切换时延对比

显然，新方案相比于原方案在切换时延上有显著的降低。造成这一结果的原因是新方案取消了网络控制中心作为中转站进行信令传输的步骤，花在星间路由上的时间大幅度减少。同时，可以看出，无论用户处于哪个卫星轨道之间，进行切换的时间大体相当，不会出现卫星反向缝间的切换时延明显偏大的问题。

同样，本文也对用户终端在不同轨道间切换的平均成功率进行了仿真，结果如图 5.17 所示。

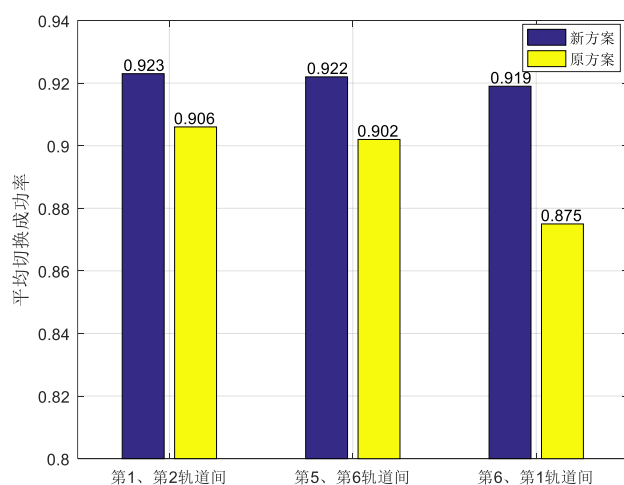


图 5.17 不同轨道间平均切换成功率对比

从图 5.17 中可以看出，新方案相比于原方案在所有轨道间的平均切换成功率上

都有增加,其中,在卫星反向缝间的提升尤为明显,从 87.5%提升到了 91.9%。造成这一结果的原因,是新方案减少了切换信令的发包数,使其发生包碰撞的几率降低,更难出现无法接收到信令包的情况。同时,在卫星反向缝两侧的平均切换成功率相对于其他地区还有降低,这是因为在该地区的用户在同一波束下的驻留时间更短,波束的相对移动速度更快,导致切换流程还未结束时,源波束已经离开了用户的覆盖范围,使得用户无法收到信令包。综合来看,采用新的用户切换方案能增加切换成功率,特别是对位于卫星反向缝间的用户提升更明显。

5.4 本章小结

本章首先介绍了低轨卫星仿真平台的基本配置,包括采用的各种软件名称和版本号。然后,介绍了本次仿真的参数配置,在此基础上,通过查看局部统计量和全局统计量,对仿真平台的功能进行了测试。接着,对仿真平台的切换管理功能进行了测试,仿真和分析了不同 TTT 和 A3 偏置条件下的切换成功率、平均切换次数和平均乒乓切换次数。本章也对不同策略下的卫星反向缝间切换进行了仿真,结果表明新方案在时延和成功率上的表现都有优势。

第6章 总结与展望

6.1 论文工作总结

随着人民生活质量的不断增长,对通信速度和质量的需求不断上升,传统的地面通信网络已无法满足这一要求,需要探索更多的通信方式,低轨卫星通信系统因其低时延和广覆盖的特性获得越来越多的关注。为了解决低轨卫星移动性管理技术无法满足实际运行需求和当前已有低轨卫星通信仿真平台缺乏完整的体系架构等问题,本文开展了如下研究工作:

1. 基于 OPNET 的低轨卫星通信仿真平台搭建

分析了当前低轨卫星通信仿真平台的需求,提出了低轨卫星通信系统的整体架构、网络拓扑和节点功能,基于 OPNET 网络仿真软件,搭建了低轨卫星通信仿真平台。在仿真平台中,分别设计了包括用户终端、低轨卫星、移动交换中心和网络控制中心节点的节点模型和进程模型,给出了使用的关键函数。本文还设计了低轨卫星的多波束天线模型,通过搭建仿真场景进行验证,结果表明该天线模型达到了预期的设计要求。

2. 低轨卫星通信系统的切换方案设计

本文参照地面 LTE 的切换流程,提出了基于强度测量的硬切换方案。该切换方案包含单卫星内跨波束的用户切换、跨卫星间的用户切换以及切换失败的用户重置。为了解决卫星反向缝轨道间的切换时延过高和成功率偏低的问题,提出了一种新的卫星反向缝间切换方案,该方案通过用户终端代替部分网络控制中心功能的方式,降低了星间路由跳数,减少了资源消耗。

3. 利用低轨卫星仿真平台对切换管理功能进行仿真分析

利用低轨卫星仿真平台,搭建了仿真场景,配置了仿真参数,以局部统计量和全局统计量的方式进行了功能仿真。通过仿真得到了不同 TTT 和 A3 偏置条件下的切换成功率、平均切换次数、平均乒乓切换次数等统计量。仿真对比了在不同切换方案下卫星反向缝间的切换时延和成功率,结果表明,新设计的方案能够明显降低时延和增加成功率,验证了该低轨卫星仿真平台能够可靠地对不同情况下的切换状况进行仿真。

6.2 未来工作展望

本文建立的基于 OPNET 的低轨卫星仿真平台，目前已能够对不同参数条件下的用户切换情况进行仿真并输出仿真结果。该仿真平台还有一些亟需完善的地方，未来还需要进一步进行改进。

首先，该低轨卫星仿真平台虽然能够较好地对移动性管理中的切换管理进行仿真，但对位置管理方面的支持力度还不够，需要进一步对仿真平台的功能进行改进和完善。

其次，空天地一体化通信网络是未来通信的发展趋势，但由于天地一体化信息网络规模庞大、结构复杂、支持业务种类繁多、网络伸缩性强、时空跨度大，网络拓扑结构不断变化，实现更为困难。因此，可以考虑在仿真平台中增加对中、高轨道卫星的支持，进行混合组网，实现更复杂的功能。

参考文献

- [1] 易克初, 李怡, 孙晨华, 等. 卫星通信的近期发展与前景展望[J]. 通信学报, 2015, 36(6): 161-176.
- [2] Ouyang Jian, Jiang Yangwei, Yin Chunyan, et al. Downlink beamforming scheme for hybrid satellite-terrestrial networks[J]. IET Communications, 2018, 12(18): 2342-2346.
- [3] Foundation O., Delhi N. Small satellite constellations: the promise of 'Internet for all'[J]. Advances in Space Research, 2015, 10(7): 1-12.
- [4] Jin Jin, Kuang Linling, Yan Jian, et al. Smart communication satellite (SCS) project overview[C]// 29th Annual AIAA/ USU Conference on Small Satellites, Reston: AIAA, 2015: 1-6.
- [5] 庞之浩. 今日移动通信卫星发展[J]. 数字通信世界, 2015, 10(3): 70-76.
- [6] 周砚茜, 冯旭哲, 代建中. 卫星星座设计仿真软件综述[J]. 计算机与现代化, 2019, 34(8): 63-68+84.
- [7] 张竹. IP/LEO 卫星网络中的移动性管理技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [8] Al-Khalidi M., Thomos N., Reed M. J., et al. Anchor free IP mobility[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(1): 56-69.
- [9] Chowdhury P. K., Atiquzzaman M., Ivancic W. D. Handover schemes in satellite networks: state-of-the-art and future research directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2006, 8(4): 2-14.
- [10] 李毅, 侯睿, 张更新. 发展我国低轨卫星通信星座系统的思考[J]. 国际太空, 2018, 39(4): 64-67.
- [11] 黄开枝, 邬江兴. 第四代无线网络中的移动管理协议分析[J]. 计算机工程与设计, 2007, 28(19): 4645-4648.
- [12] 周宏成. 5G 移动性管理解决方案[J]. 电子技术与软件工程, 2017, 23(7): 39-41.
- [13] 3GPP. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) and evolved universal terrestrial radio access network (E-UTRAN): overall description (release 13): TS 36.300 V13.4.0 [S]. 3rd Generation Partnership Project, 2016.
- [14] Rosa C., Pedersen K., Wang H., et al. Dual connectivity for LTE small cell evolution: functionality and performance aspects [J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(6): 137-143.

- [15] Kibria G., Nguyen K., Villardi G. P., et al. Next generation new radio small cell enhancement: architectural options, functionality and performance aspects [J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(4): 120-128.
- [16] 张德民, 田凤仙, 李培林. LTE-A 异构网中双连接技术的切换流程设计与实现[J]. 电视技术, 2016, 40(8): 52-56.
- [17] 裴旭明, 贾建鑫, 钱骅, 等. 5G 双连接场景下的低传输时延切换机制[J]. 通信学报, 2019, 40(4): 216-226.
- [18] Giambene G. Resource management in satellite networks[M]. Springer, 2007: 102-104.
- [19] Papapetrou E., Pavlidou F. Analytic study of doppler-based handover management in LEO satellite systems[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(3): 830-839.
- [20] Cho S., Akyildizky I. F., Bender M. D., et al. A new connection admission control for spotbeam handover in LEO satellite networks[J]. Wireless Networks, 2002, 8(4): 403-415.
- [21] 贺达健, 游鹏, 雍少为. LEO 卫星通信网络的移动性管理[J]. 中国空间科学技术, 2016, 36(3): 1-14.
- [22] 栾鹏, 朱江, 高凯, 等. 低轨卫星接入系统中基于位置信息的时隙分配协议[J]. 电讯技术, 2016, 56(9): 990-994.
- [23] Liu Shuaijun, Hu Xin, Wang Yipeng, et al. Distributed caching based on matching game in LEO satellite constellation networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2): 300-303.
- [24] Huang Huawei, Guo Song, Wang Kun. Envisioned wireless big data storage for low-Earth-orbit satellite-based cloud[J]. IEEE Wireless Communications, 2018, 25(1): 26-31.
- [25] Xu Wenchao, Jiang Meng, Tang Feilong, et al. Network coding-based multi-path routing algorithm in two-layered satellite networks[J]. IET Communications, 2017, 12(1): 2-8.
- [26] Park K. N., Kang J. H., Cho B. M., et al. Handover management of net-drones for future Internet platforms[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2016, 12(2): 1-9.
- [27] 薛开平, 周焕城, 孟薇, 等. 天地一体化网络无缝切换和跨域漫游场景下的安全认证增强方案[J]. 通信学报, 2019, 40(6): 138-147.
- [28] 王亮, 张乃通. LEO 网络中卫星切换的动态概率路由优化策略[J]. 通信学报, 2002, 23(9): 8-15.

- [29] 杨斌, 何锋, 靳瑾. LEO 卫星通信系统覆盖时间和切换次数分析[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(4): 804-809.
- [30] A.i.solutions Inc. FreeFlyer University Guide[EB/OL].[http://www. trylam. com/ wp-content/uploads/2017/01/FreeFlyer University- Guide.pdf](http://www.trylam.com/wp-content/uploads/2017/01/FreeFlyer%20University-Guide.pdf).
- [31] 高静, 刘小萌. 基于 STK 的混合星座性能仿真与分析[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2016, 47(5): 773-778.
- [32] Wood L. SaVi: Satellite Constellation Visualization[EB/OL]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.3265.pdf>.
- [33] 罗昶, 黎连业, 潘朝阳, 等. 计算机网络故障诊断与排除[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 315-319.
- [34] 王钢, 谢晓川, 贾世楼. 仿真技术在无线网络中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2006, 11(5): 83-86.
- [35] 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): 118-124.
- [36] 邵丰伟, 龚文斌, 姜兴龙. 基于 OPNET 的一种导航卫星系统通用仿真模型[J]. 电子设计工程, 2017, 25(14): 105-110.
- [37] 熊菊. 基于 OPNET 的卫星信道建模与仿真研究[J]. 通信技术, 2019, 52(2): 384-390.
- [38] 陈清. 4G 网络切换技术与关键技术研究[J]. 信息通信, 2016, 29(7): 290-291.
- [39] Laya A., Alonso L., Alonso-Zarate J. Is the random access channel of LTE and LTE-A suitable for M2M communications? A survey of alternatives[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(1): 4-16.
- [40] 张勤. 低轨卫星通信系统切换管理研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
- [41] 李卓. 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.
- [42] 张晓东, 马东堂, 李树锋, 等. 基于 OPNET 的卫星多波束天线仿真建模研究[J]. 现代电子技术, 2009, 32(3): 46-49.
- [43] 陈敏. OPNET 网络仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 138-142.
- [44] 孟晨. OPNET 通信仿真开发手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 337-339.
- [45] 丁俊栋. 低轨卫星网络的路由技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
- [46] Werner M. A dynamic routing concept for ATM-based satellite personal communication networks[J]. Selected Areas in Communications IEEE Journal on, 1997, 15(8): 1636-1648.

- [47] De Sanctis M., Cianca E., Ruggieri M. Ip-based routing algorithms for leo satellite networks in near-polar orbits[C]// 2003 IEEE Aerospace Conference, USA: IEEE Xplore, 2003: 1273-1280.
- [48] 张颖, 王化民. 基于 GSM 的铱星通信系统[J]. 航海技术, 2013, 34(3): 35-37.
- [49] 胡东伟, 宋春晓. 低轨卫星移动通信系统的星间链设计[J]. 无线电通信技术, 2017, 43(5): 11-15.
- [50] 3GPP. Mobility enhancements in heterogeneous networks: overall description (release 11): TR 36.839 V11.1.0 [S]. 3rd Generation Partnership Project, 2012.
- [51] Cheng Nan, Quan Wei, Shi Weisen, et al. A comprehensive simulation platform for space-air-ground integrated network[J]. IEEE Wireless Communications, 2020, 27(1): 178-185.

致 谢

随着 2021 年春天的到来，转眼之间，三年的硕士研究生生涯就要结束了。在这三年里，我认识到了来自全国各地的老师、同学和朋友，并从他们那里学到了很多知识和道理。在此，我要向在这三年之中帮助和陪伴我的各位老师、同学和朋友表达我最真挚的感谢。

首先，我要感谢重庆邮电大学为我提供了一个学习和成长的平台，让我能够不断的超越自我，突破极限。为此，我要感谢为学校辛勤工作的各位领导、老师和工作人员，祝愿学校越办越好，为祖国培养更多的现代化人才。

然后，我要感谢我的导师陈前斌教授。陈老师作为重庆邮电大学的副校长，也是通信领域的学科带头人，拥有渊博的知识和敏捷的思维，是我学习的榜样。能够成为陈老师的研究生，我感到万分的荣幸。

感谢唐伦教授。从我进入到学校开始，唐老师一直不断的鼓励和鞭策我，让我受益匪浅。唐老师在科研和学术方面都有很深的造诣，在项目实践和论文写作方面为我提供了很多的指导，让我能够顺利的度过三年的研究生生涯，走向新的天地。

感谢团队的梁承超老师、柴蓉老师、刘翔老师等，是您们的辛苦付出为我营造了一个良好的学习环境，并为我提供了诸多帮助，让我充分认识到自身的不足。

感谢和我同届的同学宋艾遥、李子煜、朱丹青、张亚、唐浩、孙移星，有了你们的陪伴，这三年的时光才会显得弥足珍贵。也要感谢实验室团队的各位师兄师姐和师弟师妹，你们在学习和生活中对我的各种帮助和支持让我有了足够的信心面对各种困难和挑战。

最后，感谢参与论文评审和毕业答辩的各位老师和专家，感谢您们在百忙之中抽出时间为我提出宝贵的建议和意见。

尽管硕士研究生生涯即将结束，但在未来的学习和生活中，我将继续怀着一颗谦虚的心，不断探索，努力实现自己的人生价值。

曹 晖

2021 年 5 月

攻读硕士学位期间从事的科研工作及取得的成果

参与科研项目：

[1] 低轨星座系统切换管理仿真平台(DG-XT3/FZ01-KJ01/JY006-1.00), 横向项目, 2020.02-2020.10.

[2] 基于多域环境感知的 5G 网络自组织机理与自优化方法研究(61571073), 国家自然科学基金, 2016.01-2020.12.

[3] 基于数据驱动和人工智能的 5G 网络智能控制理论和方法研究(KJZD-M201800601), 重庆市教委科学技术研究重大项目, 2018.07-2021.07.

发表及完成论文和专利：

[1] 曹晖, 陈前斌, 梁承超, 唐伦. 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), 已录用.

[2] 陈前斌, 曹晖, 唐伦, 梁承超. 一种低轨卫星通信切换方法[P]. 中国: 202010947760.9, 2020-9-10.

[3] 陈前斌, 曹晖, 唐伦, 梁承超. 一种低轨卫星反向缝间通信切换方法[P]. 中国: 202110522430.X, 2021-5-13.

获奖：

[1] 曹晖. 校级学业奖学金三等奖, 2021.