



信息通信领域产学研合作特色期刊 十佳皖刊
第三届国家期刊奖百种重点期刊 中国科技核心期刊

ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN

中兴通讯技术

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL

<http://tech.zte.com.cn>

2021年10月·第5期

专题：低轨卫星通信技术与应用



《中兴通讯技术》第9届编辑委员会成员名单

- 顾问** 侯为贵(中兴通讯股份有限公司创始人) 钟义信(北京邮电大学教授)
陈锡生(南京邮电大学教授) 糜正琨(南京邮电大学教授)
- 主任** 陆建华(中国科学院院士)
- 副主任** 李自学(中兴通讯股份有限公司董事长) 李建东(西安电子科技大学教授)

编委(按姓名拼音排序)

- | | | | |
|-----|-----------------|-----|-------------------------|
| 陈建平 | 上海交通大学教授 | 唐雄燕 | 中国联通研究院副院长 |
| 陈前斌 | 重庆邮电大学教授、副校长 | 陶小峰 | 北京邮电大学教授 |
| 段晓东 | 中国移动研究院副院长 | 王文博 | 北京邮电大学教授、副校长 |
| 葛建华 | 西安电子科技大学教授 | 王文东 | 北京邮电大学教授 |
| 管海兵 | 上海交通大学教授 | 王喜瑜 | 中兴通讯股份有限公司执行副总裁 |
| 郭庆 | 哈尔滨工业大学教授 | 王翔 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 |
| 洪波 | 中兴发展股份有限公司总裁 | 卫国 | 中国科学技术大学教授 |
| 洪伟 | 东南大学教授 | 吴春明 | 浙江大学教授 |
| 黄宇红 | 中国移动研究院副院长 | 邬贺铨 | 中国工程院院士 |
| 纪越峰 | 北京邮电大学教授 | 向际鹰 | 中兴通讯股份有限公司首席科学家 |
| 江涛 | 华中科技大学教授 | 肖甫 | 南京邮电大学教授 |
| 蒋林涛 | 中国信息通信研究院科技委主任 | 解冲锋 | 中国电信研究院教授级高工 |
| 李尔平 | 浙江大学教授 | 徐安士 | 北京大学教授 |
| 李红滨 | 北京大学教授 | 徐子阳 | 中兴通讯股份有限公司总裁 |
| 李厚强 | 中国科学技术大学教授 | 续合元 | 中国信息通信研究院副总工 |
| 李建东 | 西安电子科技大学教授 | 薛向阳 | 复旦大学教授 |
| 李乐民 | 中国工程院院士 | 薛一波 | 清华大学教授 |
| 李融林 | 华南理工大学教授 | 杨义先 | 北京邮电大学教授 |
| 李少谦 | 电子科技大学教授 | 叶茂 | 电子科技大学教授 |
| 李自学 | 中兴通讯股份有限公司董事长 | 易芝玲 | 中国移动研究院首席科学家 |
| 林晓东 | 中兴通讯股份有限公司副总裁 | 张宏科 | 北京交通大学教授 |
| 刘健 | 中兴通讯股份有限公司高级副总裁 | 张平 | 中国工程院院士 |
| 刘建伟 | 北京航空航天大学教授 | 张钦宇 | 哈尔滨工业大学教授 |
| 隆克平 | 北京科技大学教授 | 张卫 | 复旦大学教授 |
| 陆建华 | 中国科学院院士 | 张云勇 | 中国联通集团产品中心总经理 |
| 马建国 | 浙江大学教授 | 赵慧玲 | 工业和信息化部通信科技委信息通信网络专家组组长 |
| 孟洛明 | 北京邮电大学教授 | 郑纬民 | 中国工程院院士 |
| 任品毅 | 西安交通大学教授 | 钟章队 | 北京交通大学教授 |
| 石光明 | 西安电子科技大学教授、副校长 | 周亮 | 南京邮电大学教授 |
| 孙知信 | 南京邮电大学教授 | 朱近康 | 中国科学技术大学教授 |
| 谈振辉 | 北京交通大学教授、原校长 | 祝宁华 | 中国科学院半导体研究所研究员 |
| 唐宏 | 中国电信IP领域首席专家 | | |

目次

中兴通讯技术 (ZHONGXING TONGXUN JISHU)
总第 160 期 第 27 卷 第 5 期 2021 年 10 月

专题：低轨卫星通信技术与应用

- 专题导读 **01**
郭庆
- 空天地一体化网络技术展望 **02**
田开波, 杨振, 张楠
- 面向低轨卫星的频谱认知智能管控 **07**
李高, 王威, 吴启晖
- 面向低轨卫星星座的多星协作信号检测技术 **12**
王虎威, 叶能, 安建平
- NGSO 互联网星座用户链路同频干扰分析 **18**
刘子威, 李嘉颖, 张更新
- DTN 辅助的低轨卫星网络路由技术 **23**
张培颖, 王超, 吴胜
- 大规模低轨卫星网络移动性管理方案 **28**
吴琦, 郭孟泽, 朱立东
- 基于多维梯度的卫星集群高可靠协同计算方法 **36**
马步云, 任智源, 李赞

- 43** 卫星地面融合网络的窃听威胁与物理层安全解决方案
韩帅, 李季蹊, 李静涛

专家论坛

- 48** 大规模低轨星座卫星通信网发展展望
孙智立, 李天儒

企业视界

- 52** 未来网络可信通信技术
闫新成, 周娜, 蒋志红

技术广角

- 60** 未来卫星通信和 5G-NR 深度融合架构设计
杨立, 窦建武

综合信息

- 51** 《中兴通讯技术》2022 年专题计划

2021 年第 1—6 期专题计划及策划人

1. 视频技术和用户体验评测

华中科技大学教授 江涛
中兴通讯股份有限公司副总裁 陆平

2. 6G 愿景及技术挑战

中国工程院院士 张平
北京邮电大学教授 张建华

3. 边缘计算与算力网络

工信部通信科技委信息通信网络
专家组组长 赵慧玲

4. 高铁智能通信技术与应用

北京交通大学教授 艾渤

5. 低轨卫星通信技术与应用

哈尔滨工业大学教授 郭庆

6. 触觉通信技术

南京邮电大学教授 周亮

MAIN CONTENTS

ZTE TECHNOLOGY JOURNAL Vol. 27 No. 5 Oct. 2021

Special Topic: Technologies and Applications of Low Earth Orbit Satellite Communication

- Editorial **01**
GUO Qing
- Prospects for the Air-Space-Ground Integrated
Network Technology **02**
TIAN Kaibo, YANG Zhen, ZHANG Nan
- Cognitive Intelligent Spectrum Management and
Control for Low Earth Orbit Satellite System **07**
LI Gao, WANG Wei, WU Qihui
- Multi-Satellite Cooperative Signal Detection for Low
Earth Orbit Constellations **12**
WANG Huwei, YE Neng, AN Jianping
- Cochannel Interference Analysis for User Link of
NGSO Internet Constellation **18**
LIU Ziwei, LI Jiaying, ZHANG Gengxin
- DTN-Assisted Low Orbit Satellite Network Routing
Technology **23**
ZHANG Peiying, WANG Chao, WU Sheng
- Large-Scale Low Earth Orbit Satellite Network
Mobility Management Scheme **28**
WU Qi, GUO Mengze, ZHU Lidong

- 36** Multi-Dimensional Gradient Based High-Reliability
Collaborative Computing Method for Satellite
Network
MA Buyun, REN Zhiyuan, LI Zan

- 43** Interception Threats and Physical Layer Security
Solution of Integrated Satellite-Terrestrial Networks
HAN Shuai, LI Jixi, LI Jingtao

Expert Forum

- 48** Development Prospect of Mega Low Earth Orbit
Constellation Satellite Communication Networks
SUN Zhili, LI Tianru

Enterprise View

- 52** Trusted Communication Technologies for Future
Networks
YAN Xincheng, ZHOU Na, JIANG Zhihong

Technology Perspective

- 60** Architecture Design for Tight Integration between
Future Satellite Communication and 5G-NR System
YANG Li, DOU Jianwu

期刊基本参数: CN 34-1228/TN*1995*b*16*66*zh*P*¥20.00*6500*12*2021-10

敬告读者

本刊享有所有发表文章的版权, 包括英文版、电子版、网络版和优先数字出版版权, 所支付的稿酬已经包含上述各版本的费用。未经本刊许可, 不得以任何形式全文转载本刊内容; 如部分引用本刊内容, 须注明该内容出自本刊。



低轨卫星通信技术与应用 专题导读

专题策划人



郭庆

哈尔滨工业大学教授、博士生导师，工业和信息化部无线专用通信智能网络技术重点实验室主任，中国通信学会第6届卫星通信委员会委员；主要从事卫星通信、空间信息网络、无线传输与网络方面的研究；获得国家科技进步奖二等奖2项；发表论文150余篇，出版学术著作1部，获授权国家发明专利20余项。

随着卫星互联网技术的迅速发展，低轨卫星通信技术与应用已成为全球通信领域的研究热点之一。通过一定数量的低轨通信卫星与地面网络的融合组网，可以构建具备实时信息处理与传输的大规模星座网络，从而为地面和空中中等用户终端提供全球覆盖的宽带互联网接入等通信服务。随着对空间资源利用的逐步深入，全球各国纷纷对低轨通信卫星星座展开部署。低轨卫星通信技术的研究，在空间信息基础设施的建设及轨道频率等资源的利用方面起到了重要的作用。

卫星互联网的发展主要经历了卫星通信网络与地面通信系统互补合作、融合发展及宽带互联网3个阶段。未来卫星互联网可以利用低轨通信卫星星座支持偏远地区互联通信、海洋作业、科考宽带、航空宽带和灾难应急通信等服务场景，满足各个地区和用户的通信需求。这些应用场景地面网络建设难度大、成本高，而卫星互联网可以很好地解决这些问题，对地面网络形成重要补充，极大地拓展网络的覆盖

范围。尽管卫星互联网尤其是低轨卫星通信技术的研究已经全面展开，并吸引了学术和工业界的关注，但由于低轨卫星通信的大时空尺度、高动态性、复杂的网络结构、繁多的业务种类等特点，许多问题需要开展深入研究。

为探讨低轨卫星通信技术的一些重要研究方向，本期专题收录了来自高校、企业、科研院所的8篇文章，分别从低轨卫星通信频谱资源、多星协作信号检测技术、卫星星座通信频率干扰问题、低轨卫星通信网络路由技术、大规模低轨卫星通信网络用户移动性管理、低轨卫星星上协同计算和星地融合网络安全等方面，分析了空天地一体化网络现有研究及技术发展趋势，希望能对低轨卫星通信技术与应用的研究与发展起到一定的推动作用。在此，对各位作者的大力支持表示衷心的感谢。

郭庆

2021年9月13日

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105001

收稿日期: 2021-09-15

空天地一体化网络技术展望

Prospects for the Air-Space-Ground Integrated Network Technology



田开波 /TIAN Kaibo^{1,2}, 杨振 /YANG Zhen^{1,2}, 张楠 /ZHANG Nan^{1,2}

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518057;

2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

摘要: 作为实现全球网络无缝覆盖的重要手段, 空天地一体化是未来移动通信的重要愿景之一。简要回顾了地面无线移动通信和卫星通信的发展历史, 论证了空天地一体化网络技术研究的必要性, 并首次定义了网络融合发展的不同层次。随后针对空天地一体化网络中的网络架构、关键技术、融合终端 3 个方面, 展望了未来网络融合的演进。

关键词: 融合通信网络; 非地面网络; 地面网络; 未来无线通信系统

Abstract: As an important means to achieve seamless global coverage, the integration of Air-Space-Ground-based wireless network is one of the important visions of future mobile communication. The development history of ground wireless mobile and satellite communication is briefly reviewed, the necessity of network technology integrating space and ground is demonstrated, and the different levels of network integration development are defined for the first time. Finally, the prospect of the development of a future integrated network is proposed on three aspects including network architecture, key technology, and terminal.

Keywords: integrated communication system; non terrestrial network (NTN); terrestrial network (TN); future wireless communication system

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105002

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210923.1530.002.html>

网络出版日期: 2021-09-24

收稿日期: 2021-08-20

1 空天地一体化网络发展背景

19 世纪 30 年代以来, 随着法拉第电磁感应、电磁场理论等物理基础理论研究的出现, 科学先驱们发明了电报、电话等通信方式, 这使得人与人之间之间的沟通方式发生了根本性的变革。此后, 随着陆地无线移动通信系统和卫星通信系统的蓬勃发展, 无线通信也逐步应用于人类生产、生活的各个方面。多年来, 两类系统各自发展, 虽然取得了巨大的成功, 但面对愈加复杂多样的通信场景和需求, 也遇到

了发展瓶颈。因此, 空天地一体化融合通信成为了未来网络发展和应用的重要趋势之一。

1.1 无线移动通信

陆地无线移动通信主要以蜂窝移动通信系统为代表。从 20 世纪 80 年代开始, 该技术至今已经发展到第 5 代, 也就是 5G。如图 1 所示, 1G 采用模拟语音调制技术和频分多址技术, 能够提供语言通信, 但由于无法漫游, 只能作为区域性的通信系统。从 2G 开始, 通信系统中不断采用更加先

进的数字通信技术, 在为个人提供语音通信的同时, 提升了服务数据传输业务的能力。其中, 4G 系统随着正交频分复用 (OFDM) 和多输入多输出 (MIMO) 技术的引入, 网络提供数据、视频等高速率的移动宽带业务的能力得到大幅提升。与此同时, 前 4 代移动通信系统主要是面向以人为中心的场景, 解决人与人之间的通信; 而 5G 系统的发展, 则是将网络应用从面向人扩展到面向人和物, 从而实现了万物互联, 成为促进经济社会数字化的重要引擎。



▲图1 无线移动系统的发展过程

1.2 卫星通信

从概念上来看，卫星通信指地球上（包括地面和低层大气中）的无线电通信设备利用卫星作为中继而进行的通信。卫星通信的起源可以追溯至 1945 年英国科学家提出的利用同步卫星进行全球无线通信的设想。直到 1958 年，人们才将第一颗通信试验卫星“斯科尔”号送入太空。卫星通信虽然具有通信覆盖范围大、部署机动灵活、不受地形地貌灾害的影响等优点，但其技术门槛很高，因此全球仅有少数国家开展该类系统的研究，且各自保持技术独立。传统卫星通信由于其较高的成本和受限的能力，导致商用市场规模相对较小，网络的发展更迭相对缓慢。在此过程中，传统卫星通信也借鉴了地面移动通信的经验和技术，通过欧洲电信标准化协会（ETSI）制定了 3 种卫星通信标准（如表 1 所示），但仍未能改变其以私有的技术体制为主的特点，现有的卫星系统仍然无法通用。

1.3 星地融合

陆地无线通信经过近 30 年的发

展，已在全球大多数地区形成了较为完善的网络覆盖，为全球 80% 的人口提供移动通信服务；但受制于经济成本、技术、自然条件等因素，在人口密度低的偏远地区以及沙漠、森林、海洋等区域，地面无线和有线网络目前无法进行有效覆盖。而这些问题恰

恰是卫星通信的优势所在，因此，星地融合发展可以有效解决陆地无线移动通信所面临的瓶颈。与此同时，卫星通信又可以解决传统卫星通信中由技术体制不同和系统封闭性所带来的研发和使用成本居高不下、市场推广难等问题。尤其是随着卫星通信技术的发展，卫星的单星服务能力和数量得以有效提高，服务的业务场景和部分技术指标也与地面移动通信越来越接近。这些均使星地深度融合的紧迫性进一步加强。

现阶段，传统的卫星通信已经可以为地面网络提供干线传输和回程业务，如图 2 所示。随着技术的发展，未来星地融合将会分为不同的融合层次（具体如图 3 所示），并最终实现体制和系统的融合。近年来，为了推动这一目标，第 3 代合作伙伴计划（3GPP）等国际组织基于 5G，从应用场景、网络以及空口技术等维度展开了相关工作^[1]。例如，以 Thales 为代表的卫星制造商积极参与 3GPP 的标

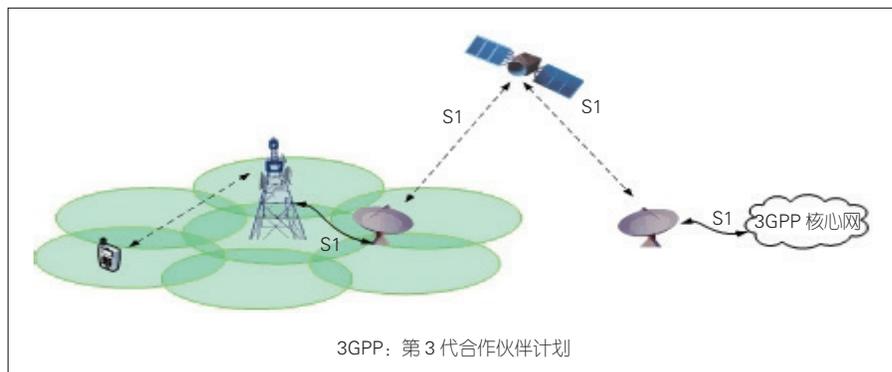
▼表1 ETSI 的卫星通信标准

标准名	特点
DVB-S/S2/S2X	卫星数字视频广播标准，使用单载波通信系统，主要用于电视转播、视频广播等数据服务以及语音通信
GMR-1	以地面 2G 标准 GSM/GPRS/EDGE 为基础制定 3 个版本的卫星移动通信标准，支持接入地面核心网
S-UMTS	以地面 3G 标准 WCDMA 为基础制定的卫星 - 通用移动通信标准，支持接入地面核心网

DVB-S: 数字卫星电视系统
EDGE: 增强型数据速率 GSM 演进
ETSI: 欧洲电信标准化协会

GMR: GEO 移动无线接口
GPRS: 通用分组无线服务
GSM: 全球移动通信系统

S-UMTS: 卫星 - 通用移动通信系统
WCDMA: 宽带码分多址



▲图2 浅层次的融合模式

准工作^[2]，在 Rel-15 阶段，成功推动了非地面网络（NTN）的研究立项^[3]，并在 Rel-16/17 阶段持续进行研究。与此同时，2019 年芯片厂商 MediaTek 也推动 Rel-17 中窄带物联网 NTN（IoT-NTN）相关技术标准的研究^[4]。按照计划，3GPP 将于 2022 年发布第 1 版的 NTN 通信标准。

总体来看，当前关于星地融合标准化研究主要是以地面通信标准为基础，并结合卫星通信传播的技术特点做出适应性改进。但随着未来网络的演进，为了更好地实现深度融合，进一步的增强设计是不可或缺的。

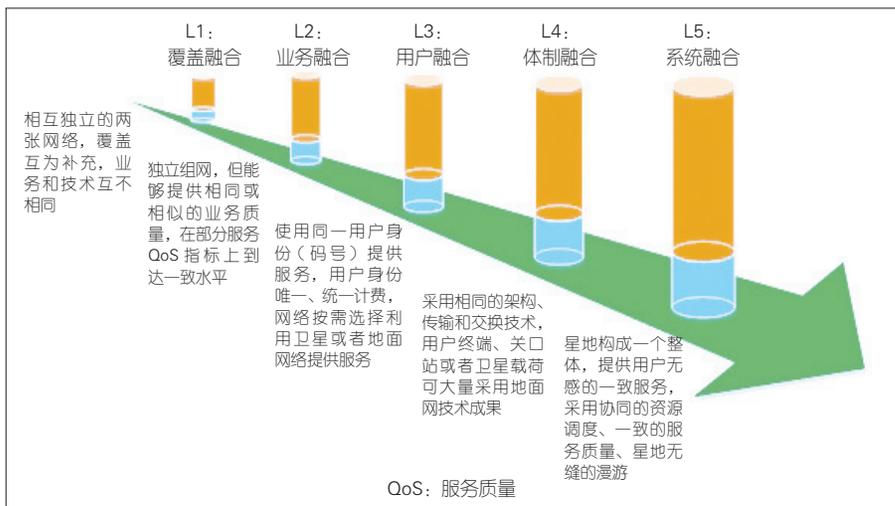
2 空天地一体化系统侧演进

空天地一体化是未来网络实现全球无缝覆盖的必由之路，也将会是由多种异构网络混合而成的复杂网络。本章中，我们将主要从系统侧来介绍空天地一体化在网络架构和关键技术两方面的演进方向。

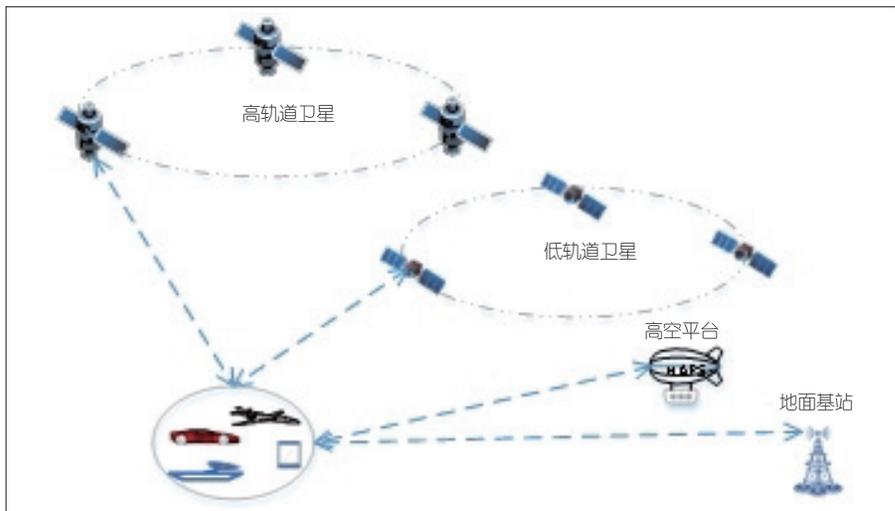
2.1 网络架构演进

在现阶段的卫星通信网络中，星侧的通信功能相对比较简单，比如缺乏基带信号处理能力或不具备星间链路。因此，在未来的网络建设中，如果卫星仍然只采用透明转发模式，将导致系统严重依赖地面信关站的建设，无法有效构成支撑广域高效通信的多层网络。

未来空天地一体化网络架构演进的前提是卫星平台能力的增强。例如，当卫星具有基带信号处理能力和星间链路时，数据可以在卫星间传递转发，网络架构也将由单层次网络向多层次网络演进，如图 4 所示。随着各类平台的发展，网络的系统侧节点可能会包括不同轨道高度的卫星、位于平流层的高空平台以及地面上的基站。其中，位于不同层次的网络节点可以通



▲图 3 星地融合层次



▲图 4 多层次网络架构

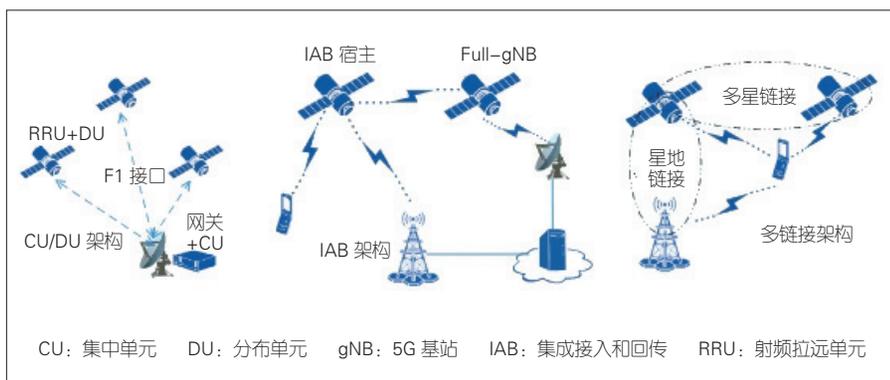
过标准化的无线空口技术进行互联互通，以承担不同的网络功能。例如，低轨道的卫星和地面基站分别作为天基和地基的接入网，高轨道的卫星作为天基骨干网，两者共同构建一个多层次的融合网络。根据网络中各系统节点能力及网络功能的不同，可以构成多种不同的接入网络架构，如图 5 所示。

未来融合网络核心网的结构和部署也是灵活多样的^[5]，如图 6 所示。其中，NTN 回传结构是指，NTN 网络作为地面无线接入网到地面核心网的无线回传网络；核心网共享结构是指，地面网络（TN）和 NTN 各自拥有独

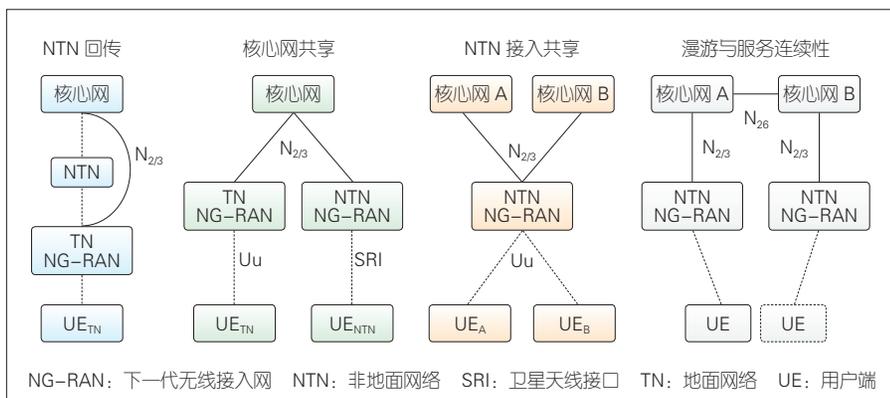
立的接入网，但共享同一个核心网；NTN 接入共享结构是指，拥有不同核心网的运营商可以共享 NTN 无线接入网；漫游与服务连续性部署结构是指，同一多模终端从 TN 网络漫游到 NTN 网络或从 NTN 网络漫游到 TN 网络，可以通过各自核心网之间的 N26 接口，支持漫游终端的服务连续性。

2.2 关键技术演进

地面无线移动通信系统和卫星通信系统发展了数十年，其应用环境和技术体制各不相同。为了实现统一的技术体制下的融合系统，我们需要在一些关键技术方面做深入研究。



▲图5 灵活的接入网络架构



▲图6 灵活的核心网网络架构

(1) 极简接入

接入网络是用户享受网络服务的第1步。然而，地面通信场景和卫星场景差异大。在卫星场景下，星地超远传输链路的长延时、卫星高速移动导致的大多普勒频移等因素，对接入和同步设计带来了很大挑战。面向天地一体化网络，为有效降低处理时延，提高用户体验，需要进一步优化随机接入过程，设计新的可以抵抗大频偏的接入序列^[6]，并在上行传输定时提前机制、时频偏估计与补偿方案等方面进行改进。

(2) 高效联合传输机制

在未来天地一体化网络中，卫星可能是数千颗甚至数万颗，这将会在地面形成多重覆盖的场景，不同卫星之间会相互干扰对方的数据传输，进而影响系统的能量效率和频谱效率。这就需要多星协作或星地协作下的高

效联合传输机制，以减少多重覆盖下的干扰问题，提升系统的资源效率。此外，未来的卫星将承载地面基站的部分或全部功能，数据的处理都在卫星侧。这样可以减少对地面的依赖，缩短调度的时延，为联合传输的实现提供了更加有力的条件。

(3) 新波形与多址接入

针对未来星地融合更广泛的部署场景需求及更高的频谱效率需求，人们需要研究抗大时延与频偏的高鲁棒性波形设计，并根据目标场景和业务的的不同，灵活选择子带带宽、子载波间隔、滤波器长度和循环前缀等系统参数，实现统一兼容的波形框架设计。此外，卫星物联网也是未来空天地一体化的重要应用场景。需要引入基于非正交的传输技术，同时实现免调度技术。也就是说，终端一旦有数据传输需求，就可以直接将数据发给卫星，

不需要卫星的授权或调度，免去了交互流程所致的开销，从而可以取得非常高的时效和谱效。

(4) 移动性管理

低轨道卫星是天地一体化网络的重要节点。卫星移动速度高达7 km/s以上，每个星波束服务用户的时长可能只有几十秒，这将会导致频繁的波束切换。整网用户的频繁切换将会给系统带来无法承受的信令开销，对用户服务的连续性带来极大影响。因此人们需要研究星地融合统一的移动性管理方案及切换策略，简化切换流程，降低信令开销，提高切换可靠性。切换的场景可能包括相同卫星的星内波束切换、不同卫星的星间波束切换或多连接情况下不同星地通信系统之间的切换等。

(5) 频谱管理

频谱资源是无线通信系统的命脉，而新一代移动通信技术的产生必然带来新的频谱需求。在无线通信系统的演进的过程中，为了维护网络服务的连续性和经济性，新旧系统网络会长期并存，且旧系统的频谱短时间内不会释放，这就增加了新一代通信网络频谱选择的困难性。为了满足未来6G通信传输速率需求，除了增加新的频谱（如太赫兹和可见光），还需要在频谱管理方面进行研究，具体包括：频谱重耕，为新一代的通信系统提供更多的低频段可用频谱资源；动态频谱共享技术^[7]，以感知无线电技术为基础，使异系统间或同系统异设备间可以共享同一段授权或非授权频谱，以解决固定频谱分配策略带来的频谱闲置和利用率不高的问题；提升频谱效率的物理层技术，如能够减少带外泄露的新波形调制技术、非正交多址技术、超大规模智能天线技术等。

(6) 人工智能（AI）

天地一体化网络是一个多层次的

异构网络，网络节点多，网络结构复杂。引入 AI 可以灵活地规划和改变网络的拓扑结构，实现网络拓扑结构的按需部署和优化，从而使网络能够自我管理、自我演进；更加合理地调度网络的软硬件资源，实现网络算力高效的利用；提升接入网侧的性能，能够自主感知学习传输环境的特性和变化，智能地决策不同终端的接入方式；在底层，还可以应用于联合参数优化、信道质量的预测、智能编解码方案的选择、波束间的干扰管理以及波束间的切换策略等。

3 空天地一体化终端侧发展

终端是无线通信系统中必不可少的一部分。在未来天地一体化通信网络中，终端的演进主要体现在形态和平台能力两个方面。

传统的无线移动通信终端主要是手持式的，最常见的就是手机；而传统卫星网络的终端形态通常分为手持式和甚小口径终端（VSAT）式，且其形态和终端的能力与业务类型有着密切的关系。手持式的卫星终端受尺寸、天线增益以及功率的影响，通常工作在 1~2 GHz 的频段上，仅提供语音通信和低速率数据传输等移动卫星业务；VSAT 式的卫星终端在尺寸功耗等方面受限制较小，能够使用 3 GHz 以上的频率，且提供中高速数据传输和广播业务等移动卫星业务和固定卫星业务。

在未来天地一体化通信网络中，终端的形态可能有 3 种，移动通信手持终端（即传统移动通信终端和卫星手持终端的融合）使用相同的空口技术及标准化频段；VSAT 式终端以车载、船载和机载模式存在，拥有一体化的设计，可以集成不同的频段、不同的天线，甚至可以支持多种技术的协议栈，因此可以进行灵活的扩展；物联网终端的关键

在于体积和功耗。

终端平台的能力有 4 个特点：（1）通信处理能力的增强。一体化终端的通信技术是与系统的技术相匹配的，系统新技术的引入会带来处理的复杂度，这需要融合终端能够处理更复杂的通信协议栈，以适应不同的应用场景接入不同的网络。（2）感知能力的增强。未来融合终端不仅仅是用于通话、上网和视频等消费需求，还会集成各种传感器来采集外部的环境信息并提供给网络，从而进行大数据分析应用；也可以采集个人的生理信息，实时监测身体状况等。（3）算力能力增强。终端感知能力的引入使得终端可以获取大量的数据，这需要终端在数据处理能力有所加强，以便能够及时有效地进行数据分析，减轻网络传输、处理海量数据的压力，并能及时将数据转变为有用的信息服务于用户。

（4）AI 能力的增强。终端获取的数据很多是语音、图像、视频等，而近年来 AI 被广泛用于语音、图像、视频识别等方面，因而未来的融合终端也需要具备较强的 AI 能力。

4 结束语

当前，B5G/6G 的研究工作正在如火如荼地进行。空天地一体化网络作为未来网络发展的重要特征，已是业内共识。通过地面网络和卫星网络的融合发展，可以解决各自发展所面临的瓶颈问题，并完成立体化通信网络的构建，进而真正实现在任何时间、任何地点与任意一方通信的美好愿景。空天地一体化网络的研究处于初始阶段，尚存在许多关键性问题需要解决。本文中，针对网络架构、系统关键技术以及终端 3 个方面，我们提出了技术演进的方向，希望能与学术界、产业界一起共同推动相关的技术研究。

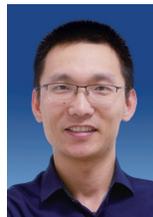
致谢

本研究得到了中兴通讯股份有限公司算法部部长胡留军、架构总经理段向阳、技术总监朱清华和方敏博士的技术指导和帮助，在此谨致谢意！

参考文献

- [1] 3GPP. Service requirements for the 5G system; stage 1 (Release 15) [R]. 2019
- [2] Thales. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) [R]. 2019
- [3] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 16) [R]. 2019
- [4] MediaTek Inc. New study WID on NB-IoT/eTMC support for NTN [R]. 2019
- [5] 田开波, 方敏. 从 5G 向 6G 演进的三维连接 [J]. 移动通信, 2020, (6), 96-103
- [6] ZHANG C, CAO W, YANG Z, et al. Random access preamble design for large frequency shift in satellite communication [C]//IEEE 5G World Forum (5GWF). Dresden, Germany: IEEE, 2019: 659-664
- [7] 李妍, 范筱, 黄晓明, 等. 面向未来的陆海空天融合通信网络架构 [J]. 移动通信, 44(6): 104-115

作者简介



田开波, 中兴通讯股份有限公司技术预研资深专家; 主要从事无线通信系统技术预研及标准化研究工作, 目前负责空天地海一体化技术预研工作; 先后参与 4G/5G 移动蜂窝网以及 IEEE 802.11ac/ah/aj/ax 等 WLAN 系列标准的制定; 发表论文 5 篇, 申请专利 40 余项。



杨振, 中兴通讯股份有限公司算法部技术预研高级工程师; 长期从事无线通信系统关键技术研发、标准化与专利保护工作, 目前负责 NTN 相关的技术研究工作; 申请专利 10 余项。



张楠, 中兴通讯股份有限公司技术预研高级工程师; 主要从事标准预研工作, 研究方向包括无线信道建模、NOMA、MIMO、NTN 通信网络、超材料及应用等; 发表论文 5 篇, 申请专利 40 余项。



面向低轨卫星的 频谱认知智能管控

Cognitive Intelligent Spectrum Management and Control for Low Earth Orbit Satellite System

李高/LI Gao¹, 王威/WANG Wei¹, 吴启晖/WU Qihui¹

(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 中国 南京 210016)
(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry
and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘要:基于天地一体频谱资源共享面临的挑战,提出了面向低轨卫星的频谱认知智能管控体系架构。频谱感知得到三维多域频谱数据并形成频谱地理数据库;三维补全技术补全缺失的数据;频谱预测预判频谱占用情况,辅助频谱感知和决策;强化学习、博弈学习可以进行智能频谱决策。这样可以形成集感知、补全、预测和决策的频谱认知闭环系统,为后续低轨卫星频谱资源管控研究提供一些指导和建议。

关键词:低轨卫星系统;频谱认知智能管控;频谱感知;频谱补全和预测;频谱智能决策

Abstract: Based on the challenges of space-air-ground spectrum sharing, a cognitive intelligent spectrum management and control architecture for Low Earth Orbit (LEO) satellites is proposed. Three-dimensional multi-domain spectrum data obtained by spectrum sensing is used to form a spectrum geographic database, followed by three-dimensional completion of the missing data, and then spectrum occupancy with prediction technology is used for assisting sensing and decision-making. Reinforcement learning and game-theoretic learning methods are used for intelligent spectrum decision-making. In this way, a closed-loop of spectrum cognition based on sensing, completion, prediction and decision-making is formed, in order to provide some guidance and suggestions for the subsequent research on LEO satellite spectral resource control.

Keywords: Low Earth Orbit satellite system; cognitive intelligent management and control; spectrum sensing; spectrum completion and prediction; intelligent spectrum decision

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105003

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210930.1547.006.html>

网络出版日期: 2021-10-05

收稿日期: 2021-08-17

1 研究背景

地面移动蜂窝网络在地域覆盖方面具有局限性,而卫星通信网络可以实现无线网络在全球的按需覆盖,满足各个地区和用户的通信需求。这在很大程度上解决了通信容量不足的问题,保证了未来各个领域内无线业务的发展。与同步轨道卫星相比,发射一颗低轨卫星所需能量较少,研发建设成本较低,传输时延

更短,路径损耗更小,且低轨卫星数量大,覆盖范围广,多个卫星组成的星座就可以实现全球覆盖^[1-2]。在“天地一体”通信网络的发展趋势下,低轨卫星系统成为地面通信系统的重要补充,在支持移动通信、边远地区基本通信和高速率用户接入等方面都十分有利。低轨卫星系统不仅可以满足全球未普及互联网区域的接入需求,与5G技术、物联网、云数据、智慧城市等融合发展还可带动各个

领域的产业发展和经济增长。在军事应用上,低轨卫星系统在构建更为高效可靠的军用通信网络、完备天地一体监测体系、强化军事战略层面的太空信息能力等方面也发挥了重要作用^[3]。近几十年来,随着航天和通信技术不断发展,低轨卫星通信领域呈现出越来越激烈的国际竞争态势。

比较有代表性的传统低轨卫星通信系统有铱系统、全球星系统、白羊系统和柯斯卡系统等,近年来又涌

现出成千上万颗以 OneWeb、Starlink 等为代表的低轨卫星星座,使得非静止轨道卫星在国际电信联盟(ITU)的申报数量大大增加^[4-5]。为了提高频谱使用效率,低轨卫星使用的频段不可避免地会和其他卫星发生重叠。低轨卫星星座之间、低轨卫星与对地静止轨道卫星之间、低轨卫星与地面通信系统之间都存在不同程度的频谱兼容性问题。各国发射的卫星在不同业务(包括空间业务)之间共享无线电频谱^[6]。

随着卫星通信的高速发展,以美国为首的航天强国抢夺频谱资源的现象越演越烈,形成独占太空的霸权势力。L、S、C、Ku、Ka 等频段的频谱资源的使用趋于饱和^[3]。为应对频谱资源稀缺问题,近年来中国也开始加快低轨卫星系统的建设步伐,相继建成鸿雁星座、虹云星座、银河航天首发星。但是中国卫星事业起步时间较晚,频谱资源“先占先得”的分配方式使得中国频谱资源的使用处于劣势^[7]。为了保障现有低轨卫星的通信业务,同时实现频谱资源可重复高效利用,除了加快发展航天事业外,还需加快对低轨卫星频谱进行有效监测和管理的技术研究。

2 低轨卫星频谱认知智能管控

2.1 面向低轨卫星的频谱认知智能管控体系架构

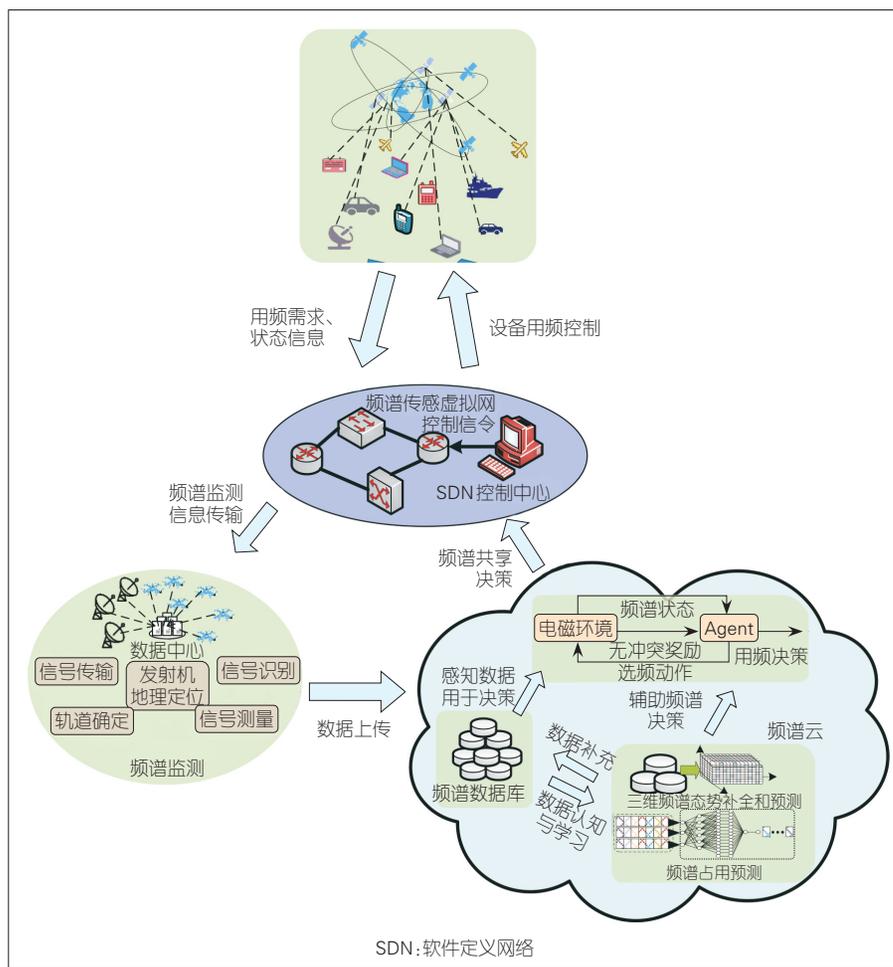
和地面移动通信系统频谱资源共享一样,低轨卫星频谱资源共享正在从静态管理模式向动态管理模式转型。电磁频谱空间认知和智能频谱管理利用数据挖掘和机器学习的方法对海量频谱数据进行认知处理,使频谱资源的动态管理更加智能。面向低轨卫星的频谱认知智能管控包括频谱数据监测、补充、预测和决

策部分,是一个从频谱感知到频谱接入的动态频谱认知闭环系统。面向低轨卫星的频谱认知智能管控体系架构及管控流程如图1和图2所示。

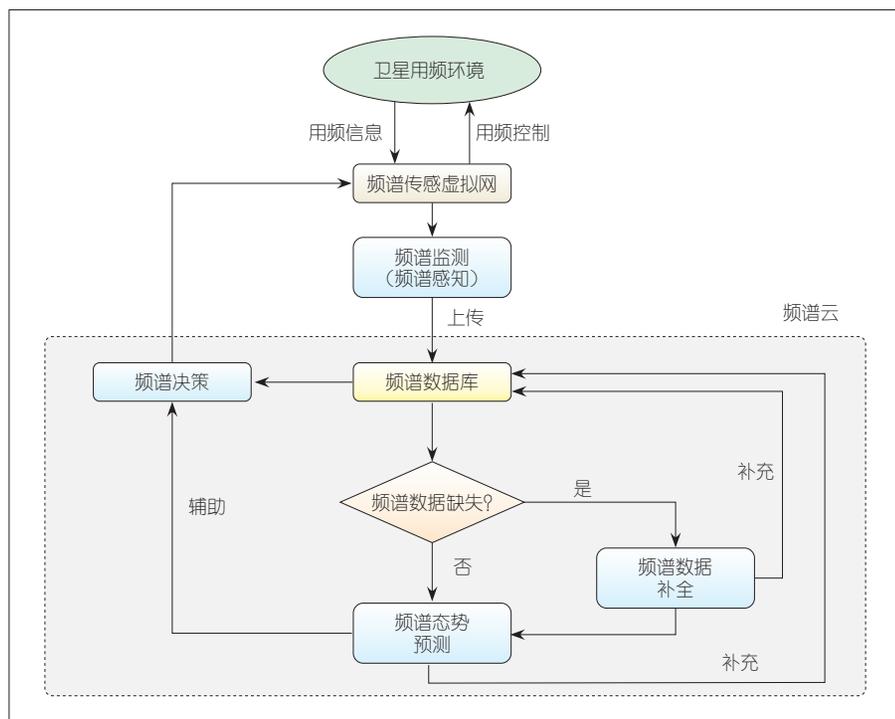
首先,通过感知设备(包括卫星专用频谱监测设备和群智频谱感知模块)感知频谱状态。卫星监测的目标主要有两个:一是监测卫星资源利用情况,包括卫星轨道占用情况、频率占用情况和波束覆盖范围等;二是监测干扰,包括监测是否有干扰及干扰源的位置等。通常监测的非对地静止卫星轨道(GSO)卫星频段是超高频(UHF)、L、S、X、Ku 和 Ka 频段,即低轨卫星对应的业务频段。随着宽带互联网卫星通信使用的日益增多,以及带宽需求的不断扩大,监测频段

将扩展至 Q 频段及以上。

低轨卫星频谱感知支持频谱管控过程,可使用分布式智能频谱感知模块感知空间无线电业务频谱状态。感知数据传至频谱云^[8]即可形成可分析利用的频谱资源库。然而,由于感知设备和感知角度等因素,在频谱信息收集和处理过程中,所得到的频谱数据往往是不完整的。在频谱云上,基于频谱大数据进行频谱认知与学习,利用频谱补全将数据库中不同格式的数据整合、填充得到完整的频谱数据。频谱预测可以利用完整的频谱数据探测可用的频谱空洞,形成可用的频谱资源库,从而辅助频谱决策,指导用频设备的频谱接入。也就是说,这样做可以深耕现有频谱大数



▲图1 面向低轨卫星的频谱认知智能管控架构



▲图2 面向低轨卫星的频谱认知智能管控流程

据,探索共享技术,使低轨卫星空间无线电业务从专用走向共用,从静态共享到动态共享,实现无线电频谱资源的精细化管理。

频谱认知智能管控体系使用软件定义的设备。低轨卫星业务的发展使得频谱监测越来越趋于分布式、分散化、复杂化和多样化,传统的基于硬件的频谱分析仪不再满足当今复杂、密集和不断发展的频谱环境需求,软件定义无线电技术带来了新型的频谱分析平台。同时使用软件定义的用频设备和管控相关设备使得智能管控更灵活和轻便。

频谱认知智能管控架构使用认知-软件定义网络(C-SDN),将低轨卫星业务面和频管控制面分离开来。C-SDN控制面通过南向接口与频谱资源池相连接,通过北向接口与应用层相连接,以及时接收与反馈应用层服务需求。感知得到的频谱状态信息被上传至频谱管控数据链,数据链再通过管链设备将信息传输到频管

中心,最终实现对全局频谱管控信息的监测控制。

2.2 三维多域频谱态势感知技术

频谱感知是实现频谱资源管控的关键前提。传统的频谱感知方法主要是匹配滤波检测、能量检测和循环平稳特性检测。这些技术在本质上是把频谱感知单纯地看作是一个信号检测问题,感知的数据并不全面,应用场景也非常有限。随着认知无线电技术的发展,近年来又相继出现了协作频谱感知、群智频谱感知和压缩频谱感知等频谱感知技术。这些技术主要用来感知各个时间内频谱资源的使用情况,包括时域和频域二维的频谱数据,但并未很好地和感知用户的空间位置实时结合。

面向低轨卫星的频谱感知通过三维空时频谱感知算法来获取低轨卫星电磁频谱的三维多域频谱态势。我们首先根据不同的监测任务选择合适的监测点来部署各种类型的监

测系统,包括固定监测站、可移动监测站和空中监测站等,形成分布式监测结构。将监测设备联网可以全方位地监测低轨卫星频谱的使用情况,并获取海量频谱数据。在获取时频二维频谱数据后,我们可以使用移动监测站来确定授权卫星通信信号的地面发射机或其他未授权干扰源的空间位置信息。常用技术包括使用到达角(AOA)、到达功率(POA)和到达时间差(TDOA)互相关算法等。这些技术源于卫星地理定位测量的结果,可以描述辐射源最可能来自的区域。由此可以获取辐射源的空间位置信息,包括精度、纬度和高度。为了做到频谱的深度共享,还要进行频谱云化,即将采集到的包含时域、频域和地理定位的三维多域频谱态势数据传回频谱云,在云计算中心进行频谱认知分析、处理和决策。

2.3 三维频谱态势补全技术

在频谱数据收集和处理过程中,基于有限监测节点的电磁频谱监测信息所得到的频谱数据往往是不完整的。为了保证后续数据分析处理的准确性,人们需要利用信息融合、相关分析、大数据挖掘等技术,充分挖掘频谱数据在时、空、频三维的相关性,实现区域内电磁环境数据的补全和恢复,从而形成区域内完整的电磁态势。我们建立了基于时、空、频三维相关性的张量形式频谱数据模型,然后针对大规模数据,设计融入矩阵分解的频谱态势张量补全算法。张量补全问题用张量秩最小化问题描述为^[9]:

$$\begin{aligned} \min_{\mathcal{X}} \quad & \text{rank}(\mathcal{X}) \\ \text{subject to} \quad & \mathcal{X}_{\Omega} = \mathcal{M}_{\Omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, \mathcal{X} 和 \mathcal{M} 具有相同的维数, $\mathcal{X}, \mathcal{M} \in R^{I_1 \times I_2 \times \dots \times I_N}$, \mathcal{M} 为观测所得

到的存在数据缺失的张量, Ω 指观测指标集。由此构建出基于频谱数据张量的低秩性质的核范数最小化优化模型, 而矩阵秩最小化问题又可以转化为求矩阵核范数最小化问题:

$$\min_{\mathcal{X}} \sum_{n=1}^N w_n \|\mathcal{X}_{(n)}\|_*$$

subject to $\mathcal{X}_{\Omega} = \mathcal{M}_{\Omega}$, (2)

其中, $\sum_{n=1}^N w_n \|\mathcal{X}_{(n)}\|_*$ 为张量的核范数。利用简单低秩张量补全算法 (SiLRTC)、快速低秩张量补全算法 (FaLRTC) 和高精度低秩张量补全算法 (HaLRTC) 3 种算法^[9] 可以得到全局最优解。在传统张量补全算法中融入矩阵分解技术, 可以将大规模矩阵转化为小规模矩阵, 以减小所需奇异值分解的矩阵规模, 从而降低算法所需运算量, 提升数据张量补全效率。

除了以上补全技术, 还有基于生成对抗网络 (GAN) 的三维频谱态势补全技术。该技术利用存储的历史或经验频谱数据, 对三维频谱张量进行切片处理和灰度处理, 得到一定量的完整三维频谱态势或场强训练数据; 每组训练数据为三通道的完整三维频谱态势或场强“灰度图”和对应的三通道的缺损三维频谱态势, 又或场强“彩色图”。利用该训练数据对 GAN 网络进行迭代且对抗式的离线训练, 得到具有三维频谱态势或场强补全机制的 GAN 网络。将训练好的网络在线部署于实际应用中, 传到频谱云中的不完整的频谱数据就可以利用已学好的 GAN 网络实现大缺损率频谱态势补全, 其补全效果远好于传统基于插值的方法。

2.4 三维频谱态势预测和信道占用度预测技术

全球频谱实测数据分析表明: 任何一个频谱数据都不是孤立存在的,

在时间、频率、空间各个维度上具有密切的相关性。因此, 人们可充分地建模、分析、挖掘、利用这些内在的相关性, 并进行频谱预测。通过分析历史频谱数据在时间、频率、空间上存在的高度相关性, 人们可以预测下一时段频谱资源的使用情况。例如, 基于时、空、频三维张量形式的频谱数据模型就可用于频谱态势预测。我们首先对感知到的频谱数据进行处理, 生成多张时频图像, 一张图像即是一天内多个时隙的多个频点 (频带) 数据, 从而建立三维频谱张量模型。然后对未来一天的频谱数据进行预填充, 最后基于过去多张频谱图像, 即可预测出未来一天的完整频谱态势。如图 3 左侧所示, 已知前 $T_1, T_2, T_3, T_4, \dots, T_{n-1}$ 天的频谱态势, 再基于张量补全理论, 利用三维频谱态势补全预测模型预测出第 T_n 天的频谱态势^[10]。

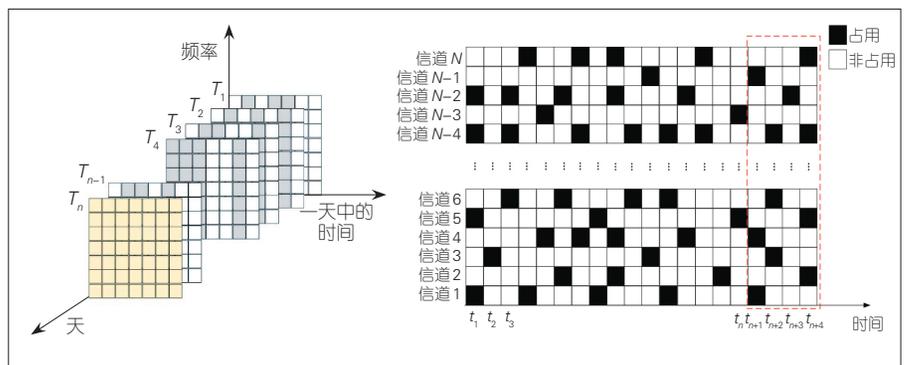
面向信道的频谱态势预测是认知无线电中的一项关键技术。根据统计信道的历史信息, 预判性地做好频谱占用策略, 可以减少频谱感知过程中消耗的大量时间和能量。根据频谱预测的结果, 认知用户可以选择最优的信道或提前撤出主用户可能会占用的信道。所以, 准确的频谱预测能够主动地减少干扰和延迟, 提升频谱利用率, 从而提高网络的吞吐量, 即用认知无线电的方式提前侦测

空闲频谱以实现频谱资源的重复利用。如图 3 右侧所示, 根据各个信道在 t_n 时间的历史占用情况, 可以预测后续多个时隙的信道占用状况。通过统计一段时间内信道忙闲程度, 能够对下一时刻或时段各个信道的忙闲程度进行精确预测, 从而能够动态地瞄准下一时刻或时段可采用的通信频率, 以便将后续通信信号发送到空闲程度高的信道上进行传输, 智能适应动态频谱变化。

深度学习中的循环神经网络 (RNN) 在解决时间序列问题方面具有优势。RNN 网络允许将历史输入的信息存储在网络的内部状态中, 从而利用当前所有可用输入信息进行频谱预测。然而, 由于梯度消失或梯度爆炸, RNN 网络的性能受到限制。长短期记忆 (LSTM) 神经网络引入记忆单元结构, 能够利用门控单元控制输入、遗忘和输出信息的量, 从而具有更强的解决时间序列问题的能力, 可以进行有效的信道占用度预测。

2.5 智能频谱决策技术

面向低轨卫星的频谱决策技术需依据频谱感知结果或预测结果。制定合理的频谱资源使用策略能够为实现低轨卫星频谱共享提供指导和依据, 然而低轨卫星业务的发展使得频谱决策越来越困难。其中的主要原因是电磁环境复杂化、设备多样



▲图3 三维频谱态势补全预测和信道占用度预测

化,且不同设备使用的频谱干扰愈发严重,不同用户使用频谱的优先级也不同。如何利用多元化的频谱感知数据并选择最优的用频策略成为智能决策的研究内容。强化学习通过与环境交互获得学习经验,并逐步改进行为策略,从而具有非常强的动态选择能力和自主学习能力。使用强化学习算法进行智能选频决策时,每一决策时刻的各个通信信道的占用状态即为当前环境状态,选择可接入的信道即为当前行为策略,并通过信道碰撞冲突概率和通信质量等评估方式设定奖惩机制,即采用“学习-决策-执行”环路实现频谱的实时决策^[11]。在基于“频谱拍卖”^[12]的频谱决策技术中,每个频谱用户都是“报价人”,中心频谱管理器为“竞拍者”,竞拍者以“赢者决策”策略把当前可用的空闲频谱资源进行决策和分配,从而最大化整个系统的全局吞吐量收益。该方法利用频谱大数据进行频谱智能决策时,博弈学习可以发挥重要作用。此外,还有基于迁移学习的频谱决策技术^[11]。由于频谱感知和预测的大数据具有多样特性,因此具备多域学习能力的迁移学习可以从不同领域、不同任务和不同分布的数据中提取知识,再结合当前新学习的知识,就可以很好地进行频谱智能决策。

3 结束语

未来卫星互联网时代频谱资源共享已成为发展趋势。智能频谱感知从总体上支撑频谱管理的过程,是保证频谱有效管理的必要手段。使用张量补全及预测算法可以补全有限观测条件下的频谱感知数据并预测频谱态势。利用已补全的频谱数据对未来频谱状态进行预测包括对

信道占用度的预测,预测结果可以辅助智能频谱决策。通过频谱决策,认知用户可以选择最优的信道或是提前撤出主用户可能会占用的信道。这些方法可以解决低轨卫星之间、低轨卫星和中高轨卫星之间,以及低轨卫星和地面通信系统之间频率复用问题。总之,本文提出的面向低轨卫星系统的频谱认知智能管控体系架构及相关技术可以智能地统筹、协调低轨卫星各业务无线电的用频需求,支持并鼓励高效利用频谱资源。

参考文献

- [1] YOU L, LI K X, WANG J H, et al. Massive MIMO transmission for LEO satellite communications [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2020, 38(8): 1851-1865. DOI:10.1109/JSAC.2020.3000803
- [2] CHU J H, CHEN X M, ZHONG C J, et al. Robust design for NOMA-based multibeam LEO satellite Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(3): 1959-1970. DOI:10.1109/IIOT.2020.3015995
- [3] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Cognitive radio techniques for satellite communication systems [C]//2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2013: 1-5. DOI:10.1109/VTCFall.2013.6692139
- [4] 袁俊, 鲍晓月, 孙茜, 等. 巨型低轨星座频率轨道资源趋势分析及启示建议 [J]. 空间碎片研究, 2021, 21: 48-57
- [5] DI B Y, SONG L Y, LI Y H, et al. Ultra-dense LEO: integration of satellite access networks into 5G and beyond [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(2): 62-69. DOI: 10.1109/MWC.2019.1800301
- [6] SU Y T, LIU Y Q, ZHOU Y Q, et al. Broadband LEO satellite communications: architectures and key technologies [J]. IEEE wireless communications, 2019, 26(2): 55-61. DOI: 10.1109/MWC.2019.1800299
- [7] LAGUNAS E, SHARMA S K, MALEKI S, et al. Resource allocation for cognitive satellite communications with incumbent terrestrial networks [J]. IEEE transactions on cognitive communications and networking, 2015, 1(3): 305-317. DOI:10.1109/TCCN.2015.2503286
- [8] WU Q H, DING G R, DU Z Y, et al. A cloud-based architecture for the Internet of spectrum devices over future wireless networks [J]. IEEE access, 2016, 4: 2854-2862. DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2576286
- [9] LIU J, MUSIALSKI P, WONKA P, et al. Tensor completion for estimating missing values in visual data [J]. IEEE transactions on pattern

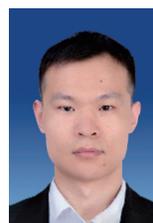
analysis and machine intelligence, 2013, 35 (1): 208-220. DOI:10.1109/TPAMI.2012.39

- [10] DING G R, WU F, WU Q H, et al. Robust on-line spectrum prediction with incomplete and corrupted historical observations [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2017, 66(9): 8022-8036. DOI: 10.1109/TVT.2017.2693384
- [11] 吴启晖, 邱俊飞, 丁国如. 面向频谱大数据处理的机器学习方法 [J]. 数据采集与处理, 2015, 30(4): 703-713. DOI: 10.16337/j.1004-9037.2015.04.001
- [12] NIYATO D, HOSSAIN E. Spectrum trading in cognitive radio networks: a market-equilibrium-based approach [J]. IEEE wireless communications, 2008, 15(6): 71-80. DOI: 10.1109/MWC.2008.4749750

作者简介



李高, 南京航空航天大学电子信息工程学院在读硕士研究生; 主要研究方向为无线通信、认知无线网络、频谱数据挖掘等。



王威, 南京航空航天大学电子信息工程学院研究员; 主要研究方向为空地一体化网络、电磁频谱安全和区块链。



吴启晖, 南京航空航天大学特聘教授、副校长, 教育部“长江学者”特聘教授, 国家百千万人才工程入选者, 国家突出贡献中青年专家, 工业和信息化部通信科学技术委员会委员, IET Fellow, 电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室主任, 中国电子学会理事, 中国通信学会云计算与大数据专业委员会副主任; 主要研究方向为认知信息论、电磁空间频谱智能管控、天地一体化信息网络、无人机集群智能通信; 主持无人机频谱认知似国家自然科学基金重大仪器等国家级重大/重点项目 10 余项; 获日内瓦国际发明展金奖 1 项, 国家科技进步奖二等奖 1 项, 省部级科技进步奖一等奖 3 项、二等奖 2 项、三等奖 7 项; 发表论文 100 余篇。

面向低轨卫星星座的 多星协作信号检测技术

Multi-Satellite Cooperative Signal Detection for Low Earth Orbit Constellations

王虎威/WANG Huwei, 叶能/YE Neng, 安建平/AN Jianping

(北京理工大学, 中国 北京 100081)

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)



摘要:低轨(LEO)卫星通信因其时延低、路损小且单星成本低等优势,近年来已成为全球通信领域的研究热点。面向未来数千乃至数万颗规模的LEO卫星星座,多星协作信号处理技术可以充分运用多颗卫星的信号收发与处理能力,挖掘低轨卫星星座的规模优势,是使能未来6G空天地一体泛在互联的关键技术。分析了多星协作信号检测技术的典型技术路线和实现方案,并探寻多星协作虚拟阵列信号检测技术在未来大规模LEO卫星星座中的应用前景。

关键词:低轨卫星星座;多星协作;虚拟阵列;信号检测

Abstract: Low Earth Orbit (LEO) satellite communications have become a research hotspot in the communication field in recent years due to its low latency, small path loss, and low-cost platform. With thousands to tens of thousands of satellites in the future LEO constellations, cooperative signal processing technology can tap the scale advantages of the mega constellation by utilizing the distributed transceiving and processing capability of multiple satellites, which makes it a promising technology to enable ubiquitous access in 6G. The recent research progress related to multi-satellite cooperative signal detection technology is analyzed, concerning both the technical routes and the implementation scenarios. Besides, the application prospect of multi-satellite cooperation technology based on the concept of the virtual array in LEO constellations is also explored.

Keywords: LEO constellations; multi-satellite cooperation; virtual array; signal detection

卫星通信具有覆盖范围广、通信距离远、组网灵活等优点,是一种能够满足泛在连接以及个性化传输需求的强有力选择。其中,低轨(LEO)卫星通信系统以低时延、小路损、低单星成本等优势,近年来逐渐受到各国移动通信研究人员的重视^[1-5]。

相较于地面移动通信,LEO卫星通信系统覆盖更广,更适合在戈壁、

沙漠、高山、森林、海洋、空中等无人区进行全球通信;相较于高轨卫星通信,LEO卫星通信系统延时更小、速率更高,且具备轻小型化的终端,支持全球随遇接入,可实现真正意义上的全球泛在连接^[6]。当前全球各国正在积极抢占LEO卫星通信的发展先机,提出大量LEO巨型星座建设规划。例如,美国Space X公司计划在近地轨道发射4.2万颗卫星,组成巨型星座,其中约1.2万颗已被允许发射;中国相继推出“虹云”“鸿雁”等星

座计划,加快了LEO卫星星座的发展步伐。

传统的卫星通信系统通常使用单颗卫星,将信号从用户转发到信关站。然而,LEO卫星高度较低,单星覆盖范围小,可用时间短,且星地链路存在阴影衰落和多普勒效应等问题,很难保证数据传输的高速率和高可靠性。为此,研究人员开展了各种技术和策略研究来提高LEO卫星通信系统的容量和频谱效率。多输入多输出(MIMO)作为一种使能技术,

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105004

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210930.1247.004.html>

网络出版日期: 2021-09-30

收稿日期: 2021-08-25

基金项目: 国家自然科学基金(62101048、62071038、61771051、61971038)

通过在收发两端配置多根天线构成拥有多个信道的通信系统,可以在同一时刻利用多个信道传输数据来更好地利用空间自由度,从而显著提高系统容量。考虑到LEO卫星星座的多用户可能同时处于多星覆盖区域,我们可以借鉴地面MIMO系统,利用多星协作传输技术来获得分集增益,从而提高LEO卫星通信系统的吞吐量和可靠性。

1 LEO卫星星座发展现状

1.1 LEO卫星星座的全球部署情况

20世纪80年代,小卫星技术的兴起促进了LEO卫星星座的发展。从90年代起,发射组网并运营的LEO卫星方案有Iridium、Orbcomm和Globalstar星座计划。随后,LEO卫星星座的发展经历了低谷时期。近年来,由于地球同步轨道资源限制以及LEO卫星制造和发射等技术的突破,LEO卫星星座逐步表现出巨大的发展潜力和广泛的应用前景。2013年,“另外三十亿人”(O3b)星座部署实施,正式拉开了全球卫星互联网的发展序幕。随后,全球兴起了LEO卫星星座的研究和建设热潮,典型的有Starlink、OneWeb、Telesat等。以Starlink为例,其系统空间段由两个星座组成:一个是LEO星座,计划在高度为1 110~1 325 km的83个轨道面上部署4 425颗Ka和Ku波段卫星;另一个是甚低轨星座,将在更低的340 km轨道部署7 518颗V波段卫星,总卫星数达11 943颗^[7]。

近年来,中国LEO卫星星座呈现出快速发展的态势。2020年4月,中国首次将“卫星互联网”纳入“新基建”的范畴,卫星互联网的建设已上升至国家战略高度^[8]。在“十三五”规划期间,以航天科技、航天科工为首

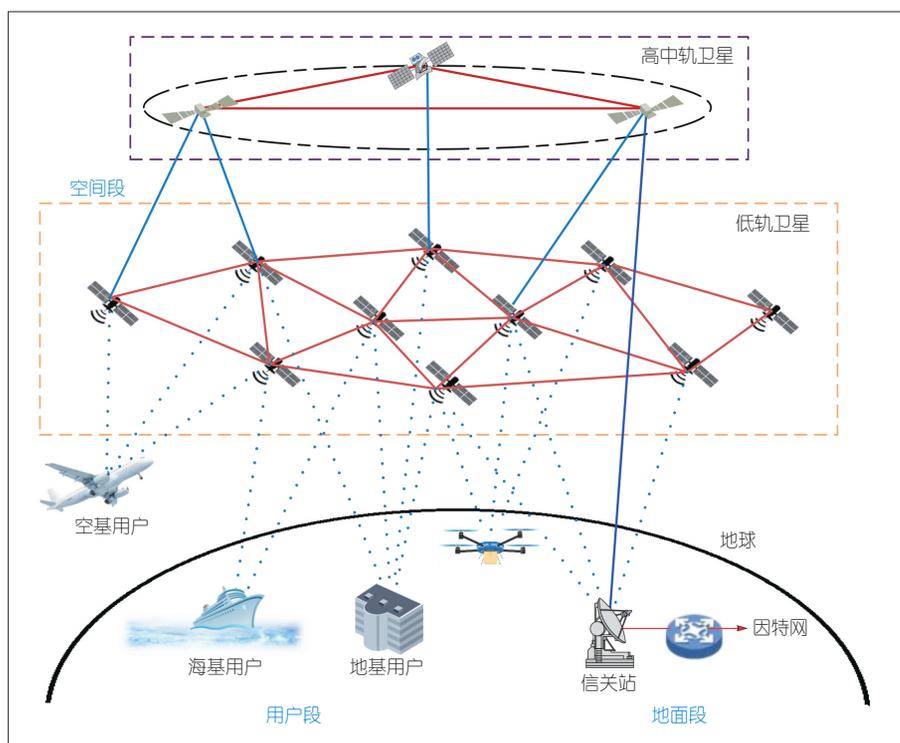
的央企卫星集团提出了各自的卫星互联网计划,推出了“虹云”“鸿雁”星座计划并发射了试验星。其中,“鸿雁”星座由航天科技集团提出,为中国首套全球LEO卫星通信系统,由300多颗LEO卫星组成;“虹云”星座是航天科工集团提出的,由156颗轨道高度为1 000 km的LEO卫星组成。民营企业银河航天计划发射650颗卫星,通过规模化研制低成本、高性能的5G卫星,打造LEO宽带通信卫星星座并成功发射首发星。2021年4月,中国星网集团正式成立,将为中国卫星星座的建设和发展注入强大动力^[9]。

1.2 典型LEO卫星星座系统架构

LEO卫星轨道高度在2 000 km以内,相较于中高轨卫星具有信号更强、部署更快、传输时延更低等优势,近年来吸引了业界广泛的研究兴趣。LEO卫星星座系统架构如图1所示,包括空间段、地面段和用户段3部分。

空间段即卫星星座,由多颗LEO卫星组成,同时兼容中高轨,采用星间链路实现互联互通;地面段主要实现卫星星座的管理与运营,是系统的控制中心、数据交换中心、运营中心,由信关站、测控站、移动通信网络、运控系统、综合网管系统和业务支撑系统组成;用户段主要由接入网及接入终端组成,包括车载站、舰载站、机载终端、电脑以及手持移动终端等。LEO卫星星座的多星系统架构及星上处理能力为多星协作信号检测的实现奠定了基础。通过星间链路与星上处理转发,可以实现全球组网和数据交换。

面向未来数千颗至数万颗规模的LEO巨型星座,星地链路的高路径损耗、阴影衰落以及LEO卫星高速移动所导致的多普勒效应,给通信系统的可靠性带来了严峻挑战。因此,需要研究适配LEO卫星星座的通信信号处理技术来提升谱效、能效,并提



▲图1 低轨卫星星座系统架构

高传输可靠性。相较于传统卫星通信系统,巨型星座的特点给LEO卫星通信系统带来多重覆盖能力,而来源于移动通信领域的MIMO技术则为多星协作传输提供了借鉴意义。

2 卫星MIMO技术与信号检测技术

多星协作的关键是结合MIMO技术来实现空间分集效果,从而提高传输性能。本节中,我们探讨卫星MIMO技术与MIMO信号检测技术。

2.1 卫星MIMO技术

MIMO技术的基本原理是在无线通信系统的发送端和接收端配置多副天线,使信号在发送端能够利用多根天线进行独立传输,并在接收端利用多根天线恢复原始信息。这样能够充分利用空间资源,在不增加发射功率和带宽的前提下产生分集复用增益,提升系统信道容量、传输速率及可靠性指标,并且可以充分利用与空时码结合产生的编码增益。MIMO技术现已成为4G、5G等移动通信系统的关键技术^[10-12]。

2005年,卫星MIMO系统开始受到业界的广泛关注,而与之相关的信道模型、系统设计和编码技术等研究也相继展开。由于星地视线(LOS)信道条件限制了信号多径分集的数量,从而限制了MIMO的增益潜力。天线反射器尺寸较大、散射环境缺失,这都使得卫星无法部署具有足够间距的天线,以获得较大的信号去相关^[13]。为获取MIMO增益,目前将MIMO技术应用到地球同步轨道(GEO)卫星通信系统主要有如下几种方案(如图2所示):一种是极化卫星MIMO系统^[14],在GEO卫星和地面终端各配置双极化天线,包括左旋圆极化天线(LHCP)和右旋圆极化天线

(RHCP),利用极化分集获取MIMO增益;另一种是分布式卫星MIMO系统^[15],利用两颗GEO卫星与地面设备构成空间分集。此外,还有一种同时运用空间分集和极化分集的方案^[16],该方案由两颗高轨卫星和一个地面移动终端组成,每颗卫星均配有一副双极化天线,地面移动终端配有两副双极化天线,同时利用极化分集和空间分集构成分布式双极化卫星移动MIMO系统。

为了提高现有卫星资源的容量和频谱效率,可以在GEO通信系统中广泛使用协作传输,这可以带来较大的MIMO增益。针对日益增加的数据传输需求,LEO卫星星座因其庞大的星座规模而具备了更大的分集增益潜力,因此面向LEO卫星星座开展卫星MIMO与多星协作技术研究将为解决日益增加的数据传输挑战提供广阔思路。

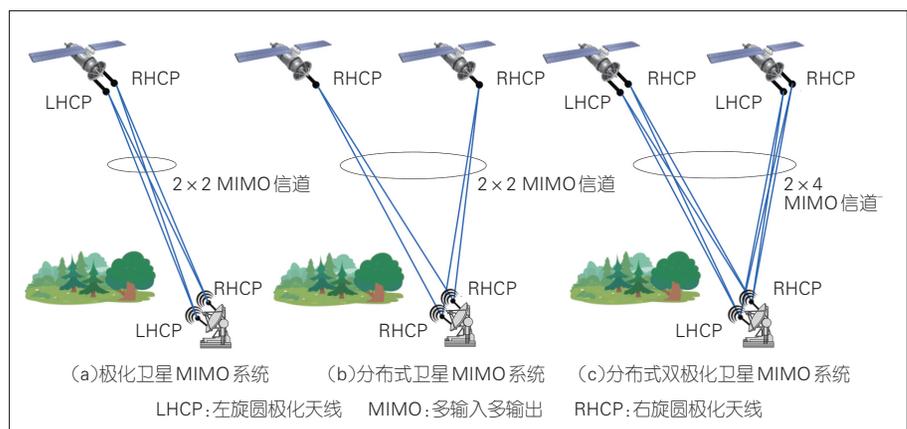
2.2 MIMO信号检测算法

MIMO技术引入了天线间信号干扰,因此需要先进的信号检测技术对接收信号进行处理。最大似然检测算法理论上拥有最佳检测性能,但其复杂度随着天线数目呈指数增长,在实际系统中难以应对系统用户数目较多的情况。目前针对MIMO系统,典型信号检测算法包括以下几种:

第1种是线性信号检测算法,包括最大比合并检测算法,即匹配滤波器检测算法、迫零检测算法以及最小均方误差检测算法等。线性信号检测算法主要依据干扰置零的思想对接收的向量进行线性加权,即通过一个检测滤波矩阵对接收信号进行线性处理,从而把相互干扰重叠的信号分离开来,再对每个用户的信号进行检测。线性信号检测算法的计算复杂度相对较低。

第2种是非线性信号检测算法,包括干扰抵消多用户检测算法、正交(QR)分解检测算法等。线性检测虽然复杂度低,但性能相对较差。为提高信号检测的可靠性,非线性检测利用判决反馈的原理,即当已经检测出这层符号时,就将其从待检测符号中消除,再继续检测其他信号,从而减小干扰并提高判决可靠性。但这样做也增加了计算的复杂度。

LEO星座卫星数量更庞大,布局更密集,分集增益潜力也更大,且星上处理资源有限,还面临信号处理复杂度上升的巨大挑战。为此,研究面向LEO卫星星座的多星协作虚拟阵列信号检测技术,能够充分挖掘LEO卫星星座的空间分集增益,从而提高传输速率和可靠性,满足下一代通信系统高速泛在的连接需求。



▲图2 3种卫星MIMO系统示意图

3 基于协作的卫星通信虚拟阵列信号检测技术

MIMO 技术在密集散射多径传播信道中能够实现高 MIMO 容量增益,而在星地 LOS 环境中性能却严重下降。由于卫星尺寸和硬件实现的限制, MIMO 技术很难直接应用于现有的卫星平台。虚拟 MIMO 技术通过多设备的分布式协作来模拟一个 MIMO 系统,使得分布的无线设备组成虚拟天线阵列,从而突破了终端天线数的制约^[17-19]。虚拟 MIMO 技术有望于在多星协作架构下获取较高的 MIMO 增益。本节中,我们基于协作的卫星通信虚拟阵列信号检测技术展开介绍。

3.1 单星多节点信号检测

单星信号检测为多星协作信号检测提供了基础。由单星对终端设备信号检测发展到多颗卫星进行星间协作处理的卫星虚拟阵列信号检测技术,实现了多星信号检测增益。针对单星信号检测,目前业界广泛采用的是单星多节点卫星 MIMO 通信系统(如图 3 所示),该系统采用陆地移动卫星信道建模,包括 1 颗卫星和 N 个设备终端。地球站要检测多颗卫星节点的数据,考虑卫星通信系统的多路中继,假设上行链路和下行链路信道都分配单独的频带以充分补偿多普勒频移,且由于星地链路时延问题不假定信道互易性,此时卫星接收到来自 N 个终端的数据可以写成:

$$y_s = \sum_{k=1}^N H_k u_k x_k + n_s, \quad (1)$$

其中, x_k 是终端 k ($k = 1, 2, \dots, N$) 的传输符号, H_k 为上行链路信道矩阵, u_k 为终端 k 的发送权向量, n_s 表示加性高斯白噪声。经过中继转发后卫星将接收到的数据传输到地球站,地球站接收到的数据表示为:

$$r = aGy_s + n, \quad (2)$$

其中, a 为转发器增益, G 为下行链路信道矩阵, n 表示地球站处的加性高斯白噪声。将式(1)的结果带入式(2),得到:

$$r = aG \left(\sum_{k=1}^N H_k u_k x_k + n_s \right) + n = aGH_1 u_1 x_1 + aGH_2 u_2 x_2 + \dots + aGH_N u_N x_N + aGn_s + n. \quad (3)$$

要获取设备终端的数据,地球站采用了一种基于零空间的干扰删除方法来消除冗余终端数据,又使用组合向量来逐步检索,最后通过最大化条件概率密度函数来恢复终端节点数据。研究表明,在单星多节点卫星 MIMO 通信系统中,系统传输性能会随着终端数量的增加而恶化,在设备终端和地球站布置更多天线可以补偿这种性能损失^[20]。

3.2 多星单节点信号检测

针对多星系统,一种典型的多星单节点下行链路信号检测方法如图 4 所示。系统中 N 颗卫星与特定的一个地球站通信。其中,所有卫星均配

备单天线,地球站配备多天线。所有卫星同时向地球站发送数据,并在地球站处逐个检测。假设所有链路的完整信道状态信息在地球站处可用,那么地球站处接收到的数据可以表示为:

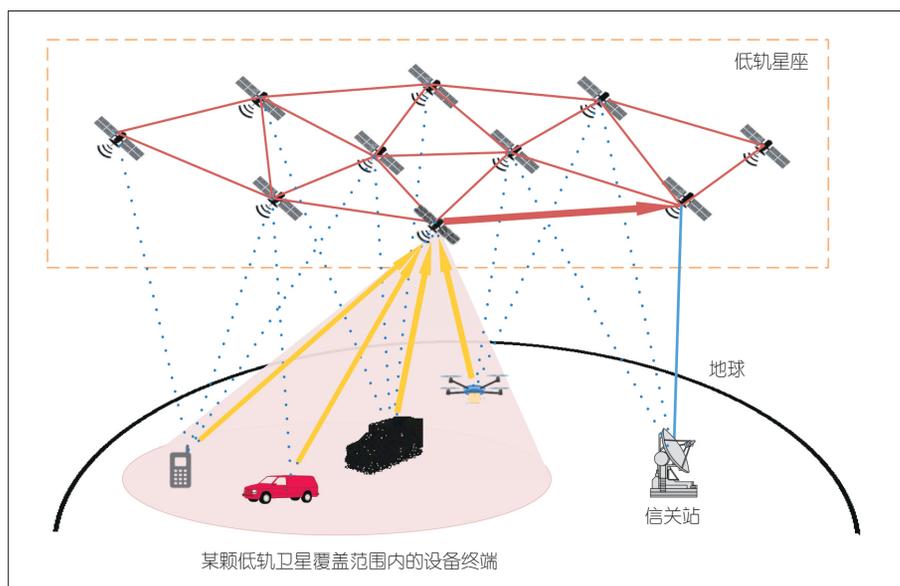
$$r = \sum_{i=1}^N h_i x_i + n, \quad (4)$$

其中, x_i 是卫星 i 的传输符号 ($i = 1, 2, \dots, N$), h_i 为卫星 i 对应的下行信道矩阵, n 表示地球站处的加性高斯白噪声。要在地球站处检测出卫星 i 的信号,式(4)可以表示为:

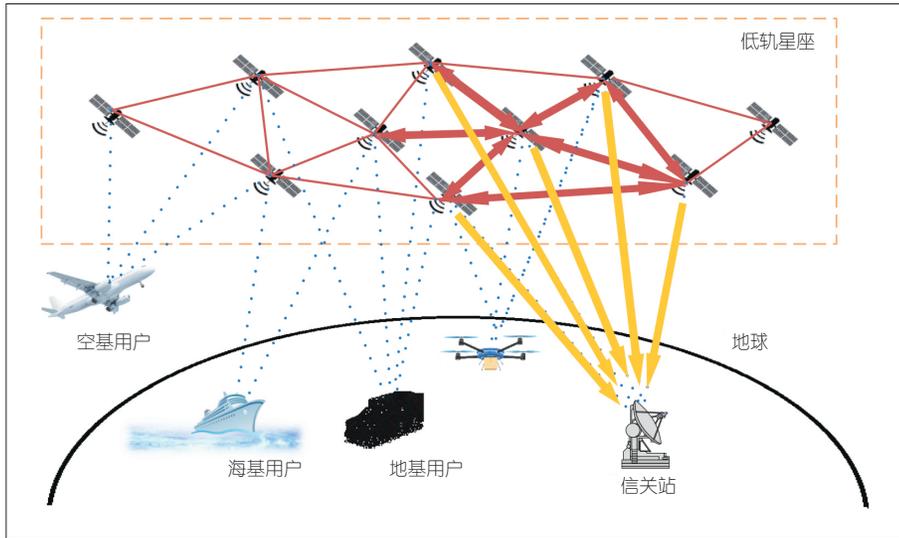
$$r = h_1 x_1 + h_2 x_2 + \dots + h_N x_N + n. \quad (5)$$

从式(5)可看出, $h_i x_i$ 包含了所要检测的卫星 i 的信号。式中的其他项在地球站处被视为检测信号 x_i 的干扰,要消除这些干扰,研究人员提出了一种新的干扰消除方法——基于标准矩母函数方法,假设向量 R^N 位于列向量 r 的零空间中,即 $R^N r = 0$ 。首先消除第一颗卫星的信号,将式(4)左乘 h_1 的左零矩阵 R_1^N 可得:

$$R_1^N r = R_1^N h_1 x_1 + (h_1 x_1 + h_2 x_2 + \dots + h_N x_N) + R_1^N n, \quad (6)$$



▲图3 单星多节点信号检测示意图



▲图4 多星单节点信号检测示意图

其中,第一项 $R_1^N h_i x_i$ 中包含有效信号 x_i , 所有其他项被视为对于此有效信号的干扰, 且 $R_1^N h_1 x_1 = 0$, 此时可将式(6)表示为:

$$R_1^N r = R_1^N h_i x_i + (R_1^N h_2 x_2 + \dots + R_1^N h_N x_N) + R_1^N n \quad (7)$$

接下来消除第二颗卫星的信号, 将式(6)左乘 h_2 的左零矩阵 R_2^N 可得:

$$R_2^N R_1^N r = R_2^N R_1^N h_i x_i + R_2^N R_1^N h_3 x_3 + \dots + R_2^N R_1^N h_N x_N + R_2^N R_1^N n \quad (8)$$

以此类推, 依次进行处理消除, 最终得到:

$$R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_{(i+1)}^N R_{(i-1)}^N \dots R_2^N R_1^N r = R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N h_i x_i + R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N n \quad (9)$$

可将式(9)写成:

$$y_i = A h_i x_i + A n, \quad (10)$$

其中, $A = R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N$, $y_i = R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N r$. 噪声协方差矩阵为 $K = E(R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N(n))(R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N(n))^H$, 将式(9)乘以 $K^{-1/2}$ 可得:

$$y_i = K^{-1/2} R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_2^N R_1^N r = K^{-1/2} R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N h_i x_i + w, \quad (11)$$

其中, w 是均值和方差都为0的向量。通过最大化条件概率密度函数, 可在地球站处检测出节点 i 的信号:

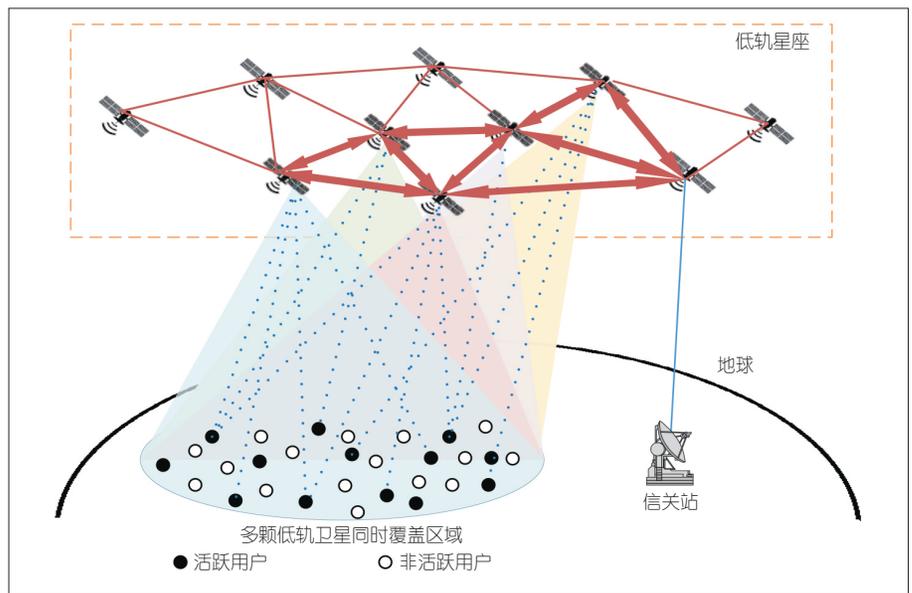
$$\hat{x}_i = \arg \min_{\hat{x}_i} \|y_i - K^{-1/2} R_N^N R_{(N-1)}^N \dots R_1^N h_i x_i\|^2 \quad (12)$$

研究表明, 在多星单节点信号检测系统中, 要实现良好的性能, 地球站处的天线数量应比卫星数量多^[21]。单星多节点信号检测和多星单节点

信号检测为多星多节点虚拟阵列信号检测的研究奠定了基础。

3.3 多星多节点信号检测

相较于单星多节点和多星单节点信号检测, 多星多节点信号检测包含的检测终端设备数目更多, 符合下一代通信中的泛在连接需求。在实际的LEO卫星星座中, 同一区域内的物联网设备终端往往同时被同一星座的多颗卫星覆盖。这些卫星可以接收设备终端的数据包, 协作检测将为其传输性能带来额外增益。由此, 一种面向低轨卫星星座的多星多节点通信系统模型被提出, 具体如图5所示。在一个时隙中, 系统中 N 颗卫星到 U 个用户终端的传输模型等价于一个虚拟MIMO系统。其中, 多颗卫星组成一个巨大的天线阵列, 与地面多节点进行数据交换。系统构建了一个离散多用户信号传输模型, 地面多个终端的分布区域由同一信关站控制的多颗卫星覆盖。在多星多节点信号检测系统中, 由于每个节点和星之间都有相对多普勒效应的影响, 考虑载波频率偏移引起的相移 $\theta_{u,i}^{(j)}$, 将终端 u 的发射信号设为 x_u 。如果在时



▲图5 多星协作虚拟阵列信号检测示意图

隙 j 存在 K 个碰撞的分组, 并假设 K 个分组来自终端 u_1, u_2, \dots, u_K , 并且考虑从终端 u_1, u_2, \dots, u_K 到卫星 i 的传播时延 $\tau_{u_1,i}, \tau_{u_2,i}, \dots, \tau_{u_K,i}$, 那么在时隙 j 中的卫星节点 i 处的 K 个碰撞分组的第 k 个接收符号如式 (13):

$$y_i^{(j)}(k) = \sum_{u=u_1}^{u_K} h_{u,i}^{(j)} s_u(k - \tau_{u,i}) e^{j\theta_{u,i}^{(j)}} + z_i^{(j)}(k), \quad (13)$$

其中, $h_{u,i}^{(j)}$ 、 $\tau_{u,i}$ 分别表示信道参数以及在时隙 j 中从终端 u 到卫星 i 的时延, $z_i^{(j)}(k)$ 表示接收端的加性高斯白噪声。该信道被假设为莱斯信道, 并且假设信道系数和相移在一个时隙是不变的。研究人员提出一种低轨卫星网络中的多卫星协作随机接入方案。该方案设计了一种基于单载波交织频分多址的分组结构, 克服了用户传播时延对卫星节点接收信号的影响, 保证接收信号的同步^[22]。

4 结束语

多星协作信号检测技术将为未来 6G 天地一体化网络的建设提供重要技术支撑。本文中, 我们对 LEO 卫星星座发展现状进行了简要介绍, 并就多星协作信号检测技术、卫星 MIMO 技术、MIMO 信号检测算法及多星协作检测相关技术路线展开了分析, 挖掘了 LEO 星座在使能未来空天地一体泛在互联中的广阔应用前景, 探索了多星协作虚拟阵列信号检测技术的实现方案。面向 LEO 卫星星座, 多星信号同步、星上计算与星间通信资源权衡等诸多问题给多星协作信号处理技术带来了极大挑战, 未来人们还需在星间不完全同步、星上资源强受限的条件下进一步解决上述问题。

参考文献

- [1] 孙震华. 与 5G/6G 融合的低轨星座思考 [J]. 卫星与网络, 2019, 19(10): 26-33
- [2] AN J P, WANG K, WANG S, et al. Antenna array calibration for IoT oriented satellites: from orthogonal CDMA to NOMA [J]. IEEE wireless communications, 2020, 27(6): 28-36. DOI:10.1109/MWC.001.2000106
- [3] 陈山枝. 关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议 [J]. 电信科学, 2020, 36(6): 1-13. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020181
- [4] 席博, 洪涛, 张更新. 卫星物联网场景下基于节点选择的协作波束成形技术研究 [J]. 电子与信息学报, 2020, 42: 2882-289
- [5] LEYVA-MAYORGA I, SORET B, POPOVSKI P. Inter-plane inter-satellite connectivity in dense LEO constellations [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2021, 20(6): 3430-3443. DOI:10.1109/TWC.2021.3050335
- [6] 汪春霆, 翟立君, 卢宁宁, 等. 卫星通信与 5G 融合关键技术与应用 [J]. 国际太空, 2018(6): 11-16. DOI: 10.3969/j.issn.1009-2366.2018.06.005
- [7] PORTILLO IDEL, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband [J]. Acta astronautica, 2019, 159: 123-135. DOI:10.1016/j.actaastro.2019.03.040
- [8] 李刚. 卫星互联网时代的技术攻坚者 [J]. 科学中国人, 2020: 62-64
- [9] 国务院国有资产监督管理委员会. 国资委关于组建中国卫星网络集团有限公司的公告 [EB/OL]. (2021-04-28) [2021-08-06]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588030/n2588924/c18286531/content.html>
- [10] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2017, 35(6): 1201-1221. DOI: 10.1109/JSAC.2017.2692307
- [11] MOLISCH A F, RATNAM V V, HAN S Q, et al. Hybrid beamforming for massive MIMO: a survey [J]. IEEE communications magazine, 2017, 55(9): 134-141. DOI: 10.1109/MCOM.2017.1600400
- [12] 杨贵德, 周渊平, 夏文龙. 协同信道空时优化 MIMO 无线传输系统 [J]. 电子与信息学报, 2018, 40(1): 102-107. DOI: 10.11999/JEIT170321
- [13] SCHWARZ R T, DELAMOTTE T, STOREK K U, et al. MIMO applications for multibeam satellites [J]. IEEE transactions on broadcasting, 2019, 65(4): 664-681. DOI: 10.1109/TBC.2019.2898150
- [14] BYMAN A, HULKONEN A, ARAPOGLOU P D, et al. MIMO for mobile satellite digital broadcasting: from theory to practice [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016, 65(7): 4839-4853. DOI: 10.1109/TVT.2015.2462757
- [15] HOFMANN C, STOREK K U, SCHWARZ R T, et al. Spatial MIMO over satellite: a proof of concept [C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/ICC.2016.7510945
- [16] 郭庆, 张硕, 杨明川, 等. 分布式双极化卫星移动 MIMO 信道模型 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(5): 50-56. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.2015.05.009
- [17] CHUNG J M, KIM J, HAN D. Multihop hybrid virtual MIMO scheme for wireless sensor networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2012, 61(9): 4069-4078. DOI:10.1109/TVT.2012.2213620
- [18] CHANG H W, WANG L C. A low-complexity uplink multiuser scheduling for virtual MIMO systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2016, 65(1): 463-466. DOI: 10.1109/TVT.2015.2394368
- [19] SOORKI M N, MANSHAEI M H, MAHAM B, et al. On uplink virtual MIMO with device relaying cooperation enforcement in 5G networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2018, 17(1): 155-168. DOI: 10.1109/TMC.2017.2707540
- [20] M K A. Data detection in large MIMO satellite communication systems [J]. IEEE wireless communications letters, 2021, 10(5): 1032-1035. DOI:10.1109/LWC.2021.3056555
- [21] ARTI M K. Data detection in multisatellite communication systems [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic systems, 2020, 56(2): 1637-1644. DOI: 10.1109/TAES.2019.2928666
- [22] ZHAO B, REN G L, ZHANG H N. Multisatellite cooperative random access scheme in low earth orbit satellite networks [J]. IEEE systems journal, 2019, 13(3): 2617-2628. DOI: 10.1109/JSYST.2018.2870416

作者简介



王虎威, 北京理工大学在读硕士研究生; 主要研究领域为卫星通信、无线宽带通信、MIMO 技术等。



叶能, 北京理工大学特别副研究员、硕士生导师; 主要研究领域为非正交多址通信、空天智能安全通信等; 发表论文 30 余篇, 获授权专利 10 余项。



安建平, 北京理工大学网络空间安全学院院长、教授、博士生导师, 中国电子学会会士, 中国通信学会会士、常务理事; 研究领域聚焦空天信息网络与安全、空间信号处理; 主持完成了 40 余项国家级科研项目, 获国家、国防和省部级科技奖 9 项; 发表论文 100 余篇, 获授权发明专利 100 余项。

NGSO 互联网星座用户链路同频干扰分析

Cochannel Interference Analysis for User Link of NGSO Internet Constellation

刘子威/LIU Ziwei¹, 李嘉颖/LI Jiaying², 张更新/ZHANG Gengxin¹

(1. 南京邮电大学, 中国 南京 210003;

2. 中国人民解放军军事科学院, 中国 北京 100141)

(1. Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. PLA Academy of Military Sciences, Beijing 100141, China)



摘要: 针对未来非静止轨道(NGSO)互联网星座用户链路的灵活多波束发展趋势,梳理了用户链路的干扰场景与星地节点特点,并建立了面向多波束的同频干扰分析模型。该模型可支撑卫星在多色复用波束编排下地面大量终端的同频干扰分析。采用商用轨道建模软件与 MATLAB 级联,在实际系统间采用所提模型对载干噪比(CINR)、干噪比(INR)等主要评估指标进行了仿真计算。结果表明,非静止轨道互联网星座间具有多波束、多终端特点,使得同频干扰问题不可避免。研究结果能够有效指导中国卫星互联网星座工程的建设工作。

关键词: 多波束;同频干扰分析;非静止轨道星座;卫星互联网

Abstract: Based on the trend of flexible multi-beam for non-geostationary orbit (NGSO) Internet constellation user links, the interference scenes and the characteristics of satellite and earth nodes are summarized, and a multi-beam-oriented cochannel interference analysis model is established. The model can support the cochannel interference analysis of massive ground terminals under multi-color multiplexing beam arrangement. The commercial orbital modeling software and MATLAB were used to calculate the carrier to interference plus noise ratio (CINR) and interference to noise ratio (INR) using the proposed model between two actual constellations. Results show that the cochannel interference is inevitable due to the multi-beam and multi-terminal characteristics of the non-geostationary orbit Internet constellation. The research results of this paper can effectively guide the construction of satellite Internet constellation project in China.

Keywords: multi-beam; cochannel interference analysis; NGSO constellation; satellite Internet

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105005

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210924.0326.002.html>

网络出版日期: 2021-09-24

收稿日期: 2021-08-16

近年来,随着卫星互联网浪潮的兴起,为了满足全球全天时覆盖和宽带高速应用需求,非静止轨道(NGSO)卫星星座成为发展的重点。目前,除中国外的其他国家主要依靠商业航天公司来建设NGSO宽带卫星通信星座,例如美国 Starlink 星座^[1]、

Kuiper 星座^[2],英国 OneWeb 星座^[3],以及加拿大 Telesat 星座^[4]。

天基信息系统发展的主要瓶颈之一是频轨资源紧张。一方面,不断增加的低轨通信星座系统,会对使用相同频段的静止轨道(GSO)卫星系统造成严重影响;另一方面,随着 Ku、Ka 频段频率资源的逐渐枯竭,各申报星座难以避免使用重叠频段,导致各 NGSO 卫星系统存在潜在同频干扰。

在国际电联的申报框架中,存在同频干扰的系统需要在申报阶段进行频轨协调,以保证有害干扰不超过可靠工作的阈值。协调时用到的方法是同频干扰分析。

最初的干扰分析主要针对 GSO 卫星开展,并形成了一整套建议书与规范^[5-7]。然而,在进行高轨卫星间的协调时,参与协调的卫星数少,星地空间关系近似恒定,干扰链路并不复

基金项目: 国家自然科学基金(91738201、61801445); 江苏省前沿引领技术基础研究专项(BK20192002)

杂。不同于GSO系统之间的干扰场景,低轨卫星与地球站的相对位置是变化的,从而导致卫星之间以及卫星与地面站之间的空间几何关系具有时变性。当前申报的NGSO星座规模通常高达数万颗,并且在某一指定地面区域的瞬时可见星座数量达到数十颗。无论是干扰链路的数量,还是干扰链路的时变性,均大大增加了干扰计算的复杂程度。文献[8-9]最早对NGSO星座间的干扰计算方法进行了分析,但并没有给出相关的仿真结果。李睿等虽然针对NGSO星座时变性的特点,对不同采样点上的瞬时干扰进行了计算和仿真,但只考虑了NGSO星座与GSO卫星间的干扰^[10-11]。对于NGSO系统间干扰,靳瑾等提出了一种卫星链路间夹角等效干扰指标的方式,并以OneWeb系统和O3b系统为例给出了全球范围内系统间的可用概率^[12]。此外,针对具体的干扰分析场景,基于链路计算的分析方法能够得到准确的分析结果^[13]。

随着星上载荷与天线技术的发展,未来低轨卫星互联网通信系统的一个重要发展方向是星载相控阵天线技术。该技术将使卫星节点在空域维度具备业务驱动、灵活可变的能力。用户链路更要依赖相控阵多波束技术,以满足广域业务的服务需求。对此,本文主要对大规模NGSO星座系统之间的用户链路同频干扰问题开展研究,在完成场景分析的基础上梳理面向多波束的干扰分析模型及计算方法,并在所搭建的仿真分析平台中对大规模星座的用户链路间同频干扰进行仿真计算。

1 用户链路干扰场景与干扰分析模型

同频干扰的产生需要在空间和

频率上均产生重叠碰撞。其中,未来NGSO星座通常具有全球覆盖的特性,因此空间域的碰撞是不可避免的。对于频率维度而言,根据目前全球典型的NGSO星座的申报数据,在用户链路干扰场景中,当NGSO系统卫星与地面通过上下行用户链路进行通信时,处于干扰角度范围内的不同NGSO星座的卫星就会产生干扰^[14]。表1给出了用户链路间潜在同频干扰情况。

(1)OneWeb与Starlink星座均采用Ku频段作为用户链路的频段,与使用Ka频段的O3b、Telesat等星座的用户链路不会发生同频干扰;

(2)OneWeb和Starlink的用户上下行链路频率产生重叠,两者都采用倾斜轨道,因此会产生用户链路碰撞;

(3)Telesat和Kuiper星座都采用不同倾斜角度的倾斜轨道,因此干扰遍布全球;

(4)O3b、Telesat和Kuiper星座的用户链路都使用Ka波段,且各自系统内的通信过程都会对相邻系统产生干扰。其中,O3b主要为赤道圆轨道星座,与其他星座的频率重叠干扰发生在低纬度地区。

在空域和频域都满足潜在干扰的条件时,需要对系统间的同频干扰进行分析。分析结果将作为频轨协调与干扰规避的依据。

1.1 用户链路干扰场景

在未来,为满足广覆盖和高资源

利用率的要求,卫星用户链路多以相控阵下的多点波束方式进行工作。多色复用技术也会被采用以避免同一系统内相邻波束间的干扰。同一卫星同频工作的用户链路波束数量多,而不同系统的卫星多色复用却不同。干扰场景表现为复杂多波束间同频波束的互相碰撞,如图1所示。其中,多色复用策略体现在使用不同颜色的波束来代表不同的频率。由于卫星用户链路采用多波束多色复用的方式,同频波束间会产生复杂的交叉干扰情况,因此干扰分析模型必须体现出多星、多波束的主要特点。

此外,对于宽带互联网星座而言,根据业务类型和形态的不同,地面终端用户包括两类:(1)大型固定天线、车载天线、船载天线等往往具有指向能力,可生成凝视波束;(2)小型天线、便携式用户天线往往不具备指向能力,可生成固定波束(多采用小口径、弱方向性波束)。因此,在不同分析场景下,不同波束调度方式的卫星和不同类型的终端会形成不同的同频干扰场景,需要做针对性分析。

1.2 干扰分析模型

在载噪比、干噪比等评估指标中,载波功率、干扰功率、噪声功率需要进行组合。这里我们分别给出多波束条件下载波功率和干扰功率的分析模型。

(1) 载波分析模型

▼表1 典型非静止轨道卫星星座使用频率

星座	用户 上行频率/GHz	用户 下行频率/GHz
O3b	27.6~28.4	17.8~18.6
	28.6~29.1	18.8~19.3
OneWeb	12.8~14.5	10.7~12.7
Starlink	14.0~14.5	10.7~12.7
Telesat	27.5~30.0	17.8~20.2
Kuiper	27.5~30.0	17.7~18.6
		18.8~20.2

考虑卫星用户链路多波束的特性,有用信号可以写为:

$$C_{ij}(t) = \frac{P_0 G_i [\theta_{ij}(t)] G_r [\varphi_{ij}(t)] \lambda_i^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^2(t)}, \quad (1)$$

其中, i 为波束编号, j 为地面段平台编号, C_{ij} 表示多波束卫星第 i 个波束中第 j 个地面段平台与卫星的有用信号功率, P_0 表示载波发射功率。 $\theta_{ij}(t)$ 与 $\varphi_{ij}(t)$ 分别表示发射天线的离轴角度与接收天线的离轴角度, $G_i [\theta_{ij}(t)]$ 和 $G_r [\varphi_{ij}(t)]$ 则分别代表发射和接收天线在对应角度上的增益。 λ_i 表示第 i 个波束频率对应的波长, $d_{ij}(t)$ 表示相应的地面终端与卫星间的距离。由于卫星具有运动特性,上述角度和斜距均随时间变化。对于工作在凝视模式的设备,可以认为其 $\theta_{ij}(t)$ 与 $\varphi_{ij}(t)$ 均一直等于最大增益角,并且几乎保持不变;而对于固定指向的卫星或弱指向性的地面终端,其 $\theta_{ij}(t)$ 与 $\varphi_{ij}(t)$ 则是随时间变化的。

(2) 干扰分析模型

实际上,由于 NGSO 卫星星座数量较多,多个干扰卫星/地面站会对同一站点/卫星产生干扰。这种干扰称为集总干扰。卫星系统的集总干扰功率则为通信仰角范围内干扰卫星造成的干扰功率之和。

$$I_{\text{total}}(t) = \sum_{j=1}^{N_1(t)} \sum_{i=1}^{N_1} \frac{P_{ij} G_i [\theta'_{ij}(t)] G_r [\varphi'_{ij}(t)] \lambda_j^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^2(t)}, \quad (2)$$

其中, N_1 表示施扰平台造成干扰的波束数量, $N_1(t)$ 表示可视范围内的卫星数量, P_{ij} 是带内干扰功率。 $\theta'_{ij}(t)$ 与 $\varphi'_{ij}(t)$ 分别表示干扰链路相对于通信链路发射天线与接收天线的离轴角度, $G_i [\theta'_{ij}(t)]$ 和 $G_r [\varphi'_{ij}(t)]$ 则分别代

表对应的发射和接收天线在对应角度上的增益。基于上述模型计算,并结合轨道外推,我们可以对 NGSO 卫星的同频干扰进行精确计算与分析。

2 仿真计算平台

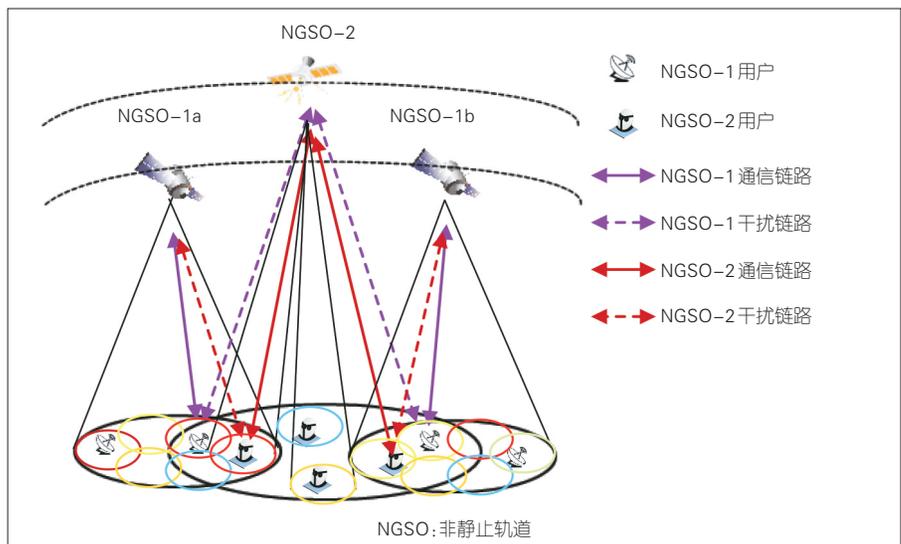
针对大规模 NGSO 星座的干扰分析仿真场景,我们搭建了商业轨道建模软件+MATLAB 科学计算的仿真架构,如图 2 所示。其中,轨道建模软件可以建立复杂的卫星场景,并支持卫星干扰场景全过程的步进推演。同时, MATLAB 能够通过编程便捷地获得可供复杂逻辑和高级数学运算使用的轨道建模结果,并通过通信控制模块实现场景的高效控制。

同时,借助轨道建模软件提供的显示接口,我们使用 C# 语言来搭建图

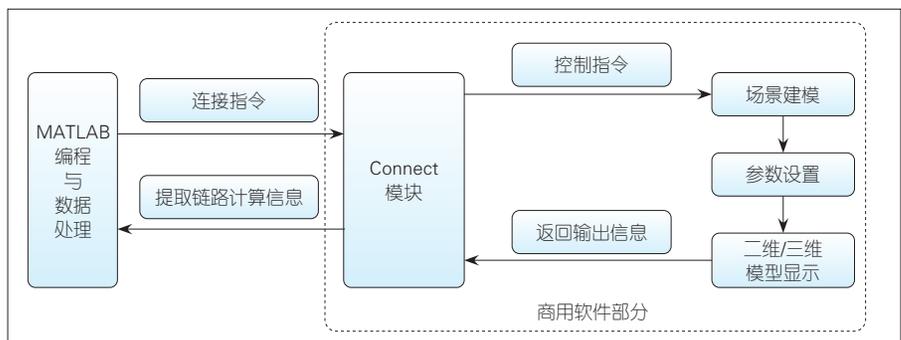
形操作界面。该界面能够实时显示星座组成、二维/三维星座状态,如图 3 所示。其中,界面顶端的任务栏能够进行整个系统的控制,包括场景构建、星座设计、干扰分析等。中间主要区域分为左侧节点列表、中部三维显示,以及右侧二维显示和图表显示。 MATLAB 运算集成于软件的后台,以支撑完整的干扰分析过程。

3 大规模星座仿真计算

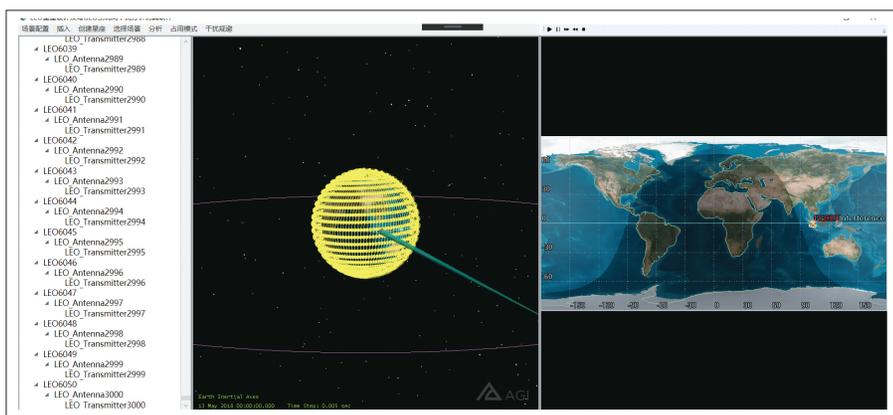
在搭建的仿真计算平台中,我们以 Starlink 和 OneWeb 系统为分析对象,对本文所建立的分析模型和分析方法进行仿真计算。根据申报资料,我们构造了 Starlink 一期的 4 425 颗卫星星座和 OneWeb 系统的 648 颗卫星星座,如图 4 所示。其中, OneWeb 为



▲ 图1 用户链路同频干扰场景图



▲ 图2 仿真平台架构图



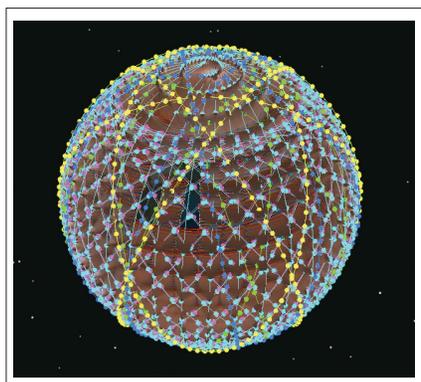
▲图3 图形操作界面截图

受扰星座,Starlink为施扰星座。OneWeb的648颗NGSO卫星和备份星分布在高度为1200 km,倾角为87.9°的12个轨道面上,并且每个轨道面均部署49颗OneWeb卫星和5颗备用星。Starlink的轨道参数如表2所示。

在互联网系统中,下行用户链路的传输速率比上行用户链路更高,使得相应的干扰变得更加严重。本文中,我们以下行链路为例进行仿真。

3.1 仿真场景与参数

OneWeb采用16个高椭圆波束(并列排布),可覆盖1100 km²的正方形区域,如图5(a)所示。Starlink则采用灵活波束,其相控阵波束可以实现点波束300 km²的覆盖。对于需要较大点波束覆盖的区域,Starlink则可实现更大波束600 km²的覆盖。由于Starlink的频率复用方式未知,我们以

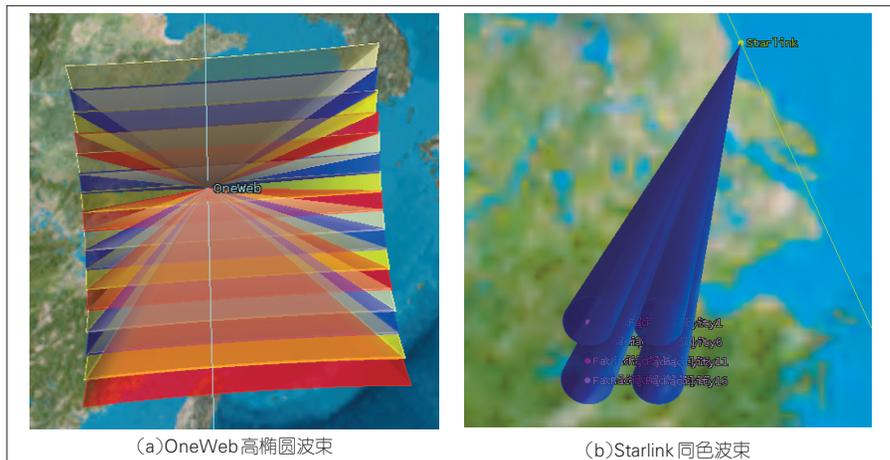


▲图4 星座布局图

四色复用的频率复用方式为例对16个用户波束进行仿真(考虑4个同频波束)。假设4个波束的覆盖面积均为600 km²,即覆盖半径约为14 km,波束半锥角为1.5°。在对热点地区进行仿真时,我们将灵活波束视为短时间内的凝视波束。此时,波束覆盖仿真区域。由上述参数可以看出,OneWeb与Starlink的波束存在完全重叠的可能,其相对离轴角受卫星间的位置关系影响,并且这种影响会随时间发生变化。Starlink同色波束如图5

▼表2 Starlink低轨道参数

参数	初期部署(1 600颗)		后期部署(2 825颗)		
轨道数量	72	72	36	6	4
轨道卫星数量	22	22	20	58	43
轨道高度/km	550	540	570	560	560
轨道倾角/°	53	53.2	70	97.6	97.6



▲图5 仿真波束示意图

(b)所示。

对于用户终端,我们采用随机分布的50个Starlink终端作为干扰链路的终端,并采用1个OneWeb终端作为受扰链路的终端进行分析。这些终端的分布中心位于江苏省南京市,如图6所示。具体系统仿真参数如表3所示。

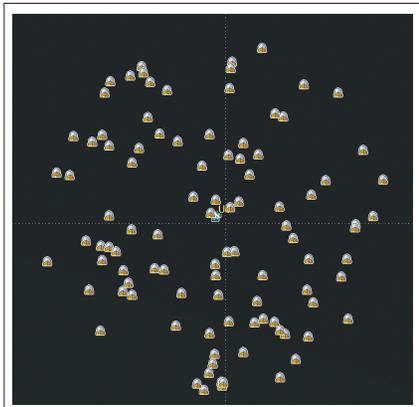
3.2 仿真结果

72 h内OneWeb终端的载噪比、载干噪比和干噪比的仿真结果如图7和图8所示。其中,干噪比-12.2 dB或等效载干噪比损失0.25 dB被作为有害干扰发生的阈值。可以看出,由于多波束、多终端、集总干扰的存在,链路质量受损严重,绝大部分时刻均处于有害干扰范围。

为量化系统的可用时间,进一步得到干扰发生的概率和系统的可用时间百分比,我们对载噪比和干噪比做进一步分析。相关累积分布曲线如图9和图10所示。

通过图10可以看出,干噪比小

于-12.2 dB 门限值的时间百分比接近 0,即系统不存在恶意干扰的时间几乎没有。这将严重影响系统的正常工作。同时,由于地面用户数量多、分布广,不同区域的用户密度不同,无法通过空间隔离来减缓干扰。因

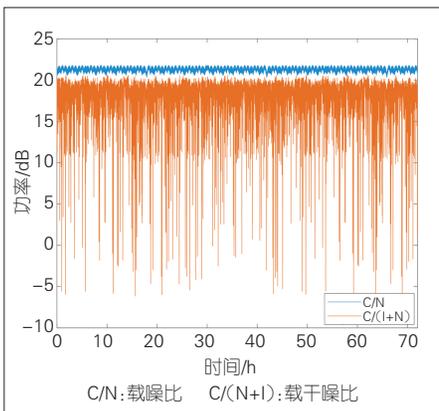


▲图6 地面终端均匀随机分布示意图

▼表3 星座用户链路参数

卫星参数	OneWeb	Starlink
卫星数量	648	4 425
卫星发射功率/dBW	4.5	7.78
卫星天线尺寸/m	0.2	0.4
接收天线尺寸/m	0.5	0.2
天线指向	固定	凝视
波束数量	16	4
天线类型	抛物线型	
通信频率/GHz	10.7	
通信带宽/MHz	250	
系统噪声温度/K	290	
传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	20	
调制方式	QPSK	
天线效率	55%	
信道类型	高斯白噪声信道	

QPSK: 正交相移键控

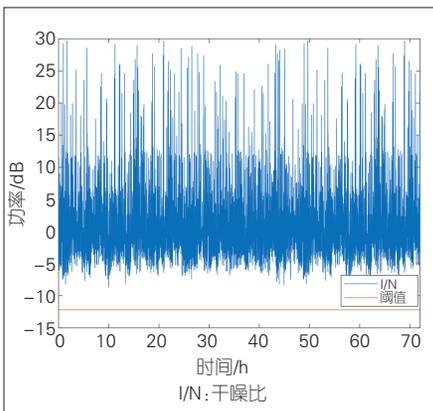


▲图7 OneWeb 终端的载干噪比与载噪比比较

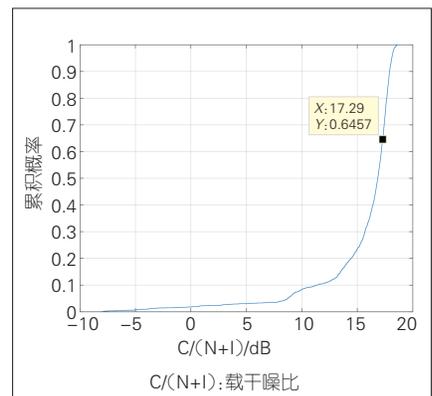
此,频率协调面临巨大压力,需要更加切实可行的干扰减缓措施。

4 结束语

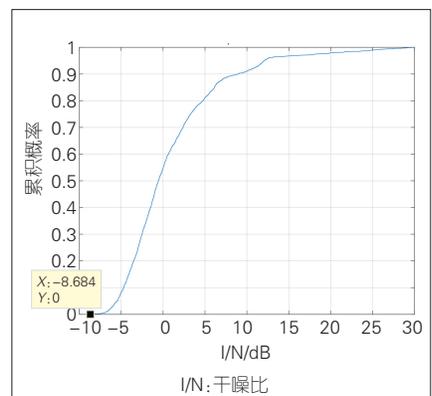
NGSO 互联网星座是未来空天地海网络的必然组成部分,但频轨资源的争夺是目前阻碍发展的重要因素。本文中我们针对未来低轨互联网卫星用户链路的空域和频域特点,梳理了同频干扰场景和干扰分析模型,并搭建了仿真分析平台,以 Starlink 和 OneWeb 星座为例进行了系统级干扰分析仿真计算。其中,所计算的卫星数达到了 5 000 颗以上。仿真结果表明,低轨星座间干扰十分严重,系统可用时间百分比不足 10%,急需频率协调与干扰减缓。这同时也说明本



▲图8 OneWeb 终端的干噪比



▲图9 OneWeb 终端的载干噪比累积分布曲线



▲图10 OneWeb 终端的干噪比累积分布曲线

文所提模型能够有效实现同频干扰分析。未来我们将针对各种不同场景下的系统共存问题进行更多的仿真计算,以持续推进本工作的研究进展。

致谢

本文的实验内容和仿真平台开发主要由南京邮电大学硕士研究生赵长林和陆远松完成,在此对他们的辛勤工作致以衷心的感谢!

参考文献

- [1] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink 第一期星座发展历程及性能分析 [J]. 卫星与网络, 2020, (9): 46-49
- [2] 刘帅军, 胡月梅, 刘立祥. 低轨卫星星座 Kuiper 系统介绍与分析 [J]. 卫星与网络, 2019, (12): 66-71
- [3] 邹明, 赵子骏, 魏凡. 新兴低轨卫星通信星座发展前景研究 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15: 1155-1162
- [4] PORTILLO D I, CAMERON B G B, CRAW-

下转第 35 页 ➡



DTN 辅助的 低轨卫星网络路由技术

DTN-Assisted Low Orbit Satellite Network Routing Technology

张培颖 /ZHANG Peiyong¹, 王超 /WANG Chao², 吴胜 /WU Sheng¹

(1. 中国石油大学(华东), 中国 青岛 266580;

2. 北京邮电大学, 中国 北京 100876)

(1. China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

摘要: 对具有代表性的延迟/中断容忍网络(DTN)的路由算法以及低轨(LEO)卫星网络路由算法进行了全面的回顾,并总结现有算法主要的技术特点及局限性。为应对LEO卫星网络通信中的长时延、星地链路频繁中断和卫星存储能力受限等情况,提出一种基于DTN的LEO卫星网络路由技术。该技术能够充分利用LEO卫星的管理能力,在出现通信链路中断、链路时延过高等状况时,动态调整路由策略。这使LEO卫星网络一定的自主性、拥塞控制与抗毁能力,从而保证数据信息的正常通信。

关键词: 延迟/中断容忍网络;低轨卫星网络;自主路由技术;拥塞控制;抗毁能力

Abstract: The routing algorithms of Delay/Disruption Tolerant Network (DTN) and Low Earth Orbit (LEO) satellite network are reviewed, and the main technical characteristics and their limitations of existing algorithms are analyzed. To cope with the long latency of the LEO satellite network communication, frequent interruption of satellite ground link, and limited satellite storage capacity, a routing technology based on DTN for the LEO satellite network is proposed. This technology makes full use of the management ability of LEO satellite to dynamically adjust the routing strategy in case of communication link interruption and high link delay, which gives LEO satellite network certain autonomy, congestion control, and destruction resistance, so as to ensure the normal communication of data information.

Keywords: Delay/Disruption Tolerant Network; Low Earth Orbit satellite network; autonomous routing technology; congestion control; destruction resistance

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105006

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.tn.20211007.1807.002.html>

网络出版日期: 2021-10-09

收稿日期: 2021-08-21

卫星网络通信是地面通信的重要补充和延伸,它可以为地面用户提供更加广阔的信号覆盖范围,而且不易遭受自然灾害影响,具有较高的灵活性和可靠性。与中轨(MEO)/高轨(GEO)卫星网络相比,低轨(LEO)卫星网络还具有通信延迟低、路径损

耗小,以及真正意义上的全球覆盖等优势,因而,LEO卫星通信网络体系的建设具有重大价值。目前,世界各国越来越重视空间资源的开发与利用,LEO卫星通信系统有望成为新的竞争目标。

延迟/中断容忍网络(DTN)是一种面向消息的覆盖层网络体系结构。通过在传输层之上集成一个Bundle层,DTN协议实现了应用层和Bundle层单元的存储和运输。空间网络通信

缺少端到端连接,因此链路延迟大、链路频繁通断并且误码率高。DTN具有适应长延迟以及中断频繁的链路特性。DTN中输入流量与输出流量的速率往往存在巨大差异,双向速率比可达1000:1。另外,因为DTN经常部署在恶劣环境下,所以信息不能有效传达到目的地,这导致接收端的信噪比和误码率等性能均不理想。常见的光通信网络中误码率可达 10^{-15} ~ 10^{-12} ,深空通信系统中仅能达到 10^{-1} ,所以深空通信

基金项目: 中石油重大科技项目(ZD2019-183-006)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2020MF006)、中央高校基本科研业务费专项资金资助(20CX05017A)

是 DTN 的一个主要应用场景。DTN 采用“存储-携带-转发”的通信方式，当源节点与目的节点之间没有直接相连的链路时，消息会被封装成束并暂存在源节点；当源节点与相邻节点之间建立链路时，消息会被传输给相邻节点，相邻节点又会择机将消息传输给下一跳节点，直至最终把消息传递给目的节点。由此可见，DTN 适用于难以形成稳定端到端链路以及高延迟的通信环境中，能够有效适应空间网络的特点。

1 路由算法简介

路由是空间网络与 DTN 必备的基础功能，高效的路由算法可以提升数据的交付效率，减少能量损耗与成本，并降低通信延迟。本节介绍了 DTN 与 LEO 卫星网络的代表性路由算法，并总结了它们主要的技术特点。

1.1 DTN 路由算法

依据算法特性，我们可以将 DTN 路由算法分为基于转发、复制、效用、编码和社会关系的路由算法五大类，表 1 概括了每一类算法的主要特征与优缺点。

下面我们举例说明不同特征 DTN 路由算法的典型代表。需要注意的是，一种 DTN 路由算法可能兼具多种特征。

(1) 基于转发的 DTN 路由算法

基于转发的 DTN 路由也称为单副本转发路由，即消息在传输过程中只复制产生一个副本。基于转发的 DTN 路由算法仅占用少量网络资源，网络拥塞风险低，但唯一副本一旦丢失，消息传输任务就会失败。

首次接触算法^[1]和直接交付算法^[2]是最基本的基于转发的 DTN 路由算法。前者是指携带消息的节点将消息转发给首次相遇的节点；后者是指不经过任何中转节点的转发，源节点直接将

消息发送给目的节点。两种算法不依赖于任何知识，逻辑过程简单，但是局限性很大。

接触图路由算法^[3]是由上述两种算法衍生的 DTN 路由算法。在空间 DTN，特别是 LEO 卫星网络中，卫星运动轨迹往往是可以预测的。根据这一特性，算法可以将卫星接触信息转化为路由图，之后依据性能需求选择转发路径。

(2) 基于复制的 DTN 路由算法

基于复制的 DTN 路由也称为多副本路由，即一条消息经过多次复制分别储存在多个节点中，通过增加节点接触次数的方式来提升成功投递概率。这样一来，即使某些副本丢失，也可以确保消息被传输到目的节点。但是复制过多的副本会消耗大量的网络资源，容易造成网络拥塞；少量副本的复制未给算法性能带来明显提升。

Epidemic 算法^[4]是典型的基于复制的 DTN 路由算法，它采用泛洪机制将消息发送到未持有该消息的每一个节点上。该算法本质上是一种以大量网络资源消耗为代价来换取更高投递率的路由算法。喷射与等待 (SaW) 算法^[5]是由 Epidemic 算法和直接交付算法结合而成的，有效解决了 Epidemic 算法副本数量不受限制的问题。该算法预先定义一个最大副本数 max_cop ，消息经过一次复制后 max_cop-1 ，直至 $max_cop=1$ 时停止复制。

(3) 基于效用的 DTN 路由算法

效用函数是实现基于效用的 DTN

路由算法的关键，它是指将用户关注的某些网络参数量化为效用函数，通过函数计算得到最优的中转节点。效用函数的参数权重在很大程度上影响着算法性能，常用参数包括节点历史相遇次数、节点运动轨迹以及网络资源等。

概率路由协议 (PRoPHET) 算法^[6]和基于能量感知的概率路由协议 (EA-PEoPHET) 算法^[7]是两种基础的基于效用的 DTN 路由算法：前者在 Epidemic 算法的基础上引入了预测投递概率，仅将消息发送给预测概率较高的下一跳节点；后者将节点剩余能量作为效用函数，仅选择能量充足的节点作为下一跳节点。

(4) 基于编码的 DTN 路由算法

基于编码的 DTN 路由算法可以降低信息传输的误码率以及链路中断概率。基于擦除编码的协作鲁棒转发 (CORE) 算法^[8]和 CCFM 算法^[9]都是根据节点历史相遇次数、平均相遇时间间隔和节点剩余资源量等参数计算消息发送的下一跳节点。区别在于前者将消息编码成了若干小码块，后者直接对节点进行编码。二者有效提高了消息的传输效率。

(5) 基于社会关系的 DTN 路由算法

基于社会关系的 DTN 路由算法可以看作基于效用的 DTN 路由算法的改进版本。我们将基于社会关系的 DTN 路由算法与人类社会网络进行类比：将节点看作人，节点之间的联系如同人与人之间的联系，并通过社会学知识进行

▼表 1 DTN 路由算法分类总结

算法	特征	优点	缺点
基于转发的 DTN 路由算法	消息只有一个副本	节约资源与能耗	消息丢失风险高
基于复制的 DTN 路由算法	消息有多个副本	可靠性、接收率高	耗费大量资源，信道易拥塞
基于效用的 DTN 路由算法	基于效用函数实现消息路由	路由效率高	计算复杂度大
基于编码的 DTN 路由算法	对消息进行编码	降低误码率与链路中断概率	冗余编码造成额外能耗
基于社会关系的 DTN 路由算法	用社会关系类比节点关系	目的性强、路由效率高	适用范围有限

DTN: 延迟 / 中断容忍网络

路由选择。Bubble 算法^[10]依据节点相遇次数划分社区，先将消息发送到社区，之后再由社区发送给具体节点。在 Bubble 算法基础上，文献[11]使用效用函数对副本数量进行控制，有效降低了网络能耗。其他具有代表性的算法还有目前最优 (TBSF) 算法^[12]和改进的目前最优 (TBSFMDI) 算法^[13]。

1.2 LEO 卫星网络路由算法

LEO 卫星通信系统可以实现真正意义上的全球无缝覆盖。现有 LEO 卫星网络路由算法的设计主要考虑用户业务类型、服务需求以及网络的负载均衡能力。依据算法实施场景与特点，可将它们分为基于 AI 的 LEO 路由算法、LEO 卫星多径路由算法和多层卫星路由算法。表 2 总结了具有代表性的 LEO 卫星网络路由算法。

1.3 局限性

DTN 赋予了空间网络更加灵活的组网方式，这使得卫星网络在恶劣环境下依旧能够拥有强大的通信能力。不可忽视的是，DTN 依旧面临逐跳传输、能量有限和场景复杂等挑战。上述 DTN 路由算法并没有真正应用到 LEO 卫星通信网络环境中。另外，现有的 LEO 卫星网络还面临星上资源受限、计算复杂度高和数据包失序等挑战。

2 基于 DTN 的 LEO 卫星网络路由技术

我们提出一种基于 DTN 的 LEO 卫星网络路由技术，该技术充分利用 LEO 卫星的管理能力，以应对空间通信中链路频繁中断、延迟高等问题，动态调整复杂断环境下的路由策略，确保消息在非正常情况下正常传输。

2.1 时间片划分

拓扑结构变化是卫星网络的常见

▼表 2 LEO 卫星网络路由算法

分类	算法	特征	评价
基于 AI 的 LEO 路由算法	模糊卫星路由策略 ^[14]	用模糊逻辑算法判断卫星拥塞程度，依据用户需求选择路由	计算复杂度随着网络规模扩大而提高
	多 QoS 约束蚁群优化路由算法 ^[15]	将链路 QoS 作为选择下一跳节点的依据，利用排序算法获取最优路径	算法收敛速度快，避免陷入局部最优解
	多目标约束遗传算法 ^[16]	依据 LEO 网络特性对初始种群生成算法进行改进，使初始路径满足约束条件	实现多路径优化，提高搜索效率
LEO 卫星多径路由算法	多径 LEO 卫星网络路由拥塞控制策略 ^[17]	基于费用函数计算链路费用值，以最小化传输带宽开销为目标实现流量均衡	降低 LEO 网络中超负荷链路数，提升网络吞吐量
	目的节点泛洪全局局部路由算法 ^[18]	在全局范围内采用多目标节点泛洪算法，对收敛节点进行多径路由优化	降低丢包率与平均时延
	基于源和目的的多径协作路由算法 ^[19]	沿多条不相交的路径动态、协同地传递数据流的不同部分	提升带宽利用率并降低端到端时延
多层卫星路由算法	基于优先级和失效概率的路由算法 ^[20]	利用虚拟节点拓扑策略消除卫星移动性，考虑服务分类和链路失效概率	路由计算复杂，集中式路由计算难以扩展
	双层网络路由算法 ^[21]	利用 LEO 卫星及星间链路的拓扑结构计算路由，利用拥塞避免和分组分类机制对算法进行优化	降低端到端时延和丢包率
	自适应路由算法 ^[22]	基于 SDN 3 层卫星通信网络模型实现最短卫星通信链路的自适应路由	减少通信链路距离并降低时延

AI: 人工智能 LEO: 低轨 QoS: 服务质量 SDN: 软件定义网络

问题，通过划分时间片将 LEO 卫星网络划分为 n 个异构拓扑（默认在每一个时间片中卫星网络拓扑是相对固定的），依次计算不同时刻的路由路径，这样可以有效应对 LEO 卫星网络拓扑带来的变化。时间片划分方法有等长时间划分和非等长时间划分两种。等长时间划分是将时间划分为等长的多个时间片段，但在等长时间间隔内，卫星网络拓扑结构可能发生巨大变化，这会导致预设路由策略失效；因此，该方法缺乏灵活性。非等长时间划分虽能解决网络拓扑变化问题，但由于划分的时间片段过多又给路由制定带来了巨大计算量。因此，我们采取二者结合的方式对时间片进行划分。

假设 T_1 时刻 A 与 B 连通， T_2 时刻 A 与 B 断开。若在 $T_1 \sim T_2$ 时间段内，网络中只有此链路发生通断变化，那么依据非等长时间划分方式， $T_1 \sim T_2$ 就是一个时间片，由此可能形成如图 1 所示的时间片。

如图 1 所示，LEO 卫星链路通断可能会出现 $T_4 \sim T_5$ 较短的时间片段。在该时间片内，只有 1 条链路发生通断。虽然对网络拓扑影响不大，但带来的路由计算问题更让人担心。为此，将所划分的时间片长度与 T_d 比较，若时间片长度小于 T_d ，则将该时间片段与上一时间片段合并，并在上一时间片段内提前将此链路设置为断开，如图 2 所示。

2.2 路由过程

依据时间片划分原理，在不同时隙内，LEO 卫星网络的拓扑结构不同；而在同一时隙内，我们可认为 LEO 卫星网络的拓扑结构基本不变。因此，当 LEO 网络中各卫星轨道确定时，便可计算出一个周期内的时隙划分。时隙划分工作可由地面控制中心完成，划分后广播给各卫星进行存储。基于此方案，我们仅需在时隙更新时重新计算路由。基于 DTN 的 LEO 卫星网络路由过程如图 3 所示。

2.3 拥塞控制

由于分时隙计算网络路由，若在某时段内产生流量突发情况，则容易引起节点拥塞。为提高路由效率，我们有必要设计拥塞控制机制。

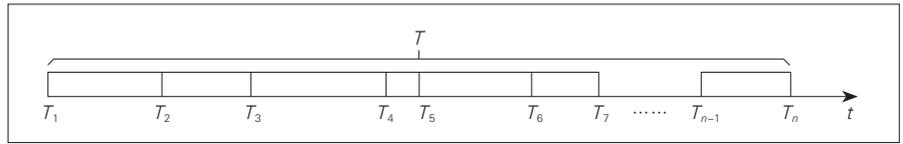
LEO 卫星主要负责地面网关接入以及大部分数据传输业务，因此当某一卫星节点拥塞，那么多因该地区业务量大或流量突发。不同轨道卫星的覆盖区域不同，人们可依据该特性来增加业务量大的区域的卫星数目，以共同完成路由任务，避免网络拥塞。对于流量突发情况，可利用卫星节点自身内存数与最大缓存数的比值实现监控，计算方式如公式（1）：

$$\beta_{men} = m_n / m_{max}, \quad (1)$$

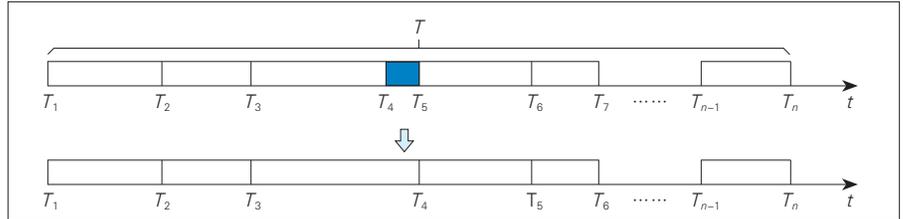
其中， m_n 代表节点当前可用内存资源， m_{max} 代表节点最大内存容量。假设节点拥塞判定的阈值为 85%，当 β_{men} 大于 0.85 时，就认为当前节点出现拥塞。本节点发送拥塞报告至分组内管理者，管理者在自身存储网络拓扑中将该拥塞卫星设为不可达，重新计算路由并下发至组内其他 LEO 卫星，直至节点发送拥塞解除报告，再置其为可到达，并更新组内路由。

2.4 性能评估

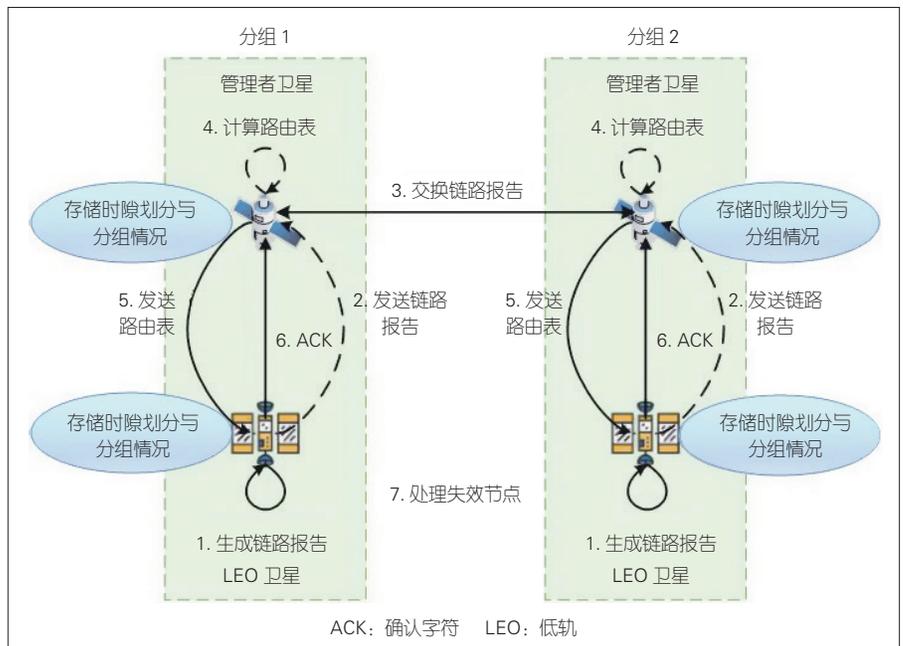
为验证所提方案性能，我们将其与一种多层卫星路由（MLSR）算法^[23]在时延方面进行对比。MLSR 算法是基于互联网协议（IP）设计的，可以为每个卫星分配独特的逻辑地址。不同于本文所提方案，MLSR 算法适用于由 GEO、MEO、LEO 组成的 3 层卫星网络。该算法将高层卫星作为管理者，将底层卫星进行分组，实现分层的网络拓扑信息收集。当组内卫星发生变化时，该算法可以动态更新路由表。由于该算法采用了集中式路由策略，当有新的卫星加入网络或者有卫



▲ 图 1 低轨卫星链路通断时间片划分



▲ 图 2 短时间片的合并

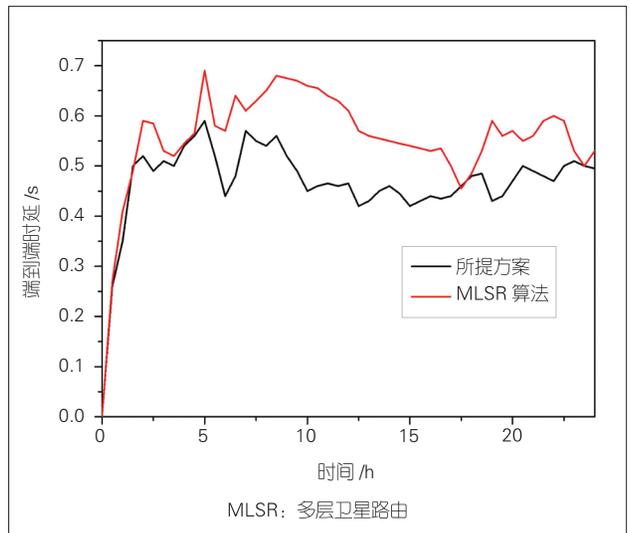


▲ 图 3 LEO 卫星网络路由过程

星离开网络时，路由表无法及时更新，因此缺乏自治能力。当卫星网络中有流量突发情况发生时，算法性能急剧下降。

利用 STK 组建卫星网络模型，在 OPNET 中进行仿真实验，我们得到了所提方案与 MLSR 算法在时延性能方面的比较结果，如图 4 所示。

由于数据包发送



▲ 图 4 平均时延对比

时间间隔较短, MLSR 算法在组内卫星发生变化时需要重新更新路由, 而且当其他组内的消息在经过本组卫星节点时, 由于更新后的路由还未在整个卫星网络更新, 所以消息在发送到该组内时会导致跳数增加。因此, MLSR 算法的平均时延较高而且抖动较大。相反, 由于本文所提方案重点考虑了 LEO 分组变化时隙, 且分组信息发生变化时可以及时在整个卫星网络更新, 所以获得了相对较低的时延。

3 结束语

本文首先介绍 LEO 卫星网络与 DTN 的基本概念与特征, 之后系统总结了 LEO 卫星网络与 DTN 代表性的路由算法, 并指出它们的典型特征, 最后提出一种 DTN 辅助的 LEO 卫星网络自主路由技术, 并描述了该技术的路由策略与拥塞控制过程。

随着天地一体化网络建设与 5G 甚至是 6G 通信服务的部署, LEO 卫星网络路由技术必将拥有广阔的应用空间与发展前景。人们需要根据差异化场景与用户差异化服务质量 (QoS) 需求设计来实现不同的 LEO 卫星网络路由算法。另外, 人们需要拓展卫星网络路由技术的应用范围与环境, 包括在 LEO、MEO 和 GEO 网络中的应用, 研究多层卫星结合的路由技术, 同时采用多个指标来测评路由技术效果。

参考文献

- [1] FALL K, HONG W. Custody transfer for reliable delivery in delay [J]. IRB, 2003, 26(1): 87-92
- [2] SHAH R C, ROY S, JAIN S, et al. Data MULEs: modeling and analysis of a three-tier architecture for sparse sensor networks [J]. Ad hoc networks, 2003, 1(2/3): 215-233. DOI: 10.1016/S1570-8705(03)00003-9
- [3] ARANITI G, BEZIRGIANNIDIS N, BIRrane E, et al. Contact graph routing in DTN space networks: overview, enhancements and performance [J]. IEEE communications magazine, 2015, 53(3): 38-46. DOI:10.1109/MCOM.2015.7060480
- [4] JAIN S, FALL K, PATRA R. Routing in a delay

- tolerant network [C]//Proceedings of the 2004 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications - SIGCOMM, 04. New York, USA: ACM Press, 2004: 145-157. DOI:10.1145/1015467.1015484
- [5] SPYROPOULOS T, PSOUNIS K, RAGHAV-ENDRA C S. Efficient routing in intermittently connected mobile networks: the single-copy case [J]. IEEE/ACM transactions on networking, 2008, 16(1): 63-76. DOI:10.1109/TNET.2007.897962
- [6] LINDGREN A, DORIA A, SCHELÉN O. Probabilistic routing in intermittently connected networks [J]. ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, 2003, 7(3): 19-20. DOI:10.1145/961268.961272
- [7] BISTA B B, RAWAT D B. EA-PRoPHET: An energy aware PRoPHET-based routing protocol for delay tolerant networks [C]//2017 IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA). Taipei, China: IEEE, 2017: 670-677. DOI:10.1109/AINA.2017.75
- [8] LIAO Y, ZHANG Z S, RYU B, et al. Cooperative robust forwarding scheme in DTNs using erasure coding [C]//MILCOM 2007-IEEE Military Communications Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2007: 1-7. DOI:10.1109/MILCOM.2007.4454738
- [9] 王汝言, 王燕燕, 刘乔寿, 等. 带有节点编码能力感知的 DTN 数据转发机制 [J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(11): 2295-2302. DOI:10.3969/j.issn.1001-506X.2014.11.29
- [10] HUI P, CROWCROFT J, YONEKI E. BUBBLE rap: social-based forwarding in delay-tolerant networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2011, 10(11): 1576-1589. DOI:10.1109/TMC.2010.246
- [11] 刘玉梅, 任清源. 社会机会网络中基于节点相遇历史信息的路由算法 [J]. 应用科技, 2016, 43:70-74
- [12] WEI K M, ZENG D Z, GUO S, et al. Social-aware relay node selection in delay tolerant networks [C]//2013 22nd International Conference on Computer Communication and Networks (ICCCN). Nassau, Bahamas: IEEE, 2013: 1-7. DOI:10.1109/ICCCN.2013.6614195
- [13] 周朝荣, 徐小琼, 杨柳, 等. 基于小世界与能效的容迟网络路由算法 [J]. 电子科技大学学报, 2016, 45(1): 129-134. DOI:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.01.022
- [14] JIANG Z Q, LIU C H, HE S B, et al. A QoS routing strategy using fuzzy logic for NGeo satellite IP networks [J]. Wireless networks, 2018, 24(1): 295-307. DOI:10.1007/s11276-016-1326-8
- [15] 魏德宾, 刘健, 潘成胜, 等. 卫星网络中基于多 QoS 约束的蚁群优化路由算法 [J]. 计算机工程, 2019, 45(7): 114-120. DOI:10.19678/j.issn.1000-3428.0051284
- [16] 周睿, 何利文, 唐澄澄, 等. 基于多目标约束遗传算法的 SDN 路径增强算法 [J]. 计算机技术与发展, 2019, 29(7): 17-22. DOI:10.3969/j.issn.1673-629X.2019.07.004
- [17] 焦媛媛, 田丰, 石神, 等. 基于多径的低轨卫星网络路由拥塞控制策略 [J]. 电子设计工程, 2018, 26(18): 113-117, 122. DOI:10.14022/j.cnki.dzsjgc.2018.18.024
- [18] WANG Y, ZHANG X, ZHANG T. A flooding-based routing algorithm for ads-b packets transmission in LEO satellite n D, QI S.

- An adaptive routing algorithm for integrated information networks [J]. China communications, 2019, 16(7): 195-206. DOI:10.23919/JCC.2019.07.015
- [19] TANG F L, ZHANG H T, YANG L T. Multipath cooperative routing with efficient acknowledgment for LEO satellite networks [J]. IEEE transactions on mobile computing, 2019, 18(1): 179-192. DOI:10.1109/TMC.2018.2831679
- [20] ZHU Y, RUI L L, QIU X S, et al. Double-layer satellite communication network routing algorithm based on priority and failure probability [C]//2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco: IEEE, 2019: 1518-1523. DOI:10.1109/IWCMC.2019.8766688
- [21] 马久龙, 齐小刚, 陈春琦. 基于拥塞避免的卫星网络路由算法 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2019, 57(2): 357-362. DOI:10.13413/j.cnki.jdxblxb.2018002
- [22] WANG F, JIANG D, QI S. An adaptive routing algorithm for integrated information networks [J]. China communications, 2019, 16(7): 195-206
- [23] 余哲斌, 朱晓薇, 吴兆峰, 等. 多层卫星网络路由协议研究 [J]. 网络安全技术与应用, 2011(12): 37-40

作者简介



张培颖, 中国石油大学 (华东) 副教授; 主要研究领域为虚拟网络映射、网络人工智能及空地一体化网络; 先后主持或参加 10 余项科研项目, 获得 3 项科研奖励; 已发表论文 50 余篇。



王超, 中国石油大学 (华东) 在读硕士研究生; 主要研究领域为虚拟网络映射、深度学习及网络人工智能; 先后参加多项科研项目; 已发表论文 10 篇。



吴胜, 北京邮电大学副教授; 主要研究领域为卫星通信、航天侦察和阵列信号处理; 主持/参与国家高技术研究发展计划 ("863" 计划) 项目、国家重点基础研究发展计划 ("973" 计划) 项目、国家自然科学基金项目、国防预研项目和国防横向项目等项目 20 余项; 发表论文 60 余篇, 获授权国家/国防专利 30 余项。

大规模低轨卫星网络移动性管理方案

Large-Scale Low Earth Orbit Satellite Network Mobility Management Scheme

吴琦/WU Qi, 郭孟泽/GUO Mengze, 朱立东/ZHU Lidong

(电子科技大学通信抗干扰技术国家级重点实验室, 中国 成都 611731)
(National Key Laboratory of Science and Technology on Communications, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)



摘要:为了在寻呼时能够快速准确地找到通信对端的接入卫星,需要对卫星网络的用户终端进行有效的移动性管理。提出了一种改进的动态虚拟化移动性管理方案。对于无法修建地面站的位置区,采用基于地面用户密度的自适应生成虚拟网关方法,可减少用户位置管理开销,并可实现大规模星座下的移动性管理。

关键词:低轨卫星;移动性管理;动态虚拟化;虚拟网关;位置管理

Abstract: In order to accurately find the access satellite of the communication peer during the process of paging, effective mobility management of user terminals connected in the satellite network is required. An improved dynamic virtualized mobility management scheme is proposed. For location areas where ground stations cannot be built, a method of adaptively generating virtual gateways based on ground user density is proposed to reduce user location management overhead, and finally achieve large-scale constellation simulation of mobility management solutions.

Keywords: Low Earth Orbit satellite; mobility management; dynamic virtualization; virtual gateway; location management

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105007

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210927.2329.004.html>

网络出版日期: 2021-09-28

收稿日期: 2021-08-19

低轨卫星网络^[1]主要包括空间段、地面段和用户段,其中空间段主要由低轨卫星组成。目前,以铱星系统与LeoSat星座为代表的低轨卫星系统,在星座设计中均采用了星间链路和星上处理技术。这使得卫星星座拥有独立组网和路由能力。未来低轨卫星星座也将继续采用这些技术,以使得卫星星座不仅具备为地

面终端之间、终端与地面站之间提供通信链路的能力,还拥有完成地面用户接入、业务传送等功能。地面段主要包括地面控制中心、指令站(跟踪、遥测),以及网络控制中心3个部分,可实现系统运维。用户段主要包括各类地面终端用户,如车载终端、舰载终端和卫星电话等。本文中,我们将地面用户段划分为高速移动终端和非高速移动终端。其中,高速移动终端在位置区覆盖卫星进行切换的同时,也可能产生越区切换。

文献[2]指出低轨卫星具有时延短、路径损耗小和对功率要求低的优点,同时低轨卫星通信系统可以采用简单、低功率的地面终端和设备。然而,相比于中轨卫星和高轨卫星,单颗低轨卫星的覆盖范围比较有限,需要大规模星座才能实现全球覆盖。OneWeb通信系统就是这类星座的代表。它是由720颗运行在轨道高度为1200 km的卫星构成的低轨卫星星座,星间通信依靠地面信关站完成。本文中的大规模低轨卫星网络移动

基金项目:国家重点研发计划(2019YFB1803102);
国家自然科学基金(61871422)

性管理方法主要应用于720颗存在星间链路的低轨卫星星座。

1 低轨卫星网络动态虚拟化分布式移动性管理

1.1 低轨卫星网络移动性管理研究现状

地面网络中的移动性管理方式主要为集中式管理^[3],即采用本地代理来实现对终端的管理,同时终端每次发起位置更新时都要向本地代理传输消息。如果直接将这种地面网络的集中式移动性管理方法应用在低轨卫星网络场景中,就会出现以下两个问题:

(1)终端频繁切换接入卫星^[4-5]而产生的大量报文消息,会经过星间链路和本地网络传递给本地代理。这将使得卫星星间链路和本地网络负载过高。这种负载会随着终端数量的增加而继续增大,容易导致网络瘫痪。

(2)当终端距离本地代理较远时,信令的传输时延会增大。这种时延会影响终端的切换,进而影响整个网络的性能。

因此,有必要针对低轨卫星网络的特点,将低轨卫星移动速度快、网络拓扑变化快等因素进行结合考虑^[6],寻找一种不同于传统地面网络集中式管理的移动性管理方法。文献[7]提出的动态虚拟化分布式移动性管理(DV-DMM)是一种适用于大规模低轨卫星网络的分布式移动性管理架构。对于分布式地面站建站困难的区域,如海洋、沙漠等,文献[7]提出利用低轨卫星群组成动态虚拟网关,即存在星间链路的相邻几颗卫星共同组成虚拟网关,对地面终端发送的位置更新信息进行网关内信息同步。虚拟网关将在无法布设地面

网关的地区发挥与地面网关相同的作用,例如存储、转发、路由等。通过和传统的基于互联网协议(IP)的移动IP第6版(MIPv6)移动性管理方法进行开销对比,DV-DMM模型的移动性管理开销优于MIPv6方案。

1.2 动态虚拟化分布式移动性管理方案

本文中我们使用和DV-DMM相似的移动性管理架构,并按照经纬度来划分位置区。每个位置区所占经度范围为 12° ,纬度范围为 15° ,这样全球一共被划分为360个位置区。以此为最小单元,若有由于地理或政治因素无法建设地面站的位置区,则由覆盖该位置区的卫星群来构成虚拟网关^[7]以协助组网。

低轨卫星分布式移动性管理系统模型如图1所示。在该模型中,我们从360个位置区中选取6个位置区。其中,LA3(LA指位置区)区域由于受到地理因素等限制无法建立地面网关。此时位于该位置区的卫星S5、S6、S7、S8会组成虚拟网关卫星群,同时S7将成为位于该位置区内

MN2(MN指终端)的接入卫星。

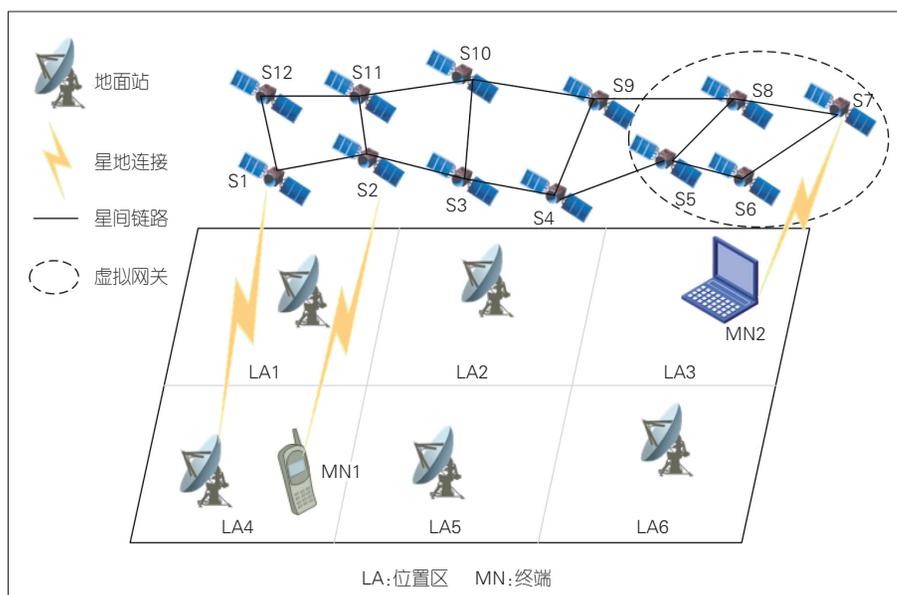
在本模型中,假设地面站与地面站之间、终端与地面站之间均不通过地面链路进行通信,所有的通信都由低轨卫星来完成。

终端向位置区所在的网关进行信息注册时存在两种情况:

(1)如果终端位置区所在的网关为地面站,那么在终端进行位置信息注册时,终端的接入卫星会通过星间链路将终端的位置信息发送给终端所在位置区的网关,以完成信息的注册。随后网关再通过星间链路将终端的位置信息并发送给其他网关,以完成信息的全局同步。

(2)如果终端所在位置区网关为虚拟网关,则终端的接入卫星与相邻的几颗卫星共同组成当前位置区的虚拟网关。接入卫星在收到终端的位置信息时,会首先在虚拟网关内向其他卫星同步终端位置信息,再通过星间链路发送到全局其他网关。

发送给其他网关的全局同步信息仅包含终端当前所属的位置区网关,而不包含终端当前的接入卫星。这是因为低轨卫星网络中终端切换



▲图1 低轨卫星分布式移动性管理系统模型

十分频繁。如果每次切换时接入卫星都进行全局更新,信令传输开销就会变得很大。因此,为了降低开销,每次终端切换接入卫星时,仅需要通知本地网关,并在本地网关内更新接入的卫星信息。

当终端MN1向终端MN2发起通信请求时,发送的请求报文中只包含源终端和目的终端的标识信息。报文首先由MN1发送给MN1的接入卫星S2。S2收到报文后会在本地缓存中寻找MN2的标识信息。如果S2本地有MN2的标识信息,就说明MN2的接入卫星也是S2。这时MN1与MN2可以经由S2直接建立通信连接。如果S2本地查询不到MN2的标识信息,S2就会将位置查询报文发给当前位置区LA4的地面站。随后,LA4的地面站将查询本地缓存有无MN2的标识信息。如果有,则说明MN2也位于LA4中。这时MN1与MN2可通过LA4的地面站建立通信连接。由于终端在注册时已经将其所属位置区

网关进行全局同步,因此任何一个网关处都存储有MN2的所属位置区网关信息。如果MN2不在LA4中,则LA4的网关就会将位置查询报文发给MN2所在位置区的网关,以完成通信连接。通信对端位置查询流程图如图2所示。

2 DV-DMM及其改进模型位置管理开销分析

文献[7]在动态虚拟化方案中提出了虚拟网关的概念。当用户所在地区可以建立地面网关时,地面网关将承担终端位置区信息的存储工作。当地面终端需要向另一个终端发起通信时,该终端将首先查询自身的接入卫星中是否存在另一终端的转交地址,如有则直接通过接入卫星转发信息,如无则通过接入卫星向自身位置区地面站寻求另一终端转交地址实现通信过程。当用户所在位置区因地理位置或地缘政治因素不能修建地面站时,覆盖位置区的卫星将组

合为虚拟网关,以代替地面网关的相关功能。

当地面终端由于覆盖区卫星运动而发生位置更新时,该方案只需要将位置更新信息在虚拟网关之间进行局部更新即可。当地面用户发生越区切换时,位置更新信息需要通过接入卫星广播到全球网关(包括所有地面网关和虚拟网关),而这将带来极大的位置更新开销。

本节在文献[7]提出的动态虚拟化分布式移动性管理方案基础之上,进一步推导了该方案中全球虚拟网关服从均匀分布(即所有虚拟网关均由相同数目的卫星通过星间链路组成)时系统的位置更新开销表达式,并结合地面终端密度进一步改进虚拟网关的分配策略,并给出了虚拟网关服从非均匀分布时系统的位置更新开销表达式。

2.1 均匀虚拟网关DV-DMM系统位置管理开销分析

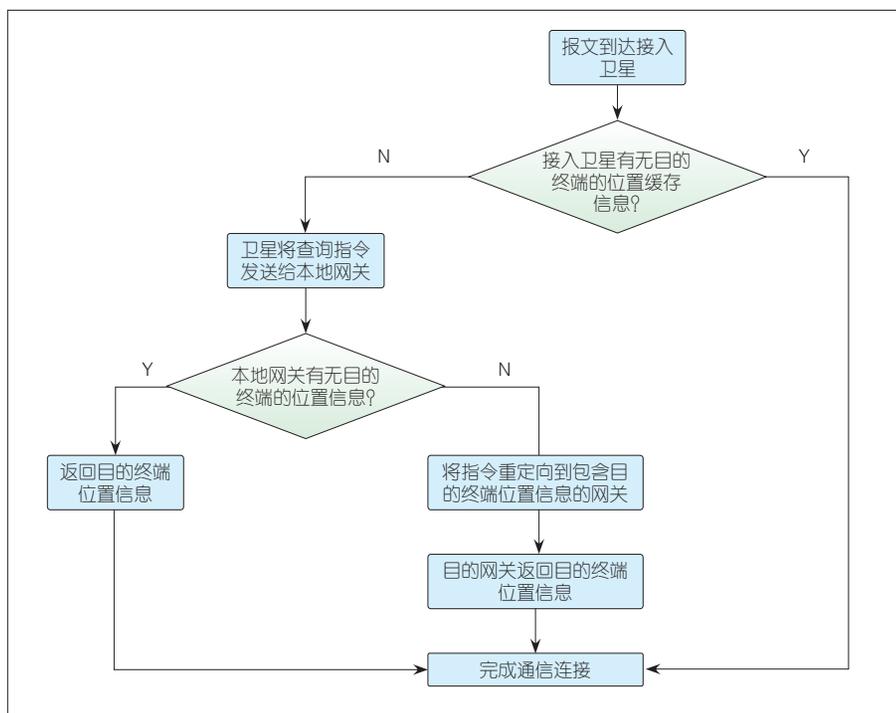
我们将位置管理信令开销定义为报文大小和报文跳数的乘积,并假设报文大小为固定值 B 。

位置管理信令开销 C_{total} 包括终端切换接入卫星时通知本地网关的开销 C_{sat} 和切换位置区时由本地网关发起的向其他网关进行信息全局同步的开销 C_{la} 。当地面终端所在位置区对应的网关为地面网关或者虚拟网关时,开销分析均可按以下方式展开。

单位时间内由于低轨卫星运动而造成的终端切换接入卫星的次数 N_{acc} 可由式(1)计算:

$$N_{acc} = \int_t^{t+dt} 2R \cdot V_{sat} \cdot \rho dt, \quad (1)$$

其中, R 表示卫星圆形覆盖区的半径, V_{sat} 表示卫星移动速度, ρ 表示地面用户密度,相关示意如图3所示。因此,



▲图2 位置查询流程图

由卫星运动导致的终端切换接入卫星的开销 C_{sat} 可由式(2)表示:

$$C_{sat} = N_{acc} \cdot B \cdot \{(1 - P_{vir}) \cdot [H(S_i, LA_k) + 1] + P_{vir} \cdot (H_{vir} + 1)\}, \quad (2)$$

其中, $H(S_i, LA_k)$ 表示当终端所在位置区网关为地面网关时, 从 MN 的接入卫星 S_i 到终端所在位置区网关 LA_k 的跳数, 通常取值为 1。该跳数加 1 表示将从 MN 到 S_i 的 1 跳也考虑在内。 P_{vir} 表示 MN 所在网关是虚拟网关的概率。如果 MN 所在网关是虚拟网关, 则还需要考虑虚拟网关内部信息同步的开销。 H_{vir} 表示该虚拟网关内部信息同步所需要的跳数, 该值与组成虚拟网关的卫星数量有关。 P_{vir} 可由式(3)计算:

$$P_{vir} = \frac{N_{vir}}{N_{LA}}, \quad (3)$$

其中, N_{vir} 为系统中虚拟网关数量。 N_{LA} 为系统中的网关总数量, 包含虚拟网关数量和地面网关数量。

当 MN 切换位置区时, 除了式(2)中的开销之外, 系统还需要向其他网关进行信息同步。此时额外开销 C_{la} 可由式(4)计算:

$$C_{la} = P_{la} \cdot N_{acc} \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N_{LA}} H(LA_k, LA_j) + \sum_{n=1}^{N_{vir}} H_{vir,n} \right], \quad (4)$$

其中, $H(LA_k, LA_j)$ 表示从位置区 k 的网关 LA_k 到位置区 j 的网关 LA_j 的跳数, $H_{vir,n}$ 表示第 n 个虚拟网关内部信息同步需要的跳数, P_{la} 表示终端切换位置区的概率。式(4)中中括号的第 1 项是由 MN 所在网关 LA_k 向全局其他网关发送位置更新消息的信令开销, 第 2 项是系统内的虚拟网关在接收到 LA_k 发送的位置更新消息后, 再进行虚拟网关内部信息同步的开销。

本系统总的位置管理开销可由式(5)表示:

$$C_{total} = C_{sat} + C_{la} = N_{acc} \cdot B \cdot \{(1 - P_{vir}) \cdot [H(S_i, LA_k) + 1] + P_{vir} \cdot (H_{vir} + 1)\} + P_{la} \cdot N_{acc} \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N_{LA}} H(LA_k, LA_j) + \sum_{n=1}^{N_{vir}} H_{vir,n} \right]. \quad (5)$$

2.2 自适应调整位置区虚拟网关规模算法

当全球虚拟网关服从均匀分布时, 地面终端密度分布不同将导致不同地区对应的虚拟网关所承载的业务量不同。2.1 节并未考虑到这一点。为使得系统能够稳定运行, 所有

虚拟网关中的卫星数目都应相同, 而且数值不能过大, 否则高终端密度地区的虚拟网关将无法及时进行全部业务的接入和内部广播操作。这种均匀划分方式只能将全球大部分卫星划分为多个小规模虚拟网关, 对于降低虚拟网关间的位置更新广播跳数是不

利的。

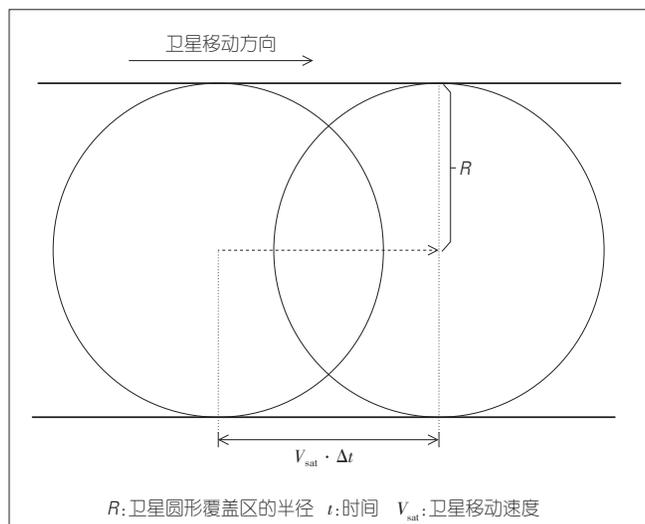
参考文献[8]将地球表面按照国家地理位置、用户分布密度、是否热点地区等条件合理划分成不同的管理区, 并对不同的管理区进行分簇管理, 实现了对不同用户密度位置区进行差异化、细粒度的管理。

基于以上分析, 本节提出了一种基于地面用户密度划分位置区的方法。为不同位置区分配不同大小的虚拟网关, 可进一步降低全球虚拟网关数目, 进而减少由地面终端发生越区切换引起的位置更新开销。

1.2 节中提到, 全球一共被划分为 360 个位置区。在这些位置区的基础上, 本文参照地球人口密度对位置区进行着色并用符号进行标记。其中, 颜色越深的地方表示相应的位置区终端密度越大(符号数越大)。360 个位置区的着色结果分布如图 4 所示。

图 4 中, 我们采用 4 种颜色, 每种颜色对应①、②、③、④中的一个数字符号。颜色由浅至深(数字符号由小到大)代表了地面终端密度由低到高。假设这 4 种颜色代表的终端密度为 $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$, 并满足 $\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4$ 。图 4 中中间白色方格区域近似为中国, 按照现有方式可在中国境内布设地面站, 暂时不需要构建虚拟网关。终端密度 ρ_4 对应的区域近似为西亚、南欧和北非, ρ_3 对应的区域近似为南美、北美和北欧等地区, ρ_2 对应的区域为其他陆地地区, ρ_1 对应的区域为海洋。

对于终端密度高的地区, 如果覆盖区的虚拟网关中的卫星数量较多, 虚拟网关覆盖的面积将增多。这是因为卫星在单位时间内需要接收更多终端的位置更新。一次位置更新将对应一次虚拟网关内部的信息广播过程。对于较大规模的虚拟网关



▲图3 按照地面用户密度对地球重新分区结果图

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
1	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
2	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
3	②	②	②	②	③	③	③	③	③	①	①	①	①	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	④	⑤	⑥
4	②	②	②	②	③	③	③	③	③	①	①	①	①	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	③	②	②	②
5	②	②	②	②	③	③	③	③	③	①	①	①	①	③	③	③	③	④	④	④	④	④								
6	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	②	②	②	②	②	②	②	④	④	④	④	④								
7	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	②	②	②	②	②	②	②	④	④	④	④	④								
8	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③	②	②	②	②	④	④	④	④	④								
9	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②
10	②	②	②	②	②	②	②	②	③	③	③	③	③	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②	②
11	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①
12	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	①	②

▲图4 按照地面用户密度对地球重新分区结果图

而言,这种开销是巨大的。此时应该选择较小规模的虚拟网关。同理,对于终端密度低的地区,可以在网关承载能力之内选择更大的虚拟网关。此时虚拟网关所覆盖的范围更大。当将此范围作为当前终端所在位置区时,地面位置区相较于起初以经纬度划分的位置区而言有所增大。这降低了该地区用户发生越区切换的概率。虽然这些地区用户密度较小,但是每一次越区切换所对应的全局广播开销十分庞大。因此,减少越区切换发生的次数对于系统整体优化有重要作用。

本文中我们将虚拟网关的最小单元设置为由4颗卫星连接而成的卫星群。终端密度高的地区将采用这样的虚拟网关单元。对于用户密度较低的区域,每颗卫星均向外部延伸1颗卫星,可以分别形成由8颗卫星和16颗卫星连接而成的卫星群。更进一步地,在16颗卫星组成的卫星群外部选择8颗卫星各自向外延伸1颗卫星,可以形成24颗卫星组成的卫星群。因此,对于目前划分的4种地面终端密度 $\rho_4, \rho_3, \rho_2, \rho_1$,虚拟网关可以依次扩充为每组4、8、16、24颗卫星。不同终端密度地面区将采用不同规模的虚拟网关,即地面终端密度为

$\rho_4, \rho_3, \rho_2, \rho_1$ 的位置区分别采用规模为4、8、16、24颗卫星的虚拟网关加以管理。需要说明的是,某一密度的地面区可能需要采取多组虚拟网关才能实现这一地面区的全部覆盖。

2.3 非均匀虚拟网关 DV-DMM 系统位置更新开销分析

本节提出了根据地面终端密度自适应调整覆盖区虚拟网关大小的思路。终端密度较大的地区,由于虚拟网关承载能力有限,可选择较小的虚拟网关,反之选择较大的虚拟网关。下面我们对这种算法中位置管理产生的开销加以分析。

当终端所在位置区网关为地面网关时,具体分析过程可参考2.1节。这里我们仅分析终端所在位置区网关为虚拟网关的情况。

由低轨卫星运动而造成的终端切换接入卫星的次数 $N_{acc,i}$ 表达式为:

$$N_{acc,i} = \int_t^{t+dt} 2R \cdot V_{sat} \cdot \rho_i dt, \quad (6)$$

其中, R 表示卫星圆形覆盖区的半径, V_{sat} 表示卫星移动速度, $\rho_i, i = 1, 2, 3, 4$ 表示地面用户密度。

$$P'_{vir} = \frac{N'_{vir}}{N'_{LA}} = \frac{N'_{vir}}{N'_{vir} + N_{gro}}, \quad (7)$$

其中, N_{gro} 为原地地面网关的数目。随着虚拟网关数目的减少,虚拟网关出现的概率将会降低。具体而言,如果全球所有不能布设地面站的地理区域都采取均匀布设虚拟网关的方式,则考虑到虚拟网关的承载能力有限,全球的虚拟网关规模均为最小单元(即4颗卫星)。当全球地区均按照用户终端密度自适应地改变虚拟网关的大小时,终端密度高的地方依旧维持由4颗卫星组成的最小虚拟网关单元,终端密度低的地方会扩大虚拟网关的规模,同时会相应地减少虚拟网关的数目。在整体星座中卫星数量一定的情况下,这种方式可以降低虚拟网关出现的概率 P'_{vir} 。

因此,由卫星运动而导致的终端切换接入卫星的开销 C_{sat} 可由式(8)表示:

$$C_{sat} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot N_{acc,i} \cdot B \cdot P'_{vir} \cdot (\overline{H}_{vir} + 1) + N_{acc} \cdot B \cdot (1 - P'_{vir}) \cdot [H(S_i, LA_i) + 1], \quad (8)$$

其中,等号右边的第1项和第2项分别表示终端处于虚拟网关下和中国境内的开销, \overline{H}_{vir} 为所有虚拟网关内部广播跳数的加权平均值。当MN切换位置区时,除了式(8)中的局部开销之外,还需要向其他网关进行信息

同步。此时开销 C_{la} 可由式(9)计算:

$$C_{la} = P_{la} \cdot \left[\sum_{i=1}^4 P_i \cdot P'_{vir} \cdot N_{acc,i} + (1 - P'_{vir}) \cdot N_{acc} \right] \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N'_{LA}} H(LA_k, LA_j)' + \sum_{n=1}^{N'_{vir}} H'_{vir,n} \right], \quad (9)$$

其中, P_i 为中国境外终端在密度为 ρ_i 位置区的概率。当 $N_{acc,i}$ 与 N_{acc} 相等时, 式(9)与式(4)本质上是一样的。

根据地面终端密度确定虚拟网关大小将会引起卫星星座中虚拟网关占比 P'_{vir} 发生变化。式(8)和式(9)中系统总网关数目 N'_{LA} 和虚拟网关数目 N'_{vir} 均会减小, $H(LA_k, LA_j)'$ 因为全局网关数目的减少也会减小, 但每个虚拟网关内部的局部更新开销 $H'_{vir,n}$ 会相应增大。

综上所述, 系统总体开销为:

$$C_{total} = C_{sat} + C_{la} = \sum_{i=1}^4 P_i \cdot B \cdot \{ [N_{acc,i} \cdot P'_{vir} \cdot (\overline{H}_{vir} + 1)] + N_{acc} \cdot B \cdot (1 - P'_{vir}) \cdot [H(S_i, LA_j) + 1] + P_{la} \cdot \left[\sum_{i=1}^4 P_i \cdot P'_{vir} \cdot N_{acc,i} + (1 - P'_{vir}) \cdot N_{acc} \right] \cdot B \cdot \left[\sum_{j=1, j \neq k}^{N'_{LA}} H(LA_k, LA_j)' + \sum_{n=1}^{N'_{vir}} H'_{vir,n} \right] \}. \quad (10)$$

2.4 虚拟网关开销

由于地球的自转和低轨卫星的高速移动性, 覆盖同一位置区的卫星是不断变化的。虚拟网关本身可以被视为与地面位置区一一映射关系。虚拟网关的规模和位置仅与地面终端分布密度有关, 同时虚拟网关内部存在卫星的接入与接出。

按照现有方式, 在虚拟网关中, 当有新的卫星进入时, 旧的卫星将从当前网关中被移除。对于旧卫星的移出, 系统需要在向虚拟网关内部其他卫星广播移出信息。新接入的卫星需要向当前虚拟网关内的全部卫

星广播自身进入虚拟网关的消息, 以便于新的用户位置更新信息不用传递给已经移出网关的卫星, 就可以正常传递给有新接入的卫星。因此, 这样的一次移入移出对应的全球系统开销可以表示为:

$$C_{vir} = 2 \sum_{n=1}^{N'_{vir}} H'_{vir,n}. \quad (11)$$

3 系统仿真分析

3.1 仿真基本参数设置

本文中的仿真工具为 MATLAB2021a 推出的卫星通信工具箱。我们采用极轨星座(每轨 24 颗卫星, 共 30 条轨道)。基本仿真参数如表 1 所示。

每个单元格为经度 12° 、纬度 15° 的方格区域。卫星轨道分为 30 轨, 右旋升交点赤经以 6° 为间隔在 $0 \sim 180^\circ$ 内均匀取值, 真近点角以 15° 为间隔在 $0 \sim 360^\circ$ 内均匀取值。为了体现相位差异, 轨道编号为奇数的真近点角从 $[7.5, 22.5, 37.5, \dots, 352.5]$ 中取值, 轨道编号为偶数的卫星真近点角从 $[0, 15, 30, \dots, 345]$ 中取值。星座仿真如图 5 所示。

图 5 中外部红色点为 720 颗卫星, 地球表面圆圈为每颗卫星覆盖面。每颗卫星可以与同轨道相邻两颗卫星以及相邻轨道上的两颗卫星

建立星间链路。紫色线表示异轨之间的星间链路建立情况, 分布不均匀的蓝色点表示地球表面添加的移动终端。

利用仿真工具并结合图 4 中地面终端密度所获得的地面终端分布如图 6 所示。

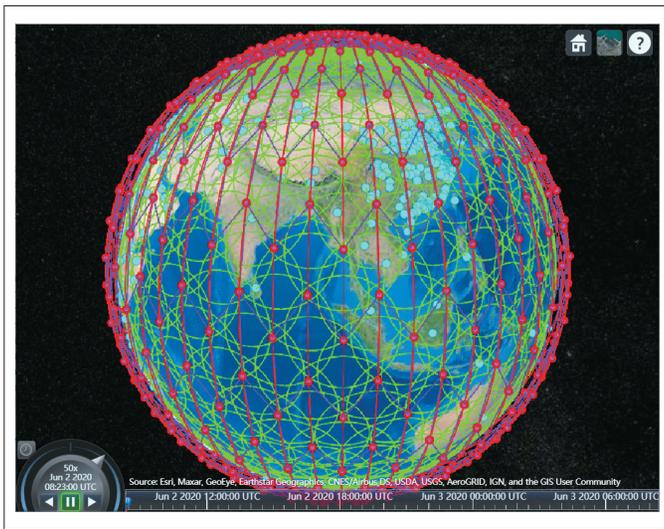
3.2 开销公式所需参数求解

本仿真规定, 所有地面终端接入卫星的规则为按时序排队。地面终端将与第 1 个接入的卫星保持连接, 直至卫星离开地面终端位置区, 此时再接入下一颗卫星。通过统计不同经纬度地区地面终端在 24 h 内接入卫星的次数, 可以计算出图 4 中不同密度地区的用户接入次数平均值 $N_{acc,i}$ 。根据图 4, 我们可以将全局 680 颗低轨卫星分成规模分别为 4、8、16、24 的 4 种虚拟网关。其余 40 颗卫星处于中国国境上方, 不需要构成虚拟网关。虚拟网关规模、数目、 $N_{acc,i}$ 等参数值如表 2 所示。其中, 虚拟网关内部广播跳数 $H'_{vir,n}$ 可根据虚拟网关规模以及卫星之间的连接情况建立邻接矩阵。利用 Dijkstra^[9] 算法可计算出从虚拟网关边界上任意一点到整个虚拟网关进行广播所需的平均跳数。

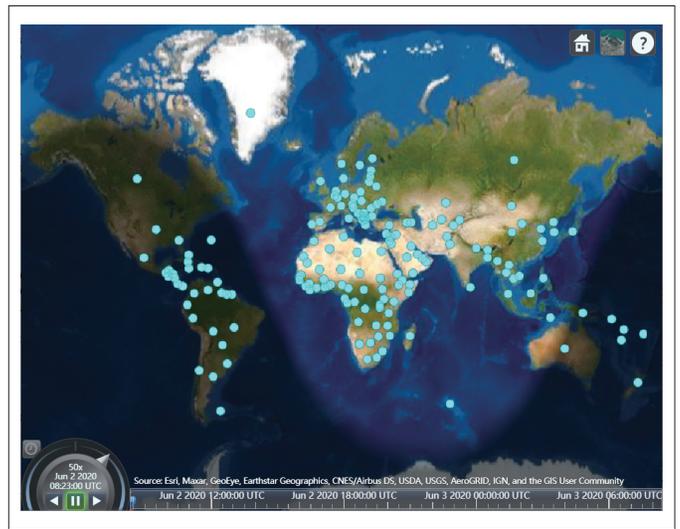
非均匀分布时, 虚拟网关总数目为 51 个, 共包含 680 颗卫星; 均匀分

▼表1 星座仿真基本参数表

基本参数	具体参数值
卫星数目	720
轨道高度/km	343.164
覆盖直径/km	2 400
偏心率	0
轨道倾角/ $^\circ$	90
右旋升交点赤经/ $^\circ$	[0, 6, 12, 18, ..., 168, 174]
真近点角/ $^\circ$	[0, 15, 30, ..., 345] 或 [7.5, 22.5, 37.5, ..., 352.5]
仿真时间/h	24
地面终端密度(每单元格)	$\rho_1 = 0.0583, \rho_2 = 0.2653, \rho_3 = 0.5333, \rho_4 = 2.7500$
发送数据包大小/bit	40
终端发生越区切换概率	0.2



▲图5 卫星星座仿真图



▲图6 地面终端分布

布时,680颗卫星以4颗卫星为一组来划分虚拟网关,此时虚拟网关总数为170个。假设中国境内的地面网关数目为10个,则非均匀分布时虚拟网关出现概率为 $P'_{vir} = 0.83$,均匀分布时虚拟网关出现概率 $P_{vir} = 0.94$ 。均匀分布时, N_{acc} 取表2中 $N_{acc,i}$ 的加权平均值。

$$N_{acc} = (\sum_{i=1}^4 V_i \cdot N_i \cdot N_{acc,i}) / 680 = 338.15 \quad (12)$$

根据图4可建立非均匀规模的虚拟网关(虚拟网关总数为51)和均匀规模的虚拟网关(虚拟网关总数为170)之间的邻接矩阵。此时,非均匀规模时网关到网关之间的平均跳数为 $\overline{H(LA_k, LA_j)} = 199.6$,均匀规模时的平均跳数为 $\overline{H(LA_k, LA_j)} = 974.8$ 。可以看出,非均匀规模虚拟网关的全局更新跳数远小于均匀规模虚拟网关的跳数。由表2可知,虚拟网关非

均匀时规模较大的虚拟网关内部更新跳数也将增大。

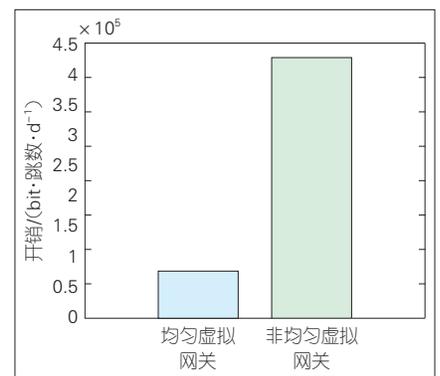
3.3 位置更新开销仿真

根据前述参数仿真两种情况下的位置更新开销,分别为虚拟网关为均匀分布时的位置更新开销和根据地地面终端密度自适应调整虚拟网关规模方案的位置更新开销。

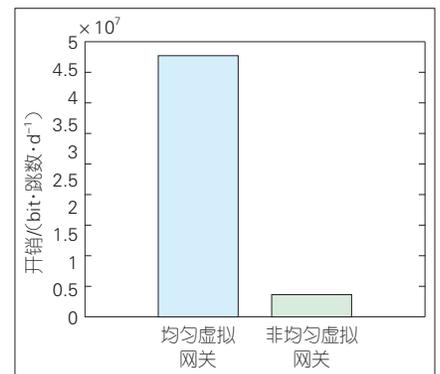
均匀虚拟网关系统和非均匀虚拟网关系统因卫星运动而发生的位置管理开销如图7所示。均匀虚拟网关系统和非均匀虚拟网关系统因地面终端发生越区切换而产生的位置更新开销如图8所示。

图7中,对于非均匀虚拟网关系统,由于引入了更大的虚拟网关,此时每次因卫星运动而产生的虚拟网关内部更新开销占主要部分。因此,非均匀虚拟网关系统在卫星移动时将产生更大的信令开销,性能表现不如均匀分布虚拟网关系统。图8中,

当非均匀虚拟网关系统引入更大的虚拟网关之后,系统中整体网关的数量变少。相比于均匀虚拟网关系统中的170个虚拟网关,非均匀虚拟网关中仅有51个虚拟网关。这大幅降低了全局更新的开销。因此,用户越区切换造成的位置更新开销更小。



▲图7 卫星移动造成的位置更新开销



▲图8 用户越区切换造成的位置更新开销

▼表2 全球虚拟网关参数

虚拟网关规模	虚拟网关数目	$N_{acc,i}$	虚拟网关内部广播跳数 $H'_{vir,n}$	虚拟网关对应出现概率 P_i
4	10	2 565.9	4	0.06
8	15	485.4	14	0.18
16	14	238.1	42.3	0.33
24	12	54.6	83	0.42

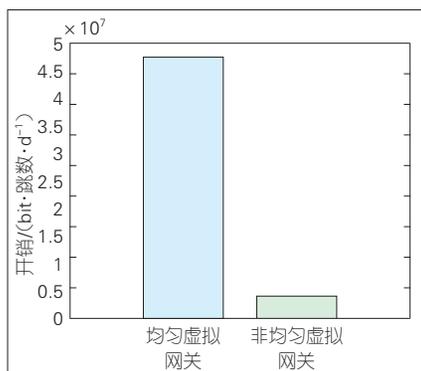
将两种位置更新开销相加可计算系统总开销,如图9所示。采取本文提出的依据地面用户密度自适应调整虚拟网关规模的方法将产生更小的位置更新开销。

4 结束语

本文对 DV-DMM 系统在移动性管理方面的位置管理开销进行了进一步探索,提出了一种根据地面终端密度自适应调整虚拟网关规模的算法,并比较了均匀分布虚拟网关系统与非均匀分布虚拟网关系统在用户因卫星运动和越区切换而发生位置更新的性能开销。仿真结果表明,非均匀分布虚拟网关系统位置管理中的位置更新信令开销要小于非均匀分布虚拟网关系统。

参考文献

- [1] 王学华, 朱立东. 低轨卫星通信系统地面核心网设计与仿真 [J]. 空间电子技术, 2010, 7(2): 119-123
- [2] 况鸿凤. 低轨大星座系统路由策略研究 [D]. 成



▲图9 均匀分布虚拟网关系统与非均匀分布虚拟网关系统开销对比

- 都: 电子科技大学, 2018
- [3] 窦志斌. 卫星网络移动性管理协议 S-MIPv [J]. 无线电工程, 2015, 45(10): 11-15
- [4] 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
- [5] Ji S, SHENG M, ZHOU D, et al. Flexible and distributed mobility management for integrated terrestrial-satellite networks: challenges, architectures, and approaches [J]. IEEE network, 2021, 35(4): 73-81. DOI: 10.1109/MNET.011.2100070
- [6] 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
- [7] 朱洪涛. 低轨卫星网络分布式移动性管理方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020
- [8] 丁煜. 低时延低轨卫星移动性管理技术 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020
- [9] JIANG J, HUANG H, LIAO J, et al. Extending Dijkstra's shortest path algorithm for soft-

ware defined networking [C]//16th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium. Hsinchu, China: IEEE, 2014: 1-4. DOI: 10.1109/APNOMS.2014.6996609

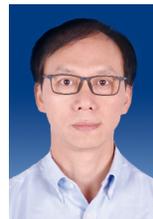
作者简介



吴琦, 电子科技大学在读硕士研究生; 主要研究方向为卫星通信智能抗干扰。



郭孟臻, 电子科技大学在读硕士研究生; 主要研究方向为卫星通信。



朱立东, 电子科技大学教授; 主要研究方向为卫星通信; 发表论文 200 余篇。

←上接第 22 页

- LEO F E, 等. Telesat, One Web 及 Space X 三个全球宽带低轨卫星星座系统的技术对比 [J]. 卫星与网络, 2019, (7): 48-61
- [5] ITU. Radio Regulations [M]. Geneva: ITU, 2020
- [6] ITU. Reference FSS earth-station radiation patterns for use in interference assessment involving non-GSO satellites in frequency bands between 10.7 GHz and 30 GHz [R]. Geneva: ITU, 2001
- [7] ITU. Analytical method for estimating interference between non-geostationary mobile satellite feeder links and geostationary fixed satellite networks operating co-frequency and codirectionally: ITU-R S.1324 [S]. 1997
- [8] 周傲松. 涉及非静止通信卫星星座的干扰计算方法 [J]. 中国空间科学技术, 2001, 21(3): 65-69. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-758X.2001.03.012
- [9] 周傲松, 陈道明. 非静止轨道卫星网络间下行数据传输同频干扰的分析方法 [J]. 通信学报, 2000, 21(3): 32-37. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-436X.2000.03.006
- [10] 李睿, 赵洪利, 曾德贤. 非静止轨道卫星网络同频干扰的分析与仿真 [J]. 空间科学学报, 2005, 25(4): 280-285. DOI: 10.3969/j.issn.0254-6124.2005.04.007
- [11] 李睿, 曾德贤. 非静止轨道卫星网络中同频干扰问题的分析与仿真 [J]. 电讯技术, 2008, 48(8): 6-10. DOI: 10.3969/j.issn.1001-893X.2008.08.002

- [12] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018, 58(9): 833-840. DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.038
- [13] FORTES J M P, SAMPAIO-NETO R. An analytical method for assessing interference in an environment involving NGSO satellite networks [C]// SBT/IEEE International Telecommunications Symposium. Sao Paulo, Brazil: IEEE, 1998: 5-9. DOI: 10.1109/ITS.1998.713082
- [14] 刘全, 葛新, 李健十, 等. 非静止轨道宽带通信星座频率轨道资源全球态势综述(上) [J]. 卫星与网络, 2020, (Z1): 66-69

作者简介



刘子威, 南京邮电大学讲师、硕士生导师; 主要研究领域为卫星通信、卫星物联网、多用户检测与信号处理技术; 先后主持国家自然科学基金项目 1 项、国家级面上项目 1 项, 参与国家级项目 4 项; 发表论文 10 余篇。



李嘉颖, 中国人民解放军军事科学院系统工程研究院工程师; 主要研究方向为卫星系统设计。



张更新, 南京邮电大学教授、博士生导师, 卫星通信研究所所长; 主要研究领域为卫星通信、卫星物联网、频谱感知等; 先后主持多项国家“863”计划、“973”计划、国家自然科学基金重点项目、国家科技重大专项等项目; 发表论文数十篇, 获授权专利 10 余项。

基于多维梯度的 卫星集群高可靠协同计算方法

Multi-Dimensional Gradient Based High-Reliability
Collaborative Computing Method for Satellite Network



马步云/MA Buyun, 任智源/REN Zhiyuan, 李赞/LI Zan

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 中国 西安 710071)
(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

摘要:在分布式低轨(LEO)卫星集群中进行端到端业务计算是当前的研究热点。但是,传统分布式LEO端到端业务计算采用的集中式调度方法,存在任务执行成功率难保障、中心节点难选取等问题。针对上述问题,提出了一种新型分布式端到端业务计算技术,研究了基于时空扩展图模型的LEO拓扑动态性屏蔽方法,并提出了基于可靠性梯度选择的端到端业务计算理论模型与分布式业务调度算法。该算法可通过综合考虑LEO节点的多维信息来选取参与任务处理的路径节点,并逐跳完成业务的计算与传输。仿真结果表明,与集中式业务调度相比,分布式业务调度以较小的时延增加为代价,有效提升了任务的执行成功率。

关键词:低轨卫星;分布式;端到端;协同计算

Abstract: It has become a hot research field to study end-to-end task computing in Low Earth Orbit (LEO) network. However, there exist difficulties to guarantee the task execution success rate and elect the management node caused by the centralized task scheduling. To solve the above problems, the distributed end-to-end information processing technology is proposed. At first, the dynamic of the LEO network is shielded based on the time expanded graph model; then, the end-to-end task computing model is constructed and the distributed task scheduling algorithm is proposed, which jointly considers the multi-dimensional information of nodes to select the processing nodes. The simulation results validate that the distributed task scheduling effectively improves the task execution success rate at the cost of little latency performance.

Keywords: Low Earth Orbit; distribution; end-to-end; collaborative computing

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105008
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210929.1604.002.html>

网络出版日期: 2021-09-29
收稿日期: 2021-08-18

由于具有星地传输距离短、覆盖范围广等优势,基于低轨(LEO)卫星的通信系统^[1]受到业界广泛关注。同时,大量数据在传输过程中仍需进一步处理才能被使用(例如,卫星采集的图像需要经过去噪、特征提取等后才可被使用)。然而,

受限于卫星的载荷能力和宇宙射线的影响^[2],单颗卫星的计算能力难以大幅提升,很难独自完成计算密集型任务。而将海量数据转发至地面云计算中心,利用云平台强大的计算资源处理数据^[3],虽然可有效降低计算时延,但是会带来过高的通信开销,仍难以有效满足业务需求。因此,研究端到端业务计算方法势在必行。通过协作可使卫星展现出强大的传

输与计算数据的能力。

目前,大多数研究者致力于单方面优化路由^[4-6]或业务卸载策略^[7-10],将两者统一考虑的很少。而现有的端到端信息处理方案均为集中式业务调度^[11-13],其中,中心管理节点负责管理网络并制订合理的业务调度方案,LEO集群根据预先制订好的方案相互协作。然而,LEO卫星数目众多且计算资源有限,真实的卫星网络很难

基金项目:科技部重点研发计划资助项目(2019YFB1803305)

拥有一个强大的中心管理节点(该节点一旦发生故障,整个网络将瘫痪)。此外,由于卫星工作在复杂的宇宙环境中,极易受到干扰,如采用集中式调度模式处理业务,调度方案中的任何一颗卫星出现故障都将导致任务失败,很难满足业务的可靠性需求。基于此,针对单星计算能力弱、节点故障率高的分布式LEO集群,亟需一种分布式低时延高可靠的端到端业务计算方法,以满足业务需求。

本文面向分布式LEO集群,提出了一种去中心式端到端信息处理技术方法。该方法首先依托时空扩展图(TEG)来屏蔽LEO集群的高动态特性,随后对端到端业务调度进行理论建模并设计分布式业务调度算法。当任务到来时,每颗卫星基于其邻居节点信息,独自运行该算法来选择下一跳节点,并逐步完成数据的传输与计算。该算法提出了一种新的度量梯度指标(业务调度效率)作为选择下一跳节点的依据。该梯度指标综合考虑了节点的计算能力、链路传输速率、故障率、至目标卫星的跳数,可有效降低系统时延,提高系统可靠性。

1 系统模型

分布式LEO集群系统架构如图1所示。其中,为不失一般性,假设地面站定时向LEO集群广播全局拓扑信息,每颗卫星可计算自身到结果接收卫星的跳数。当任务到达时,每颗卫星根据自身相邻节点的信息逐步选择下一节点,并完成端到端业务计算。

1.1 LEO网络模型

为屏蔽LEO集群的动态性,本节依托LEO卫星运行轨道参数构建TEG模型。

令 $N = \{n_1, \dots, n_p, \dots, n_s\}$ 表示LEO集群,以地心为坐标原点,以赤道平面为X轴、Y轴所在平面,Z轴通过地心并垂直于赤道平面指向北极,建立空间直角坐标系。则在任意时刻 t 时, n_p ($n_p \in N$) 的位置坐标 (x_p^t, y_p^t, z_p^t) 可通过运行轨道计算得到。 n_p 与 n_o ($n_p, n_o \in N, p \neq o$) 之间的距离可通过式(1)来计算。

$$d_{po}^t = \sqrt{(x_p^t - x_o^t)^2 + (y_p^t - y_o^t)^2 + (z_p^t - z_o^t)^2} \quad (1)$$

定义 t 时刻 n_p 与 n_o 之间的链路状态为 $state_{po}^t$,并可表示为式(2):

$$state_{po}^t = \begin{cases} r^*, r_{po}^t \geq r^* \\ 0, r_{po}^t < r^* \end{cases} \quad (2)$$

其中, r^* 为星间链路的设计速率, r_{po}^t 为 t 时刻 n_p 与 n_o 的理论传输速率。 $state_{po}^t = r^*$ 表示 n_p 与 n_o 连通且链路传输速率为 r^* ,反之则表示 n_p 与 n_o 链路中断。可根据香农公式得出式(3):

$$r_{po}^t = B \log_2 \left(1 + \frac{P_r^t}{\sigma^2 B} \right) \quad (3)$$

其中, B 为星间链路带宽, σ^2 为高斯白噪声方差, P_r^t 为 t 时刻的信号接收功率。在星间链路中,信号传输损耗主要为自由空间传输损耗^[4]。因此, P_r^t 可由式(4)来表示:

$$P_r^t = \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi d_{po}^t / \lambda)^2} \quad (4)$$

其中, G_r 、 P_t 、 G_t 分别表示信号接收增益系数、信号发射功率和信号发射增益系数, λ 为载波波长。则式(2)可进一步表示为:

$$state_{po}^t = \begin{cases} r^*, B \log_2 \left(1 + \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi d_{po}^t / \lambda)^2 \sigma^2 B} \right) \geq r^* \\ 0, B \log_2 \left(1 + \frac{P_t G_t G_r}{(4\pi d_{po}^t / \lambda)^2 \sigma^2 B} \right) < r^* \end{cases} \quad (5)$$

基于式(5),通过遍历可获得LEO集群拓扑。此时,以LEO集群某一时刻状态为起点,将系统运行周期 T 等分为 n 个连续时隙,长度定义为 $\Delta = T/n$ 。假设时隙内拓扑稳定不变,



▲图1 低轨集群系统架构图

则LEO集群 N 可表示为 $N = (N^T, E^T)$, 其中 $N^T = \{N^1, \dots, N^n\}$ 为节点集合, E^T 为边集合, 如图2所示。

(1)时隙内边的权重。任意时隙 $\forall q \in T$ 内, 边 $(n_p^q, n_o^q) \in E^T$ 的权重为节点 n_p^q 传输单位数据量到节点 n_o^q 的时延, 如式(6)所示:

$$\pi_{po}^q = \begin{cases} \frac{1}{r^*}, state_{po}^t = r^*, t \in q \\ 0, state_{po}^t = 0, t \in q \end{cases} \quad (6)$$

则 q 时隙内LEO集群可表示为式(7):

$$G^q = \begin{bmatrix} 0 & \pi_{12}^q & \dots & \pi_{1(d-1)}^q & \pi_{1d}^q \\ \pi_{21}^q & 0 & \dots & \pi_{2(d-1)}^q & \pi_{2d}^q \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \pi_{(d-1)1}^q & \pi_{(d-1)2}^q & \dots & 0 & \pi_{(d-1)d}^q \\ \pi_{d1}^q & \pi_{d2}^q & \dots & \pi_{d(d-1)}^q & 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

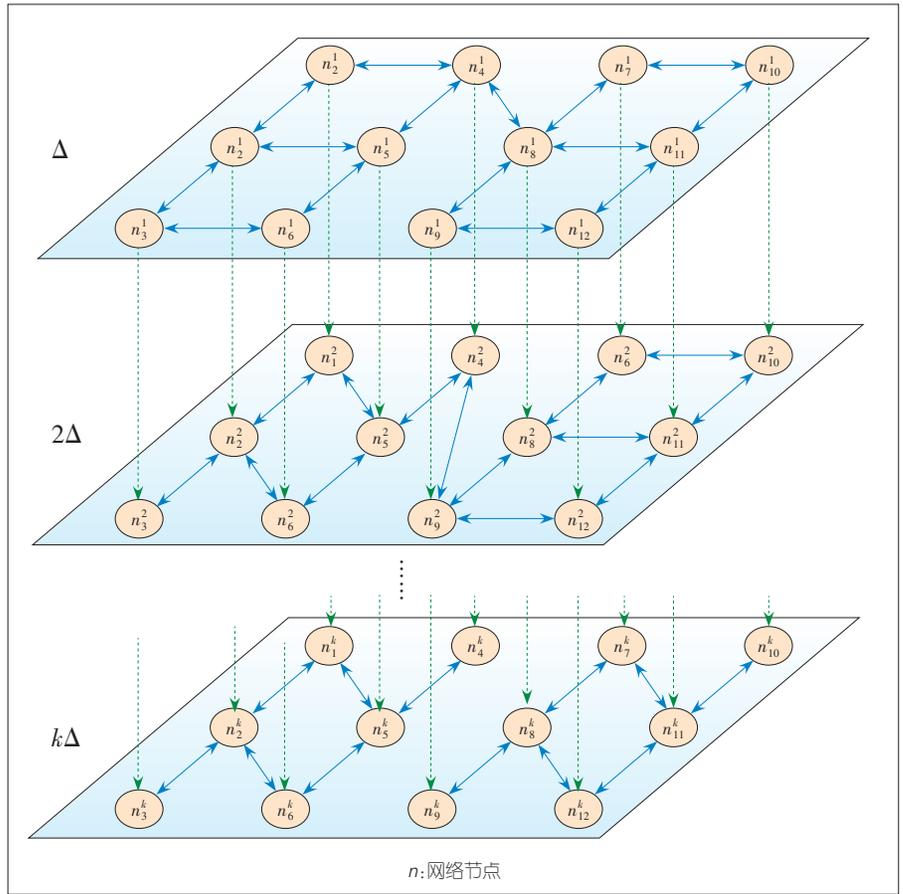
(2)时隙间边的权重。数据在传输过程中可能存在由链路中断所导致传输失败的情况, 因此, 需要定义时隙间边的权重 $\pi_p^{q(q+1)}$, 即数据到达卫星节点 v_p^q 时, 当前时隙的剩余时间, 如式(8)所示:

$$\pi_p^{q(q+1)} = \Delta t - t_p^q \quad (8)$$

则相邻时隙 $q, q+1 \in T$ 间LEO集群可表示为式(9):

$$G^{q(q+1)} = \begin{bmatrix} \pi_1^{q(q+1)} & \dots & \infty & \dots & \infty \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \infty & \dots & \pi_p^{q(q+1)} & \dots & \infty \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \infty & \dots & \infty & \dots & \pi_d^{q(q+1)} \end{bmatrix} \quad (9)$$

此时, LEO集群的TEG模型可表示为式(10):



▲图2 低轨集群时空扩展图模型

$$TEG = \begin{bmatrix} G^1 & G^{12} & \infty & \dots & \infty & \infty \\ \infty & G^2 & G^{23} & \dots & \infty & \infty \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \infty & \infty & \infty & \dots & G^{(n-1)} & G^{(n-1)n} \\ \infty & \infty & \infty & \dots & \infty & G^n \end{bmatrix} \quad (10)$$

对于任意连通节点对 $n_p^q, n_o^w \in N^T$, 基于TEG可通过最短路径算法(如Dijkstra)求得其最短时延 g_{po}^{qw} 和最短路由 $Path_{po}^{qw}$ 。

1.2 端到端业务计算理论模型

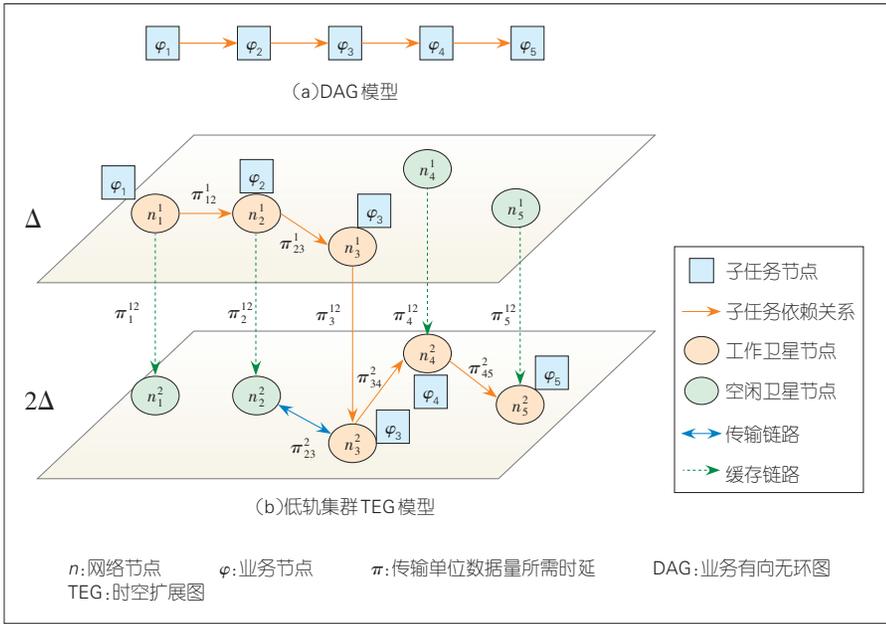
基于TEG, 本节提出端到端业务计算理论模型。为不失一般性, 本节按照子业务间的依赖关系建立业务有向无环图(DAG)模型。同时, 根据文献[15], 任何结构的DAG均可解析为串行DAG, 因此, 本文仅考虑串行

DAG。

定义DAG为 $\Omega = (\Psi, s)$ 。其中, $\Psi = \{\varphi_1, \dots, \varphi_l\}$ 为节点集合, 表示子业务集群, φ_i 为业务起点, φ_i 为业务终点; s 为边集合, 表示子业务间的依赖关系。此外, $\varphi_i \in \Psi$ 由元组 $\{D_i, \eta_i, \varepsilon_i\}$ 表征, 其中 D_i 为输入数据量, η_i 为数据压缩系数, ε_i 为计算复杂度系数。同时, 定义 $\Theta_1(\varphi_j) = \{\varphi_i | (\varphi_j, \varphi_i) \in s\}$ 为子任务 φ_j 的先驱节点集合。此时, 业务 Ω 在LEO集群中的调度可转化为DAG至TEG的映射规则, 如图3所示。

(1) 节点映射规则

我们首先定义 $\tau: \Psi \rightarrow N^T$ 表示子业务节点 Ψ 至卫星节点 N^T 的映射。具体地, 如式(11)所示, 业务起



▲图3 DAG至TEG的映射示例

点映射至业务发起卫星,业务终点映射至结果接收卫星,中间业务节点映射至任意卫星。为不失一般性,假设子业务不可再分,所有子业务均在单颗卫星上计算,考虑到传输过程中链路可能断开,此时数据需在卫星上缓存,经过虚拟链路至下一时隙, ρ_i 为跨时隙数目。

$$\tau(\varphi_i) = \begin{cases} \{n_1^1, \dots, n_1^{1+\rho_i}\}, \varphi_i = \varphi_1 \\ \{n_d^q, \dots, n_d^{q+\rho_i}\}, \varphi_i = \varphi_i \\ \{n_p^q, \dots, n_p^{q+\rho_i}\}, \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

(2) 边映射规则

$s \rightarrow E^T$ 表示 DAG 有向边 s 至 TEG 无向边 E^T 的映射,以反映子业务间的依赖关系。具体地,如式(12)所示,将 DAG 的有向边 $\forall(\varphi_i, \varphi_j) \in s$ 映射为图 N 中 $\tau(\varphi_i)$ 至 $\tau(\varphi_j)$ 之间的最短路由 $Path_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_j)}$

$$Z((\varphi_i, \varphi_j)) = Path_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_j)} \quad (12)$$

1.3 分布式端到端业务调度算法

为了实现在分布式 LEO 集群中数据的“边传输边计算”,本节提出分布式端到端业务调度算法,如算法 1 所示。该算法主要由 3 个步骤构成: (1)任务到来时,通过广播发现邻居节点,并获取其必要的状态信息以用于计算任务调度效率(TSE);(2)计算邻居节点的 TSE,并根据 TSE 选择下一跳节点;(3)判断当前时隙剩余时间是否充足,若充足则将数据发给已确定好的下一跳节点,否则返回步骤 2,并基于下时隙信息重新选择下一跳节点。

基于上述端到端业务计算理论模型分析,算法需统一考虑节点的计算能力和链路状态以实现端到端业务计算,而由于缺乏中心节点的统一调度,仅考虑计算能力和链路状态可能会导致数据的反向传输。因此,需要引入目标节点位置信息以实现数据的定向传输,同时为了保证数据传输的可靠性,节点故障率也需要被考虑进算法中。基于以上分析,本节定义 TSE 梯度指标,综合考虑了节点的

计算能力、链路状态、故障率、距目标节点跳数多维梯度信息,如式(13)所示:

$$TSE(\tau(\varphi_i)) = H_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_j)} \cdot \chi_{\tau(\varphi_i)} \cdot \left(\frac{1}{f_{\tau(\varphi_i)}} + \frac{1}{e_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_j)}} \right) \quad (13)$$

其中, $H_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_j)}$ 为映射节点 $\tau(\varphi_i)$ 至结果接收卫星 $\tau(\varphi_j)$ 沿最短路径所需跳数, $\chi_{\tau(\varphi_i)}$ 为节点 $\tau(\varphi_i)$ 的故障率, $f_{\tau(\varphi_i)}$ 为节点 $\tau(\varphi_i)$ 的计算能力, $e_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_j)}$ 为子任务 φ_i 的前向节点 φ_j 的映射节点 $\tau(\varphi_j)$ 沿最短路径至 $\tau(\varphi_i)$ 的传输速率。由式(13)可知,距目标节点越近,节点计算能力越强,故障率越低、链路传输速率越快,TSE 就越小,该节点的调度效率也就越高。

算法 1 分布式端到端业务调度算法

输入: DAG 模型, TEG

- 步骤 1: 任务到来时,通过广播发现邻居节点并获取其多维状态信息,包括计算能力、链路状态、故障率、距目标节点跳数;
- 步骤 2: 根据式(13)计算各邻居节点的 TSE 指标,并选取 TSE 最小的节点为下一跳节点;
- 步骤 3: 判断此时将数据传输至下一跳节点的时延是否小于当前剩余时隙,若小于则传输;否则就缓存数据,返回步骤 2,并根据 TEG 预测下时隙的 TSE 指标,重新选择下一跳节点。

输出: 下一跳节点

2 仿真与评估

为验证本文提出的分布式业务调度方案的有效性,本节将该方案同集中式方案进行比较。在比较过程中,所有实验均基于相同假设。在集中式业务调度模式下,中心节点运行

集中式业务调度算法以获取传输路径上的关键计算节点。集中式业务调度算法采用经典的 DAG 调度算法—异态最早结束时间 (HEFT) 算法^[15]。值得注意的是,由于集中式业务调度算法依赖较多的计算资源,卫星节点虽具备一定计算能力,但很难运行集中式业务调度算法。本节同时将基于 TSE 指标选择下一跳节点的分布式业务调度算法(记为 Proposed)同随机式(记为 Random)和贪婪式(记为 Greedy)两种常用业务调度算法进行比较,并对仿真结果进行分析与讨论。

2.1 仿真场景及参数设置

本文考虑由 15 颗低轨卫星构成的卫星集群。其中,低轨卫星均取自铱星星座(轨道高度 780 km)。本文中,我们利用卫星工具包(STK)获取网络真实连通情况。仿真时间段为 2021 年 4 月 26 日 00:00—00:30。本文仿真平台为 Python 3.7,采用的业务图为图 1 中的 DAG。参照文献[11]和[16],仿真参数如表 1 所示。此外,为不失一般性,本文所有仿真结果均基于 3 000 次蒙特卡洛实验。

为了分析与评估性能,我们考虑端到端业务处理时延和任务成功率两个指标。

(1) 端到端业务处理时延

基于 1.2 节的 DAG 至 TEG 的调度规则,端到端业务处理时延可建模如下。

进行到子任务 φ_i 时的处理时延如式(14)所示:

$$T(\varphi_i) = T_{\text{comp}}(\varphi_i) + T_{\text{accu}}(\varphi_i) = \frac{D_i \eta_i \varepsilon_i}{f_{\tau(\varphi_i)}} + \max_{\varphi_j \in \phi_{\tau(\varphi_i)}} [T(\varphi_j) + g_{\tau(\varphi_j)\tau(\varphi_i)} D_j \eta_j], \quad (14)$$

其中, $T_{\text{comp}}(\varphi_i)$ 表示 φ_i 的计算时延,

▼表1 基本参数

具体参数	数值	具体参数	数值
G_r	37.5 dB	G_t	52.5 dB
P_i	5 kW	σ^2	5×10^{-15}
ε_i	237 cycles/bit	η_i	0.8
B_{sc}	10 Mbit/s	r^*	30 Mbit/s
f_c	10 GHz	f_s	[3,5.5] GHz

$T_{\text{accu}}(\varphi_i)$ 表示 φ_i 前向节点的累积时延。 $f_{\tau(\varphi_i)}$ 为节点 $\tau(\varphi_i)$ 的计算能力,表示卫星节点 $\tau(\varphi_i)$ 中央处理器(CPU)每秒运行的周期数。

因此, Ω 的业务处理时延为最后一个子任务 φ_l 的处理时延,如式(15)所示。

$$T(\Phi) = T(\varphi_l) = \max_{\varphi_i \in \phi_{\tau(\varphi_l)}} [T(\varphi_i) + g_{\tau(\varphi_i)\tau(\varphi_l)} D_i \eta_i \varepsilon_i] + \frac{D_l \eta_l \varepsilon_l}{\rho_{\tau(\varphi_l)}}. \quad (15)$$

(2) 任务成功率 α

任务成功率 α 是成功完成的任务数与总试验次数的比值,如式(6)所示。

$$\alpha = \frac{N_{\text{succ}}}{N_{\text{total}}} \times 100\%, \quad (16)$$

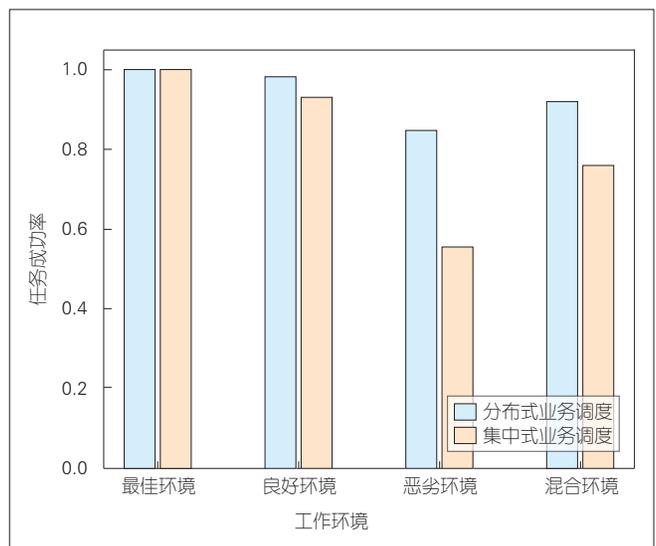
其中, N_{succ} 为成功完成的任务数, N_{total} 为总实验次数。

2.2 仿真结果与分析

2.2.1 可靠性性能

图 4 比较了不同业务调度模式在不同环境下的可靠性性能。其中,任务量大小为 100 Mbit。值得注意的是,卫星的故障概率包括卫星器件故障概率和卫星受到环境干

扰(如发生“0-1 翻转”等)导致任务失败的故障概率。因此,为不失一般性,本节设置了 4 种不同环境:最佳环境、良好环境、恶劣环境、混合环境。在最佳环境中,卫星的故障概率设置为 0,即 $\chi_i = 0$;在良好环境中,假定卫星的故障概率均匀分布,即 $\chi_i \sim U([0,0.5\%])$;在恶劣环境中, $\chi_i \sim U([1\%,3\%])$;在混合环境中,某些卫星的故障概率为 $\chi_i \sim U([0,0.5\%])$,另外一些卫星的故障概率为 $\chi_i \sim U([1\%,3\%])$ 。由图 4 可知,在最佳环境下,分布式业务调度和集中式业务调度的任务成功率均为 100%。这是因为在理想环境中,不会出现卫星故障,任务能 100% 完成。然而,由于理想情况根本不存在,因此本文研究了 3 种现实环境下的可靠性性能。由图 5 可知,集中式业务调度模式的可靠性性能在各种环境下均比较低。



▲图 4 不同环境下不同业务调度模式的可靠性性能比较

恶劣环境中,集中式业务调度模式的任务成功率仅为55.0%。相比之下,分布式业务调度的任务成功率为84.4%。这是因为,分布式业务调度仅须保障当前执行业务节点在执行业务期间不会发生故障,而集中式业务调度模式须保障业务调度方案中所有节点在执行任务之前均不会发生故障。

2.2.2 时延性能

图5比较了不同计算范式的时延性能,即云计算、本地计算和协同计算。其中,协同计算可进一步分为集中式业务调度和分布式业务调度,并且工作环境为混合环境。由图5可知,当任务量较小时,3种计算范式均表现出良好的时延性能。但随着任务量的增加,云计算的时延也迅速增加。这是因为云计算中心距卫星较远,导致传输时延较高。而本地计算虽可避免较高的通信开销,但由于单星计算能力有限,计算时延也较高。对于协同计算,由于卫星集群具备强大的计算能力,且卫星之间距离较近,因此,随着数据量的增加,其时延仍在可接受范围之内。

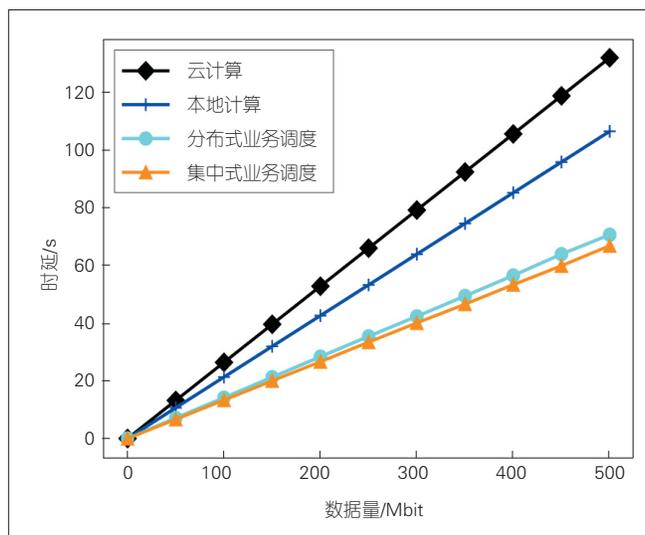
由图5可知,分布式业务调度的时延略高于集中式业务调度。但应注意到,混合环境下,在处理100 Mbit的数据时,分布式业务调度的任务成功率比集中式业务调度提升了21.3%,而时延仅增加了6.21%,即以较小且可接受的时延为代价换取了可靠性性能的大幅度提升。

2.2.3 多种算法可靠性及时延性能分析

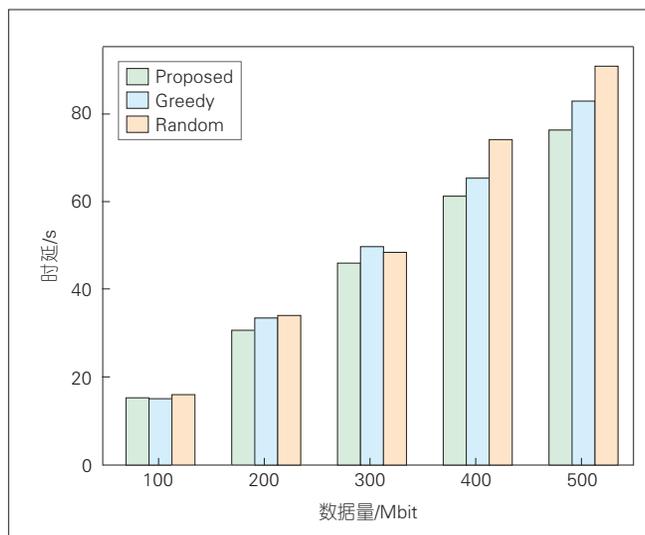
本节比较了基于TSE指标的算法(记为Proposed)同随机式(记为Random)和贪婪式(记为Greedy)算法的时延性能和可靠性性能,分别如图6、图7所示。

图6比较了不同算法的时延性能。其中,工作环境为混合环境。由图6可知,当任务量较小时,3种算法时延差别不明显。而随着任务量的增加,所提算法的时延明显低于其他两种算法。例如,当任务量为500 Mbit时,Proposed、Greedy、Random的时延具体分别为76.14 s、83.08 s、90.94 s,所提算法比其他两种算法的时延分别低了8.35%、16.27%。这是因为,Random算法随机选取下一跳节点,并未考虑其计算能力,同时Greedy算法选取计算能力最强的节点作为下一跳节点,并未考虑边的传输能力和传输方向,因此时延性能均不如Proposed算法。

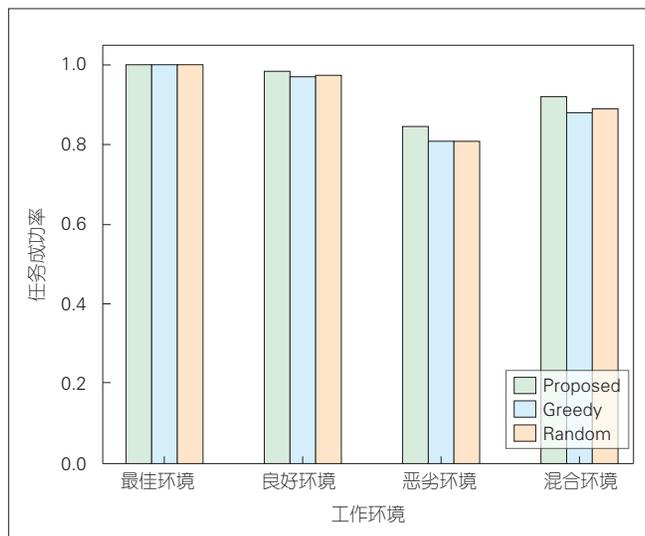
图7比较了不同算法的可靠性性能,其中,任务量为100 Mbit。可以看出,除最佳环境外,在其他环境下所提算法的任务成功率均高于其他两种算法。



▲图5 不同计算范式的时延性能比较



▲图6 不同算法时延性能比较



▲图7 不同算法可靠性性能比较

这是因为 Random 和 Greedy 算法在选择下一跳节点时,均未考虑节点的故障概率,因此可靠性性能不如所提算法。

3 结束语

本文面向分布式 LEO 集群,提出了分布式端到端信息处理技术。首先我们构建 TEG 将 LEO 集群动态拓扑稳定化,随后构建端到端信息处理理论模型并提出分布式业务调度算法。该算法通过综合考虑计算资源、通信资源、至目标节点跳数、节点故障率多维信息来选取下一跳节点,并逐步完成数据的传输与计算。仿真结果表明,所提分布式业务调度技术以牺牲较小时延为代价,有效地提升了业务的执行成功率。

致谢

本研究得到西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室程文驰老师的帮助,谨致谢意!

参考文献

- [1] 王艳峰,谷林海,刘鸿鹏.低轨卫星移动通信现状与未来发展[J].通信技术,2020,53(10):2447-2453. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0802.2020.10.014
- [2] BRAVHAR K, MARTINS V, SANTOS L, et al. BRAVE NG-MEDIUM FPGA reconfiguration

- through SpaceWire: example use case and performance analysis [C]//2018 NASA/ESA conference on adaptive hardware and systems (AHS). Edinburgh, UK: IEEE, 2018: 135-141. DOI: 10.1109/AHS.2018.8541461
- [3] 郝玉龙,孙阳,李冰.基于云计算的卫星地面应用系统设计[J].计算机应用与软件,2012,29(4):216-219. DOI: 10.3969/j.issn.1000-386X.2012.04.061
- [4] 李红艳,张焱,张靖乾,等.基于时变图的天地一体化网络时间确定性路由算法与协议[J].通信学报,2020,41(10):116-129
- [5] ZHANG T, LI H Y, ZHANG S, et al. STAG-based QoS support routing strategy for multiple missions over the satellite networks [J]. IEEE transactions on communications, 2019, 67(10): 6912-6924. DOI: 10.1109/TCOMM.2019.2929757
- [6] LV Y, XING C, XU N, et al. Research of adaptive routing scheme for LEO network [C]//2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC). Chengdu, China: IEEE, 2019: 987-992. DOI: 10.1109/ICCC47050.2019.9064312
- [7] TANG Q Q, FEI Z S, LI B, et al. Computation offloading in LEO satellite networks with hybrid cloud and edge computing [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(11): 9164-9176. DOI:10.1109/JIOT.2021.3056569
- [8] SONG Z Y, HAO Y Y, LIU Y W, et al. Energy-efficient multi-access edge computing for terrestrial-satellite Internet of Things [J]. IEEE Internet of Things journal, 2021, 8(18): 14202-14218. DOI:10.1109/JIOT.2021.3068141
- [9] 任智源,侯向往,郭凯,等.分布式卫星云雾网络及时延与能耗策略[J].浙江大学学报(工学版),2018,52:1474-1481
- [10] 王元君.星地混合网络中的计算资源分配和负载均衡[D].北京:北京邮电大学,2020
- [11] 国晓博,任智源,程文驰,等.低轨卫星网络中业务图驱动的星间协作计算方案[J].天地一体化信息网络,2021,2(2):35-44
- [12] 何秀丽,任智源,史晨华,等.面向医疗大数据的云雾网络及其分布式计算方案[J].西安交通大学学报,2016,50(10):71-77. DOI: 10.7652/xjtub201610011
- [13] 马步云,马新策,黄松,等.WSN低功耗低时延路径式协同计算方法[J].无线电通信技术,2021,47(2):168-177
- [14] XUE R, YU H, CHENG Q L. Adaptive coded modulation based on continuous phase modulation for inter-satellite links of global navigation satellite systems [J]. IEEE access, 2018, 6: 20652-20662. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2825255
- [15] ARABNEJAD H, BARBOSA J G. List scheduling algorithm for heterogeneous systems by an optimistic cost table [J]. IEEE transac-

tions on parallel and distributed systems, 2014, 25(3): 682-694. DOI: 10.1109/TPDS.2013.57

- [16] WANG C, REN Z Y, CHENG W C, et al. Time-expanded graph-based dispersed computing policy for LEO space satellite computing [C]//2021 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Nanjing, China: IEEE, 2021: 1-6. DOI: 10.1109/WCNC49053.2021.9417247

作者简介



马步云,西安电子科技大学在读硕士研究生;主要研究领域为面向卫星网络、无人机网络、车载网络等高动态场景的多目标协同下的动态网络分布式计算。



任智源,西安电子科技大学副教授、博士生导师;主要研究领域为云计算、边缘计算、物联网、分散智能;已发表论文20余篇,申请国家发明专利40余项,获授权专利6项。



李赞,西安电子科技大学教授、博士生导师,教育部“长江学者特聘教授”,“中国青年科技奖”获得者;主要研究领域为突发通信、数字信号处理、无线通信系统。

卫星地面融合网络的窃听威胁 与物理层安全解决方案

Interception Threats and Physical Layer Security Solution of Integrated Satellite-Terrestrial Networks

韩帅/HAN Shuai¹, 李季蹊/LI Jixi¹, 李静涛/LI Jingtao²

(1. 哈尔滨工业大学, 中国 哈尔滨 150000;

2. 中国空间技术研究院, 中国 北京 100081)

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China;

2. China Academy of Space Technology, Beijing 100081, China)



摘要:分析了卫星地面融合网络(ISTN)中的现有安全架构与潜在的安全威胁。针对低轨卫星星座场景,以频发的窃听威胁作为研究重点;针对ISTN中的窃听威胁,提出了基于物理层安全(PLS)的解决方案;针对ISTN应用物理层安全解决方案所面临的相关信道、同频干扰、邻频干扰以及多用户多窃听者场景等挑战,提出了相应的解决方案。这对中国卫星互联网设施建设的落地具有重大的现实意义。

关键词:卫星地面融合网络;窃听威胁;物理层安全

Abstract: The existing security architecture and potential threats in the integrated satellite-terrestrial networks (ISTNs) are analyzed. Considering the Low Earth Orbit (LEO) satellite constellation scenario, the frequent interception threats are selected as the research focus. In view of the interception threat, solutions based on physical layer security (PLS) are proposed. The challenges of applying PLS to an ISTN, including correlated channels, co-channel interference, adjacent channel interference, and multi-user multi-eavesdropper scenarios are proposed, and the corresponding solutions to these challenges are then analyzed. This is of great practical significance to the construction of China's satellite Internet facilities.

Keywords: integrated satellite-terrestrial networks; interception threats; physical layer security

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105009

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210930.1238.002.html>

网络出版日期: 2021-09-30

收稿日期: 2021-08-16

由于卫星网络业务具有广播特性,数据会传递给一定范围内的多个接收者,包括合法用户以及非法用户,因此每个合法用户都会受到不同程度的安全和隐私威胁。工作中的卫星很难进行安全漏洞修补,因此我们需要预先对卫星地面融合网络(ISTN)可能面对的安全威胁进行

分类评估,并提出相应的安全方案以对抗潜在的安全威胁。

低轨(LEO)卫星星座在保证与地球同步轨道卫星同样的覆盖范围的前提下,大幅降低了通信的往返时延,是ISTN的重要组成部分。虽然单个LEO卫星仍然只能在短时间内可见,但这并不意味着其安全性得到了提高。因为对卫星星座所形成的在轨网络而言,星座中的每颗卫星都充当了其相邻卫星的路由中继,从而增

加了整个星座的安全风险。

1 ISTN的安全风险与现有安全架构

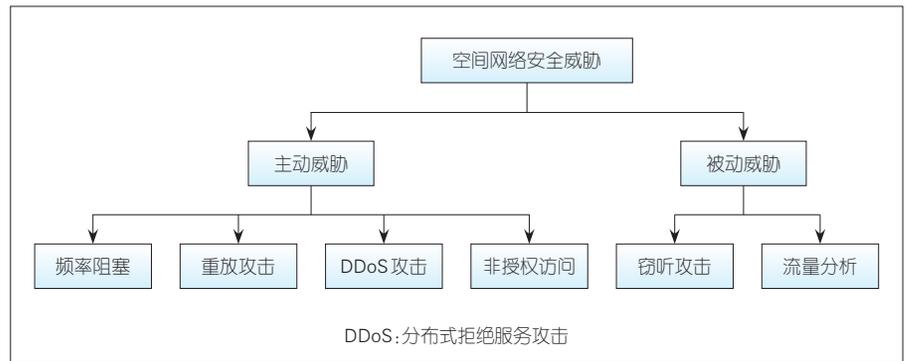
目前,关于ISTN安全架构的主流观点是基于2012年国际空间数据系统咨询委员会(CCSDS)提出的空间网络安全架构的。CCSDS将安全威胁分为两部分:主动威胁与被动威胁。主动威胁包括频率阻塞攻击、重放攻击、分布式拒绝服务攻击(DDoS)

基金项目:国家自然科学基金(61831002、61771169)

攻击以及非授权访问攻击,被动威胁包括窃听以及流量分析。这两种威胁均可以出现在卫星通信的空间段、地面段以及空间传输链路等处,其分类如图1所示。

在频率阻塞攻击中,通过在相同频率上发射大功率噪声,攻击者造成了严重的链路损耗,并阻断星地通信接入。重放攻击是指攻击者重复向卫星传输之前拦截并记录的指令。若重放指令未被拒绝,则卫星有可能重复执行操作,这会导致卫星偏离轨道或天线指向错误。不同于上述偏向物理层的安全威胁,DDoS攻击主要来自于网络层的瞬时海量访问攻击,它通过阻塞合法用户的接入达到拒绝服务的目的。非授权访问攻击是指未授权用户假冒合法用户对网络中的节点进行访问。在2003年,中国“鑫诺卫星”的转发器就曾遭到以大功率信号伪装成卫星地球站的境外势力的劫持,播出了非法信号,造成了极为恶劣的影响。在被动威胁中,攻击者可以在不被察觉的情况下,窃听卫星广播信号。此外,攻击者还可以通过分析卫星通信流量,侵害用户的隐私。

CCSDS的安全架构主要考虑3点:物理安全、信息安全(数据的机密性、完整性)以及传输安全(隐藏通信链路,防止被阻塞)。卫星通信管理部门可以根据通信任务的不同,在不同层协议中进行加密,以保证信息的保密性、完整性。在安全级别更高的通信任务中,可以应用物理层加密,以对抗流量分析等被动威胁。在LEO卫星星座与5G融合的场景下,海量接入用户与星间链路的的存在导致上述安全威胁中的窃听攻击变得更为频繁,因此,我们将主要讨论针对窃听攻击的解决方案。



▲图1 空间网络威胁分类

2 窃听威胁及其解决方案

2.1 物理层安全技术概述

卫星通信的广播特性决定了其信息极易被窃听,A.D.Wyner在文献[1]中建立了如图2所示的窃听信道模型。其中, X,Y,Z 分别为信源发射的信号和用户与窃听者接收的信号, h_m, h_e 分别为主信道与窃听信道的信道系数, γ_m, γ_e 分别表示用户与窃听者处的信干噪比。在文献[1]中,A.D.Wyner证明了当窃听链路信干噪比比主信道的信干噪比差时,保密容量 C_s 满足式(1):

$$C_s = [C_m - C_e]^+ = [\log_2(1 + \gamma_m) - \log_2(1 + \gamma_e)]^+ \quad (1)$$

当保密容量非负时,合法用户正常接收信号,而窃听者获得保密信息的概率为0。

显而易见,在A.D.Wyner所提的窃听信道模型中,当保密容量为0(即 $\gamma_m \leq \gamma_e$)时,系统不能保证完美的保密性。此时进行信息传输则很有可能被窃听者成功窃听,从而导致

保密信息泄露。而物理层安全技术正是通过已知的信道信息 h_m, h_e ,绕过密钥加密,通过预编码等物理层技术,最大化保密容量以保证安全传输。

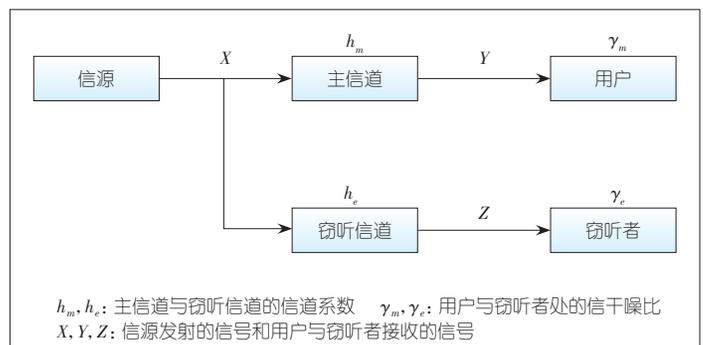
物理层安全是一种基于无线信道特性对信息传输进行加密的技术。作为一种全新的安全架构,物理层安全技术有许多优点:

(1)物理层安全利用无线信道的天然随机性和复杂性,可以实现“一次一密”保证安全通信。

(2)物理层安全技术主要用于物理层,无须考虑上层协议,可以作为传统加密方式的补充,以增强传统加密协议的综合性能。

(3)密钥加密有被量子计算破解的风险,而物理层安全技术则通过无线信道的随机性规避了这一问题。

可以预见,物理层安全技术将会作为CCSDS安全协议的补充,与地面核心网的安全架构进一步融合,形成



▲图2 窃听信道模型

全新的ISTN安全架构。目前,关于物理层安全的研究主要集中于资源分配^[2-4]、波束成形与人工噪声^[5-6]、用户节点选择与协作^[7-8]三大类技术。这三类技术的本质都是通过预编码、协作干扰等物理层手段,降低窃听者处的信干噪比或提高合法用户处的信干噪比,以保证非负的保密速率。目前相关的理论研究已经较为成熟。

目前,也有部分研究^[9-10]将物理层安全技术拓展至ISTN场景中,研究卫星与地面节点的预编码与协作调度方案。将地面的物理层安全技术从地面移植到卫星上并不简单,因为卫星信道更为复杂,衰减更为严重,且通信距离较远。利用信道的特性来保证安全传输,可能会面临诸多挑战。

(1) 相关信道

在ISTN场景中,合法用户的信道 h_m 与窃听信道 h_e 的相关性将远高于传统的地面场景,因此传统的物理层安全方法在卫星场景下有失效之虞。

(2) 同频干扰与邻频干扰

中国地面5G蜂窝通信主要工作于5G频谱n78频带中的3.4~3.6 GHz频段,但3.4~4.2 GHz频段已经被国际电信联盟分配给了卫星通信业务,共享的频谱将在3.4~3.6 GHz频段与3.6~4.2 GHz频段内引入严重的同频干扰和邻频干扰。这种干扰对依赖于无线信道特性的物理层安全技术也将是一个严重的打击。

(3) 多用户多窃听者场景

在ISTN场景中,卫星往往需要为数量远多于地面场景的用户提供服务,ISTN要应对的窃听者的数量也会大幅度增加。为对抗多窃听者空间分集导致的窃听信干噪比增益,我们需要在ISTN中应用更加灵活的物理层安全技术。

2.2 物理层安全在ISTN中遇到的挑战

2.2.1 相关信道

卫星和终端之间的距离较大,而窃听者与用户之间的距离可以忽略不计。因此,用户和窃听者之间信道的相关性较高。当窃听者靠近合法接收者时,即便已经采用了人工噪声和波束成形等传统物理层安全方案,卫星和用户通信的保密能力还会迅速降低。这使得我们不得不采取其他方法来扩大窃听信道与主信道之间的差异。

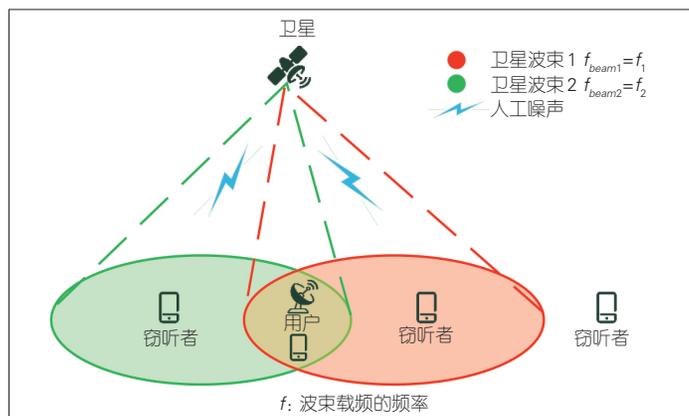
文献[11]引入了双频双波束的传输方案,以扩大主信道与保密信道的差异。如图3所示,用户由不同频率的两个波束提供服务,每个波束的功率都是单波束场景的一半。此外,我们还证明了这种双频双波束的传输方案存在最优的波束成形与人工噪声矢量,可以保证窃听者与用户间距离较小时的高保密速率。

文献[12]假设了一个带有近地中继的ISTN,如图4所示。如上文所述,即便是LEO卫星,其波束的覆盖范围也在200 km左右,窃听者与用户极有可能被同一波束覆盖,两者之间

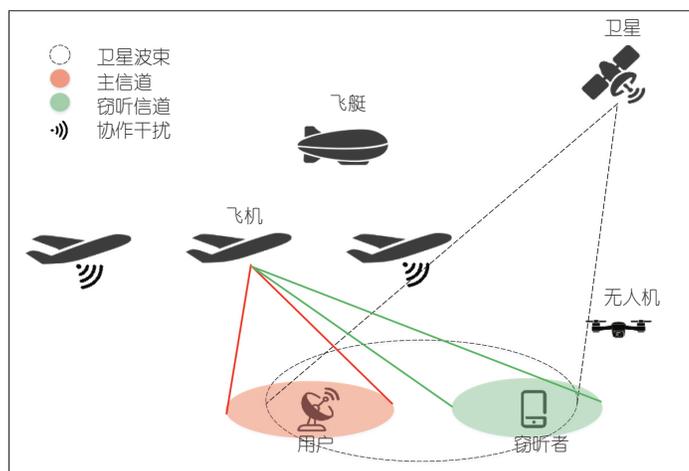
的信道相关性较高。近地中继(如飞机、飞艇等航空器)的波束覆盖范围较小,窃听者与用户信道会产生很大的差异,从而给物理层安全技术留下了发挥的空间。在此基础上,我们进一步研究了近地中继的中继选择、同时同频干扰中继与卫星之间的功率分配,以优化系统的保密性能。

2.2.2 同频干扰与邻频干扰

由于卫星通信的频谱资源利用不足,且地面频谱资源日益紧张,因此,将频谱共享方法纳入ISTN的研究范畴具有广阔的前景。近年来,认知卫星地面网络的混合架构被认为是提高频谱效率的主要方案之一。该技术在地面网络和卫星网络之间共享C波段(4~8 GHz)。频谱共享缓解了频谱稀缺问题,但又会面临着另外



▲图3 双频双波束物理层安全卫星地面融合网络



▲图4 近地同时同频干扰中继物理层安全系统

一个困扰,即卫星和地面系统之间的同频干扰与邻频干扰。这种卫星业务与5G系统间的频率冲突会导致星地链路信干噪比、保密容量等指标降低,从而影响通信质量。除此之外,在第3代合作伙伴计划(3GPP)R17规划中的卫星物联网也同样面临着由于海量接入而引发的干扰问题。在现行的干扰协调指南中,我们通常使用频率隔离、地理隔离,以及加装滤波器、屏蔽网等方案减轻干扰。本文中,基于物理层安全的解决方案,我们可以通过波束成形与预编码等技术充分利用干扰,恶化窃听者的信道条件,降低窃听者处的信干噪比。

在认知卫星地面网络架构中,我们一般认为卫星网络是主要网络,地面网络是辅助网络。辅助网络对主信道的干扰会明显降低系统性能,如图5所示。如果将辅助网络引入的干扰视为对窃听者的干扰,那么通过波束成形来减轻对合法用户的同频干扰,就可以提升系统的保密性能。

文献[13]研究了认知卫星地面网络架构中地面基站的波束成形方法,在满足主要网络(卫星网络)的保密速率约束以及辅助网络(地面网络)的通信速率约束条件的同时,最小化地面基站上的发射功率。在其基础上,文献[14]在多地面基站的场景下进一步考虑了整个系统的能效。在迫零(ZF)波束成形之外,该文献还考虑了添加人工噪声以增强系统的物理层安全的方法。

在3GPP的规划中,毫米波波束也将成为地面和卫星网络的共享波段。在毫米波信道下,部分研究着眼于卫星与地面网络,并关注波束成形方案。文献[15-16]研究了一种协作安全传输波束成形方案,通过卫星处的自适应波束成形、人工噪声以及地面基站处的波束成形的协作实现安全

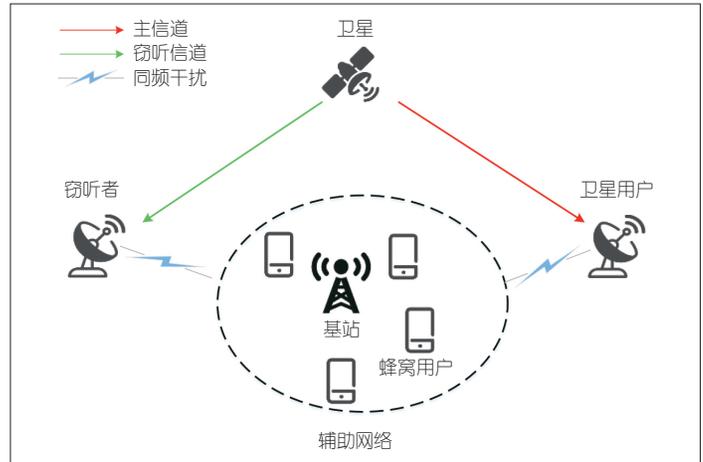
传输。

如果考虑多卫星的场景,那么就可以从另一角度——多卫星调度,来考虑频谱共享下的ISTN的物理层安全。文献[17]讨论了多卫星轮流访问共享频谱的轮询卫星调度(RSS)与多卫星共同访问共享频谱的多卫星调度(MSS),如图6所示。文献[17]分析了MSS方案的安全性由拦截概率和中断概率来表征。面对系统保密性能过剩的问题,我们可以通过增减卫星数量来达到安全可靠的折衷。

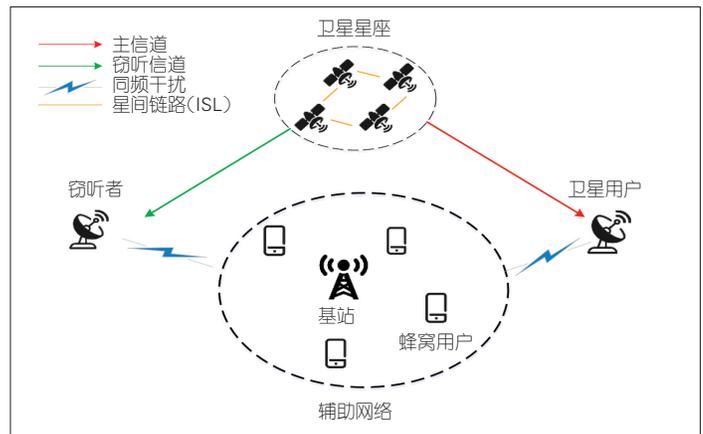
2.2.3 多用户多窃听者场景

随着卫星的能力变得越来越强大,可服务的用户密度也在不断增大,这使得一个卫星波束中通常存在多个用户或窃听者。目前,多用户场景已经成为卫星地面通信网络常用

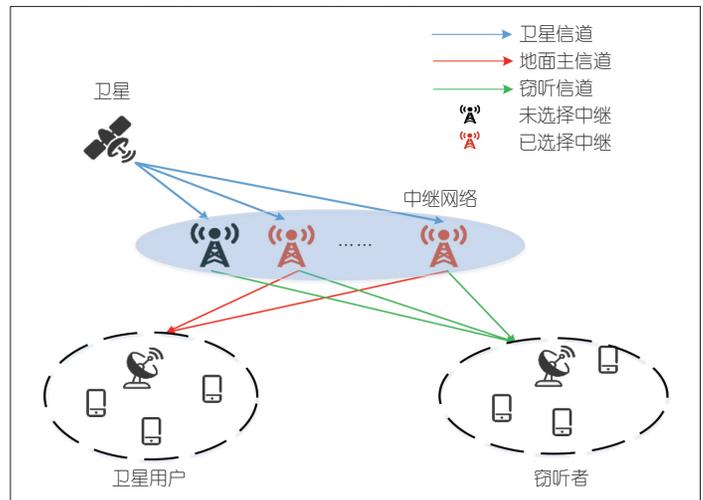
的场景之一,如图7所示。与上述情况考虑的单用户单窃听者场景不同,多用户场景由于通信链路的增加,所面临的窃听风险也会不断增大。与此同时,多用户场景的空间分集也为



▲图5 认知卫星地面网络物理层安全模型



▲图6 多卫星调度频谱共享物理层安全模型



▲图7 卫星地面融合网络多用户多窃听者场景

从物理层安全角度提高系统的安全性提供了新的思路。

在多用户 ISTN 中,文献[18]研究了多用户协作与调度对物理层安全的增强。在混合卫星地面中继网络(HSTRN)中,其用户与中继均可以通过最大化端到端保密容量等类似的方法进行选择,以增强物理层安全性,从而逐渐成为最常用的架构之一。文献[19]推导了 HSTRN 中使用不同中继选择方法在放大转发与解码转发协议下的保密中断概率(SOP)。文献[20]分析了在放大转发(AF)和解码转发(DF)中继协议下具有多天线卫星的下行链路多用户多中继 HSTRN 的保密性能,提出了最佳用户中继对选择准则,以期使 HSTRN 系统的 SOP 最小化。

3 结束语

卫星地面融合网络是中国通信网络基础设施体系建设的重大需求。研究 ISTN 场景下面临的窃听威胁与解决方案,将驱动中国天地一体化信息系统的广泛应用。本文中,我们分析了 ISTN 在 LEO 卫星场景下的安全威胁与相应的解决方案,对中国卫星互联网设施建设的落地具有重大的现实意义。

致谢

感谢中国空间技术研究院和中国科学院微小卫星创新研究院对本研究的帮助。

参考文献

- [1] WYNER A D. The wire-tap channel [J]. Bell system technical journal, 1975, 54(8): 1355-1387. DOI: 10.1002/j. 1538-7305.1975.tb02040.x
- [2] LEE J H. Optimal power allocation for physical layer security in multi-hop DF relay networks [J]. IEEE transactions on wireless communications, 2016, 15(1): 28-38. DOI: 10.1109/TWC.2015.2466091

- [3] WANG X W, TAO M X, MO J H, et al. Power and subcarrier allocation for physical-layer security in OFDMA-based broadband wireless networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2011, 6(3): 693-702. DOI:10.1109/TIFS.2011.2159206
- [4] WANG J H, HUANG Y M, JIN S, et al. Resource management for device-to-device communication: a physical layer security perspective [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2018, 36(4): 946-960. DOI: 10.1109/JSAC.2018.2825484
- [5] ZHANG W, CHEN J, KUO Y H, et al. Artificial-noise-aided optimal beamforming in layered physical layer security [J]. IEEE communications letters, 2019, 23(1): 72-75. DOI:10.1109/LCOMM.2018.2881182
- [6] WANG W, TEH K C, LI K H. Artificial noise aided physical layer security in multi-antenna small-cell networks [J]. IEEE transactions on information forensics and security, 2017, 12(6): 1470-1482. DOI:10.1109/TIFS.2017.2663336
- [7] YAN P S, ZOU Y L, ZHU J. Energy-aware multiuser scheduling for physical-layer security in energy-harvesting underlay cognitive radio systems [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2018, 67(3): 2084-2096. DOI: 10.1109/TVT.2017.2725989
- [8] ZOU Y L, WANG X B, SHEN W M. Physical-layer security with multiuser scheduling in cognitive radio networks [J]. IEEE transactions on communications, 2013, 61(12): 5103-5113. DOI:10.1109/TCOMM.2013.111213.130235
- [9] 肖叶秋, 祝幸辉, 赵双睿, 等. 卫星通信系统的物理层安全性能分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2021, 48(3): 163-169. DOI: 10.19665/j. issn1001-2400.2021.03.021
- [10] 顾宏伟, 林志, 林敏, 等. 卫星通信下行链路鲁棒安全波束成形设计 [J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43: 1361-1370
- [11] WANG P R, NI Z Y, JIANG C X, et al. Dual-beam dual-frequency secure transmission for downlink satellite communication systems [C]// 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019: 1-6. DOI:10.1109/GCWkshps45667.2019.9024580
- [12] LI J T, HAN S, TAI X X, et al. Physical layer security enhancement for satellite communication among similar channels: relay selection and power allocation [J]. IEEE systems journal, 2020, 14(1): 433-444. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2921306
- [13] LU W X, AN K, YAN X J, et al. Power-efficient secure beamforming in cognitive satellite-terrestrial networks [C]//2019 27th European Signal Processing Conference (EUSIPCO). A Coruna, Spain: IEEE, 2019. DOI: 10.23919/eusipco.2019.8903182
- [14] LU W X, LIANG T, AN K, et al. Secure beamforming and artificial noise algorithms in cognitive satellite-terrestrial networks with multiple eavesdroppers [J]. IEEE access, 2018, 6: 65760-65771. DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2878415
- [15] DU J, JIANG C X, ZHANG H J, et al. Secure satellite-terrestrial transmission over incumbent terrestrial networks via cooperative beamforming [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2018, 36(7): 1367-1382. DOI:10.1109/JSAC.2018.2824623
- [16] LIN M, LIN Z, ZHU W P, et al. Joint beamforming for secure communication in cognitive satellite terrestrial networks [J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2018, 36(5): 1017-1029. DOI:10.1109/JSAC.2018.2832819
- [17] DING X J, ZHANG G X, QU D X, et al. Security-reliability tradeoff analysis of spectrum-sharing aided satellite-terrestrial networks [C]// 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Waikoloa, HI, USA: IEEE, 2019: 1-6. DOI:10.1109/GCWkshps45667.2019.9024465
- [18] GUO K F, LIN M, ZHANG B N, et al. Secrecy performance of satellite wiretap channels with multi-user opportunistic scheduling [J]. IEEE wireless communications letters, 2018, 7(6): 1054-1057. DOI: 10.1109/LWC.2018.2859385
- [19] BANKEY V, UPADHYAY P K. Secrecy outage analysis of hybrid satellite-terrestrial relay networks with opportunistic relaying schemes [C]//2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2017: 1-5. DOI: 10.1109/VTCSpring.2017.8108272
- [20] BANKEY V, UPADHYAY P K. Physical layer security of multiuser multirelay hybrid satellite-terrestrial relay networks [J]. IEEE transactions on vehicular technology, 2019, 68(3): 2488-2501. DOI:10.1109/TVT.2019.2893366

作者简介



韩帅, 哈尔滨工业大学教授; 主要研究方向为无线信号处理、MIMO、非正交多址接入和卫星定位导航及对抗等; 近年来先后主持了国家自然科学基金青年项目、国家自然科学基金面上项目、中央高校基本科研业务费重大专项资助项目、中国空间技术研究院创新基金项目等国家及省部级科研项目 20 余项; 获黑龙江省科技进步二等奖 2 项; 发表论文 100 余篇, 获授权发明专利 40 项。



李季溪, 哈尔滨工业大学在读硕士研究生; 主要研究方向为物理层安全与空天地通信网络。



李静涛, 中国空间技术研究院通信与导航卫星总体部研究员; 主要研究方向为无线通信与通信卫星系统设计。



大规模低轨星座卫星通信网 发展展望

Development Prospect of Mega Low Earth Orbit Constellation Satellite Communication Networks

孙智立 /SUN Zhili, 李天儒 /LI Tianru
(萨里大学, 英国 萨里郡 吉尔福德 GU2 7XH)
(University of Surrey, Guildford Surrey GU2 7XH, UK)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105010
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20210927.2158.002.html>

网络出版日期: 2021-09-28
收稿日期: 2021-08-15

摘要: 卫星通信网络系统将成为未来全球网络的重要组成部分。现代卫星制造技术、发射技术和网络技术促使大规模低轨星座通信网络成为现实。探讨了未来大规模低轨星座卫星通信网的研究和发展, 包括卫星服务和应用、卫星通信的演进与技术挑战、用户对服务质量(QoS)的要求、5G 标准用例、5G 部署场景。最后展望了基于大规模低轨星座卫星通信网络在未来 6G 发展中的作用。

关键词: 卫星通信网络; 低轨卫星; 卫星应用; 地球静止轨道卫星; 低轨星座; 服务质量; 5G; 6G

Abstract: Satellite communication network system will become an important part of the global network in the future. Modern satellite manufacturing technology, launch technology, and network technology have made mega Low Earth Orbit (LEO) constellation communication networks a reality. The research and development of mega LEO constellation satellite communication networks in the future, including satellite services and applications, the evolution and technical challenges of satellite communications, user requirements for quality of service (QoS), 5G standard use cases, and 5G deployment scenarios, are discussed. Finally, the role of mega LEO constellation satellite communication networks in the future development of 6G is highlighted.

Keywords: satellite communication network; Low Earth Orbit satellite; satellite application; geostationary earth orbit satellite; Low Earth Orbit constellation; quality of service; 5G; 6G

1 卫星通信网络的发展及优势

自 1957 年第 1 颗人造地球卫星发射以来, 人们一直都在探索卫星和空间的应用。卫星通信和卫星广播是卫星应用的最好范例。在卫星的帮助下, 人们可以把更多的应用和服务送到世界的各个角落。卫星网络可以提供全球覆盖, 已成为地面网络的补充和全球网络不可或缺的重要组成部分。最早的卫星通信都是基于地球静止轨道(GEO)的。随着科学技术的发展, 特别是卫星制造、移动通信、电子工程、卫星发射、互联网技术的

发展, 中轨(MEO)和低轨(LEO)卫星系统开始迅猛发展。大规模 LEO 星座卫星通信网络的发展和应用迎来了新契机^[1-2]。

2 卫星服务和应用

卫星网络可以提供广泛的服务和应用(见图 1)。这些应用包括如下几个方面:

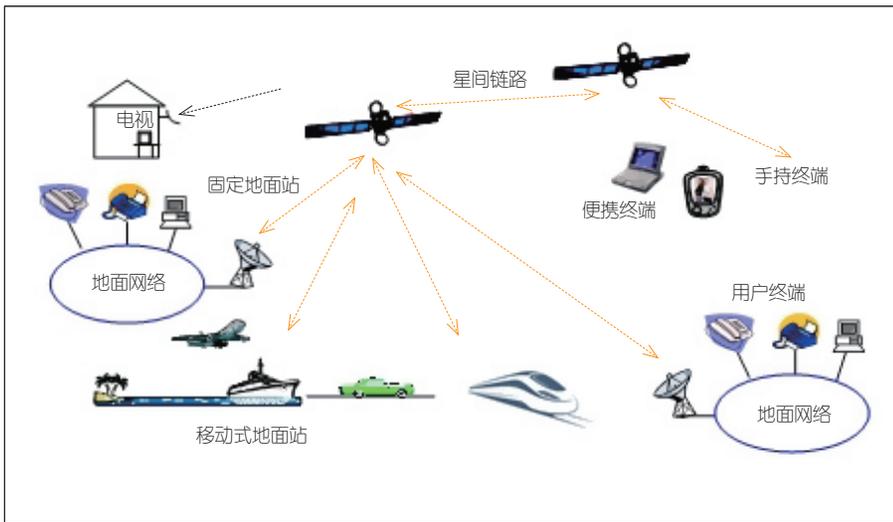
- 边远地区乡村的远程商业和住宅服务;
- 偏远山区、沙漠和岛屿网络服务;
- 智能交通系统和车辆通信连接

服务;

- 航海和船运通信服务;
- 航空航天飞行器和民航服务;
- 工业物联网、农业自动化、海上风电、海上钻井平台等应用;
- 紧急服务(救护车、海岸救援、山区救援等);
- 政府及国防应用。

3 卫星通信技术的演进

卫星通信技术的发展主要包括 3 个阶段。(1) 基础技术的发展。在这一阶段, 单极化 6/4 GHz 波束提供全球波束覆盖, 双极化波束整形基于



▲图1 卫星服务和应用^[1-2]

16/14 GHz 可提供多点波束和转发器波束跳跃以及星上交换服务。星间链路、光通信技术和 30/20 GHz 的应用使得高通量全球卫星网络成为现实。(2) 星上技术的发展。这一阶段经历了分频交换、分时交换、星上信号处理、星上数据包交换以及星上路由和星间链路的发展。其中,星间链路的发展也推动了 LEO/MEO 星座卫星网络的发展。(3) 网络服务和应用的发展。这一阶段从国际长途电话和卫星广播开始,然后经历国内长途电话和卫星服务、专用网络、航空地面移动服务、直接数字卫星广播、多媒体互联网宽带服务的发展,最终到现在的 4G/5G 和未来 6G 网络的发展。

4 卫星组网的技术挑战

卫星通信网络在以下几个方面仍面临巨大技术挑战:

(1) 传播时延大。虽然无线电波和光波在真空中均能以 3×10^8 m/s 的速度传播,但是较大的卫星通信距离使得传播时延远大于地面网络。

(2) 带宽有限。能够用于卫星通信的频谱资源比较有限。同时卫星产生的波束远大于地面无线网络,使得频谱的利用率远不如地面无线网络。

这将直接影响通信的容量。

(3) 传输错误多。由于传输距离和链路信道会受到各种干扰,传输数据的误码率也大于地面网络。

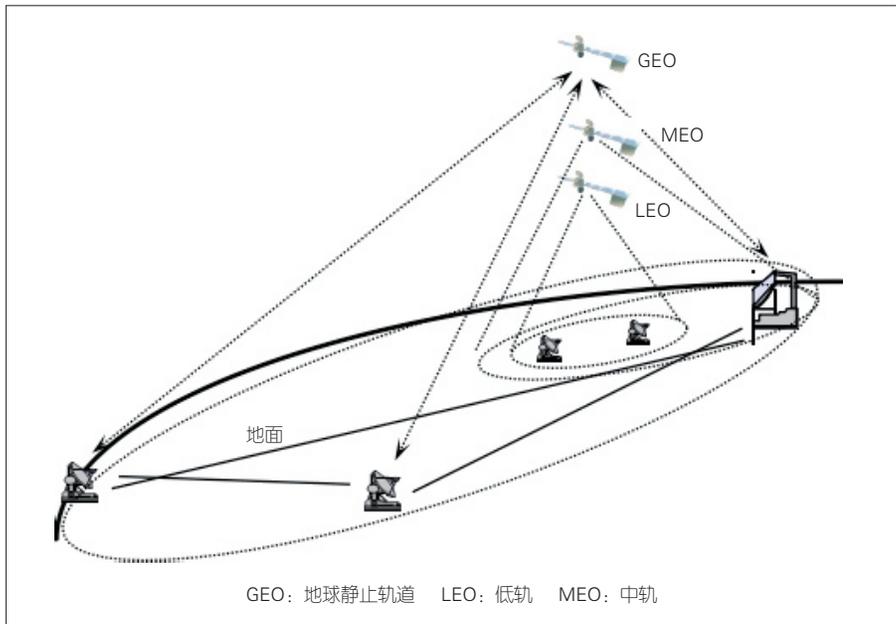
(4) 传输功率受限。卫星主要靠

太阳能来供电,同时要和其他卫星及地面无线网络进行协调以避免产生干扰。因此,传输功率就会受到很大限制,数据的传输速率也会受到影响。

需要注意的是,在引入 LEO 卫星网络时,要做好卫星数量和覆盖范围的权衡,如图 2 所示。对卫星网络进行动态管理可降低卫星网络传输成本,有利于满足网络服务质量(QoS)的要求。

5 卫星网络 QoS

网络 QoS 以用户为中心。目前,QoS 的类别模型已经由国际电联明确提出^[3],如图 3 所示。可以看出,QoS 的类别模型共有 8 个。其中,有的服务可以容忍传输错误,如语言视频交互、语言视频信息、语言视频流媒体和传真;有的服务则不能容忍传输错



▲图2 卫星网络系统覆盖范围示意图^[1-2]

能容忍传输错误	语言视频交互	语言视频信息	语言视频流媒体	传真
不能容忍传输错误	指令和控制	电子交易和电子邮件	信息文件下载	后台处理
	交互 (时延远小于 1 s)	反应 (时延约为 2 s)	及时 (时延约为 10 s)	非紧急 (时延远大于 10 s)

▲图3 以用户为中心的服务质量类别模型^[3]

误,如指令和控制(远程交互和游戏操作)、电子交易和电子邮件、信息文件下载、后台处理。

在5G标准的制定过程中,第3代合作伙伴计划(3GPP)为基于GEO、MEO或LEO集成基础设施的卫星接入网络制定了具体的QoS参数。这些参数都是与传播时延有关的,如表1所示^[4]。

6 非地面网络 (NTN) 用例

NTN泛指除了地面网络的所有网络,包括卫星网络和高空平台(HAP)。3GPP为卫星网络定义了12个用例,并在相关的技术报告中给出了详细说明^[4]。这12个用例具体为:地面和卫星网络之间的漫游、带有卫星覆盖的广播和组播、具有卫星网络的物联网(IoT)、临时使用卫星组件、最佳路由或卫星转向、卫星跨境业务连续性、全球卫星覆盖、通过5G卫星接入网间接连接、新无线接入网和5G核心网之间的5G固定回传、5G移动平台回传、5G与场地设备的连接、远程服务中心到海上风电场的卫星连接。

7 NTN 部署场景

3GPP和欧洲电信标准协会(ETSI)对NTN部署场景进行了深入研究,并提出了具体的部署场景^[5-6]。

(1)平台轨道和高度。这一场景包括平台轨道类型(如GEO、非GEO)及其高度。其中,平台可以是卫星,也可以是其他高空平台。

(2)平台和用户设备之间的载波频率。该场景涉及0.5~100GHz的

频率。

(3)波束模式。这里的波束模式是指波束覆盖模式。它是频谱复用和容量计算的重要参数。

(4)接入方式。接入方式可以是频分双工(FDD),也可以是时分双工(TDD)。

(5)信道带宽(下行链路和上行链路)。该场景涉及信道下行链路和上行链路的可用带宽。使用何种带宽取决于所使用的载波频率。出于评估目的,我们主要考虑以下两个因素:

- 对于在6GHz以上频段运行的卫星和空中网络,下行链路和上行链路的平均带宽高达800MHz;
- 对于在6GHz以下频段运行的卫星和空中网络,下行链路和上行链路的平均带宽高达80MHz。

(6)非地面网络架构选项,具体包括:

- 卫星可以作为无线接入网在用户设备和5G基站(gNB)之间以透明的方式连接;
- 卫星可以具备5G基站的一些功能,并与用户设备相连接;
- 用户设备连接中继站时,卫星仅在中继站和5G基站之间以透明的方式连接;
- 用户设备连接中继站时,卫星可以具备5G基站的一些功能并与中继站相连接。

(7)终端类型。用于评估目的时,可以考虑的终端类型包括:

- 发射功率设置为33dBm(2W),等效孔径直径为60cm(圆极化);
- 对于每个3GPP FDD功率等

级(PC),PC1的全向天线最大输出功率为33dBm(2W),PC2的为27dBm(0.5W),PC3的为23dBm(0.2W)。

(8)终端属性分布。终端属性分布可以设置为3类:

- 100%户外用户设备;
- 100%室内用户设备;
- 室内外混合用户设备分布。

(9)终端速度。该属性通常是指相对于卫星或空中平台上的发射器/接收器的速度,具体包括:

- 高速/低速用户设备;
- 高速/低速平台;
- 出于评估目的,终端速度最大值可以为1000km/h(例如飞机),或者500km/h(例如高速列车)。

8 系统容量建模的考虑

在进行系统容量建模时,我们应用流量工程原理从3个方面来考虑。

(1)用户流量。这里的用户流量主要是指用户设备的数量和每个终端产生的峰值流量(如500Mbit/s)。(2)网关站数量与容量,以及网络架构(包括卫星数量、每颗卫星的点波束数量、每个点波束的容量)。(3)流量控制和网络资源管理(用以满足QoS要求,并有效利用网络资源)。总的来说,这些考虑应包括:

- 需要明确系统容量定义和流量衡量标准;
- 明确说明网络架构;
- 精心设计流量控制和网络资源管理的算法和方法;
- 开发相关系统的规划、性能评估、操作和维护问题的解决方案。

9 面向2030年的卫星网络(6G)

2020年,5G移动网络标准的制定已经完成,5G网络的部署在全球范围内已经展开。未来研究的方向已经

▼表1 用户设备到卫星的传播时延^[4]

卫星类型	用户设备到卫星的传播时延/ms		单程最大传播时延/ms
	最小值	最大值	
LEO	3	15	30
MEO	27	43	90
GEO	120	140	280

GEO: 地球静止轨道 LEO: 低轨 MEO: 中轨

集中到面向 2030 年的网络技术。相对于 5G, 这个新的网络研究方向通常被称为 6G。很多大学、研究机构、公司以及标准化组织都开始了面向 6G 的研究和探索。其中, 国际电信联盟 (ITU) 和电气与电子工程师学会 (IEEE) 都已经取得一些显著的进展^[7-9]。表 2 给出了 5G 和 6G 的关键绩效指标的对比。

10 结束语

卫星通信网络系统将成为未来全球网络以及 5G 和 6G 的重要组成部分。现代卫星制造技术、发射技术、电子技术、网络技术的发展使得大规模 LEO 星座通信网络成为现实。大规模 LEO 星座通信网络既能与地面网络形成互补, 也能与 GEO 卫星通信网络互补。在不远的将来, 大规模 LEO 星

座通信网络和未来的网络技术都将获得巨大发展, 网络信号全球无死角覆盖也将成为现实。

参考文献

- [1] MARAL G, BOUSQUET M, SUN Z. Satellite communications systems: systems, techniques and technology [M]. 6th ed. New Jersey: John Wiley & Son Ltd, 2020
- [2] SUN Z. Satellite networking [M]. 2nd ed. New Jersey: John Wiley & Son Ltd, 2014
- [3] ITU. Transmission systems and media, digital systems and networks, end-user multimedia QoS categories: ITU-T G.1010 [S]. 2001
- [4] 3GPP. Study on using satellite access in 5G: 3GPP TR 22.822 V16.0.0 [S]. 2018
- [5] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks: 3GPP TR 38.811 V15.4.0 [S]. 2020
- [6] 3GPP. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies: 3GPP TR 38.913 V16.0.0 [S]. 2020
- [7] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): 3GPP TR 38.821 V16.0.0 [S]. 2019

- [8] FG-NET-2030. Network 2030: a blueprint of technology, applications and market drivers towards the year 2030 and beyond [R]. 2019
- [9] IEEE. IEEE international network generations roadmap: 2021 Edition [EB/OL]. [2021-08-09]. <https://futurenetworks.ieee.org/roadmap/>

▼表 2 5G 和 6G 网络关键绩效指标对比

技术	关键绩效指标
5G	新服务和应用的推动者, 低时延 (1 ms), 网络速度 (10 Gbit/s), 关键技术包括切片、软件定义网络、网络功能虚拟化、自组织网络, 网络服务质量、网络安全和隐私, 具有视觉/音频和 3D 的媒体, 低轨卫星的数量从几个到数十个
6G	发展新互联网技术, 超低时延 (<1 ms)、及时和准时, 网络速度 (1 Tbit/s), 关键技术包括新 IP 和新交换/路由, 服务质量 (QoS)、网络安全和隐私, 全息图、远距离即时传输, 增强的新一代 IP, 全面整合地面网络和卫星网络, 低轨卫星的数量从几百个到数千个 (甚至数万个)

IP: 互联网协议

作者简介



孙智立, 英国萨里大学讲座教授; 在许多欧盟主导的卫星网络、下一代互联网科研、地面网与卫星集成等大型科研项目, 以及英国研究委员会和欧洲航天局的卫星互联网和安全的科研项目中担任首席研究员, 同时担任多个期刊的编委或

副主编; 主要研究领域为卫星通信和网络、移动自组织网络、物联网和工业物联网、未来互联网技术、网络安全、移动通信和移动操作系统; 发表论文 243 篇, 2005、2014 年先后出版专著《Satellite Networking-Principles and Protocols》第 1 版和第 2 版 (有中文译本), 2007 年出版专著《IP Networking over Next-Generation Satellite Systems》, 2009、2020 年先后出版专著《Satellite Communications Systems and Technologies》第 5 版和第 6 版。



李天儒, 英国萨里大学在读博士研究生; 研究领域包括物联网技术、边缘计算和卫星网络。

专题预告

《中兴通讯技术》2022 年专题计划

期次	专题名称	策划人
1	新型网络技术	中国联通研究院副院长 唐雄燕
2	自然语言预处理模型	中国工程院院士 郑纬民
3	智能超表面技术	中兴通讯技术预研总工 赵亚军 北京理工大学教授 费泽松
4	多频段协同通信	电子科技大学教授 李少谦
5	通信感知一体化	中国科学技术大学教授 卫国
6	网络内生安全	北京航空航天大学教授 刘建伟



未来网络可信通信技术

Trusted Communication Technologies for Future Networks

闫新成 /YAN Xincheng^{1,2}

周娜 /ZHOU Na^{1,2}

蒋志红 /JIANG Zhihong²

(1. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室, 中国 深圳 518057;

2. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057)

(1. State Key Laboratory of Mobile Network and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen 518057, China;

2. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105011

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20211009.1646.002.html>

网络出版日期: 2021-10-11

收稿日期: 2021-08-26

摘要: 可信通信技术是网络 5.0、6G 等未来网络的核心技术方向, 也是长期困扰学术界和产业界的关键安全问题。系统分析了未来网络新架构下的可信通信需求和现有技术方案的缺陷, 构造了一套可信通信技术体系, 并阐述了可信通信的基本原则。在此基础上明确了两种技术防御思路, 并在技术研究和产业化应用方面提出了相关建议。

关键词: 未来网络; 可信通信; 身份假冒

Abstract: Trusted communication technology is the core technology direction of future networks such as network 5.0 and 6G. It is also a key security problem that has plagued academia and industry for a long time. The requirements of trusted communication under the new network architecture in the future and the defects of existing technical schemes are systematically analyzed. A trusted communication technology system is constructed. The basic principles of trusted communication are introduced. On this basis, two technical defense ideas are defined, and relevant suggestions are put forward in technical research and industrial application.

Keywords: future network; trusted communication; identity spoofing

互联网协议 (IP) 地址是当前 IP 网络体系结构的核心, 拥有网络身份和路由位置两种属性^[1]。其中, 网络身份属性用来标识通信对象, 而路由位置属性则代表拓扑位置, 是路由寻址的基础。地址欺骗可能会造成非法访问服务、分布式拒绝服务 (DDoS) 攻击、事件难以追溯等一系列安全问题, 因而 IP 地址的安全性是构建可信网络的基础^[2-3]。攻击者通过伪造 IP 地址来隐藏自己的真实身份, 有时也会将报文引向非法位置。RFC 6959^[4] (互联网工程任务组发布的征求意见稿) 列举的 10 类攻击都与 IP 地址真实性相关。麻省理工学院的研究表明, 互联网中至少有半数以上的网络可以产生一种类型的 IP 地址伪造攻击^[5]。据 CAIDA 的统计, 互联网中平均每天有 3 万起伪造源地址的攻击事件发生^[6]。

IP 地址真实性是未来网络可信通信的核心要素, 而当前传统的 IP 网络体系并不具备对 IP 地址真实性验证的内在机制。解决 IP 地址的欺骗问题, 保障地址网络身份的唯一性以及路由位置的真实性, 并确保 IP 地址所标识的身份和位置信息在通信过程中不被篡改和伪造, 是未来网络可信通信所要解决的关键问题。

学术界对可信通信的研究相对较早。早在 2003 年, 以麻省理工学院为代表的学术团体就推出了下一代互联网的新架构 NewArch^[7], 明确了 IP 地址具有位置和身份的双重属性, 同时强调了对 IP 地址进行安全保障的必要性。清华大学吴建平院士针对新一代互联网体系提出需要保障互联网地址身份及其位置属性真实可信的观点^[8]。

产业界近年也掀起了可信通信的

热潮。国际移动通信 (IMT)-2030 (6G)、中国通信标准化协会 (CCSA) 等均开展了大量对未来网络安全方面的研究工作。中国网络 5.0 产业和技术创新联盟^[9]更是将 IP 网络的安全体系, 尤其是 IP 地址真实性保障, 作为未来网络内生安全的重要目标。

当前产业界缘何要兴起可信通信的热潮? 可信通信要解决什么问题? 当前方案存在哪些不足, 又该如何改进? 针对这些问题, 本文结合学术研究和产业应用, 阐述和分析了可信通信的产业驱动力, 提出了可信通信的必要条件和基本策略, 对可信通信的主要技术方向进行了对比分析, 并给出了技术应用建议。

1 未来网络可信通信需求和挑战

未来网络具备泛连接、广覆盖和

高可靠的网络能力，深度融合了5G、云计算、边缘计算、大数据、人工智能、卫星通信等一系列新兴技术，现阶段正飞速发展，将深入经济社会各个领域，为社会带来全方位、深层次的影响，并将引领我们步入一个高度互联、内生智能、万物感知的世界。然而，未来网络在提升业务应用价值、使能社会高度信息化的同时，也为利益驱动的攻击者创造了有利条件，为实施更大规模、更高强度的攻击提供了可能。

1.1 网络可信通信需要适应新的业务模式

新技术驱动智慧医疗、工业互联网、能源互联网、车联网、算网融合、天地一体化等多个场景持续发展与创新，并带来诸多新的业务特征。本节将重点分析这些业务特征给网络可信通信带来的需求和挑战。

- 泛在连接。网络连接模式从“人-人”互联向“物-物”互联以及“人-物”互联发展。泛在连接不仅包括连接数量的指数级增长和空天地海的广域覆盖，更重要的是，还包括无处不在的连接、算力的下沉和通信节点间的自主连接。车联网、传感器网络等新型业务模式，促使通信从单一客户端/服务器的请求服务模式向多元化的对等通信模式演变。当前服务器认证终端用户的方式不再普遍适用，可信通信架构需要进行重构。

- 网络开放。云计算、边缘计算、天地一体化都使得网络更加开放，需要在开放的物理环境下构建一个相对安全可信的逻辑网络。更重要的是，企业信息化和数字化转型打破了原有生产领域的封闭性。生产网络IP化、终端的智能化均使得生产领域面临域内、域间的双重威胁，因此不能仅仅关注来自办公领域的横向渗透。如何保障数字化

生产领域的域内安全，构建安全可信的内部通信网络，是企业数字化转型时需要重点考虑的安全问题。

- 海量终端。未来网络不仅要提升网络覆盖的广度，还要提升覆盖的连接密度。类型多样、数量庞大的终端将使得网络的攻击面进一步扩大。尤其是低功耗、低成本的弱终端，缺乏自我防护能力，存在漏洞修复困难问题，更易于被攻击者利用或假冒。因而网络需要增强对通信终端的控制力，尤其要增强对通信节点真实性的保障。

- 算力增强。伴随着算力提升，单位时间内的数据量也将持续增长，攻击者更容易获取攻击所需的算力。网络资产(尤其是一些高价值的资产)将更容易遭受到攻击，例如卫星节点遭受DDoS攻击。避免算力因素对通信节点假冒攻击的放大效应，提升对通信节点真实性的保障。

未来网络的安全挑战包括两个方面：一方面，随着网络承载的资产价值增大，攻击程度在加深，风险也随之变大；另一方面，业务模型的多样化使得通信模式发生改变，通信安全架构需要进行再设计。未来网络需要进行安全设计，以便在新业务应用场景中为新型网络体系架构赋予最基础而又有效的可信通信能力，为未来业务的持续创新和广泛应用提供必要条件。

1.2 未来网络需要在网络层构建可信通信技术

在传统网络中，由于网络缺乏安全设计，通信安全问题需要由应用层来解决。例如，在对身份的真实性进行验证时，由于网络身份缺乏唯一性和确定性表达，通常由应用层对用户身份进行验证。长此以往，人们甚至会认为，安全问题应该仅由应用层来解决。然而，应用层的“补丁式”防护，

不但效能低下，而且难以在未来网络的诸多新兴场景中应用。本节围绕身份真实性问题，对比分析了网络层IP地址真实性与应用层用户身份真实性的防护能力与效果，同时论述了在网络层构建可信通信技术的必要性。

(1) 网络层的身份真实性防护机制比用户层具有更高的系统效能。

图1展示了一个用户访问网络的典型模型，其中图的上半部分展示的是只进行应用身份真实性防护的情况。当前，大部分应用都会在向用户提供服务之前对用户身份进行验证，因而非法用户(黑色用户图标)如果不能通过身份验证，则无法访问该应用服务。但是，对用户身份进行验证是一项很复杂的工作，中间件和操作系统层通常不具备这项能力。例如，“永恒之蓝”^[10]之所以可以广泛传播，就是因为借助了Windows的445开放端口服务。同时，应用层虽然可以阻止非法用户的访问，却难以有效防范DDoS攻击。

图1的下半部分展示的是同时进行网络层身份真实性防护的情况。如果加入基本的网络准入机制，网络就会首先拒绝非法用户(黑色用户图标)的接入，可以有效减少非法用户对应用节点和其他网络节点的攻击。虽然网络准入不能替代应用层的身份验证，却可以极大地降低应用层遭受攻击的风险。

基于应用层的用户身份真实性防护机制，只能为单个服务提供保护，无法保障整个系统的安全；而基于网络层的身份真实性防护机制，却可以提供更低风险、更“干净”的通信环境。同时，网络身份的唯一性具有不可否认属性。不论是非法用户还是合法用户，在网络攻击发生后，均可以被溯源和审计，而应用层身份不具备普遍追溯的能力。因此，网络层的身份真

实性防护至少具备两个优势：为封闭网络提供准入机制，为开放网络提供溯源能力。

(2) 应用层的用户身份真实性防护机制难以在新的业务模型和通信模式下应用。

如图 2 上半部分所示，当前的工业互联网生产线上使用了控制器局域网（CAN）、以太网控制自动化技术（EtherCAT）等各种现场总线协议。接入到总线上的各通信节点，通常属于对等通信体，即按需临时分配主从节点。对等通信模式在越来越多的领域中得到应用，例如车联网、传感器网络等。此外，这种模式在云内容器间通信、5G 服务化架构（SBA）网络中也开始应用。

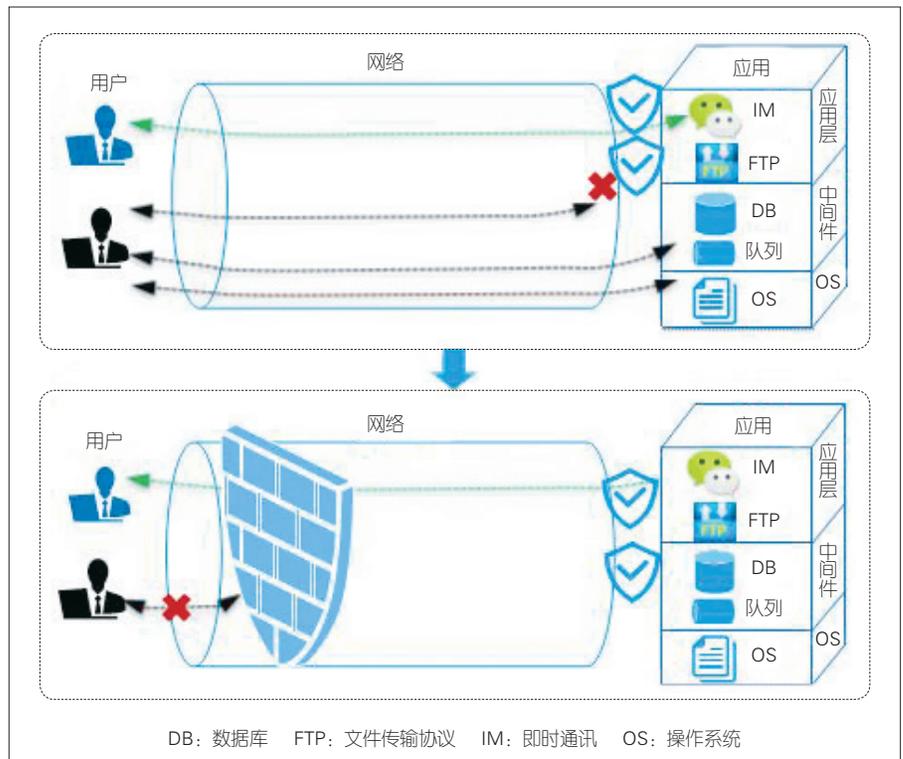
此外，工业领域也纷纷开始了网络的 IP 化改造。由图 2 可知，将总线抽象为 IP 网络交换机，对原有的业务模型和通信模式影响最小。在原有的业务模型下，工业节点可以即插即用，通信身份通常由总线进行标识。相应地，在 IP 改造后的通信模式下，新的身份通过网络来标识比通过应用来标识更具兼容性。在原有的通信模式下，工业节点可以对等访问。如果采用应用层身份来标识，就需要每个通信节点都启用应用层身份验证机制。这将大大增加系统改造的代价。

工业领域生产现场的安全性很大程度上依赖于物理隔离、技术与产业的封闭性。但在完成 IP 化改造后，网络风险将显著增大。攻击者可以利用一部手机或者其他智能终端，通过交换机或者 Wi-Fi，很容易进入现场网络，从而实施攻击。因此，生产领域的域内风险是工业数字化需要重点考虑的安全问题。在新的通信模式下，尤其是在物-物对等通信的场景下，基于网络层的可信通信更具兼容性和经济性，更加有利于工厂的产业数字

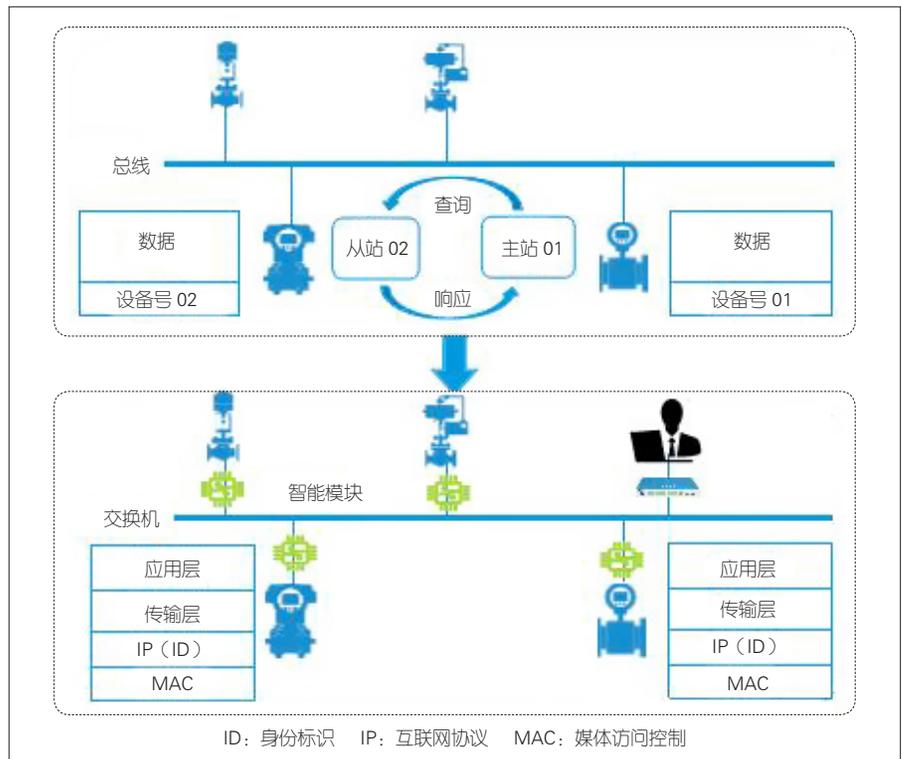
化改造。

互联网和通信网络的高速发展，

极大地提振了人们对社会信息化和数字化的信心。人们希望基于成熟的 IP



▲图 1 用户互联网场景下的防护模式对比



▲图 2 产业互联网场景下的防护模式对比

网络架构和网络生态来构建新型的基础设施,促使更多的社会资产和服务基于 IP 网络进行互联互通。由上述分析可知,网络的安全问题并不一定全都由新的业务模型和攻击手段引入。从图 2 中工业生产领域的例子可以看出,网络的开放性不仅包括基础设施共享和网络边界的模糊,还包括信息化和数字化本身。未来网络对安全的需求,从某种角度讲,不是因为网络变得复杂了,而是因为网络变得太简单了。

对于网络中新的使用者来讲,网络提供基本的安全保障和“接入即安全、通信即安全”的安全能力是生产领域快速实现数字化转型的一个必要条件。这种能力是传统网络体系所不具备的。未来网络应该构建网络的可信通信能力,帮助业务实现高效、便捷和安全的信息化和数字化改造。

2 IP 地址欺骗攻击分析

未来网络的可信通信应该首先聚焦于网络安全的原初问题,即如何解决 IP 地址的欺骗问题,以保障网络身份和位置的真实性。本节将重点分析基于身份和位置的攻击对网络的影响,以便为后续地址真实性技术方向的研究提供依据。表 1 列出了目前 IP 网络中存在的几种典型攻击,这些攻击都与 IP 地址欺骗相关^[3]。其中,身份假冒和地址假冒均可单独引发 IP 地址欺骗攻击。

为了避免被溯源和审计,或者达成某些攻击目的,攻击者往往将自己的网络身份和位置进行隐藏,假冒他人身份(或在非法的位置)进行攻击。网络地址在网络系统中有身份位置合一、身份位置分离两种典型表达。当前的网络系统采用身份位置合一的方式。IP 地址兼具身份位置双重含义。在大部分情况下,攻击者对报文中的

IP 地址进行伪造,既是对身份的假冒,也是对位置的假冒。

一些改进的网络系统采用了身份和位置分离的方式。通信端的身份标识与位置标识采用不同的报文字段来表达。身份和位置可以被独立假冒和攻击:

- 身份假冒。身份假冒缺少了身份真实性保障。通信双方难以获知通信对象的真假,很容易发生会话劫持或假冒,从而导致通信数据被进一步篡改和窃取。同时身份的假冒可以使攻击者避免追溯,也可以使攻击事件被否认。因而身份的真实性是可信通信重点保障的目标。

- 位置假冒。位置真实性保障是通信中很容易被忽略的因素。如果网络只保障身份真实性,而不保障位置真实性,位置假冒的报文就仍然可以在网络中传输。这会给通信节点的可用性带来极大风险。如图 3 所示,

Alice 发送报文给 Bob, 报文被攻击者截获。攻击者将报文源位置标识修改为攻击对象 Charlie 的位置信息。接收者 Bob 如果只验证 Alice 身份信息而忽略其位置信息,会将应答报文回传给 Charlie, 从而导致对 Charlie 的反射式攻击。

由此可见,通过单独伪造身份标识或位置标识均可以引发网络攻击。攻击者不仅可以假冒身份标识,伪造通信方身份并发送非法报文,窃取、伪造和破坏通信数据,还可以假冒和篡改位置标识信息,破坏网络服务。很显然,身份和位置两者同时被假冒的情形,也同样能够引发上述典型攻击。为了避免身份伪造形成的多种攻击,未来网络需要同时考虑对身份与位置的保护。

3 可信通信现有方案分析

基于 IP 地址欺骗的网络攻击给网

▼表 1 互联网协议地址欺骗攻击列表

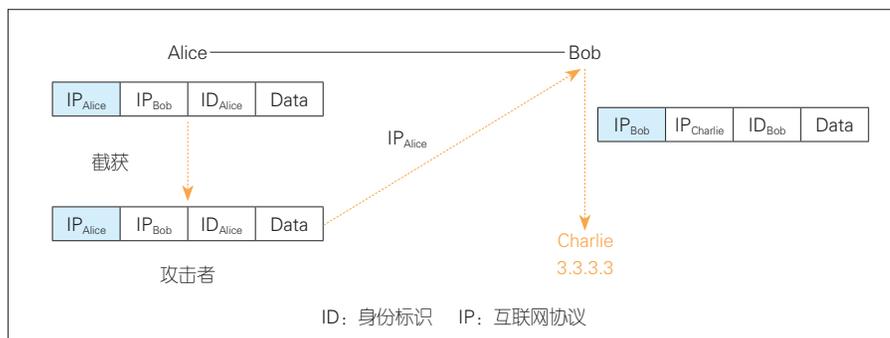
攻击类型	攻击实例	身份假冒	位置假冒
泛洪攻击	TCP SYN Flood、TCP SYN ACK Flood、TCP ACK Flood、TCP FIN Flood、TCP RST Flood、UDP Flood、ICMP Flood、DNS Flood、ARP Flood 等	有效	-
反射攻击	Smurf 攻击、Fraggle 攻击、DNS 放大攻击等	有效	有效
中间人攻击	会话劫持等	有效	-
单包攻击	LAND 攻击、RST 探测器等	有效	有效

ACK: 确认字符
ARP: 地址解析协议
DNS: 域名系统

FIN: 结束标志
ICMP: 互联网控制协议
LAND: 局域网拒绝服务

RST: 复位标志
SYN: 同步序列编号
TCP: 传输控制协议

UDP: 用户数据报协议



▲图 3 位置假冒导致反射攻击的案例

络安全带来了巨大挑战。业界在不断探索针对 IP 地址欺骗的防范机制，并针对不同的防护思路推出了多种技术方案。由于 IP 地址具有位置和身份的双重含义，因此这些方案也可以分为两大技术方向：对位置的真实性防护和对身份的真实性防护。同时，网络体系本身也在演进发展。除了现有的网络体系外，还存在改良型和革新型的网络体系。这些体系对 IP 地址的真实性保障，主要体现在对身份的真实性保障上，是在新的网络体系基础上开展的。按技术方向和网络体系，表 2 给出当前典型的地址可信技术方案。

可以看出，基于位置的真实性防护主要借助路由表来实现对源地址真实性的反向验证。我们将其称之为基于位置的访问控制技术。这种方式适应性较强，可以适应于各种以 IP 路由为基础的网络体系。为了实现身份真实性的防护，典型的方式是采用密码学技术。通过通告其他节点不可获知的私密信息（如基于密钥的签名）可证实本节点拥有的唯一身份。我们将其称为基于身份的可信验证技术。在身份真实性保障技术方案中，有基于当前 IP 体系进行增强的，也有基于身份位置分离架构设计的。革新型的网络体系方案涉及较大的体系架构调整，使之前对于 IP 地址的分析不完全适用。

表 3 给出了现有地址可信技术的对比。可以看出，虽然目前位置标识和身份标识均存在相应的防护技术，但都存在一定程度的不足。基于位置的访问控制技术虽然可以利用路由表和地址列表实现轻量化的位置真实性检查，但由于不对身份真实性进行保障，缺乏地址来源的合法性检查，并不能覆盖 IP 地址欺骗的所有场景。而基于身份的可信验证技术则普遍存在性能较低、兼容性差和不够系统化等

问题，难以广泛应用。单纯的身份假冒和位置假冒都可能造成 IP 地址欺骗攻击，因而如果只保障其中一个方面，则无法有效防范所有攻击。

4 可信通信的技术体系与关键技术

互联网地址体系不具备地址真实性验证机制。网络中存在的各种 IP 地

▼表 2 地址可信技术总览

技术方向	网络体系	研究思路	技术方案
IP 网络位置真实性	IP 网络体系	现有 IP 地址保持不变，借助位置、路由等信息验证源地址真实性	SAVA ^[11] 和 SAVI ^[12]
IP 网络身份真实性	传统 IP 网络体系（地址改造）	维持现有 IP 语义不变，在地址构造中加入自验证	CGA ^[13] TrueIP ^[14]
		使 IP 的身份与位置属性分离，增加身份标识；IP 只标识位置，并负责路由和转发	LISP ^[15]
	改良型 IP 体系（身份位置分离）	使 IP 的身份与位置属性分离，增加身份标识的自验证机制	HIP ^[16] New IP ^[17] MobilityFirst ^[18]
位置和身份真实性	革新型网络体系	现有 IP 体系不再存在，使用自验证的身份标识来构造全新地址体系	AIP ^[19] XIA ^[20]

AIP: 可问责互联网协议 IP: 互联网协议 SAVI: 源地址验证改进
 CGA: 加密生成地址 LISP: 定位器 / 标识符分离协议 XIA: 表达型互联网架构
 HIP: 主机标识协议 SAVA: 源地址验证体系结构

▼表 3 现有地址可信技术对比分析

技术方向	网络体系	技术方案	技术手段	技术缺陷
IP 网络位置真实性: 基于位置的访问控制技术	IP 网络体系	SAVA 和 SAVI	通过接入位置过滤、地址前缀过滤、自治域过滤实现源地址验证	缺乏身份真实性校验
IP 网络身份真实性: 基于身份的可信验证技术	传统 IP 网络（地址改造）	CGA	用公钥的哈希作为 IP 地址的后 64 位	系统性不足，性能低
		TrueIP	用 IP 地址作为公钥	兼容性差，性能低
		LISP	LISP 本身没有涉及安全机制，但一些安全机制如 CGA 等可用于 LISP 架构中	安全性缺失
	改良型 IP 体系（身份位置分离）	HIP	使身份位置分离，增加主机标识层，并将公钥作为身份标识；通过对称密钥对数据报文进行源身份验证	兼容性差，系统性不足
		New IP	使身份位置分离，采用临时标识符进行身份隐藏；接入路由器采用非对称密钥验证源主机身份，域间采用对称密钥进行验证	兼容性差，性能低
MobilityFirst	在名称 /GUID/NA 标识中，GUID 采用公钥哈希	性能低		
位置和身份真实性	革新型网络体系	AIP	地址结构为 AD:EID，其中 AD 与 EID 分别为责任域和主机对应的公钥	兼容性差
		XIA	基于 AIP 的思想，加入有向无环图机制	兼容性差

AD: 责任域 HIP: 主机标识协议 SAVA: 源地址验证体系结构
 AIP: 可问责互联网协议 IP: 互联网协议 SAVI: 源地址验证改进
 CGA: 加密生成地址 LISP: 定位器 / 标识符分离协议 XIA: 表达型互联网架构
 EID: 端点标识符 MAC: 媒体访问控制
 GUID: 通用唯一识别码 NA: 网络地址

址欺骗的攻击给互联网环境造成了极大危害。解决身份真实性问题是构建真实可信的互联网环境的基础和前提。在当前 IP 同时包含身份与位置属性的场景下，对身份的攻击往往从地址攻击中表现出来。在未来身份与位置分离的情况下，对身份的攻击可以表现为身份标识的欺骗和位置标识的欺骗。现有技术虽然针对身份标识和位置标识都采取了一定程度的保护机制，但并未彻底解决问题。

图 4 给出了可信通信的问题与技术路线。从互联网可信通信的安全问题、技术需求、防范机制来看，可信通信包含身份保护和位置保护两大技术路线。这两条技术路线同时又存在各自的技术缺陷。

4.1 技术体系和原则

如果要实现广泛应用，可信通信的技术方案应该是一套健全、完善的解决方案。该方案不仅能在网络标识保护过程中融入真实性保障，还可满足高性能系统需求。从目前的技术方案来看，这仍是一个长期而艰巨的挑战。基于对可信通信技术需求和方案的分析，我们先给出未来网络可信通信的基本原则。

(1) 可信通信有两个需求维度：身份真实性与位置真实性。这两个需求维度需要被同时满足，即无论采取何种技术方案，都需要对身份和位置同时进行防护。遗漏任何一项都会造成技术方案的不足。

(2) 可信通信有两类典型的技术方向：访问控制和密码学。两类技术与身份、位置等网络特性结合，各具优势。综合考虑性能、安全性、兼容性等因素，选择若干技术进行组合，可以有效地实现网络的可信通信。

图 5 给出了基于这一原则的可信通信矩阵。为了给未来网络提供完整

而又全面的保护，需要同时从身份和位置层面来考虑访问控制可信技术及密码学验证机制，以满足全方位安全可信保障需求。然而，当前的可信通信方案侧重于对位置的访问控制和对身份的密码学验证两个技术领域，忽略了对另外两个技术领域的探索。基于访问控制的身份验证技术，在与当前基于访问控制的位置验证技术结合后，既可以弥补当前访问控制技术的不足，又可以在一定程度替代基于密码学的身份验证技术。

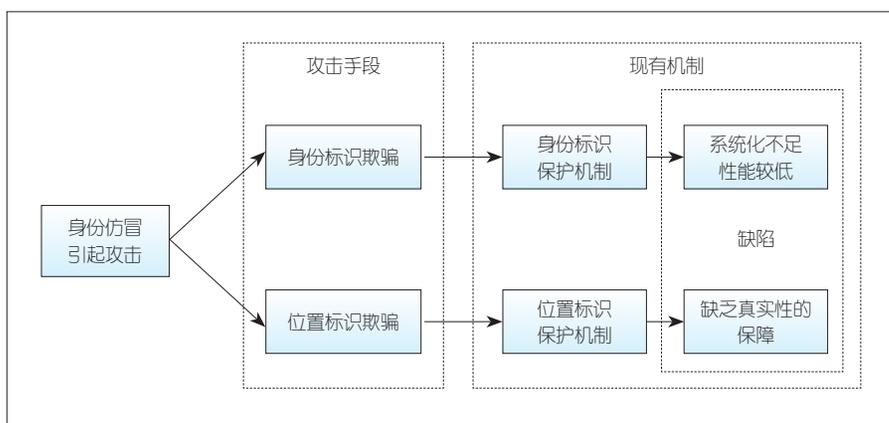
4.2 访问控制技术

通过检查并过滤 IP 报文的源位置标识或者源身份标识，基于访问控制的可信技术可以阻止携带假标识的非法报文通过。整个基于访问控制的可信技术体系包含三层技术框架：接

入网控制、域内网络控制和域间网络控制。构建多层、系统化的身份可信体系可以保障整个业务通信过程的合法性。

- 接入网验证可通过深度融合身份认证与地址分配功能，基于动态主机配置协议 (DHCP) Snooping 等来构建源信息合法性校验机制 (ID Filtering)，并增强接入设备中过滤表的真实有效性，以实现近源端防御，进而在数据报文的首跳节点扼制攻击的形成与传播。借助高可信的身份认证和轻量级的访问控制技术，可以实现身份和位置的双重保护。提供高效的源节点真实性验证机制可以解决现有技术中低性能和真实性缺失的问题。

- 域内验证采用地址过滤表方式。在同一管理域下的路由设备，可在设备上构建过滤表，并将路由前缀与设



▲图 4 可信通信的问题与技术路线



▲图 5 可信通信技术矩阵

备的入端口进行关联。源域的边缘路由器可以通过该过滤表对收到的报文进行前缀验证，从而防止主机假冒任意地址。域内验证与接入网验证结合能够实现完整的域内可信防护机制。

- 域间验证可以通过在边界路由器上构建一个验证规则表，将路由器的每个入口与一组有效的源地址块或者域信息相关联，以用于过滤伪造的报文。

4.3 密码学验证技术

针对身份与位置的密码学验证技术主要包括基于对称密钥的验证技术和基于非对称密钥的验证技术。

(1) 对称密钥方案

在基于对称密钥进行验证的方案中，通信双方通过密钥协商或预共享的方式生成系统的共享密钥。源端使用共享密钥生成验证码，同时验证端使用共享密钥验证源端身份。将对称密钥验证方案应用于端到端系统的多点验证时，借助报文路径上多个节点与源节点协商生成的对称秘钥，源主机在发送报文前会针对身份或位置产生校验码，在报文到达中间节点时对身份、位置进行可信验证。该方案无须改变 TCP/IP，与现有系统兼容，可以从不同层面增强系统的防御控制能力。首先，该方案可通过源域节点实现对源端的验证，并通过目的域对源端进行校验，可以全方位提供报文来源真实性保障；其次，该方案不仅对身份标识进行验证，还考虑了基于位置的密码学防护（IP Verification），从验证对象层面改善现有技术的不足，实现了最终应用或业务的全面保护。

(2) 非对称密钥方案

基于非对称密钥的验证技术利用公私钥管理技术，在转发面上通过私钥进行签名，同时通过公钥进行验签。该方案主要包括两类分支：基于数字证书机制和基于自认证的密钥管理机

制。类似于对称密钥方案，非对称密钥方案也拥有实现全系统的多点验证机制。该方案在报文中添加针对身份或位置的签名信息，由报文途经的多个节点对报文的发起端依次进行身份、位置验证，最终可实现近源防护、目的节点保护等多重安全保障，具备较好的系统性防御效果。

4.4 技术对比分析

一种理想的身份可信技术方案应尽可能优化以下几个特性。

(1) 身份或位置欺骗防御能力：鉴别伪造身份/位置（前缀）的能力，包括准确性、实时性等（还应结合追溯定位技术为审计追查提供基础）。

(2) 可部署性：针对当前网络基础设施应具备良好的兼容性，支持增量部署，为运营商提供部署激励。

(3) 开销：包括方案的存储开销、计算开销、带宽开销等，也包括对网络性能造成的影响。

根据以上 3 个特性，我们对“基于访问控制的可行”和“基于密码学的验证”两种攻击防御技术方案进行对比，如表 4 所示。

在身份攻击的防御能力方面，方案 1 从接入网、边界、域间 3 个层面分别对源地址、地址前缀、域 3 个粒度进行访问控制，粒度相对较粗，在某些情况下存在一些防御难题（如业务面地址的真实性不足等）；而方案 2 是一种直接确认源主机位置/身份标识所有权的方法，真实性程度高，防御准确性好。方案 1 和方案 2 都可部

署在第 1 跳接入路由器上，进行近源防护，实时性基本相同。方案 1 根据位置进行追踪，在移动性及多宿主的场景下，无法直接定位身份；而方案 2 可依赖密钥来关联信息，进而直接定位身份，追溯性较好。

从可部署性方面看，方案 1 无需扩展协议，只需对交换机、路由器进行少量软件升级即可；而方案 2 需要扩展地址和路由协议以及密码体系的支持，实际部署难度大。

从开销上看，方案 1 需要在接入和边界路由器上建立过滤规则表，并依据源报文中的字段进行过滤，不在源报文中增加新的字段，也不涉及复杂的运算，故开销较小；而方案 2 需要进行密钥管理，不仅要在报文中增加签名或校验码，还要在验证节点上进行加解密的运算，故系统开销较大。

总体来说，基于密码学验证机制的方案安全能力好，但部署难度和开销都较大；基于访问控制的方案可部署性好，开销也较小，但安全能力相对较弱。就目前来看，很少有哪一种方案或技术能够在各个方面都做得很好。安全能力与部署能力的矛盾始终是一个巨大的挑战。

5 技术应用建议

针对上文提出的技术原则和技术方向，基于访问控制和密码学验证两类技术的分析和比对，两类技术方向各有优劣，适用于不同场景。未来网络需要面临多样化的应用场景，不仅需要满足高带宽、超高吞吐、超低时

▼表 4 攻击防御技术对比分析

技术方案	防御能力			易部署性		资源开销	
	准确性	实时性	可追溯性	协议兼容性	计算开销	存储开销	带宽开销
方案 1: 访问控制技术	较好	好	较差	较好	小	小	小
方案 2: 密码学验证技术	好	好	好	较差	大	较大	较大

延的网络需求，还要考虑海量资源受限的弱终端接入。未来网络可信通信需要具备高效轻量化的可信验证和转发机制。但由于未来网络承载着高资产价值，因此也需要考虑高安全性的需求。本文中，我们在如下几个方面提出建议：

- 性能是未来网络大部分应用场景优先考虑的因素。优先选择深度融合身份认证与地址分配的基于访问控制技术，可以兼顾防御能力、易部署性和性能。

- 为了实现业务端到端安全可信通信，基于访问控制的可信技术往往需要实现全系统部署。因此，当应用场景需要全网进行防护但无法整网全面部署时，或者需要高级别安全保障时，可考虑基于密码学的验证机制。

- 对于基于密码学的两大类机制（非对称和对称方案），虽然对称算法需要借助控制面体系来辅助完成数据面的安全标识和密钥传递，但在路由转发层面的验证性能优势显著。结合网络安全策略的按需检验机制，可以构建灵活高效验证转发能力的通信体系，满足未来网络高吞吐高效传输演进需求。因此，对于基于密码学的验证机制而言，对称算法的方案更值得推荐。

- 基于访问控制的可信技术从是否属于该网络的合法信息方面来进行判断和控制。基于密码学的验证机制从身份真实性角度来判断和保障。两类技术方向分别解决不同场景的攻击问题。在需要系统性高级别安全保障的情形中，两类机制的融合可以实现全方位、全系统的安全防护。

6 结束语

未来网络可信通信技术通过在 IP 网络中构建可信的网络标识，建立以网络为核心的端到端的可信关系，实

现了域内域间的信任传递，不仅能确保网络标识可验证、可追溯、不可篡改，还可有效提升网络身份在端到端通信中的真实性交互能力，充分保障了业务和应用未来的持续发展。本文中，我们在全面分析身份假冒诱发成因及其形成的若干典型安全攻击的基础上，针对现有可信通信技术系统性的不足，从身份标识和位置标识的角度，结合不同技术方向的维度，深入分析了各技术方向的适应性，为未来网络架构的设计提出安全可信防护建议。

致谢

本研究得到中兴通讯股份有限公司谭斌、王继刚、黄兵、周继华、马彘、吴华强、彭少富等专家的帮助，谨致谢意！

参考文献

- [1] WANG J H, WANG Y, XU M W, et al. Separating identifier from locator with extended DNS [C]//2012 IEEE International Conference on Communications (ICC). Ottawa, ON, Canada: IEEE, 2012: 2747-2751. DOI:10.1109/icc.2012.6363725
- [2] 闫新成, 毛玉欣, 赵红勋. 5G 典型应用场景安全需求及安全防护对策 [J]. 中兴通讯技术, 2019, 25(4): 6-13. DOI: 10.12142/ZTETJ.201904002
- [3] 徐恪, 朱亮, 朱敏. 互联网地址安全体系与关键技术 [J]. 软件学报, 2014, 25(1): 78-97. DOI:10.13328/j.cnki.jos.004509
- [4] MCPHERSON D, BAKER F, HALPERN J. Source address validation improvement (SAVI) threat scope [R]. 2013
- [5] CAIDA. State of IP spoofing [EB/OL]. [2021-07-16]. <http://spoofer.cmand.org/summary.php>
- [6] CAIDA. CAIDA's annual report for 2018 [EB/OL]. (2019-03-20)[2021-07-16]. <https://www.caida.org/about/annualreports/2018/>
- [7] USC/ISI, MIT LCS, ICSI. NewArch project: future-generation Internet architecture [EB/OL]. [2021-07-16]. <http://www.isi.edu/newarch/>
- [8] WU J, WU Q, XU K. Research and exploration of next-generation Internet architecture [J]. Chinese journal of computers, 2008, 31(9): 1536-1548. DOI: 10.3724/SP.J.1016.2008.01536
- [9] 网络 5.0 产业和技术创新联盟. 下一代泛在全场景 IP 协议 [EB/OL]. [2021-07-16]. <http://www.network5.cn/>
- [10] Baidu. WannaCry [EB/OL]. [2021-07-16] <https://baike.baidu.com/item/WannaCry/20797421?fr=aladdin>
- [11] WU J, BI J, LI X, et al. A source address validation architecture (SAVA) testbed and deployment experience [R]. 2008
- [12] NORDMARK E, BAGNULO M, LEVY-ABEGNOLI E. FCFS SAVI: first-come, first-served

- source address validation improvement for locally assigned IPv6 addresses [R]. 2012
- [13] AURA T. Cryptographically generated addresses (CGA) [C]//Information Security, 6th International Conference. Bristol, UK: IETF, 2005
- [14] SCHRIDDE C, SMITH M, FREISLEBEN B. True-IP: prevention of IP spoofing attacks using identity-based cryptography [C]//Proceedings of the 2nd international conference on Security of information and networks. North Cyprus, Turkey: ACM, 2009. DOI:10.1145/1626195.1626229
- [15] FARINACCI D, FULLER V, MEYER D, et al. The Locator/ID Separation Protocol (LISP) [R]. 2013
- [16] IETF. Host identity protocol [EB/OL]. [2021-07-16]. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5201>
- [17] 网络 5.0 产业和技术创新联盟. 网络 5.0 技术白皮书 [R]. 2019
- [18] RAYCHAUDHURI D, NAGARAJA K, VENKATARAMANI A. MobilityFirst [J]. ACM SIGMOBILE mobile computing and communications review, 2012, 16(3): 2-13. DOI:10.1145/2412096.2412098
- [19] ANDERSEN D G, BALAKRISHNAN H, FEAMSTER N, et al. Accountable Internet protocol (aip) [C]//Proceedings of the ACM SIGCOMM 2008 conference on Data communication. Seattle, WA, USA: ACM, 2008: 339-350. DOI:10.1145/1402958.1402997
- [20] HAN D, ANAND A, DOGAR F, et al. XIA: efficient support for evolvable Internetworking [C]//The 9th USENIX Symposium on Networked Systems Design and Implementation (NSDI' 12). San Jose, CA, USA: ACM, 2012

作者简介



闫新成，中兴通讯股份有限公司网络安全首席系统架构专家、移动网络与移动多媒体技术国家重点实验室未来网络研究中心副主任，教授级高工；从事电信行业 20 年，曾主持国家科技重大专项 5G 安全课题，获得多项科技奖励，拥有专利 40 余项。



周娜，中兴通讯股份有限公司技术预研系统工程师；主要负责网络安全、无线通信安全和未来网络安全等技术研究工作。



蒋志红，中兴通讯股份有限公司技术预研系统工程师；主要研究方向为网络安全、5G 通信安全和未来网络可信通信。



未来卫星通信和 5G-NR 深度融合架构设计

Architecture Design for Tight Integration Between Future Satellite Communication and 5G-NR System

摘要: 卫星通信系统在技术和市场层面遇到发展瓶颈, 需要与地面蜂窝网络系统进行融合升级。系统分析了卫星通信系统和 5G 新空口 (5G-NR) 系统融合的架构设计, 包括单跳卫星融合架构、多跳卫星融合架构和卫星本地分流融合架构。认为未来卫星通信的无线电信号都将采取 5G-NR 规范方式, 同时卫星通信系统在架构和功能特征等方面也将逐渐向下一代无线接入网 (NG-RAN) 靠拢对齐和同步演进。

关键词: 卫星通信; 5G-NR; NG-RAN; 架构融合

Abstract: The satellite communication system has encountered development bottlenecks in terms of techniques and markets, and needs to be integrated and upgraded with the terrestrial cellular network system. The architecture design for the integration of satellite communication system and 5G new radio (5G-NR) system is systematically analyzed, including single-hop satellite integration architecture, multi-hop satellite integration architecture, and satellite local shunt integration architecture. It is considered that the radio signals of satellite communication will adopt 5G-NR specifications in the future, and the satellite communication system will gradually move towards next-generation radio access network (NG-RAN) in terms of architecture and functional characteristics.

Keywords: satellite communication; 5G new radio; next-generation radio access network; architecture integration

杨立 / YANG Li^{1,2},
窦建武 / DOU Jianwu^{1,2}

(1. 中兴通讯股份有限公司, 中国 深圳 518057;
2. 移动网络和移动多媒体技术国家重点实验室,
中国 深圳 518057)
(1. ZTE Corporation, Shenzhen 518057, China;
2. State Key Laboratory of Mobile Network
and Mobile Multimedia Technology, Shenzhen
518057, China)

DOI: 10.12142/ZTETJ.202105012
网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1228.TN.20200708.1635.002.html>

网络出版日期: 2020-07-09
收稿日期: 2020-06-15

1 卫星通信系统发展现状和趋势

5G 新空口 (5G-NR) 属于陆基蜂窝网络, 已成为当前主要的陆地通信网络。虽然 5G-NR 能够通过特殊的射频手段实现对近海和低空的局部无线覆盖, 但却不能实现对远海和高空等区域的无线覆盖。在过去, 远海和高空等特殊区域的移动覆盖服务, 主要是由卫星通信系统来提供的^[1-2]。这是因为卫星通信系统具有三维广域覆盖的特点, 很适用于高空、远海、荒漠、极地等特殊区域。一些物联网终端 (如飞机、轮船) 具有特殊的广域大尺度和高速移动性。在这种场景中, 通过

卫星通信系统提供服务将更为便捷和经济^[3-4]。卫星通信系统虽然在增强移动宽带 (eMBB) 和超高可靠低时延通信 (URLLC) 应用方面逊色于 5G-NR 地面蜂窝网络, 但是在海量机器类通信 (mMTC) 应用场景中仍具有显著优势^[5]。此外, 卫星通信还能实现安全应急类通信、广域广播与多播, 并可灵活提供网络无线宽带回传等。卫星通信系统将是未来全球泛在移动通信不可缺少的一部分^[6]。

按照卫星轨道高度的不同, 卫星通信系统大概可分为低轨 (LEO) 卫星 (300 ~ 1 500 km)、中轨 (MEO) 卫星 (7 000 ~ 25 000 km)、地球同

步轨道 (GEO) 卫星 (35 786 km) 和高椭圆轨 (HEO) 卫星 4 类。其中, LEO 卫星和 GEO 卫星是当前部署最多且最具技术代表性的, 如铱星系统和国际海事卫星系统。卫星通信系统虽然能实现通信网络的全球覆盖, 也能提供常规语音和数字服务, 但是与地面蜂窝网络相比, 在产业链规模、业务服务形态、受众用户数量、通信资费等方面仍存在不足。在新一轮 5G-NR 技术、国家战略和相关商业资本的驱动下, 传统卫星厂家逐渐意识到: 如果继续走过去封闭式的技术和市场发展之路, 卫星的应用规模和市场价值将很难得到大幅提升, 卫星厂

家的盈利瓶颈也很难得到突破。因此，卫星厂家正在积极寻求卫星系统和地面蜂窝网络之间的融合，进而激发新的商业运营合作模式，以获得更多的商业利润。这种融合主要体现在以下 3 个方面：

(1) 技术方案。未来卫星通信系统的架构、协议栈、物理层空口技术等应尽量和 5G-NR 保持一致^[7]。针对卫星通信的特点，局部功能也需要做适当优化。这有助于推动卫星系统相关技术的发展，以快速提升卫星通信系统的整体能力。与此同时，未来主流商用卫星网络产品的规范协议将主要由第 3 代合作伙伴计划 (3GPP) 来制定。

(2) 产业资源。随着未来卫星通信系统的标准化，卫星产业力量将集中在最具市场潜力且最关键的卫星产品上。无论是卫星网络设备，还是用户终端，未来都会被高度关注。沿着同一方向拓展更有利于形成产业规模效应，进而有助于降低卫星制造和服务成本。

(3) 商业合作。在面向不同的应用场景和用户时，卫星网络和地面网络不仅各具优势，在某些领域还可以产生重叠和互操作。因此，卫星网络和地面网络应该取长补短，通过更紧密的互操作，形成深度天地一体化的泛在移动网络，进而推进天地通信产业链之间的合作，催生更前沿的商业合作模式。

2 卫星通信系统架构设计

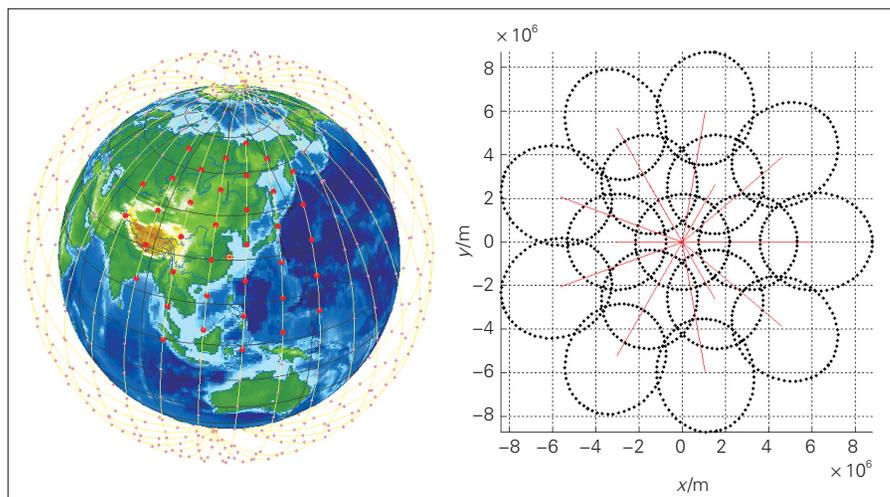
2.1 融合前传统卫星通信系统的特征和架构

截至 2018 年，全球在轨的通信卫星约有 800 颗，其中大部分是 GEO 和中低轨道卫星。通信卫星可提供语音、导航、天基互联网 / 物联网服务

等。2016 年，中国发射的“天通一号 01”卫星采用窄带单载波的制式，星上采取弯管透明转发。它可以提供 1.2 kbit/s 的速率语音和最大 384 kbit/s 的数据通信业务。2017 年，中国发射的“中星 16 号”卫星采取宽带传输制式，能提供 20 kbit/s 的高通量服务。由于中低轨道卫星组成的卫星星座能提供更大的通信容量和更短的端到端时延，因此它们成为未来商业应用发展的主要目标。对此，中国启动国家科技创新 2030 重大项目——天地一体化信息网络低轨接入网（轨道高度 800 ~ 1 100 km），包括鸿雁系列星座（轨道高度为 1 100 km，共 324 颗卫星）、虹云系列星座（轨道高度为 1 040 km，共 156 颗卫星）。图 1 左侧是一个有 16 个轨道面的低轨卫星星座分布图；图 1 右侧是一个具备 16 波束能力的卫星地面投射覆盖示意图，且椭圆长直径约为 400 km。

对于传统卫星通信系统，无论轨道高度和卫星类型如何，其系统架构都可用图 2 来表示。卫星用户终端 (UE) 可以是手持设备，也可能是抛物面式的收发器等。UE 和卫星之间的无线链路称为服务链路。卫星和地面观测控制站（卫星网关 / 观口站 / 信关站等）之间的无线链路称为馈电链路。地面控制站可通过地面全互联网协议 (IP) 网络与核心网 (CN) 和数据网 (DN) 相连。

根据星上处理能力和配置，卫星可划分为两大类。第 1 类为弯管型（不支持星间链路）卫星，这类卫星以模拟信号变频放大和简单中继转发为主，同时星上处理复杂度和卫星成本都较低。第 2 类为再生型卫星，这类卫星有较强的数字信号处理能力（能支持星间链路），但星上处理复杂度和卫星成本都较高，对卫星的物理载荷能力要求也较高。



▲图 1 低轨卫星星座分布和地面信号覆盖示意图



▲图 2 传统卫星通信系统的基本架构

由于 GEO 卫星处于 35 786 km 的高度, 并且相对于地面静止, 因此 GEO 卫星波束所提供的覆盖也是相对静止的, 对应的地面容量 / 覆盖规划和链路控制都相对简单。非地球同步轨道 (NGEO) 卫星有着特定的轨道和运行速度, 因此这类卫星通常向地面提供移动式覆盖。此外, N GEO 的多普勒频移、动态变化时延 / 路损和对无线链路的性能要求都会增加, 对地面容量 / 覆盖的规划和卫星链路控制也会变得更加复杂。由于 N GEO 卫星有着不同的发射接收仰角和天线模式, 因此投射在地面的服务小区拓扑形状也会随着卫星的移动而不断发生变化。虽然 N GEO 卫星的部署比 GEO 卫星复杂, 但是一旦 N GEO 卫星入轨运行, 它的星历信息也就会确定, 即卫星地面站可准确判断任意时间卫星所在的具体位置, 同时卫星对地面的投射信号覆盖也将呈现出一定的周期性变化规律。因此, 卫星星历信息可用来高效辅助卫星和终端的移动性管理。LEO 卫星的轨道低, 它对应的无线链路环回时延 (2 ~ 13 ms) 和路损都相对较小, 更容易保证无线链路的质量和有利于宽带类数据业务的开展。而 GEO 卫星的无线链路环回时延 (约 560 ms) 和路损都相对较大, 对卫星终端的天线类型和发射功率都有更高的要求, 需要花更大的代价去保证无线链路的质量。

从系统角度看, LEO 卫星处于低轨空间环境, 会受到更多外界环境的干扰 (地球引力、大气尘埃、星际辐射等), 通常寿命会更短一些。由于 LEO 卫星轨道低, 通常投射的小区覆盖范围没有 GEO 卫星那么大。为了实现全球覆盖, 需要部署成百上千颗 LEO 卫星, 而这会使得发射和维护成本变得很高。相比之下, GEO 卫星的使用寿命通常更长一些, GEO 覆盖

服务小区较大, 只需要几十颗甚至几颗卫星就可实现全球覆盖, 因此发射和维护成本不高。总的来说, GEO 和 N GEO (主要是 LEO) 卫星各有优缺点。在实际部署时, 可考虑混合异构部署组网。相同类型或不同类型的卫星之间, 还可配置星间链路, 并利用微波或激光等进行信号的中继转发, 使卫星信号能沿最佳路径到达地面。

2.2 融合后未来卫星通信系统的特征和架构

卫星通信系统和地面蜂窝系统的差异主要表现在以下面几个方面:

(1) 卫星通信系统需要特定的卫星频段和专有的芯片终端, 才能进行卫星信号的收发, 特别是在终端的天线射频能力配置方面, 因此, 过去无法以低成本的方式实现像普通 UE 那样的小型化和一体化。

(2) 卫星通信系统的架构和协议栈完全取决于各个卫星厂家的内部设置。卫星通信系统没有公共的核心网来做统一的业务编排和策略安全管控。对于再生类型卫星, 有什么样的数字处理模块和多少处理资源配置, 都没有统一的标准。卫星通信设备大多基于专有的硬件模块实现, 而非基于日益流行的软件定义网络 (SDN) / 网络功能虚拟化 (NFV)。

(3) 卫星通信系统和地面蜂窝系统之间没有统一的服务质量 (QoS) 体系, 也不能进行复杂的跨系统操作, 例如跨系统切换、无线资源负荷均衡、多连接操作等, 因此很难提供一致性的服务。

(4) 卫星通信系统对可靠性要求较高。卫星模块器件工作在极端的太空环境中, 需要考虑有害的高能粒子流和 180 ~ 120 °C 的温度变化。

在过去, 卫星通信系统和地面蜂窝系统是两套独立的无线系统。国际

电信联盟无线电通信部门 (ITU-R) SG4-WP4B 工作组开展的天地系统融合方面的研究, 为其他相关标准的制定提供了重要参考。3GPP 在 Release 14—16 期间, 发起了一系列与卫星通信相关的项目。

Release 16 阶段:

- 业务与系统架构组 (SA) 1 研究项目实现卫星一体化的标准化;

- SA2 研究项目确定卫星 5G 系统架构;

- 无线接入网 (RAN) 1—3 研究项目制定新空口支持非地面网络解决方案^[8]。

Release 15 阶段:

- 完成 3GPP TR 22.822^[9]《5G 中使用卫星接入》研究报告, 确定融合卫星接入的 5G 系统的用户案例。

- 完成 3GPP TR 38.811^[10]《新空口支持非地面网络》研究报告。

Release 14: 完成 3GPP TS 22.261^[11]《下一代新业务和市场的业务需求》报告。

卫星通信系统和 5G-NR 之间的深度融合应至少包括无线接入网、核心网、终端和上层业务应用四大方面。本文主要探讨卫星与下一代无线接入网 (NG-RAN) 架构融合^[12-16]。

2.2.1 单跳卫星融合架构

单跳是指, UE 先经过 NR-Uu 空中接口接入单颗服务卫星, 再连接到卫星基站和核心网, 从而实现端到端的网络连接。这里, 我们用卫星射频单元 (Sat-RU) 来表示星上只有模拟信号处理能力或很弱的数字信号处理能力的卫星, 例如弯管型卫星或者基于厂家私有方案实现的星间链路和卫星无线接口 (SRI) 信号转发型卫星; 用卫星分布单元 (Sat-DU) 来表示星上有较强的数字信号处理能力, 但没有完整的 5G 基站 (gNB) 整机能力或

更上层的逻辑功能能力的卫星，例如具备 5G-NR L1 数字信号处理能力和 L2 数据包处理能力的卫星；用卫星完整单元 (Sat-FU) 来表示星上有完整的 gNB 整机能力和更上层的逻辑功能能力的卫星，例如具备 5G gNB 全部完整协议数字处理能力的卫星。需要说明的是，如果把下文中的 UE 换成地面蜂窝 NG-RAN 基站，那么卫星服务链路还能能为这些地面基站提供无线回程传输服务。

Sat-RU 卫星的融合架构如图 3 所示。由于单颗 Sat-RU 卫星可通过 SRI (馈电链路也可基于 NR-Uu 新传输制式) 同时和多个地面 gNB 基站相连接，传输底层多路模拟信号，因此 gNB 前端需配置支持 SRI 的收发模块。Sat-RU 卫星之间可根据能力和部署的需要来配置星间链路 (仅用于底层模拟信号的中继转发)。在这种架构中，相比于地面蜂窝 NG-RAN，卫星 NG-RAN 并没有太大改变。这是因为 gNB 基站、Xn 接口、NG 接口等都还部署在地面网络中。由于 UE 能力有限，通常假设 UE 只能与单颗 Sat-RU 卫星、单个地面 gNB 进行通信。也就是说，这种架构通常不支持 UE 和多颗卫星之间的多连接操作。

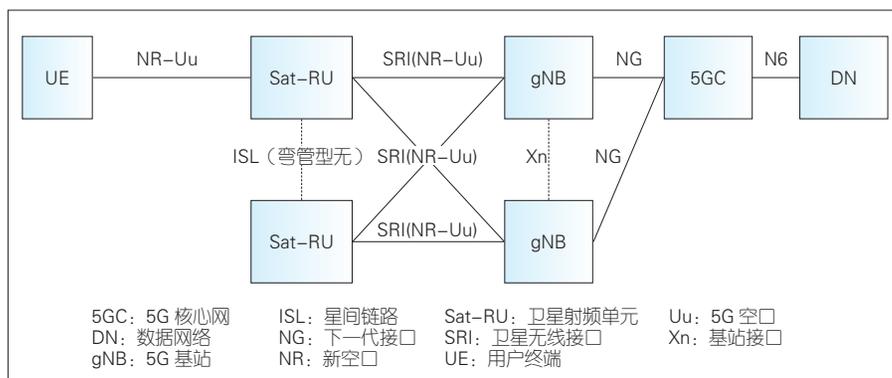
在 Sat-RU 卫星融合架构中，UE 和 gNB 之间需要分别经历服务和馈电两个无线链路，这会给 L1、L2 数据块传输带来更大的时延和链路自适应 / 功控等问题，使卫星链路性能降低。随着卫星自身物理载荷能力的提高和 SDN/NFV 技术的发展，提升卫星星上的数字处理能力并优化资源配置，已成为卫星产业界的主流趋势。未来 gNB 各个空口协议功能 / 数字处理模块会被设置在卫星上，从而降低 L1、L2 数据块 (重) 传输时延，增强对卫星链路的自适应性，提升链路级性能。

Sat-DU 卫星融合架构如图 4 所示。

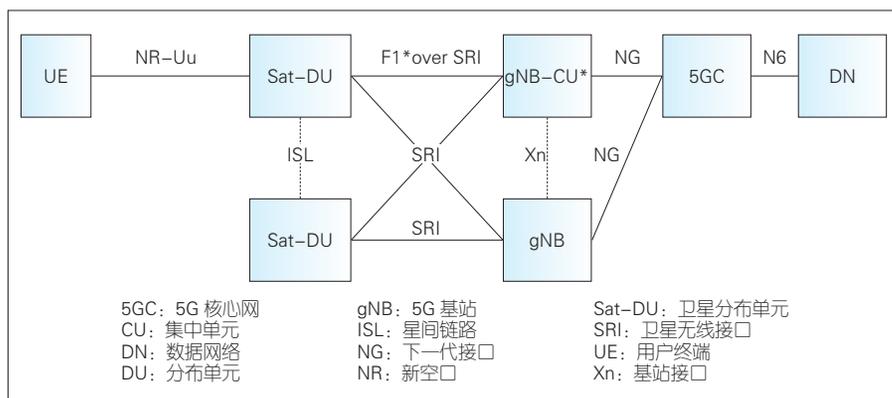
单颗 Sat-DU 卫星可通过 F1* 接口 (F1* 和 5G-NR 中的 F1 接口不同) 同时和多个地面 gNB 集中单元 * (gNB-CU*) 相连接 (gNB-CU* 和 5G-NR 中的 gNB-CU 实体不同)。gNB-CU* 前端同样需要配置支持 SRI 收发的模块。Sat-DU 卫星之间可根据能力和部署的需要来配置星间链路 (仅用于模拟信号的中继转发，暂不支持高层标准化的接口)。此种架构下，相比于地面蜂窝 NG-RAN，卫星 NG-RAN 也没有太大变化。这是因为 gNB-CU* 基站、Xn 接口、NG 接口等仍然全部部署在地面。由于 UE 能力有限，通常假设 UE 只能和单颗 Sat-DU 卫星、单个地面 gNB-CU* 进行通信，即这种架构通常不支持 UE 和多颗卫星之间的多连接操作。由于 Sat-DU 卫星至少配置了 NR 物理层 (PHY) / 媒体接入控制 (MAC) / 无线链路控制 (RLC) 等协

议功能模块，因此链路自适应 / 功控、数据包重传操作只需要经历一段服务链路。只有当 Sat-DU 最大重传失败或需要执行更高层重传和连接重配置 (RRC) 操作时，管控操作才会再次回到地面 gNB-CU* 基站。

为了进一步提升卫星链路的性能，增强卫星本地无线资源管控能力，降低控制面的信令传输时延，卫星也应具备 gNB 功能。Sat-FU 卫星融合架构如图 5 所示。单颗 Sat-FU 卫星可通过 NG 接口同时和多个地面卫星网关 (Sat-GW) 相连接。Sat-GW 前端同样需要配置支持 SRI 的收发模块。Sat-FU 卫星之间可根据能力和部署的需要来配置星间链路，以支持空中 Xn 接口，实现相邻卫星间的资源协调。例如，同一轨道上的相邻 LEO 卫星之间比较容易实现稳定的 Xn 连接，以辅助 UE 移动性管理。相比于 Sat-RU 和 Sat-



▲图 3 Sat-RU 卫星融合架构



▲图 4 Sat-DU 卫星融合架构

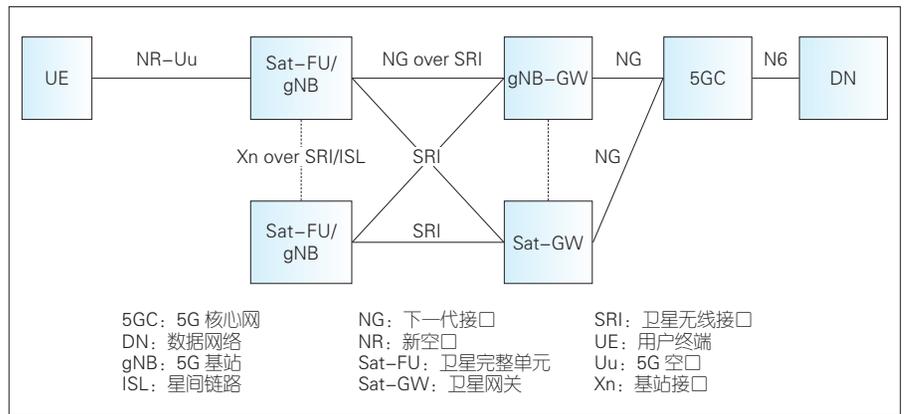
DU, 此种架构下的卫星 NG-RAN 部署有了很大改变。此时卫星 gNB 基站、Xn 接口、NG 接口都部署在天上, 并处于相对移动状态。这会给卫星网络拓扑和接口管理带来较大影响。同理, 由于 UE 能力有限, 通常也假设 UE 只能和单颗 Sat-FU 卫星进行通信, 即该架构通常不支持 UE 和多颗卫星之间的多连接操作。Sat-FU 卫星配置了 gNB 全部的协议功能模块, 除了具备 Sat-DU 卫星的所有数字处理能力外, 还能进行分组数据汇聚协议 (PDCP) 重传恢复、RRC 重配置、移动性管理, 以及空口和其他接口资源管理等操作。那些原本在地面蜂窝基站上的操作都可以放在 Sat-FU 卫星上执行。在图 5 的架构中, 相邻的 Sat-FU 卫星既可以属于同一运营商, 也可以属于不同的运营商 (有漫游的情况下)。因此, 该架构可以应用在 UE 空中漫游的场景中。

为减少 Sat-FU 卫星对 5G 核心网 (5GC) 的影响, 通常在 Sat-FU 卫星和 5GC 之间会部署一个独立的 Sat-GW 实体。该实体具有类似于地面控制站的功能, 可监测 Sat-FU 卫星的运行状态和相关参数配置。此外, 该实体还能在网络传输层 (TNL) 保证 Sat-FU 卫星和 5GC 之间 NG 标准化接口连接畅通。在上述 Sat-RU 和 Sat-DU 卫星场景下, Sat-GW 实体既可以独立部署, 也可以被整合在地面 gNB/gNB-CU* 基站内部。3GPP 认为, Sat-GW 实体不会产生新的标准化接口, 它仅具有 TNL 传输功能和对卫星的管控功能。因此, Sat-GW 不需要实现标准化。

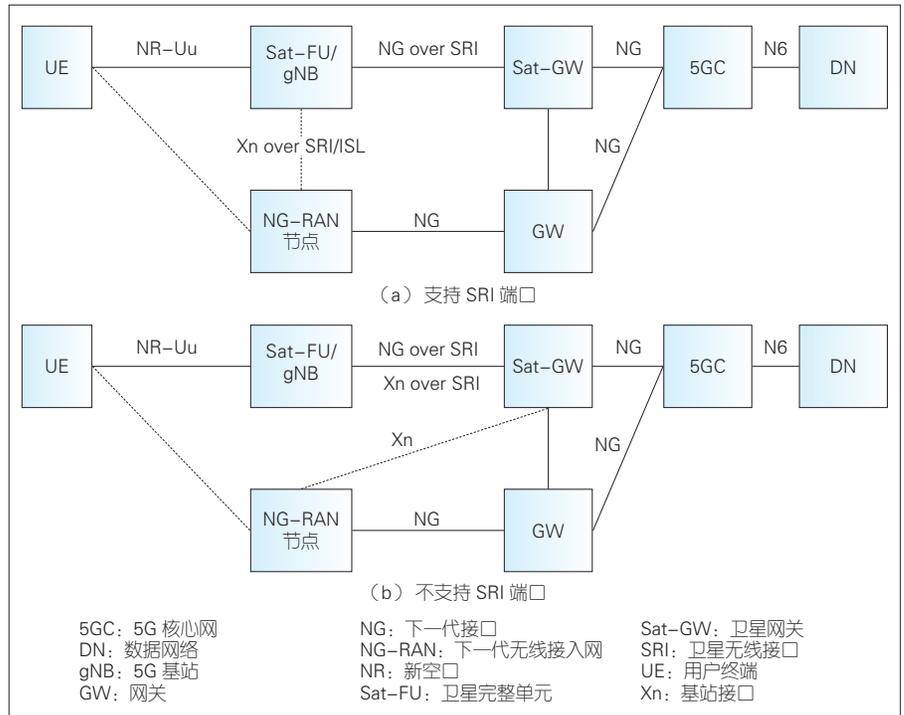
Sat-RU 和 Sat-DU 卫星的 NG-RAN 与传统地面蜂窝 NG-RAN 相比, 没有本质变化。Sat-FU 卫星在理论上支持 SRI 端口的地面蜂窝 NG-RAN 节点, 并通过 Xn 建立标准化接口, 如图

6 (a) 所示。如果地面蜂窝 NG-RAN 基站不支持 SRI 端口, 如图 6 (b) 所示, 那么 Sat-FU 卫星可通过地面 Sat-GW 间接地与地面蜂窝 NG-RAN 基站建立 Xn 标准化接口连接。Sat-GW 和地面普通网关在 TNL 也是相连接的。卫星基站和地面蜂窝基站可同时被同一个 5GC 网元所管辖, 并可执行天地基站间的无缝移动性操作。这有利于天地一体化资源的统一协调管理。建立 UE 和卫星服务链路需要一套独立的射频 (RF) 和天线模块。因此, 在

UE 和地面蜂窝基站之间的链路模块不被占用的前提下, 理论上该架构也可支持天地基站之间的多连接配置操作, 即 UE 同时和地面蜂窝基站、卫星基站建立独立的无线链路, 从而使不同数据业务可被不同的无线链路承载。在图 6 (a) 和图 6 (b) 的架构中, 天地相邻的 Sat-FU 卫星和地面蜂窝 NG-RAN 基站, 可属于同一运营商, 也可属于不同运营商 (有漫游的情况下)。因此, 这两种架构支持 UE 在天地基站之间的漫游移动。



▲图 5 Sat-FU 卫星融合架构



▲图 6 Sat-FU 卫星和地面 NG-RAN 节点互操作架构

2.2.2 多跳卫星融合架构

传统卫星通信系统一般支持多跳服务^[17]。例如，飞机或游轮上的 UE 通过 Wi-Fi 先连接一个集中的中继转发节点，然后这个中继转发节点再和通信卫星建立服务链路，以服务所有汇聚的 UE。未来地面 gNB 基站和 UE 将支持中继多跳。对于卫星通信系统来说，在多跳服务场景下的多跳技术架构也可能和地面蜂窝 gNB 一样。这种架构包括地面多跳接入和先星间链路多跳再中继转发两大类。地面多跳接入的融合架构如图 7 (a) 所示。

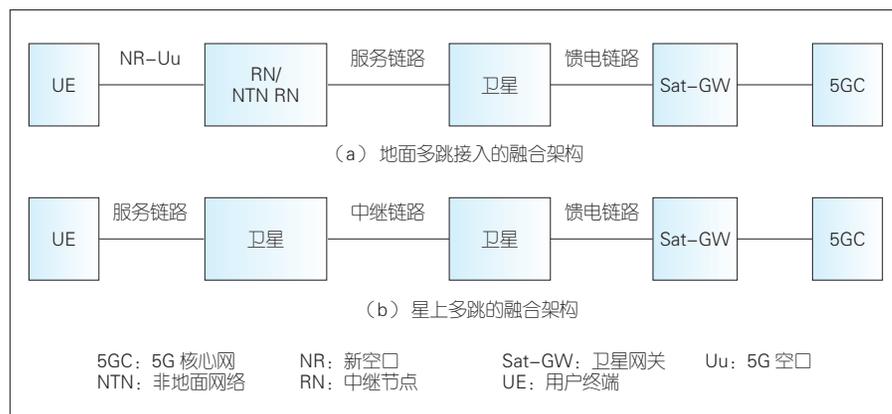
UE 首先通过 NR-Uu 空口接入最近的服务中继节点 (RN)，再经过若干跳之后通过非地面网络 (NTN) RN 来转发卫星信号。这种服务架构对于聚合成本相对低的物联网终端意义很大。低端的物联网终端不太可能和卫星直接建立服务链路。即使能和卫星直接连接，物联网天然的小微数据包^[18]、超大连接数也会给卫星带来严重的资源负荷冲击。因此，先汇聚地面数据流量再将数据上传至卫星的做法将更加高效。星上多跳的融合架构如图 7 (b) 所示，UE 在卫星上的数据流信号还可继续在星间链路之间以标准化的方式多跳传输。例如，基于集成接入回传 (IAB) 技术，不同厂家的卫星设备可提供多跳中继传输服务，并可进行路由优化等操作。地面多跳和星间多跳可同时部署，此时需要要考虑端到端的时延问题。另外，卫星间的多跳传输场景可能会给未来 6G 天地一体化传输承载方式和相关协议带来影响^[19]。

2.2.3 卫星本地分流融合架构

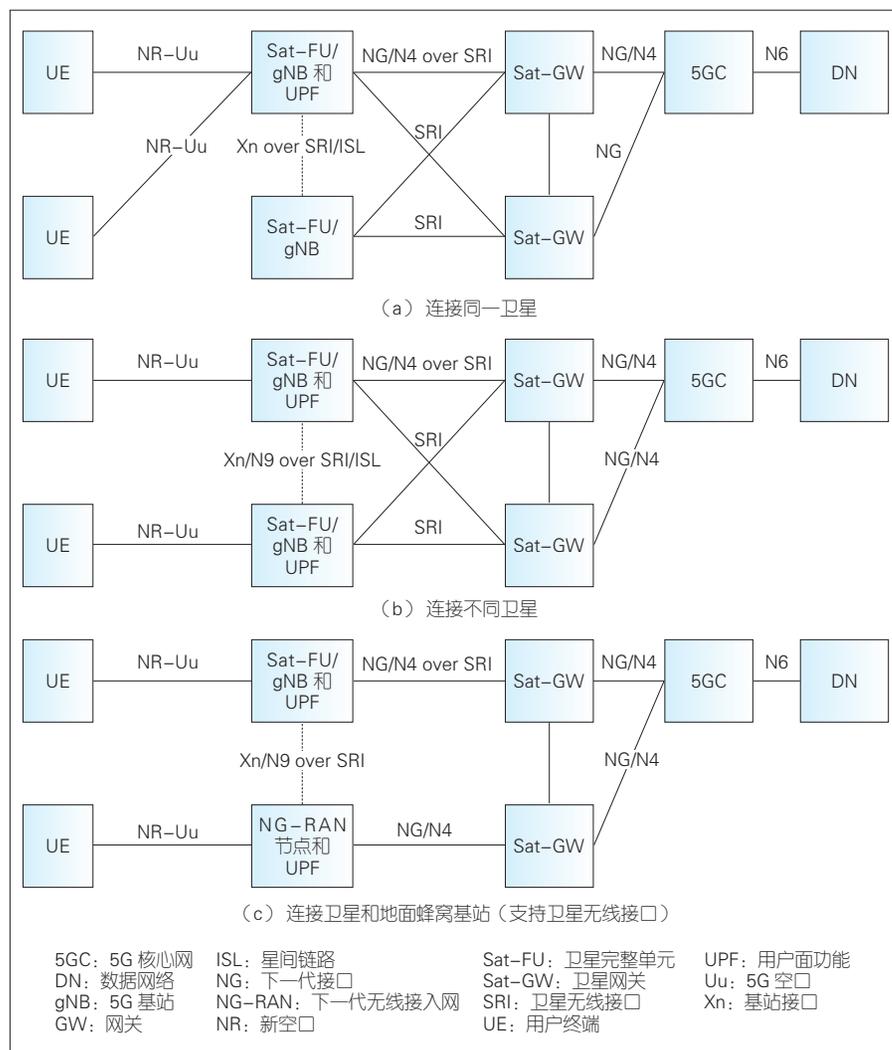
由于卫星链路的时延较大，因此在卫星物理载荷能力允许的前提下，为 Sat-FU 卫星增配 UPF 和 MEC 功能，有助于形成用户内容和资源复用优势。如果发生通信的两个节点都是 UE，那

么可通过卫星本地分流的服务架构来缩短端到端时延。在这种架构中，UE 之间可直接通过服务链路完成数据包传输。如图 8 (a) 所示，两个 UE 都

连接同一颗配备有本地 UPF 的 Sat-FU 卫星。当控制面完成建链后，两个 UE 可直接在卫星内进行数据包转发。如图 8 (b) 所示，两个 UE 各自连接不



▲图 7 多跳卫星融合架构



▲图 8 卫星本地分流融合架构

同的配备有本地 UPF 的 Sat-FU 卫星。当控制面完成建链后,两个 UE 可直接在两颗卫星之间进行数据包转发。此时,星间 N9/N4 接口可用来支持星间传输。配备有本地 UPF 的不同 Sat-FU 卫星,既可属于同一运营商,也可属于不同的运营商,即能够支持不同 UE 的跨运营商通信。

类似地,如图 8(c)所示,两个 UE 分别连接配备本地 UPF 的 Sat-FU 卫星基站和地面蜂窝基站。当控制面完成建链后,两个 UE 也可直接在天地基站链路之间进行本地数据包的转发传输。为了支持天地间本地分流操作,地面蜂窝基站也应具备 UPF,这可通过天地基站链路间 N9/N4 over SRI 的标准化接口来实现。天地基站之间配备本地 UPF 的 Sat-FU 卫星基站和地面蜂窝 NG-RAN 基站^[20],既可属于同一运营商,也可属于不同的运营商,即支持不同 UE 的跨运营商通信。

3 结束语

随着全球化的发展,卫星通信系统的应用将越来越广泛,5G-NR、6G 等通信技术也将被逐渐运用在卫星通信系统中。虽然在网络部署和工作方式上有较大差异,但是在系统架构/协议栈层方面,未来卫星 NTN 系统将会和地面蜂窝 NG-RAN 彼此深度融合。在某些地面蜂窝 NG-RAN 无线信号无法覆盖的地方,卫星 NG-RAN 可提供多种灵活的接入方式。不同类型卫星的组合有助于提升业务性能,降低综合成本。虽然卫星基站能够更好地服务用户,但是单颗卫星的成本和系统

复杂度也在增加。因此,必须综合多方面因素来选择最优的服务架构。在某些天地 NG-RAN 无线信号同时覆盖的地方,天地 NG-RAN 基站之间可紧密协作,以实现数据包的无损跨节点移动性管理、资源负荷均衡和多连接操作等。未来卫星通信系统和 5G-NR 之间的深度融合,不仅有利于传统卫星厂商提升卫星整体性能,开发和部署新卫星,开辟新业务市场,还有利于 5G-NR 移动业务市场和巨量的终端用户数被更好地共享。在未来,普通终端用户将以更低的资费享受到质量更好、内容更丰富的卫星通信服务。

参考文献

- [1] 朱立东,吴廷勇,卓永宇.卫星通信导论:第4版[M].北京:中国工信出版社,2015
- [2] 张洪太,王敏,崔万照.卫星通信技术[M].北京:人民邮电出版社,2018
- [3] 张军.天基移动通信网络[M].北京:国防工业出版社,2018
- [4] 潘申富,王赛宇,张静,等.宽带卫星通信技术[M].北京:国防工业出版社,2018
- [5] 杨立,赵亚军,方球斌.从容量和覆盖升级到连接和品质——论未来无线技术的盈利拓展[J].信息通信技术,2020,14(6):57-62
- [6] 宗鹏.卫星地球站设备与网络系统[M].北京:国防工业出版社,2018
- [7] 杨立.5G-NR 蜂窝系统功能演进趋势分析[J].无线电通信技术,2020,46(3):310-314
- [8] 3GPP. Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 16): 3GPP TR 38.821[S].2019
- [9] 3GPP. Study on using satellite access in 5G, stage 1 (Release 15): 3GPP TR 22.822[S].2017
- [10] 3GPP. Study on New Radio (NR) to support Non-Terrestrial Networks (Release 15): 3GPP TR 38.811[S].2018
- [11] 3GPP. Service requirements for the 5G system (Release 14): 3GPP TS 22.261[S].2017
- [12] 3GPP. Architecture options for NTN: 3GPP R3-185406[S].2018

- [13] 3GPP. Further discussion on NTN architecture issues: 3GPP R3-185409[S].2018
- [14] 3GPP. NTN architecture options: 3GPP R3-185699[S].2018
- [15] 3GPP. Further discussion on NTN architecture: 3GPP R3-185704[S].2018
- [16] 3GPP. Considerations on NG-RAN architectures for non-terrestrial networks: 3GPP R3-186043[S].2018
- [17] 3GPP. Further considerations on multi-hop scenarios in NTN: 3GPP R3-185411[S].2018
- [18] 杨立,黄河,张梦洁,等.小微数据包高效无线传输技术的发展和趋势[J].移动通信,2021,45(1):90-95
- [19] 牟林,杨立,李志军,等.6G无线侧相关新承载和新传输的愿景需求分析[J].信息技术,2021,15(3):62-68
- [20] 杨立,李大鹏.网络切片在5G无线接入侧的动态实现和发展趋势[J].中兴通讯技术,2019,25(6):8-18. DOI: 10.12142/ZTETJ.201906002

作者简介



杨立,中兴通讯股份有限公司技术资深预研专家、高级工程师,曾常年担任 3GPP 规范协议资深主编;长期从事 3GPP 移动网络技术的标准化研究,包括 ODICT 生态战略、网络系统功能演进、卫星通信等;获江苏省科学技术奖二等奖 1 项;有 400 余篇标准提案被 3GPP 组织采纳,发表论文 10 余篇,出版专著 1 部,拥有授权专利 50 余项。



窦建武,中兴通讯股份有限公司高级工程师、中国电子学会电波传播分会委员会委员;主要研究方向为 5G/6G 无线信道建模、无人机通信、卫星通信等;参与 3GPP 5GCM、UAV、NTN 等标准化工作,所主导的 Map-based Hybrid 信道模型被 3GPP 及 ITU 国际标准化组织采纳,主持国家重大科技专项 1 项;获中国专利金奖、中国通信学会科学技术奖一等奖等奖项。

“中兴通讯技术杂志社第26次编委会议暨2021通信热点技术研讨会”在兰州召开

2021年9月11—12日，来自高校、运营商、院所及企业的80余位ICT专家学者齐聚兰州，参加“中兴通讯技术杂志社第26次编委会议暨2021通信热点技术研讨会”。中兴通讯董事长李自学、执行副总裁王喜瑜、高级副总裁王翔等公司领导和专家出席会议。

编委会上，李自学董事长介绍了中兴通讯的发展情况。自2018年来，中兴通讯按照“恢复、发展、超越”的三步走路线，以技术创新为本，积极推进业务拓展，目前已处于稳定的发展期。2021年上半年，中兴通讯在业务营收、现金流等方面实现了有质量的增长，两大市场三大业务均保持同比增长，多项指标创历史新高，这为中兴通讯顺利进入超越期奠定了坚实的基础。

在听取杂志社年度工作报告、产学研工作介绍以及编委换届工作汇报后，代表们充分肯定了办刊成果和产学研合作的价值，一致认为企业办刊不仅是知识传播，更是国家科技战略的需要。产学研合作是企业办刊的优势和特色，未来需要继续坚持并做到更加开放。

在通信热点技术研讨会上，须成忠、赵慧玲、唐雄燕、张钦宇、向际鹰等15位专家学者针对无人驾驶技术、网络技术、网络架构、天地一体化技术、5G技术进展等内容做了精彩的学术报告，展现了相关技术和标准的最新研究进展，受到与会代表的好评。



受到新冠疫情的影响，部分受邀代表未能与会，但通过录音报告和在线方式参加了会议。两天会议的现场直播，吸引了23000多人次的点击观看。

每年一度的编委会是专家学者交流的平台，更是连接学术界、产业界的纽带，在汇聚资源、促进合作方面起到重要作用。

中兴通讯技术杂志社第26次编委会议暨2021通信热点技术研讨会

中国兰州，2021年9月11日



中兴通讯技术

(ZHONGXING TONGXUN JISHU)

办刊宗旨:

以人为本, 荟萃通信技术领域精英
迎接挑战, 把握世界通信技术动态
立即行动, 求解通信发展疑难课题
励精图治, 促进民族信息产业崛起

产业顾问(按姓名拼音排序):

段向阳、高 音、胡留军、刘新阳、
陆 平、史伟强、王会涛、熊先奎、
赵志勇、朱 方、朱晓光

双月刊 1995年创刊 总第160期
2021年10月 第27卷第5期

主管: 安徽出版集团有限责任公司
主办: 时代出版传媒股份有限公司
深圳航天广宇工业有限公司
出版: 安徽科学技术出版社
编辑、发行: 中兴通讯技术杂志社

总编辑: 王喜瑜
主编: 蒋贤骏
执行主编: 黄新明
责任编辑: 徐焯
编辑: 杨广西、卢丹、朱莉、任溪溪
设计排版: 徐莹
发行: 王萍萍
外联: 卢丹
编务: 王坤

《中兴通讯技术》编辑部
地址: 合肥市金寨路329号凯旋大厦1201室
邮编: 230061
网址: tech.zte.com.cn
投稿平台: tech.zte.com.cn/submission
电子信箱: magazine@zte.com.cn
电话: (0551)65533356

传真: (0551)65850139
发行方式: 自办发行
印刷: 合肥添彩包装有限公司
出版日期: 2021年10月15日
中国标准连续出版物号: ISSN 1009-6868
CN 34-1228/TN
定价: 每册 20.00元