



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:

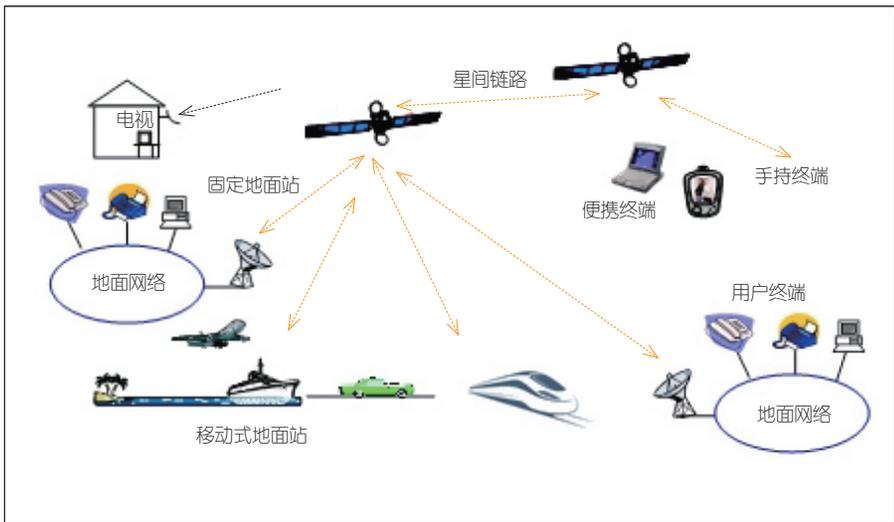
- 边远地区乡村的远程商业和住宅服务;
- 偏远山区、沙漠和岛屿网络服务;
- 智能交通系统和车辆通信连接

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。

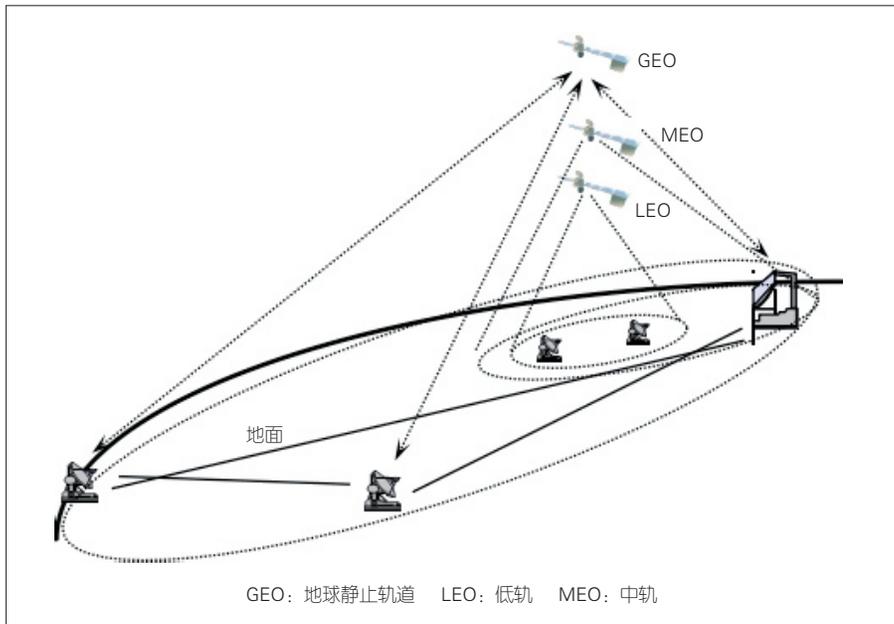
(4) 传输功率受限。卫星主要靠

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