

卫星5G技术的发展和展望

翟立君, 潘洙铭, 汪春霆

(中国电子科技集团公司电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 随着新兴宽带卫星通信星座的发展, 卫星通信与5G通信的融合成为当前发展的热点。梳理当前卫星5G发展的现状, 重点介绍3GPP、ITU、Sat5G等标准化组织的工作成果。在此基础上提出卫星5G网络总体架构, 介绍卫星动态拓扑条件下的组网、多频段星地一体化波形设计、卫星物联网用户多址接入、无线资源管理和干扰协调等技术研究和发展情况, 并探索OTFS、非正交多址接入以及基于频谱感知的NGSO和GSO干扰协调等新技术的可行性; 最后对6G阶段天地融合网络的发展进行展望。

关键词: 卫星5G; 网络架构; 信号波形设计; 卫星非正交多址接入; 无线资源管理

中图分类号: TN919.23

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021001

Development and Prospect of Satellite 5G Technology

ZHAI Lijun, PAN Shuming, WANG Chunting

China Academic of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

Abstract: With the development of new broadband satellite communication constellation, the fusion of satellite communication and 5G has become a hot spot in the communication industry. The current status of the development of satellite 5G was summarized, and the work achievements of 3GPP, ITU, SaT5G and other international standard development organizations were introduced. On the basis, the overall architecture of satellite 5G network was proposed, the research and development were introduced such as networking under the condition of satellite dynamic topology, multi band satellite ground integration waveform design, multiple access to satellite IoT terminal, radio resource management and interference coordination. In addition, the feasibility of new technologies such as OTFS, non-orthogonal multiple access and interference coordination of NGSO and GSO based on spectrum sensing were explored. Finally, the development of the 6G phase of integrated satellite and terrestrial networks was presented.

Keywords: satellite 5G, architecture of network, waveform design, satellite non-orthogonal multiple access, radio resource management

1 引言

卫星通信因为其覆盖广、对基础设施依赖小以及费用与距离无关等一系列突出优势, 仍然是当前世界弥合数字鸿沟不可或缺的重要手段。根据“玛丽·米克尔”发布的《2019年互联网趋势报告》: “2018年全球约有51%的人口(38亿人)是互联网用户, 高于2017年的49%(36亿人)。由于上网人数众多, 新用户获得难度加大, 2018年增长放缓至6%左右”^[1]。为了争夺剩下人口的互联网入口, 近年来随着O3b^[2]、OneWeb^[3]以及Starlink^[4]等计划的提出, 卫星通信迎来了新一轮发展高潮。

与此同时, 地面5G已经成为世界经济和社会发展的新引擎。中国信息通信研究院2018年发布的《5G经济社会影响白皮书》预测: “2030年5G带动的直接产出和间接产出将分别达到6.3万亿元和10.6万亿元, 并将开启万物广泛互联、人机深度交互的新时代”^[5]。如何利用5G上下游产业链成果, 加速卫星通信产业发展, 融合卫星与地面蜂窝两种场景, 为全球范围内用户无缝漫游、泛在接入提供支持成为当前研究和产业化的热点问题。3GPP(The 3rd Generation Partnership Project)、ITU(International Telecommunications Union, 国际电信联

收稿日期: 2020-10-09; 修回日期: 2021-02-04

基金项目: 中国工程院网络强国重大战略咨询项目(2020-ZD-14-03)

Foundation Item: Major Strategic Consulting Project of the Cyberpower, China Academy of Engineering(2020-ZD-14-03)

盟)以及Sat5G (Satellite and Terrestrial Network for 5G)联盟等国际组织已纷纷开展相关技术的研究和标准化工作。

2 发展现状

2.1 星地融合的早期工作

从20世纪90年代开始,关于卫星与地面移动通信相互融合的讨论与尝试就从未停止,其成果主要集中在采用L、S等较低频段卫星移动服务(Mobile Satellite Service, MSS)领域,而较少涉及采用C、Ku和Ka频段的固定卫星服务(Fixed Satellite Service, FSS)领域。总体上来讲,目前已经形成的若干卫星移动通信的技术方案主要是,在保持地面同期移动通信标准框架、网元功能划分以及上层协议尽量不变的情况下,针对卫星移动通信的特点对物理层、媒体接入层、链路层以及无线资源管理机制及算法进行了优化设计。

在高轨道卫星(GEO)方面,Thuraya卫星移动系统的GMR-3G标准^[6]、Inmarsat-4系统采用的IAI-2标准以及欧洲电信标准化协会(European Telecommunications Standards Institute, ETSI)发布的S-UMTS^[7]标准均基于3GPP R4框架。在低轨卫星通信星座方面,铱星和GlobalStar的空中接口设计分别以GSM和IS-95作为蓝本。我国2016年发射的天通一号卫星在体制标准设计上借鉴了GMR3G标准成果,并将核心网升级至与3GPP R6相似版本,但是在空中接口上并没有采用CDMA技术,而是采用了可变带宽参数的窄带单载波体制。我国在2014年与韩国分别向国际电联提交了基于LTE框架的卫星通信系统标准草案。美国光平方公司的SkyTerra卫星系统,引入了地面辅助基站(Ancillary Terrestrial Component, ATC)的概念来解决卫星在城市及室内覆盖不佳的问题。SkyTerra卫星与基站复用同一频段,空中接口信号格式几乎相同,其与英飞凌合作,基于软件无线电(Soft Defined Radio, SDR)技术开发手机芯片,用户无须双模终端就可以在卫星与地面基站间无缝切换^[8]。

随着互联网卫星星座的发展,星地融合在FSS领域取得了一些进展。采用Ku频段的OneWeb系统很好地融合了其两家主要投资商“休斯(HUGHES)”和“高通(Qualcomm)”的研究基础,在前向链路使用了单载波时分复用体制(SC-TDM),反向链路则采用了LTE标准单载波频分多址机制(SC-FDMA)^[9]。

2.2 3GPP组织开展的工作

3GPP是全球电信标准的主要制定者。目前,3GPP正在主持推动全球5G的标准化工作,第二阶段的R16在两次延期后于2020年7月完成标准冻结。R17设计已经全

面启动,其阶段3计划于2021年9月冻结。

3GPP从R14阶段开始研究卫星通信与地面移动网络的融合,通过将卫星作为5G的接入方式之一,探索卫星在5G系统中的角色和优势。其在R15中对卫星通信与地面5G的融合做了进一步研究,主要成果集中在技术报告TR38.811^[10]与TR22.822^[11]两个文件中。前者阐述了5G系统中非地面网络(Non-Terrestrial Network, NTN)的作用与角色,并列举了卫星接入网服务于5G的用例,介绍了非地面网络候选架构、5个非地面网络参考部署场景及传输特征和信道模型。后者对卫星访问5G的用例进行了分类,并列出了12个用例,包括星地网络间漫游、卫星广播和多播、卫星物联网、卫星组件的临时使用、卫星的最优路由和指向、卫星跨界服务的连续、通过5G卫星的非直连、NR和5G核心网间的5G固定回程链路等。

3GPP的R16阶段主要开展了卫星5G系统架构和新空中接口支持非地面网络的解决方案等方面的研究。在2018年6月的3GPP RAN全会上,3GPP提交了新提案TR38.821^[12]。提案主要对非地面网络及其场景进行了描述,分析了透传、再生等不同模式对5G接入网的影响,开展了对星地网络链路层和系统级的仿真评估,提出了针对无线协议、5G接入网架构和空中接口等相关问题的解决方案。2019年12月,TR38.821更新至V16.0.0版本。

R17作为5G标准的第三阶段,除了对R15/R16特定技术进一步增强外,将基于现有构架与功能从技术层面持续演进,全面支持物联网应用。在2019年12月举行的会议上,3GPP公布了R17阶段的23个标准立项,其中5G非地面网络由法国公司泰雷兹(Thales)牵头。虽然23个标准立项中近一半已由中国企业牵头,但在卫星通信领域仍然是以欧美公司为主。在R17阶段,3GPP将继续进行非地面网络的5G NR增强的标准工作研究,以卫星与高空平台与5G的融合探索高精度定位、覆盖增强、组播广播等方向。

表1给出了3GPP在TR38.811定义的5种5G非地面网络典型部署场景,涵盖了GEO、Non-GEO等多种形式卫星。在传输上频率考虑了Ka、S等频段,传输带宽可达800 MHz,双工仅考虑频分双工(FDD)模式,支持固定以及可移动点波束等多种卫星载荷形式,主要支撑室外条件下的增强型移动宽带(eMBB)场景。3GPP定义的NTN终端包括手持终端等小型终端和甚小口径天线地面站(Very Small Aperture Terminal, VSAT)。其中手持终端由窄带或宽带卫星提供接入服务,频率一般在6 GHz以下,下行速率为1~2 Mbit/s(窄带)。VSAT一般作为中继节点搭载于船舶、列车、飞机等移动平台,由宽带卫星提供接入服务,频率一般在6 GHz以上,下行速率约为50 Mbit/s。NTN架构中的5G网元映射见表2。

表1 5G非地面网络典型部署场景

参数	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5
轨道平台与高度	GEO (35 786 km)	GEO (35 786 km)	Non-GEO (最低600 km)	Non-GEO (最低600 km)	高度在8 ~ 50 km间的无人飞行系统
载波 (平台—终端)	(Ka频段) 上行: 约30 GHz 下行: 约20 GHz	(S频段) 上/下行: 约2 GHz	(S频段) 上/下行: 约2 GHz	(Ka频段) 上行: 约30 GHz 下行: 约20 GHz	约6 GHz
波束模式	固定波束	固定波束	移动波束	固定波束	固定波束
双工模式	FDD	FDD	FDD	FDD	FDD
信道带宽 (DL+UL)	最高2 × 800 MHz	最高2 × 20 MHz	最高2 × 20 MHz	最高2 × 800 MHz	最高2 × 80 MHz (移动用户) ; 最高2 × 1 800 MHz (固定用户)
非地面网络架构选择 (参考表2)	A3	A1	A2	A4	A2
非地面网络终端类型	VSAT (固定或移动)	用户终端 (3GPP class 3)	用户终端 (3GPP class 3)	VSAT (固定或移动)	用户终端 (3GPP class 3) 和VSAT
非地面网络终端分布	100%室外	100%室外	100%室外	100%室外	室内和室外
非地面网络终端速度	最高可达1 000 km/h (例如飞机)	最高可达1 000 km/h (例如飞机)	最高可达1 000 km/h (例如飞机)	最高可达1 000 km/h (例如飞机)	最高可达500 km/h (例如高铁)
接入方式	GEO基于中继的间接接入	GEO的直接接入	Non-GEO的直接接入	Non-GEO基于中继的间接接入	支持3GPP移动用户的低时延服务 (包含室内和室外)
支持用例	eMBB: 多播、固定蜂窝连接、移动蜂窝连接、网络弹性、边缘网络传输、移动蜂窝混合连接、节点组播直连/广播	eMBB: 区域公共安全、广域公共安全、移动广播直连、广域物联网服务	eMBB: 区域公共安全、广域公共安全、广域物联网服务	eMBB: 多归属、固定蜂窝连接、移动蜂窝连接、网络弹性、集群、移动蜂窝混合连接	eMBB: 按需热点

表2 NTN架构中的5G网元映射

架构	NTN终端	航天器或高空平台搭载	NTN网关
A1:通过弯管卫星/空中平台为用户提供接入服务	用户终端	RRH	5G基站 (gNB)
A2: 通过搭载5G基站的卫星/空中平台为用户提供接入服务	用户终端	5G基站 (gNB) 或中继节点	连接核心网的路由
A3: 通过弯管卫星/空中平台为中继节点提供接入服务	中继节点	RRH	5G基站 (gNB)
A4: 通过搭载5G基站的卫星/空中平台为中继节点提供接入服务	中继节点	5G基站 (gNB) 或中继节点	连接核心网的路由

根据表2，在星地功能分割上，3GPP只考虑了星上搭载完整基站gNB或者只有射频拉远头（Remote Radio Head，RRH）两种形式。

2.3 ITU组织开展的工作

ITU是主管信息通信技术事务的联合国机构，负责分配和管理全球无线电频谱与卫星轨道资源，制定全球电信标准，向发展中国家提供电信援助，推动全球电信发展。ITU下设3个部门，分别为电信标准化部门ITU-T、无线电通信部门ITU-R及电信发展部门ITU-D。与卫星通信相关的规范由无线电通信部门ITU-R负责，其中与卫星通信在频谱和轨道资源分配管理相关的资料，大多集中在ITU-R建议书及报告中^[13]。

ITU在ITU-R WP5D第22次会议上将5G正式命名为IMT-2020，并确定了5G愿景与时间进度等关键内容。

在其报告中提出了中继到站、小区回传、动中通、混合多播4种星地5G融合的应用场景；并提出支持这些场景必须考虑的关键因素，包括多播支持、智能路由支持、动态缓存管理及自适应流支持、时延、一致的服务质量（QoS）、NFV（网络功能虚拟化）/SDN（软件定义网络）兼容、商业模式的灵活性等^[8]。

同时，ITU在促进卫星与5G频率科学、合理利用方面开展了系列工作。在世界无线电通信大会WRC-15上，ITU明确了在6 ~ 84 GHz范围内需探索5G新的可用频率，为此需开展一系列关于卫星与5G的频谱共用与电磁兼容性分析^[13]。值得注意的是，在WRC-19上，世界各国对Non-GEO投入使用规则进行了修改，要求占用特定频率的通信星座必须在14年内完成所有卫星发射。这将极大地推动空间网络的工程建设步伐，促进其产业链形成，5G已有成果将发挥更大的作用。

2.4 Sat5G和SatIS5组织开展的工作

Sat5G是欧盟“H2020 5G PPP”阶段二资助的项目,项目成员包括欧洲卫星公司(SES)、萨里大学等。

Sat5G通过为5G提供低成本的卫星解决方案,加速5G部署,为卫星产业链提供新的市场增长机会。其整个项目计划30个月完成,主要开展6个方面的工作:推动相关的5G及卫星研究团体,定义和评估卫星与5G融合的网络架构解决方案;研究卫星与5G融合的商业价值主张;针对所确定的研究挑战,定义和开发卫星与5G融合的关键技术;在实验室测试环境中,验证关键技术的合理性;演示卫星与5G融合的特性和用例;为ETSI和3GPP中关于卫星与5G融合的相关标准化研究做贡献^[8]。

为实现上述目标,Sat5G确定了卫星融入5G的关键使用情形和6项关键技术。前者包括多媒体内容和多址接入移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC)、虚拟网络功能(Virtualized Network Function, VNF)软件的边缘分发和减负、5G固定回程、5G to Premise、5G移动平台回程;后者为卫星网络功能虚拟化、融合5G—卫星的资源编排机制和业务管理、为小蜂窝连接建立链路聚合方案、推动卫星通信中5G的特点/技术、星地接入间建立优化/协调关键管理和授权方法、发挥多播优势以实现内容分发和VNF分布^[8]。

依托Sat5G项目研究成果,其成员在3GPP中推动了多项卫星5G融合的标准化工作,其中包括TR38.811、TR22.822等重要报告。此外,2018年6月,在2018欧洲网络与通信会议上,Sat5G联盟现场演示了基于Pre-5G测试平台的卫星与3GPP网络架构的融合。该平台由SDN/NFV/MEC和GEO卫星组成,演示还包含卫星回程功能及Pre-5G网络中的多媒体内容有效边缘传输等关键特性^[8]。2019年6月,Sat5G项目团队在西班牙举行的EuCNC 2019上成功演示5G卫星系列操作。演示通过并行的卫星和地面传输路径融入5G网络,为消费4K视频用户提供增强质量体验,并着重展示了5G系统使用卫星链接提供实时内容的优势^[13]。

2019年11月,Sat5G项目组在英国的行业简报会上宣布,通过使用测试平台,已经在实时卫星链路上执行了多个5G用例演示,并且卫星链路执行了不同的任务。项目通过在直接和间接连接卫星领域进行研究演示,证明了卫星在以下方面具有优势:向网络边缘传递内容,提供蜂窝基站回程,改善办公场所的宽带体验,以及通过GEO和MEO卫星为飞行移动平台提供接入服务。Sat5G项目已经成功地在OpenStack和Kubernetes上设计和部署了几个卫星专用的VNF,并开发了一个集成架构,以便卫星链路可以无缝地承载网络切片。2020年2月,在德

国举办的研讨会上,Sat5G演示了用于连接飞机内部和外部地面数据网络的5G原型系统。通过模拟的GEO卫星链路,依托SkyEdgellc虚拟平台,现场演示了5G内星地网络的完整集成。此外,还发布了依托O3b中轨高通量卫星星座的5G星地网络空中端到端连接的视频演示。

此外,欧洲航天局于2017年3月启动了5G背景下星地一体化SatIS5项目,其目标是构建一个大规模端到端的5G集成网络概念验证测试平台,可实现、部署和评估一个完整的星地5G网络,展示eMBB和大规模机器类通信(eMTC)场景中星地集成的优势。该平台已于2018年8月投入使用。

3 网络架构

当卫星采用透明转发器模式时,卫星只承担射频信号的转发接口,所有空中接口涉及的处理主要在地面处理。此时如何设计网络架构需要解决以下几个问题:如何在星地之间分割网元功能;如何解决星座内卫星之间相对移动对架构的影响;如何支持地面转发和不落地转发等多种业务模式。

目前,5G核心网采用了服务化架构(Service Based Architecture, SBA)^[14],原来与特定硬件设备相耦合的网元功能转化为相对独立、可重用、松耦合、可灵活调用的“微服务”^[15],在云计算设施上被调度执行,从而实现控制面与业务面的分离。基于这一思想,参考文献[16]提出了如图1所示的卫星5G网络总体架构。在图1中,系统基于处理转发器,至少将一个完整的5G基站gNB部署在星上。卫星和地面关口站的计算和存储资源构成一个统一的资源池,按需支撑部分业务相关的核心网服务调度在卫星上,例如接入和移动性管理功能(Access and Mobility Management Function, AMF)、会话管理功能(Session Management Function, SMF)以及用户面功能(User Plane Function, UPF)。

由于目前新一代卫星通信普遍采用LEO或者MEO星座,卫星处于相对于地面、相对于卫星之间的不停歇运动状态^[15]。因此很难将一个基站gNB的功能按照“CU-DU”分离的思路^[16]分散到不同的卫星或者星地之间,必须在每颗卫星上实现完整基站功能。对于核心网服务来说,将“服务”调度在卫星上主要是满足以下场景需求:高安全等级的特殊用户为了避免业务落地过程中遭到窃听,要求实现空间直接连接;在某些场景中,落地交换可能具有过大的时延,不满足QoS指标要求,例如同一颗卫星下两个应急用户的信息交换,将UPF调度在该卫星上可明显降低时延;地面信关站与卫星之间的激光或者微波馈电链路因气象或者其他因素而不可用时,

提供基本服务能力,提升系统的稳健性。

在图1所示架构中,卫星与地面覆盖区之间的相对运动问题可以用终端在基站间的切换流程来解决。星上基站与星上核心网服务、地面关口站服务之间动态互联问题可以用图2所示的架构来解决。卫星上搭载MPLS (Multi-Protocol Label Switching) 协议的边界标签交换路由器 (Label Edge Router, LER) 和标签交换路由器 (Label Switch Router, LSR)。地面配置SDN服务器根据可预先计算的卫星轨道,采用快照序列等星座路由算法^[17],周期性建立、拆除和维护LER到LER之间的标签交换路径 (Label Switch Path, LSP)。这种将MPLS和SDN的结合、集中管控的架构符合当前业界主流的SD-WAN架构^[18-19]思路,不仅实现了星上基站gNB与核心网之间互联问题与星座动态拓扑问题之间的解耦,还能够方便地根据需要构建虚拟专用网络 (Virtual Private Network, VPN) 或者进行网络切片。这种能力对作为卫星通信主要客户的政府、企业以及军事用户来说是非常重要的。

4 传输关键技术

4.1 多频段星地一体化波形设计技术

卫星5G空中接口设计拟解决的首要问题是,在高

低频传输信道模型、通信仰角、可用带宽、终端射频、天线特性不一致的条件下,如何设计波形,将频段传输纳入一个框架,满足对支持卫星场景、峰均比、频谱效率、速率以及产业化快速推广的需求。目前,ITU在参考文献[20]中给出了20 GHz及其以下频段的星地链路传输模型可以采用“两状态Markov+Loo多径”模型,不同可用仰角、不同频段和场景下多径分量强度存在明显差异。此外,对于LEO卫星来说卫星轨道运动还将造成多普勒效应以及动态时变的星地时延^[16]。

目前,对于L、S低频段来说,即使不考虑可用带宽的约束,由于链路余量有限,采用下行OFDM/上行DFT-S-OFDM^[21]方案也有一定的困难。以目前最为先进的铱星为例,轨道高度780 km,其卫星波束下行波束EIRP取32.9 dBW (考虑扫描到60°覆盖边缘天线增益下降6 dB,终端仰角小于10°),地面手持型终端品质因数约-28 dB/K。假设解调门限5 dB (QSPK和1/2卷积码),即使仅考虑自由空间传播损耗,1.024 Mbit/s速率链路余量仅为3.2 dB。如果进一步考虑链路的低仰角带来的遮挡、多径等衰减因素,这种链路余量是难以支持类似地面5G较大载波配置的。我国发展自主星座还要进一步考虑可用频段资源限制问题。目前在L、S频段用于MSS业务的仅有上行1 668~1 675 MHz、下行1 518~1 525 MHz可

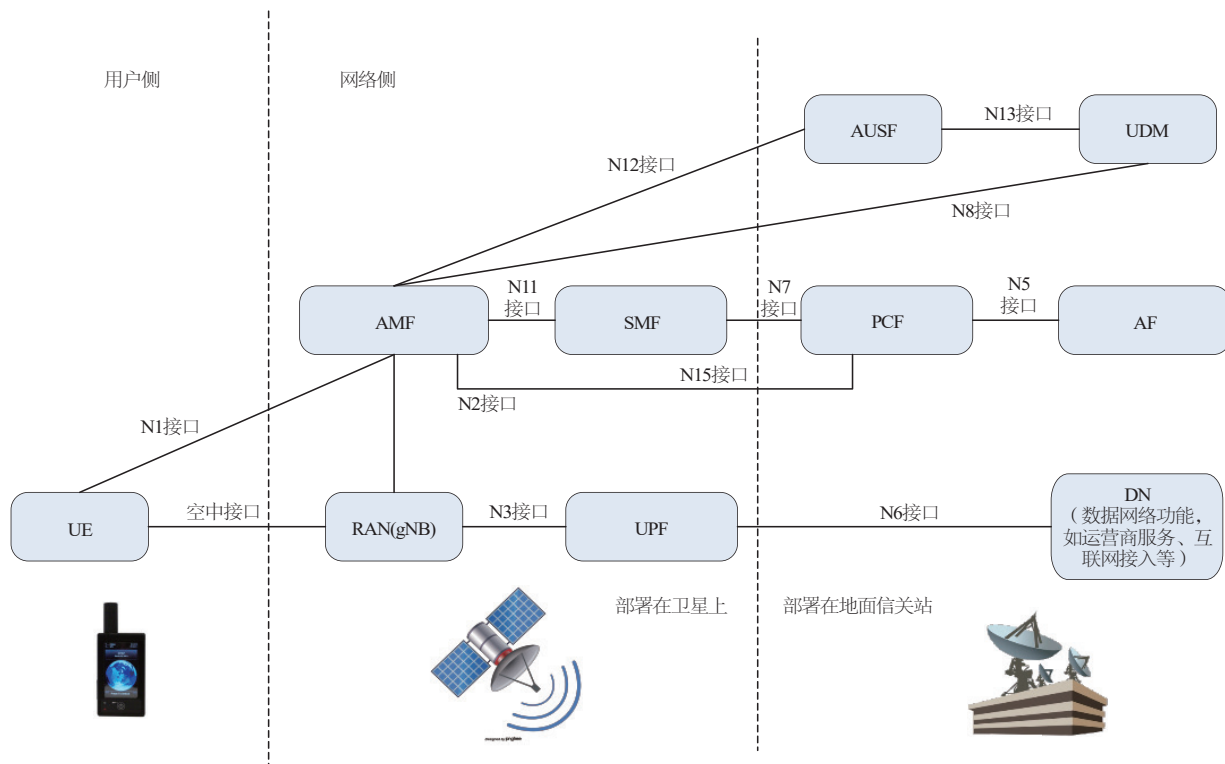


图1 卫星5G总体架构设想

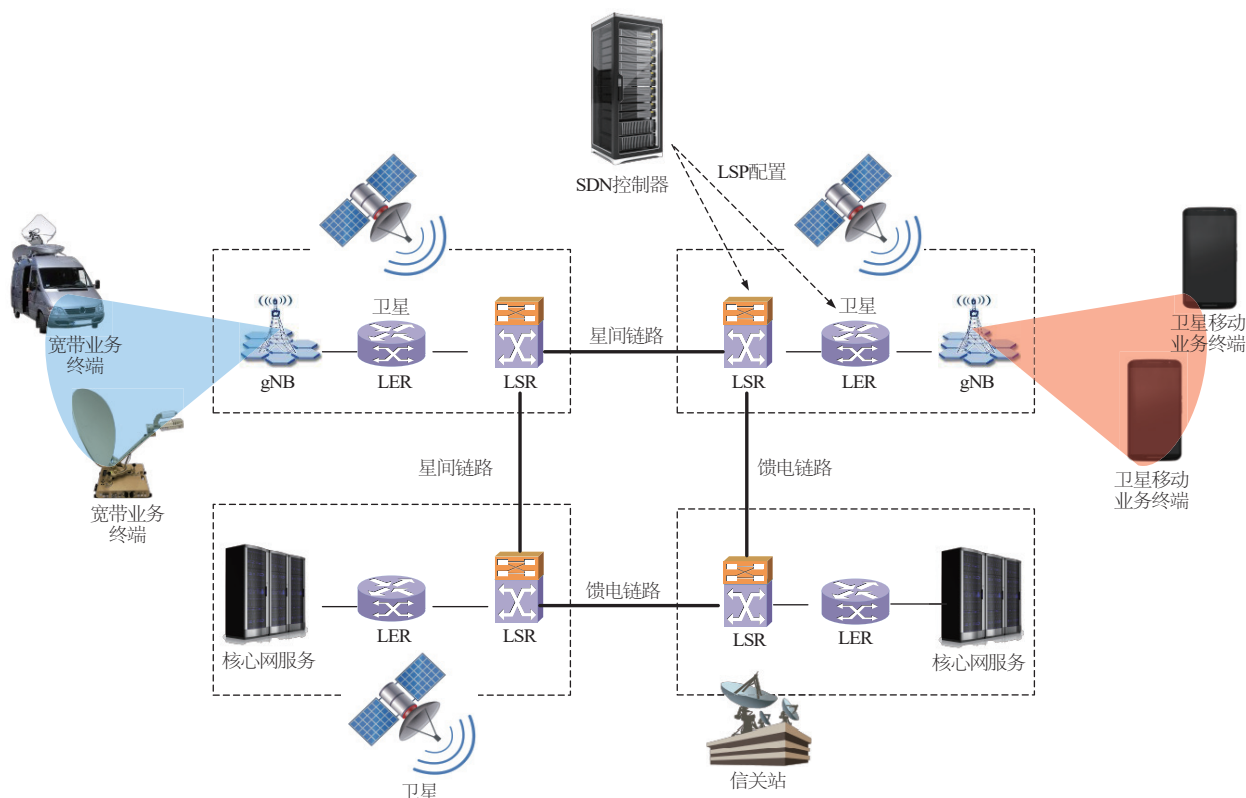


图2 卫星5G网络的空间组网架构

用,采用7色复用后每个波束带宽仅为1 MHz。

在Ka和Ku等高频段,卫星轨道运动造成的多普勒频移可以通过基于轨道预测的频偏补偿来解决,但是仍然需要设计相关机制来解决轨道预测误差以及终端自身运动估计误差带来的残余频偏问题。采用可变OFDM子载波带宽的设计方案可有效抵抗残余频偏对系统性能的影响,但过大的子载波配置又降低了可接纳的用户数以及分配的灵活性,因此需根据场景选择合适的波形配置,例如为飞机、高铁用户选择较大的子载波。虽然在上行方向采用DFT-OFDM已经获得了一些共识,但在下行方向仍然有观点认为可以采用DVB-S2X^[22]标准的单载波时分复用波形SC-TDM设计,因为其具有相对更好的PAPR性能。

目前,5G仍然在探索平衡载波灵活性与PAPR性能,参考文献[23]研究了如何利用滤波器降低5G信号的低峰比和接收机的复杂度。目前,受雷达信号处理启发,面向6G业界提出了一种新型的正交时间频率空间(Orthogonal Time Frequency & Space, OTFS)调制技术^[24]。OTFS发射机将二维逆有限辛傅里叶变换应用于基带数据,然后进行Heisenberg变换得到时域信号。接收机对信号先后进行Wigner变换和有限辛傅里叶变换获得基带数据。OTFS可

视为一种时频域的扩频技术,每个QAM信号由一个扩展至时频二维空间网格上的基函数来承载^[24]。OTFS的优势在于更易于与高阶调制、MIMO相结合,对窄带干扰具有良好的稳健性,且通过支持一种称为“多普勒横向分配”的机制使其有望实现与单载波PAPR性能,这对未来解决星地一体化波形问题提供了新的思路。

4.2 卫星物联网用户的多址接入

卫星物联网业务是近年来备受瞩目的一个领域。2020年8月,联发科携手Inmarsat组织通过Alphasat L波段GEO卫星,完成了基于NB-IoT^[25]标准卫星物联网业务的传输实验。远距离无线电(Long Range Radio, LoRa)在卫星物联网中的应用亦有研究^[26]。

卫星物联网设计除了进一步提升连接密度之外,还需重点解决低轨道卫星覆盖场景中物联网终端因与卫星之间相对运动而周期性地在波束(小区)间发生跨区切换而导致的信令风暴以及减轻终端在这个过程中的能源消耗。非正交多址接入技术^[27]以及无授权传输机制是解决这个问题一个可行手段。

在面向地面移动通信的非正交多址接入中,可以通过基站实时的时间提前量(Timing Advance, TA)通知

以及采用基于循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 的OFDM/DFT-S-OFDM波形实现多用户间的严格同步。在此情况下, 可以采用调制符号级 (Symbol-level) 的多用户联合接收机, 如消息传递算法 (Message Passing Algorithm, MPA)、期望传递算法 (Expectation Propagation Algorithm, EPA) 等^[28], 降低用户间干扰、提升检测正确率。当用户处于非同步的情况时, 也可以采用基于功率域的用户叠加方式, 在接收端采用串行干扰删除 (Successive Interference Cancellation, SIC)^[29]实现非同步的多用户接收。然而, 卫星物联网多址通信中用户间通常无法实现严格同步, 此外卫星同一个波束内的多用户间功率差异很可能不显著, 所以传统的MPA或SIC接收机将无法适用, 如何设计合适算法是亟待解决的问题, 基于图样分割非正交多址接入、稀疏码多址接入^[30]等的编码域方案是可能的解决方案。

基于非正交多址接入, 在用户上行传输过程中, 用户的传输不需要来自基站的动态和显式调度许可, 而是从基站与用户预先约定好用来发送信号的多址接入特征序列库中随机选择合适的特征序列 (例如, 码序列、功率电平、交织序列等) 再随机接入信道 (Random Access Channel, RACH) 来发送信息。当存在多个用户随机选择到相同的多址接入特征序列时, 用户间互相干扰严重, 导致星上基站端无法成功接收数据。因此还需要利用少量信令显式指示用户可以或者不能使用某些特性序列。由于用户的多址接入特征序列将保持相当长的一段时间, 这将显著降低系统信令开销和终端能量损耗。

4.3 无线资源管理和干扰避免

在5G框架里, 资源管理的主要对象是每一个由子载波、时隙构成的资源块 (Resource Block, RB) 以及与MIMO处理相关资源的分配问题。在卫星场景中, 波束、功率资源在多个波束内如何高效共享是在这个框架基础上必须进一步加以重点考虑的问题。

当前, Starlink、Telesat等Ka频段星座的卫星都广泛配置了相阵控多波束天线, 其波束可扫描范围远大于每个波束的宽度, 为了实现覆盖区域内多个用户的服务, 波束必须在多个波位之间不断跳变、扫描。由于波位数量可能高达数百个, 即使每个波位内进行毫秒级的驻留, 也可能整体上在最恶劣情况下导致用户数据在空中接口秒级的时延。在此期间, 信号同步的丢失、混合自动重传请求 (Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ) 进程的往返时延 (Round-Trip Time, RTT) 过大导致的效率低下、广播及专用控制信道在空闲波束

内的分配以及波束间公平性的平衡都是需要进一步研究的问题。GEO场景因为其固有的星地长时延, 情况还将进一步恶化。此外, 卫星是一个典型的功率受限系统, 为了避免波束间由于覆盖区业务不均衡导致的部分波束过早饱和问题, 一般采用每束多馈源 (Multiple Feed per Beam, MFB) 方案^[31]使星载功放放在多个波束间共用。为了使有限的功率资源、处理资源与实际需求相匹配, 常使用跳波束 (Beam Hopping, BH) 技术^[32]。跳波束技术对时间进行分片, 在同一时刻的多个可用波位上只有一部分点波束发射功率, 未来必须将这个功率分配机制与5G资源调度结合在一起。

干扰是卫星5G资源分配必须考虑的另一个问题。在宽带卫星通信的场景中, 不仅要考虑与其他系统LEO、GEO之间的干扰, 还要考虑自身未来多个轨道之间、不同卫星间的干扰。目前与GSO的干扰协调有效方案是利用NGSO与GSO卫星轨道高度差产生的俯仰渐进隔离角避免干扰^[33]。简单地说主要是避免被干扰对象落入卫星与终端之间连线或者以连线延长线为轴的圆锥体内, 圆锥体的底半径取决于干扰的门限, 一般来说来自其他系统的干扰不能使噪声温度增加7%。这一方法也适用于不同NGSO系统之间以及自身多颗卫星之间的干扰协调, 前提是对被干扰卫星的轨道进行精确的估计。

此外, 基于频谱感知的NGSO和GSO干扰协调技术近年来也得到重视^[34]。随着Starlink、Kuiper星座的规模增大到数千或数万颗, 巨型星座的网络环境将变得越来越动态和复杂, 为了应对这些挑战, 人工智能 (AI) 的应用至关重要。目前, 基于深度强化学习的频谱共享已经在地面移动通信系统中得到研究^[35]。

5 未来发展趋势

当前, 卫星作为未来网络的重要组成部分已经得到了广泛的共识。美国Starlink星座系统号称“卫星6G”网络, 英国电信首席网络架构师宣称6G将是“5G加卫星网络 (通、导、遥)”。ITU在其“2030网络技术焦点组”构想的未来基础设施架构中认为地面和卫星融合也是一个重要的发展思路。

2019年11月, 我国科技部在北京召开6G技术研发启动会, 并于2020年通过重点研发计划支持包含卫星通信的一系列关键技术研究课题。未来6G拟实现较5G流量密度提升10~1 000倍、连接密度提升10~1 000倍以及终端移动性大于1 000 km/h等技术指标。这需要在天地一体的框架下, 通过立体多维覆盖、空间立体组网、多频段协同通信等关键技术突破来满足。

按照世界各国规划,6G拟于2030年投入使用,在其发展过程中将从需求、愿景、用频、研发、组网、服务到运维等多层面真正实现天地统一规划、设计、建设和管理,实现从创新、产品、工程到应用服务的全产业链协同发展。

参考文献:

- [1] MARY M. Internet trends 2019[EB]. 2019.
- [2] ZHANG Y Z, WANG Z H, ZHANG G X. Status and analysis of O3b constellation system[J]. Space International, 2017(3):29-32.
- [3] ZHAI J Q, LI X F. Introduction of OneWeb system and domestic LEO internet satellite system[J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(6):1-7.
- [4] JEFF F. SpaceX's space-Internet woes: Despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12,000 satellites in 2019[J]. IEEE Spectrum, 56(1):50-51.
- [5] 中国信息通信研究院. 5G经济社会影响白皮书[EB]. 2017. China Academy of Information and Communications Technology. 5G Economic and social impact white paper[EB]. 2017.
- [6] LI Z B, SI W L, HAN J. Frequency-offset estimation algorithm for GMR-1 3G satellite communication system[J]. Communications Technology, 2019, 52(2):391-396.
- [7] NARENTHIRAN K, KARALIOPOULOS M, EVANS B G, et al. S-UMTS access network for broadcast and multicast service delivery: The SATIN approach[J]. International Journal of Satellite Communications & Networking, 2004, 22(1):87-111.
- [8] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面5G的融合初探(一)[J]. 卫星与网络, 2018, 188(9):14-21.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. A preliminary study on the integration of satellite communications and terrestrial 5G (1)[J]. Satellite & Network, 2018, 188(9):14-21.
- [9] WONG I C, OTERI O, MCCOY W. Optimal resource allocation in uplink SC-FDMA systems[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(5): 2161-2165.
- [10] 3GPP. Study on new radio to support non-terrestrial networks: TR38.811[S]. 2017.
- [11] 3GPP. Study on using satellite access in 5G :TR 38.822[S]. 2018.
- [12] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN): TR 38.821[S]. 2019.
- [13] 徐冰玉, 韩森. 国际卫星通信标准研究进展[J]. 信息通信技术与政策, 2019(11): 41-44.
XU B Y, HAN M. Study on international standards of satellite communications[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(11): 41-44.
- [14] 张亚飞, 阎东. 5G核心网服务化架构研究[J]. 信息通信, 2019 (2):226-227.
ZHANG Y F, YAN D. Research on service architecture of 5G core network[J]. Information & Communications, 2019 (2):226-227.
- [15] 3GPP. System architecture for 5G System(5GS) Stage2(Release 16) :TS 23.501[S]. 2019.
- [16] 汪春霆, 李宁, 翟立君, 等. 卫星通信与地面5G的融合初探(二)[J]. 卫星与网络, 2018, 188(11):22-26.
WANG C T, LI N, ZHAI L J, et al. A preliminary study on the integration of satellite communications and terrestrial 5G (2)[J]. Satellite & Network, 2018, 188(11):22-26.
- [17] 晏坚. 低轨卫星星座网络IP路由技术研究[D]. 北京: 清华大学. 2010.
YAN J. Research on IP routing technology of LEO satellite constellation network[D]. Beijing: Tsinghua University. 2010.
- [18] ALI E K, MANEL M, HABIB Y. An efficient MPLS-based source routing scheme in software-defined wide area networks (SD-WAN) [C]//2017 IEEE/ACS 14th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA). Piscataway: IEEE Press, 2017.
- [19] 胡绯绯. 变革运营商全球业务市场运营模式且看SD-WAN[J]. 通信世界, 2019(26):41-42.
HU F F. Change the operating model of operators in the global business market and look at SD-WAN[J]. Communications World, 2019(26):41-42.
- [20] Recommendation ITU-R P.681-10. Propagation data required for the design of earth-space land mobile telecommunication system[S]. 2017.
- [21] SAHIN A, YANG R, BALA E, et al. Flexible DFT-S-OFDM: Solutions and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11):106-112.
- [22] 卢六翻. DVB-S2X技术解析[J]. 广播与电视技术, 2014, 41(7):97-99.
LU L H. Analysis on DVB-S2X Technology[J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2014, 41(7):97-99.
- [23] ANKARALI Z, PEKOZ B, ARSLAN H. Flexible radio access beyond 5G: A future projection on waveform, numerology & frame design principles[J]. IEEE Access, 2017:18205-18309.
- [24] HADANI R, MONK A. OTFS: A new generation of modulation addressing the challenges of 5G[R]. 2018.
- [25] SINHA R S, WEI Y Q, HWANG S H, et al. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT[J]. ICT Express, 2017, 3(1):14-21.
- [26] 吴庭薇, 谢继东, 张更新. LoRa调制在低轨卫星物联网下适应性研究[J]. 电视技术, 2018, 42(9):21-25.

- WU T W, XIE J D, ZHANG G X. Adaptability of LoRa modulation in LEO satellite internet of things[J]. Video Engineering, 2018, 42(9): 21-25.
- [27] 肖可鑫, 夏斌, 陈智勇. 非正交多址接入的关键技术研究[J]. 中兴通讯技术, 2017, 23(3):6-10.
- XIAO K X, XIA B, CHEN Z Y. Key technologies for non-orthogonal multiple access[J]. ZTE Technology Journal, 2017, 23(3):6-10.
- [28] 唐万伟, 康绍莉. 面向5G非正交多址接入系统的检测算法研究[J]. 高技术通讯, 2018, 28(Z1):813-819.
- TANG W W, KANG S L. Research on detection algorithm for 5G non-orthogonal multiple access system[J]. High Technology Letters, 2018, 28(Z1):813-819.
- [29] 郭永娜, 王钢, 郑黎明, 等. 5G非正交多址接入中干扰消除技术研究[J]. 无线电通信技术, 2016, 42(5):6-9.
- GUO Y N, WANG G, ZHENG L M, et al. Research on interference cancellation in non-orthogonal multiple access system[J]. Radio Communications Technology, 2016, 42(5):6-9.
- [30] 张长青. 面向5G的非正交多址接入技术的比较[J]. 电信网技术, 2015, 257(11):42-49.
- ZHANG C Q. Comparison of 5G-oriented non-orthogonal multiple access technologies[J]. Telecommunications Network Technology, 2015, 257(11):42-49.
- [31] 陈修继. 通信卫星多波束天线的发展现状及建议[J]. 空间电子技术, 2016, 13(2):54-60.
- CHEN X J. Development status and proposals for multi-beam antennas of communication satellites[J]. Space Electronic Technology, 2016, 13(2):54-60.
- [32] HAN H, ZHENG X, HUANG Q, et al. QoS-equilibrium slot allocation for beam hopping in broadband satellite communication systems[J]. Wireless Networks, 2015, 21(8):2617-2630.
- [33] 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(9):833-840.
- JIN J, LI Y Q, ZHANG C, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2018(9):833-840.
- [34] ZHANG C, JIANG C, JIN J, et al. Spectrum sensing and recognition in satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3):2502-2516.
- [35] TAN J, ZHANG L, LIANG Y C, et al. Intelligent sharing for LTE and Wi-Fi systems in unlicensed bands: A deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(5):2793-2808.

[作者简介]



翟立君 (1981—), 中国电子科技集团公司集团专家, 高级工程师, 主要研究方向为卫星移动通信和5G/6G移动通信等。



潘流铭 (1988—), 中国电子科技集团公司电子科学研究院工程师, 主要研究方向为卫星通信和5G/6G移动通信等。



汪春霆 (1965—), 中国电子科技集团公司电子科学研究院研究员, 博士生导师, 中国电子科技集团公司首席科学家, 主要研究方向为卫星通信、天地一体化信息网络等。