

导读:随着业务逐渐融合和部署场景不断扩展,地面网络与包括高轨卫星网络、中低轨卫星网络、高空平台、无人机在内的空间网络相互融合,将构建起全球广域覆盖的空天地一体化立体网络,为用户提供无盲区的宽带移动通信服务。为了促进天地一体化技术交流,推动我国卫星通信与地面网络技术融合发展,《电子技术应用》杂志 2022 年第 6 期推出“天地一体化技术”主题专栏,论文内容从天地一体的融合网络

架构入手,重点围绕星地融合 5G 网络架构增强技术、低轨星座边缘计算技术、卫星柔性太阳能电池阵关键技术等领域展开介绍,期待为卫星网络与地面网络的融合技术研究与应用部署提供有益的借鉴。

特约主编:朱雪田,北京邮电大学工学博士,教授级高级工程师,中关村国家自主创新示范区高端领军人才,现就职于中国联通研究院。长期从事 5G/6G 移动通信技术与业务创新研发工作,作为项目组长先后负责多个 5G/6G 领域的移动通信国家重大项目,发表学术论文超过 100 篇,发明专利 100 余项,个人专著 4 本。



星地融合 5G 网络架构增强技术研究*

王胡成,徐 晖,孙韶辉

(大唐移动通信设备有限公司,北京 100083)

摘要:星地融合为 5G 网络带来更强的覆盖能力、更灵活的组网能力和更健壮的网络结构,使得 5G 网络真正可能实现万物互联,因此成为 5G 网络演进的重要方向。首先介绍了在后 5G 时代支持星地融合的必要性,然后从网络架构和技术标准的角度分析了当前星地融合 5G 网络的发展阶段和技术现状。基于技术现状,分析星地融合 5G 网络在系统架构演进方面面临的问题,并给出架构增强技术方案。

关键词:星地网络融合;5G;系统架构

中图分类号:TN929.5;TP393

文献标识码:A

DOI:10.16157/j.issn.0258-7998.223015

中文引用格式:王胡成,徐晖,孙韶辉.星地融合 5G 网络架构增强技术研究[J].电子技术应用,2022,48(6):1-4,9.

英文引用格式:Wang Hucheng,Xu Hui,Sun Shaohui. Research on architectural enhancements for integrating satellite into 5G networks[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(6): 1-4, 9.

Research on architectural enhancements for integrating satellite into 5G networks

Wang Hucheng, Xu Hui, Sun Shaohui

(Datang Mobile Communication Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: Integration of satellite and terrestrial networks would bring better coverage, more flexible networking and more robust network architecture for 5G, which makes the 5G network connecting everything possible, and then becomes an important evolution direction for 5G network. This paper firstly introduces the necessity to support integration of satellite and terrestrial networks in B5G era, then analyses the developing phases and technical status of 5G network integrating with satellite from network architecture and technical standard point of view. Based on the technical status, the paper further analyses issues on system architecture evolution that 5G network integrating with satellite faces, and puts forward some architectural enhancement solutions, including 5G system enhancement on supporting satellite backhaul and User Plane Function (UPF) on-board.

Key words: integration of satellite and terrestrial network; 5G; system architecture

* 基金项目:国家重点研发计划(2020YFB1807901)

0 引言

第5代移动通信(5 Generation, 5G)愿景是“信息随心至、万物触手及”,5G网络不仅要提供更高的数据传输速率,还应提供无处不在的移动网络接入,以满足用户无处不在的通信需求。然而根据调查,目前全球地面移动通信服务只能覆盖约20%的陆地面积、6%的地球表面积,在海洋、山川、森林、沙漠等边远地区,地面基站的建设成本和维持成本很高,无法通过传统地面网络来5G覆盖^[1]。相比地面通信,卫星通信能够利用高、中、低轨卫星实现广域甚至全球覆盖,从而帮助5G真正实现万物互联。由此可见,卫星网络和地面网络融合是5G发展的必要构成。

此外,目前各卫星系统的通信制式、接口协议都是独立发展的,星地系统之间以及不同卫星系统之间无法互通,形成了“烟囱”效应,既不能支持服务共享,又容易造成重复投入,造成网络低效和资源浪费,不利于通信产业的发展。而5G网络经过多年的技术迭代,其技术体制、网络功能、接口协议等已经形成完整的标准体系,已经发展为成熟的商用网络,为全球用户提供了一致的用户体验。因此,卫星网络可以借助国家大力发展5G网络的契机,完成与地面5G网络体制的融合,从而发展成能够覆盖全球的,且能够提供统一、标准化服务的商用通信系统。

虽然卫星通信相对于地面移动通信在覆盖范围、组网效率、可靠性、安全性、成本等有着极大的优势,但卫星通信并不能替代地面移动通信,因为地面网络在系统容量、覆盖深度、数据传输速率等方面占据绝对的优势。因此,卫星通信不应成为地面蜂窝通信的竞争者,而应当成为5G系统的必要构成,形成地面网络和卫星网络的相互补充,例如城区地面覆盖,边远地区卫星覆盖。因此,星地融合5G网络是移动通信网络发展的重要趋势。

1 星地融合5G网络的技术发展现状

星地融合为5G网络带来更大的发展潜力,能够使得5G网络真正做到万物互联,因此国内外学术界和产业界纷纷掀起了星地融合5G网络架构与关键技术的研究热潮,并公认星地融合也是未来6G网络的重要特征之一。

卫星通信最初作为地面通信网络的回传网络存在,文献[2]指出低轨星座可以用于在陆地网络拥塞时进行数据分流,或者提供多跳回传连接gNB和远端5G核心网。文献[3]进一步考虑了采用密集低轨星载为传统地面网络提供回传服务,并提出了在多个低轨星提供回传连接时最大化用户数和与总用户速率和的联合优化问题。

文献[4]从星地网络发展的视角展望了星地融合的前景,认为到2025年,将有100多个高通量卫星通信系统,能够提供T比特率的数据传输速率,这些卫星系统能够作为无线接入网融合到5G系统中。当卫星工作在弯管模式时,5G基站(generation NodeB, gNB)将于地面网

关合设;当卫星工作在星上处理模式时,gNB将部署到卫星上。文献[5]也总结了目前第三代伙伴计划协议(the 3rd Generation Partnership Project, 3GPP)研究的NTN网络架构,从载荷类型上分为透明载荷类型和再生载荷类型;从用户接入连接类型上分为直接连接和间接连接。其中透明载荷类型下,卫星仅提供用户与地面基站的连接;而再生载荷类型下,卫星支持gNB功能且能够使用星间链组网。

在面向5G-Advance甚至6G的星地融合网络中,卫星载荷不仅支持基站功能,甚至支持部分核心网功能,支持天基组网,例如文献[6]、[7]都提出,未来星地融合网络架构下,核心网功能将可能在地基和天基网络上进行功能柔性分割,通过天基核心网的功能定制,可以支持基于天基网络的控制优化,实现天基地基灵活组网、业务数据动态路由以及天地协同传输等。

从上述文献分析可知,星地融合的思路有多种,工业界也从工程角度对星地融合的发展进行了展望。文献[8]系统地梳理了卫星通信与地面5G融合在传输体制、接入与资源管理、移动性管理等方面的挑战,并按照覆盖、业务、用户、体制、系统多层次融合,星地功能分割、网络虚拟化部署等方面提出了卫星通信与地面5G融合的思路。文献[9]结合实际星座场景的工程约束条件,梳理了卫星通信与地面5G融合的3个发展阶段的具体问题和解决方案。其中,3个发展阶段包括承载网融合、核心网融合和接入网融合:承载网融合主要是通过卫星通信取代偏远地区地面基站与核心网之间的光纤功能,从而降低系统建设成本;核心网融合能够实现卫星网络和地面网络的统一管控和运营,从而实现多模终端在不同的星地网系间切换;接入网融合则是无线链路空口的体制统一设计,采用相同的空口技术体制,从而完成同样一套基带及射频能够接入卫星网络和地面5G网络。

随着5G网络的逐渐成熟和卫星通信技术的快速发展,许多研究和标准化组织开始对星地融合5G网络的场景、需求、关键技术展开研究。

(1)国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)

ITU认为星地融合网络是未来网络的重要组成部分,其卫星相关的工作主要在国际电信联盟无线电通信部(International Telecommunication Union-Radio Communication Sector, ITU-R)第四研究组第二工作组中开展。2016~2019年完成的下一代接入技术(Next Generation Access Technology, NGAT)卫星接入技术(Satellite Access Technology, SAT)项目中提出了星地5G网络融合的4种应用场景^[10]:中继宽带传输业务,数据回传与分发业务,宽带移动通信业务,混合多媒体业务。同时提出星地融合解决方案在支持上述场景时需要考虑以下技术要素:多播/单播支持、智能路由、动态缓存管理及自适应流的支持、服务

质量保证、网络功能虚拟化/软件定义网络兼容性等。

(2) 3GPP

3GPP 讨论 5G 标准之初,就考虑星地网络融合的需求和场景^[11]。在完成 Release 15 的 5G 基础版本之后,3GPP 开始在网络架构和无线接入两个方向分别展开卫星通信与 5G 系统融合的立项研究。

截至目前,3GPP 已经完成了 Release 16 和 17 两个版本的星地融合技术研究,主要针对卫星作为 5G 基站的射频拉远单元或分布式单元的组网场景,标准研究的主要技术内容包括:支持卫星接入的 5G 接入网架构增强、卫星支持新无线接入(New Radio, NR)的物理层增强、支持卫星接入的空口协议增强、卫星移动带来的移动性管理增强、馈电切换、卫星接入带来的服务质量(Quality of Service, QoS)控制增强、支撑监管要求的 5G 系统增强等^[12-14]。

此外,3GPP 在 Release 18 将继续开展星地融合 5G 网络关键技术的研究,在 2021 年 12 月份召开的无线接入网(Radio Access Network, RAN)#94E 和系统架构(System Architecture, SA)#94 会议上,通过了 3 个关于星地融合 5G 网络关键技术研究的立项,具体包括由 RAN2 牵头的非地面网络(Non-Terrestrial Networks, NTN)演进 NTN evolution-NR 以及由 SA2 牵头的 FS_5GSAT_Ph2 和 FS_5GSATB 项目,主要研究目标包括:卫星覆盖增强、10 GHz 以上频段的 NR-NTN 网络部署、网络验证终端(User Equipment, UE)位置、星地网络和星星网络之间的移动性管理和业务连续性增强、非连续卫星覆盖的增强、卫星回传增强和用户面功能(User Plane Function, UPF)上星^[15-17]。

(3) 中国通信标准化协会(China Communications Standards Association, CCSA)

CCSA 从 2020 年开始研究 5G 星地融合技术,主要研究包括空天地一体化通信网络应用场景和基于 5G 的卫星通信系统。

空天地一体化的通信网络应用场景研究主要阐述了空天地一体化通信网络的研究现状、网络应用和发展趋势,分析了空基网络、天基网络和地基网络的特点、现状、问题等,介绍了空天地一体化通信网络下广域时敏通信、高通量容易、物联网、遥感和定位等网络应用。

基于 5G 的卫星通信系统研究主要分析了 5 种基于 5G 的卫星通信系统的应用场景,相比于 ITU 增加了直连终端业务;提出了基于 5G 的卫星通信系统网络架构、关键技术问题和解决方案,主要包括同步技术、移动性管理、跟踪区域管理、网络标识管理、寻呼技术、跳波束技术等。

2 星地融合 5G 网络在系统架构方面面临的问题

目前形成标准的星地融合 5G 网络还处于初步融合阶段,卫星主要工作在透明转发模式,无法对用户数据

做星上处理,因此存在如下通信时延高、带宽受限等缺点。

若星上仅支持射频拉远单元,则存在以下缺点:

(1) 卫星需与地面基站功能直连,难以使用星间链进行数据路由,因此对于信关站数量少的卫星系统来说,存在组网限制,数据落地困难。

(2) 用户数据需要回传到地面核心网或数据网络中处理,传输链路长,通信时延高。由于星上仅支持部分基站射频功能,无法实现用户通信数据的本地交换或本地终结,从而造成较高的通信时延,降低用户体验。

若星上支持数据单元(Data Unit, DU),用户数据同样需要回传到地面核心网或数据网络中处理,因此也存在传输链路长和通信时延高的缺点,尤其是在星上 DU 和地面控制单位(Control Unit, CU)直接通过较长的星间链相连的情况下。当用户数据通过星间链和馈电链路回传到地面网络时,将造成更高的通信时延。

即使星上支持完整的 gNB 功能,也存在卫星接入用户的通信有较高时延的缺点,即用户数据需要通过星间链和馈电链路回传到地面核心网或数据网络中处理或交换。为了进一步提高星地融合 5G 网络的系统性能,学术界已经提出了部分核心网功能甚至特定业务系统上星的构想,但这些研究大都处于试验和探索阶段,尚未从产业和技术标准的角度加以论证和讨论,也缺乏对整个 5G 系统影响的完整分析。

星地深度融合的 5G 网络除了要求系统架构上的增强,还需要考虑组网的灵活性。因此,未来星地网络深度融合的 5G 系统将大量使用星间链来实现灵活组网,星上基站和地面 5G 核心网之间将存在基于多跳星间链或基于多种类型卫星的回传连接。这将带来动态变化的端到端传输时延和回传带宽,然而现有 5G 系统中的策略控制机制并没有考虑这一问题,由此可能导致用户体验下降,例如无法满足用户的端到端时延要求或数据传输速率要求。

3 支持星地融合的 5G 网络增强技术

针对星地融合 5G 网络在系统架构上面面临的问题,需要从 5G 网络架构上进行思考。3GPP SA2 工作组在 Release 18 阶段,提出了支持星地融合的 5G 网络增强的研究项目 FS_5GSATB,该项目从网络架构的角度建议了如下研究目标^[17]:

(1) 基于卫星回传特征(如动态变化时延、受限带宽)的策略控制与计费(Policy Control and Charging, PCC)/PCC/QoS 控制增强以匹配业务传输需求与 5G 系统能力,提升 5G 系统的 QoS 保障能力和用户体验;

(2) 基于星上 UPF 的卫星边缘计算支持,实现对用户数据的星上处理,降低传输成本以及基于星上 UPF 的本地交换增强,实现通信终端间的本地交换,避免数据落地,显著降低通信时延,提升用户体验。

卫星回传具有明显的高延迟、低带宽特征,其中延迟主要由于卫星轨道高度与星间链跳数决定,例如高轨卫星到地面的空口传输时延在 120~140 ms,多跳星间链的最大传输时延也可达到100 ms 以上;带宽主要由卫星波束的空口速率及星间链传输速率决定。当 5G 系统融合了卫星回传后,其端到端的 QoS 保障能力将受到卫星回传链路能力的制约,因此 5G 系统需能够感知卫星回传的时延、带宽特征。

3GPP 在 Release 17 的研究中设定使用卫星回传的基站只能使用一种卫星回传,且卫星回传链路上不能包含星间链。在这一假设的前提下,5G 核心网可以通过基站的标识来区分卫星回传的类型,例如低轨卫星(Low Earth Orbit, LEO)、中轨卫星(Middle Earth Orbit, MEO)或同步轨道卫星(Geostationary Orbit, GEO),进而确定回传链路的时延特征。然而当卫星回传链路上存在星间链或者多种卫星回传时,5G 核心网无法通过基站标识来准确获知回传链路的时延特征。因此,需定义动态监测回传链路性能的方法来保证 5G 核心网能够准确掌握回传链路的性能变化,例如由基站触发和完成回传链路性能的动态监测。

如图 1 所示,当 gNB 通过卫星回传网络建立有与 5G 核心网建立用户面传输层关联时,gNB 应向 5G 控制面网络功能 AMF 报告卫星回传指示,具体可以在 NG 建立过程中上报。后续有终端通过该 gNB 获取服务时,例如建立协议数据单位(Protocol Data Unit, PDU)会话或者切换到该 gNB,5G 核心网控制面网络功能可以根据 gNB 报告的卫星回传指示确定启用针对该 UE 的 PDU 会话的 QoS 监测。UE 的 PDU 会话的锚点 UPF 可以在 PDU 会话的用户面路径上发送探测包来检测该路径上的数据

传输时延。当 gNB 收到探测包后,将根据承载该路径的卫星波束信息(例如卫星空口速率)确定该传输层路径上的最大数据传输速率,然后在探测响应包中携带该传输层路径的最大带宽。用户面锚点通过事件报告的方式向控制面网络功能报告 QoS 监控结果。

5G 核心网控制平面功能在拿到 gNB 与锚点 UPF 之间的传输时延和最大带宽后,将执行相应的 QoS 控制,例如限定所有使用该传输网络层路径的 QoS 流的保证流比特率之和不大于最大带宽。另外,当 5G 核心网判断出通过卫星回传无法满足应用层的 QoS 需求时,可以发起与应用服务器的 QoS 需求协商,请求降低 QoS 需求,例如降低时延和数据传输速率的要求。

4 结论

卫星网络和地面网络各有所长,也各有缩短,星地融合网络实现了卫星通信和地面移动通信的优势互补。因此,随着 5G 网络的发展和成熟,产业界、学术界开始关注星地融合 5G 网络的发展,并展开了相关的研究。目前比较成熟的研究成果已经在 3GPP 标准化组织落地,例如针对卫星工作在透明转发模式时的系统增强,然而目前的星地融合还处于初级阶段,无法支持灵活组网以及业务的高效承载。因此,本文提出了面向星地融合 5G 网络的架构增强技术,并仿真分析了星载 UPF 在网络性能上带来的增益,从而部分论证了星地网络深度融合的技术途径。

未来星地融合 5G 网络将进一步实现卫星通信和 5G 网络的深度融合,并逐步向星地融合的 6G 网络演进。展望未来星地深度融合 5G 网络,将具备天基组网能力,支持星星、星地之间的灵活组网,能够按需提供用户信令或数据的星上处理,允许终端在星地网络之间动态

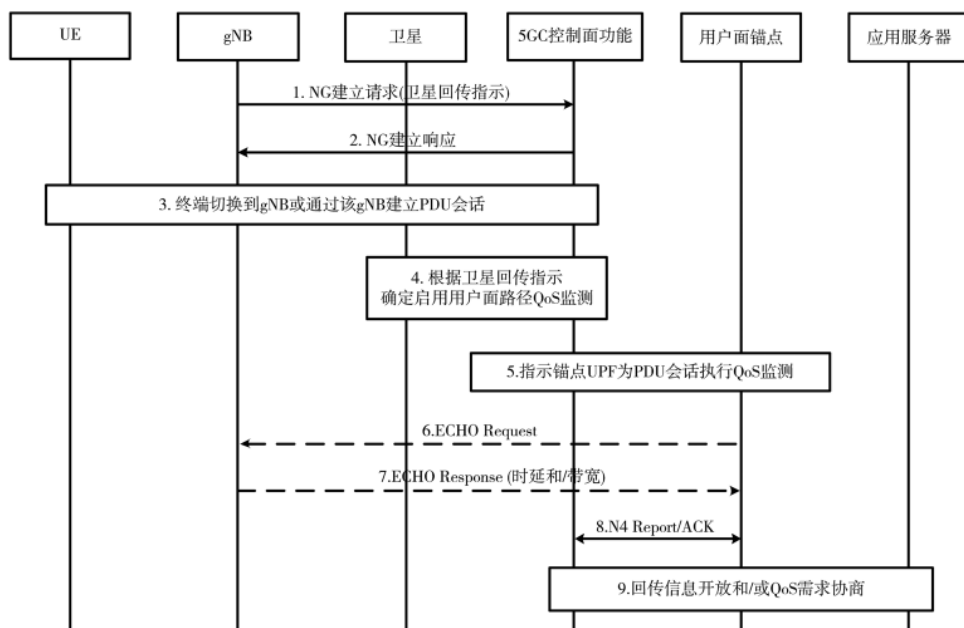


图 1 基于卫星回传链路特性的策略与 QoS 控制增强流程

(下转第 9 页)

- [18] YU S, GONG X, SHI Q, et al. EC-SAGINs: Edge computing-enhanced space-air-ground integrated networks for internet of vehicles[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(8): 5742-5754.
- [19] XIE R, TANG Q, WANG Q, et al. Satellite-terrestrial integrated edge computing networks: Architecture, challenges, and open issues[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 224-231.
- [20] PELLE I, CZENTYE J, DOKA J, et al. Towards latency sensitive cloud native applications: A performance study on aws[C]//2019 IEEE 12th International Conference on Cloud Computing(CLOUD). IEEE, 2019: 272-280.
- [21] UCUZ D. Comparison of the IoT platform vendors, microsoft azure, amazon web services, and Google Cloud, from users' perspectives[C]//2020 8th International Symposium on Digital Forensics and Security(ISDFS). IEEE, 2020: 1-4.
- [22] ZHU X, JIANG C, YIN L, et al. Cooperative multigroup multicast transmission in integrated terrestrial-satellite networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(5): 981-992.
- [23] HASSAN H, SHAFEEY N Y A. 3D study of convection-

(上接第 4 页)

切换并保证一致的用户体验。

参考文献

- [1] 王胡成, 徐晖, 孙韶辉. 融合卫星通信的 5G 网络技术研究[J]. 无线电通信技术, 2021, 47(5): 8.
- [2] SORET B, LEYVA-MAYORGA I, CIONI S, et al. 5G satellite networks for Internet of Things: Offloading and backhauling[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2021, 39(4): 431-444.
- [3] DI B, ZHANG H, SONG L, et al. Ultra-dense LEO: integrating terrestrial-satellite networks into 5G and beyond for data offloading[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2019, 18(1): 47-62.
- [4] GIAMBENE G, KOTA S, PILLAI P. Satellite-5G integration: a network perspective[J]. IEEE Network, 2018, 32(5): 25-31.
- [5] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: A survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [6] CHEN S, SUN S, KANG S. System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G[J]. China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [7] 孙韶辉, 戴翠琴, 徐晖, 等. 面向 6G 的星地融合一体化组网研究[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 891-901.
- [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(9): 14-21.

radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by heat sink[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, 159: 106585.

- [24] HUANG H, GUO S, LIANG W, et al. Coflow-like online data acquisition from low-earth-orbit datacenters[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 19(12): 2743-2760.
- [25] TONG M, WANG X, LI S, et al. Joint offloading decision and resource allocation in mobile edge computing-enabled satellite-terrestrial network[J]. Symmetry, 2022, 14(3): 564.
- [26] WANG H, WANG H, AN J. Dynamic game-based computation offloading and resource allocation in LEO-multiaccess edge computing[J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2021: 1-13.
- [27] YANG J, WANG A, YE N, et al. Simplified random access design for satellite internet of Things with NOMA[C]//2021 International Wireless Communications and Mobile Computing(IWCMC). IEEE, 2021: 128-132.
- [28] CAO H, ZHU W, FENG W, et al. Robust beamforming based

(下转第 13 页)

- [9] 郑重, 缪中宇, 郑寒雨, 等. 卫星通信与地面 5G 融合发展路线探讨[J]. 航天器工程, 2021, 30(5): 115-124.
- [10] ITU-R M.2460-0, key elements for integration of satellite systems into next generation access technologies[R]. ITU, 2019.
- [11] 3GPP. TS 22.261, service requirements for the 5G system; stage 1[S]. 3GPP, 2017.
- [12] 3GPP. TR 38.821, solutions for NR to support non-terrestrial networks(NTN)[R]. 3GPP, 2019.
- [13] 3GPP. TR 23.737, study on architecture aspects for using satellite access in 5G[R]. 3GPP, 2020.
- [14] 3GPP. TS 23.501, system architecture for the 5G system (5GS); stage 2[S]. 3GPP, 2021.
- [15] 3GPP RAN WG. RP-213690. New WI: NR NTN(non-terrestrial networks) enhancements[R]. 3GPP, 2021.
- [16] 3GPP SA WG. SP-211651. New SID: 5GC enhancement for satellite access Phase 2[R]. 3GPP, 2021.
- [17] 3GPP SA WG. SP-211639. New SID on study on support of satellite backhauling in 5GS[R]. 3GPP, 2021.

(收稿日期: 2022-05-24)

作者简介:

王胡成(1983-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 移动通信网络架构、组网以及协议。

徐晖(1969-), 女, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 移动通信核心网技术、天地融合网络技术。

孙韶辉(1972-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向: 移动通信系统设计及多天线技术、卫星通信、定位等关键技术。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所