



专题：手机直连卫星通信

星地融合下的手机直连关键技术研究

刘会, 叶阳, 丁志东, 刘湘华, 朱子园, 周晶
(中国联合网络通信有限公司研究院, 北京 100076)

摘要: 当前, 大众用户和行业用户对星地融合通信的需求不断演进, 以实现无缝覆盖与随时随地接入, 集成卫星和地面通信能力将是未来手机终端的发展方向。首先介绍了手机直连的应用场景、国内外发展路径和相关技术方案; 其次, 针对3GPP NTN标准化技术方案, 分析了实现手机直连的组网架构和空口关键技术方案, 并探讨了卫星通信场景下多模终端在天线能力、语音能力及节能方面的需求及潜在改进方案; 最后阐述了手机直连频谱资源及挑战, 为星地融合手机直连终端通信设计提供参考。

关键词: 非地面网络; 5G; 星地融合; 手机直连卫星通信

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024099

Research on key technologies of direct-to-handset under satellite-terrestrial integrated network

LIU Hui, YE Yang, DING Zhidong, LIU Xianghua, ZHU Ziyuan, ZHOU Jing
Research Institute of China United Network Communications Co., Ltd., Beijing 100076, China

Abstract: Nowadays, the demand of consumers and industrial users for satellite-terrestrial integrated communications is evolving to achieve seamless coverage and anytime, anywhere access, and the integration of satellite and terrestrial communication capabilities will be the development direction of future mobile phones. The application scenarios for direct-to-handset connectivity, domestic and international development paths, and related technical solutions were introduced. Subsequently, the network architecture and key technology for realizing direct-to-handset connectivity with respect to the 3GPP NTN standard scheme were analyzed. The requirements and potential improvement schemes for multi-mode terminals in satellite communication scenarios in terms of integrated design, antenna capabilities, voice capabilities and power saving, were also identified. Finally, by exploring the key regulatory challenges (e.g. radio-frequency spectrum) related to direct-to-handset communications, feasible pathways for the future development of satellite-terrestrial integrated terminals were provided.

Key words: non-terrestrial network, 5G, satellite-terrestrial integrated, direct-to-handset satellite communication

0 引言

随着卫星互联网战略意义的日益凸显以及核心卫星通信技术的不断突破,近年来卫星互联网产业得到广泛的发展,手机直连面向公众领域,提供无处不在的泛在连接,是未来通信的重要发展方向,成为星地融合下的产业研究热点。

传统卫星通信系统使用私有协议,通过专用卫星电话终端进行通信。近年来,低轨卫星互联网开始快速发展。OneWeb、AST、SpaceX等公司均提出了各自的低轨星座计划^[1]。目前,市场上手机直连主要有两种实现方案^[2]:一是卫星进行适配,手机终端不需要做任何改动即可直连卫星,从而实现语音、短消息和数据业务;二是手机通过定制化的改造,实现支持卫星通信,手机通过外挂卫星专用芯片,支持直连卫星进行通信。当前的两种技术实现方式均为私有化方案,难以产业化推广。

未来促进标准的统一和产业的规模化,3GPP启动了新空口技术应用于卫星通信的标准化研究,提出了手机直连的标准方案,将非地面网络(non-terrestrial network, NTN)和地面网络(terrestrial network, TN)纳入一体化标准研究^[3-6],推动地面网络和卫星网络深度融合发展。基于3GPP NTN技术的手机直连技术路线,充分借鉴地面网络成熟的演进机制,在体制设计时深入考虑卫星通信场景的独特性,如传播距离远、移动速度快、覆盖范围广等,推动卫星网络和地面网络在技术、标准方面全方位融合。本文基于3GPP NTN技术路线,对3GPP NTN的标准进展进行了全面的梳理和分析;随后对手机直连技术的关键技术进行了探讨,并研究了手机直连面临的频谱挑战;最后对手机直连的发展方向进行了展望。

1 3GPP NTN标准进展

3GPP最早在Release 15(Rel-15)版本的基础上提出了支持非地面网络的5G新空口的研究报告立项,对NTN的应用场景和信道模型进行研究^[7]。Rel-16版本在Rel-15的基础上研究了NR支持非地面网络的解决方案,包括网络架构、物理层设计和高层设计,明确了要优先支持卫星接入场景^[8]。在Rel-17版本上,3GPP将NTN纳入技术规范,重点关注基于透明转发架构系统,并分为IoT NTN和NR NTN两大方向。其中,IoT NTN侧重支持低速窄带物联网业务,NR NTN则主要面向手机直连业务及甚小口径卫星终端(very small aperture terminal, VSAT)业务的宽带通信。

Rel-18阶段的研究重点仍在透明转发模式,进一步完善5G NTN通信的能力^[9]。在频谱方面,针对10 GHz以上的、卫星通信的常用Ka频段,研究ITU定义的n510、n511、n512 NTN的频段的支持;在覆盖增强方面,针对卫星系统传播距离远、低轨系统对地运动速度快的特点,研究终端侧在物理上行控制信道(physical uplink control channel, PUCCH)引入重复传输和解调参考信号(demodulation reference signal, DMRS)联合信道估计机制,以提高信号质量信道估计的准确度;在网络验证终端位置方面,研究了通过认证管理功能(authentication management function, AMF)进行终端位置验证的方案,实现对终端位置信息的使用需求。通过网络对终端位置的验证,保障星地融合化网络提供适用于该终端所处国家或地区监管要求的卫星网络服务。在移动性和业务连续性方面,对NTN系统的移动性和业务连续性的进一步增强,以降低低轨卫星系统下终端频繁切换对终端业务的影响;并设计和完善TN-NTN的移动性方案,提高服务连续性。IoT NTN方面则主要研究了移动性增强方案^[10],沿用



了 Rel-17 NR NTN 中相关的移动性方案；在业务体验上，研究对混合自动重传请求（hybrid automatic repeat request, HARQ）反馈的禁用，提升物联网终端的传输速率。

3GPP 已经批准 Rel-19 阶段的工作项目（work item, WI）^[11]，NR NTN 的研究增加对星上再生载荷的支持，并主要对以下几个方面进行标准化。

- 基站上星。支持 TR 38.821 定义的基站上星的再生传输模式网络架构，进一步定义基站与基站之间包含星间链路的移动性管理方案。
- 上行链路容量增强。通过正交覆盖码及射频能力的增强，提升物理上行共享信道（physical uplink shared channel, PUSCH）能力，提高上行链路数据传输速率和所支持用户的容量，满足用户数和上行数据业务不断增长的需求。
- 下行覆盖增强。研究卫星跳波束的管理方案，进行下行链路级和系统级增强，对卫星波束进行动态和灵活配置，实现在卫星总功率受限的情况下，提高有效覆盖能力。
- 广播服务的服务区域通知能力。将广播业务和 NTN 结合，定义相关的系统信息块（system information block, SIB），以在卫星覆盖范围更大的情况下指示预期服务区域，并定义核心网和基站之间的必要信

令，满足对特定服务区的广播业务需求。

- NTN+RedCap（reduced capability）。对支持 RedCap 或 eRedCap（enhanced reduced capability）的 NTN FR1 终端，定义 NTN 的射频和无线资源管理要求，满足不同场景下物联网设备的能力需求。

3GPP Rel-19 在 IoT NTN 方面^[12]，一是增加存储转发模式的研究，在卫星没有馈电链路的情况下，先存储终端的数据，在馈电链路恢复后进行转发，完成相应的 IoT 业务；二是增强上行能力，提升上行数据速率。

2 手机直连终端关键技术

集成卫星和地面通信能力的终端是未来的发展趋势，面向大众用户的手机直连技术，能够在应急等场景下提供泛在连接，是星地融合技术的演进方向。但卫星通信中的星地距离远、运动速度快、传输链路损耗高且手机发射功率受限，实现星地融合融合通信面临着诸多技术挑战。

2.1 网络架构

3GPP NTN 组网模式包括透明转发和再生转发两种网络架构，是未来星地融合通信的重要组网模式。

在 NTN 透明转发网络架构下，如图 1 所示，卫星载荷会对信号进行变频和射频放大，但信号波形不做改变；信关站也只是进行信号透传。在此架构下，需要对地面 gNB 具有 NTN 的支持能力。此组网模式下的卫星通信仅适用于信关站辐

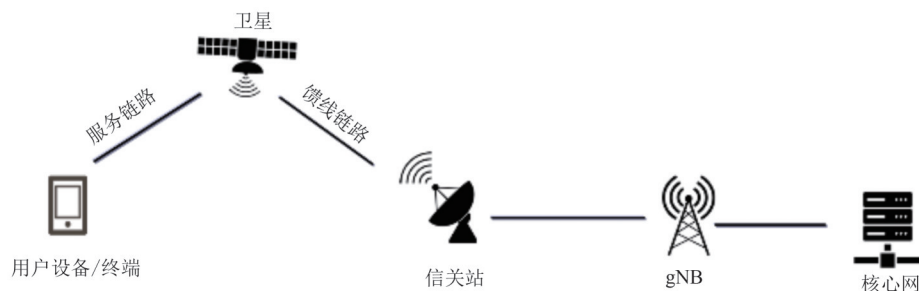


图1 NTN透明转发网络架构

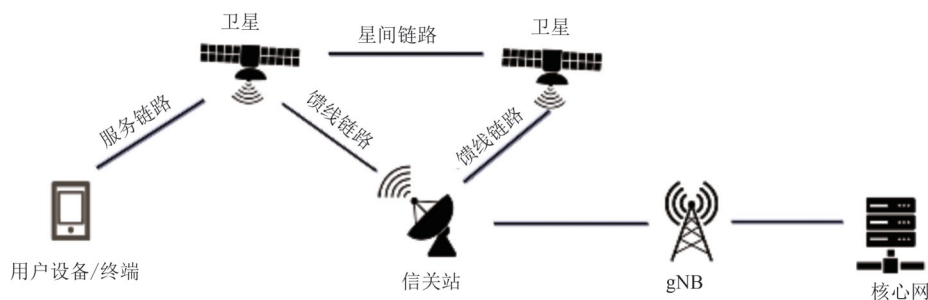


图2 NTN再生转发网络架构

射范围内，由于信关站部署受限与多种因素，无法实现卫星网络的全球覆盖^[13]。

NTN再生转发网络架构，如图2所示，相当于在卫星上拥有部分基站及核心网功能，卫星有效载荷还可提供卫星间的星间链路，终端可以通过星间链路接入核心网，可在无信关站地区通过星间链路进行转发，实现灵活路由全球无缝覆盖。

2.2 空口协议关键技术

与地面5G网络不同，NTN与地面通信的差异主要体现在大时延、高动态和广覆盖等方面，需对无线链路性能增强。手机直连在无线协议侧需要时频增强、HARQ增强和移动性管理增强等关键技术进行研究^[14-15]。

(1) 时频增强技术

在移动通信系统中，终端在接入网络前需要与基站接入网进行时频同步，且在接入网络之后还需要持续根据自身测量及网络下发的配置数据保持同步状态，从而使终端能够正确使用时频资源，确保端网间的数据传输能够正常进行。然而对于卫星通信通信系统，特别是低轨卫星通信系统，卫星在空间轨道上相对地面的高速运动，导致多普勒效应对无线链路信号的影响远高于地面系统。以工作于600 km轨道高度、载波频率为2 GHz的低轨通信卫星为例，在不考虑器件原因引入额外变量的假设下，系统中星地多普勒频偏达-40 kHz~40 kHz，链路的时延变化率可达到约38 μs/s的量级，对于工作在更高频段（如Ka等）

的系统，多普勒频偏甚至高达MHz级别，远高于地面网络在高铁场景下的数kHz处理能力，对于未来卫星直连网络下的终端、网络的时频偏补偿处理能力提出了新挑战。

针对手机直连通信，3GPP在Rel-17版本中定义了卫星透明转发与卫星可再生两种实现模式。在透明转发场景中，由地面的NTN基站通过对获取的星历信息进行处理，得到卫星在轨的空间位置及运动状态，并将卫星对地覆盖波束中心点的位置作为参考点，计算小区级的频偏，并基于计算得到的频偏对信号进行预补偿处理。在进行与补偿计算的同时，基站将卫星星历信息、波束中心点位置信息向波束覆盖下的终端进行广播，非波束中心点位置的用户终端则在收到广播信息后，根据各自的全球导航卫星系统（global navigation satellite system, GNSS）位置信息计算与中心点用户的频偏偏差，从而完成终端级的用户链路二次补偿。而在卫星可再生场景中，星载基站一方面直接链接用户终端，另一方面通过地面信关站接入地面核心网。因此，在卫星可再生的场景中，星载基站可以根据终端、信关站的位置分别对小区级的用户链路、馈线链路进行补偿，非小区中心用户以与透明转发相同的方式进行用户链路的二次补偿。

相比于频偏补偿，手机直连卫星系统的时间补偿同样选用参考点补偿方式，当将参考点选定在卫星侧时，手机以星地往返传输时延作为时间提前量进行补偿。



(2) HARQ增强

HARQ增强用以提升链路自适应工作模式下的链路可靠性。星地融合地空通信传播时延高达上百毫秒，HARQ过程时间较长，对链路性能影响较大。3GPP对HARQ的增强研究为以下两方面。

一是增加HARQ进程数：将下行控制信息(downlink control information, DCI)增加到5 bit, HARQ进程数量可拓展到32个，补充HARQ往返时间过长造成的等待，该方案主要用于时延相对较短的低轨卫星通信。

二是采用禁用HARQ反馈：以避免HARQ过程中的停止和等待，此方案针对长往返超百毫秒的高轨卫星通信场景，通过无线电资源控制(radio resource control, RRC)信令半静态地向终端发送信号通知的网络决策。

(3) 移动性管理增强技术

相比于传统的地面移动通信网络，基于低轨卫星直连的移动通信系统具有较高的传播时延、更大的小区半径、单颗卫星覆盖地面用户的时间较短等特点，需要用户和卫星间进行频繁切换以保证通信连续性，为手机直连卫星网络的移动性管理带来了一系列挑战，包括大量用户并发切换导致的切换成功率低、传输中断时间长以及信令开销大等。

除了卫星直连网络的周期并发切换问题，手机直连网络移动性管理面临的另一大挑战是切换时机的选择。在地面传统蜂窝通信系统中，由于基站发射端位置相对较低，小区内的手机终端容易受到来自地面环境变化带来的影响，信号传播大多不依赖于视径(LOS)，因此终端处于小区边缘时，终端的信号强度测量结果(例如RSRP与RSRQ)会出现急剧下降的现象，即具有明显的远近效应现象，非常适合作为小区切换的判决条件。然而，对于卫星通信系统，终端收到来自卫星的信号几乎是垂直到达地面，导致小区中心

的信号强度和小区边缘的信号强度只有较小的差异，并不具备明显的远近效应现象，因此信号强度的测量结果难以作为手机直连卫星网络切换的主要判决条件。针对这个问题，3GPP NTN研究了基于时间/计时器的条件切换、基于位置信息的条件切换这两种条件切换方式，并进一步进行了优化，以降低频繁切换对终端业务的影响。

(4) 基于时间/定时器的条件切换

3GPP Rel-17版本中新增的SIB19广播消息中广播当前卫星的星历和停止服务时间，由终端计算并判断当前服务卫星剩余服务时间是否需要执行切换。

(5) 基于位置信息的条件切换

终端通过GNSS信息和卫星在SIB19消息广播的卫星星历信息计算终端与卫星或与小区参考位置(通常选择小区中心点)间的距离判断是否需要执行切换。

2.3 其他关键技术

手机直连终端除了支持NTN空口基本协议外，还需在天线能力、语音业务、功耗方面进行增强和优化。

(1) 天线能力优化

3GPP标准化的终端直连技术将有利于NTN和TN通信的多模一体化集成。多模一体化集成所释放出的功率与空间，可用于新型共形天线的应用与布置，如将天线阵列集成到显示屏的屏上天线技术，可提高手机终端在星地链路下的天线性能，优化终端的用户体验。另一方面，在天线系统硬件能力增强的同时，终端还可通过基于机器学习的智能天线选择算法等软件优化手段，更好地避免在竖屏、横屏或平置等场景下，由于人手握持等操作令手机天线性能产生严重下降的情况发生，保证终端在用户的日常使用体验。

(2) 语音增强

语音业务是卫星通信的关键业务之一。虽然全球低轨宽带卫星星座正在快速发展，但在当前

的商用的卫星系统中,仍以高轨卫星为主,业务速率通常在kbit/s级别。3GPP在Rel-17和Rel-18标准中仅支持NR NTN下的语音业务。考虑对存量高轨卫星的复用,3GPP SA1第105次会议已经立项通过了面向Rel-20的“高轨语音服务的IMS增强需求”,将基于高轨卫星的传输速率、容量和传播时延限制,制定高轨语音的增强服务需求。项目计划基于高轨窄带的特点,优化语音协议建立流程,研究低于最小编码速率4.75 kbit/s的语音编码增强。除了标准侧的语音业务增强,终端侧还可以通过噪声消除、回声消除及自动增益控制等方案,提升语音通信质量。

(3) 功耗优化

智能手机和物联网通常面临电池续航能力有限的挑战,而低轨卫星通信带来的频繁小区切换将进一步增加终端设备的功耗^[16]。为了实现直连终端的功耗优化,可以从硬件和软件两个方面开展。在硬件设计阶段,通过优化整机设计集成度,有效降低设备的总体功耗。在软件层面,可采取地面蜂窝通信中常见的功耗优化策略,如非连续接收(discontinuous reception, DRX)、节电模式(power saving mode, PSM)、唤醒信号(wake up signal, WUS)等。此外,鉴于Rel-17阶段的NTN终端默认集成了GNSS,对GNSS定位功能造成的功耗影响也应予以考虑。特别是在卫星网络覆盖不连续的场景下,优化GNSS在长时间连接状态下的运行效率和降低设备空闲时段的GNSS功耗,进一步实现节电效果。

3 手机直连频谱资源及监管政策研究

用于手机直连的频谱资源有限,国内外正在开展频率资源的研究并制定其国际规则和标准。同时,卫星可能使用和地面相同的频谱,这会对地面通信产生干扰,相关的监管政策也需要进一步制定。

3.1 手机直连频谱资源

当前,手机直连卫星工作频率有3种工作模式,一是使用专用卫星移动通信系统技术体制的使用频率,主要使用ITU为卫星移动业务划分的L频段和S频段;二是使用地面蜂窝网络的频段,该种模式卫星运营商通过与地面运营商合作,获得频率使用权限,同时,该模式需要获得频率主管部门的批准;三是使用3GPP NTN划分的频率资源,3GPP已划分L频段和S频段上的一段用于手机直连卫星接入,上行频率为1 626.5~1 660.5 MHz和1 980~2 010 MHz,下行频率为1 525~1 559 MHz和2 170~2 200 MHz^[17]。

3.2 手机直连频谱的挑战

手机直连卫星频谱面临新频谱规划和与地面频率的干扰问题。新增卫星移动业务的频率需要世界无线电大会的研究与论证;借用地面蜂窝系统的频率资源方面,一方面需要监管部门的政策允许,另一方面需要卫星通信与地面通信的频率干扰问题。

为应对上述的挑战,一方面,需要进行星地频谱共享和干扰规避的研究。减少干扰最直接的方法是空间隔离,即把相同的频率资源分配给地理上相距较远的地面蜂窝和卫星系统使用,通过一定的物理空间隔离来实现干扰规避。例如在地面蜂窝基站周围标记“电子围栏区域”,此区域内不允许卫星波束照射,进行两者的空间隔离,实现地面与卫星网络的互补覆盖。另一方面,在政策监管方面,需加强对卫星互联网设备的监管,确保其符合国际和国内的相关法律法规及技术规范,避免非法终端干扰卫星通信。

4 结束语

未来星地网络将在网络、业务、终端、资源、管理等方面深度融合,广泛满足多种陆海应用和空间应用需求。3GPP NTN标准正在加快制



定中，并已经在星地融合网络时频管理、移动性策略、网络架构等方面取得了一系列研究成果，推动了星地网络向星地融合化融合发展。但由于终端设备尺寸小，在终端的发射能力、一体化设计、天线能力及语音质量等方面，仍需进一步探索解决方案；此外，手机直连还面临着频谱资源和监管要求的挑战。

当前阶段手机直连尚处于起步阶段，但具有广阔的应用和发展前景。集成卫星和地面通信能力的终端是未来的发展方向，需要产业链各方携手进一步推动标准的完善，进一步优化终端解决方案，加强对频率的使用和管理，共同推动未来通信网络进入星地融合新时代。

参考文献：

- [1] 周德山, 王燕, 钟颖, 等. 卫星与5G融合通信组网探索[J]. 邮电设计技术, 2020(9): 49-52.
ZHOU D S, WANG Y, ZHONG T, et al. Exploration of satellite and 5G integrated communication network[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2020(9): 49-52.
- [2] 肖永伟, 卢山, 宋艳军. “手机直连卫星”发展及关键技术[J]. 国际太空, 2024(1): 20-27.
XIAO Y W, LU S, SONG Y J. Development and key technologies of “mobile phone direct satellite” [J]. Space International, 2024(1): 20-27.
- [3] 陈东, 张千, 秦兆涛, 等. 面向手机直连的卫星移动通信系统架构与特性[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(4): 11-18.
CHEN D, ZHANG Q, QIN Z T, et al. Architecture and features of mobile communication satellite system for mobile phone[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(4): 11-18.
- [4] 李静, 崔航, 贺琳. 面向NTN的网络管理标准进展和研究[J]. 邮电设计技术, 2023(11): 14-17.
LI J, CUI H, HE L. Progress and research on network management standards for NTN[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2023(11): 14-17.
- [5] 林琳, 朱斌, 王泽林, 等. 5G星地融合标准演进与趋势[J]. 移动通信, 2023, 47(7): 92-97.
LIN L, ZHU B, WANG Z L, et al. Evolution and trends of 5G satellite-terrestrial integration standards[J]. Mobile Communications, 2023, 47(7): 92-97.
- [6] 王达, 童建飞, 穆飞宇. 手机直连卫星通信: 发展现状、应用场景和标准演进[J]. 无线电通信技术, 2023, 49(5): 795-802.
WANG D, TONG J F, MU F Y. Satellite communication supporting direct connection with mobile phones: development trend, application scenario, and standards evolution[J]. Radio Communications Technology, 2023, 49(5): 795-802.
- [7] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (V15.2.0): TR 38.811[S]. 2019.
- [8] 3GPP. Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN)(V16.0.0): TR 38.821[S]. 2020.
- [9] 3GPP. NR NTN (non-terrestrial networks) enhancements: TSG RP-234011[R]. 2023.
- [10] 3GPP. TSG RP-234073: WID on IoT NTN enhancements[R]. 2023.
- [11] 3GPP. New WID: non-terrestrial networks (NTN) for NR phase 3: TSG RP-234078[R]. 2023.
- [12] 3GPP. New WID: non-terrestrial networks (NTN) for Internet of things (IoT) Phase 3: TSG RP-234077[R]. 2023.
- [13] 孙耀华, 许宏涛, 彭木根. 手机直连低轨卫星通信: 架构、关键技术和未来展望[J]. 移动通信, 2024, 48(1): 103-110.
SUN Y H, XU H T, PENG M G. Direct-to-mobile low earth orbit satellite communication: architecture, key technologies, and future perspective[J]. Mobile Communications, 2024, 48(1): 103-110.
- [14] 朱斌, 何建伟, 王光全, 等. 星地融合网络架构及关键技术研究[J]. 邮电设计技术, 2022(7): 56-60.
ZHU B, HE J W, WANG G Q, et al. Research on architecture and key issues of integrated satellite-terrestrial systems[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2022(7): 56-60.
- [15] 孙耀华, 彭木根. 面向手机直连的低轨卫星通信: 关键技术、发展现状与未来展望[J]. 电信科学, 2023, 39(2): 25-36.
SUN Y H, PENG M G. Low earth orbit satellite communication supporting direct connection with mobile phones: key technologies, recent progress and future directions[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [16] 何辉. 卫星通信终端的低功耗设计要点[J]. 数字通信世界, 2022(2): 46-48.
HE H. Key points of low power design of satellite communication terminal[J]. Digital Communication World, 2022(2): 46-48.
- [17] 牛億莹, 周瑶, 刘吉凤, 等. 面向5G与低轨卫星网络融合的频谱共用研究[C]//5G网络创新研讨会(2022)论文集. 北京, 2022: 436-441. doi:10.26914/c.cnkihy.2022.027674.
NIU Y Y, ZHOU Y, LIU J F, et al. Research on spectrum sharing for the integration of 5G and low earth orbit satellite networks[C]// Proceedings of the 5G Network Innovation Symposium (2022). 2022: 436-441. doi:10.26914/c.cnkihy.2022.027674.

[作者简介]



刘会（1981-），女，中国联合网络通信有限公司研究院工程师，主要从事卫星互联网技术研究、5G 终端标准研究以及技术验证等工作。



刘湘华（1988-），男，中国联合网络通信有限公司工程师，主要从事智能终端、智能卡、卫星互联网等方向的技术研究工作。



叶阳（1988-），男，中国联合网络通信有限公司研究院高级工程师，主要从事 5G 终端测试技术及标准研究、卫星互联网技术研究工作。



朱子园（1994-），女，中国联合网络通信有限公司工程师，主要从事 5G+/6G 终端关键技术标准研究及新技术验证工作。



丁志东（1989-），男，中国联合网络通信有限公司研究院工程师，主要从事 5G 终端标准和新技术研究、卫星互联网技术研究工作。



周晶（1983-），女，中国联合网络通信有限公司高级工程师，主要从事 5G/6G 技术、天地一体、泛在终端、融合创新业务及战略新兴产业研究工作。