



专题：手机直连卫星通信

手机直连卫星应用发展与挑战

李思栋¹, 李侠宇¹, 孙建成², 康绍莉², 廖运发³, 陈俊琰³

(1. 中国信息通信研究院, 北京 100191;

2. 中信科移动通信技术股份有限公司, 北京 100083;

3. 中国信息通信研究院华东分院, 上海 201101)

摘要: 近年来, 卫星互联网发展迅速, 全球主要国家积极推动卫星星座的建设, 星地融合网络成为未来6G的重要演进趋势, 手机直连卫星也成为终端厂商的产品卖点。归纳了全球手机直连业务的发展现状, 提出3种手机直连技术发展路线, 分析手机直连卫星所面临的终端芯片一体化、星地融合、星地频率共享等挑战, 总结了手机直连业务所需要攻克的关键技术, 如时频同步技术、随机接入技术、HARQ重传技术、移动性管理技术和星上再生网络架构, 并对手机直连卫星业务的未来趋势进行研判。

关键词: 卫星互联网; 手机直连卫星; 星地融合

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2024095

Development and challenges of direct-to-handset satellite communication

LI Sidong¹, LI Xiayu¹, SUN Jiancheng², KANG Shaoli², LIAO Yunfa³, CHEN Junyan³

1. China Academy of Information and Communications Technology, Beijing 100191, China

2. CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. East China Branch of China Academy of Information and Communications Technology, Shanghai 201101, China

Abstract: In recent years, satellite Internet has developed rapidly, with major countries around the world actively promoting the construction of satellite Internet. The integration of satellite and terrestrial networks has become an important trend in the evolution towards 6G, and direct-to-handset satellite services has also become a selling point for terminal manufacturers. The current state of global direct-to-handset satellite services was summarized, three development routes for direct-to-handset satellite technology were proposed, and the challenges faced by direct-to-handset satellite connections were analyzed, including the integration of terminal chips, integration of satellite and terrestrial networks, and sharing of frequencies between satellite and terrestrial systems. The key technologies that need to be mastered for direct-to-handset satellite services were also outlined, such as time-frequency synchronization technology, random access technology, HARQ retransmission technology, and mobility management technology, and the future

收稿日期: 2024-03-15; 修回日期: 2024-04-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFB1808002)

Foundation Item: The National Key Research and Development Program of China (No.2020YFB1808002)



trends of direct-to-handset satellite services were assessed.

Key words: satellite Internet, direct-to-handset satellite, the integration of satellite and terrestrial

0 引言

随着通信技术的不断进步和全球化信息需求的日益增长,手机直连卫星通信系统已成为一个热门的研究和应用领域。智能终端通过直接连接通信卫星,使手机用户无论在偏远的农村地区、海上,还是在广袤无垠的沙漠中,即在地球的任何角落都能实现稳定的通信连接。手机直连卫星技术的发展,不仅为偏远地区居民提供了前所未有的通信能力,还为全球紧急救援、海洋探索、航空航天等关键领域的操作提供了强有力的通信支持。

然而,高效、广泛的手机直连卫星通信服务的实现面临诸多挑战,包括如何提高系统的频谱效率、降低终端成本、优化协议以适应不同的通信环境等。此外,确保这些系统与现有的地面通信网络无缝集成,也是推广手机直连卫星服务必须解决的关键问题之一。随着技术的不断发展和标准化工作的推进,手机直连卫星通信正在逐步克服这些挑战,展现其在未来通信网络中不可或缺的地位。

1 手机直连发展现状

手机直连卫星,比较直接的理解就是手机可以与卫星直接连接。其系统与以往依赖专用卫星设备的传统卫星移动通信方式不同,它允许普通的商用手机直接与地面通信系统进行通信,并且可以通过信号自动切换在天地网络之间漫游。

手机直连卫星技术拥有多种潜在应用场景,首先,它是应急通信理想的解决方案,可以构建全球覆盖、全天候、全天时的基于手机直连的公众应急通信网;其次,能够在运营商网络覆盖不到的地方,为用户提供无处不在的通信服务;从产业的角度,可以复用地面移动通信系统产业链,降低卫星通信领域的成本并实现与地面移动

通信系统的深度融合;此外,在手机直连卫星的模式下,运营商无须在人烟稀少的偏远地区建设基站,这将显著减少建设和运维成本。总而言之,卫星直连手机技术推动着通信领域的创新,为用户提供更加连贯和广泛的服务范围。

2022年,苹果 iPhone14 和华为 Mate 50 两款手机率先引入了手机直连卫星的业务,成为了消费级终端市场的一个全新热点。2022年9月6日,华为 Mate 50 发售,支持北斗卫星短报文功能,通过3颗北斗卫星搭载的通信转发器载荷,提供应急卫星消息服务,其销量超出预期。2022年9月16日,苹果发布 iPhone14,这是苹果首款支持手机直连卫星业务的终端。iPhone14 与“全球星(Globalstar)”卫星移动通信系统合作,为用户提供空紧急呼救服务,通过卫星向救援机构发送文字、位置、医疗ID等信息。2023年9月,华为在发布会上发布的手机,全部支持手机直连卫星业务,其中, Mate 60、X5 支持双向北斗通信; Mate 60 Pro 和 60 RS 率先实现双向卫星通信功能。未来手机直连卫星服务将会成为旗舰级的标配。

在国际上,美国初创企业 AST Space Mobile 等正在积极进行手机直连卫星通信的技术实验。同时,全球知名的科技与电信公司,例如,爱立信、泰雷兹和高通已联合宣布共同研制支持5G的非地面网络(non-terrestrial network, NTN)卫星系统。SpaceX 的“星链”项目在2023年10月11日,通过官网推出了星链直连手机业务(Starlink Direct to Cell),能够与现有的LTE手机兼容,并无须改动手机的硬件、固件或下载特殊应用程序,便能实现无缝访问文本、语音、数据。2023年12月,美国联邦通信委员会(Federal Communications Commission, FCC)授权SpaceX在1 910~1 915 MHz和1 990~1 995 MHz频段内运

行星链卫星,开展手机直连卫星在轨测试。2024年3月,“星链”与商用手机开展测试,实现了17 Mbit/s的传输速率。

手机直连卫星是5G及未来6G网络发展的一个重要方面,将网络覆盖范围从地面拓展到太空、深山、深海、无人区等自然空间,从而形成立体覆盖,这是未来网络的主要发展趋势。因此,需要构建并实现通信网络全覆盖,实现海量终端泛在连接,将应用最广泛的移动智能终端与覆盖范围最大的卫星网络相结合,这是未来网络发展的一个重要方面。

2 手机直连技术路线

手机直连卫星的主要技术路线有3种,包括定制手机直连、存量手机直连和第三代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP) NTN手机直连。

(1) 基于在轨卫星的定制手机直连技术路线

基于在轨卫星的定制手机直连技术路线通常需要卫星运营商、手机制造商、芯片厂商等多方共同合作研发,并通过共享卫星频率、定制双模手机实现手机直连卫星。例如,华为的Mate 50系列(北斗短报文)、Mate 60 Pro(天通语音电话)和苹果的iPhone14(全球星应急卫星通信)等设备均采用这一技术路线,我国公司在该领域的进展已处于领先地位。

现有的在轨卫星系统大多采用专有的空口协议,这意味着不同卫星通信系统之间难以实现互联互通。例如,铱星系统采用GSM协议,Globalstar使用扩频技术,海事卫星(Inmarsat)的第四代卫星采用GMR-1(GEO-Mobile Radio interface specifications)协议,天通一号采用定制化私有通信协议。该模式下,由于在轨卫星的空口协议难以修改,所以终端侧需要适配卫星,采用专用通信协议和卫星频段,这种方案手机需要定制。双模终端虽然可以既连接卫星系统又能接入

地面通信系统,但受制于应用需求和场景,以及在轨卫星的能力有限,只能作为手机直连卫星的一个过渡模式。

(2) 存量手机直连卫星的技术路线

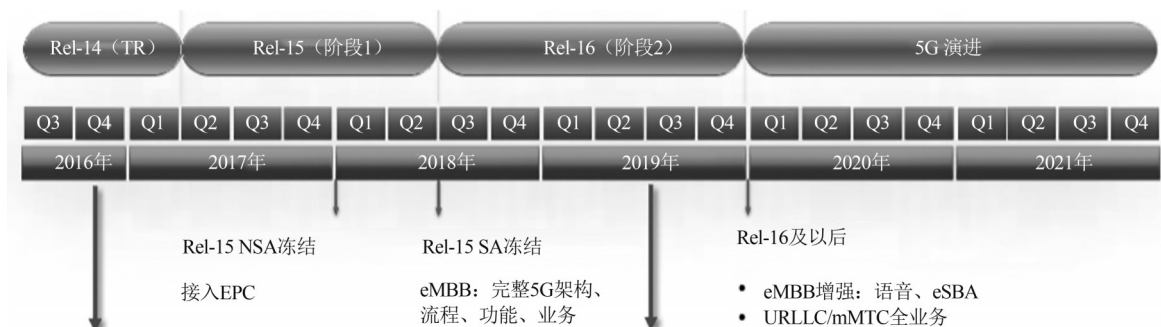
目前,存量手机直连卫星的技术路线由国外新兴低轨卫星公司主导,通过与移动蜂窝网运营商合作,共享地面蜂窝网络频谱资源,基于先进的卫星相控阵天线技术降低手机天线收发的灵敏度要求,以低轨卫星转发地面蜂窝网信号(或基站上卫星),支持存量手机直连卫星,美国Starlink、AST等公司在该路线上计划建设星座系统,预计未来两年内提供服务。

2022年以来,业界逐渐关注存量5G手机,即基于Release15(Rel-15)、Rel-16版本的手机终端,直连接入卫星系统的技术。当前Rel-15、Rel-16版本的手机终端不支持3GPP NTN技术,因此如果要存量手机接入卫星系统,则终端侧的技术特性不能更改,那么潜在的解决思路只能是对网络侧进行适应性改造,以适应卫星通信场景的深衰落、大时延等技术特点。所以,存量手机直连卫星的研究重点集中在网络侧协议的优化和改造。

该技术路线中,手机基本不做改动,技术难度主要交由卫星处理。首要问题就是克服手机发射功率和天线增益不够的问题,把卫星天线建得大一些(超大规模相控阵,天线增益足够大)、卫星发射功率高一些、通信频率低一些,代表公司为AST SpaceMobile,卫星与手机之间通信的天线是一个 64 m^2 的相控阵天线,工作在700~900 MHz的LTE频段。3GPP Rel-15和Rel-16主要内容如图1所示。

(3) 基于3GPP NTN的手机直连卫星路线

5G NTN是3GPP国际标准组织主导,由全球移动通信设备商、运营商、芯片商、终端厂商、卫星运营商等共同参与制定的非地面网技术体制。3GPP从Rel-15开始定义NTN,卫星网络是



注:Q1~Q4分别表示第一季度至第四季度。

图1 3GPP Rel-15&Rel-16主要内容

其中重要的场景：2022年7月，3GPP宣布5G Rel-17标准冻结。5G Rel-17将网络覆盖场景从地面拓展到了非地面（NTN），在频率方面，3GPP Rel-17为5G NTN引入了两个专用频段：L波段的n255和S波段的n256，以便于全球业务的开展；Rel-18持续定义及优化了以卫星通信网络为主的NTN通信的体制协议。

同时随着3GPP Rel-17阶段的冻结，第一阶段的NTN标准完成，业内多家企业开始开展基于Rel-17阶段的NTN测试验证工作。2022年8月，联发科公司宣布，通过自研的具备3GPP 5G NTN卫星网络功能的移动通信芯片，以及信道模拟器和测试基站，其实实验室模拟完成了全球首次5G NTN卫星手机连接，验证了手机直连卫星通信的可能性。同年7月，爱立信公司称，将携手法国泰雷兹公司和美国高通公司，共同开展基于5G NTN技术的手机直连卫星通信技术测试和验证。

同年8月，中国移动联合中兴通讯及其他合作伙伴，共同宣布了世界首个由运营商推出的5G NTN技术的现场验证成果，该试验遵循3GPP Rel-17 NTN标准，利用高轨道卫星的透明转发方式构建网络架构，成功进行了文本短信和语音通话等业务的测试，证实了遵守3GPP NTN标准的手机直连卫星技术的可行性。3种技术路线对比见表1。

3 面临的主要挑战

（1）终端芯片一体化

虽然，现在各个手机厂商均已发布自己的手机直连卫星的产品，但大多采用双模方式，即卫星模块与手机基带相互独立。双模方式虽然易于实现，但不利于智能终端的小型化。终端一体化设计可以有效降低芯片体积，从而促进手机直连卫星业务的商业化与大众化。

表1 3种技术路线对比

对比项	基于在轨卫星的定制手机直连技术路线	使存量手机直连卫星的技术路线	基于3GPP NTN的手机直连卫星路线
空口协议	• 卫星私有协议	• Rel-15/Rel-16协议 • 卫星侧须进行增强	• 3GPP NTN协议
设备研发	• 双模手机	• 高性能卫星 • 定制化信关站	• 支持NTN的手机 • 支持NTN的信关站
空口频率	• 卫星L/S频段	• 地面运营商频率	• 卫星L/S频段 • 地面运营商频率
卫星轨道	高/低轨	低轨卫星	高/低轨
典型卫星系统	北斗短报文，天通一号，全球星	二代星链、AST、Lynk	Omnispace星座、此外，透明转发模式下基本适用于所有卫星移动系统

(2) 天地融合组网

卫星网络与地面网络由于运营主体不同,存在通信体制协议不同的问题,不同网络之间的融合存在很多困难,例如数据的归属、异网漫游、计费方法、资源一体化管理等。地面移动网络主要采用通过流量计费的方式,而传统卫星网络由于容量有限,并且其业务以紧急呼救为主,采用的是“保险”的商业模式。为了提升网络性能,星地协同传输已成为通信系统发展的必然趋势。通过对系统内的时间、空间、频率和功率等多个维度资源进行综合调度,可以达到资源配置的最优化,以适应未来广域智能连接的各项业务需求。这种方式能够实现极简化和智能化的网络接入过程,确保即时接入及无时延的网络切换体验。无论用户身处何地,都能根据业务的服务质量(QoS)需求,动态地在地面网络和卫星网络之间进行选择,智能化地接入网络,从而享受最佳的网络使用体验。天地一体化通信网络构架示

意图如图2所示。

(3) 星地频率共享

由于电磁波传播特性,频率越高空间损耗也越大,加上卫星部署的成本和星载设备能力的限制,手机直连服务最适宜的频段仍然是L/S频段。频率资源成为限制手机直连服务发展的关键瓶颈。随着大规模低轨道卫星群的部署,频率冲突问题将变得更加显著。因此,研究新的星地频率规划和频率共享技术是实现星地融合网络的重要任务。未来,根据需求进行频率的统一分配和动态共享,这一举措将显著提高频谱资源的利用率。此外,星地频率的干扰协调和避免技术也将是星地融合组网的关键技术之一。

4 关键技术

(1) 时频率同步

在基于OFDM的通信系统中,无线资源被划分为多个相互正交的资源元素(resource ele-

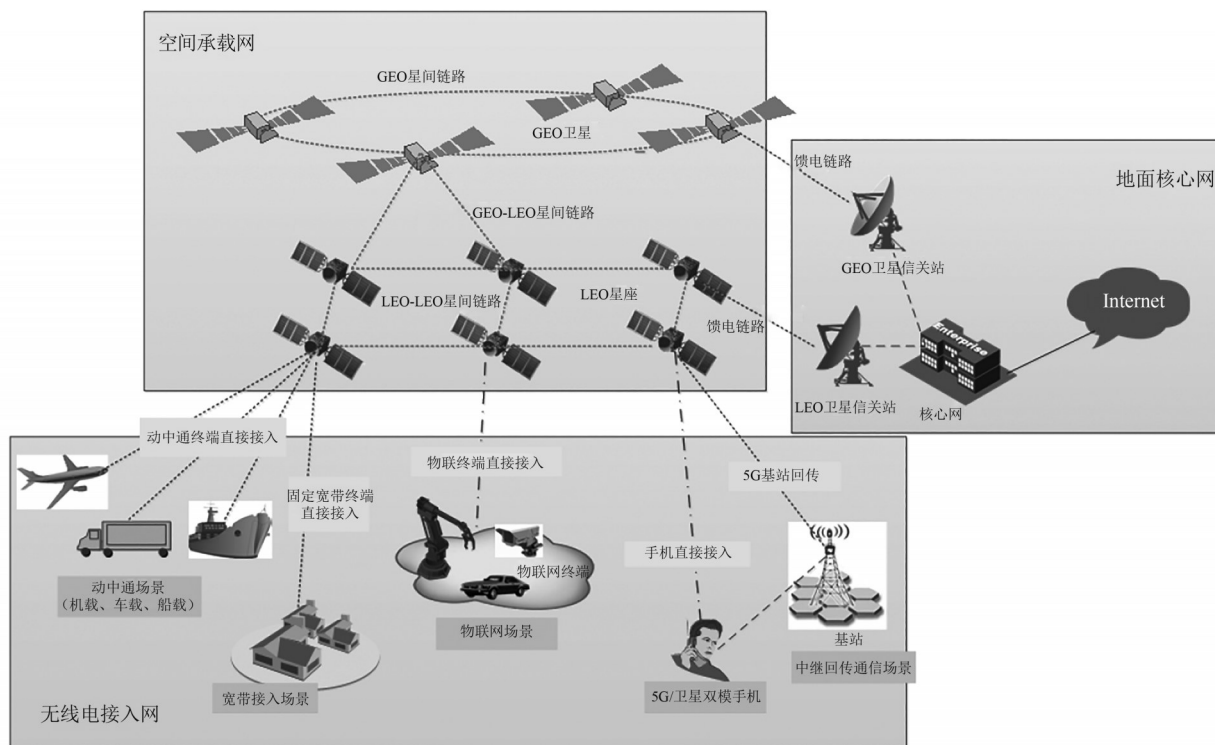


图2 天地一体化通信网络构架示意图



ment, RE), 需要在正确的时频位置上接收端才能有效地进行数据接收和发送。为了找到正确的时频位置, 用户终端需要进行上下行时频同步。为了与基站建立连接, 首先用户终端需要通过检测基站下发的下行同步信号来进行下行时频同步。根据下行同步信号的时频位置, 用户终端可以进一步接收基站下发的系统消息。

在卫星通信中, 卫星相对于地面的用户终端具有较大的间距和较高的运动速率, 因此带来了远超地面系统的传输时延和频偏, 这为时频同步带来了困难。对于下行同步来说, 用户终端需要在可能的时频位置上搜索参考信号。当时频偏范围过大时, 需要搜索的位置过多, 会导致用户终端计算复杂度过大。对于上行同步来说, 时频偏远超传统随机接入前导序列能容忍的范围, 这使得上行同步无法完成。

从终端设备的视角出发, 为了补偿服务链路, 用户终端能够通过全球导航卫星系统 (GNSS) 定位自身的位置, 并接收卫星传播的星历信息。卫星系统的定时补偿采用相对补偿, 即终端仅补偿小区内相对于定时参考点的差异时延部分, 基站侧 (信关站) 维护公共部分时延。公共时延包含馈电链路的时延和用户链路的公共时延, 用户的相对时延是用户根据自己的位置和公共参考点推算出的传播时延。

(2) 随机接入技术

随机接入的核心目标在于帮助终端设备实现上行时间的同步, 并且在用户终端 (user equipment, UE) 由无线电资源控制 (radio resource control, RRC) 空闲状态转变为 RRC 连接状态, 即建立初始的无线连接时, 能够通过这一过程获得用户识别信息 (C-RNTI)。

和地面移动通信相比, 卫星通信因为传输路径更远具有更大的时延, 此外卫星的快速运动也会带来很大的多普勒频偏, 因此, 需要解决随机接入过程中的上行频率和时间估计问题。随机接

入过程中的另一个问题是接入时延问题, 为了加快接入流程, 特别是针对卫星传输的较大时延, 需要对随机接入过程进行优化。

对于卫星通信, 一般假设终端具备定位能力, 也能获取星历信息, 因此可以获得相对准确的频率和定时估计信息。在这个基础上, PRACH 信号抵抗的时延偏差不再是对抗整个小区的半径, 而是定位误差和星历偏差。从 PRACH 信号设计的角度看, 需要考虑实际条件下的残留的时延和频率偏差大小, 通过设置合适的子载波间隔和信号长度, 可以抵抗多普勒偏移残差和信号传输时延偏差, 前导码的重复次数可以缓解卫星信道的低信噪比的压力。

(3) HARQ 重传

用户的终端设备通过 GNSS 技术来确定其位置信息, 并接收卫星广播的星历数据。利用这些星历数据, 可以预测卫星的具体位置和移动速度, 进而估算信号从用户到卫星的传播时延和频率偏移。在每次数据传输完成后, 发送设备需暂停发送, 等待接收方的确认, 这使得混合自动重传请求 (HARQ) 流程是一个非常耗时的机制。

在卫星通信中, 因卫星星座的 RTT 远远大于传统地面通信 RTT, 其 ACK/NACK 反馈可能会在传统 HARQ 的最大计时器之后才能接收到, 或所需的 HARQ 进程数远远多于标准支持的 HARQ 进程数。NTN 中, 卫星到地面的时延过长, 如高度在 35 786 km 的地球静止轨道 (GEO) 单路传输时延可达 272.4 ms, 对于高度为 600 km 的低地球轨道 (LEO) 单路传输时延为至少 14.2 ms, 这给传统地面网络中的 HARQ 重传技术带来了挑战, 3GPP Rel-17 确定 NTN 有能力配置 UE 关闭 HARQ 重传功能, 并且基于终端能力的考虑, 将 HARQ 进程数量扩展到 32 个。对于上行链路上的动态授权, 网络可为 UE 的每个 HARQ 过程配置上行 HARQ 状态, 确定是允许重传或非重传模式。此外, 每个逻辑信道 (logical channel,

LCH) 可被配置为在一种 UL HARQ 状态上传输。大时延下的 HARQ 进程数量问题如图3所示。

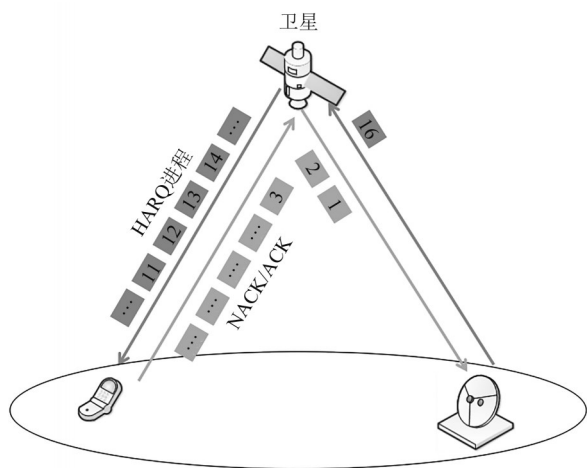


图3 大时延下的 HARQ 进程数量问题

(4) 移动性管理技术

由于低轨卫星高速移动，单颗卫星覆盖地面用户的时间较短，终端面临持续的小区切换以保证通信的连续性。然而，在手机直连低轨卫星场景下，低轨卫星相对于地面高速移动，会造成手机终端需要进行规律性的大规模切换，出现严重的信令风暴，需要对协议进行适应性增强来保障终端用户的业务连续性，可基于用户业务模式、传输速率需求及卫星负载限制对用户进行群组分类，减少切换过程中的重复信令传递，有效降低

切换开销和平均切换时延，从而提升切换成功率。此外，传统星间切换方案主要从单一判决指标出发，为实现零传输中断的星间切换，需研究基于多属性判决的星间无缝切换技术。其核心思想为基于位置信息，与卫星服务时间信息等多指标提出组合切换方案，进行切换链路预判决，同时进行资源预留，并在切换过程中执行基于用户双激活协议栈 (dual active protocol stack, DAPS)，从而达到无损切换。高动态下的移动性管理技术如图4所示。

(5) 寻呼和空闲态管理

在地面移动通信网络中，影响寻呼成功率的主要因素是终端的移动特性，但在低轨卫星通信系统中，速度较低的地面终端相对于卫星的运动来说影响较小，影响寻呼的主要因素变成了卫星的运动、终端的跟踪区以及多波束拓扑模型。每当有新的呼叫产生时，系统将发起终端的寻呼以确定终端的准确位置。如何尽快确定终端的准确位置而又不产生较大的位置寻呼开销是位置寻呼的主要研究内容。位置管理方面，在卫星网络中，由于波束的不断移动，终端和波束小区的对应关系一直在变化，网络在确定寻呼小区的时候比较困难；同时，终端的位置上报对跟踪区 (tracking area, TA) 的确定非常重要，因为获得

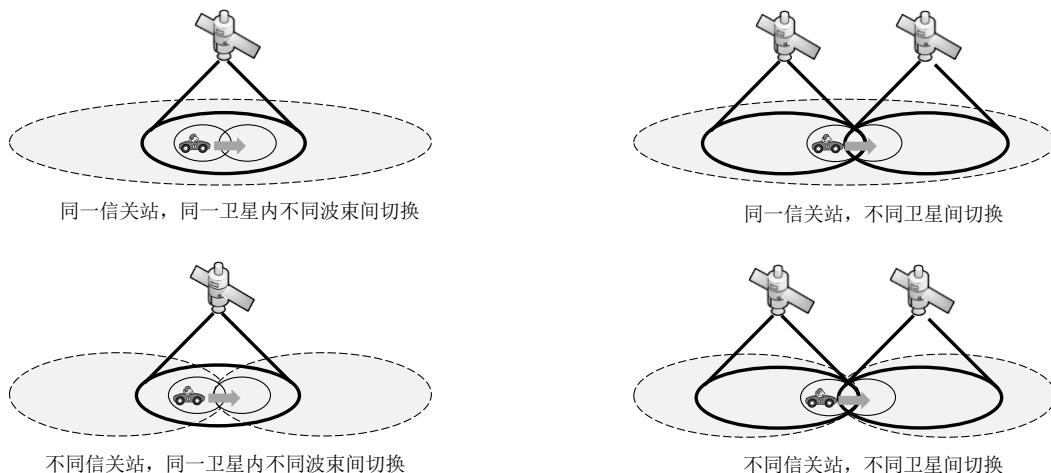


图4 高动态下的移动性管理技术



终端的具体位置，网络能确定合适的寻呼区域。位置上报与寻呼过程如图5所示。寻呼流程如图6所示。

(6) 星上再生网络架构

终端设备通过卫星的服务链路（service link）与馈电链路（feeder link），通过地面信关站与数据网络进行信息互联。支持多种轨道的卫星（高轨、中轨、低轨），并根据其在轨处理能力，分为透明转发与星上处理两种主要模式。透明转发模式下，卫星仅将信号作射频级的放大并转发，不进行任何信号或波形的处理；而星上处理模式允许卫星进行更复杂的操作，如调制/解调、编解码、数据交换和路由。拥有星上处理功能的卫星

能为用户提供接入网的部分（分布式单元DU）或全部功能（集中单元CU+分布式单元DU），甚至包括核心网络功能，使得卫星能够通过星际链接（inter-satellite link, ISL）相互交换信息。总体网络架构示意图如图7所示。

Rel-17/Rel-18均基于的是透明转发的工作模式，Rel-19已经开始讨论可再生的工作模式。在星上再生模式的网络架构中，需要在卫星中集成部分或全部的接入网功能。这种架构能够提供对用户透明的统一接入验证，并对网络的资源、结构、功能和数据进行统一而智能的灵活管理。然而，这一模式对卫星的在轨处理能力提出了更高的要求，同时也对卫星的载荷设计提出了较高的标准。

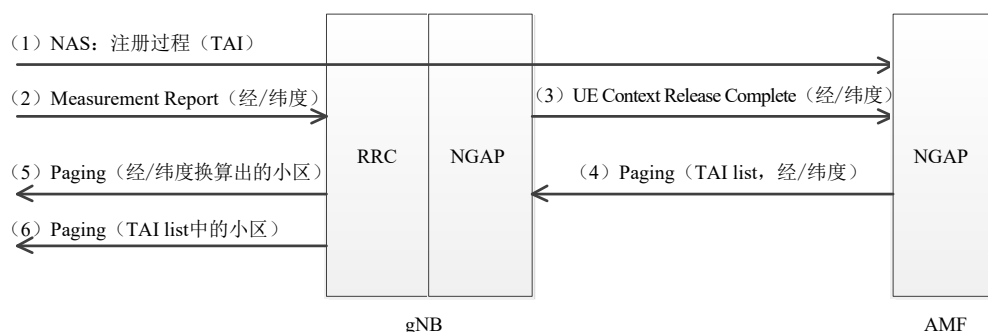


图5 位置上报与寻呼过程

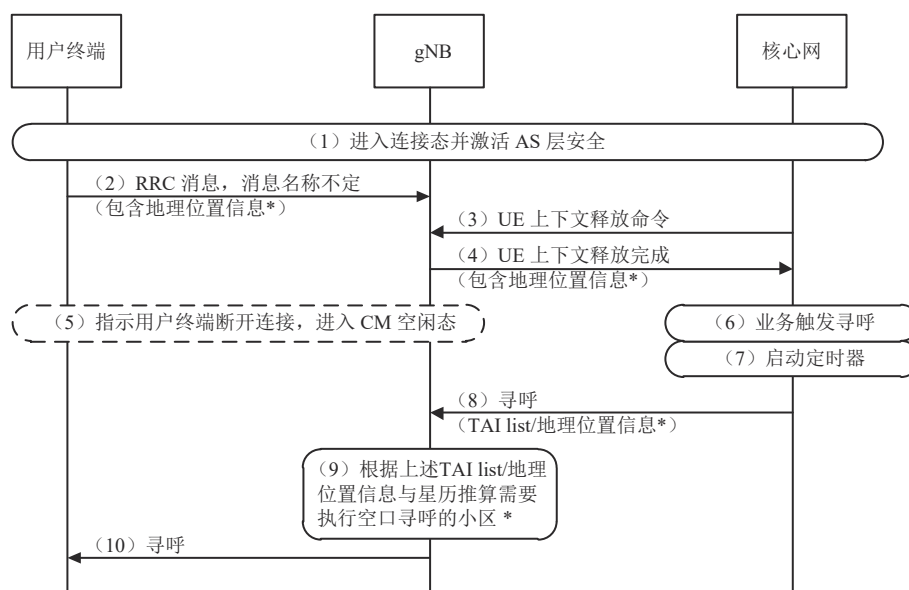


图6 寻呼流程

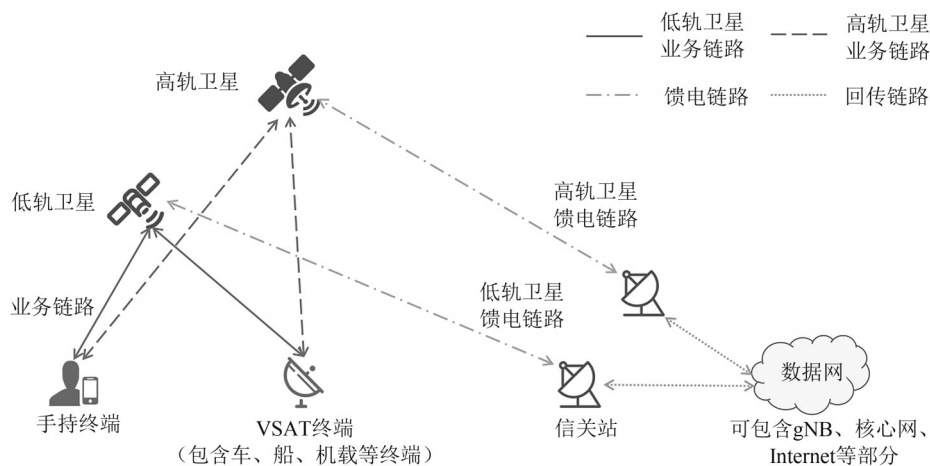


图7 总体网络架构示意图

基于星上处理转发的网络架构有以下两种方式。

在第一种方式中，卫星充当5G接入网基站，星上载荷实现全部的接入网功能如图8所示。

在第二种方式中，基于5G RAN的CU-DU分离特性，可以把CU部署在地面站，从而减轻卫星上的载荷压力。这种配置下，卫星承担gNB-DU的角色，而地面站则负责gNB-CU（集中单元）的功能。在这种架构中，地面的CU与卫星上的DU通过F1AP（F1 application protocol，CU

于DU之间的接口协议）协议进行无线接口通信。星上载荷实现部分的接入网功能如图9所示。

5 未来发展趋势

（1）星地干扰规避

天地融合宽带网络是未来手机直连卫星的重要发展方向，在频谱资源严重不足的背景下，星地频谱共用机制与干扰规避机制是天地融合宽带网络的需要突破的关键问题。因此，可以将卫星和地面蜂窝移动通信系统进行频谱共享，同时对

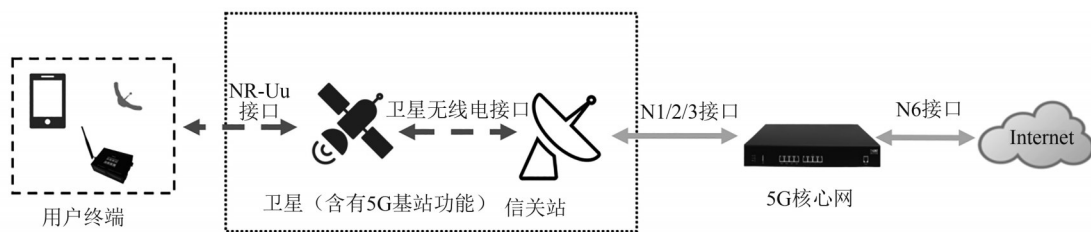


图8 星上载荷实现全部的接入网功能



图9 星上载荷实现部分的接入网功能



卫星和地面蜂窝移动通信进行统一设计，这样可以提升地面蜂窝移动通信系统的高速率需求，卫星产业也可以利用地面蜂窝移动通信的终端产业链来拓展产业空间。

立足于天地融合网络体系架构，如何充分利用地面频率资源、实现星地同频组网，是天地融合宽带网络的研究重点。同频组网可能带来较为严重的波束间干扰，需要统筹设计天地融合网络中的传输技术，通过融合通信的方式，规避天地之间的干扰，实现星地频率的共用。

在星地频率公用场景中，针对卫星覆盖范围较大、星地间干扰较为严重的问题，以满足星地干扰门限为目标，研究卫星侧低复杂的自适应波束成形设计方法，减轻对被干扰方的干扰强度，从而降低星地系统间的同频干扰。星地干扰规避如图10所示。

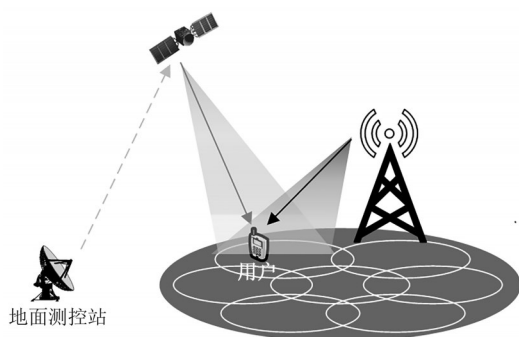


图10 星地干扰规避

(2) 星地融合组网

当前，卫星通信和地面移动通信网络在技术架构上基本是独立的，卫星主要扮演中继的角色，为那些地面移动通信网络无法覆盖的偏远地区或紧急通信情景提供数据传输支持，旨在补充业务覆盖。展望未来，卫星通信与地面移动通信网络正在探索技术的融合，比如在3GPP的NTN中，卫星网络开始使用类似于地面移动通信网络的结构和接口协议。在5G NR标准研究中，卫星通信采用的是透明转发的传输

方式，这需要众多地面站的协同组网。但是，由于无法统一协调无线资源等问题，网络效率仍然偏低。

未来，在6G时代，卫星网络和地面移动通信网络将更深入地实现系统融合，通过使用一体化的网络结构和空中接口协议框架来完成这一目标。通过基站上的卫星、卫星间链路的协调等技术来统一资源管理和调度，实现全球范围内低成本的无缝覆盖，为用户提供无感知的一致服务体验。随着6G的发展，卫星通信网络将作为地面通信网络的重要补充和延伸，同时通过深度融合来提升用户的空口接入能力和立体覆盖能力。6G将实现基站上的卫星部署，并通过星间链路组成卫星星座，协力传输，从而减少大规模传输网络的搭建，并降低地面站的成本。

在6G时代，星地融合的应用场景将更为广泛，需要考虑所有终端用户，无论其是否具备GNSS定位能力。为了降低处理时延、优化用户体验，需要简化接入流程，优化随机接入过程。此外，星地融合系统包括多层异构子网（高、中、低轨卫星网络和地面通信网络），终端连接不同子网的费用存在较大差异，同时由于卫星的高速移动性，波束服务用户时间可能仅有几十秒，需要频繁切换波束，终端可能面临多星多重覆盖的情况，因此，如何智能选择最低成本、最优传输业务的子网进行低成本、简便的快速接入将是需要解决的关键技术。星地融合组网如图11所示。

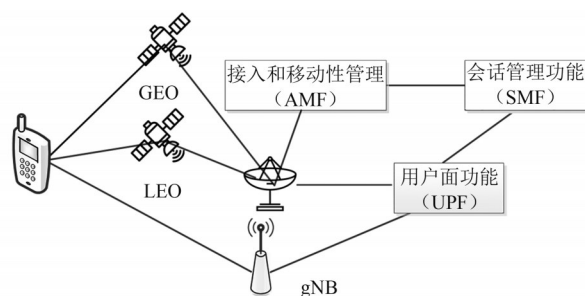


图11 星地融合组网

(3) 协议一体化

为了实现终端芯片一体化设计,降低终端体积,首先要做到协议一体化设计。2024年,随着5G-Advanced阶段3GPP首个标准版本Rel-18的冻结,5G NTN的第二个版本正式发布。3GPP作为地面移动通信标准的技术标准组织,给出了地面与卫星通信系统的协议一体化解决方案。

3GPP在Rel-17 NTN无线空口方面,修改主要涉及物理层时序关系的增强、上行时频同步技术的增强、HARQ技术的增强等关键技术。在NTN场景下,相比地面网络,卫星的覆盖范围增大、传输的时延增加,因此原Rel-16 NR标准中定义的时序关系及参数取值均需要增强,Rel-17对上行时频同步技术进行了增强。在NTN场景下,单向传输时延增大,对于低轨卫星场景,卫星的快速运动造成严重的多普勒效应,影响上行时频同步。在Rel-17中,终端需要根据星地传输时延和频率变化情况对上行时频进行预补偿。

NTN场景的大传输时延导致原NR的HARQ进程难以满足需求,因此需要扩展原HARQ进程以及支持关闭HARQ进程等。在Rel-18阶段,针对手持终端上下行链路受限的特点,3GPP开展

了覆盖增强、10 GHz的高频段应用、NTN-TN的移动性增强、网络验证的UE位置的研究。在未来的Rel-19阶段,3GPP仍将会持续开展下行覆盖增强,提升上行容量、可再生模式、在NTN中支持多播广播技术或称广播与多播技术(MBS)、在NTN FR1(450 MHz~6 GHz)上支持Redcap设备等方面的研究以及标准化工作。

面向6G的星地一体化网络通过卫星网络与地面网络的优势互补、紧密融合,将扩大网络覆盖范围,提升网络整体效率,从而实现全球立体无缝覆盖网络。3GPP Rel-18和Rel-19 NTN时间线如图12所示。

6 结束语

随着无线通信技术的发展,未来通信的发展痛点不仅是提高人口密集地区的通信速率,还要满足飞机、轮船等地面5G网络无法触及区域的网络服务需求,所以,星地融合通信成为未来通信网络的必然趋势。手机直连卫星业务作为星地融合网络的体验入口,将是未来产业界主攻的方向。3GPP NTN将完成从卫星通信到地面通信系统的全面融合演进。未来将部署的低轨卫星星



图12 3GPP Rel-18和Rel-19 NTN时间线



座, 均会实现卫星间链路, 从而可以搭载再生有效载荷, 使得实现在没有信关站部署的地方提供卫星覆盖。未来的6G网络星地融合网络需要根据卫星的特点进行技术优化和改进, 从而真正实现全域覆盖, 万物智联。

参考文献:

- [1] 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 oriented to mobile phone direct connection: key technologies, development status and future prospect[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(2): 25-36.
- [2] 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.
- [3] 孙建成, 孙嘉颖, 缪德山, 等. 5G NTN网络架构标准化演进思考[J]. 电信科学, 2023, 39(9): 76-86.
SUN J C, SUN J Y, MIAO D S, et al. Thoughts on the standardization evolution of 5G NTN network architecture[J]. Telecommunications Science, 2023, 39(9): 76-86.
- [4] 缪德山, 柴丽, 孙建成, 等. 5G NTN关键技术研究及演进展望[J]. 电信科学, 2022, 38(3): 10-21.
MIAO D S, CHAI L, SUN J C, et al. Key technologies and evolution of 5G non-terrestrial network[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(3): 10-21.
- [5] 邓伟. 基于3GPP NTN的天地一体技术与产业发展研究[J]. 通信世界, 2023(21): 16-19.
DENG W. Research on the integration of heaven and earth technology and industrial development based on 3GPP NTN[J]. Communications World, 2023(21): 16-19.
- [6] 李侠宇, 钱梦媛. 新一代星地融合通信技术标准的发展[J]. 通信世界, 2023(21): 8-11.
LI X Y, QIAN M Y. Development of New Generation Satellite-Earth unified communication Technical Standards[J]. Communications World, 2023(21): 8-11.
- [7] 李侠宇. 卫星通信: 2023年加速发展 2024年值得期待[J]. 通信世界, 2023(24): 30-31.
LI X Y. Satellite communication: accelerating development in 2023 and looking forward to it in 2024[J]. Communications World, 2023(24): 30-31.
- [8] 孙晓南, 周世东, 侯利明, 等. 存量5G手机直连低轨卫星通信技术研究[J]. 信息通信技术, 2023, 17(5): 22-31.
SUN X N, ZHOU S D, HOU L M, et al. Research on technologies of existing 5G mobile phone direct accessing to LEO satellite communication[J]. Information and Communications Technologies, 2023, 17(5): 22-31.
- [9] 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.
CHEN S Z. Analysis of LEO satellite communication and suggestions for its development strategy in China[J]. Telecommunications Science, 2020, 36(6): 1-13.
- [10] 徐晖, 陈山枝, 艾明. 面向6G的星地融合网络架构[J]. 中兴通讯技术, 2023: 1-12. (2023-10-17).
XU H, CHEN S Z, AI M. Integrated with satellite and terrestrial network architecture for 6G[J]. ZTE Technology Journal, 2023: 1-12. (2023-10-17).
- [11] 3GPP. Solution for new radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 16): TR38.821[S]. 2019.
- [12] 3GPP. Study on new radio (NR) to support non-terrestrial networks (REL-15): TR 38.811v15.4.0[S]. 2020.
- [13] 徐冰玉, 李侠宇. 卫星互联网与5G/6G融合发展探析[J]. 国际太空, 2022(12): 28-32.
XU B Y, LI X Y. Analysis on the integration development of satellite Internet and 5G/6G[J]. Space International, 2022(12): 28-32.
- [14] 徐冰玉, 杜斌, 李侠宇. 与5G融合的卫星通信移动性管理技术研究[J]. 国际太空, 2021(11): 53-57.
XU B Y, DU B, LI X Y. Research on mobile management technology of satellite communication combined with 5G[J]. Space International, 2021(11): 53-57.
- [15] 徐冰玉, 李侠宇. Starlink低轨卫星通信星座深度分析[J]. 信息通信技术与政策, 2021, 47(9): 16-20.
XU B Y, LI X Y. In-depth analysis of the satellite constellation Starlink[J]. Information and Communications Technology and Policy, 2021, 47(9): 16-20.
- [16] 王文跃, 万屹, 卢海萌, 等. 卫星移动通信市场现状及我国市场发展空间研究[J]. 电信网技术, 2017(10): 34-37.
WANG W Y, WAN Y, LU H M, et al. Current situation of satellite mobile communication market and its development space in China[J]. Telecommunications Network Technology, 2017(10): 34-37.
- [17] 丁睿, 房天昊, 王闻今, 等. 星地融合通信系统: 网络架构、使能技术及原型验证[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(3): 79-87.
DING R, FANG T H, WANG W J, et al. Integrated satellite-terrestrial communication systems: architectures, enabling technologies and prototype verification[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(3): 79-87.

[18] 王文跃, 万屹, 卢海萌. Ka 宽带卫星通信商业运营模式研究[J]. 电信网技术, 2017(10): 41-44.

WANG W Y, WAN Y, LU H M. Study on business model of Ka-band satellite communication[J]. Telecommunications Network Technology, 2017(10): 41-44.

[作者简介]



李思栋 (1995-), 男, 中国信息通信研究院工程师, 主要从事无线信息化、卫星通信等方面的研究工作。

李侠宇 (1978-), 男, 中国信息通信研究院技术与标准研究所副总工程师、正高级工程师, 现任 IMT-2020 (5G) 推进组 5G NTN 工作组组长, 中国通信标准化协会 TC611 WG2 工作组组长。长期从事移动通信 4G 和 5G 网络、移动互联网、数字集群、专网通信、卫星通信、卫星定位和导航等方面的

研究、标准化、技术评估和试验工作。

孙建成 (1982-), 男, 中信科移动通信技术股份有限公司高级工程师, 主要从事 4G/5G/6G 高层技术研究和标准化推动工作, 主要研究方向为卫星通信。担任 3GPP Rel-19 NR NTN 的联合报告人, 负责 RAN2/3 标准化工作。

康绍莉 (1974-), 女, 博士, 中信科移动通信技术股份有限公司正高级工程师, 长期从事移动通信新技术研究, 主要研究方向包括移动通信系统设计及多址接入技术、卫星通信、频谱共享等。

廖运发 (1973-), 男, 中国信息通信研究院华东分院院长、副总工程师、高级工程师, 机载公众通信联盟运营专委会主席。长期从事信息通信、互联网、数字化及安全领域的技术研究、咨询规划、标准制定、测试评估、市场研究等工作。

陈俊琰 (1981-), 男, 博士, 中国信息通信研究院华东分院副总工程师、高级工程师, 长期从事人工智能与大数据、企业信息化规划等相关领域的整体规划设计及解决方案等咨询工作。