

面向天地融合的卫星网络架构和传输关键技术

徐 晖, 缪德山, 康绍莉, 孙韶辉
(大唐移动通信设备有限公司, 北京100083)

摘 要: 通过对天地融合的应用场景和技术需求的分析, 提出面向B5G/6G的弹性可重构天地融合网络架构, 实现网络功能的按需重构, 保证网络按需确定性服务能力。基于所提的网络架构给出天地融合的统一空中接口传输体制, 实现天地融合网络的高效传输, 提出天地融合网络的移动性管理机制, 提升网络组织与资源管理效能。

关键词: 天地融合网络; 网络架构; 传输体制; 移动性管理

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200201

Network Architecture and Key Technologies for the Integrated Satellite and Terrestrial Mobile Communication System

XU Hui, MIAO Deshan, KANG Shaoli, SUN Shaohui
Datang Mobile Communication Equipment Co.Ltd., Beijing 100083, China

Abstract: The flexible and reconfigurable network architecture for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system was proposed based on analyzed the scenarios and requirements. And the integrated satellite and terrestrial mobile communication system could realized the reconstruction of network functions and ensured the deterministic service capability of the network. A unified transmission mechanism and the mobility management mechanism for the integrated satellite and terrestrial mobile communication system was proposed to realized efficient transmission and improved network resource management efficiency.

Keywords: integrated satellite and terrestrial network, network architecture, transmission mechanism, mobility management

1 引言

随着以卫星通信为代表的空间网络的快速发展, 空间网络与地面网络形成了两大独立的通信网络。虽然地面蜂窝网络与空间网络在各自领域都得到了长足发展, 但仍未改变各自独立发展、应用场景受限的局面。随着业务逐渐融合和部署场景不断扩展, 地面蜂窝网络与空间网络具有极强的互补性。面向未来万物智联与全球广域覆盖等迫切需求, 为了更高效地实现资源共享, 构建空间网络与地面网络相结合的天地融合网络已成为B5G和6G通信网络的重要发展趋势^[1]。

2 天地融合网络发展概述

天地融合网络是指由高轨卫星网络、中低轨卫星网络、临空网络、地面蜂窝网络等共同组成立体覆盖移动

通信网络, 形成全球无缝立体覆盖, 实现无盲区宽带移动通信。针对卫星、升空气球、无人机、地面蜂窝等组成的多重形态异构网络, 期望构建包含统一空中接口协议和组网协议的服务化网络架构, 能够满足不同部署场景和多样化的业务需求^[2]。未来用户只需要携带一部终端, 就可以实现全球无缝漫游和无感知切换。

2.1 应用场景和技术需求

天地融合网络的覆盖, 能够在任何地点、任何时间、以任何方式提供信息服务, 满足天基、空基、陆基等各类用户接入与应用。系统不仅可以在全球范围内实现宽带和大范围的物联网通信, 还可以集成精确定位、导航、实时地球观测等各种新功能。

如图1所示, 天地融合网络可以在内陆地区用地面

基站覆盖，发挥容量优势，满足海量接入需求；在偏远地区用卫星覆盖，发挥覆盖优势，节省基站建设成本。卫星覆盖可以为偏远地区人口、飞机、无人机、汽车等提供宽带接入，实现全地域全时的宽带接入能力；在全球没有蜂窝网络的地区提供广域物联网接入，实现农作物监控、珍稀动物无人区监控、海上浮标信息收集、远洋集装箱信息收集等服务；全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）与低轨星座的融合，可以提供10 cm级的高精度定位，相对于GNSS自身的10 m级定位其精度提高100倍；高精度的地球表面成像，实现可持续发展检测、动物迁徙观察、救灾、交通调度等服务^[3-4]。

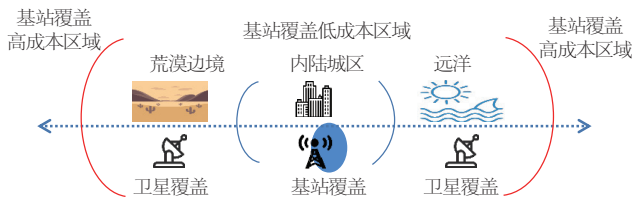


图1 天地融合的应用场景示例

天地融合网络将能够满足如下一些技术需求：

- 实现真正的全球100%覆盖；
- 支持1 000 km/h以上的终端运动速度；
- 支持差异化空中接口传输时延，从微秒级到数百毫秒级；
- 小区通过天地协作传输，边缘频谱效率明显提升；
- 具有很好的抗毁应灾能力。

2.2 标准进展及发展趋势

业界有多个组织在开展天地融合的研究工作。例如，国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）早在2016年便提出了卫星通信与地面通信融合的构想，并设立重点研究课题“将卫星系统整合到下一代接入技术中的关键因素（简称NGAT_SAT）”。目前该课题已经完成了研究报告ITU-R M.2460，分析了远程中继宽带传输、数据回传及分发、宽带移动通信、混合多媒体等卫星应用场景，并探讨了卫星组网、相控阵天线、频谱共享等关键技术方向^[5]。

3GPP在系统架构（System Architecture, SA）以及无线接入网（Radio Access Network, RAN）工作组中先后设立了多个非地面网络（Non-Terrestrial Network, NTN）相关的研究项目和技术标准，已明确将卫星接入列为5G的多个接入技术之一，并对基于5G的卫星网络部

署方案和应用场景进行了具体研究和分析，开展初步技术研究。其中，3GPP TR38.913、TS22.261探讨了卫星在5G系统和应用中的重要作用，TR38.811、TR22.822、TR38.821开展了具体的技术可行性分析和技术方案研究。目前3GPP R17尚有3个新的NTN项目在进行标准化制定，包括NR over NTN、IoT over NTN、5G ARCH_SAT，预期在R17完成第一个基于5G的透明转发架构卫星通信标准的制定。

此外，欧洲航天局（European Space Agency, ESA）牵头成立了Sat5G组织，探索卫星采用5G的可行性方案，研究和验证网络功能虚拟化（Network Function Virtualization, NFV）、软件定义网络（Software Defined Network, SDN）、多连接、星地网络一体化管控等关键技术。

面向未来的天地融合网络已成为了移动通信领域的研究热点。实现天地融合网络的组网将经历3个阶段：第一阶段是业务互通，卫星与地面网络各自独立，两者通过中间网关进行业务的互联互通，实现初步的融合；第二阶段是体制融合，卫星通信系统采用与地面相同或相似的通信体制，频谱资源与地面系统协同复用；第三阶段是系统融合，实现两者在网络架构、网络功能和空中接口传输，以及无线资源管理和调度等方面的融合，单一用户管理和安全机制实现全网统一网络管理。通过天地通信融合形成天地无缝覆盖的三维立体通信，实现全球的随时随地宽带无线接入能力。

3 天地融合的网络架构

天地融合网络将由天基多层子网（高轨卫星、中低轨卫星以及临空设备）和地面蜂窝多层子网（宏蜂窝、微蜂窝和皮蜂窝）组网构成统一的大时空尺度跨域异构的网络^[6]，如图2所示。

对于卫星组成的天基网络，随着卫星技术的不断进步，星上处理能力将大大增强，将实现星上信号再生处理、路由交换等功能，不同的卫星之间可以通过星间链路建立广泛的、全面的连接^[7]；同时5G/6G网络将面向多样化的应用场景为用户提供按需的服务能力。因此天地融合网络应该能够灵活适配业务场景和需求，根据业务场景和需求智能地提供弹性可重构的网络服务能力，实现5G/6G网络按需服务的目标。

由于卫星的轨道和形态类型丰富，与地面网络运行环境存在较大差异，天地融合网络架构需要考虑网络部署的灵活性和扩展性^[8]，兼容透明转发和星上处理模式，考虑不同的传输条件、不同的传输时延以及链路动态切换等因素，通过网络的柔性适配能力实现天地融合网络

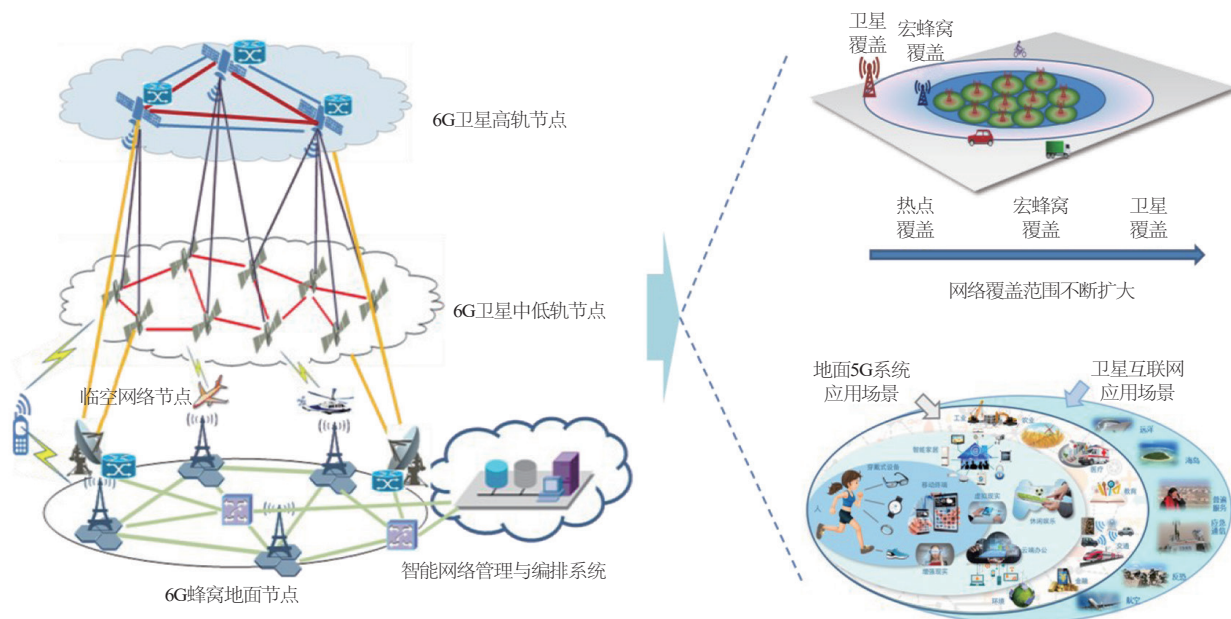


图2 大时空尺度跨域异构的天地融合组网示意

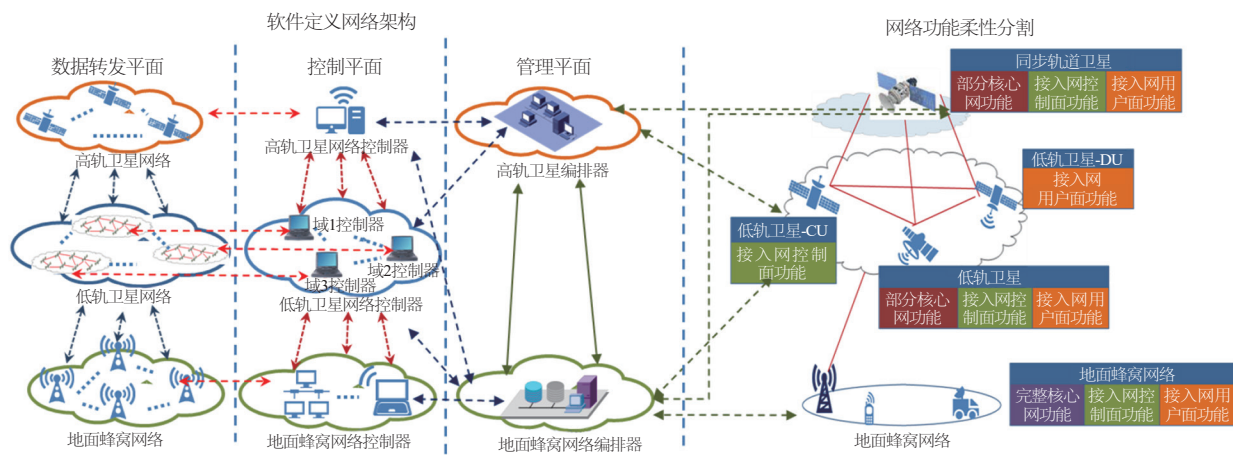


图3 天地融合网络的系统架构

的灵活部署、优化和扩展。

面向B5G/6G的天地融合网络应具备简洁、敏捷、开放、集约和资源随选等特点,尽量减少网络层级和接口数量,降低运营和维护的复杂性。天地融合网络可以通过天地融合网络的弹性可伸缩能力,实现网络和业务的快速部署,通过网络资源的统一规划和按需、自动化部署,实现端到端运营。

SDN技术能够在异构多域网络环境下对全网资源进行统一管理和动态配置,实现灵活高效的资源分配和协同。因此天地融合网络可通过SDN技术实现网络的弹性

可重构,通过SDN提供的网络功能增强网络活力,降低运营成本,促进网络开放与业务创新^[9-10]。通过采用模块化功能设计模式,并通过“功能组件”的组合,构建满足不同应用场景需求的网络。天地融合网络的系统架构如图3所示。

在图3中,天地融合网络根据卫星的处理能力构建分层分域的协同管理架构,通过高轨、低轨、地面3级控制器进行协同工作,完成端到端的网络和业务的管理。地面部署能力强大的主控制器,负责构建全局网络视图,根据网络状况和业务需求进行全网资源编排。地面控制

器可根据卫星及地面网络状况计算符合需求的路由、分片情况，通过高轨控制器、低轨控制器下发资源编排策略到数据转发面。

高轨卫星作为天基网络的骨干节点，不仅承载着宽带业务传输，还负责管控区域内的星间网络拓扑并构成卫星网络中的单个自治域。高轨卫星的控制器主要负责从地面主控制器处获取业务需求、路由策略等，并将这些策略下发到低轨控制器；同时，高轨控制器从低轨控制器处收集卫星网络实时状况，并将网络状况发送给地面主控制器，用于路由调优和负载均衡。低轨卫星控制器执行网络性能监测上报，并执行本地快照路由和备份路由切换任务。

天地融合网络采用服务化的网络架构，网络功能可以根据业务和组网需求进行按需部署，根据不同的部署场景以及网络传输能力，将不同网络功能在天基和地基网络间进行柔性分割，如在控制面和数据转发面之间进行分割，或在集中单元（Centralized Unit，CU）和分布单元（Distributed Unit，DU）间组网。在地面部署完整的蜂窝移动通信核心网和接入网，在卫星上根据组网部署场景、需求和卫星能力进行网络功能定制化设计，支持灵活的路由与业务传输。

天地融合网络全域覆盖、随遇接入和动态变化的特性需要对异构网络的资源进行统一和智能的管理。为了实现天地融合网络资源的统一管理和智能编排，天地融合网络将在高轨卫星和地面部署网络编排系统。由于高轨卫星资源受限，因此高轨卫星编排器将采用轻量级的网络编排技术，负责接收其管辖域内卫星节点或链路的异常状态通知，根据业务特性、网络拓扑、网络负载等动态调整网络结构。在紧急情况发生时，可以根据地面智能网络编排系统的指令以及域内卫星网络节点的可用性、安全性、负载等进行网络重构。在地面将部署智能网络编排系统，负责天地融合网络资源的统一管理，实现网络功能和性能的自动化编排与管理。

同时，为了满足天地融合网络架构弹性可重构的需求，智能网络编排系统引入了网络人工智能技术，实现以用户需求数据、网络运行数据、网络拓扑数据、星历数据等为数据源，通过人工智能算法分析匹配业务需求的网络能力。根据业务需求，按需、自动化地对网络资源进行管理和编排；同时结合天地融合网络中增强的网络控制、分析和采集能力，形成动态跨域资源的实时自治闭环系统，实现网络的智能分析、编排，避免网络资源的浪费；快速调整网络服务能力，保障重点用户的业务需求。同时智能网络编排平台还具备端到端的网络策略管理能力，结合用户的业务需求、网络状态和资源现状，进行智能决策与策略下发。

4 面向天地融合网络的关键技术

4.1 天地融合网络的无线传输技术

天地融合网络面临复杂的信道环境，信道时延、多普勒频率偏移值（简称多普勒频移）等特性差异极大，高效利用时、空、频、功率等多维资源提升传输性能面临巨大挑战^[1]。面向天地融合的通信体制设计需要充分利用地面通信的研究成果，同时考虑卫星通信的特殊条件和需求。对于卫星通信的传播环境、移动性、卫星轨位变化和多重覆盖等方面进行针对性优化设计，保证通信的可靠性和传输效率。对于不同的应用场境，采用天地融合统一的无线空中接口协议设计，能简化系统和终端的产品设计，扩大产业生态链。通过空中接口参数和协议机制的软件可配置和适应性修改，实现统一空中接口体制，保持技术体系的一致性，使得地面通信和卫星通信保持部署和业务提供的协同性。下面分别介绍提升天地融合网络卫星通信空中接口传输性能的关键技术。

(1) 多普勒频移补偿和时频同步技术

在天地多层融合网络中，高轨系统相对地面静止，因此时间和频率的同步并没有对系统带来更多的要求，然而对于低轨系统，卫星的快速运动会导致定时和频率的快速变化，对通信链路的稳定传输带来较大的压力。不同载频的多普勒频率偏移值见表1。

表1 不同载频的多普勒频移

载频/ GHz	最大多普勒 频移/kHz	相对多普勒 频移	最大多普勒 变化率	备注
2	±48	0.002 4%	-544 Hz/s	LEO轨道高度为600 km
4	±96	0.002 4%	-1.08 kHz/s	
6	±144	0.002 4%	-1.62 kHz/s	
8	±192	0.002 4%	-2.16 kHz/s	
20	±480	0.002 4%	-5.44 kHz/s	

表1中，当频段较高时，多普勒频移达到几百千赫兹的量级，这对链路的同步带来了较大挑战，如果完全依赖接收端盲检，信号的接收性能无法保证。为了解决这个问题，常见的解决方案是进行发送端预补偿。图4中列出了一种解决思路，网络侧以波束中心点进行多普勒频移预补偿；接收侧终端则只需要补偿终端位置与波束中心点存在距离偏差所带来的残留多普勒偏移值。

同时，卫星网络传输时延的快速变化将导致空中接口传输链路同步保持困难。在下行链路，终端可以通过参考信号的检测来纠正符号和帧边界定时；上行链路传输一般缺少连续的参考信号，导致上行的定时调整存在较大问题。

当终端具备GNSS定位和时频自主补偿能力时，终

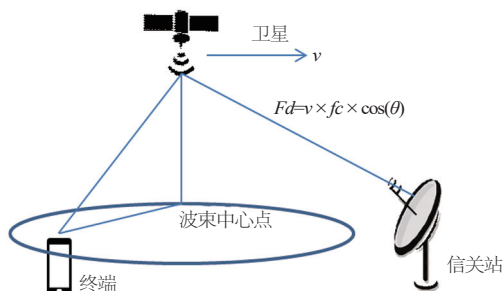


图4 公共多普勒频移补偿

端可以获得自己的地理位置；基于预存的星历信息或广播的星历信息，获得卫星的位置信息；计算出时间偏移和频率偏移信息，经过终端的时频预补偿操作，残留的时频偏移相对较小。网络侧能检测出终端的上行发送信号，开启接入流程和随后的数据传输。

对于无GNSS定位和时频预补偿能力的终端，将无法对上行链路的时间偏移和频率偏移信息进行补偿，需要设计更加稳健的上行物理随机接入信道（Physical Random Access Channel, PRACH）信号以克服时间和频率偏移；网络侧在检测PRACH信号时，必须能检测出定时偏移和频率偏差，并将时频偏差信息反馈给终端，以帮助终端的上行信号同步。进一步的，在定时维护和频率跟踪阶段，由于终端不具备GNSS定位能力或者不能进行时间和频率偏差预补偿，因此需要网络通知终端定时变化率和频率变化率信息，以帮助终端进行时间和频率的同步调整。

(2) 编码调制技术

对于信道编码技术，地面移动通信系统3G采用了卷积码和Turbo码；4G对纠错编码从性能与译码速度方面进行了优化，控制信道引入TBCC，数据信道Turbo码则引入QPP交织器；5G数据信道进一步引入了LDPC码，控制信道引入可达香农限的Polar码。和地面通信系统相比，卫星通信系统的链路存在传输距离远、时延大等特点，对编码有着不同诉求。卫星通信链路传输距离远，需要设计极低码率纠错编码方案，而且为了减少重传反馈时延，需要设计支持低HARQ时延的纠错编码方案。

因此，相对于地面移动通信系统，卫星通信系统的编码方案设计需要额外考虑如下方面：高可靠、低误块率的信道编码方案；基于可分组和重复传输的信道编码方案（如喷泉码）；多重级联的信道编码方案。

调制技术通常和信道编码技术存在一定的交互，针对卫星通信的特点，需要基于卫星信道的传输特性进行特定的优化。在卫星功率受限的情况下，应采用功率利用率

较高的调制方式；而在频带受限的情况下，则应采用频带利用率较高的调制方式。地面移动通信一般采用BPSK、QPSK、xQAM等调制方式，而在卫星通信中通常采用BPSK、QPSK、8PSK、xAPSK等调制方式，这主要是由对峰均比特性的需要差异导致的。在天地融合系统的调制方式设计中，需要综合考虑两种通信模式的差异性。

针对卫星信道传输，由于其通常LOS径占据主导地位，因此对于调制编码等级MCS的颗粒度比地面移动通信更加敏感。为了提高频谱利用率，可以采用更精细颗粒度的MCS等级定义，从而进一步优化自适应编码调制方式（AMC技术）。

卫星信道另一个特点是可能经历雨雪等恶劣天气，这要求采用支持极低信噪比的调制编码等级，而且需要采用更稳健的信道编码方案和重复传输方案，以尽可能维持在极低信噪比下的低速率数据通信。

(3) 波形和多址技术

对于地面移动通信系统，5G系统已采用了OFDM技术和DFT-S-OFDM技术两种波形传输方式，主要的出发点是提高频率调度的灵活性，并能较容易地对抗频率选择性衰落。对于卫星通信系统，单载波波形应用的较为广泛，主要的好处是峰均比较好，而且对多普勒频移的影响相对稳健一些，但是其对于互联网业务的适应度比较差，无法采用更精细的颗粒度进行资源调度。对于峰均比的比较，业界有较多的研究。在3GPP的讨论中，基于参考文献[12]的对比，DFT-S-OFDM波形的峰均比性能和DVB的单载波性能类似，因此现阶段，地面通信的波形应用于卫星通信具备技术上的可行性。

面向天地融合的通信网络，未来新波形的设计需要考虑如下一些需求：

- 除已有5G定义的互联网和物联网业务外，还支持广播、组播等多样化业务；
- 面向卫星通信的带宽和功率约束，能支持低的峰均比（PAPR）；
- 能工作在高频段、非线性器件、大相噪等不利条件下；
- 能够兼容地面通信，具有高频谱效率；
- 面向高速运动场景（无论是卫星的运动还是终端的运动），具有更好的抗频偏能力。

在波形技术的基础上，多址技术是无线通信系统中的重要研究方向，其目的主要是为多个用户提供更好的接入和复用，常用的技术包括TDMA、FDMA、CDMA、SDMA等。针对卫星物联网场景，非正交多址NOMA技术具备较大的技术优势，一是提供更多的连接，二是减少卫星接入传输的时延。在物联网海量连接场

景中，NOMA技术可以提供巨大的多址资源池，每个用户可以按需占用资源发送，接收端只需同时区分并检测出一定数量的用户信号，而无须支持所有的用户同时发送。事实上，由于物联网的数据突发性，导致同时发送的用户数量并不大，但是必须为每个用户分配或者提供一定的资源，减少用户碰撞的概率。新型多址接入技术应用到卫星通信中，需要解决下述一些关键问题。

卫星信道下的码本/复数域扩频序列设计：针对卫星通信覆盖范围广、时延较大以及卫星信道开放性的问题，在免许可竞争接入、安全等方面进一步优化码本/复数域扩频序列的设计。

低复杂度多用户检测算法研究与实现：现有非正交多址多用户检测算法的复杂度较高，星上处理较为困难，需进一步优化。

兼容正交多址卫星通信系统：受卫星寿命影响，天地一体化信息网络中多体制卫星通信系统共存的局面将长期存在，为保证用户的服务质量以及技术更新的平滑过渡，新型非正交多址卫星通信系统应能兼容传统正交多址系统。

(4) 混合自动重传请求

对于卫星通信系统，传输时延较大，如果采用现有地面移动通信的技术将无法满足不同HARQ的需求。这是因为如果每个时隙都允许信号重传，则需要预留非常大的HARQ进程，特别是高轨系统几百毫秒的RTT（Round-Trip Time，往返时延），导致终端或者网络的数据缓存的压力非常大。

为此，在天地融合网络中可以针对不同轨道和不同传输时延卫星采取不同的HARQ配置策略，主要包括：
①基于用户设备（User Equipment，UE）的混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat Request，HARQ）使能关闭，一般用于高轨卫星系统，由于其传输时延太大，可以关闭UE的全部HARQ进程，不支持重传；②基于HARQ进程的使能关闭；③基于逻辑信道的HARQ使能关闭。②和③一般应用于低轨系统，由于低轨星座的传输时延相对较小，采用物理层重传可以有效提高系统的吞吐量。通常HARQ配置有两种典型的模式，一种是半静态的HARQ关闭机制，另一种是动态的HARQ关闭机制。动态的HARQ具有更大的灵活性，可以针对业务状态和缓存能力对每个HARQ进程进行动态配置。

(5) 波束管理技术

卫星通信中一个重要的应用技术是波束管理。典型的波束赋形技术包括方向可调波束（Steering Beam）和移动波束（Moving Beam）两种。对于方向可调波束来说，卫星移动时，波束可以始终覆盖同一个用户或区域；而对于移动波束来说，当卫星运动时，波束和卫星相对静止，

但是波束在地面是平滑移动的。在地面移动通信中，主要的波束管理技术包括波束扫描技术和定向波束赋形。因此波束管理技术存在星地技术路线融合的可能性。

在卫星通信中，由于卫星覆盖范围较大，导致卫星功率的使用效率降低。为提高波束的使用效率，可以采用宽波束和窄波束结合机制。宽波束负责用户的接入控制，窄波束用于数据的实际发送，通常也称之为点波束，这和地面移动通信系统的控制波束和业务波束类似。进一步的，波束管理和载波分配可以结合，比如宽波束对应主载波，而点波束对应辅载波。基于载波聚合原理，宽波束和窄波束可以集成在一起，共同服务一个用户。控制宽波束和业务点波束示意如图5所示。

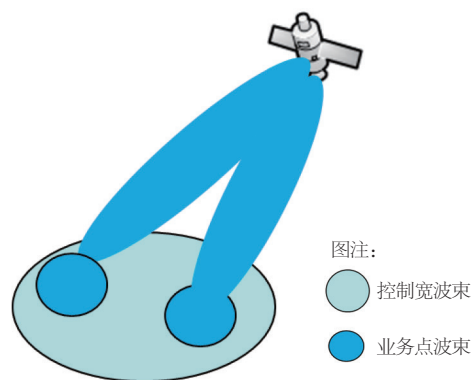


图5 控制宽波束和业务点波束示意

(6) 多星多波束的协作传输技术

传统的卫星通信一般采用单星单波束服务一个用户，这对用户的数据传输速率和容量带来一定的限制，卫星资源的使用效率也未能充分利用。为了进一步利用卫星的空间传输特性，可以让一个终端同时连接在编队的多颗卫星上。这些卫星通过协作实现联合数据传输，获得发送分集增益或者复用增益。

多星协作传输技术作为提升卫星传输速率的一种候选技术，多个卫星波束或者单个卫星多个极化波束在相同频谱资源中为同一个用户传输数据。图6给出多星多波束协同传输示意及仿真结果。由于卫星的快速移动以及功率受限等原因，多星协作传输技术对系统要求较高，主要的研究内容与技术挑战包括^[13]：

- 多星多波束协同传输模型构建；
- 多星多波束视距MIMO传输理论与容量；
- 多波束协同信号传输与接收处理方法；
- 多波束动态调度方法与多维波束资源分配机制。

从图6的传输性能仿真对比中可以看出，通过4星多波束协作传输，可实现单用户150%以上传输速率的提升。

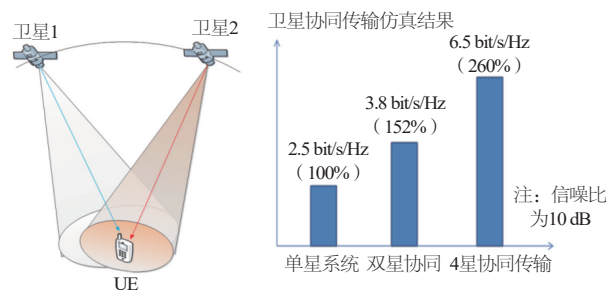


图6 多星多波束协同传输示意及仿真结果

4.2 移动性管理技术

在天地融合网络中, 由于非同步轨道卫星的移动速度很快, 导致终端和卫星的连接不断发生变化, 不仅用户链路发生变化, 馈电链路也会发生变化, 从而带来业务中断, 降低用户的体验。对于具备星上处理能力的卫星, 其移动还会带来星间拓扑结构的变化和星间路径的重选, 导致路由的移动性变化^[14]。因此终端与卫星连接的移动性管理始终是天地融合网络的一个重要课题。相对于地面移动通信系统, 卫星通信移动性管理面临以下挑战。

(1) 基于无线资源管理测量的切换准则不准确

地面基站小区中心点和边缘点链路损耗差异大, 容易基于信号强度变化判断切换时机, 而卫星系统波束边缘和波束中心点信号强度差异相对较小, 完全依赖于无线资源管理 (Radio Resource Management, RRM) 测量进行波束切换判决将会带来较大的不确定性。

(2) 切换的频率高, 小区驻留时间短

由于低轨卫星的移动速度快, 波束和星间切换时间通常在秒级或分钟级, 使得终端需要进行频繁切换, 对切换性能和可靠性提出了更高要求。

(3) 馈电群切换

当卫星采用透明模式进行数据传输时, 馈电链路发生切换时该卫星内所有服务用户必须同时从原信关站切换到新信关站, 否则将会失去连接。通常, 一颗大容量卫星服务用户数有数千或数万个, 所有用户要求在较短的时间内进行切换, 对于随机接入资源和信关站协调存在很高要求。

因此针对天地融合网络的移动性管理需要考虑新的思路和解决方案。根据终端用户所处的不同的RRC (Radio Resource Control, 无线资源控制) 状态, 可以区分为空闲态的移动性管理和连接态的移动性管理。下面将针对这两种移动性管理机制进行讨论。

(1) 空闲态的移动性管理

当用户处于空闲态时, 终端将对卫星波束进行波

束选择和重选。卫星波束的选择和重选是终端自主的行为, 但网络可以通过广播消息对终端小区的选择/重选进行干预。终端对卫星波束的选择或重选判决可以依赖于卫星的星历信息、信号强度和终端位置信息。相比地面通信系统, 终端可以基于星历信息和卫星波束配置信息判断终端是否处于卫星的波束覆盖范围之内。

(2) 连接态的移动性管理

对应连接态的终端, 其移动性管理可以分为星内切换、星间切换和馈电切换。对于星内切换和星间切换, 需要解决的主要是切换判决的准确性和切换信令开销问题; 对于馈电切换, 要求的是切换的可靠性和大规模用户切换的有序性。

1) 星内切换和星间切换

终端在同一卫星内不同小区切换时, 如果源小区和目标小区属于同一个基站, 切换过程和目前地面移动通信的小区间切换一致。对于星间切换, 终端将在两颗卫星之间的波束进行切换。当卫星移动时, 终端从一颗卫星切换到另一颗卫星, 除了空中接口的信令交互外, 此时还需要卫星间进行信息交互。

一是基于星历、位置和RRM测量的联合判决。当卫星在移动时, 终端上报位置和RRM测量信息给网络, 网络基于星历信息确定波束覆盖情况, 然后判断终端是否处于波束或者小区边界, 再进行切换判决。相比于现有技术, 充分利用了终端的位置信息和RRM测量信息, 保证了切换的准确性和有效性。一种基于终端位置和RRM测量同时上报的切换流程示意如图7所示。

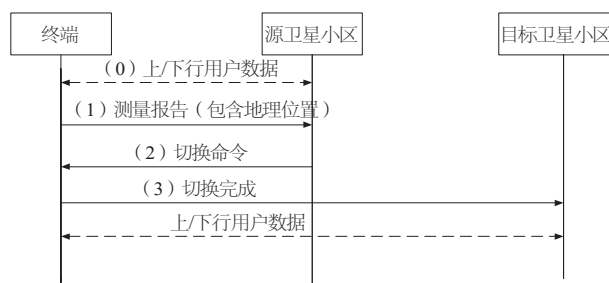


图7 一种基于终端位置和RRM测量同时上报的切换流程示意

二是基于星历和位置的条件切换。为了减少频繁切换带来的时延和信令的影响, 终端可以基于网络的信息通知进行条件切换, 即终端自主判断是否进行切换, 而且基于网络的信令通知自动连接到新的波束和小区, 切换成功后通知网络。对于条件切换, 最大的优势就是不需要每次切换都通知终端的切换命令, 切换的参数和小区信息提前一次性告知用户, 以减少切换信令开销和中

间的信令交互。

2) 馈电切换

对于馈电切换，主要用于卫星仅和单信关站连接的场景。如果发生馈电链路切换，需要先切断与地面原信关站的连接，然后再与新信关站进行连接。这种切换过程将会带来较大的业务中断。由于每颗卫星包含多个波束（小区），每个波束又有几百个甚至几千个的接入用户，在进行馈电链路切换过程中，需要最多数万用户进行群切换，将带来随机接入资源需求、切换时延以及切换成功率等极大挑战。

对于馈电切换的需求和挑战，需要提前通知所有连接用户统一连接到新的卫星，并且分配合适的PRACH资源，支持大量用户在一个时间窗口内和新的信关站重新建立RRC连接。因此，需要根据用户优先级与业务需求进行分类接入管理，用户安排在一个特定的时间点发送PRACH信号，以保证用户有序地接入，不至于发生冲突和资源拥塞。

4.3 天地融合网络协同覆盖技术

(1) 天地融合网络的智能接入

当存在高轨、低轨、地面系统多层网络时，终端的智能按需接入变得非常重要。从网络的角度看，尽可能提供统一兼容的接入方式，并且提供必要的广播消息辅助终端进行网络的选择；从终端的角度看，需要能动态按需选择网络。

针对终端的智能接入，主要的潜在技术包括：空中接口接入协议的统一；终端基于网络的负载和业务时延需求进行按需动态接入；网络具备多层网络的协调能力和管控能力，比如选择一个子网络作为接入锚点，然后在数据传输时进行切换，或者网络对资源和接入能力进行多层网络的协同，维持对每一层接入用户的最佳体验。

(2) 天地融合网络的频率动态分配

在天地融合网络中，高低轨卫星、临空平台、地面基站之间形成了多层立体网络，随着用户业务需求的增长，频谱资源变得越发匮乏，传统的频率硬性分割使得传输效率大大下降。为提高频率资源的利用效率，需要研究空间多层网络的信号传输特点，利用波束和覆盖的差异性，探索星地通信的软频率复用方法；通过干扰预测和资源协调，进一步研究频率动态共享复用的技术和方法，同时提升小区边缘传输效率，降低小区边缘干扰。

基于天地融合网络特点，频谱协调主要可利用的技术特性包括：波束的方向性；业务的动态性；频率资源的空间重用性。对于天地融合网络，一个重要的基础条件是不同层网络之间信息是可以交互协调的，协调时间

的粒度可以是小时、分钟、秒或者毫秒级，频率协调技术的前提是信息交互的粒度。因此，频谱共享总的技术测量以干扰共存分析评估为基础，以认知协调技术解决干扰抑制问题，以动态频谱共享技术应对频谱资源配置问题。首先，通过对系统间的干扰共存进行分析，明确频谱共用中的干扰关系，对潜在干扰程度进行量化评估。针对已分配频谱资源的在用业务系统，结合数字信号处理的抗干扰技术，根据干扰信号在不同维度上表现出的特性，如时间维度、频率维度、空间维度等，通过时域干扰抑制技术、变换域干扰抑制技术、空域干扰抑制技术等，规避或抑制潜在干扰，提升通信系统的频谱利用效率。针对请求获取频谱资源的业务系统，可采用动态频谱管理技术，通过频分频谱共享、时分频谱共享以及半动态频谱共享3种方式实现。通过这3种动态频谱管理技术的综合运用，实现全局频谱资源的统筹协调和分配，最大化频谱利用效率。

(3) 天地融合网络的无缝切换

对于存在卫星网络和地面网络多重覆盖的场景，网络间的切换至少包括星地网络的切换和高低轨多层卫星网络之间的切换。切换的需求主要考虑的是数据传输的连续性和网络负载的均衡性。对于终端来说，通常存在软切换和硬切换两种方式，如果终端具备双连接能力或多连接能力，零时延的切换是可能的，这要求终端在断开原有网络的时候已经和新的网络建立了连接；如果不具备双连接能力，则需要提前对切换进行预测，并且通过数据前转的技术优化来减少对用户数据传输的影响。

面向未来的星地融合覆盖部署，终端需要充分利用卫星的广覆盖优势和地面覆盖的低时延优势来进行工作，因此在卫星小区和地面小区之间进行切换时，需要考虑的关键技术手段有：通过卫星的星历信息提取进行切换预测，减少切换时延，提高星地融合覆盖的质量；通过提前在目标节点的数据前传，降低切换带来的数据传输时延；通过终端建立多连接，消除切换带来的数据中断。

5 结束语

面向B5G/6G万物智联与全球广域覆盖的迫切需求，移动通信网络能够在任何地点、任何时间、以任何方式提供信息服务，满足天基和地面各类用户的接入与应用。随着业务融合和部署场景不断扩展需求，地面网与卫星网络具有极强的互补性，构建统一融合的天地一体化信息网络成为B5G/6G通信网络重要的发展趋势。天地融合网络架构应具备动态可重构特性，才能形成高效能、无阻塞的多维多域异构网络柔性互联能力，实现按需组网、高效的多域多维度的网络管控。目前面向

B5G/6G的天地融合网络架构和关键技术还处于起步阶段，随着B5G/6G需求和关键技术研究的不深入，智慧内生和安全内生的天地融合网络及其关键技术将是B5G/6G的重要研究方向，实现天地融合网络组网，为用户提供具有自适应按需通信服务能力。

参考文献：

- [1] CHEN S Z. Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G——How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-rate and Movement Speed[J]. IEEE Wireless Communications, 2020,27(2): 218-228.
- [2] 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 low-orbit satellite communications and development suggestions[J]. Telecommunications Science,2020,36(6): 1-13.
- [3] 3GPP. Service requirements for the 5G systems (Release 16): TS 22.261[S].2018.
- [4] 3GPP. Study on Satellite Access in 5G, Stage 1 (Release 16): TR 22.822[S]. 2018.
- [5] 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 S. International standards progresses for satellite communication [J]. Information and Communications Technology and Policy, 2019(11):41-44.
- [6] 李贺武, 吴茜, 徐恪, 等. 天地一体化网络研究进展与趋势[J]. 科技导报, 2016, 34(14):95-106.
LI H W, WU Q, XU K, et al. Research progress and trends of terrestrial mobile communication and Satellite communication Integration Network[J]. Science & Technology Review, 2016, 34(14):95-106.
- [7] 吕智勇. 6G网络中的卫星通信[J]. 数字通信世界, 2020(1):27-28.
LV Z Y. Satellite communication in 6G network[J]. Digital Communication World, 2020(1):27-28.
- [8] 吴曼青, 吴巍, 周彬, 等. 天地一体化信息网络总体架构设想[J]. 卫星与网络, 2016(3):30-36.
WU M Q, WU W, ZHOU B, et al. System architecture of integration of Terrestrial mobile communication and Satellite communication[J]. Satellite & Network, 2016(3):30-36.
- [9] 黄韬, 霍如, 刘江, 等. 未来网络发展趋势与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2019,8(49):941-948.
- HUANG T, HUO R, LIU J, et al. Challenges and opportunities of future network[J]. SCIENCE CHINA Information Sciences, 2019,8(49):941-948.
- [10] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOUS P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 54-60.
- [11] 杨昕, 孙智立, 刘华峰, 等. 新一代低轨卫星网络和地面无线自组网融合技术的探讨[J]. 中兴通讯技术, 2016, 22(4):58-63.
YANG X, SUN Z L, LIU H F, et al. Technology of new generation LEO satellite networks and terrestrial MANET integration[J]. ZTE Technology Journal, 2016, 22(4):58-63.
- [12] 3GPP. Study on New Radio (NR) to Support Non Terrestrial Networks, (Release 15): TR 38.811[S]. 2018.
- [13] CHEN S Z. Beam-space multiplexing: Practice, theory, and trends, from 4G TD-LTE, 5G, to 6G and Beyond[J]. IEEE Wireless Communications, 2020,27(2): 162-172.
- [14] 3GPP. Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN), (Release 16): TR 38.821[S]. 2018.

[作者简介]



徐晖（1969—），博士，大唐移动通信设备有限公司标准部，主要研究方向为移动通信核心网、天地融合网络技术和移动通信安全等，目前主要从事6G及卫星通信等方向的技术研究和标准化推进工作。



缪德山（1978—），博士，大唐移动通信设备有限公司新技术部高级工程师，主要研究领域为无线移动通信、卫星通信，全面参与3GPP 4G和5G各个版本的技术研究和标准推进工作，目前主持和参与多项国家级移动通信及卫星通信在研项目。



康绍莉（1974—），博士，大唐移动通信设备有限公司新技术部，目前在CCSA担任TC5 WG6（无线新技术）副组长和TC12 WG1（航空通信）副组长，从事6G、卫星通信等技术研究和标准推进工作。



孙韶辉（1972—），博士，大唐移动通信设备有限公司副总经理，长期从事移动通信新技术研究与标准制定工作，主要研究方向包括移动通信系统设计与多天线技术、卫星通信、定位等关键技术。