

# 面向手机直连的卫星移动通信系统架构与特性

陈 东<sup>1,2</sup>, 张 千<sup>1</sup>, 秦兆涛<sup>1</sup>, 佟金成<sup>1</sup>

(1. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

2. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055)

**摘 要:** 全球范围内面向个人用户的移动通信卫星系统的发展建设已有三十多年, 卫星移动通信技术水平和产业规模不断成熟。在卫星通信与地面通信系统走向深度融合和一体化发展的大趋势下, 支持手机直连的新一代卫星移动通信是当前星地融合的卫星系统发展的新方向。阐述支持手机直连的卫星移动通信系统发展前景与驱动, 提出基于高轨卫星和低轨卫星星座的卫星移动通信系统网络架构, 从卫星角度出发分析上述架构中引入的网络特性及卫星技术挑战, 最后对网络通信体制及相关关键问题进行深入探讨。

**关键词:** 星地融合; 移动通信卫星; 手机直连

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2023038

## Architecture and Features of Mobile Communication Satellite System for Mobile Phone

CHEN Dong<sup>1,2</sup>, ZHANG Qian<sup>1</sup>, QIN Zhaotao<sup>1</sup>, TONG Jincheng<sup>1</sup>

1. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

2. Pengcheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

**Abstract:** The development and construction of mobile communication satellite systems for individual users worldwide have been ongoing for over thirty years, and the technological level and industrial scale of satellite mobile communication are constantly maturing. Under the trend of deep integration of satellite communication and ground communication systems, the new generation of mobile communication satellites that support mobile phone connection is a new direction for the development of satellite-ground convergence. This paper expounded the development prospect and driving force of satellite system supporting mobile phone connection, proposed the mobile communication satellite network architecture based on GSO satellite and LEO satellite constellation, and analyzed the network characteristics and satellite technical challenges introduced in the above architecture from the perspective of satellite. Finally, the network communication system and related key issues were discussed.

**Keywords:** satellite-ground convergence, mobile communication satellite, mobile phone connection

## 0 引言

当前以低轨巨型星座为特征的卫星互联网发展呈现多元化趋势, 宽带卫星互联网系统建设热潮尚未达到顶峰, 以“手机直连”为代表的新一代卫星移动通信系统正在成为新的热点。下一代无线移动通信网络结构将卫星、地面(包括低空)的各类平台集成为一体化融合的全球通信网络, 为用户提供无缝、立体的全球通信服务, 为人和

物提供随时随地直连的通信网络。

为了实现这一愿景, 国际上相关研究机构和企业等通过多种模式探索手机接入卫星的技术途径和商业模式<sup>[1]</sup>。面向消费者, 苹果公司与全球星(GlobalStar)签署协议为iPhone 14手机提供紧急求救服务, 华为公司则利用北斗卫星短消息业务为Mate 50手机用户提供紧急服务。面向运营商, AST SpaceMobile公司<sup>[2-3]</sup>和Lynk Global公司<sup>[4-5]</sup>已利用低轨试验卫星开展手机直连的技术试验, 可支持低用

户密度区域,如海洋、空中和边远地区的通信服务。其中,AST SpaceMobile 公司已取得实质性在轨试验成果,其蓝色步行者 3 (Bluewalker-3) 卫星展示了超越现有在轨卫星移动通信系统的能力,验证了为普通手机提供 Mbit/s 量级以上速率通信的可行性<sup>[6]</sup>。

国际标准化组织 3GPP 自 2017 年以来,就在非地面网络 (Non-Terrestrial Network, NTN) 技术方面做了大量研究和标准化工作<sup>[7]</sup>,所定义的 NTN 标准支持基于 GSO 和 NGSO 的宽带与物联网服务网络。2023 年欧盟成立 6G NTN 联盟并启动 6G NTN 研究项目<sup>[8]</sup>,旨在设计和验证未来 6G 网络充分集成非地面网络的关键技术,推进在 3GPP 和 ITU-R 的标准化工作。多个地面移动通信标准化组织和企业先后发布 6G 白皮书,卫星作为 6G 系统的重要特征已经成为业内共识。

学术界对星地融合趋势和技术方向进行了广泛研究。参考文献[9]提出了星地融合通信正朝着“5G 体制兼容”到“6G 统一系统”的技术路径发展的基本判断,认为实现星地融合的全球广域覆盖是 6G 的标志之一。参考文献[10]研究了空天地一体的多层次网络架构,支持卫星和地面系统的核心网共享、NTN 接入共享、漫游与服务等特性。参考文献[11]就地面移动通信星地融合方面面临的新波形和多址接入、高效联合传输、移动性管理、频谱管理等方面的技术挑战进行了广泛探讨。

## 1 手机直连卫星移动通信系统发展前景与驱动

泛在覆盖是通信发展不变的方向,移动通信成功的重要因素是其全球属性。当前地面移动通信服务范围依然非常有限,约为陆地范围的 20%;卫星移动通信系统发展至今,手持机依然是终端最重要的形态,全球卫星移动通信系统容量预估仅约千万户。实现全球广域按需服务、融合卫星终端与移动电话形态、拓展星地一体无缝服务是卫星手机业务的发力点,其商业潜力促进了终端制造、卫星制造和通信运营整个产业链的深度合作。AST SpaceMobile 公司在其系统建设愿景中提到,要通过与移动运营商合作挖掘全球不能获得良好网络服务的市场,特别是美国等移动通信覆盖有限的国家所具有的巨大潜在市场。

TONG 等<sup>[12]</sup>对星地融合实现无线接入的应用场景进行了展望,包括未直连区域的宽带覆盖、物联网覆盖、高精度导航和实时对地观测等场景,提出了下一代星地融合构成的三维 (3D) 网络服务特征。支持手机接入的移动通信卫星具有覆盖性、移动性、宽带、多播/广播优势等融入

5G/6G 的特有属性<sup>[13]</sup>,更重要的是其最终用户无须受到卫星终端形态的限制。例如,传统卫星移动通信手持机的 SWAP (Size、Weight and Power) 与对讲机类似,需要可伸出的鞭状天线实现高天线增益,这显然难以适应现代手机用户市场需求。受移动通信卫星链路和覆盖影响,在城市地区和复杂地形地区的服务连续性也受到约束,制约了基于卫星的机器通信 (Machine Type Communication, MTC) 和物联网 (Internet of Things, IoT) 等设备的广泛应用。当卫星具备直接直连手机的能力并融入 5G/6G 系统时,用户可以采用统一的终端无缝地在卫星和地面系统中按需切换,同时具有卫星和地面系统的优点,实现灵活优化的服务质量 (Quality of Service, QoS) 保障。

在卫星运营商的不断开拓下,传统卫星移动通信也正在进一步扩展用户群体,IoT 和个人通信覆盖已扩展到近地轨道空间,实现从 3D 网络向 3D 空间的变化。例如,部分低轨道商业小卫星已经采用 Inmarsat 等卫星运营商的移动通信服务,实现卫星管控信息和业务数据传输,进一步降低了卫星系统的运营成本。

## 2 基于高轨卫星移动通信系统的手机直连网络

高轨卫星移动通信系统是最早部署并付诸应用的卫星移动通信系统,当前在轨提供服务的主要包括国际的 Inmarsat 和 Thuraya 系统以及国内的天通系统<sup>[14]</sup>。2010 年前后,美国先后部署了 Terrestar-1、SkyTerra-1 等多颗新一代移动通信卫星,卫星移动通信服务能力进一步增强。Terrestar-1 和 SkyTerra-1 卫星系统设计之初即考虑了与地面移动通信的融合,提出采用地面辅助组件 (Ancillary Terrestrial Component, ATC) 或地面补充组件 (Complementary Ground Component, CGC) 技术,实现对卫星移动终端的区域覆盖增强<sup>[15]</sup>。

2020 年以来,相关企业利用多个中高轨卫星系统进行了手机接入卫星或相近的通信技术试验,包括联发科公司、eSAT Global 公司等先后成功完成直连卫星物联网演示验证<sup>[16]</sup>。表 1 从网络体制标准、手机终端和星地通信频率 3 个方面对已有各系统进行了对比。

商业终端利用现有卫星系统进行星地双模终端方式的集成。但最新趋势上,支持 3GPP NTN 的系统正在向星地统一体制方式开展试验验证。

### 2.1 系统架构设想

系统设计目标是充分发挥高轨卫星覆盖优势,实现对地面手机终端的基本移动通信服务,即无须通过降低通信速率或其他牺牲服务质量的方式提供普通手机通信;支持

表 1 当前中高轨卫星手机直连应用/试验技术路线对比

| 对比项    |             | 北斗（华为） | 天通 | Skyterra（Ligado） | Inmarsat（联发科） | Thuraya（eSAT Global） |
|--------|-------------|--------|----|------------------|---------------|----------------------|
| 网络体制标准 | 卫星通信体制      | √      | √  |                  |               | √                    |
|        | 3GPP NTN 体制 |        |    | √                | √             |                      |
|        | 地面蜂窝网体制     |        |    |                  |               |                      |
| 手机终端   | 星地两套芯片      | √      | √  |                  |               | √                    |
|        | 星地一套芯片      |        |    | √                | √             |                      |
| 星地通信频率 | MSS 频率      | √      | √  | √                | √             | √                    |
|        | 地面频率        |        |    |                  |               |                      |

终端与地面核心网、终端与终端（Terminal to Terminal, T2T）的通信服务，有效降低终端之间的通信时延；支持接入网共享、漫游与服务连续性，以适应不同运营商组网需求。室内环境可以通过增加直放站增强通信覆盖。

图 1 给出了高轨卫星系统手机直连网络架构示意。该架构由一颗或多颗 GEO 卫星组成，多颗卫星可以扩展对地覆盖或者利用分集技术增强特定区域覆盖。卫星用户侧采用多波束实现对地面广域覆盖，配置超大口径的多波束天线以支持上下行链路的闭合。卫星馈电侧由多个馈电波束构成，通过一定数量的固定或可动波束实现对各地区运营对应信关站的馈电直连。卫星信关站内部署基站（gNB）功能以及下沉的用户平面功能（UPF），核心网中控制平面（Control Plane, CP）根据运营商需要部署在特定的地区，实现最佳的移动性和管理效能。图 1 中，gNB1 直连两颗卫星，使用两颗卫星中部分波束提供通信服务，同时对两颗卫星共视的区域利用上行分集的方式增强手持终端上行链路。gNB2 直连一颗卫星，使用该卫星部分波束提供通信服务。核心网 1 和核心网 2 分别与 gNB1 和 gNB2 直连，核心网 1 还与 gNB2 直连。gNB2 则通过接入网共享方式实现其对应波束区域的多运营商共同服务。

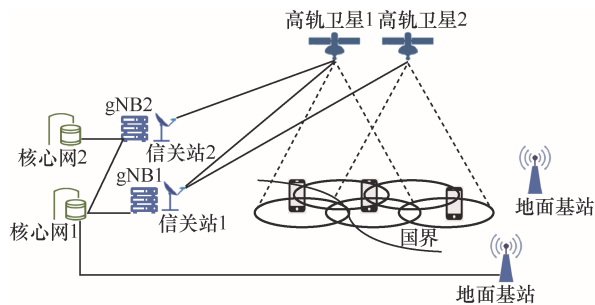


图 1 高轨卫星系统手机直连网络架构示意

卫星有效载荷的核心是数字透明处理载荷、数字波束成形网络和超大口径可展开天线。特征在于采用 30 m 以上的超大口径卫星天线实现卫星固定波束（Satellite Fixed

Beam, SFB）覆盖并支持对特定用户凝视。波束数量可达数百个，波束宽度不超过 0.4°。天线支持左旋和右旋极化合成，以增强上行手持终端线极化接收性能。多波束天线通过跳波束技术降低不同固定波束间的干扰。考虑到高轨卫星复杂空间环境，星载处理使用与通信体制紧密设计的数字透明处理方式。图 2 中，数字透明处理载荷可以实现多波束在不同馈电端口落地，满足跨国家多运营商对网络控制的要求。例如波束组 1 中的波束经过星载数字透明处理后可以按需在不同 gNB 落地，进一步接入特定核心网或被多个核心网共享。

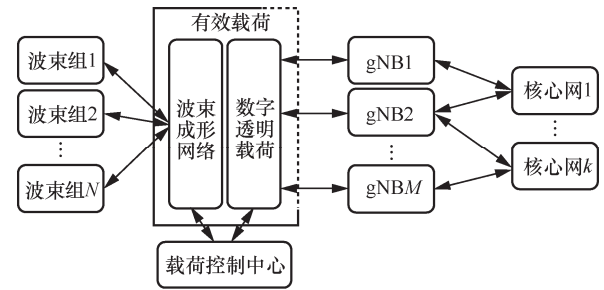


图 2 高轨卫星载荷结构及与地面系统直连

考虑卫星有效载荷技术的发展，通信体制上优先考虑 IoT NTN 或相近的窄带通信体制。卫星主要参数应可以达到上行  $G/T$  优于 23 dB/K，相比 Thuraya 卫星多约 7 dB，估算在保有一定链路余量的前提下，上行链路速率不低于 16 kbit/s。

2.2 高轨卫星系统新特性

除传统移动通信卫星基本通信服务外，从高轨系统特征出发，针对应用场景建议在以下新特性方面深入研究。

（1）T2T 业务增强：充分发挥高轨卫星广域覆盖优势，通过合理分割 gNB 的星地功能，将星载数字透明处理设计与空中接口体制密切结合，可以实现不经过地面站的 T2T 通信。在具体实现上，可以在 D2D 技术上进行扩展，设计适应星上数字透明处理的物理层帧格式，终端之间直

接由卫星转发而无须经过地面基站及核心网进行数据交互<sup>[17]</sup>, 这种模式可以扩展用于 MCPTT (Mission Critical Push To Talk) 等类型的服务。

(2) 广播增强: 支持基于 IP 的移动多媒体服务、导航增强信息广播和特殊场景应急信息广播<sup>[18]</sup>, 利用多星空间分集和时间分集发送技术提供高可用度广播性能。

(3) 覆盖增强: 下行采用功率动态调配和跳波束技术, 支持动态的功率集中, 实现高穿透寻呼技术。上行采用左右旋极化合成和跳波束技术, 改善上行通信链路。跳波束通过控制同频波束播发时间, 可用于改善波束间的干扰。大规模应用时需要利用人工智能和机器学习技术进行跳波束优化, 兼顾覆盖范围内的业务负载调整。左旋和右旋双极化接收技术已在 SkyTerra-1 卫星中应用。

(4) 移动性增强: 虽然高轨卫星对地面相对静止, 但对于空中和太空的高动态用户, 例如低轨航天器或高速飞行器, 窄点波束意味着频繁的波束切换。采用数字波束成形技术, 将传统移动通信卫星采用的卫星固定波束设计扩展为用户固定波束 (User Fixed Beam, UFB) 方式, 支持对特定用户的凝视覆盖。

### 2.3 卫星使能技术

#### (1) 超大型可展开多波束天线技术

为实现手机直连需要的卫星天线增益, 需要口径不低于 30 m 的天线技术。2010 年前后国外已在 Terrestar-1 和 SkyTerra-1 上分别部署了 18 m 和 22 m 口径的 L/S 频段大型可展开多波束天线, 30 m 口径天线也已具备工程条件。近年来在大型可展开天线领域的发展侧重于高频段, 例如 L3 Harries Technologies 公司推出的下一代周边桁架反射面天线, 重量比传统反射器设计低 50%, 提供优于 0.25 毫米均方根的表面精度。

#### (2) 高性能数字透明处理技术

高性能数字透明处理器主要实现星载数字波束成形和数字透明转发。其中数字透明转发需要与通信体制密切结合设计, 适应信号带宽和载波时隙的具体要求, 以在支持信号调理和转发的同时, 实现 T2T 数据处理。这种模式兼顾了透明转发器和再生转发器的优点, 可以适应更小颗粒度的交换。数字透明转发器 (Digital Transparent Processor, DTP) 技术已发展至第 5 代, 在宽带通信卫星上开始应用。移动通信卫星方面, Thuraya 系统采用了 IBM 的数字信号处理器, 支持 12 500 路用户到用户的双向直连。前向处理器中的用户到用户交换机 (MMS), 支持给定载波和给定时隙交换到任意输出载波和时隙的能力, 能够实现用户间的 T2T 一跳通信<sup>[19]</sup>。

### 3 基于低轨卫星移动通信系统的手机直连网络

低轨卫星移动通信系统也是当前较为成熟的卫星系统。当前在轨服务的系统主要包括国际的 Iridium 和 GlobalStar 系统。其中 Iridium NEXT 于 2019 年完成部署, 在兼容一代 Iridium 系统的基础上进一步增强了卫星的容量和数据业务的支持能力。

新一代低轨移动通信卫星系统概念正在验证中, BlueWalker-3 试验卫星配置了面积约 64 m<sup>2</sup> 的大型平面天线, 采用 4G LTE 波形已成功与地面手机终端完成简短的通信业务, 下行速率达 10.3 Mbit/s<sup>[1]</sup>。Lynk Global 的试验卫星在斐济也开展了手机通信测试。表 2 从网络体制标准、手机终端和星地通信频率 3 个方面对比了相关低轨卫星网络。

表 2 当前低轨卫星手机直连应用/试验技术路线对比

| 对比项    |             | AST SpaceMobile | Lynk Global | 全球星 (苹果) | Iridium (高通) |
|--------|-------------|-----------------|-------------|----------|--------------|
| 网络标准体制 | 卫星通信体制      |                 |             | √        | √            |
|        | 3GPP NTN 体制 |                 |             |          |              |
|        | 地面蜂窝网体制     | √               | √           |          |              |
| 手机终端   | 星地两套芯片      |                 |             | √        | √            |
|        | 星地一套芯片      | √               | √           |          |              |
| 星地通信频率 | MSS 频率      |                 |             | √        | √            |
|        | 地面频率        | √               | √           |          |              |

新一代服务手机直连的低轨卫星与传统低轨移动通信卫星存在巨大差异, 体现在实现星地融合需要的基本特性。一是配置更大口径的卫星天线以适应手机终端约束。相比传统卫星电话有效全向辐射功率 (EIRP) 优于 5 dBW、G/T 优于 -24 dB/K 的参数, 3GPP 定义的 Class 3 UE 的参数中 EIRP 为 23 dBm、G/T 为 -31.6 dB/K。二是采用地面移动通信频段, 包括 BlueWalker-3 等系统从工程实施角度考虑采用 700 ~ 900 MHz UHF 频段。三是兼容地面移动通信体制或 3GPP NTN 体制。AST SpaceMobile 的卫星采用透明转发器结构可以兼顾 4G/5G 多种技术标准。

#### 3.1 系统架构设想

系统设计目标是实现 Mbit/s 速率的高性能手机直连卫星服务, 利用低轨卫星网络全球覆盖属性在兼顾本土运营商全球运营的需求上, 支持国际不同运营商对网络共享共用。手机直连卫星系统网络架构既要提供更为灵活的网元部署以实现网络的软件定义化, 又要考虑可操作性和工程可实现性。

图 3 给出了低轨卫星手机直连卫星系统网络架构

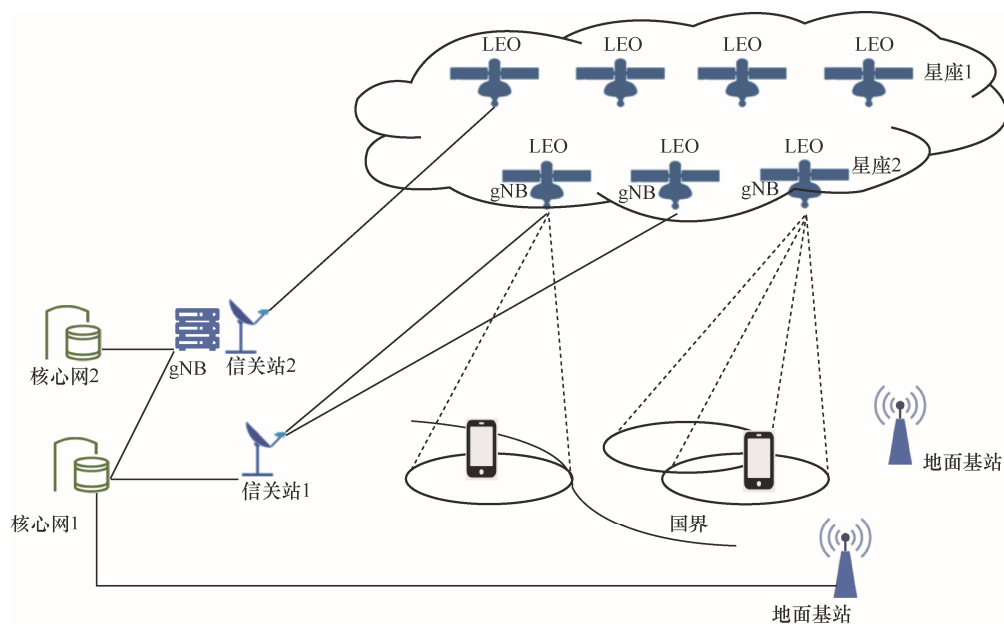


图3 低轨卫星手机直连卫星系统网络架构示意

示意。低轨卫星系统由多个不同轨道高度和轨道倾角的卫星星座构成，以尽量改善卫星星座在不同纬度的通信覆盖。例如倾角  $20^\circ$ 、 $40^\circ$  和  $60^\circ$  卫星星座，可以分别增强低纬度、中纬度和高纬度地区覆盖。卫星用户侧采用对地凝视波束（Earth Fixed Beam, EFB）实现给定区域的通信覆盖，并利用扫描波束方式提供最低限度通信保障。卫星侧采用可动波束天线，实现对地区运营的信关站直连。图3中，星座1中卫星透明转发器结构，降低卫星复杂度，其服务区依赖于地面信关站部署。地面信关站部署了gNB等所有基站网络功能，有利于利用地面基站技术解决时延时序、定时变化和多普勒频移修正、移动性管理等问题，并支持通信体制未来的平滑演进。考虑到全球服务及远海地区通信覆盖，星座2采用了星上处理和星间链路组网模式。星上配置gNB和UPF功能，星上处理模式可以采用接入网共享和接入控制（Unified and Access Control, UAC）方式实现星载基站共享共用，实现多运营商相同星载基站的共享。

对于采用星上处理的卫星，有效载荷的核心是星载基站、数字波束成形网络和超大口径可展开平板天线。大口径可展开平板天线实现高增益波束，波束宽度约20 km。每个波束等同于地面的一个小区。此外载荷需要配置星上路由器和星间链路，实现星间组网直连。图4中，有效载荷部署灵活的网元功能，包括提供接入网服务的gNB和

用户面功能的UPF。考虑运营需要，两个星载功能均支持多核心网共享。

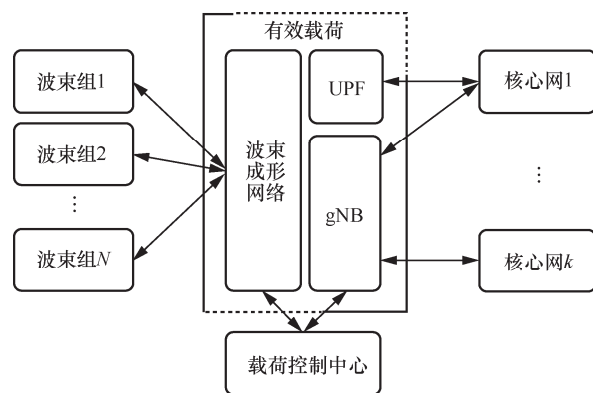


图4 低轨卫星有效载荷结构与及与地面系统直连

接入网体制选用NR NTN或类似技术。参考文献[20]中LEO NTN链路仿真分析表明，对于3GPP Class 3的终端，S频段平均上行频谱效率为0.18 bit/s/Hz，下行0.52 bit/s/Hz。对于10 MHz带宽而言，单波束可以实现1~5 Mbit/s的通信速率。

### 3.2 低轨系统新特性

除传统移动通信和卫星通信基本服务外，从低轨系统特征出发，针对应用场景建议在以下新特性方面深入研究。

（1）Non-GNSS依赖：为应对低轨卫星高速运动带来

的星地时延和多普勒频移变化, 3GPP NTN 标准中采用全球卫星导航系统 (GNSS) 为终端提供位置和速度信息<sup>[22]</sup>, 结合卫星星历对时延和多普勒频移进行预补偿。工程实现上估计频率补偿精度为 $\pm 0.1$  ppm, 时延补偿精度为  $0.2 \mu\text{s}$ 。为降低终端对 GNSS 的依赖, 可以利用低轨卫星高动态特性进行信号的通信和导航一体化设计, 为终端提供 50 m 和 200 ns 的定位授时精度。相关分析表明, 该精度可以满足随机接入过程及 RRC 建立后闭环时频偏控制的误差要求。

(2) 用户中心波束成形: 支持手持终端接入的卫星波束极窄, 单个波束覆盖范围低至 50 km 量级。因此, 必须采用用户固定波束 (UFB) 代替传统低轨卫星系统所采用的卫星固定波束 (SFB), 解决卫星快速运动导致的频繁波束切换问题。卫星利用动态扫描的信令波束 (用于初始接入) 对卫星服务区进行遍历, 接收地面用户的接入请求, 实现对海洋、山区等用户稀疏地区泛在服务的目的。用户接入后的业务波束调度则需要联合使用凸优化、机器学习等各类方法进行解决<sup>[21]</sup>。

(3) 最低限度服务: 信令波束支持接入控制实现接入负载处理, 提供最低限度通信服务, 例如短信息服务。针对终端天线的全向特性, 信令波束采用频分、码分或相关手段解决多星系统下信令波束间频率干扰问题。信令波束采用扫描方式, 通过合理设计波束驻留时间满足承载信息量和回扫时间的平衡。例如按照 50 ms 驻留时间和 1 000 个波束位置考虑, 单次回扫周期达 50 s。伴随星座规模增加, 通过压缩扫描波束覆盖范围, 降低波束位置数量, 可以改善回扫周期。

(4) 端到端服务质量: 低轨卫星星座通过星间链路互联, 完成 F1 接口或者 NG 接口承载及回传落地。天基网络存在带宽受限、链路时延动态变化的特点, 服务质量与地面承载网存在较大差异, 因此需要将天基承载网作为系统端到端服务质量保障的组成部分。天基星间网络与星载基站根据所承载业务提供差异化 QoS, 例如对于语音等业务提供低时延抖动的星间链路, 对于高吞吐量数据业务通过合理的网络负载均衡等实现较高的星间链路速率。

### 3.3 卫星使能技术

#### (1) 可展开数字多波束天线技术

低轨道和大口径天线是实现高性能手机直连的可选方案。国际同类卫星如 Starlink V2 和 BlueWalker-3 卫星的天线面积达数十平方米。传统多波束天线如 Iridium NEXT 卫星天线口径不超过 2 平方米, 其所采用的模拟波束成形技术并不适用于大量窄波束的按需形成。运载发射限制要

求天线具有高收纳比, 而灵活波束指向、波束赋形以及跳波束则要求高集成度的数字波束成形。

#### (2) 星载基站数字处理技术

低轨卫星等同于星载基站, 新的特性要求星上支持层 2/层 3 部分的协议实现, 例如 3GPP R18 和 R19 开展的 UPF 星载波束和 T2T 项目。其吞吐量面向 IoT 业务预估在数十 Mbit/s 量级、NR 业务预估数百 Mbit/s 量级。星载基站数字处理可以参照地面基站处理架构, 考虑星载需求加强灵活软件定义和高冗余可靠性, 例如快速的故障恢复。元器件方面则依赖于高性能基带处理 FPGA 和 CPU, 目前国际已有多款高性能处理器在轨应用, 例如 Iridium NEXT 采用了 1 GHz 主频的 PowerPC 处理器。

## 4 若干关键问题

综上所述, 当前支持手机直连的卫星移动通信系统实现上存在不同层次和技术路线。关于手机直连卫星的定义及工程途径还需要本着科学精神进行广泛且深入的探讨, 兼顾运营商、工业部门及消费者的各类需求。其中, 通信与网络体制、频段选取与共享、协议实现轻量化均是工程实现中技术路线选取的最重要约束。

#### (1) 通信与网络体制

三十多年来, 地面蜂窝网按照“全球统一标准、共享产业链、共享全球市场”的模式发展。卫星移动通信多按照自定义标准独立建设和运营, 较少有卫星系统采用兼容一致的体制标准。目前大部分在用的网络和通信标准均是来自于欧洲电信标准化协会 (ETSI) 或者 3GPP, 例如卫星宽带通信采用的 DVB-S2X/RCS2, 卫星窄带通信采用的 DVB-SH 和 GMR-1/2, 以及 3GPP 定义的 NR NTN 和 IoT NTN。ETSI 在 SES-SCN 项目的“宽带卫星通信系统中基于 DVB-S2X/RCS2 和 3GPP 5G NR 的比较”研究中, 对两种接入技术进行定性和定量的比较, 包括 5G NR 或 DVB-S2X 多载波条件下降低峰均比的多种技术。采用 3GPP 定义的 NTN 技术可能更经济或者更容易被运营商所接受, 即与地面移动通信设备的无缝集成, 不需要使用另一套芯片或技术体制实现终端层面的形态融合。

面向手机接入卫星业务, 在通信与网络体制设计上需要兼顾地面和卫星通信两类不同无线通信信道。童文等<sup>[12]</sup>认为 6G 地面与非地面网络需要共享统一的物理层和 MAC 层设计, 采用有效手段解决二者在信号、波形、编解码等方面的差异。受 OFDM 波形特性限制, NTN 的物理层设计及工程实现上仍然具有挑战性。例如在处理定时同步和频偏适应之间的平衡方面, NR 紧凑的技术体制并

不能像 DVB 一样对帧格式进行更为灵活的调整,包括预留更多的时隙和保护间隔以提供足够的定时保护等。其循环前缀 (Cyclic Prefix, CP) 长度要求定时同步精度在  $\mu\text{s}$  量级以下 (如 120 kHz 子载波间隔时, PUSCH 信道需要优于  $\pm 0.5 \mu\text{s}$  的同步精度要求), 显然对于高动态运行的卫星而言是巨大的挑战。参考文献[11]中进一步分析了实现星地融合体制所面临的技术挑战,包括信道建模、频谱共享、物理层过程、HARQ、同步、移动性管理、星座管理等系列技术。

## (2) 频率选取与共享

面向手机直连卫星业务的发展,星地融合移动通信频率规则正在发生变化。2023 年 2 月美国联邦通信委员会 (FCC) 发布的 NPRM (Notice of Proposed Rule Making) 报告中考虑允许卫星运营商使用地面频谱<sup>[23]</sup>。目前国际最受关注的频段为 600 MHz ~ 1 GHz 的 UHF 频段和 1 800 ~ 2 400 MHz 之间的 S 频段,具体见表 3。相比地面移动通信新兴的 C 频段,较低的工作频段具有更好的卫星有效载荷工程可实现性,且在星地传播方面对抗阴影衰落的性能更佳。Lynk Tower2 和 BlueWalker-3 卫星均采用 UHF 频段作为用户链路 (617 ~ 960 MHz)。

表 3 国际关注的手机直连卫星的主要频段范围

| 频段            | 使用频段                                        |
|---------------|---------------------------------------------|
| 600 MHz       | 614 ~ 652 MHz, 663 ~ 698 MHz                |
| 700 MHz       | 698 ~ 758 MHz, 775 ~ 788 MHz, 805 ~ 806 MHz |
| 800 MHz       | 824 ~ 849 MHz, 869 ~ 894 MHz                |
| Broadband PCS | 1 850 ~ 1 915 MHz, 1 930 ~ 1 995 MHz        |
| WCS           | 2 305 ~ 2 320 MHz, 2 345 ~ 2 360 MHz        |

采用地面频段后的星地融合 3D 网络架构中,星地频率共享和干扰管理方面更为复杂<sup>[24]</sup>,成为全球范围频率规划问题。参照 ITU-R M.2101 建议书对低轨卫星星座地面频率干扰的仿真结果表明,就下行业务而言,同频情况下通过地理隔离可以实现地面移动通信业务对手机直连业务的干扰保护。但来自卫星的下行干扰受卫星波束滚降受限影响,采用地理区域隔离依然会产生大概率同频干扰。欧洲航天局 (ESA) 支持的研究项目<sup>[25]</sup>正在对地面移动通信的授权共享机制进行研究。可以预见,6G 中的星地用频将更为复杂,需要依赖人工智能 (AI) 和机器学习 (ML) 技术,借助频谱干扰感知等多种手段,动态调整资源分配策略。

## (3) 协议实现轻量化

卫星移动带来的高动态加剧物理层和高层协议设计

和实现的复杂度,在系统设计之初就需要进行轻量化协议实现的全面考虑。

准确的信道信息是实现高可靠无线通信的必要条件。卫星通信与地面通信的典型差异是无线传播信道变化特征的不同。当前无线通信系统主要基于参考信号进行信道测量,而卫星通信中可以利用感知或定位等技术对信道进行预测,从而降低通信开销以及信道跟踪或估计的复杂度。面向 IoT 的 S 频段低轨卫星网络因卫星运动导致的单程时延变化率和频率变化率可达  $46 \mu\text{s/s}$  和  $641 \text{ Hz/s}$ <sup>[11]</sup>。针对这类信道情况,在 3GPP NTN 中考虑终端利用卫星广播的本星 GNSS 信息计算距离和相对速率,实现时延补偿和多普勒频移补偿,以开环方式调整与卫星运行相关的信道变化参数。补偿后的精度可以基本满足 OFDM 波形循环前缀允许的时间偏差和频率偏差,进而再利用 RAR 或 MAC CE 提供的 TAC/FAC 信息对进行闭环调整。

低轨卫星网络还会带来显著的移动性问题,切换的主要因素不再是用户移动,而是卫星移动<sup>[26]</sup>。这一过程中,波束内用户同时切换需要大量的高层信令和功耗开销,特别是对于具有星上处理需求的卫星而言,星上处理复杂度显著增加。然而卫星间的相对运动规律是明确的,通过卫星与相邻卫星间的状态交互,可以实现根据预测进行终端移动性管理。例如利用 Xn 接口实现相邻卫星间的位置和波束指向等信息交换,星间切换颗粒度不再按照用户为单位,而以波束为单位,在切换后继续保持各用户已有空中接口资源分配,从而减少信令开销。

## 5 展望

卫星是地面移动通信空间延伸的重要基点。下一代移动通信网络应该是星地融合组网构成的立体架构,由工作在不同高度的卫星系统为地面、空中和太空节点提供统一的直连,针对不同的场景提供灵活的波形,更好地实现星地多直连和网络的互操作。星地融合过程中,通信网络技术发展不仅仅是当前 NTN 技术的延伸,更需要从技术和工程实现角度将卫星和地面进行深度集成,充分发挥卫星通信的优势,为星地融合的未来网络引入新的特性,提供新的服务。

## 参考文献

- [1] LAURSEN L. No More “No Service”: Cellphones will increasingly text via satellite[J]. IEEE Spectrum, 2023, 60(1): 52-55.
- [2] ELIZABETH H. AST SpaceMobile scores US license to connect satellite directly to cell phones[EB]. [2022-05-09].
- [3] AST SpaceMobile. SpaceMobile: The future Of Wi-Fi could be here[EB]. [2021-02-01].

- [4] Lynk Global. Lynk demonstrates first-ever two-way standard phone voice calls by satellite[EB]. [2023-07-25].
- [5] Lynk Global. Lynk and vodafone cook islands to begin Sat2Phone service for subscribers[EB]. [2023-08-08].
- [6] AST Space Mobile. AST Space Mobile confirms 4G capabilities to everyday smartphones directly from space[EB]. [2023-07-23].
- [7] LIN X Q, ROMMER S, EULER S, et al. 5G from space: an overview of 3GPP non-terrestrial networks[J]. IEEE Communications Standards Magazine, 2021, 5(4): 147-153.
- [8] European Commission. 6G Non terrestrial networks[EB]. [2023-08-06].
- [9] 中国信科集团. 中国信科陈山枝: 全域覆盖、场景智联——6G愿景和技术引擎[EB]. [2023-06-23].  
China Xinke Group. China Xinke Chen Shanzhi: global coverage, scene Zhilian-6G vision and technology engine[EB]. [2023-06-23].
- [10] 田开波, 杨振, 张楠. 空天地一体化网络技术展望[J]. 中兴通讯技术, 2021, 27(5): 2-6.  
TIAN K B, YANG Z, ZHANG N. Prospects for the air-space-ground integrated network technology[J]. ZTE Technology Journal, 2021, 27(5): 2-6.
- [11] GIORDANI M, ZORZI M. Non-terrestrial networks in the 6G era: challenges and opportunities[J]. IEEE Network, 2021, 35(2): 244-251.
- [12] TONG W, ZHU P Y. 6G, the next horizon: from connected people and things to connected intelligence[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [13] ESA. SATis5G White paper[Z]. 2023.
- [14] 高菲. 天通一号 01 星开启中国移动卫星终端手机化时代[J]. 卫星应用, 2016(8): 73.  
GAO F. Tiantong No.1 01 star opens the era of mobile satellite terminal in China[J]. Satellite Application, 2016(8): 73.
- [15] 焦现军, 曹桂兴. MSV-ATC 卫星移动通信技术研究[J]. 航天器工程, 2007, 16(5): 59-67.  
JIAO X J, CAO G X. Introduction of MSV-ATC technology in mobile satellite systems[J]. Spacecraft Engineering, 2007, 16(5): 59-67.
- [16] Media Tek. MediaTek powers World's first satellite 5G NTN smartphone communication[EB]. [2022-8-16].
- [17] FERNANDO J. Study of 5G new radio (NR) support for direct mode communication[J]. 2023.
- [18] GONZÁLEZ C C, PIZZI S, MURRONI M, et al. Multicasting over 6G non-terrestrial networks: a softwarization-based approach[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2023, 18(1): 91-99.
- [19] SUNDERLAND D A, DUNCAN G L, RASMUSSEN B J, et al. Megagate ASICs for the Thuraya satellite digital signal processor[C]//Proceedings International Symposium on Quality Electronic Design. Piscataway: IEEE Press, 2002: 479-486.
- [20] SEDIN J, FELTRIN L, LIN X Q. Throughput and capacity evaluation of 5G new radio non-terrestrial networks with LEO satellites[C]//Proceedings of GLOBECOM 2020 - 2020 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2021: 1-6.
- [21] XIAO Z, YANG J, MAO T, et al. LEO satellite access network (LEO-SAN) towards 6G: challenges and approaches[EB]. 2022.
- [22] LIN X Q, CIONI S, CHARBIT G, et al. On the path to 6G: embracing the next wave of low earth orbit satellite access[J]. IEEE Communications Magazine, 2021, 59(12): 36-42.
- [23] FCC. Single network future: supplemental coverage from space notice of proposed rulemaking[EB]. [2023-2-23].
- [24] EVANS B. 6G satellite communications[C]//Proceedings of 2022 27th Asia Pacific Conference on Communications (APCC). Piscataway: IEEE Press, 2022: 175-177.
- [25] ESA. ASCENT strategic recommendations: Spectrum sharing between satellite and terrestrial systems[EB]. [2023-6-15].
- [26] WANG F, JIANG D D, WANG Z H, et al. Seamless handover in LEO based non-terrestrial networks: service continuity and optimization[J]. IEEE Transactions on Communications, 2023, 71(2): 1008-1023.

#### [作者简介]



**陈东** (1982—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为通信卫星总体设计、卫星互联网技术和移动通信卫星技术, 主持或参与卫星研制任务, 先后承担科技部 863 项目、国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目 10 余项。



**张千** (1987—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统设计、卫星移动通信技术、天地融合通信网络技术。



**秦兆涛** (1989—), 男, 博士, 工程师, 主要从事低轨卫星通信、目标定位等方面的研究工作。



**佟金成** (1979—), 男, 研究员, 主要研究方向为卫星通信。