



星地融合通信 白皮书

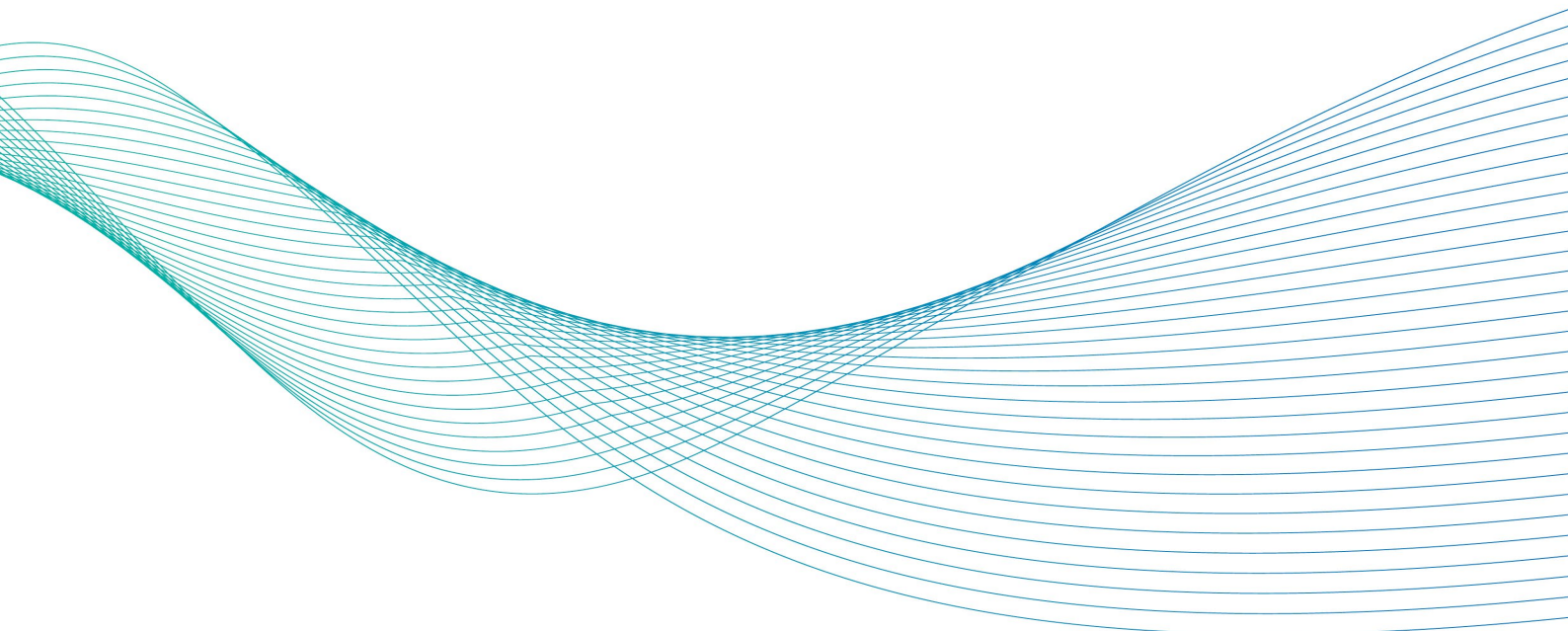
White paper on integrated terrestrial-satellite communication (ITSC)

全域覆盖 场景智联

星地融合通信

白皮书

本白皮书版权专属中信科移动通信技术股份有限公司（以下简称“中信科移动”）所有，并受法律保护。如需基于非商业目的引用、转载、传播或以其他方式合理使用本白皮书的全部或部分内容，应完整注明来源。违反前述声明者，中信科移动将追究其法律和商业道德之责任。



CONTENTS

目 录

| | | | |
|------------------------------|----|----------------------------|----|
| 第一章：引言 | 02 | 5.3 移动性管理 | 21 |
| 第二章：驱动力、需求与应用场景 | 04 | 5.3.1 星间切换 | 21 |
| 2.1 星地融合通信驱动力 | 05 | 5.3.2 终端位置管理与寻呼 | 21 |
| 2.2 星地融合通信的典型应用场景 | 06 | 5.3.3 漫游 | 22 |
| 2.3 星地融合通信愿景 | 07 | 5.4 网络与安全技术 | 23 |
| 第三章：关键指标和技术挑战 | 08 | 5.4.1 网络功能的柔性部署 | 23 |
| 3.1 关键技术指标 | 09 | 5.4.2 切片技术 | 23 |
| 3.2 主要技术挑战 | 11 | 5.4.3 网络虚拟化 | 23 |
| 3.3 手机直连卫星的关键指标和主要挑战 | 12 | 5.4.4 边缘计算 | 24 |
| 第四章：发展路径 | 13 | 5.4.5 广播和组播技术 | 25 |
| 第五章：星地融合通信关键技术 | 16 | 5.4.6 安全 | 26 |
| 5.1 网络架构与组网方式 | 17 | 5.4.7 路由 | 26 |
| 5.2 星地融合通信空口 | 18 | 5.5 星地频谱共享及干扰规避 | 28 |
| 5.2.1 双工方式 | 18 | 5.6 实现优化技术 | 28 |
| 5.2.2 波形与多址技术 | 19 | 第六章：标准和技术验证推进 | 29 |
| 5.2.3 波束管理 | 19 | 总结与展望 | 30 |
| 5.2.4 链路与覆盖增强 | 20 | 缩略语 | 31 |
| 5.2.5 终端定位 | 20 | 参考文献 | 33 |

01

引言

FOREWORD



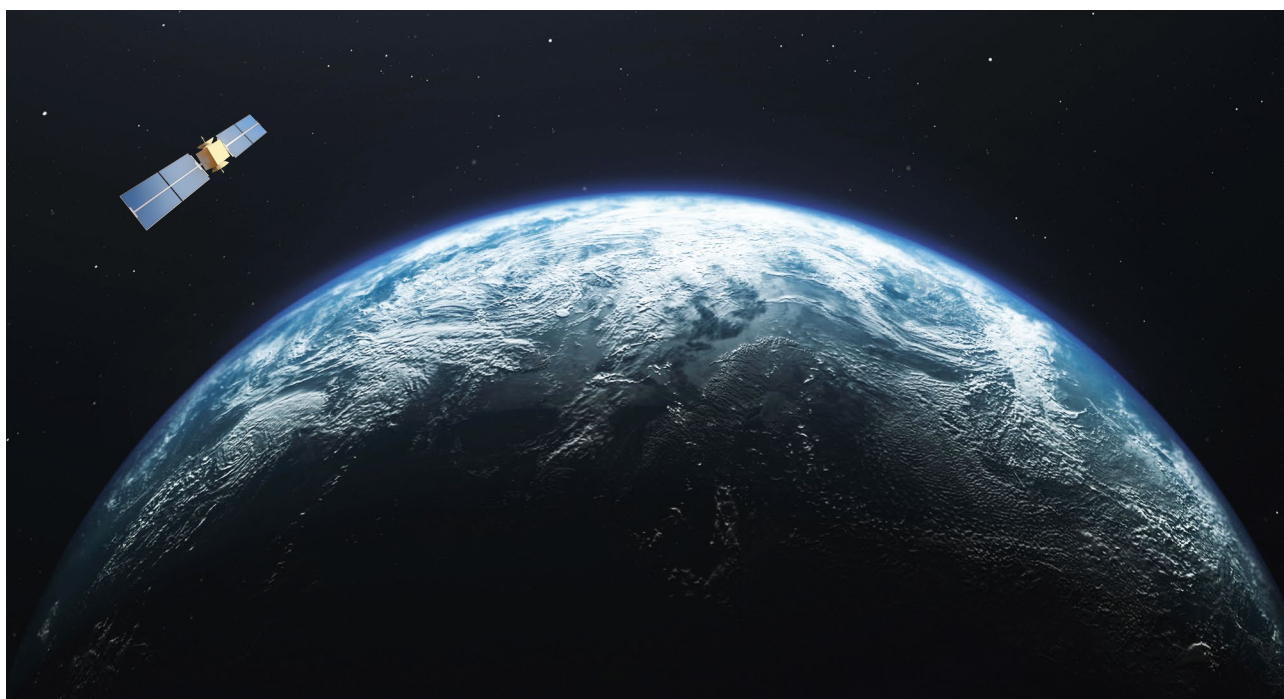
近年来，低轨（LEO）卫星互联网成为无线通信领域新的竞争赛道和焦点，并对传统地面移动通信技术提出巨大挑战。

第3代合作伙伴组织（3GPP）在5G非地面网络（NTN）及未来6G协议中，从无线传输技术、网络架构与安全、终端接入与认证等方面融合卫星通信和地面移动通信，为构建天地一体、全球立体无缝覆盖的星地融合通信系统创造条件，以满足万物互联、无限沟通的需要。星地融合通信也是国家战略需要，在《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》中，明确指出“要建设高速泛在、天地一体、集成互联、安全高效的信息基础设施”。

卫星互联网在国内外发展迅猛。美国“星链”（Starlink）是目前最大的低轨宽带卫星通信系统，已拥有100万以上的VSAT用户，并在汤加火山救援、俄乌战争战场通信中发挥了重要作用，其潜在

的军事价值也在不断地体现出来。在手机直连卫星方面，AST Space Mobile公司正在积极开展存量手机直连卫星的技术试验，SpaceX和T-mobile表示将合作建设可支持手机直连的卫星通信系统，爱立信、泰雷兹、高通联合声明将共同研制基于5G NTN的卫星通信系统，苹果公司也表示APPLE Watch、iPhone14等产品将支持卫星通信。此外，国内的卫星运营商、移动通信运营商、系统设备厂商和终端厂商也在积极关注手机直连卫星的需求与技术发展。中国信科以及国内相关企业、研究机构和大学也在持续开展5G/6G星地融合通信技术的研究与验证。

本白皮书主要从驱动力、需求与应用场景、关键技术指标与技术挑战、技术发展路径、关键技术、标准推进与技术验证等方面对星地融合通信技术进行了探究，重点剖析手机直连卫星模式的关键技术，为业界更深入地了解星地融合通信提供参考。



02

驱动力、需求与应用场景

DRIVING FORCE, REQUIREMENTS AND
APPLICATION SCENARIOS



2.1 星地融合通信驱动力

过去数十年内，在人们不断地追求“更高频谱效率”和“更高传输速率”的过程中，移动通信系统被优化成为一个越来越适于“地面通信信道模型和业务模型”的“地面”通信系统，为个人移动用户和物联网用户提供移动通信服务；而在不断地追求“更高功率效率”和“更高通量”的过程中，卫星通信系统被优化成为一个越来越适于“卫星通信信道模型和业务模型”的“卫星”通信系统，为专业移动用户和专业 VSAT 用户提供卫星通信服务。因用户群、应用场景、信道环境等方面的不同，它们的技术演进相对独立。虽然，在目前已部署的卫星通信系统中，有部分系统的协议（如：GMR、S-UMTS）是基于地面移动通信系统协议做适应性修改而成的，但因协议和具体实现上的差异，导致星、地通信系统间的融合仍然困难重重。随着无线通信技术的发展，特别是 6G 技术需求的逐渐清晰，无论是从用户需求，还是从运营商期望或者从产业发展的角度，对星地融合通信的需求越来越强烈，在所有的驱动力中，以下四个方面尤为突出：

► 卫星通信用户的大众化

传统的卫星通信用户是政府、军队、专业机构和专业人员。随着人类活动空间的拓展，卫星通信

逐渐走向普通个人，以手机为中心的个人移动通信业务与应用越来越需要“手机直连卫星”，以避免专用卫星通信终端引起的各种问题与不便。手机能灵活地接入星、地网络，省去卫星专用终端，可降低用户使用成本，并能提升手机用户体验，这无疑是星地融合通信的重要市场驱动力。

► 无缝覆盖与随时随地接入需求^[1]

地面移动通信系统虽然可以在陆地上为所有的人和物提供宽带移动接入服务，却难以覆盖海洋、高山、森林、沙漠、中空域和临近空间。卫星通信系统虽然可以覆盖整个地球表面、中空域和临近空间，却难以为手机用户提供宽带卫星接入服务。因此，需要二者相互配合、互为补充，提供无缝覆盖，才能为用户提供随时随地的接入服务和融合业务。

► 万物智联的需求

以信息传递和应用处理为中心的万物智联不仅需要低成本局域物联网连接，也需要经济的广域物联网连接，以支持信息的快速交互与共享，实现融合的业务与应用。星地融合通信为地面偏远地区、中空域和临近空间的万物智联提供了更加便捷和经济的技术手段。

► 卫星通信和地面移动通信产业链共享

地面移动通信拥有数十亿的用户、强大的技术队伍和完备的产业链。但卫星通信目前只有百万级的用户量，并且其参与人员与产业规模也远远低于地面移动通信，这也是卫星通信设备和运营成本高、

技术更新慢的一个重要原因。如何充分利用地面移动通信的产业链，如何把普通移动通信用户发展为卫星通信用户，是运营商面临的两个重要问题，而“星地融合通信”则为这两个问题的解决提供了技术路径。

2.2 星地融合通信的典型应用场景

星地融合通信在个人移动通信、交通运输、航空航海、电信、物联网、航天、应急救援等领域都有广泛的应用场景。

► 个人移动通信场景

手机是目前最为常用的个人通信工具，在有地面移动网络覆盖的情况下，可以通过地面移动网络接入；在没有地面移动网络信号的地方，或者因不可抗力导致地面移动网络失效时，手机可以通过卫星接入到网络，实现真正意义上的无缝覆盖和随时随地接入。

► 交通运输场景

无论是行驶在陆地上的专业车辆、火车，还是航行在江海湖泊上的船只，都有专业通信、数据回传、或向乘客提供网络接入的需求。当有地面移动网络或专用网络覆盖时，可以通过地面网络接入；当进入到沙漠、无人区、江海湖泊中心时，可以通过卫星接入。

► 航空航海场景

当飞机停在机场、舰船泊在码头时，飞机和舰船可以通过地面移动通信系统实现专业通信、数据回传；而在航行的过程中，则需要通过卫星通信系统实现专业通信、数据回传，或向乘客提供网络接入服务。

► 电信场景

星地融合通信系统可以以较低成本为边远地区、

海岛、海上平台、移动平台提供基站回传业务、宽带接入业务和卫星中继业务，可在不改造存量通信网络条件下提供卫星连接和数据中继服务。

► 物联网智联场景

在固定平台或移动平台上，为物联网终端提供“直接连接”业务或“间接连接”业务，进而提供电网监控检修、地质监测、森林监测、无人机数传与控制、海上浮标信息收集、远洋集装箱信息收集、农作物监控、珍稀动物无人区监控等服务，以及相应的应急处理。星地融合通信可满足大规模、低成本终端接入的需要。

► 导航与航天场景

星地融合通信的卫星网络支持更为强大的导航功能，为个人和专业用户提供定位与导航增强业务；同时，星地融合通信可以支撑航天相关信息传输业务，例如：高速数传业务、IP 测控业务。

► 应急救援场景

利用星地融合通信系统，可以通过手机向普通个人用户预报各种自然灾害，如：地震、洪水、台风、海啸、森林火灾、火山等。在灾害发生后，灾民可以利用手机通过卫星通信保持与救灾人员的必要联系，救灾人员也可以通过卫星通信来实现应急指挥。此外，在日常的应急通信中，如没有地面应急通信网络或地面移动网络覆盖时，也可以通过卫星来实现应急通信。

2.3 星地融合通信愿景

星地融合通信网络，是一个星地立体通信网络，由地面网络、临近空间网络和天基网络组成^[2]（如图1）。其中，地面网络主要包括地面蜂窝基站、卫星信关站和核心网；临近空间网络包括无人机和临空接入平台；天基网络主要包括高中低轨卫星通信载荷与平台。星地融合通信网络使用统一的网络架构和标准体制，使用一体化的无线接入、传输和网络技术，

使用一体化的星地协同无线资源分配与业务管理，为多种通信设备提供宽带或窄带接入服务，满足天基、空基、海基和陆基用户随时随地通信需要^[3]。星地融合通信使得卫星通信和地面移动通信在通信技术、元器件、通信设备、通信网络、通信系统、通信业务与应用方面得以深度融合，极大地降低成本，提升用户体验，促进整个产业的良性发展^[4]。

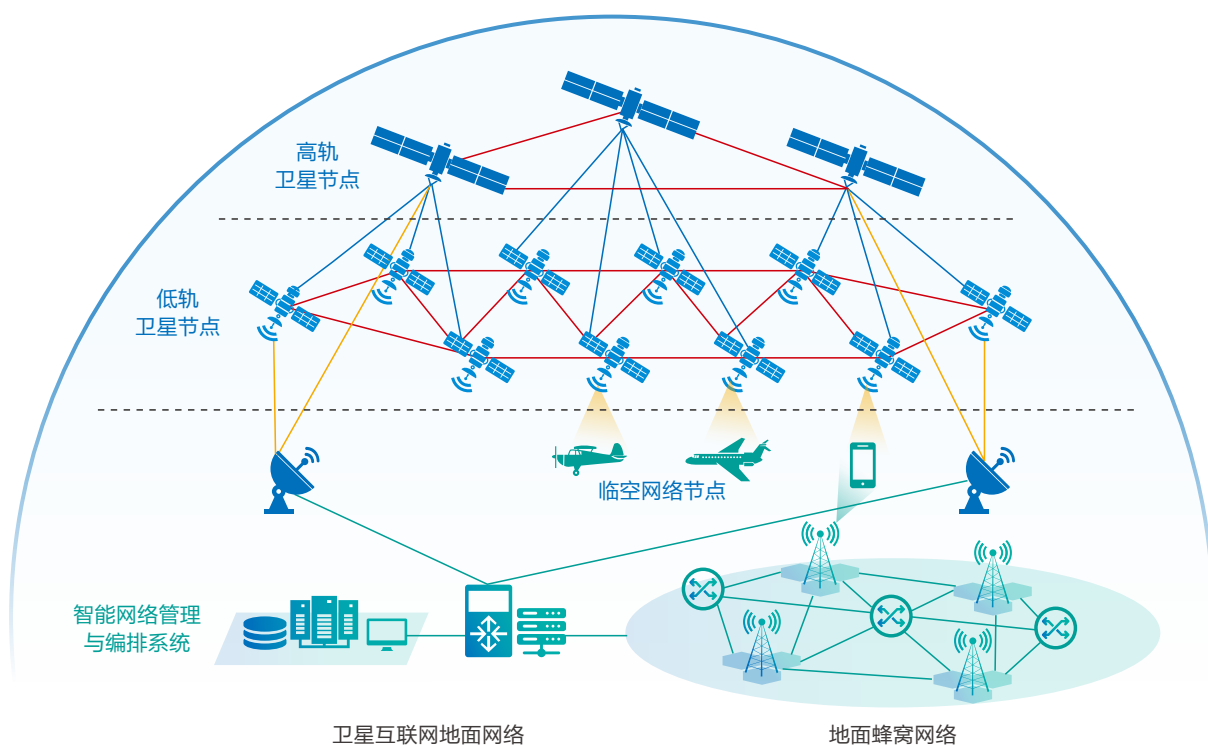


图1-星地融合的立体网络

手机直连卫星是星地融合通信的一个重要方面，使得应用最广泛的移动通信终端与覆盖范围最大的卫星网络紧密结合，是增强终端能力与网络覆盖广度的重要途径，是对基于专用终端、提供语音及低速率数据业务的传统卫星通信的重新定义，是面向6G真正实现随遇接入、无缝覆盖的重要举措。手机直连卫星的星地融合通信系统的基本愿景为：系统在全球范围内提供无缝覆盖及不间断服务，手机用户可以随时随地接入地面移动网络或/和卫星网络，并能在它们之间无感知地切换。

03

关键技术指标和技术挑战

KEY PERFORMANCE INDICATORS AND
TECHNICAL CHALLENGES

3.1 关键技术指标

基于用户与业务的需要,结合典型的卫星星座、频率资源和载荷配置,并考虑到卫星通信技术、器件和组件发展水平,本文初步估算星地融合通信系统中卫星通信需要满足的技术指标^{[5][6][7]},具体分析如下:

► 峰值速率

未来星地融合通信系统的卫星应具有部分或全部基站功能,每颗卫星支持数十至数百个波束。对于为低增益(几分贝以内)天线的终端(如手机、物联网终端)提供接入服务的波束来说,单波束下行峰值速率可设在10~50Mbps之间;对于为高增益(30dB以上)天线的终端(如VSAT终端)提供接入服务的波束来说,单波束下行峰值速率可设在50~1000Mbps之间;每颗卫星的容量可设定在10~100Gbps之间。

► 空口时延

空口时延包括传播时延、处理时延、跳波束调度时延和重传引入的时延,它与“接入网-核心网”间的时延、核心网内时延之和应满足所支持的通信业务的包时延预算^[8]的要求。传播时延是由轨道高度和最低仰角决定的,对于星上处理和透明转发的LEO卫星通信系统来说,传播时延分别在1.1~11ms和2.3~23ms之间;对于地球静止轨道(GEO)卫星来说,传播时延则超过百毫秒。处理时延相对较小,一般单侧在1~2ms之间。跳波束调度时延的最大值与平均值分别是实际回跳周期的一倍和一半,受跳波束同步时间的约束,跳波束周期一般设在80ms以内,应根据业务的包时延预算和其它时延情况设置实际回跳周期。重传引入的时延由重传次数、传播时延、处理时延和跳波束调度时延等因素共同决定,当传播时延或跳波束调度时延比较大时,或在

传输实时交互业务时,应尽量减少重传次数或避免使用重传机制。

► 多普勒频移

多普勒频移由信号频率、卫星与终端/信关站之间的相对径向速度决定,对于常用的Ku和Ka频段的低轨卫星通信系统来说,多普勒频移可高达数百千赫兹;对于常用的C和X频段的低轨卫星通信系统来说,多普勒频移也可超过100千赫兹;对于常用的L和S频段的低轨卫星通信系统来说,多普勒频移也有数十千赫兹。在低轨卫星通信系统中,不仅多普勒频移绝对值很大,而且多普勒频移的变化率也比较大,因此,多普勒频移对同步、随机接入、信号检测等有明显的影响,星地融合通信系统应具有容忍大多普勒频移的特性。

► 终端移动速度

卫星通信系统支撑的典型终端类型为手持终端、固定终端、车载终端、船载终端和机载终端等。对于机载终端,其移动速度可高达1000km/h,会影响对星、同步和移动管理等方案的设计,对波束宽度和波控也有一定的约束。

► 频谱效率

卫星通信系统因功率受限,功率回退不宜太多,因此,线性度、调制阶数(特别是用户链路)和频谱效率不会太高。一般而言,对于低增益天线的终端来说,用户链路调制阶数在4以内;对于高增益天线的终端来说,用户链路调制阶数在5或者6以内,最高频谱效率应大于3bit/s/Hz。

► 频段与频率复用

地面移动通信系统一般使用Sub-6GHz低频段,多采用同频复用。卫星通信系统部分采用L、S、C、X低中频段的频率,部分采用Ku、Ka高频段的频率,

通常基于波束空分及多色复用频分来组网。此外，原来用于馈电链路或星间链路的 Q/V 频段也开始用于用户链路。在星地融合通信网络中，不仅需要支持星内和星间的频率复用，也需要支持星地频率复用，频率复用因子不超过 4。对于宽带卫星通信系统来说，每颗卫星的波束数与频点数之比一般在 2 至 8 之间，这也是频率复用的一个重要指标，会从多个方面影响卫星通信系统的设计。

► 链路可用度

卫星通信无线链路的可用性会受到电离层、大气、云、雨等无线环境的影响。在做链路预算时，需要根据使用的频率考虑上述因素的影响。一般而言，在没有异地链路备份机制的条件下，用户链路的可用度应不低于 98%，馈电链路的可用度应不低于 99%。在实际中，可以从用户群、频率、覆盖区

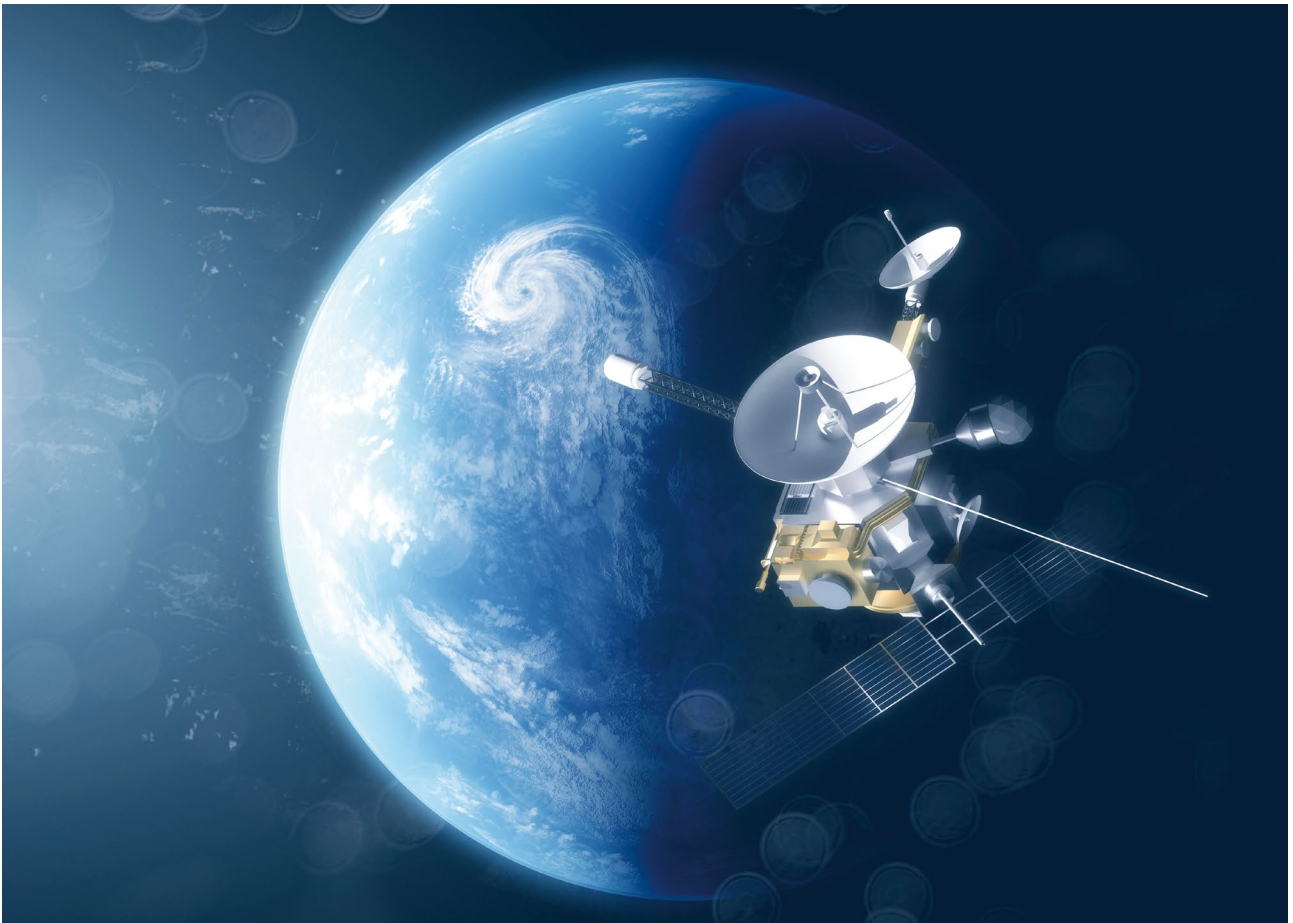
域和代价等方面综合考虑链路的可用度指标，并与用户签订适合的服务水平协议。

► 小区半径

卫星通信系统的单波束对应的小区半径从数十公里到上千公里，其覆盖范围可为数万平方公里，比地面移动通信系统小区覆盖范围高出多个数量级。

► 单波束服务的用户数

虽然城市区域人口稠密，但是真正使用卫星通信系统的用户还是少数。对于无地面网络覆盖或者覆盖不足、主要由卫星网络覆盖的区域，例如海洋、森林、沙漠等地广人稀的偏远区域，用户密度也不会太大。参照典型场景中用户分布情况和已有卫星通信系统的设计目标，未来的卫星通信系统的每颗卫星和每个波束支持的激活用户数将分别超过 5000 和 500 个。



3.2 主要技术挑战

为满足上述关键技术指标要求，星地融合通信系统面临着众多挑战，主要包括：

► 同一通信体制对多种迥异部署环境的适应性

对于卫星通信而言，信道环境受轨道、频率、终端天线类型等方面的影响，信道以强莱斯信道为主。对于高轨卫星通信系统来说，传播时延和信道衰减问题突出；对于中低轨卫星通信系统来说，多普勒频移、信道衰减、传播时延和时间漂移问题突出。卫星通信虽然传输路损很大，但同一卫星覆盖范围内的终端间的信号强度差异比较小，通常只有十分贝左右。此外，对于采用全向天线或低增益天线的低频段卫星通信终端来说，多径效应的影响不容忽视。而对于地面移动通信而言，信道环境明显不同于卫星通信系统，其典型特征包括：较强的多径衰落、微秒级的传播时延、线性射频通道（含功放）、终端到基站之间信号强度差异可达数十分贝。上述差异对统一空口设计带来巨大挑战。

► 有限数量波束与充分覆盖需求之间的差距

跳变波束虽然能够按照业务需求动态调整卫星覆盖、增加系统容量，但因跳变波束数量有限，系统往往需要在波束效率与覆盖率之间寻求折中方案。如何利用有限的波束覆盖更广阔的区域，将是卫星星座设计和通信体制设计需要面对的一个重大挑战。

► 复杂而动态的干扰管理

在星地融合通信系统中，需要处理同一卫星通信系统内的干扰问题、不同卫星通信系统间干扰问题，以及卫星通信系统与地面移动通信系统之间的干扰问题。在与 GEO 卫星系统共用频率时，非对地静止卫星（NGSO）系统还需要实现规避对 GEO 系统干扰的功能。同时，还要防止卫星通信系统对地球探测、气象卫星等系统的干扰。更为复杂的是，

上述问题的处理需要随着卫星的运动、波束指向变化等动态调整。

► 轻量化的协议

受载荷能力的限制和空间环境的约束，星地融合通信系统应该保证星上处理的各层协议简洁、轻量化，并便于软件 / 固件空间防护措施的实现。

► 多样化的终端

在星地融合通信系统中需要支持多种类型终端。因终端的部署及使用场景不同，不同终端在能力上也存在巨大差异，这将导致终端在工作频段、工作带宽、峰值速率、动态适应性、业务类型、能耗等方面可能存在较大的差异。因此，需要在通信协议、资源调度编排、移动性管理、业务管理等方面适应多样化终端的需求，这可能提高星载通信设备的复杂度。

► 高动态巨型空间承载网络

在星地融合通信系统中，低轨卫星数量可达数千至上万颗，卫星间将通过星间链路组网，形成巨大的空间承载网，典型跳数可达数十跳，且难以用简单的方法把它分成多个固定的路由域。空间承载网拓扑动态变化，缺少链路级弹性机制，设备级弹性机制也很弱，而且激光星间链路的稳定性较弱。因此，空间承载网络远比地面移动通信系统的承载网络复杂，如何在这样的网络上实现满足服务质量（QoS）要求的承载网将是一个巨大的挑战。



3.3 手机直连卫星的关键指标和主要挑战

对于手机直连卫星模式来说，因手机采用全向天线、发射功率较小、频率资源有限，其关键技术指标取值有别于 VSAT 终端，也不同于手机接入地面移动通信网络时的情况。手机直连卫星的关键技术指标如下：

➤ 峰值速率

手机直连卫星系统受终端天线增益、发射功率等因素的影响，造成上下行速率受限，其峰值速率相比 VSAT 终端或接入传统地面移动网络的终端而言有较大的降低。

➤ 频段带宽

手机直连卫星系统，受无线传播特性以及终端天线形式等因素的影响，一般工作在低频段，如 1GHz 以下频段、L 或 S 频段。按照国际电信联盟（ITU）的规划，在 1GHz 以下频段、L 波段和 S 波段，为卫星移动业务分配的频段带宽分别在 6MHz、41MHz 和 50MHz 以内（除在 2 区内的 2120~2220MHz 频段外）；在 C 波段内，没有为普通卫星移动业务（不包含卫星水上移动业务和卫星航空移动业务）分配频率。对于运营商来说，可用于卫星移动业务的低频段的带宽更低，远低于为 5G 新空口（NR）以及传统高通量卫星通信分配的频段带宽。

➤ 频谱效率

由于手机直连卫星系统功率受限，低信噪比导致高阶调制难以应用。同时卫星距离地面较远，传统的多输入多输出（MIMO）系统难以用于单星增加容量，因此这些因素都会限制手机直连卫星系统的频谱效率。

➤ 多普勒频偏

LEO 卫星由于运动速度快，因此会带来较大的动态特性。即便是在较低的 L 和 S 频段，低轨卫星带来的多普勒频偏也有数十千赫兹。

受手机天线增益、手机发射功率、频率资源和通信监管的约束，手机直连卫星面临如下主要挑战：

➤ 低信噪比对速率影响

低信噪比造成传输速率低、可靠性差，需要每个物理信道都能适应低信噪比场景。

➤ 高动态对时频同步影响

卫星的高速运动带来较大的多普勒频偏和多普勒变化率；星地间长距离造成较大的传输时延，而且时延随着卫星运动快速变化；上述因素均对时频同步产生影响，需要手机具备高动态时频同步能力。

➤ 星地间频率协调问题

目前可用于卫星移动通信的业务的频率资源受限，特别是 L、S 频段，几乎没有新的可用于卫星移动通信的频率资源。地面移动网络占用了大量的 Sub-6GHz 频段。手机直连卫星的星地融合通信需要在低频段为地面通信和卫星通信划分相关频带，通常有两种方式：一种方式是地面通信和卫星通信各自沿用目前 ITU 划分的频段，避免相互干扰，但是这种方式未必现实，因为现有可用于卫星通信的低频段几乎已全部被占用，很难挪用出来用于星地融合通信；另一种方式是卫星移动通信借用地面蜂窝网的频段，在星地融合通信网络部署方面根据干扰准则统一规划、统一部署、统一管理，但这种方式存在频段使用合规性问题，需要 ITU 各参与单位形成共识，可能存在共识难以达成的风险，造成星地融合通信频段共享仅在某些特定区域可以实施的局面。

➤ 移动性管理方面挑战

手机直连卫星在扩展网络覆盖范围及服务空间的同时，也带来了服务地域区分、法规约束等新问题。需要网络侧精准地获取手机的位置，并据此选择对应的、合法的核心网为之服务，以满足当地的法律法规及监管的要求。

04

发展路径

ROADMAP FOR INTEGRATED TERRESTRIAL-
SATELLITE COMMUNICATION



在学术界和产业界的推动下，星地融合通信正朝着“5G 体制兼容”到“6G 系统融合”的技术路径进行发展。

4.1 5G NTN 与地面网络（TN）在标准体制的兼容，为星地融合通信奠定了初步基础

5G 在设计之初并没有考虑卫星通信，3GPP R15 是 5G 第一个商用版本。3GPP 对卫星通信的研究在 R15 NTN 启动，在 R17 完成第一个版本的标准规范制定，主要在定时关系、时间和频率的补偿、混合自动重传请求（HARQ）机制、移动性管理与切换等方面做了技术优化，以适应卫星通信场景。这就决定了星地融合通信在 5G 阶段是体制兼容，即在已有地面 5G 标准的整体技术框架下通过优化的方式实现星地融合通信。5G NTN 使得卫星通信能够利

用并分享 5G 的产业链和规模经济效应。5G NTN 支持 GEO、中轨道（MEO）和 LEO 场景，目前支持 Sub-6GHz 频段，未来将支持更多频段，能适应透明转发和星上处理两种部署场景，支持 VSAT 终端、手持终端和物联网终端，支持卫星固定、“静中通”、“动中通”和卫星移动通信业务。基于 5G NTN 的手机直连卫星方案，既契合手机更迭周期短的特点，又能满足行业应用需求，也为 6G 星地融合通信奠定了坚实的基础。

4.2 6G 星地融合通信将是全面的系统融合

在 6G 时代，从标准制定之初，就充分考虑了地面与卫星两种不同类型的接入方式，地面移动通信将与 GEO、MEO、LEO 卫星通信充分融合，实现全球无缝覆盖，使得任何人或物在任何地点和任何时间都可以接入到网络。6G 星地融合通信网络是一个多维复杂的“巨系统”，是多个异构接入网络的

融合，具有多层立体、空间大尺度、动态时变的特点，在网络架构设计、传输效率提升、网络拓扑维护、移动性管理、以及服务质量与业务连续性保障等方面都面临巨大的挑战，这些都将在 6G 网络中予以充分考虑，并在网络初始设计中予以解决，实现星地网络充分融合。

4.3 手机直连卫星是星地融合通信网络发展的重要阶段

5G NTN 星地体制兼容阶段，已就手持终端接入 LEO 卫星和 GEO 卫星的关键技术及解决方案进行了讨论，并将在 R18 阶段不断完善 5G NR 手机接入透明转发模式的卫星网络的技术方案和标准，为初步的星地融合通信提供解决方案和标准支撑。

在 6G 标准研究之初，业界就非常重视手机——

这种应用最广泛、数量最多的移动终端类型——接入星地融合通信网络的问题。6G 以统一网络架构、统一空口协议以及统一频谱规划管理为基本技术途径，力图解决手机直连星地融合通信网络的问题，以确保在 6G 阶段，手机用户能够在地面接入和卫星接入之间无感知切换。



05

星地融合通信关键技术

KEY TECHNOLOGIES OF INTEGRATED
TERRESTRIAL-SATELLITE COMMUNICATION

为应对在构建星地融合通信系统时所面临的挑战，需要在网络架构与组网方式、星地融合通信空口、移动性管理、网络与安全、星地频谱共享及干扰规避、工程实现等多个方向开展关键技术攻关。

5.1 网络架构与组网方式

图 2 是星地融合通信系统网络架构，支持基于 TN 和 NTN 的多种通信接入方式，可支持手机直连或者 VSAT 终端接入。对于 NTN 来说，星上处理（OBP）模式和星间链路的使用可以大幅度降低信关站布站的数量和难度、提高覆盖度，是星地融合通信系统发展的趋势。受技术条件、发射能力和成本的约束，以及实际需要，透明转发（TP）模式也是星地融合通信系统可能采用的一种模式。此外，

由于星地融合通信系统需要在全局运营，出于通信监管的需要，各个国家监管机构可能要求在其国家内建立独立的信关站和核心网，甚至要求使用透明转发模式。因此，星地融合通信系统应支持基于多运营商核心网（MOCN）的接入网共享方式，多个核心网共享接入网，支持 TN、NTN-OBP 和 NTN-TP 混合组网的方式^{[8][9][10]}。

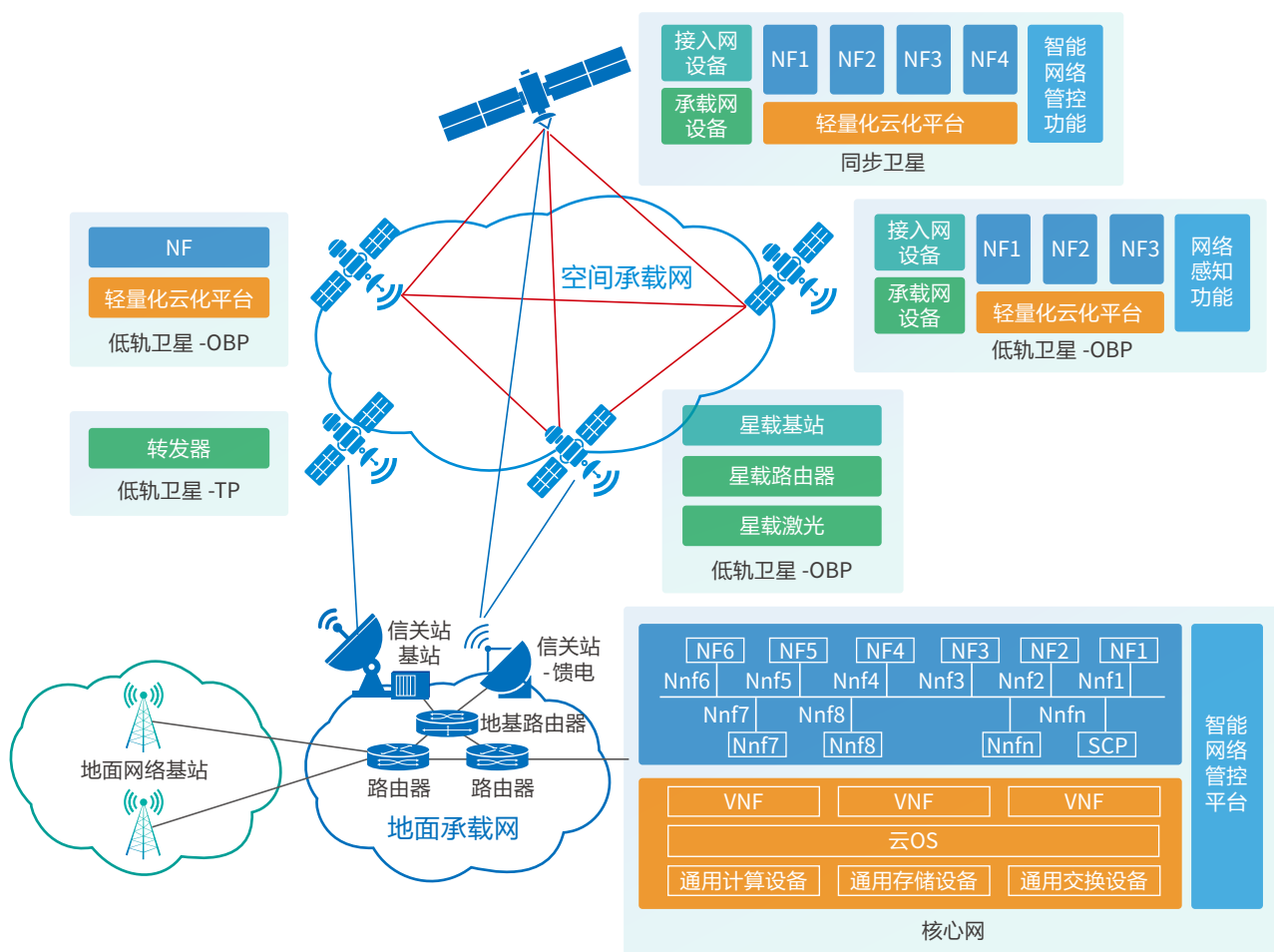


图2-星地融合通信网络架构

在星地融合通信系统架构中，主要包括终端、无线接入网、承载网、核心网四个部分，此外，还有应用系统和运营支撑系统。

无线接入网的主要功能是为终端提供卫星或地面无线接入以及数据传输的功能，支持不同速率、不同移动速度的终端接入，并提供低时延切换和连续性服务。无线接入网由星载基站、转发器、信关站基站和通常的地面蜂窝基站构成，支持随遇波束接入和业务波束接入，支持单星或多星组网应用。

承载网的主要功能是承载无线接入网及其他载荷、平台的数据（业务流、控制流、管理流和 IP 测控流），支持网络互联和高效可靠传输。承载网包括空间承载网和地面承载网，空间承载网包括星载路由器、星载激光 / 微波终端、馈电载荷和星载馈电控制功能；地面承载网包括馈电地基单元、地基路由器、承载网网络控制器和传统的 IP 设备。

核心网包括 5G 核心网(5GC)/6G 核心网(6GC)

和 IP 多媒体子系统(IMS)，支持用户面与控制面分离。5GC/6GC 为用户提供认证鉴权、会话管理、移动性管理、用户管理、计费等功能，为系统运营提供基础能力开放接口。IMS 系统可为各类业务建立多媒体通道，提供统一的服务质量和计费策略控制机制，同时，负责语音转码以及不同网络间语音业务的互通。

根据监管的需要，星地融合通信系统应该在相应的国家内建立独立的信关站和核心网，这些核心网共享接入网（特别是星载基站）和空间承载网的资源。每个中低轨卫星上的星载基站需要被所有的核心网所共享。对于同一国家内的不同运营商来说，可以通过核心网网络切片的方式组网，也可以通过虚拟运营商的方式共享整个网络，以降低接入网和空间承载网的复杂度。

此外，星地融合通信系统的不同核心网之间需要互联，并需要与其它运营商网络的核心网互联，以支持用户在不同核心网之间漫游。

5.2 星地融合通信空口

5.2.1 双工方式

地面移动通信系统中通常采用频分双工(FDD)模式和时分双工(TDD)模式，传统的卫星通信系统多采用 FDD 模式，目前 3GPP NTN 主要研究的双工模式也是 FDD 模式。对于星地融合通信来说，双工方式既是频率使用的问题，也是系统实现上的折中选择。

FDD 模式是星地融合通信的一种主要双工方式。其主要优势有：1) 同步设计和定时关系简单；2) 传输效率较高。其主要不足有：1) 可用的频率资源较少；2) 上下行频率之间需要有足够的保护间隔，当收发频率相差太远，或无法实现足够高的频率隔

离度时，就需要采用分离的接收阵和发送阵，增大了天线面积、重量和成本。在频率资源丰富的情况下，手机直连卫星通信首选 FDD 制式^{[11][12]}。

TDD 模式是星地融合通信的一个重要的发展方向。其主要优势有：1) 频率资源相对丰富；2) 便于实现收发共阵。其主要不足在于：1) 对时间同步要求高；2) 复杂的上下行链路干扰问题；3) 更长的物理帧长度。

半双工 FDD 也是星地融合通信的一种重要的双工方式。其主要优点是：便于实现单端收发共阵，解决收发隔离问题。其主要不足在于：对时间同步要求高，传输效率较低。

未来，三种双工模式都将有各自的应用场景，建议以 FDD 为主，在特定频段可以考虑 TDD 模式和半双工 FDD 模式。

5.2.2 波形与多址技术

星地融合通信的基础是一体化空口，其关键是要统一传输波形并构建可配置的空口参数集合，该集合包含卫星和地面网络对应的参数与取值范围。通过灵活的空口参数配置来适应不同应用场景，实现星地空口融合。

在星地一体化空口中，TN 和 NTN 的帧结构与波形必须采用统一的配置。在卫星通信场景，应选择低峰均比（PAPR）的波形。下行链路可以采用 CP-OFDM 并实施降 PAPR 处理；上行链路可以采用 DFT-s-OFDM；这样可以保证与 5G NR 的波形一致，有利于系统的平滑演进。同时，也需要继续探索适合卫星通信的低 PAPR 波形和降低 PAPR 的方法，进一步提高系统的功率效率。

对于星地融合通信来说，由于卫星传输时延大，可考虑采用非正交多址接入技术增加传输机会，提高支持的用户数，有效降低接入时延和数据传输时延。此外，可采用 2 步快速接入机制降低接入时延：

第一步：终端发送 preamble 信号和终端身份信息，也可包括业务请求信息；

第二步：网络对终端的接入请求进行确认，终端收到信号完成接入过程。

5.2.3 波束管理

在卫星通信中，需要通过点波束 / 窄波束方式，以降低波束宽度为代价来提高天线增益。为了改善使用点波束 / 窄波束时系统的覆盖能力，通常采用捷变跳波束方式来分时覆盖不同区域。跳波束的驻留时间在毫秒级、回跳周期在十毫秒级，不会对通

常业务的服务质量产生明显的影响^{[13][14]}。

在波束资源有限的情况下，有两种方法来应对覆盖不足的问题：一是预规划覆盖，即事先规划好波束覆盖区域，并只对规划区域内的用户提供服务；二是使用信令波束为用户提供随遇接入服务，即，信令波束周期性地扫描各个波位，发现有用户需要接入的波位，调用能提供业务的波束（通常称为业务波束）覆盖该波位，服务其中的用户，以最大限度地满足用户接入需要。

一般情况下，由于用户分布的非均匀性，业务波束为点波束 / 窄波束，工作模式是跳波束模式和



凝视模式；当信令波束的宽度与业务波束宽度相当时，可以工作在轮询或者凝视模式；当信令波束的宽度远远大于业务波束宽度时，可以工作在推扫（即：Earth-Moving）模式。

在星地融合通信网络中，在用户链路和馈电链路上均可使用多波束协同传输和星地协同传输技术，以获取分集增益或复用增益。

5.2.4 链路覆盖增强

在星地融合通信系统中，特别是对于手机直连卫星的通信场景来说，往往存在链路预算紧张或不足的问题，并且反向链路的链路预算通常会更为紧张。为此，需要从空口协议、终端与基站无线能力要求等方面综合考虑 5G NTN 的无线链路覆盖增强^[15]，也需要在设计 6G 无线链路时候充分考虑这些问题：

► 使用增强的 HARQ 机制

由于卫星通信传播时延比较大，需要基于场景动态地开启或关闭 HARQ 功能。对于低信噪比场景和时延不敏感的业务，可以采用盲重传或 HARQ 重传实现信号的分集合并以提升性能；对于时延和抖动敏感的业务、传播时延过大场景（如：高轨卫星通信）和高速传输链路来说，应关闭 HARQ 反馈以避免重传；在其他场景下，通过开启 / 关闭 HARQ 反馈的方法自适应地应用 HARQ 机制。在卫星网络中应用 HARQ 功能，需要配置更多的 HARQ 进程才能满足通信链路的需求。

► 使用信号重复传输机制

信号重复传输机制可以有效地改善链路预算，特别是对于手机直连卫星的通信场景来说，重复传输机制是保证其通信可靠性和覆盖能力增强的一种重要手段。当链路预算改善要求为几个分贝时，这种方法的效率比较高；当链路预算改善要求超过 10dB 时，这种方法的效率大大降低。

► 提高对终端无线能力的要求

对于使用低增益天线终端的系统来说，应提高终端在卫星通信频段内的天线增益和发射功率，特别是对于直连卫星的手机，其天线增益和等效全向辐射功率（EIRP）应高于 Power Class 3 终端。针对卫星通信频段设计的专用天线的增益，可以比普通手机天线的增益高出几个分贝，终端功放模块的功放也可输出高于 23dBm 的功率，这些均可作为卫星通信手机的默认配置。

► 提高对卫星天线能力的要求

提高星载基站或转发器 EIRP 和品质因素（G/T）是解决手机直连卫星链路预算紧张最为重要的途径，而其关键是提高对卫星天线能力的要求。可适当地提高卫星天线阵面尺寸和阵元规模，使用捷变跳波束技术，实现天线增益与覆盖能力之间的平衡；可采用收发共阵、阵元增益最大化、稀疏阵等方法，提升天线的无源增益。

► 降低信号带宽

对于手机直连卫星的场景，空口协议应支持更低的信号带宽，以提高功率谱密度、降低噪声带宽，从而提高信噪比。特别是，对于手机直连 GEO 卫星场景中的反向链路来说，应该考虑百 kHz 量级带宽或更低。

5.2.5 终端定位

在卫星通信中，终端和卫星都需要双方的位置信息，以便于搜星、确定波束指向、调整时间提前量、做频率预补偿、优化发射功率等。此外，为了满足监管的需要，网络通常需要知道并限制终端的使用位置。

依靠星地融合通信系统的导航增强功能，即使是没有配置全球导航卫星系统（GNSS）模块的终端，也可以实现定位并接入卫星网络。网络根据终端的

信号实现公里级、米级或亚米级等各种定位精度。

终端定位方法包含单星定位和多星定位。其中，单星定位是指终端对同一颗卫星的信号进行多次测量，获得空间上的多个样本来完成定位；多星定位是指终端通过对多颗卫星信号采用时分或空分测量来完成定位。

同样，网络对终端的定位也包含单星定位和多星定位。其中，单星定位是指同一颗卫星对终端进

行多次测量来完成对终端的定位，多星定位是指多颗卫星同时对终端信号测量共同完成对终端的定位。

单星定位便于实现，但在定位实时性和定位精度上，还无法同时满足实际监管和定位业务的需要。多星定位可以快速完成定位，但需要星间协同和良好的星间同步。未来的卫星定位技术将从信号体制、定位算法与定位流程等方面进一步改进，优化通信导航的一体化设计。

5.3 移动性管理

5.3.1 星间切换

在星地融合通信的卫星通信场景中，切换包括用户链路切换和馈电链路切换，用户链路切换包括星内波束间切换和星间切换^{[14][16]}。

在星地融合通信系统中，每颗卫星需要支持大量激活用户，而且每次切换可能会导致数十至上千毫秒的通信中断（特别是“先断后连”的切换模式），应避免频繁的用户链路切换，以减少信令开销和星上处理器资源的消耗，并降低对用户体验的影响。为此，需要从以下方面来优化用户链路切换：

- 在切换判断条件方面，综合考虑终端与卫星的相对位置关系、干扰规避条件、信号质量（包含是否有遮挡）、目标卫星负载和有效服务时间、终端天线能力、用户服务等级、切换模式（先连后断/先断后连）等因素；

- 在切换模式方面，可使用条件切换和分组切换

- 在切换预测方面，可以利用地面反馈的辅助信息，并使用基于人工智能的切换预测与判决方法；

- 在目标基站选择策略方面，尽可能选择服务时间最长的卫星；

- 此外，采用凝视波束模式，以减少甚至避免星内波束间切换。

馈电链路切换包括站内馈电链路切换和站间馈电链路切换。馈电链路切换导致承载网拓扑改变，进而会改变业务流的路径。为了降低馈电链路切换对服务质量的影响，一般采用“先连后断”的切换方式，并结合承载网的路由交换机制做进一步的优化，以降低因路径变化引起的拥塞、丢包和时延抖动。在透明转发模式下，馈电链路切换会引起用户的整体切换，此时可采用分组的切换规划，以降低信令风暴的影响。

5.3.2 终端位置管理与寻呼

地球固定跟踪区（Earth-Fixed TA）管理是目前卫星通信系统常采用的方式。它把跟踪区（TA）绑定到地面区域，但这种方式不仅会带来星载基站的TA更新问题，也会消耗大量的信令波束资源。特别是对于星地融合通信系统来说，每颗卫星覆盖区域内的空闲状态终端数量可达数千至上万，而信令波束资源却十分有限，需要优化位置管理方式和寻呼机制。

星地融合通信系统可采用基于地理位置的终端位置管理方式，终端向网络上报自己的地理位置，并且只有当地理位置发生大尺度变化（远大于波位



直径)或很长时间没有做位置更新时,空闲态的终端才发起位置更新流程。

在网络获得用户的位置后,可采用基于用户地理位置的寻呼机制。空闲态的终端在满足干扰规避的条件下,可按照最近距离原则选择驻留星载基站。核心网在寻呼空闲态终端时,也按照最近距离原则选择星载基站发出寻呼指令,包含最近距离和次近距离星载基站。星载基站需要根据终端速度等级来确定在哪个或哪些波位里发出寻呼,以降低对信令波束的资源消耗。

5.3.3 漫游

传统的卫星通信系统不支持漫游场景,但对于星地融合通信系统来说,特别是对于中低轨卫星通信系统来说,不仅需要支持终端在该系统内不同核

心网之间的漫游,也需要支持终端在卫星通信运营商网络和移动通信运营商网络之间的漫游。

对于星地融合通信系统来说,用户流量监管尤为重要,甚至会成为影响通信业务在境外落地可能性的一个关键因素。星载基站应确认终端的地理位置,并根据终端的地理位置选择适合的落地卫星和信关站,把信令和用户流量引入正确的拜访地核心网,以便于拜访地监管机构监管用户流量。根据漫游协议,拜访地核心网把用户业务流路由到本地其它网络或互联网(本地分流漫游模式:LBO),或路由到用户归属地核心网(归属地漫游模式:HR),以便于归属地监管机构监管用户流量。此外,拜访地核心网和归属地核心网都需要确认终端的位置及其漫游权限。



5.4 网络与安全技术

5.4.1 网络功能的柔性部署

星地融合通信系统应具有灵活适变的网络架构，能够根据不同的场景和业务需求多尺度构建服务网络，这需要以切片技术和虚拟化技术为基础，实现“功能模块化”、“功能组件化”，提供网络功能的可重构能力。

星地融合通信网络是由 GEO/MEO/LEO 卫星、地面通信系统共同组成的大时空尺度多层异构网络，而且星上资源有限，可以采用以下措施来实现网络功能的柔性部署：1) 利用星上虚拟化技术虚拟化星上资源，以提高不同 / 异构节点上资源的通用性，并实现星上功能可重构化；2) 通过容器等形式在星上部署定制化的网络功能，以降低部署网络功能的资源开销；3) 针对不同的业务场景，按需灵活柔性分割必要网络功能，提供定制化网络服务能力，从而提升网络的全场景适应能力；4) 轻量化处理网元功能，并根据组网形态、业务需求、网络资源情况和节点处理能力，在卫星和地面节点之间合理部署网元功能，实现网络功能的定制和按需重构。

5.4.2 切片技术

卫星通信具有高动态、分层分布的特征，且地面通信与卫星通信的网络差异较大，这些给星地融合通信网络中的端到端切片管理和服务质量保障提出了巨大的挑战，需要采用智能端到端网络切片管

理架构和人工智能技术，实现端到端网络切片智能选择、全生命周期自主切片管理和多域网络协同统一编排。

在网络切片选择方面，卫星接入网有机融合不同用户、不同场景的需求，基于统一的地面和天基网络（由星载接入网设备和空间承载网设备组成的网络）切片接入策略管理机制，按需选择端到端的接入网、传输网和核心网切片，实现切片选择的智能化和精准适配。

在网络切片编排方面，网络切片编排管理与服务质量保障系统实现多域的切片管理。新增网络控制功能单元，抽象化不同域、地面与天基网络切片间的差异，实现切片模板的自动化设计和切片资源的自动化编排。二者可将多域异构的网络资源融合起来，实现了跨越地面和天基的端到端切片的按需编排。

在网络切片全生命周期管理方面，将实现对网络切片的全生命周期的管理和智能化管理，包含对网络切片的部署智能化、选择智能化、调度智能化、删除智能化、故障定位智能化，并实时监控切片状态以保障切片安全健康运行。

5.4.3 网络虚拟化

考虑到空间环境恶劣、星上硬件资源有限、天基设备维修困难等原因，以及容器技术在运行快捷性、管理便利性、标准化、网元微服务化改

造等方面的优势，星地融合通信系统中天基网络的虚拟化技术将以容器为基础。通过云原生技术构建虚拟网络功能（VNF），采用容器把 VNF 封装成虚拟化组件，以微服务方式独立部署虚拟化组件单元，采用集中式的编排调度系统动态管理和调度虚拟化资源。这可以提高 VNF 和系统的弹性，

简化虚拟化平台的维护，提升整体服务的敏捷性。

在星地融合通信系统中，地面网络的虚拟化可以基于容器技术，同时，考虑到地面网络硬件资源相对丰富、部分网络功能复杂、且已存在部分基于 VM 的 VNF 等原因，地面网络也应支持基于 VM 虚拟化。

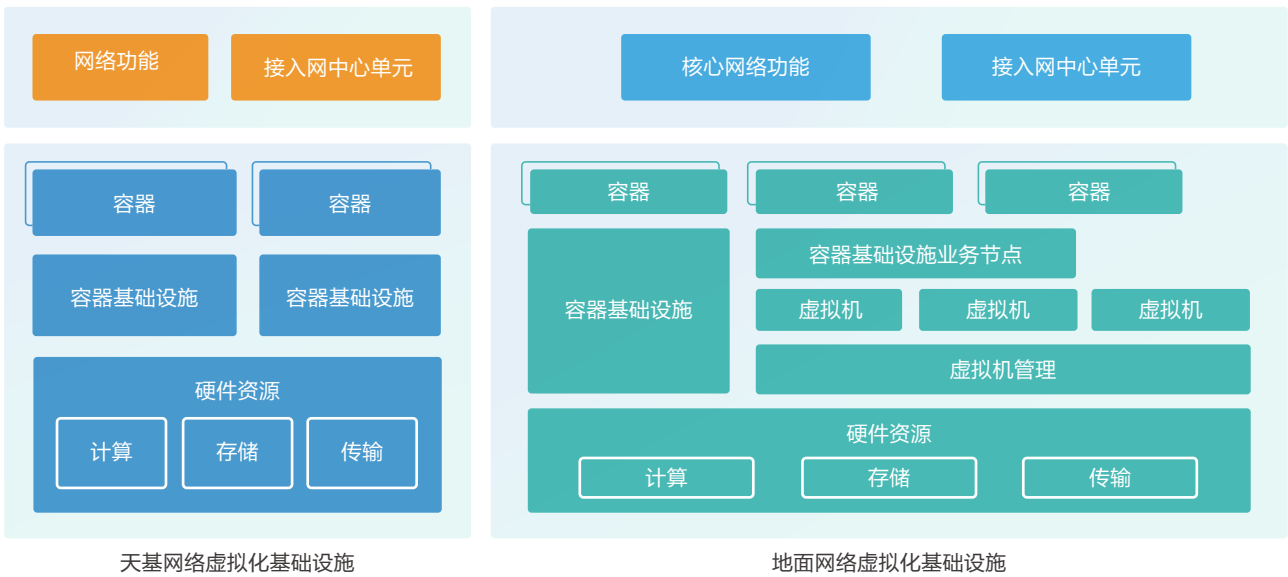


图3- 星地融合网络云化基础平台架构

星地融合通信网络云化基础平台架构如图 3 所示。对于天基网络来说，星载基站、馈电载荷、空间路由器、星载激光终端等设备都可以基于容器技术虚拟化。对于地面网络来说，信关站基站、馈电地基设备、地基路由器等设备可以基于容器技术虚拟化，而接入网的高层功能、核心网功能和运控系统可以基于容器技术或 / 和 VM 技术虚拟化。

5.4.4 边缘计算

随着新业务的不断涌现，卫星网络仅作为远程地面数据中心的中继，无法继续提供高效的数据处理响应。因此，星地融合通信网络需要考虑边缘计算功能，在星地之间柔性分割边缘计算功能，把全局性、复杂度高、时延要求不高的业务放在地基网

络平台上处理，把实时性要求高、计算复杂度不高的业务放在天基平台上处理，通过在轨计算服务，降低时延并实现高效的业务分发。例如，利用卫星预先数据缓存、卫星广播 / 组播功能可以大大减少星地融合通信网络的前向链路上的流量；将部分天基数据（如地球图像和天气观测）的处理转移到卫星上，可以大大地降低需要回传的天基数据，节省馈电链路的带宽；在星上处理延迟敏感和计算密集型应用，可以提供更好的用户体验。

为了在卫星上部署边缘计算平台，需把轻量级云原生容器技术引入到边缘计算架构中来。k3s 是专为物联网及边缘计算设计，并经云原生计算基金会（CNCF）一致性认证的 Kubernetes 发行版，将 Kubernetes 的优势扩展至边缘计算领域，使边缘

计算变得云原生、智能化和可扩展。边缘计算平台（MEP）以及边缘应用（APP）都将以微服务的形式构建并部署在容器中，方便应用的开发、发布、部署和移植。容器管理编排平台会获取节点资源的当前状态和服务部署情况，在网络边缘按需部署和复制其服务，实现边缘计算平台的弹性服务。此外，采用基于 OpenFlow 协议的软件定义网络（SDN）控制器架构实现网络的集中控制，提供灵活的边缘网络动态构建能力。

5.4.5 广播和组播技术

星地融合通信，由于面向全球立体覆盖，广播和组播技术将具有较大的优势，能提供广域的信息内容服务、公共安全和应急任务、集团客户的群组通信等，如图 4 所示。

对于星地融合通信系统，广播业务的一个关键问题是如何在不同卫星和不同小区中保持业务服务的连续性，以提高系统资源的效率和用户的服务体验。最优广播方案是使用单一频点提供广播服务，以便空闲态终端和连接态终端都可以接收到广播业

务，降低网络的开销。终端事先从应用层获取广播业务配置，然后从实时广播消息中获取频率资源和承载配置，再检测广播特定的控制调度信息，最后完成广播信息的接收。星地融合通信网络可基于广播区域要求，通知特定的卫星或波束，发送广播信息给所需要的终端。同时，终端可以对信息内容进行反馈，提高传输的可靠性。

对于组播业务，主要的技术难点在于如何实现高效的组播管理和组播路由。网络需要对用户分组并建立组会话，实现组内用户的相互通信。当同一组播组的用户在同一波位内时，只需要在无线空口传输一份信息，可大大节省资源开销；当同一组播组的用户在同一卫星下的不同波位时，需要在不同波位上分别发送组播信息；当同一组播组的用户在不同卫星下时，需要在相关卫星的相应波位上分别发送组播信息，并需要网络支持组播路由。对于 LEO/MEO 卫星通信网络来说，同一组播组的用户通常处在不同卫星下，并频繁地发生星间切换，由此需要高效的组播管理机制和组播路由协议。

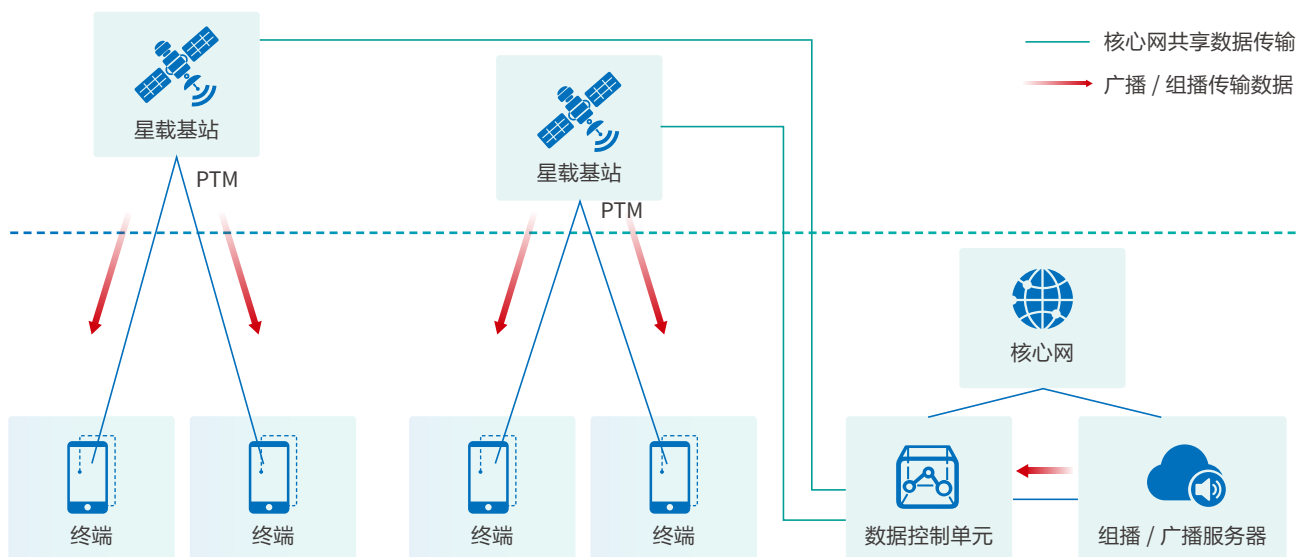


图4-卫星广播组播网络示意图

5.4.6 安全

与地面移动通信网络相比，星地融合通信网络的覆盖范围更广且不受地理环境的限制，受到攻击的点也更多，主要存在于星间链路、星地链路、卫星、信关站、核心网和运控中心中，攻击手段包括非法接入、窃听、信息篡改、重放攻击、流量分析、无线入侵、病毒感染、木马渗透、后门注入等。

在星地融合通信系统中，核心网和运控系统部

署在地面，用户链路、星间链路和馈电链路都是无线链路，用户链路承载用户业务流和控制信令，星间链路和馈电链路承载用户业务流、控制信令、管理流、遥感数据、导航增强信息和 IP 测控流。星地融合通信系统应重点保护这三段无线链路及其上的各种数据流，提供接入安全、星间安全和馈电安全能力，如图 5 所示。

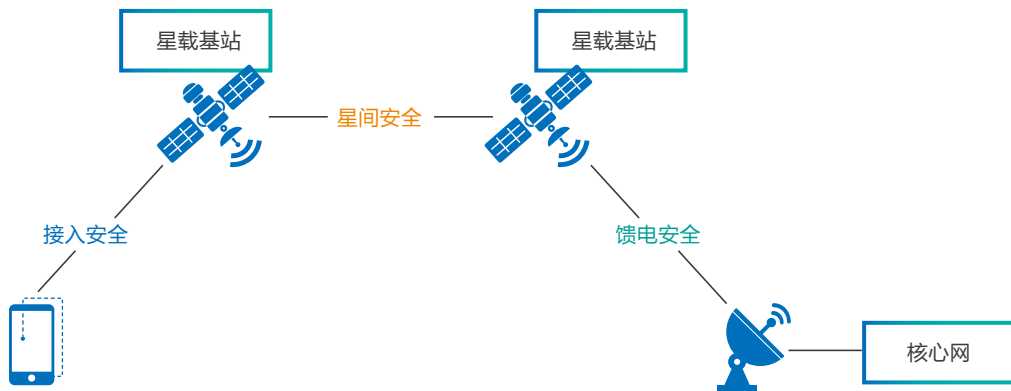


图5- 星地融合安全场景

在星地融合通信系统中，由终端、基站、核心网构成的子系统可沿用地面移动通信系统的安全架构与机制。终端到星载基站的接入层（AS）安全和终端到核心网的非接入层（NAS）安全，如终端与网络间的双向认证、信令和用户数据的保密性和完整性保护等，均可以采用地面移动通信系统的网络接入安全机制。星载基站到核心网、核心网内部网元之间，以及不同核心网之间的安全防护，可以沿用地面移动通信系统的网络域安全机制。

在星地融合通信系统中，星间安全应包括双向认证、控制消息（包括星间激光链路控制消息、空间路由器间控制消息）的保密性和完整性保护。馈电安全应包括双向认证、控制消息（包括馈电链路控制消息、空间路由器和地基路由器间的控制消息）的保密性和完整性保护，可以基于地面移动通信系

统的网络接入安全机制适应性修改来实现。星间链路和馈电链路上承载的其它数据流的总速率很高，应避免“链路层加解密”（即“逐段链路加解密”），可以采用网络层或应用层安全机制，以降低安全功能对星上资源的消耗。

此外，星地融合通信系统的运控系统可沿用传统运控系统的安全架构和安全机制。

5.4.7 路由

在星地融合通信网络中，承载网承载用户业务流、控制信令、管理消息、遥感数据、导航增强信息、测控数据与指令等。

从路由角度上讲，空间路由器和地基路由器组成一个路由域，运行空间与空地路由协议；地面其它 IP 网络构成传统的 IP 路由域，运行传统的路由协议。

地基路由器应作为这两个路由域之间的网关，在包处理和路由协议上对这两个路由域作隔离，确保二者在路由上的相对独立，从而降低空间与空地路由协议的复杂度和软硬件资源的开销。此外，地基路由器还可以实现不同馈电之间的负载均衡^{[17][18]}。

对于空间路由器来说，需要在功耗、重量和可用硬件的约束下实现 100Gbps 及以上的吞吐量，为此，建议数据面采用包交换的方式和结构化的编址方法，并基于简单映射算法，根据航天器信息计算载荷各层地址，以简化地址映射和地址解析，并降低转发表的规模。

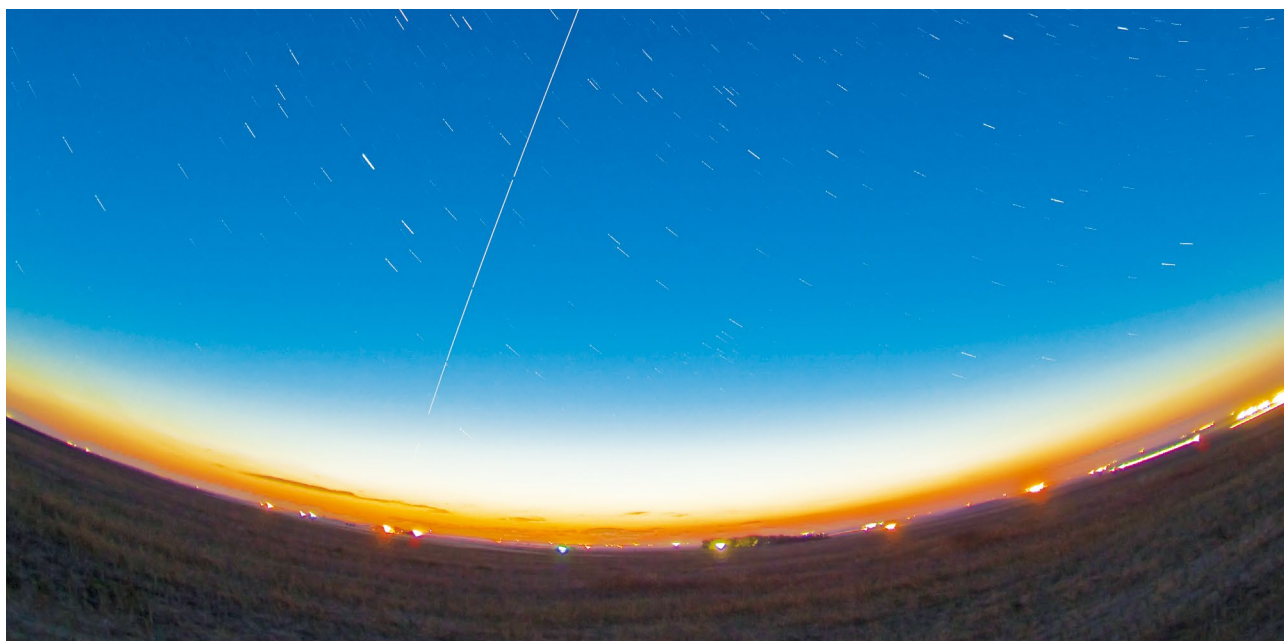
空间与空地路由协议可以基于距离矢量算法，但对于拥有数千至上万颗卫星的巨型 LEO 星座来说，网络拓扑变化的时间间隔会小于全局路由收敛的时间。因此，空间与空地路由协议及包转发，均需要基于局部自治策略。空间与空地路由协议应支持链路的预丢失处理，在链路中断前引导切换业务流量，避免后续发生的中断对业务流的影响。对于不可预测的链路中断，空间与空地路由协议提供中断快速处理功能。空间与空地路由协议应支持逐跳转发方

式，以提供基本的连通性；也应支持“类标签交换”方式，便于数据面路径规划的实现，为数据流指定空间段出口；还需要支持负载均衡和流量控制功能，以保证承载网的服务质量。

在星地融合通信网络中，为了保证上述空间与空地路由协议以及包处理方式的正常工作，还需要一定的机制来处理各种流的路径变化问题，主要包括以下两个方面：

对于“终端 - 基站 - 核心网”相关的业务流和控制流，在根据监管要求选择核心网时，自动地确定了地基路由器。在发生切换（主要是馈电链路切换和核心网间切换）或漫游时，通过切换消息流程完成核心网重选 / 切换，并自动完成地基路由器的重选。

对于“卫星 - 地面段”之间的网络管理流、网络控制流、测控流、遥感数据流、导航增强信息流，可以事先设置默认和备用的地面段目的地，或基于 Multi-homing 机制，规划好地基路由器选择与切换策略，通过专用的消息来完成地基路由器和路径的变更。



5.5 星地频谱共享及干扰规避

随着用户和业务的增长，频率资源，特别是用于卫星通信的频率资源变得越发匮乏。星地融合通信网络需要突破传统的频率硬性分割模式，利用空间隔离、时间隔离、空分复用和精细化频谱管理实现星地频谱共享与频率复用。

在星地融合通信中，对于高频段，卫星和终端都采用高增益定向天线，空间隔离、时间隔离和空分复用相对容易实现。对于低频段，特别是手机直连卫星的场景，由于终端采用全向天线或低增益天线，频率复用变得更为复杂，集总干扰问题也十分突出，需要从整个星座的角度（而非单颗卫星的角度）来综合考虑，把多频复用方案、卫星天线模式、旁瓣抑制技术、终端功率控制技术等结合起来。

在星地融合通信中，NGSO 卫星系统不能干扰

GEO 卫星系统。对于两者共享的频段，应对 NGSO 卫星系统施加功率通量密度（PFD）限制，对于某些频段而言也可能还需要施加等效功率通量密度（EPFD）限制。因 PFD 设计相对简单，可以以 PFD 约束为条件，根据轨道高度、倾角和带宽来设计波束的 EIRP。EPFD 设计相对复杂，一般需要从覆盖、干扰规避角、天线旁瓣抑制水平、轨道高度、倾角和带宽等方面来综合考虑波束的 EIRP。

此外，在星地融合通信中，可以利用先进的算法和机制来协作实现星地频谱共享。例如：终端可以使用人工智能（AI），更好地区分卫星通信信号和地面通信信号；利用空间多层网络中波束和覆盖的差异性，实现星地通信的软频率复用；通过引入机器学习预测频率态势，制定星地动态频率共享策略。

5.6 实现优化技术

由于卫星的空间环境、功耗、重量等方面的限制，要实现星地融合通信的规模应用，特别是手机直连卫星的规模应用，还需要优化或突破一些实现技术，主要包括下述一些方面：

首先，提升手机 EIRP 的技术。在手机直连卫星的通信场景中，手机的 EIRP 是制约星载天线和整个星座设计的一个关键因素。由于终端的尺寸和储能有限，可以通过以下技术改进或突破来提高终端在卫星通信频段上的 EIRP：为卫星通信选取适当的频率和上下行频率间隔，针对卫星通信频段设计专用的天线，以获得更高的增益；基于新型材料设计具有指向调整能力的手机天线，以降低指向损耗；设计更高效率的功放模组，在卫星通信频段上输出更高功率。

其次，星载相控阵天线技术。目前相控阵天线

的功耗和尺寸比较大，给卫星设计带来极大的挑战，亟需有技术上的突破。多波束相控阵有两个重要的发展方向：其一为基于低位宽模数转换器 / 数模转换器（ADC/DAC）的数字多波束相控阵，其二为基于新材料的多波束相控阵。在组阵方面，可采用稀疏阵技术来降低功耗，需要突破折叠式大型相控阵的组阵技术和在轨校准技术；在射频器件方面，需要基于合适的材料，设计可用于星载天线的 S/C 频段高效的功率放大器。

最后，充分利用地面设备的辅助信息以降低卫星侧的复杂度。例如，对于波束调度来说，可以基于终端上报的辅助信息预测用户运动轨迹，由地面控制中心完成复杂的计算后，把波束管理辅助信息上注到卫星，以降低卫星侧计算复杂度。

06

标准和技术验证推进

PROMOTION OF STANDARDIZATION AND TECHNICAL VALIDATION

2022年6月，国际标准化组织3GPP在5G R17版本完成了第一个关于低频段、透明转发模式的NTN标准版本。针对目前的R18阶段，网络侧正在推进核心网元用户面功能（UPF）的天基部署，无线接入网侧正在推进手机直连卫星所需的链路传输增强。面向未来的R19版本，预期3GPP会进一步考虑星上处理模式、跳波束技术增强技术等方面的标准化工作，从而使得星地融合通信能够支撑多样化的组网模式，并在2030年实现6G的星地融合网络能力。

与此同时，星地融合通信的技术验证和组网通信，大致分为三个阶段：

2023–2025年，可以基于5G R17版本的NTN进行手机直连卫星的技术验证和商业组网；

2025–2030年，依据卫星能力的扩展，基于5G NTN后期版本开展手机直连卫星的技术验证和商业组网；

2030年之后，实现基于6G星地融合的组网技术验证和商业组网应用。



总结与展望

SUMMARY AND OUTLOOK

本白皮书分析了星地融合通信系统，特别是手机直连卫星场景，探讨了星地融合通信的应用场景、网络能力需求和面临的挑战，凝练出融合网络架构以及关键技术。我们认为：星地融合通信是地面移动通信和卫星通信发展的必然趋势；从 5G NTN 到 6G，星地融合通信将完成从“卫星通信和地面移动通信的标准体制兼容”到“卫星通信和地面移动通信的系统全面融合”的演进，并将成为 6G 区别于以往地面移动通信系统的最重要特征；同时，为了实现星地融合通信，不仅需要无线空口、网络和移动性管理等方面的技术

优化与改进，更需要星载相控阵天线、空间路由等方面的技术突破。

中国信科积极参与我国卫星互联网新基建，从事关键技术研究、国际国内标准推进、设备研发与技术验证等工作。作为星地融合通信领域的积极参与者和推动者，我们希望以上分享能够为星地融合通信后续的技术研究与验证、标准与产业推进提供有益的参考。面向未来，中国信科将一如既往地 对星地融合通信系统进行积极探索，并与业内伙伴共同加快推进星地融合通信发展，为星地融合通信创新发展贡献力量。

缩略语

| 英文缩写 | 英文全称 | 中文全称 |
|------------|--|--------------------|
| 3GPP | 3 rd Generation Partnership Project | 第三代伙伴计划 |
| 5GC | 5G Core network | 5G 核心网 |
| 6GC | 6G Core network | 6G 核心网 |
| AI | Artificial Intelligence | 人工智能 |
| AS | Access Stratum | 接入层 |
| ADC | Analog-to-Digital Converter | 模数转换器 |
| CNCF | Cloud Native Computing Foundation | 云原生计算基金会 |
| CP-OFDM | Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplexing | 循环前缀 - 正交频分复用 |
| DAC | Digital-to-Analog Converter | 数模转换器 |
| DFT-s-OFDM | Discrete Fourier Transform-Spread-Orthogonal Frequency Division Multiplexing | 离散傅里叶变换 - 扩频正交频分复用 |
| EIRP | Equivalent Isotropically Radiated Power | 等效全向辐射功率 |
| EPFD | Equivalent Power Flux Density | 等效功率通量密度 |
| ESIM | Earth Station In Motion | 动中通地球站 |
| FDD | Frequency Division Duplex | 频分双工 |
| GEO | Geostationary Earth Orbit | 地球静止轨道 |
| GMR | Geostationary Earth Orbit Mobile Radio Interface | 地球静止轨道移动无线接口 |
| GNSS | Global Navigation Satellite System | 全球导航卫星系统 |
| G/T | Gain-to-noise Temperature ratio | 增益噪声温度比, 品质因数 |
| HARQ | Hybrid Automatic Repeat reQuest | 混合自动重传请求 |
| NAS | Non Access Stratum | 非接入层 |
| NGSO | Non GeoStationary Orbiting | 非对地静止轨道 |
| HR | Home Routed | 归属地路由 |
| IP | Internet Protocol | 互联网协议 |
| ITSC | Integrated Terrestrial-Satellite Communication | 星地融合 |

| 英文缩写 | 英文全称 | 中文全称 |
|--------|--|------------|
| IMS | IP Multimedia Subsystem | IP 多媒体子系统 |
| LBO | Local Break Out | 本地分流 |
| LEO | Low Earth Orbit | 低地球轨道 |
| MEO | Medium Earth Orbit | 中地球轨道 |
| MEP | Mobile Edge Computing Platform | 移动边缘计算平台 |
| MIMO | Multiple Input Multiple Output | 多输入多输出 |
| MOCN | Multi-Operator Core Network | 多运营商核心网 |
| NR | New Radio | 新空口 |
| NTN | Non Terrestrial Network | 非地面网络 |
| OBP | On-Board Processing | 星上处理 |
| QoS | Quality of Service | 服务质量 |
| PAPR | Peak to Average Power Ratio | 峰均比 |
| PFD | Power Flux Density | 功率通量密度 |
| SDN | Software Defined Network | 软件定义网络 |
| S-UMTS | Satellite Universal Mobile Telecommunications System | 卫星通用移动通信系统 |
| TA | Tracking Area | 跟踪区 |
| TDD | Time Division Duplex | 时分双工 |
| TN | Terrestrial Network | 地面网络 |
| TP | Transparent | 透明转发 |
| UPF | User Plane Function | 用户面功能 |
| VM | Virtual Machine | 虚拟机 |
| VNF | Virtual Network Function | 虚拟网络功能 |
| VSAT | Very Small Aperture Terminal | 甚小孔径终端 |

参考文献

- [1] 全域覆盖、万物智联, 中国信科 6G 白皮书, 2021, 参见: <https://www.cictmobile.com/about/down.html>.
- [2] Chen S Z, Liang Y C, Sun S H, et al. "Vision, requirements, and technology trend of 6G: how to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed", IEEE Wireless Communications, 2020, 27(02): 218-228.
- [3] Chen S Z, Sun S H, Kang S L. "System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G", IEEE China Communications, 2020, 17(12): 156-171.
- [4] 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):13.
- [5] 康绍莉, 缪德山, 索士强等. 面向 6G 的空天地一体化系统设计和关键技术 [J]. 信息通信技术与政策, 2022(009):18-26.
- [6] 3GPP TR38.811 v15.4.0: "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)".
- [7] 3GPP TR38.821 v16.2.0: "Solutions for NR to support non-terrestrial networks (NTN) (Release 16)".
- [8] 3GPP TS 23.501 v17.4.0: "System architecture for the 5G System (5GS) (Release 17)".
- [9] 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):11.
- [10] 徐晖, 缪德山, 康绍莉等. 面向天地融合卫星网络架构和传输关键技术 [J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2):9.
- [11] Miao D S, Han B, Kang S L, et al. "Key Technologies and Potential Challenges of Mobile Phone directly Connecting to the Satellite Network", 9th Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications, SPIE, Nov.2022.
- [12] 侯利明, 韩波, 缪德山, 康绍莉, 孙韶辉. 基于 5G 及演进的星地融合空口传输技术 [J], 信息通信技术与政策, 2021(9):9.
- [13] Shi T, Sun S H, Kang S L. "A Practical User Selection in the Satellite System", 9th Symposium on Novel Photoelectronic Detection Technology and Applications, SPIE, Nov.2022.
- [14] Sun S H, Hou L M, Miao D S, "Beam Switching Solutions for Beam-Hopping Based LEO System", IEEE VTC Workshop, Aug. 2021.
- [15] R1-2206386, "Discussion on coverage enhance for NR NTN", CATT, 3GPP RAN1#110, 2022-8.
- [16] 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(038-003).
- [17] Hou L M, Kang S L, Sun S H, et al. "A load balancing routing method based on real time traffic in LEO satellite constellation space networks", 2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference:(VTC2022-Spring), June.2022, pp. 1-5.
- [18] 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.



中国信科



中信科移动

中信科移动通信技术股份有限公司
CICT Mobile Communication Technology Co., Ltd.

网址: <http://www.cictmobile.com/>