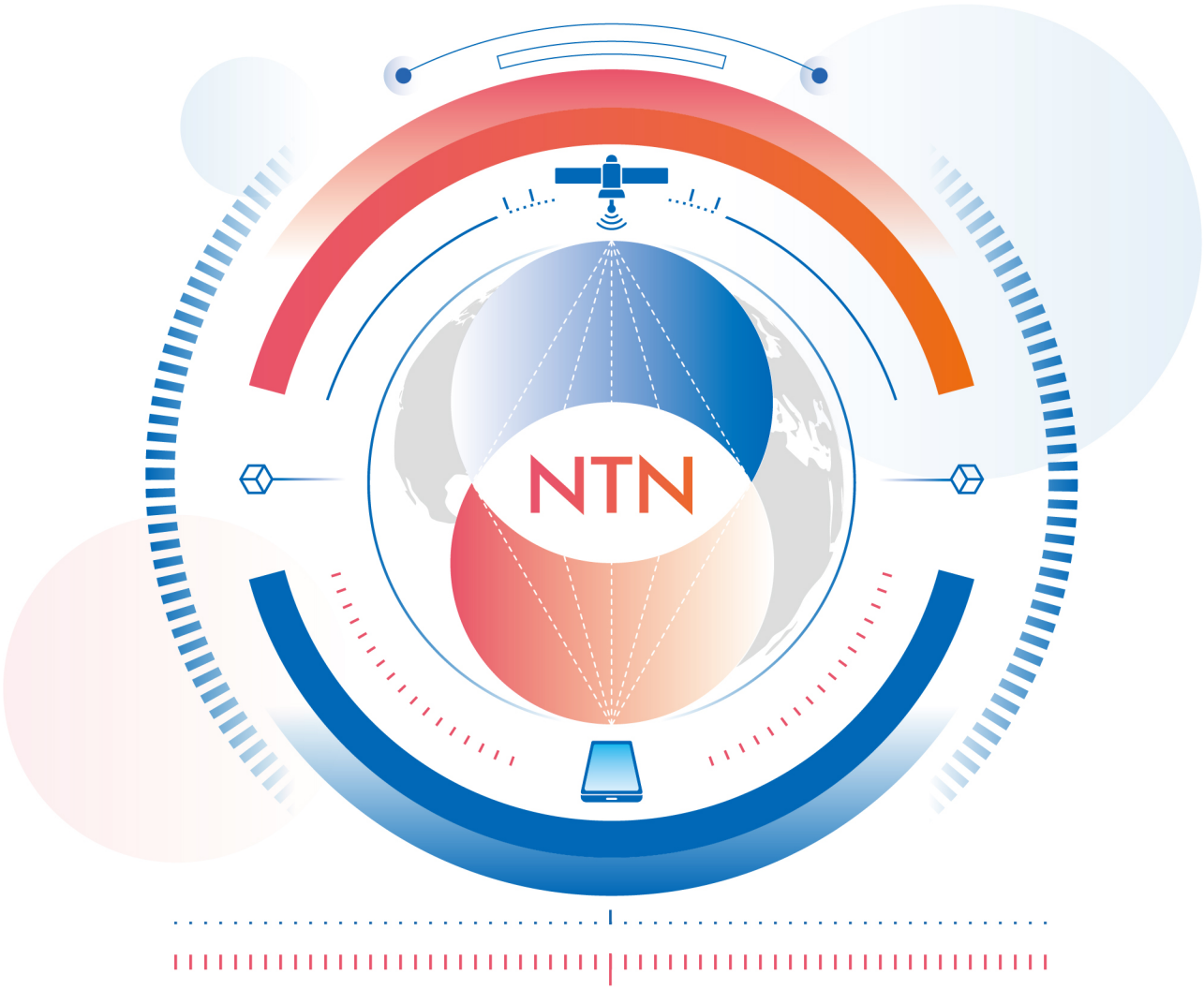
中国信科 中信科移动 CICT Mobile

星地融合通信技术(V2.0)

INTEGRATED SATELLITE-TERRESTRIAL COMMUNICATION TECHNOLOGY

基于NTN技术的宽带手机直连卫星



中信科移动通信技术股份有限公司

无线移动通信全国重点实验室(中国信科)

星地融合通信技术白皮书（V2.0）

—— 基于 NTN 技术的宽带手机直连卫星 ——

本技术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”)和无线移动通信全国重点实验室所有，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技术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。

引 言

手机直连卫星通信的核心目标是消除地面移动通信网络覆盖盲区，共同构建全球无缝覆盖与立体覆盖的通信网络。从技术体制来看，手机直连卫星主要存在现有卫星通信体制、现有地面移动通信体制和 3GPP NTN 体制共三种技术路线，其中 3GPP NTN 被业界公认为将是主流技术路线。技术标准上，3GPP 自 Release 17 完成首个透明转发 5G NTN 技术标准，Release 18-19 持续进行面向手机直连卫星的 5G NTN 技术增强，在 Release 20 同时开展 5G NTN 增强和 6G NTN 研究。产业上，越来越多的地面运营商和地面通信厂商都参与到 NTN 大潮中，越来越多的通信卫星运营商宣布支持 NTN 或即将发射新的卫星支持 NTN，手机直连卫星与 3GPP NTN 的相向而行使手机直连卫星的内涵更加明确和接近未来。

中国信科在 2018 年就提出“5G 体制兼容、6G 系统融合”的卫星互联网技术发展路线。5G 体制兼容是指卫星通信采用 5G 技术和标准，对卫星通信信道环境和低轨卫星高速运动进行优化，发挥 5G 技术和产业规模优势。6G 系统融合是指将卫星通信和地面移动通信从一开始设计时就作为一个有机整体进行统一设计。目前，“5G 体制兼容、6G 系统融合”技术发展路线已得到业界高度认可，星地融合正加速从学术愿景转化为全球标准和产业行动。

中信科移动联合无线移动通信全国重点实验室继 2023 年发布《星地融合通信白皮书》以来，持续开展 NTN 技术标准和产业推进工作。本技术白皮书作为 V2.0 版本，重点分析基于 NTN 的宽带手机直连卫星技术标准与产业发展，包括发展历程、技术路线、关键技术、标准发展、产业发展等，为我国建设与 5G NTN 手机直连卫星系统相关的工程和实践提供参考，并为 6G 星地融合全球发展凝聚共识，探索路径。

目 录

引 言 I

一、 手机直连卫星发展历程 1

二、 手机直连卫星的技术路线 2

三、 基于 NTN 的手机直连卫星关键技术 5

3.1 5G NTN 手机直连卫星关键技术 5

3.2 6G NTN 手机直连卫星关键技术 7

3.3 手机直连卫星的工程实践技术 12

四、 基于 NTN 的手机直连卫星标准发展 16

4.1 3GPP 16

4.2 ITU 18

4.3 CCSA 21

五、 手机直连卫星的产业发展 22

5.1 全球频率资源配置与监管政策 22

5.2 全球 NTN 产业进展 25

5.3 NTN 应用拓展 28

六、 中国信科的相关技术与产业布局 29

6.1 技术突破，标准引领 29

6.2 面向星地融合，布局 5G NTN 产业链核心环节 30

七、 我国手机直连卫星面临的挑战及相关建议 31

7.1 面临的挑战分析 31

7.2 对技术产业的发展建议 32
八、 未来展望 34
缩略语 36
参考文献 39

一、 手机直连卫星发展历程

手机直连卫星通信是指消费者的普通智能手机不需要依赖地面基站或专用卫星终端（即“星猫”），直接与卫星连接实现语音、短信或数据通信的移动通信技术[1]。其核心目标是消除通信盲区（如海洋、沙漠、偏远山区、空中），构建全球无缝覆盖的星地融合网络。

手机直连卫星并非近年突然兴起的颠覆性技术，而是经过长期技术积累、标准迭代与产业升级逐步成熟的通信技术。纵观其发展脉络，可分为专用卫星终端探索期、消费级窄带商用落地期与低轨宽带试验攻坚期三个核心阶段，整体呈现出**从特种专业通信向民用大众通信**、**从窄带应急服务向宽带全域融合通信**的清晰演进趋势，逐步实现星地通信从相互割裂到深度融合的跨越式发展。

1990~2016 年为**专用卫星终端探索期**，是手机直连卫星技术的原始积累阶段。上世纪 90 年代，铱星、全球星、海事卫星等传统卫星通信系统陆续建成，初步实现手持终端与卫星的直接通信，打破了地面基站的通信局限。但该阶段仅支持专用卫星终端通信，终端设备体积大、功耗高、资费昂贵且通用性差，难以适配普通智能手机，主要应用于极地科考、远洋航行、野外应急等小众专业场景，未面向大众普及。此时期卫星通信与地面移动通信体系相互独立、技术割裂，尚无民用手机直连卫星的实现条件。在此基础上，我国提前布局天通一号高轨移动通信卫星系统，结合后续商业航天技术，为后续星地融合技术研发、国产手机卫星通信功能的落地提供了可行方案。

2017~2024 年为**消费级窄带商用落地期**，实现手机直连的技术标准成型与民用窄带通信规模化落地。2017 年起，3GPP 逐步启动非地面网络（NTN）技术研究，R17 正式发布首个透明转发 NTN 标准，自 R18 面向手机直连卫星持续增强，形成了星地体制兼容的卫星通信标准，开启了手机直连通信的新阶段。与此同时，商业航天发射成本持续下降，低轨星座建设热潮兴起，芯片厂商研发出小型化卫星射频芯片解决硬件适配难题，卫星厂商研发星载相控阵天线提升链路余量。在此基础上，业界开始基于存量卫星或者基于存量手机率先开始技术试验，推动产业快速落地，2022 年华为、苹果相继在旗舰机型搭载卫星短报

文功能，2023 年天通一号实现消费级手机双向卫星通话商用，标志着该技术正式迈入民用规模化阶段。此外，AST SpaceMobile、SpaceX 等推出存量手机直连卫星，其中 SpaceX 快速发展用户已高达 1200 万；Skylo、铱星、SatelioT、天通一号等也纷纷开展 IoT NTN 技术试验。

自 2025 年开始为**低轨宽带试验攻坚期**，技术面向 5G NTN 增强和 6G 全域通信持续迭代升级。全球越来越多的卫星星座，如我国 GW 与 G60 以及国外 Starlink、Amazon、Omnispace、EQUATYS 等，表示未来将支持 5G NTN 体制，并纷纷开展 NTN 体制的手机直连卫星技术试验。Starlink 向 Echostar 进行频谱收购，既打破传统卫星通信的竞争格局，也提前开启 6G 星地融合时代[2]。目前低轨宽带手机直连技术仍处于试验验证阶段，尚未实现大规模商用，但作为 6G 天地一体化泛在通信的核心支撑，将持续完善星地融合体系，最终构建陆海空全域无死角的新一代通信网络。

二、 手机直连卫星的技术路线

针对大众消费级手机，其手机直连卫星具有三种典型的技术路线[3]，如图 1 所示。

图 1　手机直连卫星的三种技术路线

技术路线一基于**现有卫星通信体制（又称定制手机体制）**，被业界俗称为“新手机、旧卫星”，其特点是手机双模。基于该技术路线，我国已经发展了天通一号移动卫星通信系统和北斗短报文等手机直连卫星通信系统，主要提供短信、语音等业务。

技术路线二基于**现有地面移动通信体制（又称存量手机体制）**，被业界俗称为“旧手机、新卫星“，其特点是星载天线阵面大。基于该技术路线，美国 AST SM、SpaceX 在联合地面运营商积极推进，其中 SpaceX 已发射卫星 600 余颗，联合 T-Mobile 于 2025 年 10 月正式商用，支持文本、语音和数据传输。

技术路线三基于 **3GPP NTN 体制**，被业界俗称为“新手机、新卫星”，其特点是手机成本基本没变化、系统优、综合成本低。3GPP NTN 的技术讨论中，目前存在两种技术分支，第一种是卫星的时频变化全部由终端补偿，第二种是终端补偿部分时频偏移、基站补偿公共部分的时频偏移。可以说，第一种是基础的 NTN 解决方案，而第二种则是借用了存量手机体制的技术实现思路，网络侧补偿了部分时频偏移的变化，降低了终端的复杂度，但也对网络侧提高了要求。

和其他技术路线相比，基于 3GPP NTN 的手机直连卫星在技术、产业、组网等方面均具有明显优势，具体分析见表 1。

优势类别	优势说明
技术优势	• 同时支撑手机和卫星网络的技术优化 • 在网络容量和用户体验等方面性能更优 • 支持向 6G 星地融合统一系统的平滑演进
产业优势	• 5G NTN 相对于 5G 只是少量改动，可以充分利用 5G 的产业基础 • 集成 5G NTN 功能的芯片和仅支持 5G 功能的芯片在面积、功耗方面差异小，成本差异可控，且随规模应用逐渐趋于一致

优势类别	优势说明
	• 星载相控阵天线等技术可充分借鉴地面移动通信的多天线技术
组网优势	• 5G NTN 功能灵活，可支撑卫星大规模星座组网 • 适应于各种组网模式，用户业务的连续性服务有保障 • 对于再生卫星组网，支持 UPF 在轨部署，支持星载边缘计算，可高效构建空间基础信息网络 • 易与地面网络互补融合

表 1　基于 3GPP NTN 的手机直连卫星的优势分析

按业界预期，3GPP NTN 手机直连卫星技术路线将成为发展主流，从解决方案看，主要有高轨卫星的手机直连、低轨透明转发卫星的手机直连、以及低轨星上处理卫星的手机直连，如图 2 所示。

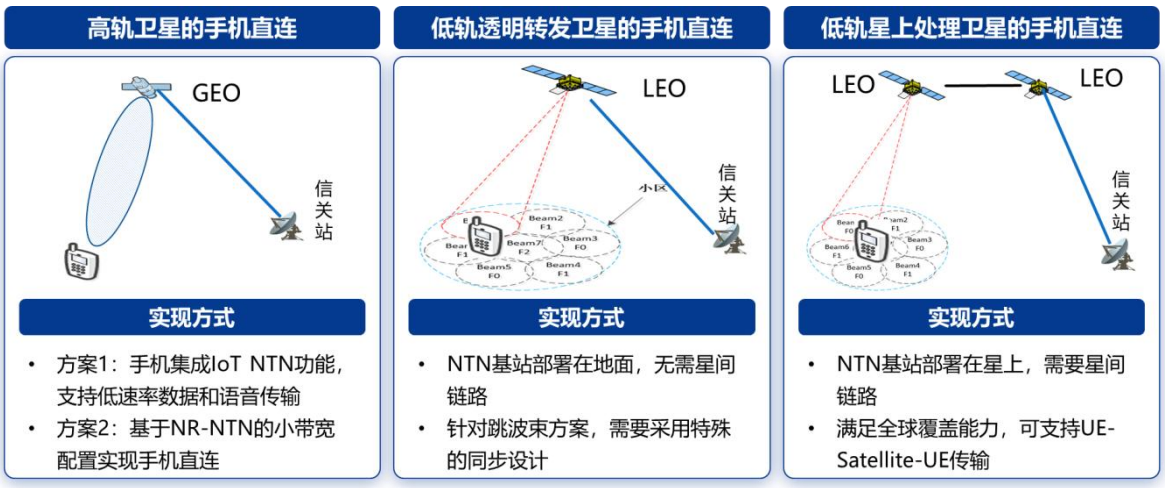


图 2　5G NTN 手机直连卫星解决方案

其中，高轨方案以窄带应急通信为主；低轨透明转发方案仅完成信号中继，星上不做基带处理，带宽与资源调度受信关站限制，难以支撑大规模宽带业务；**低轨星上处理方案将基带、交换、路由能力搬至星上，可实现星上资源调度、星间链路数据转发，降低对信关站的依赖，能够支撑手机直连从窄带短消息向宽带连续业务演进，是 NTN 手机直连承载宽带业务的核心优选路线。**

国内外运营商、系统厂商和终端芯片厂家均在积极开展 NTN 宽带业务测试。例如，中国信科、中国移动等自 2023 年积极开展基于再生处理模式的 NR NTN 技术验证；中国星网、上海垣信等均发射了支持宽带 NTN 的技术试验卫星；Starlink 于 MWC 2026 上表示未来将采用 NR NTN 标准。预期 2027 年后，手机将大比例支持宽带 NTN。

三、 基于 NTN 的手机直连卫星关键技术

基于国际标准组织 3GPP 对 NTN 的研究，本章先回顾适用于手机直连卫星的 5G NTN 关键技术，然后展望适用于手机直连卫星的 6G NTN 关键技术，最后从实现角度探讨手机直连卫星的工程实践技术。

3.1 5G NTN 手机直连卫星关键技术

5G NTN 在技术体制上与地面 5G 兼容，具备扩大 5G 生态增长经济边际、充分利用地面移动通信的人才技术产业、通过业务创新提升卫星网络效率等系列优势。和地面 5G 相比，针对星地大多普勒、大时延、大路损、高动态等特征，5G NTN 引入了时频同步、时序管理、混合自动重传请求（Hybrid Automatic Repeat reQuest, HARQ）机制、移动性管理、QoS 机制等基本特性。针对手机直连卫星，5G NTN 进一步引入的新特性主要包括跳波束、覆盖增强、容量增强、基于 MBS 的广播、星上处理模式、终端-卫星-终端等[4]。

跳波束：卫星在逐步使用更小的波位划分以提升单位面积的信号功率，通常单颗卫星支持的波位数达到成百上千个。然而，受限于发射功率，卫星支持的波束数目相对有限，意味着每个波束需要在其所管辖的多个波位中按照时分的方式来进行跳变。跳波束技术需要设计合理的跳变图样，以保证每个波位都能被服务到并兼顾波位的容量需求，以及降低

同频波束的干扰。

覆盖增强：面对卫星到手机（即下行用户链路）或手机到卫星（即上行用户链路）的链路预算不足，需要从系统和链路层面去考虑覆盖增强。系统级增强技术主要有控制和业务分离，即采用控制波束来完成用户的同步和接入过程、采用业务波束来完成用户的数据传输。为了合理利用功率，控制波束可以设置成宽波束来形成更广区域的覆盖，业务波束设置成窄波束来为用户按需服务。链路级增强技术从兼容性 5G 考虑主要采用冗余传输的方式，理论上，每增加一倍重传次数能获得 3dB 的链路增益。

容量增强：和地面移动通信的小区覆盖范围相比，卫星通信的单个波束（对应单个小区）覆盖范围远远要大，意味着手机直连卫星业务爆发增长后，卫星通信将面临容量不足问题，因此需要进行容量增强。针对相同的时频资源，常用的扩容手段有正交扩频或者非正交多址接入。考虑到实现的简化以及性能不受影响，目前标准中主要探讨了用低倍数的正交覆盖码（Orthogonal Covering Code, OCC）来实现，并考虑了时隙内 OCC、时隙间 OCC、符号内 OCC、符号间 OCC 等多种方案。

基于 MBS 的广播：NTN 与组播广播服务（Multicast-Broadcast Services, MBS）功能结合，能够实现从传统点对点通信向点对多点广播的扩展，将广泛应用于应急通信（如灾害预警广播）、偏远地区公共信息广播服务、物联网数据分发及公共安全服务。例如，5G NR MBS 可复用现有蜂窝网元，终端无需硬件改造即可接收广播信号，实现“泛终端化“覆盖。针对 NTN 覆盖区域大、MBS 服务区域可能比 NTN 小区小的问题，标准支持了只在特定区域（小于 1 个小区）广播、以及业务连续性等问题。

星上处理模式：3GPP 在 R17、R18 阶段的 5G NTN 标准仅支持卫星透明转发模式，即卫星仅进行无线电信号处理，不处理数据。随着卫星技术的进步，以低轨巨型星座为代表的新一代卫星通信系统均采用星上处理和星间链路技术，即星上处理模式更易于支持大规模星座组网。自 R19 开始，3GPP 针对 NR NTN 支持再生处理模式，并优先完成了完整基站（full gNB）上星模式。对于 CU-DU 分离、UPF 上星等更多的灵活网络架构再生处理模式，将在后续版本中持续推进。

终端-卫星-终端：两台远端用户终端经由同一颗卫星中继实现端到端通信，无需经过地面信关站与核心网转发，属于星上再生处理架构下的直通通信方案。该特性主要面向地面网络损毁、海洋荒漠无基站覆盖等应急通信场景，可以降低业务传输时延，减少对地回程链路的带宽消耗。技术实现层面，卫星需要具备星上交换与信号处理能力，同时终端需要补偿低轨卫星高速运动带来的多普勒频偏与超长传播时延。

3.2 6G NTN 手机直连卫星关键技术

和 5G 相比，6G 将实现全域覆盖，支持任何人和任何物及智能体在任何时间、任何地点及（物理与虚拟）空间通过地面移动通信或卫星移动通信按需接入，并在两者之间无感知的切换与漫游，实现人机物的场景智联[2,3]。ITU 为 6G 定义了沉浸式通信、超大规模连接、超高可靠低时延通信、通信与感知融合、通信与 AI 融合、泛在连接共六大典型场景。其中泛在连接旨在通过增强的连接能力，解决目前未覆盖或覆盖稀少区域或室内的连接问题，弥补数字鸿沟并改善用户体验，或者通过提供一种泛在定位能力以增强定位服务的韧性、准确性和可用性，满足增强型服务对位置、授时的需求。

从 5G NTN 到 6G 将打破星地产业链壁垒，使卫星通信共享地面移动通信的万亿级产业生态，从根本上破解成本与普及困局。6G NTN 将是“系统层面的重构”——首次从标准起点即为星地融合通信进行“统一设计”。在应用场景维度，6G NTN 将构建三大服务集群：泛在连接确保“任何时间、地点、终端”可及；卫星定位使网络从“通信管道”升级为“通感融合”；融合智能推动网络从“连接中心”向“通智融合”演进。在关键技术维度，6G 满足 NTN 和 TN 统一统计的前提下，针对 6G NTN 将支持星地多层网络协同传输、无全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）的通信、卫星非视距（Non-Line of Sight, NLOS）的深度覆盖、馈电接入一体化设计、星地频谱共享、通导融合定位、通信与 AI 融合、通信与算力融合等[4,5]。尤为重要的是，“星上核心网与计算”将使卫星从“透明转发器”进化为“边缘智能节点”，重塑空间信息基础设施的功能定位。

（1）TN 和 NTN 统一的无线空口设计

由于 6G 的总体设计思路是支持 TN 和 NTN 的统一无线空口设计，因此在融合设计中

既支持 TN 和 NTN 的统一无线空口框架，又兼顾 NTN 的特殊需求。

卫星通信传统上以 FDD 为主，而地面移动通信同时支持 TDD 和 FDD 两种方式。和 FDD 相比，TDD 频谱部署更加灵活，在卫星通信中具有节省天面等突出优势。因此，TN 和 NTN 统一设计意味着 6G NTN 需要考虑支持 TDD 或者半双工 FDD（HD-FDD）方式。和 FDD 方式相比，TDD 方式无需同时收发，可简化天线及射频复杂度，但需要考虑 TDD 特定的定时关系及流程设计，并进行上下行干扰规避。

除双工方式外，NTN 无线空口设计还需要考虑：（a）帧结构设计及调度优化，如在新型帧结构中降低 TDD 模式下保护间隔的占比，对更长传输时间间隔的资源进行统一调度等；（b）无 GNSS 辅助的终端接入，即允许 UE 在仅具备有限的 GNSS 信息或者无 GNSS 信息情况下完成与卫星的接入；（c）用户及馈电链路一体化，即支持馈电链路采用与用户链路相似的系统设计；（d）深度覆盖，即支持终端在室内场景下的寻呼，从而接入卫星网络。

（2）星地多层网络协同传输

6G 网络将向星地立体多层覆盖发展，因不同层网络具有各自覆盖和传输特性，孤立的网络会导致覆盖和业务传输的割裂，不利于资源高效利用，因此，需要考虑多层子网的高效协同，提升用户体验。

星地多层网络协同传输涉及四个方面：（a）多波束传输协同，即利用单颗或多颗卫星的多个波束，基于 SU-MIMO 来提升用户峰值速率，或者基于 MU-MIMO 来提升系统容量；（b）多层网络智能接入协同，其中终端基于高轨、低轨和地面网络的信号质量，智能自适应接入最优的子网进行通信，网络侧可以广播接入参数，实现基于业务负载或 QoS 控制用户的接入；（c）多轨道传输协同，即以多连接技术为基础，终端可以选择高轨作为主小区，完成控制面的连接，低轨卫星网络作为数据面增强小区，提供更高速率的业务服务能力；（d）多维资源协同，即当单一运营商具备多层网络的部署能力时，可以动态地调整各层子网的覆盖区域、频谱带宽、业务负载，实现系统效率的最优化。

（3）无 GNSS 的通信

5G NTN 的标准中，终端的 GNSS 信息认为是基本条件。然而，在实际应用中，存在

GNSS 信息被干扰或者精度低的情况，而且持续的测量 GNSS 也会对终端带来一定的复杂度和功耗，因此业界在 5G-A NTN R20 和 6G 开始关注无 GNSS 条件下的接入。

当终端不具备 GNSS 信息时，对终端的同步、波束跟踪、调度和切换带来较大的挑战。特别对低轨卫星，对于同步保持的难度非常大。因此，需要攻克系列关键技术，具体包括：（a）基于网络辅助信息的终端接入，即网络发送波束中心点的位置参考信息，终端基于该参考点进行同步补偿，实现精准同步；（b）基于终端自主定位的接入机制，即网络发送定位参考信号给终端，终端测量定位参考信号，并获取卫星的位置信息，实现终端的自主定位；（c）物理随机接入信道（Physical Random Access CHannel, PRACH）信号增强，即当终端无 GNSS 信息时，PRACH 信号检测需要克服时延和频偏两大挑战，采用新型 PRACH 设计可解决这两个问题。

（4）卫星 NLOS 的深度覆盖

现有卫星通信以服务具备直射径的用户为主，当用户在信号遮挡区域时对应 NLOS 无线信道，会导致链路连接失败，无法进行有效通信。

深度覆盖技术可支持低轨卫星的增强覆盖场景，也可以用于高轨卫星的数据传输。为实现深度覆盖，可采用更低速率的鲁棒传输设计方式。需要攻克系列关键技术，主要包括两个方面：（a）深度寻呼技术，设计单独的寻呼信道，可抵抗 10-20dB 左右的额外链路损耗，用户在收到寻呼后，到室外接听电话，回归正常模式；（b）室内短信通信技术，即用户在室内或有遮挡条件下，可接收到单向的短报文信息，维持最低能力的通信连接。

（5）馈电接入一体化设计

传统 5G NTN 架构采用接入链路（也称服务链路）与馈电链路分离的设计模式，接入链路负责卫星与用户终端的数据交互，馈电链路承担卫星与地面信关站的回传任务，两条链路资源调度、波形体制相互独立。在低轨卫星高速运动的场景下，馈电链路会频繁发生切换，易造成星地回传中断、用户通信业务卡顿，此外分离架构频谱利用率低、端到端时延较大。

馈电接入一体化设计将打破接入链路与馈电链路的技术边界，实现二者波形体制、时

频资源、调度策略和信令流程的统一协同设计，依托星上处理能力完成双链路资源统一调度与联合切换。相较于传统架构，该技术优势显著：有效提升卫星频谱资源复用效率，缓解低轨星座频谱资源紧张问题，同时增加系统设计的复用性；通过双链路切换联动，降低信关站切换导致的通信中断，提升手机直连卫星的业务连续性；减少星地信令交互开销，压缩传输时延，能够适配野外应急、远洋通信、全域物联网等场景。

（6）星地频谱共享

地面 5G 系统及传统卫星通信系统采用星地频谱独立划分、静态分配的模式，二者在频段上也存在一定重叠与资源闲置。随着低轨巨型星座与手机直连卫星技术快速发展，静态频谱分配模式暴露出明显短板，如频谱资源利用率低、星地同频干扰严重、资源适配灵活性差，难以满足 6G 全域覆盖、海量连接、高速宽带的融合通信需求。

星地频谱共享将打破星地频谱隔离壁垒，通过实时频谱感知、智能干扰协调与动态资源调度机制，实现地面蜂窝网络与低轨卫星网络的频谱复用与动态共用。系统结合星地链路状态、波束覆盖及业务负载，自适应调整频谱资源、发射功率与调度策略，有效规避星地同频干扰。相较于传统静态频谱分配方式，该技术可显著提升频谱利用效率，缓解 6G 星地组网的频谱资源压力，此外可适配卫星高速运动、波束动态切换等复杂场景，实现星地网络协同。

（7）通导融合定位

低轨星座的大规模部署为通信导航融合提供了基础设施，为通信和定位的融合带来新的价值。受限于可见卫星数量，5G NTN 主要研究了基于单星多个时刻的定位方法，其几何精度因子（Geometric Dilution Precision, GDOP）较差，制约了定位精度。随着卫星星座的致密化发展，终端可视范围内能看到的卫星数量众多，因此可以采用基于多星的定位方法。多星定位可显著改善 GDOP，突破单星定位几何构型差的瓶颈。

由于卫星快速运动导致时延、多普勒频移高动态变化，多星定位面临星地信道下的测量误差和测量精度的剧烈抖动、时钟误差带来的定位误差、终端可见卫星数量的快速变化等技术挑战。因此，需要攻克系列关键技术，包括：基于 OTDOA 或 multi-RTT 定位增强技

术、基于角度或多普勒测量的定位增强技术、基于载波相位的卫星定位技术、基于同步信号块（Synchronous Signal Block, SSB）和定位参考信号（Positioning Reference Signal, PRS）的定位信号设计方案以及星间定位信号的干扰抑制技术等。

（8）通信与 AI 技术融合

人工智能（Artificial Intelligence, AI）已经渗透到移动通信网络的各个方面。例如，核心网+AI，可以解决业务及应用的部署、运行、拓展、安全等问题；无线接入网+AI，可以解决信号处理、无线资源管理等问题；此外，在网络规划、操作维护等层面，可以替代传统的人工操作。

和地面移动通信系统类似，AI 和卫星通信系统的融合包括两个层面：（a）AI 赋能网络，侧重于利用 AI 加强网络的系统能力；（b）网络赋能 AI，以卫星网络作为 AI 的基础设施对外提供 AI 服务。基于 AI 的卫星通信网络可以大幅提升网络效率和服务能力，目前已获得业界的广泛关注。典型的卫星与 AI 融合的用例包括：星地链路的 AI 应用、卫星组网的 AI 应用、网络管理的 AI 应用等。6G 卫星网络与 AI 技术融合，需要考虑星载算力的受限、星地 AI 的协同性等挑战。

（9）通信与算力融合

随着 6G 星地融合及通感算智技术快速演进，传统卫星仅承担通信中继、信号转发、遥感数据回传的单一业务模式，已难以满足未来全域智能业务发展需求。6G NTN 不再局限于传统透明转发通信模式，面向星地融合业务，需要将通信传输与天基算力深度耦合，逐步演进为具备原生计算、存储、智能处理、任务编排的天基算力基础设施，构建星地异构算网融合体系，解决星地海量数据传输带宽瓶颈，实现“在轨预处理、星间协同计算、星地分工处理“，支撑手机直连卫星场景下终端任务卸载、低时延业务闭环、全域算力服务供给。

受星上功耗、体积、散热、存储资源约束，以及低轨星座拓扑高速动态变化的影响，实现通信传输与天基算力深度耦合，需要突破星载轻量化模型在轨部署、星地算网联合编排与动态任务调度、星地分布式算力协同、高动态环境下算力服务迁移、以及星地算力安

全可信等关键技术。通过算力资源池化、模型轻量化部署、星地算网资源联合优化调度、多星分布式协同计算、计算服务迁移及多维度安全防护等，可有效应对星上硬件受限、星座拓扑高速动态变化带来的挑战，构建 6G 星地融合、算网融合的基础能力形态。

3.3 手机直连卫星的工程实践技术

手机直连卫星在载荷和终端均面临产业化挑战，其中卫星载荷涉及的关键技术主要包括星载相控阵天线、星间激光通信、载荷一体化等，卫星终端需要提升收发能力并考虑集成化等。

（1）星载相控阵天线

和传统机械天线的追踪单目标、响应慢、易发生故障等特点相比，星载相控阵天线具备能追踪多目标、响应快、高可靠等特征，越来越多地在手机直连卫星通信系统中应用[1]。从国外来看，以 AST SM 代表，其 BlueWalker 3 卫星采用了“翼阵一体“相控阵，阵元数 2368 个，展开面积达 64 平方米，能支持 10Mbps 以上的峰值速率，其新一代 BlueBird Block2 卫星将天线展开面积提升至 223 平方米，预期峰值速率达 150Mbps。

手机直连卫星对星载相控阵天线提出了技术需求：一方面，星载相控阵天线要克服工作频段及带宽、阵列规模、波束数量、频谱效率等方面的约束（如表 2 所示），以满足系统性能的要求；另一方面，为适配卫星及运载系统，星载相控阵天线需要降低天线重量、体积、功耗等。

类别	具体说明
工作频段与带宽	• 近期支持单频段，以 L/S/C 频段为主，工作带宽在 20MHz 左右。 • 远期为满足多运营商共享和国际运营，工作带宽将超过 100MHz，并支持多个频段。

类别	具体说明
阵列规模	• 近期采用单个阵列，阵列规模在数百个阵元以上，最高增益达 35dBi。 • 远期采用可折叠的多阵或多子阵，单/子阵规模可达 5000 个阵元以上，实现更高增益。 • 天线具有较强的赋形能力和干扰抑制能力。
波束数量	• 近期波束数量数十个。 • 未来波束数量数百个，从而保证实时覆盖能力和提升用户容量。 • 动态波束能力。
频谱效率	• 近期频谱效率在 2bit/s/Hz 左右。 • 未来频谱效率 3~5bit/s/Hz。

表 2　星载相控阵天线的性能指标要求

星载相控阵天线目前存在着波束数量少、赋形能力弱、工作带宽低（平坦度差）、增益低、功耗高、体积/重量大、成本高、规模化弱等系列挑战，为支持手机直连卫星需要攻克系列关键技术，例如数字波束赋形、多子阵/天线、折叠相控阵、超大阵面架构、芯片化、稀疏阵、体制优化、架构优化、工业级器件、星载一体化设计等。

（2）星间激光通信

采用二维结构的光天线已发展到准商用阶段，在相关星座完成多厂家的全天候建链、稳链任务验证。当前我国的光天线跟瞄技术正从人工完成标定校准，逐步迈向终端在轨自

动校准和一键建链、复链，保障未来大规模星间激光链路的常态化运营。

星间激光通信链路传统上采用 CCSDS 协议，具有如下优点：（a）航天领域非常成熟、可靠，深空探测、测控都在用；(b) 标准完备，工程经验丰富，点对点通信容易互通。CCSDS 也存在如下不足：（a）业务映射简单，难以支持多业务类型的混合承载；（b）承载效率易受报文长度影响，业务波动大；（c）开销缺少网络质量监测与网络管理能力；（d）体制更适合“窄带、低速率、少节点”的场景。

和 CCSDS 协议相比，OTN 协议具有承载效率高、多业务隔离能力强、加密方案灵活高效、丰富的监测与运维等特征，越来越受到业界青睐[6]。而且，OTN 协议已在地面成熟应用多年，标准化程度高，光底座已覆盖 1.25Gbps~1.6Tbps 速率范围，相关产业链发达且开放，如表 3 所示。

类别	国内	国际
芯片	海思、飞思灵微电子、中兴微电子、复旦微电子、紫光同创、安路科技	BROADCOM、MACOM、MAXIM、SILICON LABS、PMC
光器件（含模块）	光迅、海思、飞思灵、德科立、昂纳、新易盛、天孚通信、剑桥科技、华工科技、源杰半导体、仕佳光子	LUMENTUM、FINISAR、ACACIA（CISCO 收购）
设备	烽火、华为、中兴	CIENA、NOKIA、ERICSSON、NEC
运营	电信、移动、联通、广电、电网	Verizon 、 AT&T 、 Deutsche Telekom、NTT Group、Vodafone

表 3　OTN 协议成熟的产业链基础

随着手机直连卫星面向宽带发展，100G OTN 相干星间组网优势明显，具体体现在：（a）长距离、高灵敏度；（b）高可靠性；（c）具备国产化能力；（d）成熟的网络感知与管理能力，地面运营商大规模应用；（e）组网互通。因此，积极发挥地面光模块产业链优势，打造真正面向“星地融合、Gbps～Tbps”的下一代星间链路协议。

（3）载荷一体化

当前卫星载荷普遍采用分立式设计，各功能单机独立研发装配，易造成星上设备繁多、布局分散、系统耦合复杂等问题。该架构硬件冗余、线缆繁杂、装配难度高，拉长了整星研制与测试周期，抬高研发成本，难以适配低轨巨型星座批量化组网、快速迭代、低成本量产的需求。因此，载荷一体化搭配半舱集成方案，依托成熟产业链优化卫星架构、降本增效，成为提升载荷集成度与综合性能的关键路径。

然而，要实现载荷一体化，需要攻克系列关键技术，具体包括：（a）核心载荷功能集成优化，打破传统分立硬件架构，采用异构基带处理方案，对基带解调、星上路由、激光通信、测控数传、星上智能处理等功能的 SoC 芯片进行整合复用，实现多业务共硬件平台部署，有效缩减设备冗余；（b）极简标准化接口设计，统一规范载荷内部处理单元与射频单元、载荷与星上综合电子、载荷与卫星平台各分系统的接口协议与电气标准，简化链路结构，提升系统兼容性与可扩展性；（c）星载机电热协同联合设计，通过一体化结构布局、电磁兼容优化、在轨热环境协同管控，解决分立设备干扰、散热不均等问题，大幅提升载荷在轨可靠性与整星集成性能；（d）构建科学化、全链路协同的卫星载荷测试体系，依托数字孪生仿真手段优化量产测试流程，将部分整星级网络协议、陪测功能验证前置下沉至载荷单机调试阶段，精简测试层级，压缩研制周期，为巨型星座规模化量产交付提供有力支撑。

（4）卫星终端

手机直连卫星系统的终端同时兼容地面移动通信与卫星通信双场景，具有通信模式多样、星地链路余量偏低等特点，需从终端天线、芯片及功耗优化等维度全面提升手机终端性能。当前行业重点聚焦小型化内置手机卫星天线、软件可重构多功能芯片、终端功耗精

细化管理等关键技术方向。

在天线技术方面，小型化内置手机卫星天线采用共形设计，可与手机中框、后盖等结构件一体化融合，在保证小型化、轻量化的同时，有效提升卫星链路的辐射效率与接收灵敏度，满足手机内置无外露结构的使用需求。

在芯片技术方面，软件可重构多功能芯片依托先进工艺制程，将基带处理、存储控制等多功能模块高度集成于单一片上系统（System on Chip, SoC），通过软件可重构适配多模式通信体制，提升芯片集成度、通用性与处理效率，降低硬件体积与功耗。

在功耗优化方面，依托场景化软件调度与通信参数自适应优化技术，结合端侧主流的动态电压频率调节（Dynamic Voltage and Frequency Scaling, DVFS）实现功耗精细化调控，有效降低终端通信能耗，延长设备待机与连续通信时长。

四、 基于 NTN 的手机直连卫星标准发展

国内外积极开展 NTN 标准推进工作，主要组织包括 3GPP、ITU、CCSA 等。

4.1 3GPP

国际标准化组织 3GPP 自 R15 开始研究 5G NTN 技术，以 5G 地面移动通信标准为基础，结合卫星通信的特征做针对性增强和适配，实现了 NTN 与地面移动通信标准的兼容。如图 3 所示，5G NTN 已完成 Rel-17~Rel-19 三个版本的标准化工作，同时支持 NR NTN 和 IoT NTN，涉及低频段和高频段。当前的 Rel-20 阶段，3GPP 在同时开展 5G NTN 的标准化工作以及 6G NTN 的研究工作。

图 3　3GPP5G NTN 的标准推进

3GPP 针对 5G NTN 的标准化工作分 Rel-15~Rel-16（可行性研究）、Rel-17（核心标准化）、Rel-18 及之后（增强优化）三个阶段，从最初的技术可行性验证到核心功能的标准化，再到场景化增强优化，逐步完善了 5G NTN 的标准体系，实现了 5G 与卫星网络的初步融合。

Rel-15~Rel-16 版本是 5G NTN 的可行性研究阶段，核心完成了 5G 地面移动通信与非地面移动通信融合的技术可行性分析，明确了 5G NTN 的应用场景、网络架构、关键技术挑战，同时开展了空口适配、时偏补偿、多普勒频偏校正等核心技术的初步研究。该版本界定了 5G NTN 的两种组网架构（透明转发架构和再生处理架构），明确了卫星在 5G NTN 中的功能定位，为后续 Rel-17 的核心标准化奠定了基础。

Rel-17 版本是 5G NTN 的核心标准化阶段，完成了 5G NTN 核心功能的标准化，是 5G NTN 产业化应用的核心标准依据。宽带 NTN 的核心特性包括：（a）空口适配技术标准化，针对星地链路的长时延、大多普勒频偏特性，完成了物理层、MAC 层、RLC 层的协议增强；（b）核心网适配，完成了 5G 核心网对 NTN 的适配优化，实现了星地核心网的信令互通和数据交互。该版本的发布标志着 5G NTN 从研究走向产业化应用，是 5G 星地融合的重要里程碑。

Rel-18 版本开始是 5G NTN 的增强优化阶段，针对 Rel-17 的不足，结合产业应用需求

开展增强优化。宽带 NTN 的核心特性包括：（a）手机直连卫星技术的标准化，制定了普通手机与卫星直连的空口协议和终端要求，涉及覆盖增强、移动性管理增强、容量增强、卫星广播接收等；（b）QoS 增强，针对星地融合的业务需求，优化了 5G NTN 的 QoS 机制；（c）组网架构增强，涉及再生处理架构、UPF 上星时的边缘计算、星上数据交换、UE-Satellite-UE 通信等；（d）无（弱）GNSS 接入等新特性。Rel-18~Rel-20 的系列增强版本进一步完善了 5G NTN 的标准体系，提升了 5G NTN 的性能和场景适配能力，支撑 5G NTN 的规模化应用。

3GPP 自 Rel-20 开始 6G 标准化工作，已经完成了首个 6G 需求报告 TR 22.870，写入了泛在连接等典型场景以及星地融合相关的系列用例。NTN 和 TN 的统一设计被业界公认为是 6G 的基本特征，6G NTN 的典型应用场景如图 4 所示。

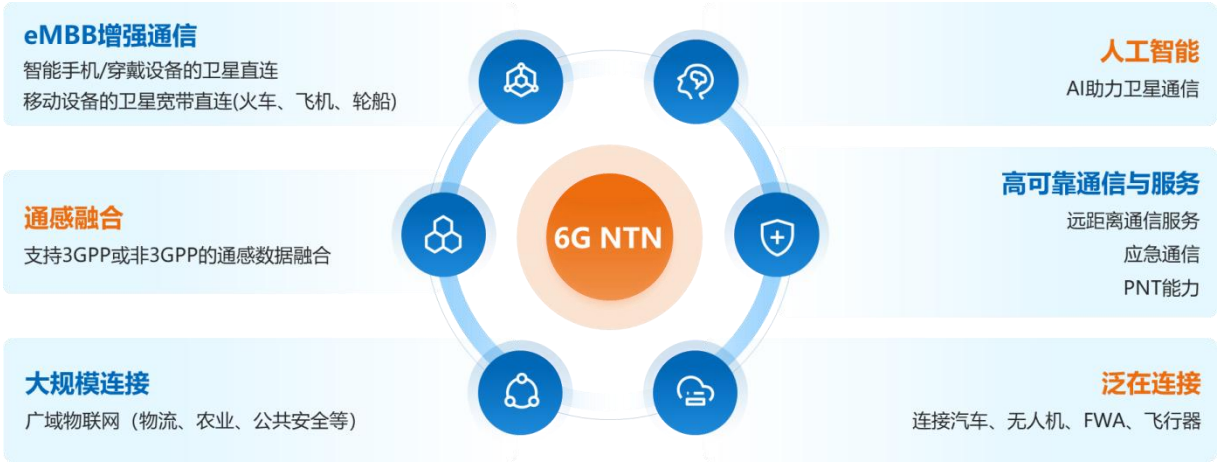


图 4　6G NTN 的典型应用场景

和 5G NTN 相比，6G NTN 一方面将和 TN 内生融合，克服 5G NTN 产业链的短板，使得 TN 和 NTN 的产业可以同步推进；另一方面将提供比 5G NTN 更好的用户体验、更大的容量和更多业务的服务能力。

4.2 ITU

国际电信联盟无线部（ITU-R）自 2021 年正式开启 IMT-2020（5G）卫星通信标准化工作，2022 年 9 月完成了 IMT-2020 卫星通信愿景和需求建议书（M.2514）[7]，定义了卫

星增强移动宽带（eMBB-s）、卫星海量机器类通信（mMTC-s）和卫星高可靠通信（HRC-s）三大应用场景，如图 5 所示。其中 eMBB-s 场景支持农村和偏远地区、空中和海上环境以及在某些情况下郊区的高数据速率应用，mMTC-s 场景解决广域上大量分散连接的固定或移动设备的通信问题，HRC-s 场景对可用性和可靠性有特定的要求。

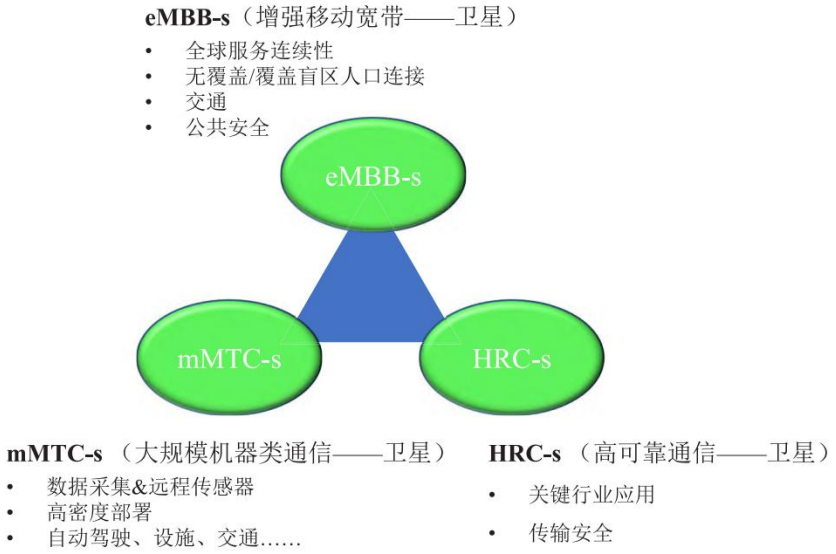


图 5　IMT-2020（5G）卫星典型场景[7]

2023 年至 2025 年期间，ITU-R 完成了关于 IMT-2020 卫星空口的提案征集及技术评估等工作，并于 2025 年 10 月发布了 IMT-2020 卫星通信空口技术规范（M.2177）[8]，其中 5G NTN 被作为唯一技术提案。2026 年 5 月，ITU-R 进一步开启了对 IMT-2020 卫星通信空口标准的升级工作。

自 2023 年 10 月，ITU-R 通过了“面向 IMT-2030 及之后的卫星发展和未来技术趋势研究”（简称“卫星未来技术趋势研究”）立项，意味着正式开启了 IMT-2030（6G）卫星通信标准化工作。2025 年 5 月，ITU-R WP4B 通过了 6G 卫星空口标准制定时间线，如图 6 所示，其总体时间规划与 ITU-R WP5D 制定的 6G 地面空口标准节奏基本保持同步，计划于 2031 年上半年完成最后的 6G 卫星空口标准发布。

2026 年 5 月，ITU 完成了卫星未来技术趋势研究报告（M.2569）[9]，主要内容包括发展趋势，以及无线空口、卫星网络、终端与应用、安全与隐私等技术趋势，如图 7 所示。

此外，ITU-R WP4B 在持续推进 IMT-2030 卫星框架、IMT-2030 卫星技术性能要求的研究，预期 2027 年完成，并于 2028 年开启 IMT-2030 卫星技术提案的征集工作。

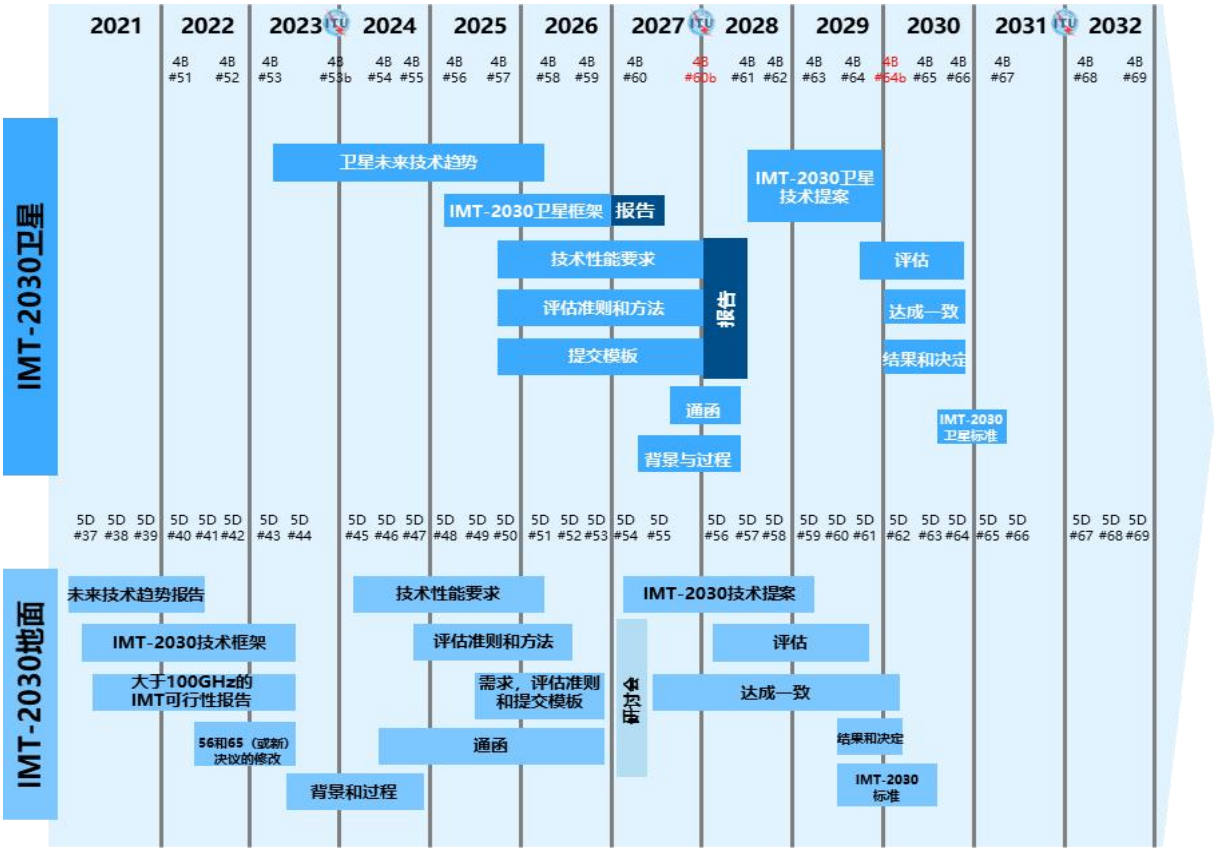


图 6　IMT-2030（6G）卫星空口标准制定时间线

图 7　IMT-2030（6G）卫星未来技术趋势

4.3 CCSA

CCSA 作为我国通信标准化的核心组织，将 3GPP、ITU 的国际标准与我国星地融合产业发展需求相结合，开展本土化标准制定。除已有的无线通信技术工作委员会（TC5）卫星与微波通信工作组(WG10)外，CCSA 于 2020 年新成立了航天通信技术工作委员会(TC12)，主要从事航天通信网络架构与协议、航天通信在行业中的应用、协同组网通信、卫星中继与计算等方面的研究和标准制定工作。

自 2022 年，TC5 联合 TC12 开展了 NTN 的系列行标制定，技术体制上涉及 IoT NTN 和 NR NTN，类别上涉及技术要求和测试方法。如表 4 所示，目前以 R17 为基础的第一阶段 NTN 行标工作已经完成，后续会持续开展版本升级工作。

技术体制	具体说明
IoT NTN	• 基于非地面网络（NTN）的物联网窄带接入（NB-IoT）接入网总体技术要求（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的物联网窄带接入（NB-IoT）卫星接入节点设备技术要求（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的窄带物联网接入（NB-IoT）卫星接入节点设备测试方法（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的物联网窄带接入（NB-IoT）终端设备技术要求（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的窄带物联网接入（NB-IoT）终端测试方法（第一阶段）

技术体制	具体说明
NR NTN	• 支持卫星接入的 5G 核心网技术要求（第一阶段） • 支持卫星接入的 5G 核心网测试方法（第一阶段） • 基于非地面网络 (NTN) 的 5G 接入网总体技术要求 (第一阶段) • 基于非地面网络（NTN）的 5G 基站技术要求（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的 5G 基站测试方法（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的 5G 终端技术要求（第一阶段） • 基于非地面网络（NTN）的 5G 终端测试方法（第一阶段） • 支持卫星接入的 5G 核心网技术要求（第二阶段） • 支持卫星接入的 5G 核心网测试方法（第二阶段）

表 4　CCSA 制定的 NTN 系列行标

五、 手机直连卫星的产业发展

基于可获取的频率资源，国内外积极开展 NTN 设备研发和技术验证，并探讨更广泛的应用拓展。

5.1 全球频率资源配置与监管政策

卫星通信的轨道和频率是全球稀缺资源，潜在可使用的频段如表 5 所示，其中宽带手机直连卫星主要使用 UHF、L、S、C 频段。

频段	范围（GHz）

频段	范围（GHz）
UHF	0.3~1.12
L	1.12~2.6
S	2.6~3.95
C	3.95~8.2
X	8.2~12.4
Ku	12.4~18
K	18~26.5
Ka	26.5~40
V	40~75
W	75~110

表 5　卫星通信使用的频段

ITU、3GPP 等均在积极推进卫星通信的频率工作。其中，面向 2027 年世界无线电通信大会（WRC-27），ITU 为手机直连卫星设置了议题 1.13 和议题 1.14，相关情况如表 6 所示。

类别	议题 1.13	议题 1.14
内容	根据第 **253** 号决议 **(WRC-23)** ，审	根据第 **254** 号决议 **(WRC-23)** ，审

类别	议题 1.13	议题 1.14
	议对卫星移动业务新的可能划分，实现空间电台与国际移动通信（IMT）用户设备直连，以补充 IMT 地面网络覆盖。	议卫星移动业务可能的新增划分。
目标频段	694/698MHz-2.7GHz 频段范围内的地面 IMT 频段	• 1 区和 3 区的 2010-2025MHz(地对空) • 2160-2170MHz（空对地） • 各区的 2120-2160MHz（空对地）
终端类型	与地面 IMT 一致的终端	未限定具体终端类型
应用类型	仅限用于手机直连卫星应用	MSS 应用

表 6　WRC-27 的手机直连卫星议题

3GPP 也为 5G NTN 确立了系列频段，其中适用于宽带手机直连卫星的 FR1 频段范围如表 7 所示。

NTN satellite operating band[1]	Uplink (UL) operating band Satellite Access Node receive / UE transmit $F_{UL,low} – F_{UL,high}$	Downlink (DL) operating band Satellite Access Node transmit / UE receive $F_{DL,low} – F_{DL,high}$	Duplex mode
n256	1980 MHz – 2010 MHz	2170 MHz – 2200 MHz	FDD

NTN satellite operating band[1]	Uplink (UL) operating band Satellite Access Node receive / UE transmit $F_{UL,low} – F_{UL,high}$	Downlink (DL) operating band Satellite Access Node transmit / UE receive $F_{DL,low} – F_{DL,high}$	Duplex mode
n255	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
n254	1610 – 1626.5 MHz	2483.5 – 2500 MHz	FDD
n252	2000 – 2020 MHz	2180 – 2200 MHz	FDD
n251	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1518 MHz – 1559 MHz	FDD
n250	1668 MHz – 1675 MHz	1518 MHz – 1559 MHz	FDD
n248	14000 MHz - 14500 MHz	10700 MHz – 12750[2,3] MHz	FDD
n247	13750 MHz - 14000 MHz	10700 MHz – 12750[2,3] MHz	FDD

NOTE 1: NTN satellite bands are numbered in descending order from n256.
NOTE 2: For Region 2, the downlink is limited to 10700 – 12700 MHz.
NOTE 3: For the US, the downlink is limited to 10700 – 12200 MHz for Mobile VSAT.
NOTE 4: Operating band n200 is a reserved value.

表 7　3GPP 针对 5G NTN 定义的 FR1 频段[10]

5.2 全球 NTN 产业进展

依据文献[11]的观察，国外在轨手机直连卫星的卫星系统已经都在朝着 NTN 标准靠近，包括西班牙 Sateliot、美国 Omnispace、美国 Skylo 等。其中，Sateliot 正在开发一个由 100 颗纳卫星组成的卫星星座，已提供 IoT NTN 通信服务，针对 NR NTN 已发 6 颗卫星，使用 3GPP n256 频段（上行 1980～2010MHz，下行 2170～2200MHz）。Omnispace 通过收购美国 MSS 运营商 ICO Global 获得了 3GPP n256 频段的许可，2022 年发射 2 颗卫星，2023 年与巴西 Anatel 合作，2024 年与非洲 MTN 合作宣布落地 NTN 业务。Skylo 于 2023

年一方面与联发科、高通、三星和索尼半导体（Sony Semiconductors）等芯片制造商建立合作伙伴关系，另一方面与西班牙电信德国公司（Telefonica Germany）及德国电信合作，提供了地面与 IoT NTN 网络的无缝漫游集成，2024 年进一步与美国 Verizon 及德国电信合作，并筹集 3700 万美元资金扩展设备直连卫星解决方案，加速在 IoT NTN 的发展速度。此外，美国 Starlink、美国 Amazon LEO、EQUATYS 等均将支持 NR NTN 宽带发展。

我国也在积极开展 NTN 的技术验证。2023 年，中信科移动发布了业界首套高低轨融合的宽带透明转发 5G NTN 系统，并联合中国卫通开展了基于“中星 26“的高轨在轨验证，联合银河航天开展了基于“灵犀”的低轨在轨验证，支持星地融合宽带业务。2025 年 5 月，中国卫星网络集团有限公司在“2025 雄安北斗生态合作大会”上表示，星网已通过新技术试验卫星实现了全球首次基于 5G NTN 标准的手机直连卫星宽带视频通话，在轨有效验证天地融合网络体制。中国星网也在积极牵引上下游产业发展，空间段推动星载基站、S 频段相控阵天线攻关，促进卫星载荷一体化量产；终端侧带动国产 NTN 基带与射频器件迭代，拉动手机、车载终端研发；同时加速天地一体网络基础设施建设，统一 NTN 测试标准，培育星地融合新兴应用市场。目前，我国已从监管规章、产业指导、顶层规划多维度出台系列政策，推动手机直连卫星与 5G NTN 产业有序发展。2025 年实施的《终端设备直连卫星服务管理规定》构建起终端直连卫星业务的监管框架，补齐行业制度短板。工信部发布《关于优化业务准入促进卫星通信产业发展的指导意见》，明确 2030 年手机直连卫星实现规模化应用的发展目标，支持运营商联合卫星企业，分阶段推进高轨、低轨直连卫星业务落地，同步启动卫星物联网商用试验，赋能车载、可穿戴等 NTN 终端场景。与此同时，“十五五“规划与 6G 创新试点将低轨卫星互联网、星地融合 NTN 通信上升为国家未来产业布局，引导产业链围绕 3GPP NTN 标准开展技术攻关、星座建设与终端生态培育。

与此同期，终端芯片厂商积极跟进 NTN，研制的产品大致分为消费手机集成 NTN 主基带、IoT-NTN 外挂窄带短报文芯片、NR-NTN 宽带技术验证芯片三类，如表 8 所示。其中，自 2023 年以来已发布的 NTN 集成终端芯片主要来自三星、高通、联发科，如表 9 所示。

产品类别	代表厂商
消费手机集成 NTN 主基带	• 全球三家实现商用：三星、高通、联发科
IoT-NTN 外挂窄带短报文芯片	• 紫光展锐：V8821，R17，22nm 工艺；双向短报文、语音，支持天通一号、海事卫星，可拓展适配低轨星座。 • 翱捷：ASR5630，R17，已完成天通一号入网认证，主打窄带短报文业务。 • Nordic：nRF9151，R17，SiP 一体化模组，适配 Sateliot 等低轨物联网星座。
NR-NTN 宽带技术验证芯片	• 星思半导体：CS7610，基于 R17 NTN，2025 年完成在轨高清视频通话，处于技术验证阶段。 • 智联安：MS340，R17/R18 NTN，宽窄带全覆盖卫星通信基带芯片矩阵，处于在轨测试阶段。

表 8　终端芯片厂商研制的 NTN 产品

芯片厂商	芯片型号		发布时间	支持标准
三星	Exynos 5300	Modem	2023 年 2 月	3GPP R17 NR-NTN
	Exynos 5400	Modem	2024 年 2 月	3GPP R17 IoT-NTN & NR-NTN

芯片厂商	芯片型号	发布时间	支持标准
	Exynos Modem 5410	2025 年 12 月	3GPP R17 IoT-NTN & NR-NTN
高通	212S	2023 年 6 月	3GPP R17 IoT-NTN
	9205S	2023 年 6 月	3GPP R17 IoT-NTN
	X80 Modem	2024 年 2 月	3GPP R17&R18 IoT-NTN
	X85 Modem	2025 年 3 月	3GPP R17&R18 IoT-NTN
	X105 Modem	2026 年 3 月	3GPP R19 NR-NTN
联发科	MT6825	2023 年 6 月	3GPP R17 IoT-NTN
	M90	2025 年 2 月	3GPP R17 IoT-NTN & NR-NTN
	MT2739	2025 年 4 月	3GPP R17&R18 IoT-NTN & NR-NTN

表 9　2023 年以来发布的支持 NTN 的集成终端芯片[11]

5.3 NTN 应用拓展

随着 NTN 星座建设和技术验证的不断深入，业界也在积极探索手机直连卫星的更广泛应用，例如可穿戴设备直连卫星、车载卫星通信、A2X 低空智联等。

可穿戴设备直连卫星：受限于狭小的设备空间与电池容量，当前行业主要采用低功耗 IoT-NTN 方案，优先实现位置上报、SOS 应急短报文等低速业务，暂不承载宽带数据传输。高通可穿戴芯片已开启 NTN 适配，部分智能手表实现脱离手机接入卫星网络，独立开展应急通信。因可穿戴终端发射功率及天线增益偏低，对射频设计和功耗调度算法提出较高要求。未来，随着低轨 NTN 星座落地、微型低功耗基带芯片迭代，可穿戴卫星终端有望在野

外探险、海上作业等盲区场景实现人身安全保障的规模化应用。

车载卫星通信：车载直连卫星通信成为星地融合 V2N 车联网重要拓展方向，能够弥补地面蜂窝网络在荒漠、山区、远洋道路等区域的覆盖盲区。受限于卫星通信的大路损、大时延，当前车载 NTN 优先承载车辆应急求救、位置上报、远程状态监测等低速率业务。车载场景面临双重多普勒频偏、传播时延波动、星地网络无缝切换等关键难题，对车规级 NTN 基带芯片、天线设计与移动性管理算法提出严苛要求。随着低轨 NTN 星座落地，国内外车企、通信厂商逐步启动前装车载 NTN 模组研发与在轨测试，未来将构建星地融合车联网体系，支撑全域无盲区智能网联汽车服务落地。

A2X 低空智联：卫星 A2X 是补齐地面蜂窝盲区的重要技术路径，可实现无人机等低空飞行器脱离地面基站覆盖时的广域管控通信服务。针对星地融合低空智联网[12-14]，地面 A2X 直连通信负责城市空域内飞行器之间、飞行器-地面管控平台的低时延交互，NTN 卫星链路则承担偏远山区、海洋上空等无公网区域的飞行器位置上报、航线回传、应急告警等低速业务，二者形成高低互补的全域管控体系。低空高速飞行场景下，飞行器-卫星链路面临复杂多普勒频偏、三维移动性管理、星-地网络无缝切换等技术难题，对机载 NTN 模组、波束跟踪与时频同步算法提出更高要求。随着低轨 NTN 星座落地，星地融合 A2X 将为城市空中交通、远距离物流无人机、边境安防巡检等低空场景，构建起全域无断点的通信保障底座。

六、 中国信科的相关技术与产业布局

中国信科自 2018 年起在业界率先提出“5G 体制兼容、6G 系统融合”的星地融合技术发展路线[15]，深度参与及主导 NTN 国际标准制定，布局 5G NTN 产业链核心环节，得到了业界的广泛认可。

6.1 技术突破，标准引领

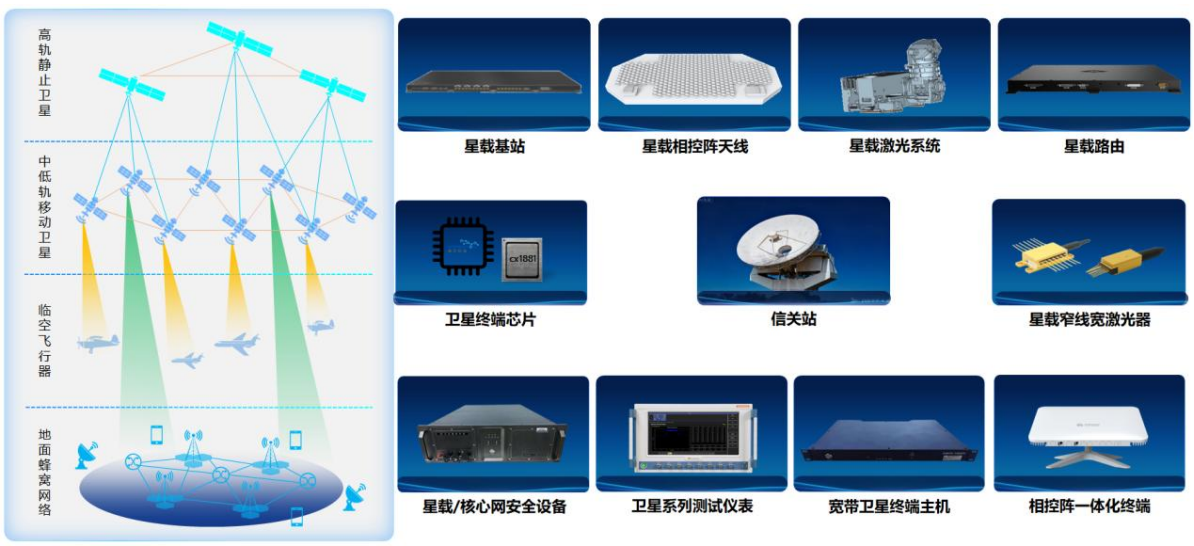
率先提出“5G 体制兼容、6G 系统融合”星地融合发展路线。中国信科自 2018 年起在业界率先提出“5G 体制兼容、6G 系统融合”的星地融合技术路线，2020 年在 China Communications 发表论文“System integration of terrestrial mobile communication and

satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G”[16]，得到了业界的积极响应。例如，2022 年，欧洲航天局（European Space Agency，ESA）和全球卫星运营商协会（Global Satellite Operators’ Association，GSOA）倡议“5G 融合设计、6G 统一设计”；2025 年 2 月 12 日，欧盟无线电频谱政策组（Radio Spectrum Policy Group，RSPG）发布 6G 战略报告，进一步深化该观点。目前，基于星地融合技术发展路径的 NTN 和 TN 统一设计在业界达成广泛共识，预期纳入 3GPP 的 6G 第 1 个版本。

突破核心技术，深度参与及主导 NTN 国际标准制定。中国信科依托长期在无线移动通信领域的深厚技术积累，针对星地融合的卫星移动通信面临的网络拓扑高动态变化、星地跨域组网复杂、无线传输效率低等难题，重点攻关高动态条件下时频精准同步与信道感知传输、敏捷高效的低复杂度波束管控、低时延高可靠卫星移动性管理、弹性可重构星地融合网络架构等系列关键技术。中国信科主导制定星地融合国际标准，在国际国内标准组织牵头立项 40 余项；代表中国首次在 3GPP 实现 5G NTN 标准牵头立项，已累计第一牵头 22 项 NTN 立项。此外，中国信科在 ITU-T 牵头制定 7 项固移卫星融合标准，在 ITU-R 牵头完成 IMT-2030 卫星发展与技术趋势，成为全球星地融合技术标准的核心贡献者。

6.2 面向星地融合，布局 5G NTN 产业链核心环节

面向国家和行业重大需求，中国信科积极推进星地融合技术验证与产业发展。自 2018 年开始研制系列星地融合设备，如图 8 所示，包括星载基站与相控阵天线、星载激光系统、星载路由、卫星终端芯片、信关站、星载窄线宽激光器、星载/核心网安全设备、卫星系列测试仪表、宽带卫星终端主机、相控阵一体化终端等，并成立了星地融合开放实验室，自主构建了完整卫星端到端实验和测试环境，为我国星地融合通信技术和产业发展提供了重



要支撑[17]。

图 8　中国信科在星地融合的产业布局

中国信科 2023 年发布了业界首套透明转发 5G NTN 高低轨一体化宽带卫星通信端到端实验验证系统，开展在轨关键技术验证，支持星地融合宽带业务，验证了 5G NTN 技术体制的可行性；研制了业界首个面向 6G 星地融合的端到端试验平台，涉及星地融合的基站、终端和核心网，支持弹性可重构网络架构、双星协同传输等关键技术验证，已实现超 1Gbit/s 高速空口传输速率，技术水平处于行业领先。

中国信科布局 5G NTN 产业链核心环节，其中卫星基站构建星载宽带接入网，激光通信打造星间高速承载网，一体化相控阵终端支撑多元增长应用需求，测试装备解决卫星测试瓶颈形成一站式解决方案，测试环境构建星地测试体系，加速产业链成熟。

七、 我国手机直连卫星面临的挑战及相关建议

7.1 面临的挑战分析

我国基于 NTN 技术的宽带手机直连卫星产业目前仍处于发展初期，在卫星制造与发射、星地通信载荷、星地融合产业生态、宽带商业化模式等多个维度存在明显瓶颈，制约了宽带直连业务的规模化落地与性能升级。

卫星制造和发射：适配宽带手机直连的低轨卫星批量化制造、低成本发射体系尚未完全成熟，产业链供应链的规模化、稳定性有待提升。国外主流星座普遍采用模块化、轻量化卫星架构，而国内卫星平台仍存在传统架构，单星载荷算力、带宽容量与在轨服役性能受限，单星制造成本偏高。发射环节方面，支撑宽带组网的火箭可重复使用技术仍在持续攻关，运载复用率不足，尚未形成规模化降本效应，导致宽带手机直连卫星的组网部署成本、迭代速度与国际领先水平存在明显差距。

通信载荷：宽带手机直连对低轨卫星组网能力、星地双向宽带传输、星间链路协同、在轨智能调度运维的技术要求远高于传统窄带卫星通信，整体技术实现难度更大。当前国内适配 NTN 宽带业务的星载高性能相控阵天线、柔性轻量化卫星平台、数字化智能有效载

荷等核心部件，仍存在性能不足、成本偏高的问题，难以支撑高速、稳定的星地宽带数据传输。同时，适配手机直连场景的国产 NTN 专用芯片虽已实现初步技术突破，但在运行功耗、多模兼容、宽带信号处理稳定性等方面仍有短板，制约了终端宽带接入体验与整机规模化量产。

产业生态：适配宽带手机直连的星地融合网络架构、空中接口、资源调度、TN-NTN 互操作等核心技术体系仍需持续完善。卫星优质频率与轨道资源是宽带手机直连业务的核心基础，当前国际频谱轨道竞争日趋激烈，国内资源申报及国际协调周期长、不确定性高，直接影响宽带 NTN 业务的组网规划与落地节奏。此外，我国宽带手机直连产业起步较晚，海外市场拓展与国际化产业布局难度较大。

商业模式：宽带手机直连卫星的规模化商用场景仍处于探索培育阶段，区别于成熟的地面移动通信与传统卫星窄带应急业务，其宽带通信的成本优势、应用价值尚未得到市场充分验证。目前产业仍以技术试验、示范应用为主，海事通信、航空机载、户外全域宽带接入、行业应急宽带保障等核心场景需求尚未完全释放，尚未形成可复制、可盈利的商业化运营模式，产业持续发展面临较大资金压力。同时，手机直连的海外运营更要考虑国外监管模式、可用频率、技术体制和功能选择等方面的差异性，进一步探索全球运营的可行性和经济效益。

面对全球 NTN 手机直连产业的激烈竞争，我国需针对性补足宽带手机直连卫星产业链核心短板，全面提升产业核心竞争力。重点聚焦适配宽带业务的轻量化卫星研制、NTN 专用芯片自主化、民用手机终端接入成本管控等关键环节实现技术突破，同时加速 3GPP NTN 国际标准落地与本土化适配，完善星地融合产业体系，抢占手机直连卫星领域的技术话语权与产业主导权。

7.2 对技术产业的发展建议

针对我国基于 NTN 技术的宽带手机直连卫星发展的多重挑战，本文从技术标准、产业生态、协同工作机制、海外市场拓展等方面提出发展建议[18]。

技术标准：持续深化 NTN 技术攻关与标准化布局。在 5G NTN 增强方向，重点推进波

束管理、覆盖增强、容量增强等关键特性的标准完善，补齐宽带手机直连业务能力短板；面向 6G NTN 前瞻布局，围绕 6G 原生星地融合新空口开展研究，重点攻克多星协同传输、多轨道异构网络接入、NLOS 深度覆盖、馈电接入一体化设计、星地频谱共享、通导感算智融合、卫星网络智能路由优化等核心技术，同步推进 6G NTN 标准化工作，为宽带手机直连向全域、宽带、智能化演进奠定标准基础，稳步推动技术试验与场景示范部署。

产业生态：系统性推动 5G NTN 宽带手机直连卫星产业成熟。充分依托我国地面 5G 完整产业链优势，推动 5G NTN 技术体制由地面网络向空间延伸，构筑星地融合产业竞争力。强化国家层面频谱资源统筹，加快形成适配宽带手机直连卫星业务的中长期频谱规划策略，统筹国内频段使用与国际频谱轨道协调。牵引基于 NTN 的卫星载荷、基带芯片、普通智能手机终端产业链协同迭代，推动宽带手机直连终端、星上再生载荷等产品规模化、低成本落地。

协同工作机制：构建跨领域协同创新体系。坚持标准牵引、产品驱动、生态协同的发展主线，建立航天、通信、集成电路、运载火箭等多方常态化协同机制，组织跨行业联合技术攻关。打通卫星研制、载荷开发、终端芯片、网络运营等各环节壁垒，加快关键技术突破与典型应用场景落地，推动星地融合产业链资源整合，巩固我国移动通信产业优势，逐步构建星地融合网络发展新格局。

海外市场拓展：有序支持国内通信运营企业依托 5G NTN 宽带手机直连方案“走出去”。卫星通信具备全域覆盖天然属性，非洲、东南亚、中亚、南美等发展中国家地面光纤、蜂窝基站覆盖不足，移动通信与行业数字化需求旺盛，是 NTN 宽带手机直连业务重要潜在市场。相比地面基站、光纤建设投入大、周期长，受属地政策波动影响显著，5G NTN 卫星业务在获得目标国家监管许可后，仅需部署少量信关站即可快速开通全域通信服务，具备部署灵活、初始投入可控、业务拓展风险相对较低的特点。依托宽带手机直连卫星服务助力发展中国家弥合数字鸿沟，打造我国 NTN 星地融合方案国际化标杆案例。

综上，5G NTN 作为全球公认通用技术体制，具备高度开放的产业属性，有利于构建全球化产业链体系，为我国通信产业出海创造有利条件。当前全球 NTN 宽带手机直连卫星正

处于产业化起步阶段，依托我国成熟 5G 产业底座，持续推进星地融合 NTN 宽带手机直连技术与产业发展，能够进一步做大通信产业规模、拓宽海外市场空间、提升我国信息通信领域综合竞争力。长远来看，从 5G NTN 平滑演进至 6G NTN，有望打破地面与卫星通信产业链割裂的现状，推动卫星通信复用地面移动通信成熟万亿级产业生态，从根源上解决终端与系统成本高、规模化普及难度大的痛点。6G 在标准起始阶段即采用星地融合统一设计，依托 6G NTN 持续技术创新，将推动移动通信实现由基础“连接覆盖“向全域“能力重构“的跨越式发展。

八、 未来展望

面向未来全球泛在连接通信需求，卫星通信对消除通信覆盖盲区、增强无处不在的覆盖起到了至关重要的作用。手机直连卫星作为卫星通信的一种应用模式，是实现星地融合、全域覆盖、万物智联的重要途径。依据手机直连卫星的发展历程和技术路线的分析，可以看出基于 NTN 体制的宽带手机直连卫星是未来技术和产业发展的共识方向。本白皮书深入解析了 NTN 宽带手机直连卫星的关键技术、标准发展、频率和产业发展，旨在促进当前 5G NTN 宽带手机直连卫星系统的设计与建设，以及未来 6G 星地融合技术与产业的发展。藉此技术白皮书，也向业界提出两方面倡议：

第一，加快推进 NTN 宽带手机直连卫星产业建设，构建开放协同的产业生态。强化国家层面统筹规划与顶层设计，围绕空口物理层、网络架构、移动性管理等核心环节积极引领 NTN 技术标准体系建设；同步提升卫星平台、星载载荷、NTN 终端全链条产业能力，统筹推进频谱协调与星地资源融合，支撑宽带手机直连卫星业务在国内规模化落地。依托共建“一带一路“契机，面向东南亚、非洲、南美等区域有序开展业务布局，输出星地融合 NTN 解决方案，贡献中国产业力量。

第二，持续优化 NTN 宽带手机直连卫星业务体验，推动服务能力由“可用“向“好用“演进，深化星地融合发展。当前宽带手机直连卫星正处于解决基础连通、转向提升综合业务体验的关键阶段，在完善手机端直连通信能力基础上，进一步拓展可穿戴终端直连、车载卫星通信、低空智联网等多元化 NTN 应用场景，丰富业务体系，充分释放规模经济效

应。面向未来 6G 的发展，基于 NTN 的宽带手机直连卫星技术将为星地融合提供重要的技术支撑，手机直连卫星业务将具有广阔的应用前景。

中国信息通信科技产业集团（简称“中国信科”）作为国内信息通信领域的高科技央企，针对 NTN 体制的宽带手机直连卫星建立了端到端的通信产业链，联合业界持续开展技术验证和应用推广。中信科移动通信技术股份有限公司（简称“中信科移动”）作为中国信科下属的主业公司，将“星地融合发展”作为公司愿景，打造星地融合移动通信全栈方案，并加强 6G 市场培育和牵引，愿携手全球产业伙伴共同解决全球数字鸿沟，推动星地融合网络成为普惠可及的新型信息基础设施，以太空产业的繁荣发展助力各国数字化转型，让技术进步的成果惠及全人类。

缩略语

英文缩写	英文全称	中文
3GPP	3rd Generation Partnership Project	第三代合作伙伴计划
5G	Fifth Generation Mobile Communication System	第五代移动通信系统
5G-A	5G – Advanced	5G 增强
A2X	Aircraft-to-Everything	飞行器对万物
AI	Artificial Intelligence	人工智能
CCSA	China Communications Standards Association	中国通信标准化协会
CCSDS	Consultative Committee for Space Data System	空间数据系统咨询委员会
D2C	Direct to Cellular	手机直连卫星
DCI	Downlink Control Information	下行控制信息
DVFS	Dynamic Voltage and Frequency Scaling	动态电压频率调节
eMTC	Enhanced Machine Type Communication	增强机器类通信
ESA	欧洲航天局	European Space Agency
GEO	Geostationary Earth Orbit	地球静止轨道
GDOP	Geometric Dilution Precision	几何精度因子
GNSS	Global Navigation Satellite System	全球导航卫星系统
GSOA	Global Satellite Operators’ Association	全球卫星运营商协会
HARQ	Hybrid Automatic Repeat reQuest	混合自动重传请求
HD-FDD	Half Duplex Frequency Division Duplex	半双工频分双工

英文缩写	英文全称	中文
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气与电子工程师协会
IoT	Internet of Things	物联网
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication	国际电信联盟无线部
LEO	Low Earth Orbit	低地球轨道
MBS	Multicast-Broadcast Services	组播广播服务
MEO	Medium Earth Orbit	中地球轨道
MO	Mobile Originated	终端始发（上行）
MT	Mobile Terminated	终端终结（下行）
MWC	Mobile World Congress	世界移动通信大会
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	窄带物联网
NLOS	Non-Line of Sight	非视距
NR	New Radio	新空口
NTN	Non-Terrestrial Network	非地面网络
OCC	Orthogonal Covering Code	正交覆盖码
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing	正交频分复用
OTN	Optical Transport Network	光传送网
PRACH	Physical Random Access CHannel	物理随机接入信道
PRS	Positioning Reference Signal	定位参考信号
RRC	Radio Resource Control	无线资源控制
RSPG	Radio Spectrum Policy Group	欧盟无线电频谱政策组
QoS	Quality of Service	服务质量

英文缩写	英文全称	中文
SIP	Session Initiation Protocol	会话初始协议
SoC	System on Chip	片上系统
SSB	Synchronous Signal Block	同步信号块
TDD	Time Division Duplex	时分双工
TN	Terrestrial Network	地面网络
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	无人机
UAM	Urban Air Mobility	城市空中交通
UE	User Equipment	用户设备
V2N	Vehicular to Network	车云网
WRC	World Radiocommunication Conference	世界无线电通信大会

参考文献

[1] 陈山枝,王策.手机直连卫星系统及其星载相控阵天线分析与建议.电信科学，2025

[2] 陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等.6G 星地融合移动通信关键技术[J].中国科学 (信息科学)，2024(5).

[3] 陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等.星地融合移动通信系统设计和关键技术.人民邮电出版社，2024.11

[4] 康绍莉.手机直连卫星关键技术及展望.pp.29-37，vol.305，环球财经，2026.4

[5] 戴翠琴,程白凡,吴旭帆,孙韶辉.手机直连卫星通信组网关键技术研究.pp.401-414，vol.30(3)，重庆邮电大学学报，2026.6

[6] 陈山枝,范志文,金家德等.卫星互联网星间激光通信的分析及建议.电信科学，2024

[7] Report ITU-R M.2514-0， Vision, requirements and evaluation guidelines for satellite radio interface(s) of IMT-2020,2022.9.

[8] Report ITU-R M.2177-0，Detailed specifications of the satellite radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2020(IMT-2020),2026.2.

[9] Report ITU-R M.2569-0， Development and technology trends for the satellite component of IMT towards 2030 and beyond,2026.5.

[10]3GPP TS 38.101-5 V20.0.0, NR; User Equipment radio transmission and reception; Part 5: Satellite access RF and performance requirements, Release 20, 2026.6.

[11]蓝天翼.手机直连卫星的发展与挑战.pp.48-55，vol.163，卫星应用，2025.7

[12]中信科移动通信技术股份有限公司,无线移动通信全国重点实验室. 低空智联网场景和关键技术白皮书:星地融合助力数字低空发展[R]. 2025.

[13]康绍莉,王可,秦海超,等.面向 6G 的低空智能网联系统用例研究[J].信息通信技术与政策,2026,52(4):2-14.

[14]康绍莉,秦海超,王可,等.6G 星地融合的低空智联需求和关键技术[J].天地一体化信

息网络,2026,07(03):99-110.

[15]陈山枝.关于低轨卫星通信的分析及我国的发展建议.电信科学，2020

[16]Chen Shanzhi, Sun Shaohui, Kang Shaoli, System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication — — the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G, pp.156-171, vol.17, no.12, China Communications, Dec.2020.

[17]陈山枝,孙韶辉,康绍莉,等."星地融合"改写通信未来——2025 中国通信学会科学技术奖特等奖背后的技术革命[J]. pp.63-65,科技纵览,2026(1).

[18]陈山枝,孙韶辉,康绍莉.星地融合 协同创新，推进卫星互联网产业高质量发展[J]. pp.37-45,中移智库,2025(9).

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：www.cictmobile.com