
当卫星信号覆盖全球：卫星通信如何为5G/6G插上翅膀？

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/40097.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

当卫星信号覆盖全球：卫星通信如何为5G/6G插上翅膀？。哈尔滨工业大学（深圳）苑阿芳、杨志华联合英国萨里大学孙智立在中国工程院院刊Engineering发表题为Evolution of Satellite Communication Systems Toward 5G/6G for 2030 and Beyond（面向2030及未来的5G/6G卫星通信系统演进）的文章。本文系统梳理了卫星通信系统与地面网络融合的演进历程，从国际标准化进展、关键技术挑战与未来研究方向三个维度，深入分析了卫星通信如何突破地面网络覆盖盲区，为面向2030及未来的5G/6G全球无缝连接提供系统性路径与技术指引。

天上还是地上？5G为何一个人打不赢这场仗

你是否想过：在浩瀚的大洋中央、荒无人烟的沙漠边缘、或是穿越高原的高铁上——手机信号是从哪里来的？

答案是：大多数时候，根本没有。

从1G到4G，再到如今的5G，地面通信网络（简称TN）在城市里越建越密、越来越快，把人与人、物与物连接得天衣无缝。但这套体系有一个致命弱点：它只能覆盖有人愿意建基站的地方。全球70%以上的陆地面积和几乎全部海洋，都是地面网络望而却步的盲区。

5G为未来描绘了三大能力愿景：超强移动宽带（eMBB）、超可靠低时延通信（uRLLC）和海量机器连接（mMTC）。而面向未来的6G，目标更宏大——要实现陆海空全域、随时随地的无缝连接，支撑包括泛在超宽带（uMUB）、超高数据密度（uHDD）和超高速超可靠低时延通信（uHURLLC）在内的极致应用场景。

但要真正实现这些愿景，仅靠地面网络根本做不到。这就是卫星通信登场的理由。

卫星+5G/6G：不是备胎，而是顶梁柱

卫星通信并不是什么新鲜事物。从最早的地球静止轨道（GEO）卫星广播电视信号，到全球导航系统，卫星一直在人类通信体系中扮演重要角色。但那时的卫星是独行侠——高延迟、低带宽，与地面网络几乎是两套互不兼容的系统。

如今，这一局面正在被彻底改写。

低轨道（LEO）卫星星座的崛起，是这场变革的核心驱动力。以Starlink、OneWeb、Kuiper为代表的LEO星座，将卫星部署高度从传统GEO的约35,786千米大幅降低至500—2,000千米，使得信号往返延迟从原来的250毫秒以上骤降低至20—50毫秒，接近地面网络水平。

在学术界和标准化组织中，卫星星座、高空平台（HAPs）和无人机（UAVs）等被统称为非地面网络（NTN）。它们与地面网络协同融合，是5G/6G实现全球覆盖的关键基础设施。

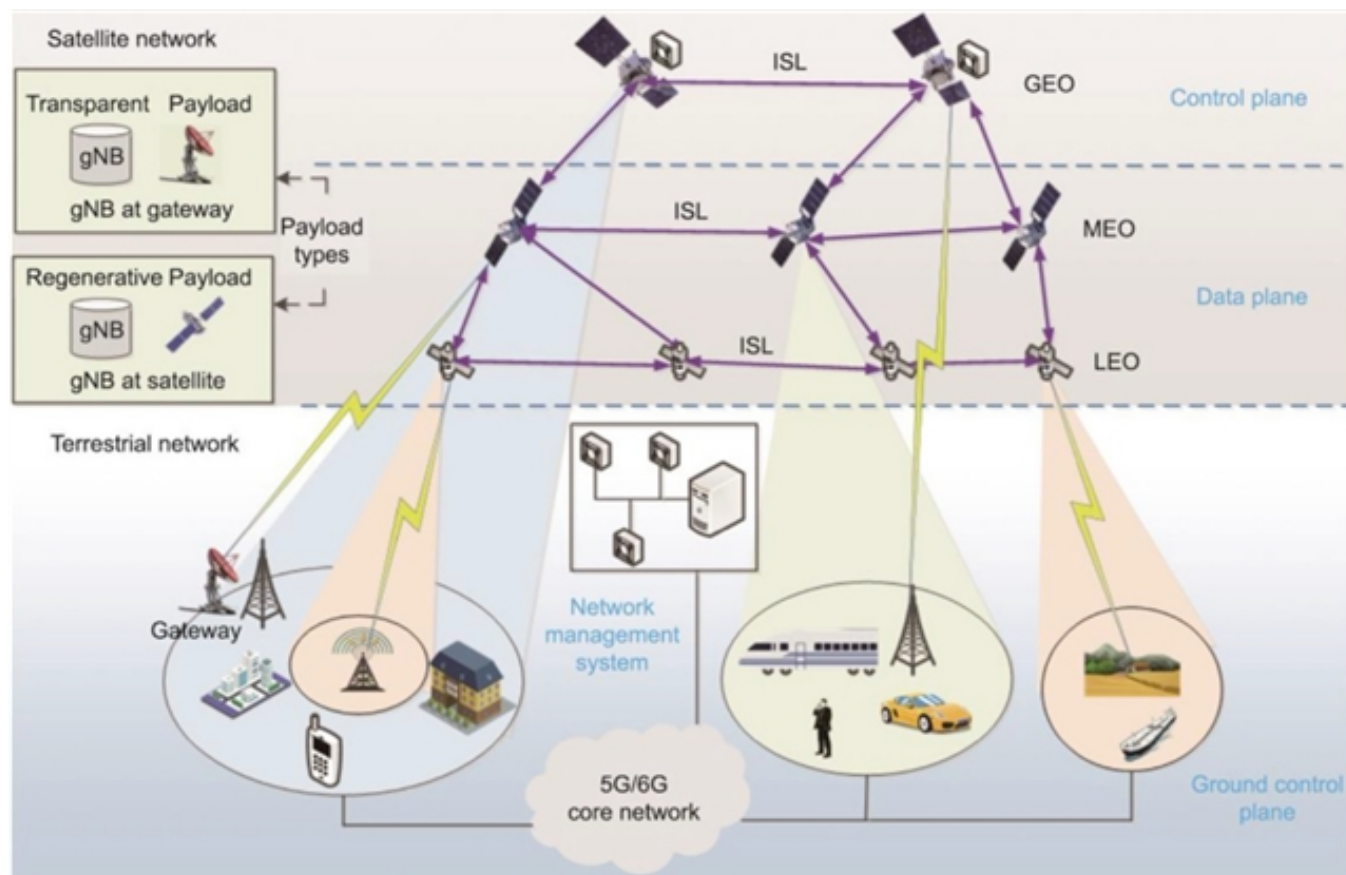


图1.卫星与5G/6G网络融合架构示意图

如图1所示，未来的天地一体化网络分工明确：GEO卫星身处高轨，凭借24小时与地球保持相对静止的特性，负责广域覆盖与网络管控；MEO卫星居中调度，兼顾覆盖范围与时延；LEO卫星则贴近地面、快速移动，承担大容量宽带接入与物联网连接的主力任务。三层轨道协同，加上地面基站和网关的配合，共同编织出一张真正意义上的全球网。

更值得关注的是两项关键技术的突破：

第一，星间链路（ISL）技术让卫星之间可以直接说话，不再需要事事通过地面转发。尤其是光学星间链路（OISL），数据传输速率可达400Gbps，是传统射频链路的千倍以上，且由于波束极窄，具备更强的抗干扰能力和更高的能效。

第二，再生载荷则赋予卫星在轨处理能力——卫星不再只是简单的信号中继站（弯管），而是能够在轨完成编解码、路由等核心通信功能的飞行基站，大幅降低传输时延，提升网络灵活性。

从3GPP到ITU：全球标准化机构如何为天地融合立规矩？

一项技术要真正走向大规模商用，离不开国际标准的支撑。围绕卫星与5G/6G的融合，全球主要标准化机构已展开系统性布局。3GPP是全球移动通信标准的主导者，其发布的每一个版本都代表着技术演进的一个里程碑。

Rel-17（2022年冻结）：首次将NTN作为5G核心架构的正式组成部分，引入物联网卫星直连、频分双工方案、全球导航卫星系统（GNSS）辅助定位等关键特性，开启了卫星与5G融合的元年。

Rel-18（2024年冻结）：5G-Advanced的首个版本，重点提升卫星网络的移动性管理、频率分配、覆盖扩展能力，并开始探索AI/ML在空口优化中的应用。

Rel-19/20（进行中）：进一步迈向6G，探索多轨道异步多连接、再生载荷、卫星广播等前沿方向，为NTN与6G的深度融合铺路。

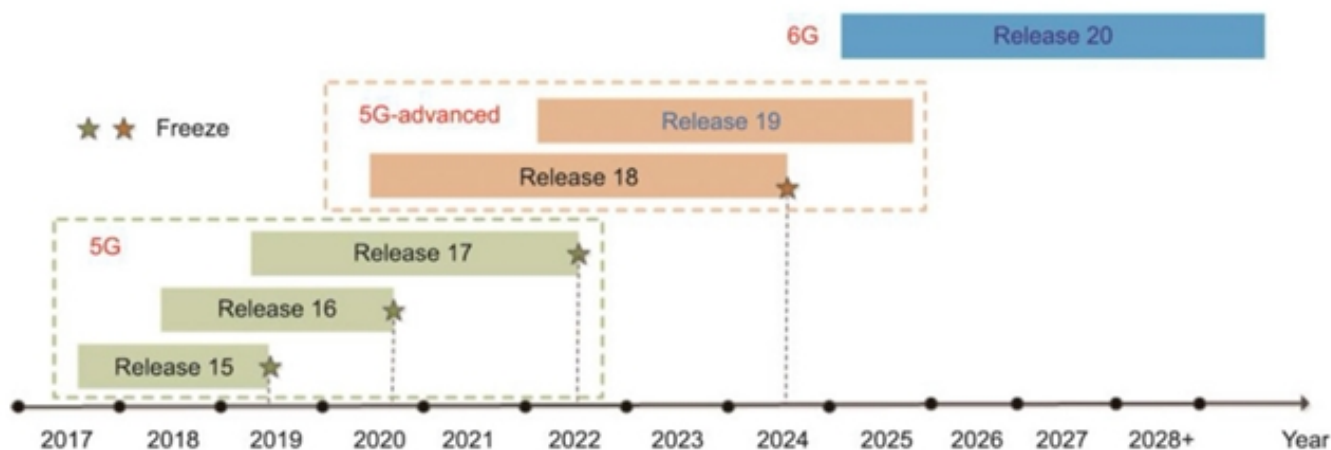


图2.3GPP相关版本时间轴

天地融合路上的五道坎

蓝图固然美好，现实却充满挑战。将卫星网络真正无缝融入5G/6G，还需跨越五道关键技术门槛：

第一，长传播时延。GEO卫星距地面约36,000千米，信号单程传输时间约125毫秒。即便是LEO卫星，也比地面光纤慢得多。如何通过网关优化部署、移动边缘计算等手段将时延压缩到可接受范围，是首要挑战。

第二，高多普勒频移。LEO卫星以约7.8千米/秒的速度高速飞行，造成严重的信号频移，影响链路稳定性。实时跟踪与多普勒补偿技术是维持可靠通信的必要手段。

第三，资源管理难题。频谱、带宽、算力——卫星与地面网络共享这些资源，却有着截然不同的约束条件。网络切片、频谱共享、AI驱动的智能调度，是实现高效资源利用的关键路径。

第四，动态波束覆盖。随着卫星移动，其波束覆盖区域不断变化，影响用户体验。自适应波束成

形技术可实时调整天线指向，保持稳定覆盖。

第五，移动性与切换管理。用户在卫星间、卫星与地面基站间的频繁切换，极易造成连接中断。动态波束成形与先进切换算法的结合，是解决这一问题的核心技术方向。

未来已来：五个方向定义下一代卫星通信

面对上述挑战，研究团队从通信协议栈的各个层次，梳理出五大最具潜力的前沿技术方向：

第一，直连手机（应用层）。无需专用设备，普通5G智能手机直接连卫星——这不是科幻，SpaceX Starlink、AST SpaceMobile已在探索落地路径。未来，高级频谱共享与网络切片技术将支撑大规模用户的卫星直连体验。

第二，巨型LEO星座（网络层）。数千颗低轨卫星协同组网，配合AI驱动的网络管理，将真正实现全球无死角覆盖，并通过规模效应大幅摊薄5G/6G部署成本。

第三，频谱共享（MAC/物理层）。天地一体化网络的频谱博弈，需要空间与时间维度的灵活复用、认知无线电架构，以及基于非正交多址（NOMA）的协作传输，在有限频谱资源下最大化网络容量。

第四，卫星波束自适应（数据链路层）。相控阵天线技术让卫星波束可以精准追踪地面热点区域，在不触发切换的前提下延长服务时间，大幅提升用户体验。

第五，光无线通信（物理层）。激光通信技术正在将星间链路的数据传输速率推向Tbps量级，并通过束控和自适应光学技术克服大气扰动，为卫星物联网应用提供高效、低干扰的无线接入新范式。

结论与展望

本文描绘的，是一幅宏观视野下的卫星通信演进全景图——从早期互不相通的孤立系统，到如今正在深度融合的天地一体化网络，再到面向2030及未来的全球无缝智能通信基础设施。

研究揭示了这一演进的核心逻辑：地面网络的覆盖极限，决定了卫星的不可或缺；而卫星技术的突破（低轨星座、再生载荷、星间链路），又正在让这种融合从可能变为现实。

当然，挑战依然真实存在。长延迟、频移、频谱竞争、动态覆盖——每一项都是横在工程师面前的硬骨头。但更重要的是，解题的工具也在加速成熟：AI驱动的网络智能、光学星间链路、可重构智能表面（RIS）……这些技术的汇流，正在为天地一体化网络的工程落地奠定越来越坚实的基础。

对于每一个曾在高铁上刷视频卡顿、在偏远山区求而不得信号的人来说，这项研究所指向的未来，不仅是一个技术命题，更是一个关于连接平等的承诺。（来源：EngineeringJournals微信公众号）

相关论文信息：<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809925003236>

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

作者：苑阿芳等 来源：《工程》

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发