

星链的发展态势及使用场景分析

(2026 年第 7 期，总第 16 期)

2026 年 7 月 28 日

主办单位：导航与时空技术国家级重点实验室

一、引言

低轨卫星互联网正在改变卫星通信以高轨卫星为主、以固定覆盖和有限容量为特征的发展模式。传统地球同步轨道通信卫星轨道高度约为 35786 km，往返时延通常显著高于低轨系统。以星链（Starlink）为代表的低轨巨型星座将卫星部署在约 540-570 km 高度，通过大规模卫星组网、地面网关、用户终端、频谱复用和星间链路构建全球宽带网络。

星链由美国太空探索技术公司（SpaceX）建设和运营，其核心目标是利用低地球轨道卫星向用户提供宽带互联网连接。系统从早期小规模试验星座逐步发展为大规模在轨网络，并持续推进卫星平台、星间激光链路、相控阵终端、网

络调度和直连手机等能力迭代。星链卫星平台已由早期 V1.0、V1.5 向 V2 Mini 及后续型号发展，系统服务也由固定宽带接入延伸至海事、航空、移动平台、应急通信、企业和政府用户等多类场景。

与传统地面网络相比，低轨卫星互联网的连接能力不完全依赖当地光纤、蜂窝基站或微波回传链路。对于偏远地区、海洋航线、航空器、临时部署地点和地面基础设施受损区域，卫星终端可以在具备供电条件和相对开阔天空视场的前提下，接入覆盖范围内的低轨卫星网络。

星链的技术和应用价值不仅体现在宽带通信。低轨卫星高速运动、星座规模较大、下行信号功率与带宽条件较好，使其通信信号被纳入定位、导航和授时（PNT）研究视野。星链 Ku 频段下行链路采用正交频分复用（OFDM）体制，并含有可被信号处理设备识别的同步和重复结构。研究人员可以通过接收、捕获和跟踪这些通信信号，提取多普勒频移、帧到达时刻或载波相位等观测量，进而结合卫星轨道模型、接收机状态及其他传感器信息，开展位置和速度估计研究。相关研究已揭示星链 OFDM 类信号中的可利用结构，并验证了以星链通信信号进行多普勒跟踪和机会信号定位的可行性。

不过，利用星链信号进行 PNT 研究，不等同于星链已经提供正式 PNT 服务。机会信号 PNT 是指用户在未获得星座

运营方专门协作的条件下，从现有通信、广播或其他无线电信号中提取位置、导航或时间信息。相较于 GPS、GLONASS、Galileo 和北斗等专门面向导航设计的全球导航卫星系统（GNSS），星链现有通信业务并不以公开播发导航电文、精密卫星轨道与钟差、统一时间基准和完整性告警信息为主要目标。星链机会信号对于 PNT 的价值主要体现为其研究潜力和多源融合潜力，而不是对 GNSS 的现成替代。

二、星链发展现状

星链（Starlink）是美国太空探索技术公司（SpaceX）主导建设的低地球轨道卫星互联网系统。截至 2026 年，星链已成为当前在轨规模最大、部署节奏最快的低轨卫星互联网项目之一。

（一）建设历程与阶段演进

1. 前期筹划阶段

星链是 SpaceX 在可重复使用运载火箭、卫星批量制造、全球卫星通信市场需求增长等条件逐步成熟后推出的系统性工程。SpaceX 自 2014 年前后开始推进低轨卫星互联网构想，并在 2015 年前后公开提出建设大规模卫星星座的设想，此后逐步完成频率资源申报、卫星技术验证、生产线建设和发射体系准备。

传统卫星通信依赖少量高轨卫星提供大范围覆盖，而星链选择通过数量庞大的低轨卫星形成网络化服务能力。低轨卫星距离地面较近，能够降低信号传播时延，但单星覆盖范围有限、相对地面运动速度快，因此必须以高密度星座、频繁切换和地面网络协同弥补单颗卫星的局限。这一选择意味着其后续竞争力不仅取决于单星性能，还取决于卫星数量、发射能力、终端成本、轨道资源、频谱资源以及全网调度能力。

星链建设初期需承担卫星制造、火箭发射、地面站建设、用户终端研发和市场推广等多项前置投入，具有重资产、长周期和高风险特征。SpaceX 拥有具有部分可复用能力的猎鹰 9 号运载火箭，可在一定程度上减少对外部运力的依赖，并通过较高发射频率降低大规模部署的时间成本。这种“卫星制造-自有发射-系统运营-终端销售”一体化布局，是星链区别于部分同类项目的重要基础。

2.初始部署阶段

星链于 2019 年开始实施实际卫星部署，由此进入从方案设计转向工程组网的关键阶段。该阶段的主要任务是验证批量发射、低轨星座运行、用户终端接入、星地链路维持及基础宽带服务等能力，并逐步构建区域性连续覆盖。

星链主体星座部署在约 550 km 的低地球轨道，显著低于约 35786 km 的地球同步轨道，传播距离更短、时延更低。

公开资料显示，星链典型时延通常可低至约 20 毫秒量级，而传统地球同步轨道卫星通信往返时延通常约为 600 毫秒量级。低时延特性使其不仅可面向一般互联网接入需求，也为实时交互、移动通信、远程控制等应用提供了基础条件。

低轨模式也带来了系统复杂度上升的问题。单颗低轨卫星高速运行，不能长期停留在同一地面区域上空，用户终端必须在卫星经过过程中持续跟踪，并在当前卫星离开可视范围前完成向后续卫星的通信切换。初始部署的重点并非简单增加卫星数量，而是形成能够支持连续覆盖、动态波束管理、终端自动捕获和网络切换的系统能力。

3.加速扩张阶段

进入 2022 年后，星链建设由早期区域覆盖和技术验证逐步转向规模化运营，业务形态从固定地点宽带接入逐步延伸至海事、航空、移动平台和应急通信等领域。

从星座规模看，星链持续快速扩张。公开跟踪数据显示，截至 2025 年 3 月，在轨卫星已达 7000 颗以上；到 2026 年 3 月，累计发射数量已突破 1 万颗；到 2026 年 7 月，累计发射数量已增至 12620 颗、在轨 10881 颗。星链星座已由数千颗量级发展至万颗量级，并持续实施在轨补充与更新。

2025 年至 2026 年，星链发展呈现出星座规模继续增加、卫星平台迭代、业务类型扩展、军民需求交织的综合特征。星链正以 V2 Mini 作为第二代网络的重要平台持续提升通信

能力，并推进 V3 等下一代卫星发展。根据官方公开信息，V3 设计下行能力为 1 Tbps、上行能力为 160 Gbps，配备 6 条 400 Gbps 的星间激光链路；V2 Mini 也较早期型号具有显著更高的单星容量。

星链在这一阶段已不再单纯追求卫星数量增长，而是更加强调数量扩张与单星能力提升相结合。大规模星座有助于增加任一地区同时可见卫星数量，提高服务冗余与连续性；卫星平台向更高吞吐能力、更强星间通信能力和更多波束资源演进，则有助于提升单位频谱和单位轨道资源的利用效率。

此外，星链正将“直连手机”（Direct to Cell）作为重要业务方向之一，目标是在获得监管与运营商支持的前提下，让普通 LTE 手机在有天空视野时直接接入卫星网络。这一布局意味着星链正由以专用卫星终端为主的宽带接入系统，向卫星与地面蜂窝通信融合的非地面网络方向延伸。

（二）星座部署、轨道构成与全球覆盖

1. 多壳层低轨布局的基本特点

Starlink 采用多壳层、多轨道面的部署方式，主力星座长期围绕约 540-550 km 的低地球轨道运行，壳层 1 约为 550 km，壳层 4 约为 540 km，并通过不同轨道面逐步加密部署。截至 2026 年，Starlink 已在约 550 km 和约 480 km 等低轨高

度形成大规模部署；部分与直连手机等任务相关的卫星部署在约 340-360 km 的更低轨道区间。

较低轨道能够缩短星地传输距离并降低时延，但卫星在地面观察者视场中的停留时间相对较短，对卫星数量和快速切换提出更高要求。多壳层布局可使星链在不同覆盖半径、信号仰角、服务密度和区域容量需求之间进行权衡，并为后续星座扩容预留轨道组织空间。这种由不同高度轨道壳层共同支撑的布局，有助于提高星座内部的冗余度和调度弹性，也意味着运行管理将面临更复杂的轨道维持、碰撞预警、卫星替换和离轨处置问题。

2. 规模扩张与系统冗余

低轨通信卫星的单星覆盖范围有限，且高速飞行导致可见卫星不断变化，只有当某一区域同时存在足够数量的可用卫星，系统才可能为不同用户提供连续通信服务。截至 2026 年，星链已形成万颗量级的累计发射规模和近万颗量级的运行卫星规模，这使其在卫星可见性、波束调度、局部故障补偿和网络持续运行等方面具备更强的冗余条件。

星座冗余并不等同于服务能力无限增长。卫星数量增加后，系统仍受到频谱总量、单星功率、波束数量、网关节容量、用户密度和地面监管条件等约束。在人口密集、终端集中接入的区域，即使可见卫星数量较多，网络容量也可能成为影响用户实际体验的重要因素。因此，星链需要在扩充卫

星数量的同时，不断提升单星吞吐能力、优化波束复用效率，并通过星间链路和网关网络实现跨区域容量调度。

3.星座构型维持与在轨管理

星座规模扩大后，轨道构型维持成为决定系统长期稳定性的关键环节。低轨卫星受大气阻力、轨道摄动、太阳活动等因素影响，会出现轨道高度和轨道面位置变化。星链卫星早期采用氮离子推进系统，后续 V2 Mini 升级为氙霍尔推进器，该类电推进系统可用于轨道抬升、姿态保持、避碰和离轨处置。

在大规模星座中，构型维持需要卫星自主控制、地面测控与太空态势感知能力协同配合。星链的星座管理已由“将卫星送入预定轨道”逐步转向“在数千乃至上万颗卫星条件下维持系统构型”，涉及批量补网节奏、不同代际卫星的共轨运行、碰撞规避优先级和末期离轨能力。随着星座继续扩张，轨道资源和太空交通管理将由技术性问题进一步演变为影响国际规则和太空安全的重要议题。

（三）发射保障、卫星迭代与在轨运行

1. 自主发射能力构成部署优势

星链能够在较短时间内形成大规模在轨星座，与 SpaceX 掌握发射运力具有直接关系。星链主要依托猎鹰 9 号火箭实施组网发射，借助火箭重复使用能力形成了相对高频的卫星

发射节奏。对于需要持续补充、替换和升级卫星的大型低轨星座而言，稳定、低成本和高频次的发射能力是维系星座规模与更新速度的基础能力。

传统卫星运营商若依赖外部发射服务，可能在运力排期、发射价格和发射窗口方面受到制约；星链依托 SpaceX 内部体系，可将卫星生产计划与火箭发射计划进行联动，提高规模部署的可控性。其竞争力并不局限于某一批卫星的性能，而在于其可以持续将卫星生产能力、发射能力和网络运营能力转化为规模优势。

2.卫星平台由早期型号向 V2 Mini、V3 升级

卫星代际演进是星链能力提升的另一条主线。星链已经历早期 V1.0 卫星、V2 Mini 卫星，并继续向 V3 卫星迭代。星链 V3 卫星设计为 1 Tbps 下行、160 Gbps 上行，配备 6 条 400 Gbps 星间激光链路；V2 Mini 的单星通信能力在几十到近百 Gbps 量级，星间链路能力可达 200 Gbps。

星间激光链路使卫星可以在轨道上直接转发数据，减少部分业务对地面网关中继的依赖。对于跨洋、极地、海上及地面基础设施薄弱区域而言，星间中继有助于延伸网络连通范围，并提升数据传输路径的灵活性。

3.在轨运行与系统韧性

星链系统在轨运行的韧性，主要来自卫星数量、轨道层级、地面设施、星间链路和快速补网能力的综合作用。大规模卫星部署可降低单星故障对全网服务的影响，分散式网络结构可提高局部受损后的业务恢复能力，快速发射和批量制造则为在轨替换提供外部保障。

（四）地面设施、频谱资源与网络架构

1.空间段、地面段与用户段协同

星链是由低轨卫星、地面网关站、网络控制设施、用户终端和互联网骨干网络共同构成的综合信息系统。用户主要依靠电子扫描相控阵天线终端与经过上空的低轨卫星建立连接；相控阵天线能够在不依赖大幅机械转动的情况下形成和调整指向性波束，以适应低轨卫星高速运动、频繁切换的运行环境。

从系统网络路径看，用户数据可以通过“用户终端-卫星-地面网关-互联网骨干网”方式传输；在具备激光星间链路的情况下，也可经由多颗卫星在轨中继后再下传至地面节点。前一种方式较依赖网关站的分布和地面回传条件，后一种方式则能够在一定程度上提高跨地域传输的灵活性。两类路径共同构成星链的网络调度基础，并决定不同区域的服务能力和网络冗余水平。

2.频段使用与信号体制

频谱资源是星链实现大容量通信服务的基本条件。星链主要使用 Ku 频段,同时也涉及 Ka 频段和第二代系统引入的 E 频段;其中, Ku 频段用户链路常见范围约为 10.7-12.7 GHz (下行)和 14.0-14.5 GHz (上行)。不同频段在带宽、传播损耗、降雨衰减、天线尺寸和业务适配性等方面存在差异,系统需要通过频段规划、波束设计和地面协调实现资源利用。

星链下行信号采用正交频分复用 (OFDM) 体制。公开研究对其 Ku 频段下行链路的分析显示,该信号具有约 240 MHz 级的信道带宽/采样配置,采用 1024 点 FFT 和 32 个循环前缀采样,帧结构中还包含主同步序列和辅助同步序列,用于宽带数据传输、同步捕获和链路维持。这一信号体制也构成后续研究利用星链通信信号开展机会信号定位的重要前提。

3.服务性能与实际约束

星链的用户宽带服务通常可达到约 100 Mbit/s,部分场景可更高;时延一般处于约 20-50 毫秒区间,在网络条件较好时可接近 20-25 毫秒。相较于高轨卫星通信,这种低时延特性有助于改善视频会议、在线协作、云服务和实时数据传输等使用体验。

（五）商业化进展与政府市场拓展

1.多层次用户市场的形成

星链的商业化路径呈现出从个人消费者市场向企业、政府及行业应用逐步拓展的趋势。普通消费者宽带服务仍是星链业务的重要基础，但企业专线、海事、航空、移动平台和政府需求已成为扩展收入来源的重要方向。三类市场相互补充，使系统从单一卫星互联网服务逐步发展为面向多类场景的综合连接平台。

截至 2025 年，星链用户数量已超过 500 万，并在约 140 个国家和地区提供服务。用户数增长并不必然等同于盈利能力同步增长，因为卫星补网、终端补贴、运营维护、频谱协调和国际市场进入均需要持续投入；但较大用户基数可为网络利用率提升、终端生态扩展和商业模式迭代提供支撑。

2.业务延伸与收入预期

星链的商业化路径正从家庭或固定场所宽带接入，逐步扩展到海事通信、航空通信、移动/车载应用、偏远地区覆盖以及直连手机等方向。2025 年星链的营收约为 114 亿美元，整体业务盈利能力较强；在收入结构上，个人消费者仍是主要来源，但企业、海事、航空及政府相关业务增长迅速。

从商业可持续性角度看，星链的收入增长依赖于持续扩大可服务区域、增加用户数量、提高企业与政府客户占比，

并通过新型终端和新业务提升单用户价值。同时，大规模星座需要持续进行卫星更新和发射补网，因此其成本结构也具有持续投入特征。未来星链能否在维持高速扩张的同时实现稳定盈利，仍取决于用户增长、终端成本下降、发射效率、监管许可和同业竞争等多方面因素。

3.政府需求与军民两用属性

低轨卫星互联网具有天然的军民两用属性。星链已经面向政府市场提供服务，并在军用通信、指挥控制、移动平台连接和战场信息保障等方向显现应用潜力。其系统特点包括低轨星座数量大、通信链路分散、用户终端可快速部署、网络节点可灵活调整等，这些特征使其在地面通信基础设施不足或受损的情况下具备一定保障价值。

星链商业网络、政府订单和军事需求之间的相互衔接，显示出其商业卫星互联网基础设施可在特定条件下向政府和军事任务提供通信支撑。其运行效果将受技术性能、区域服务状态、终端部署、频谱条件、制度授权和任务环境等因素共同影响。

三、星链使用场景分析

星链的现实使用场景已由早期面向固定地点的卫星宽带接入，逐步拓展至偏远地区连接、海事与航空通信、应急保障、政府及军事通信、直连手机和天地融合网络等领域。

其应用价值主要来自低轨星座的广域覆盖、相对低时延、可移动终端接入以及星间激光链路支持下的跨区域网络传输能力。

（一）个人与偏远地区宽带接入

1.固定宽带接入

面向个人消费者的固定宽带接入，是星链最早形成规模化服务的基础场景。用户通过相控阵天线终端与低轨卫星建立通信链路，卫星再经由地面网关或星间激光链路接入互联网骨干网络；这一架构使其可以覆盖山区、荒漠、岛屿、牧区和其他人口分散、地面网络建设成本较高的区域。

星链典型宽带服务的下行速率常见可达 100-200 Mbit/s，延迟通常在 25-50 毫秒范围内，在较优条件下可接近 20-25 毫秒。这样的性能足以支撑一般网页访问、视频会议、云端协作、在线教育以及音视频娱乐。

2.偏远地区的连接价值

对于用户分布分散、地形复杂、地面网络投资回报周期长的区域，卫星互联网可通过运输和部署用户终端的方式快速建立连接。星链低轨星座覆盖与用户终端接入相结合，为边远社区、远程作业点和临时驻地提供了不同于地面网络的接入选项。

该场景的核心适用条件，是地面通信网络供给不足而用户存在持续中等以上带宽需求。其主要限制包括终端初始成本、设备供电、安装环境、气象因素、区域卫星容量和运营许可。星链更适合作为地面固定网络难以经济覆盖区域的补充性基础设施，或作为对既有网络的冗余连接方式。

（二）行业移动通信场景

1.海事通信

海事通信是星链具有较高商业价值的行业应用方向。海洋区域远离陆地基站覆盖范围，低轨卫星互联网通过较高带宽与较低时延能力，可扩展船员互联网接入、船岸视频通信、设备远程维护、运营数据回传和数字化船队管理等业务。

海事场景对技术要求较高。船舶处于持续摇摆和高速移动状态，终端必须保持稳定的卫星捕获和波束跟踪；海洋环境存在盐雾、强风、降雨和设备维护困难等问题；跨越不同海域和沿岸国家时，服务可能受到区域许可、频谱协调与运营规则影响。

从业务价值看，海事应用的关键并非单一终端的网速提升，而是船舶从间歇低速连接向持续数据连接转变的可能性。稳定的数据链路有助于船岸协同、远程诊断、船员福利和运营调度。

2.航空通信

航空通信是星链另一类高价值应用场景。航空器在飞行过程中长期处于地面蜂窝网络无法覆盖的区域，低轨卫星互联网相较传统高轨卫星系统具有较低传播时延，在机上宽带接入和实时数据传输方面具有一定适配性。

星链航空服务的应用可分为两类：一类是面向旅客的机上互联网接入；另一类是面向航空运营方的运行数据连接，可支撑飞行计划更新、设备状态回传、机组通信及机务维护信息传输。前者更强调用户体验与带宽容量，后者更重视连接可用性、数据安全和业务优先级。

3.陆地移动与临时作业场景

星链可用于车辆、移动作业平台、野外巡检队伍及临时活动场所的互联网接入。此类场景的共同特征为用户位置并不固定，且可能处于地面移动网络覆盖不稳定或容量不足的区域。低轨卫星系统可通过移动终端为车辆或临时站点提供回传链路，并与本地 Wi-Fi、蜂窝网络或专用通信系统结合使用。

移动场景的优势在于部署迅速：终端具备供电、可视天空和服务授权条件时，可在不依赖本地固定线路的情况下建立网络连接。但移动状态会增加卫星跟踪和链路切换频率，复杂地形、城市高楼、树木遮挡和极端天气也可能降低实际可用性。移动使用更适合作为车队、工程项目、媒体直播、野外科考等场景的补充链路或主备链路之一。

（三）政府与军事通信应用

1.政府通信与公共任务

星链面向消费者、企业和政府三类市场开展服务，其中政府应用通常包括应急管理、公共安全、边境或海上巡护、远程政务及其他在地面网络不足或不稳定条件下需要维持通信的任务。政府相关业务正在成为其商业化的重要组成部分。

与普通商业用户相比，政府用户往往更关注服务连续性、终端管理、身份认证、数据安全、链路优先级和区域可控性。星链的大规模星座和分布式网络架构，可以为政府任务提供较广域的通信覆盖选择。

2.俄乌冲突中的实践

俄乌冲突是观察星链军事和准军事应用的典型案例。星链在冲突地区被用于补充通信保障，并使低轨商业卫星互联网在战场信息连接、分散单元通信和地面网络受损条件下的网络恢复能力受到广泛关注。

2022年初，乌克兰战场上的通信系统濒临崩溃，传统军事通信设备难以抵挡俄罗斯的电子战干扰。就在此时，SpaceX 宣布免费向乌克兰提供星链服务。乌军通过星链协调炮兵打击，远程操控无人机、调整部队部署；前线士兵依赖

星链与指挥部保持联系，实时接收战术指令；后方的网络战和宣传团队，则利用星链传播信息、控制舆论。

从使用逻辑看，冲突环境中的地面通信设施可能遭受破坏、干扰或网络中断，传统集中式通信节点的脆弱性随之上升。星链可由分散部署的终端接入大规模低轨星座，让使用方能够在一定程度上绕开局部受损的地面传输网络，并通过卫星链路维持数据、语音和图像等信息传递。这一案例显示，商业卫星互联网一旦进入冲突地区，其功能可由民用接入迅速延伸至战场通信保障、态势信息共享和远程协同等用途。

但该案例同样揭示出商业网络用于军事任务的边界。星链的服务可用性并不完全由终端使用者决定，运营商的服务策略、区域开通状态、合同安排和政策约束都会影响实际使用范围。2025年2月，美国向乌克兰施压，要求签署一项关键矿产协议，以换取持续的军事援助。然而，乌克兰政府最初拒绝了这一提议。不久后，出现了SpaceX可能关闭星链的传言，乌克兰在沙特与美国高级官员会谈后，最终决定签署协议。

因而，商业卫星互联网虽然能够提供分散式通信资源，却不具备传统国家专用军事通信系统在指挥权限、任务确定性和服务保障方面的完全可控性。

3.指挥通信、无人系统与战场数据链

从应用类型看，星链在军事领域可承担若干通信功能：为分布式地面单元提供数据回传和语音通信条件；为机动平台、临时指挥所和后方节点提供网络连接；为无人系统运行中涉及的图像、遥测或任务信息传输提供链路支撑；为后方情报处理、地图更新和跨区域协同提供网络基础。

对星链军事应用潜力的分析指出，低轨通信系统的较低时延、高带宽和大规模星座特征，有助于适应快速信息传输和分布式节点连接需求。不过，通信链路只是作战信息体系的一环。终端暴露风险、电子干扰、网络攻击、设备后勤、供电保障和服务授权变化，均可能影响系统在高强度对抗环境中的实际表现。

（四）直连手机、物联网与天地融合网络

1. “直连手机”的业务定位

“直连手机”（Direct-to-Cell）是星链近年来重点推进的新型服务方向，其目标是在不依赖专用卫星天线终端的条件下，使部分普通 LTE 蜂窝终端通过卫星获得基础通信服务。官方资料显示，该路线兼容 CAT-1、CAT-1 bis 和 CAT-4 终端，且要求调制解调器符合 3GPP Release 10 或更新版本。

相较于传统星链宽带服务需要用户安装相控阵终端，直连手机服务更强调降低用户侧接入门槛。其主要应用价值并非立即提供与家庭宽带相同的高速率服务，而是在地面蜂窝

网络信号缺失或中断的地区，为普通手机提供短信、基础数据或其他低速连接能力，并逐步与运营商的地面网络形成补充。

星链在直连手机方向已展开服务布局，并将其视为面向移动用户和天地融合网络的重要延伸。从应用逻辑看，该模式可将卫星网络的服务范围从已购买专用终端的特定用户，进一步扩展至普通移动用户，尤其适用于偏远地区、野外活动、山区、海岛、灾害现场和移动通信覆盖盲区。

2.与地面蜂窝网络的互补关系

直连手机的核心定位是补盲和应急，而非简单替代地面移动通信网络。地面蜂窝系统依靠密集基站实现较高容量和较稳定的频谱复用，适合人口密集地区的大规模语音和移动数据业务；卫星直连手机则受到卫星高度、链路预算、可用频谱、终端发射功率和覆盖波束容量限制，更适用于基站难以覆盖或灾后暂时失去服务的区域。

从天地融合网络角度看，直连手机可被理解为地面移动网络的延伸层：当地面基站覆盖充分时，终端优先使用地面网络；当地面信号缺失或中断时，卫星网络可作为补充通道。这一模式有助于扩大移动通信的地理覆盖范围，但其实施依赖卫星运营商、移动运营商、频谱使用权和终端兼容性之间的协调。

3.物联网与低速连接场景

直连卫星能力也可为低速率、广分布、低频次的数据采集需求提供技术路径。远程传感设备、野外监测终端、物流追踪装置、海上浮标和基础设施监测设备，通常不需要持续的高带宽连接，却需要在缺少地面基站的区域进行状态上报或告警传输。官方资料显示，该服务兼容 CAT-1、CAT-1 bis 和 CAT-4 模块，并基于 3GPP Release 10 及以上 LTE 标准，表明其与现有蜂窝物联网模块生态存在明显衔接空间。

物联网应用的广泛落地仍取决于功耗、终端成本、通信资费、消息时延、区域覆盖和行业协议适配。对于需要高频大容量回传的设备，低轨宽带终端可能更合适；对于仅需周期性上报的设备，直连手机或其他低速卫星物联网方案可能更具经济性。

四、星链系统在 PNT 领域的应用

星链的主业是低轨卫星互联网，而非面向公众提供定位、导航与授时（PNT）服务。其 PNT 价值主要表现为：研究人员可利用星链下行通信信号中的时频与结构信息开展机会信号定位、融合导航和授时研究；这与运营方主动发布导航信号、精密星历钟差及完整性告警的正式 PNT 服务存在区别。

（一）星链具备 PNT 研究价值的原因

星链成为低轨 PNT 研究的重要对象，主要在于其星座规模大、低轨卫星相对运动快、Ku 频段下行信号带宽较大且存在可被接收机识别的帧结构。其主体卫星通常运行在约 550 km 高度，显著低于约 35786 km 的地球同步轨道。星链下行链路覆盖 10.7 至 12.7 GHz Ku 频段，采用正交频分复用（OFDM）体制，信号中包含主同步信号、辅助同步信号及其他可重复利用的结构元素。研究人员通过接收、捕获和跟踪这些通信信号，提取多普勒频移、帧到达时刻或载波相位等观测量，结合轨道模型和其他传感器信息开展位置和速度估计研究。相关研究已验证利用星链 OFDM 类信号进行多普勒跟踪和机会信号定位的可行性。

（二）机会信号 PNT 的本质与边界

机会信号 PNT 是指用户在未获得星座运营方专门协作的条件下，从现有通信、广播或其他无线电信号中提取位置、导航或时间信息。星链公开运行的核心业务是互联网连接，其下行信号首先服务于通信，研究人员对这些信号进行非协作接收、捕获、同步和参数估计，属于机会信号 PNT 研究。机会信号 PNT 的优点是无需等待专用导航星座建设完成，能够复用现有通信基础设施；其缺点是信号和服务资源不受

PNT 用户控制，系统参数变化可能直接影响接收和解算能力。

2025 年 12 月，据美国俄亥俄州立大学消息，该校电气与计算机工程系教授、智能交通系统 TRC 讲席教授扎克·卡萨斯（Zak Kassas）团队在一项研究中证实，利用 SpaceX 的“星链”和欧洲通信卫星公司（Eutelsat）旗下“一网”（OneWeb）低轨（LEO）卫星星座发射的无线电信号，结合船舶高度数据，可将北极地区导航误差从无 GPS 时的逾一公里大幅压缩至 27 米，为全球 PNT 体系提供了不依赖全球导航卫星系统（GNSS）的实用备份手段。

研究针对 GNSS 信号在全球范围内日益频发的蓄意干扰与欺骗攻击，提出利用现有低轨通信卫星星座的“环境信号”实现被动导航的新路径。实验数据采集自格陵兰岛西海岸航行的船舶，接收机仅需被动“窃听”“星链”与“一网”的下行链路传输频率，并辅以船舶高度信息，即可实现显著优于纯惯性推算的定位精度。研究团队无需卫星运营商提供任何协助，也未接入卫星传输的实际数据，仅依据公开可查的下行频率及卫星轨位的粗略预估完成信号捕捉与解算。当飞机或船只丢失 GPS 信号时，目前尚无即插即用的现成替代方案，而该项工作展示的解决方案可基于现有系统直接部署。

该研究建立在卡萨斯领导的俄亥俄州立大学交通部多模态保障导航自动驾驶车辆研究中心（CARMEN）与自主系

统定位与导航（ASPIN）实验室的前期积累之上。ASPIN 团队此前已率先实现对“星链”信号的定位利用，并逐步通过地面固定接收器（圣路易斯）、地面车辆（匹兹堡、哥伦布）、极高空气球（阿尔伯克基）及无人机（哥伦布）等平台，在美国本土验证了多星座低轨卫星导航的可行性。此次转向北极进行试验，是因“一网”约 600 颗卫星重点覆盖南北极区域，而“星链”逾 7000 颗卫星则遍布其他纬度，二者互补构成近乎全球覆盖的信号源。研究强调，低轨卫星信号强度比中高轨的 GNSS 信号强数千倍，敌方欲实施干扰需付出更高代价，因而具备更强的抗干扰与安全保障能力。

（三）星链与 GNSS 的系统性差异

在设计目标上，GPS、GLONASS、Galileo 和北斗等全球导航卫星系统从设计阶段即以定位、导航和授时为目的，卫星播发导航电文包含卫星时间、轨道参数、钟差改正及其他导航辅助信息。星链系统设计目标是为用户终端提供卫星互联网连接，信号结构、波束策略和时钟管理首先服务于通信业务。

在轨道与几何特征上，GNSS 卫星位于中地球轨道，单星可见时间较长、几何变化平缓；星链卫星位于低轨，可见时间较短、相对速度高、多普勒变化明显。两种系统在 PNT 应用上具有互补性。

在信号特征上，低轨宽带通信星座相对于传统 GNSS 具有较高发射功率和较大带宽潜力，可能有助于提高信号可检测性。但这并不意味着星链已具备可稳定交付的 PNT 能力。这些特征只有在运营方主动转化为 PNT 服务并建立公开接口、认证、完整性和服务保障体系后才能成为可依赖的系统能力。

（四）GNSS 受限环境中的潜在作用

全球导航卫星系统（GNSS）在开放环境中已形成广泛应用基础，但信号到达地面功率较低，易受建筑遮挡、复杂多径、干扰压制和欺骗攻击影响。在城市峡谷、室内近窗区域、山地峡谷、林区、地下或高干扰环境中，GNSS 可见卫星减少、几何条件恶化，导航性能下降。星链低轨信号在此类环境中的潜在作用是增加可观测信号源：低轨卫星高速运动带来与 GNSS 不同的多普勒特征和几何变化，可与 GNSS、惯性测量单元、视觉、地图或其他无线电信号共同进入融合算法，改善导航解算的可观测性。

得克萨斯大学奥斯汀分校无线网络与通信组（WNCG）及无线电导航实验室主任托德·汉弗莱斯（Todd Humphreys）指出，星链作为 GNSS 备份的优势在于其系统差异巨大：频率高 10 倍、带宽宽 10 至 100 倍、信号功率强 100 至 1000 倍、卫星数量多 100 倍。

2025 年 5 月 19 日，SpaceX 在针对美国联邦通信委员会（FCC）《关于促进定位、导航与授时技术及解决方案发展的质询通告》（WT Docket No. 25-110）提交的回复意见中，系统阐述了星链低地球轨道（LEO）卫星星座当前提供并可持续增强 PNT 服务的能力。

SpaceX 在意见中明确指出，“一个格外成熟且触手可及的机遇在于：推动下一代低地球轨道卫星星座的快速部署，使其能在提供高速、低时延宽带与泛在移动连接的同时，将 PNT 作为一项服务交付。”该公司透露，其面向蜂窝网络的星链服务已进入公开测试阶段，计划于 7 月通过 T-Mobile 正式推出，并已为该系统研制 PNT 能力。

在技术细节层面，SpaceX 指出星链终端已能利用卫星到达时间测量，提供纳秒级授时精度与米级定位。授时信号源自 LEO 星座并经由星链宽带基础设施同步，使网络可在不依赖外部 GPS 源的情况下支持蜂窝网络同步等精密授时应用。星链架构依托数千颗低轨卫星实现全球覆盖与短信号传输时间，其相控阵用户终端采用定向天线增强信号完整性并抑制干扰，同时系统采用端到端加密，使授时与定位信息不易遭受欺骗或篡改。SpaceX 强调，上述能力已由包括美军及民用客户在内的多种用户在传统全球导航卫星系统（GNSS）信号降级环境中完成实际测试，而非仅停留在理论层面。

针对 FCC 所关注的“分层”国家 PNT 韧性路径，SpaceX 将星链定位为增强国家 PNT 韧性的互补解决方案之一，主张运用多样化、独立运行的天基与地面系统提供冗余、降低对单一技术或频谱波段的依赖。公司在回应其他利益攸关方对星链是否构成 PNT 系统的关切时重申，该系统独立于政府资金开发，并凭借 SpaceX 垂直整合的制造与发射模式可快速规模化部署。SpaceX 确认星链运行于分配给宽带服务的 Ku 与 Ka 频段频谱，未提议为 PNT 专用功能申请新增频谱分配，并断言 PNT 功能可在现有分配框架内实现。

但是，关于星链用于 PNT 一事 SpaceX 在 2026 年口风又有转变。

2026 年 5 月 11 日，据科技媒体 Ars Technica 报道，SpaceX 旗下星链卫星互联网服务已通过邮件通知用户，将于 2026 年 5 月 20 日关闭其用户天线的位置数据访问功能。该功能此前曾允许用户通过星链移动应用的调试数据模块，获取天线的精确经纬度与海拔，并可选择“完全使用星链定位”，但其存在一直未被多数用户察觉。

星链定位功能的核心机制是用户天线与单颗卫星间的往返时间测量。天线采用相控阵天线，可聚焦追踪快速移动的卫星，且通信使用加密信号并支持用户认证，使其天然抗欺骗与干扰。据软件开发者保罗·萨瑟兰（Paul Sutherland）披露，该功能此前无需认证即可向本地网络提供位置数据。

案例显示，安装了星链 Mini 天线的帆船在红海航行时，即便身处 GPS 干扰与欺骗环境，仍能完全依赖星链定位数据。

五、结论与展望

星链已由低轨宽带通信项目发展为覆盖固定接入、海事、航空、应急、直连手机及政府等多类需求的综合性非地面网络。其影响来源不只在于大规模卫星部署，更在于卫星制造与发射、用户终端、地面网关、星间激光链路、网络调度和多层次市场共同构成的体系能力。卫星平台由早期型号向 V2 Mini、V3 等方向迭代，推动系统由规模扩张转向容量、效率与服务形态的同步提升。

在通信层面，星链为偏远地区、海洋、航空器、移动平台和地面网络受损区域提供了不同于传统固定网络的接入路径，并推动卫星通信与 5G/6G 非地面网络、直连手机和物联网业务的融合。

在 PNT 层面，星链 Ku 频段通信信号已成为低轨机会信号定位、差分多普勒、载波相位处理及 GNSS/IMU 融合研究的重要对象。公开研究已验证利用星链信号实现约 10 米量级多普勒定位的可行性，但星链当前仍不构成正式 PNT 服务：轨道与钟差精度、帧时钟调整、信号结构变化、用户对信号资源缺乏控制，以及完整性和异常告警机制不足，均限制其直接承担安全关键定位或高精度授时任务。

大规模低轨星座增加了系统运行的不确定性。卫星数量上升会提高轨道构型维持、碰撞预警、失效卫星处置和太空交通协调的复杂度；太空碎片风险、轨道资源竞争、频谱协调以及对天文观测的潜在干扰，均可能成为影响巨型星座持续扩张的重要外部约束。同时，星链服务依赖商业运营策略、地面网络节点、终端供应和区域许可，商业通信系统在应急、政府或冲突地区场景中的使用，可能使其通信资源呈现军民两用和战略外溢特征。

未来，星链及同类系统可能继续沿着“通信能力升级、终端轻量化、天地网络融合和多源 PNT 探索”方向演进。其能否进一步转化为通信导航一体化服务，取决于运营方是否提供稳定的专用信号、统一时间基准、精密轨道钟差、认证机制和完整性保障；其全球扩展速度则受到频谱规则、市场准入、太空环境、安全治理和商业可持续性的共同影响。

参考文献

[1] GEOFF HUSTON. Starlink Protocol Performance [R].

[2] 鶴田悟史. 衛星ブロードバンド「Starlink」による地域・産業・防災への活用事例[R]. 2024.

[3] Starlink Progress Report 2025[R]. SpaceX, 2025.

[4] 代传金, 秦培杰, 李林. CPU+GPU 并行加速的星链信号实时高精度频率估计算法[J]. 航空学报, 2025, 46(24).

[5] CURZIO A. Starlink Receiver Prototyping for Opportunistic Positioning: Master Thesis in ICT for Internet and Multimedia - Telecommunications[R/OL]. University of Padova, 2023. https://thesis.unipd.it/retrieve/8312d2be-62d4-42b1-a60d-0d53efa0b030/Curzio_Alessio.pdf.

[6] Starlink Direct to Cell Service Now Available[R/OL]. SpaceX, [2026]. https://starlink.com/public-files/DIRECT_TO_CELL_SERVICE_FEB_25.pdf.

[7] Direct to Cell First Text Update[R/OL]. SpaceX, [2026]. https://starlink.com/public-files/DIRECT_TO_CELL_FIRST_TEXT_UPDATE.pdf.

[8] SECOND GENERATION STARLINK SATELLITES[R/OL]. SpaceX, [2026]. <https://starlink.com/public-files/Gen2StarlinkSatellites.pdf>.

[9] BACHL R, NABEEL M, LEI T. Opportunistic positioning with LEO satellites based on SSB from NR NTN [EB/OL]. arXiv, 2026. <http://arxiv.org/abs/2607.00967>.

[10] QIN W, PSIAKI M L, BOWMAN J R, 等. Pilot s and other predictable elements of the starlink ku-band downlink[EB/OL]. arXiv, 2026. <http://arxiv.org/abs/2602.02627>.

[11] Starlink | technology[EB/OL]. . <https://starlink.com/ke/technology>.

[12] Starlink | business case studies[EB/OL]. . <https://starlink.com/ke/business/case-studies>.

[13] The state of satellite connectivity (2025)[EB/OL]. (2025-11-06). <https://www.spglobal.com/market-intelligence/en/news-insights/research/2025/11/the-state-of-satellite-connectivity-2025>.

[14] Forecast: 8.2m starlink subs by December | advanced television[EB/OL]. (2025-10-01). <https://www.advanced-television.com/2025/10/01/forecast-8-2m-starlink-subscribers-by-december/>.

[15] BRITZMAN M. Inside SpaceX's IPO filing – revenue, starlink, AI and key financials[EB/OL]. (2026-06-05). <https://www.hl.co.uk/news/inside-spacexs-ipo-filing-revenue-starlink-ai-and-key-financials>.

[16] ERWIN S. Starlink set to hit \$11.8 billion revenue in 2025, boosted by military contracts[EB/OL]. (2024-12-16). <https://spacenews.com/starlink-set-to-hit-11-8-billion-revenue-in-2025-boosted-by-military-contracts/>.

[17] Starlink doubles subscriber base; expands to 42 new countries, territories & markets – IEEE ComSoc tech

nology blog[EB/OL]. (2025-12-30). <https://techblog.comsoc.org/2025/12/30/starlink-doubles-subscriber-base-expands-to-to-42-new-countries-territories-other-markets/>.

[18] QIN W, GRAFF A M, CLEMENTS Z L, 等. Timing properties of the starlink ku-band downlink[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2026, 62: 727-744.

[19] JARDAK N, ADAM R. Practical use of starlink downlink tones for positioning[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2023, 23(6): 3234.

[20] MCCORMICK M S, LARSSON T, TAMRAT A, 等. Configurable orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) signal and transmitter and receiver for user terminal to satellite uplink communications: US12003350B1[P/OL]. 2024-06-04. <https://patents.google.com/patent/US12003350B1/en>.

[21] Starlink business | maritime[EB/OL]. . <https://starlink.com/pr/business/maritime>.

[22] JACKSON M. Starlink prep second generation direct-to-cell 5G mobile satellites for 2027[EB/OL]. (2026-01-22). <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2026/01/starlink-pr>

ep-second-generation-direct-to-cell-5g-mobile-satellites-for-2027.html.

[23] JACKSON M. Starlink 2024 report details 1Tbps speed LEO v3 broadband satellites[EB/OL]. (2025-01-04). <https://www.ispreview.co.uk/index.php/2025/01/starlink-2024-report-details-1tbps-speed-leo-v3-broadband-satellites.html>.

[24] WHITT K K. 10,000 starlink satellites orbiting earth ... and counting[EB/OL]. (2026-03-22). <https://earthsky.org/spaceflight/10000-starlink-satellites-orbiting-earth-counting/>.

[25] CLARK S. SpaceX begins “significant reconfiguration” of starlink satellite constellation[EB/OL]. (2026-01-02). <https://arstechnica.com/space/2026/01/spacex-begins-significant-reconfiguration-of-starlink-satellite-constellation/>.

[26] Starlink satellite constellation - eoPortal[EB/OL]. (2026-05-07). <https://www.eoportal.org/satellite-missions/starlink>.

[27] Starlink | starlink version 3 satelliten[EB/OL]. . <https://starlink.com/de-lu/updates/starlink-version-3-satellites>.

[28] Jonathan’s space report | space statistics[EB/OL]. (2026-07-25). <https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>.

[29] FCC approves SpaceX plan to deploy an additional 7,500 starlink satellites[EB/OL]. (2026-01-10). <https://www.fcc.gov/news-releases/fcc-approves-spacex-plan-to-deploy-an-additional-7500-starlink-satellites>.

w.cnn.com/2026/01/10/fcc-approves-spacex-plan-to-deploy-7500-starlink-satellites.html.

[30] TUESDAY R Z P T milestone was reached on the first of two F 9 launches on. SpaceX launches 10,000th active starlink satellite in low earth orbit (video)[EB/OL]. (2026-03-17). <https://www.space.com/space-exploration/launches-spacecraft/spacex-launches-10-000th-active-starlink-satellite-into-low-earth-orbit>.

[31] ORBITS M W "Lowering the satellites results in condensing S, WAYS." W I S S in S. SpaceX lowering orbits of 4,400 starlink satellites for safety's sake[EB/OL]. (2026-01-02). <https://www.space.com/space-exploration/satellites/spacex-lowering-orbits-of-4-400-starlink-satellites-for-safety-sake>.

[32] Starlink plans to lower satellite orbit to enhance safety in 2026 | reuters[EB/OL]. (2026-01-02). <https://www.reuters.com/business/aerospace-defense/starlink-plans-lower-satellite-orbit-enhance-safety-2026-2026-01-01/>.

[33] TEREZA PULTAROVA. Starlink satellites: facts, tracking and impact on astronomy[EB/OL]. (2026-06-01). <https://www.space.com/spacex-starlink-satellites.html>.

[34] YANG S, KHODABANDEH A, ZAMINPARDAZ S, 等. Ambiguity-resolved short-baseline positioning performance of LEO frequency-varying carrier phase signals: a feasibility study[J]. Journal of Geodesy, 2025, 99(2): 17.

[35] SHAHCHERAGHI S, KASSAS Z M. A computationally efficient approach for acquisition and doppler tracking for PNT with LEO megaconstellations[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2024, 31: 2400-2404.

[36] NARDIN A, DOVIS F, ZANIER F, 等. Adaptable meta-signal tracking for next-generation satellite navigation systems and LEO PNT[J]. IEEE Access, 2025, 13: 5706-5718.

[37] 杨冬雪. 基于非合作低轨通信卫星的定位技术研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2024.

[38] KOZHAYA S, SAROUFIM J, KASSAS Z (Zak) M. Unveiling starlink for PNT[J]. Navigation- Journal of the Institute of Navigation, 2025, 72(1): navi.685.

[39] 魏伍, 张更新, 万博闻. 基于机会信号的卫星终端定位方法[J]. 无线电通信技术, 2025(第 4 期): 763-770.

[40] QIN W, KOMODROMOS Z M, HUMPHREYS T E. An analysis of the short-term time stability of the starlink ku-band downlink frame clock[C/OL]//2024 IEEE Inte

International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). 2024: 106-111[2026-07-27]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10850407/>.

[41] HE J, NI S, LIN H, 等. Survey on positioning technology based on signal of opportunity from low earth orbit[J]. Frontiers in Physics, 2025, 13: 1592447.

[42] KASSAS Z M, SAROUFIM J. LEO PNT frameworks for non-cooperative satellites with poorly known ephemerides: open-loop SGP4, tracking, and differential[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2025, 40(9): 28-45.

[43] IANNUCCI P A, HUMPHREYS T E. Fused low-earth-orbit GNSS[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024, 60(4): 3730-3749.

[44] STOCK W, HOFMANN C A, KNOPP A. Correlation-based doppler shift estimation for opportunistic LEO-PNT with starlink signals[C/OL]//2024 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). 2024: 130-135[2026-07-27]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10850255/>.

[45] 沈利荣, 李守兵, 孙海峰, 等. 基于 Starlink 机会信号/INS 的组合导航方法[J]. 导航定位与授时, 2024(第 2 期): 72-82.

[46] SHARBEL KOZHAYA, JOE SAROUFIM, ZAHEER M. KASSAS. Starlink for PNT: A Trick or a Treat?[C]//2024 ION GNSS+ Conference. Baltimore, Maryland, USA: Institute of Navigation, 2024.

[47] SpaceX details starlink' s role in enhancing US PNT resilience amid FCC inquiry - GPS world[EB/OL]. (2025-05-19). <https://www.gpsworld.com/spacex-shares-starlinks-role-in-strengthening-us-pnt-resilience-in-response-to-fcc-filing/>.

[48] From the heartland to the arctic, starlink and OneWeb are redefining navigation[EB/OL]. (2025-09-12). <https://engineering.osu.edu/news/2025/12/heartland-arctic-starlink-and-oneweb-are-redefining-navigation>.

[49] KAN M. Starlink to drop tech that helps beat GPS spoofing. Maritime users are alarmed[EB/OL]. (2026-04-28). <https://www.pcmag.com/news/starlink-to-drop-tech-that-helps-beat-gps-spoofing-maritime-users-are-alarmed>.

[50] HSU J. Starlink shuts down its GPS-style cheat code. Researchers may unlock it anyway[EB/OL]. (2026-05-1

1). <https://arstechnica.com/gadgets/2026/05/starlink-blocks-access-to-its-gps-alternative-ahead-of-spacex-ipo/>.