中北大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF NORTH UNIVERSITY OF CHINA(NATURAL SCIENCE EDITION)
2026年 第47卷 第5期(总第229期)
Vol. 47 No. 5 2026(Sum No. 229)

文章编号：1673-3193(2026)05-0639-14
J. North Univ. China, Nat. Sci. Ed., 2026, 47(5): 639-652.

全球通导遥星座技术演进综述与太行星座解析

李京阳[1,2,3,4]，蔚瑞鹏[1]，马晓帆[1,2,3,4*]

(1. 中北大学 航空宇航学院，山西 太原 030051；2. 中北大学 太行宇航研究院，山西 太原 030051；
3. 山西省无人飞行器工程研究中心，山西 太原 030051；
4. 中北大学 极限环境光电动态测试技术与仪器全国重点实验室，山西 太原 030051)

摘　要：针对传统天基单平台系统难以满足空间信息实时性与广域性需求的问题，本文系统梳理了低地球轨道通导遥巨型星座体系的技术演进规律。通信卫星系统通过大规模应用激光星间链路与相控阵手机直连技术，克服了空间物理传输瓶颈，构建了极低延迟的分布式宽带网络。导航星座演进出低轨增强架构，低轨卫星依托星载GNSS高精度接收机与星间链路实现分米至厘米级自主定轨，并在下行大功率播发中采用同频同时自干扰抑制技术解决射频阻塞，借助剧烈的星地相对几何视线切割，将地面终端精密单点定位算法的收敛时间压缩至分钟级。遥感观测体系突破了亚米级高分辨率极限，并通过引入星上人工智能边缘计算实现了“感存算一体化”，将应急数据响应链路时间缩减至秒级。太行星座由128颗低轨卫星异构组网，分布于23个轨道面，在单星平台上探索“通感算”的深度物理层融合，凭借全天候、中低纬度重点区域1h以内的快速重访能力，为无缝广域通信、城市精细遥感、应急态势感知及低空经济智联提供了高度智能自治的天基基础设施范式。

关键词：低轨巨型星座；空间信息网络；通感算一体化；低轨导航增强；在轨边缘计算；太行星座
中图分类号：V474.2　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2026.05.0025
引用格式：李京阳，蔚瑞鹏，马晓帆．全球通导遥星座技术演进综述与太行星座解析[J]．中北大学学报(自然科学版)，2026，47(5)：639-652.
Li Jingyang, Yu Ruipeng, Ma Xiaofan. A Review on the technological evolution of global communication, navigation, and remote sensing constellations and an analysis of the taihang constellation[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2026, 47(5): 639-652.

A Review on the Technological Evolution of Global Communication, Navigation, and Remote Sensing Constellations and an Analysis of the Taihang Constellation

Li Jingyang[1,2,3,4], Yu Ruipeng[1], Ma Xiaofan[1,2,3,4*]

(1. School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051 China;
2. Taihang Aerospace Research Institute, North University of China, Taiyuan 030051 China;
3. Shanxi Engineering Research Center of Unmanned Aerial Vehicle, Taiyuan 030051 China;
4. State Key Laboratory of Extreme Environment Optoelectronic Dynamic Measurement Technology and Instrument, North University of China, Taiyuan 030051 China)

Abstract: To address the inability of traditional space-based single-platform systems to meet the demands

收稿日期：2026-05-31
基金项目：中北大学-太行星座项目
作者简介：李京阳(1987—)，男，教授，博士，主要从事航空航天工程方面的研究。E-mail：20220126@nuc.edu.cn。
***通信作者：**马晓帆(1992—)，男，讲师，博士，主要从事航空航天工程方面的研究。E-mail：maxiaofan@nuc.edu.cn。

for real-time and wide-area spatial information, this paper systematically reviewed the technological evolution of low earth orbit (LEO) communication, navigation, and remote sensing giant constellations. Communication satellite systems constructed ultra-low latency distributed broadband networks by utilizing laser inter-satellite links and phased-array direct-to-cell technologies to overcome spatial physical transmission bottlenecks. Navigation constellations evolved into LEO augmentation architectures, which achieved centimeter-level autonomous orbit determination using co-frequency co-time self-interference suppression technology and compressed the precise point positioning algorithm convergence time to less than 1 minute. Remote sensing observation systems broke through sub-meter high-resolution limits and achieved the "integration of sensing, storage, and computing" through on-orbit artificial intelligence edge computing, reducing emergency data response times to seconds. The "Taihang Constellation", heterogeneously networked by 23 orbital planes and 128 satellites, achieved the deep physical-layer integration of communication, sensing, and computation on a single platform, and provides a highly intelligent and autonomous space-based infrastructure paradigm for ubiquitous wide-area communication, precise smart city remote sensing, national defense situational awareness, and low-altitude economy intelligent connection through its all-weather, global 1-hour rapid revisit capability.

Key words: LEO giant constellation; spatial information network; integrated sensing, communication and computation; LEO navigation enhancement; orbital edge computing; Taihang constellation

0 引言：空间信息基础设施的范式转移与技术系统演进

自20世纪中叶人类成功发射第一颗人造地球卫星斯普特尼克一号(Sputnik 1)以来，航天科学技术经历了由国家战略驱动向新世纪商业化、规模化与多场景应用驱动的深刻演进[1]。在这一波澜壮阔的历史进程中，以通信、导航、遥感为代表的传统天基信息系统，正面临着从单一功能平台向分布式巨型星座转变的历史性范式转移。早期的航天器受限于发射成本和器件寿命，多采用"单星定制、大而全"的设计理念，通常运行于中高地球轨道或地球同步轨道。这种设计虽然在单体可靠性上达到了极高的标准，但其研制周期漫长，单星成本居高不下，系统冗余度极低，且在轨重构与升级能力严重匮乏。然而，随着全球微电子技术的突飞猛进、商业现货器件在空间辐射环境下的高可靠性应用验证、火箭的一箭多星发射技术以及可回收运载火箭技术的日益成熟，人类进入太空的物理与经济壁垒被大幅削弱。这些技术红利直接催生了低轨(Low Earth Orbit, LEO)微小卫星巨型星座的前所未有的发展机遇[2]。低轨空间相较于传统高轨具有自由空间路径损耗小、信号传播延迟低、对地观测分辨率高等天然的物理优势。

通信、导航、遥感三大领域的融合演变，代表了当前国际空间科学技术的最前沿。在传统的天基信息体系下，通信卫星负责射频信号与数字信息的广域传输，导航卫星提供高精度的时空基准与授时服务，遥感卫星则执行对地电磁波谱的被动或主动观测。三者在物理架构、轨道资源、频谱分配和数据链路上处于相互割裂的"烟囱式"状态[3]。在当今的"新太空时代"，地面移动终端、低空飞行器以及物联网设备的指数级增长，促使全球用户对空间信息的实时性、广域性和绝对精度提出了极为苛刻的要求。这种需求驱动航天系统向天基遥感、天基通信与天基计算"一体化"甚至"通导遥一体化"的网络架构方向发展[4]。在此演变脉络中，"通导遥"体现为宏观业务功能的一体化协同，而"通感算"则是支撑其在微观卫星单机与物理层高效落地的底层技术架构。

低轨星座凭借其极低的网络物理延迟、强大的信号空间增益以及极高频次的轨道重访能力，正在重塑全球数字信息底座。本综述将系统性地梳理全球具有通信、导航、遥感功能的星座的发展历程，深度剖析目前主流商业及国家级星座系统的技术独特性与工程瓶颈。在此理论与技术框架下，对中北大学的"太行星座"进行详尽的论证与解析，以期为未来空间信息网络的设计与演进提供参考，本文综述框架如图1所示。

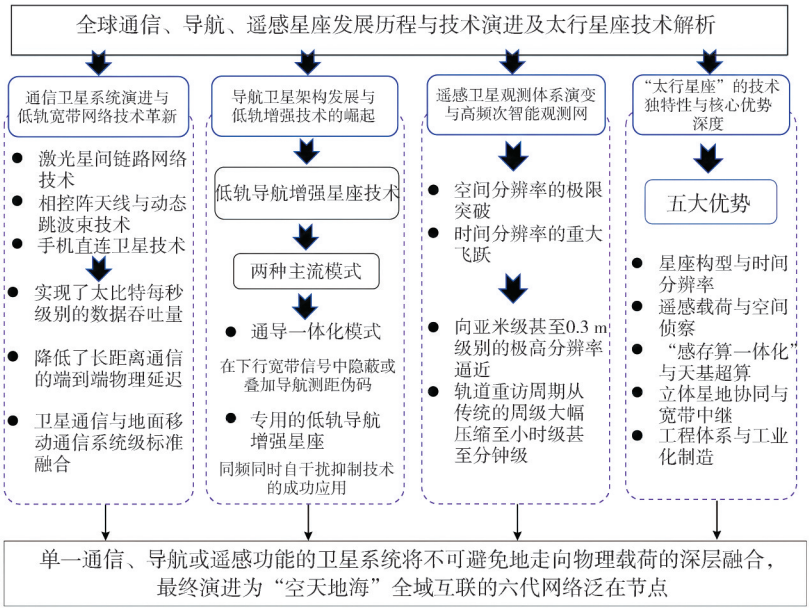


图 1　本文论述结构

Fig. 1　The argument structure of this paper

1　通信卫星系统演进与低轨宽带网络技术革新

卫星通信技术的发展历程[5]，本质上是一部从静止轨道高功率广播向低轨分布式巨型互联网演进的空间通信物理学史。在早期的模拟通信时代，通信卫星的轨道选择高度集中于距离地表约 35 786 km 的地球同步静止轨道（Geostationary Earth Orbit，GEO）。GEO 卫星的轨道周期与地球自转周期严格同步，这意味着其在地面观测者眼中保持相对静止。单颗 GEO 卫星能够实现对全球近 1/3 面积的稳定覆盖，极大地便利了跨洋电视广播和固定宽带干线通信[6]。然而，GEO 轨道固有的漫长物理距离导致了严重的信号传播延迟。电磁波在真空中的往返传播时间约为 250 ms，加之地面信关站的处理延迟，使得端到端延迟往往超过 0.5 s。此外，受限于地球曲率，GEO 卫星在极地高纬度地区存在天然的覆盖盲点，这在根本上限制了其在实时高频交互式应用、高频交易以及全球无缝覆盖方面的潜力。

随着全球移动通信标准的持续迭代，卫星通信经历了数次重大的代际跃迁。在 1G 时期，系统主要用于传输模拟话音信号，代表性卫星如 Inmarsat 系统；进入 2G 时期，系统实现了数字传输应用，支持语音、传真、短消息及低速率数据传输；随后在 3G 时期，系统引入了宽带码分多址体制，大幅提升了业务传输能力与频谱复用效率[6]。到了 4G 时期，系统全面转向全 IP 化宽带网络架构，高通量卫星技术打破了高速数据传输的瓶颈[7]；步入当前的 5G 及演进时代，非地面网络标准的落地与低轨巨型星座的大规模部署，推动了星地网络的深度融合，标志着卫星通信开始迈向大众消费级应用的新纪元；而面向未来的 6G，系统将致力于追求太比特级峰值速率、微秒级时延等极致性能（如图 2），实现通感算一体化与人工智能的深度融合，最终推动空天地海全域泛在连接与沉浸式交互场景的全面落地（如图 3）。为支撑向 6G 时代的跨越并满足上述极致的网络需求，当前空间基础设施的底层组网架构与传输能力正在加速重构。

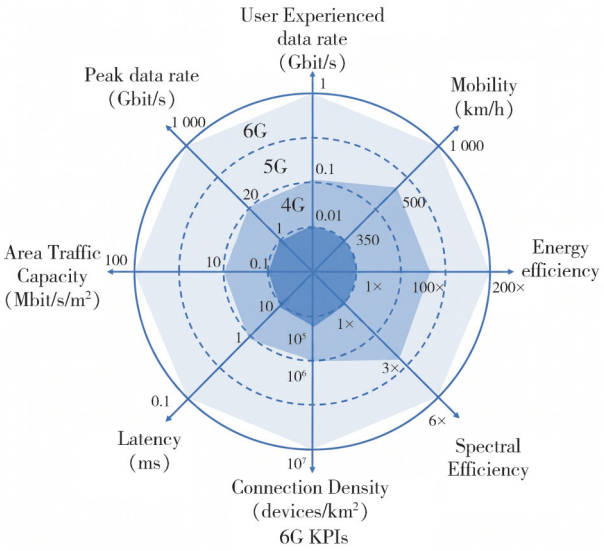


图 2　底层基准指标的跃升[8]

Fig. 2　The leap of underlying benchmark metrics[8]

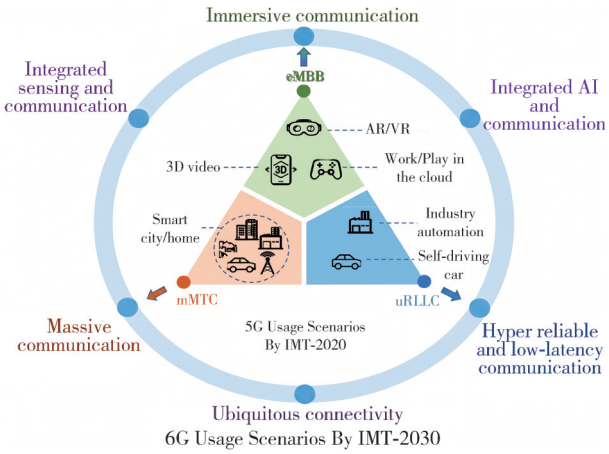
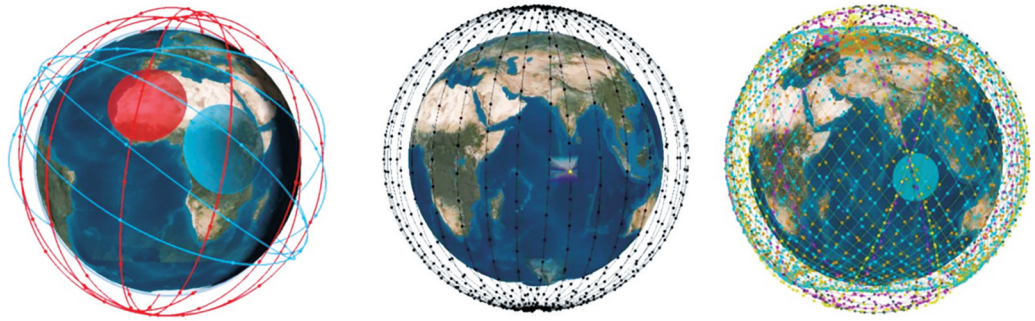


图3 顶层业务架构的底层范式转移[8]

Fig. 3 The foundational paradigm shift in the top-tier business architecture[8]

20世纪90年代，以“铱星”(Iridium)和“全球星”(Globalstar)为代表的低轨移动通信星座，首次尝试通过多轨道面空间分布式组网打破高轨通信的高延迟物理瓶颈。其中，Iridium依托近极地轨道构型实现了包含南北极区在内的全球无缝立体覆盖；Globalstar则采用52°中倾角Walker构型，侧重于为中低纬度人口密集区提供低延迟卫星移动通信服务。尽管这些系统在航天系统工程与空间通信体制上取得了举世瞩目的成就，但受限于当时的微电子制造成本、极其昂贵的发射费用以及地面蜂窝移动通信网络的爆发式扩张，在商业运营上遭遇了巨大的滑铁卢。进入21世纪的第2个10年，随着数字通信载荷的成熟、先进调制方案的应用以及制造成本的断崖式下降，以SpaceX的Starlink系统、OneWeb系统以及Telesat的Lightspeed为代表的低轨宽带巨型星座项目(如图4)，重新掀起了天基互联网的发展浪潮[9]。



(a) Telesat系统的星座图像
(蓝色代表倾斜轨道，红色代表极地轨道)

(b) OneWeb系统的星座图

(c) SpaceX系统的星座图案
(不同的轨道组用不同的颜色表示)

图4 3种系统的星座图案[10]

Fig. 4 The constellations of three systems[10]

目前主流低轨通信星座的技术独特性主要体现在三大核心技术维度：激光星间链路网络技术、相控阵天线与动态跳波束技术，以及手机直连卫星技术。

激光星间链路网络技术的全面工程化普及[11-12]。传统的卫星通信网络高度依赖透明转发架构，这导致海洋、沙漠、极地等无法建设地面基础设施的广袤区域无法实现高速网络接入。新一代星座如Starlink的升级版卫星大规模搭载了空间激光通信终端[13]。激光通信(如图5)，利用真空中光速传输的特性和激光波束极窄的散角，在数千公里外的卫星之间构建起动态拓扑的光纤级传输网络(如图6)。这种技术不仅实现了太比特每秒级别的全网数据吞吐量，还有效避免了无线电频谱的枯竭与干扰问题。更重要的是，激光星间链路使得数据包能够在空间网络中进行星载路由，极大地降低了长距离跨洋通信的端到端物理延迟，使其在某些超长距离路由下的延迟甚至低于铺设于海底的光缆网络。

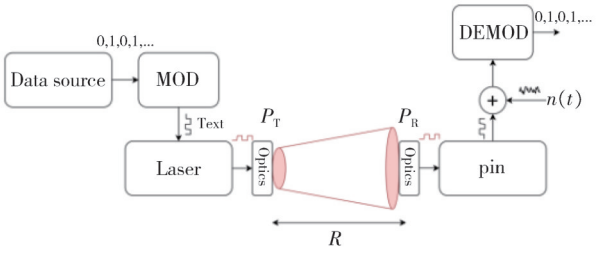


图5 空间激光通信系统的核心信号处理链路与物理信道模型[14]

Fig. 5 Core signal processing link and physical channel model of space laser communication system[14]

相控阵天线与动态跳波束技术的应用[15-16]。低轨星座面临的核心挑战之一是卫星相对于地面用户的高速移动。传统的机械伺服抛物面天线完全无法满足这种极速跟踪的需求。因此，现代通信卫星平台大量搭载了先进的平板源相控阵天线。相控阵天线摒弃了物理机械部件，通过控制

成百上千个微型天线单元的发射相位，利用电磁波的干涉原理，在空间中实现了波束的极速扫描与精准指向。这种技术使得一颗卫星能够同时生成数百个独立的高增益点波束，紧密追踪地面高速移动的用户终端。同时，结合跳波束技术和软件定义网络，系统能够根据不同地理网格内的实际业务负载动态分配通信容量与频段，极大地提升了稀缺的无线电频谱的复用效率[17]。

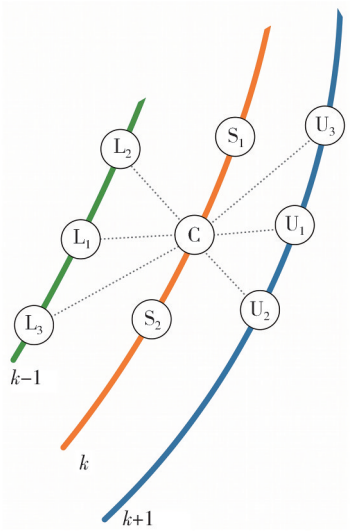


图 6　卫星星座星间链路空间拓扑构型[14]

Fig. 6　Space topology configuration of inter satellite links in satellite constellations[14]

手机直连卫星技术成为当前各大通信星座激烈角逐的最新制高点[18]。传统卫星宽带接入需要用户配备带有高增益天线的专用地面接收终端，这在很大程度上限制了用户规模。为了跨越专用终端的硬件鸿沟，行业正加速推进非地面网络与第三代合作伙伴计划标准体系的内生融合[19]。实现智能手机直连的技术瓶颈在于链路预算极度受限——普通手机的微型全向天线发射功率极低且无方向性增益。为了弥补高达数百公里的空间自由损耗，低轨卫星必须在轨部署面积达数十平方米的超巨型相控阵天线。通过这种天地倒置的系统设计，将复杂度和功耗转移至空间段，从而实现存量消费级智能手机在无地面基站覆盖区域的直接语音通话与宽带数据接入。这种星地协同组网模式不仅解决了偏远地区和突发应急场景下的连续覆盖难题，更标志着卫星通信与地面移动通信从相互独立、互为补充走向实质性的系统级标准融合[20]。

在全球低轨空间资源争夺日益白热化的背景下，中国在 2024—2026 年迎来了天基互联网部署的大爆发。“GW 星座”和“G60 千帆星座”构成了中国争夺空间信息霸权的“双轮驱动”格局，两者在技术路线上各具极致特色[21]。

GW 星座的最独特技术在于其为“手机直连卫星”与 6G 底座量身定制的高低轨双层异构拓扑。GW 规划部署 12 992 颗卫星[22]，其中 6 080 颗密集部署于 500 km 以下的极低地球轨道。这种极致贴近地表的物理距离配合星上巨型相控阵，依托超大孔径天线带来的高空域增益裕度，直接突破了消费级手机微型天线发射功率极低的物理链路瓶颈，实现了极低延迟的无感直连。截至 2026 年 3 月，GW 已成功进行第 20 组密集组网发射。

G60 千帆星座的最独特之处则在于极轨网格拓扑与超高频段破局。千帆远期规划超 1.4 万颗卫星[22]，初期采用 36 个正交极地轨道面设计，确保了对南北两极冰盖等传统盲区的高密度覆盖。更激进的是，其在骨干网关侧大规模启用了 Q、V 极高频段，如同在太空架设无干扰的超大带宽骨干光缆，规避了低频段的严重拥挤。2026 年，千帆正力争年内完成 324 颗卫星的累计在轨部署以达到初步商用标准。

2　全球卫星导航系统发展与低轨增强技术崛起

全球卫星导航系统（Global Navigation Satellite System，GNSS）是现代人类社会精密授时、地理空间定位与基础科学研究的基石。其发展历程起始于美国军方在 20 世纪 70 年代启动的全球定位系统（Global Positioning System，GPS）计划。GPS 系统在历经多年的在轨测试与部署后，于 1993 年达到全面运行能力，并在全球范围内确立了以中圆地球轨道（Medium Earth Orbit，MEO）为基础架构的导航星座标准[23-24]。伴随 GPS 的成功，俄罗斯的 GLONASS 系统与欧洲的 Galileo 系统相继投入建设并完成全球组网，打破了单极技术垄断，形成了多星座、多频段并存的全球精密导航格局[25]，3 种系统与北斗系统的对比见表 1。

在这场空间导航体系的建设浪潮中，中国北斗卫星导航系统（BeiDou Navigation Satellite System，BDS）走出了一条具有中国特色与技术前瞻性的独立发展道路[26-27]。北斗系统的建设严格遵循了“三步走”的战略规划：从 20 世纪 90 年代末解决有无问题的双星定位试验系统（BDS-1），到 2012 年完成覆盖亚太地区的区域导航系统（BDS-2），再到 2020 年全

面建成的全球组网系统(BDS-3),展现了后发系统在顶层架构设计上的独特优势。

表1 GPS、GLONASS、Galileo及北斗系统对比

Tab. 1 Comparison of GPS, GLONASS, Galileo and BDS

对比维度	GPS	GLONASS	Galileo	北斗
核心优势	系统最成熟,全球生态占有率最高,稳定性极强	高纬度与极地地区覆盖能力卓越,抗干扰设计独特	民用精度最高,首创信号认证体制,星载钟稳定性最优	三轨混合异构构型,抗遮挡强,独创短报文通信与搜救功能
星座构型与轨道分布	6个轨道面,倾角55°轨道高度约20 200 km	3个轨道面,倾角64.8°轨道高度约19 100 km	3个轨道面,倾角56°轨道高度约23 222 km	3星GEO+3星IGSO+24星MEO
信号多址体制	CDMA	FDMA为主	CDMA	CDMA
核心技术亮点	率先应用L5频段,现代化程度高,具备航空级生命安全服务能力	FDMA体制天然为每颗卫星分配不同频率,具备较强的抗窄带干扰和抗压制能力	采用被动型氢原子钟,提供极高的空间测时精度	国产高性能铷钟与氢原子钟,提供星基PPP-B2b精密单点定位与全球双向短报文

北斗系统的核心技术独特性之一在于其首创的混合星座空间构型[28]。不同于GPS或Galileo单一依赖MEO轨道的纯对称布局,北斗系统采用了包含GEO、倾斜地球同步轨道(Inclined Geosynchronous Satellite Orbit, IGSO)以及MEO的三轨混合异构网络[29]。这种设计的绝妙之处在于,其不仅利用MEO卫星确保了全球范围内的高质量覆盖,更通过高轨道的GEO和IGSO卫星,针对亚太地区实现了极高密度的区域信号增强。这种构型大幅提升了城市峡谷、复杂山地地形等高遮挡环境下的可见星数量,优化了空间,从而显著提升了抗遮挡能力与定位连续性[30]。同时,北斗系统在全球范围内率先集成了独特的短报文通信功能与国际搜救载荷,在无移动网络覆盖的海洋与荒漠区域,将单向的定位服务扩展为双向的位置报告与信息交互,这在历次地质灾害救援中发挥了重要作用。

然而,传统中高轨导航星座在物理极限上面临着严峻的挑战。受限于距离地表两万公里以上的遥远轨道高度,卫星发射的无线电信号到达地面时强度微弱,这使得GNSS信号极易受到人为的电磁干扰、敌意欺骗或自然界电离层闪烁的影响(如图7)。同时,在高精度应用领域,精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术需要利用载波相位观测值进行整周模糊度解算,在无密集地基增强网络辅助的情况下,由于高卫星相对于地面的几何变化缓慢,导致PPP算法的收敛时间往往长达数十分钟至数小时,这严重制约了自动驾驶、高精度无人机编队、智慧农业等新兴产业对瞬时厘米级定位能力的需求。

为突破这一物理与算法极限,低轨导航增强星座技术应运而生[33],并迅速成为当前卫星导航与空间大地测量领域的最大研究热点[32]。低轨导航增强系统的技术独特性,深刻源于低轨空间的动力学特性与电磁辐射优势。首先,低轨卫星距离地面仅数百至上千公里,无线电信号的自由空间路径损耗相比MEO卫星大幅减小。这意味着低轨卫星发射的导航信号落地功率可比传统GNSS高出数个数量级即增强30~40 dB的信号空间增益[34]。这种"高强信号"具备强大的穿墙穿透能力,不仅能够有效抵御复杂的宽带电磁干扰,甚至为室内浅层区域、地下车库等传统导航盲区的连续定位提供了可能。

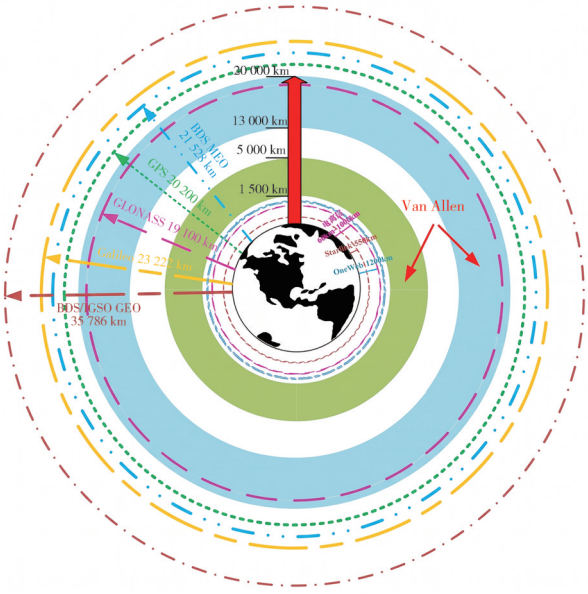


图7 电离层影响[31]

Fig. 7 Ionospheric effects[31]

关键的物理优势在于轨道动力学特征[35]。低轨卫星绕地球运行的速度极快,导致其与地面固定或移动观测终端之间的空间几何拓扑结构变化异常剧烈(如图8)。这种几何视线的快速切割,能够在极短时间内为接收机算法提供丰富且不相关的高频观测方程。在数学层面,这种快速的几何变化能够显著降低设计矩阵的病态性,加速接

收机对电离层延迟、对流层天顶延迟以及载波相位整周模糊度等关键参数的解算过程。在一定的星座可视重叠度与几何精度衰减因子约束下，大量仿真与在轨实测数据表明，LEO增强技术能够将全球任意地点的PPP收敛时间从传统的小时级或20 min级别，极速压缩至1 min甚至10 s以内，实现了真正意义上的“瞬时”高精度定位[36]。

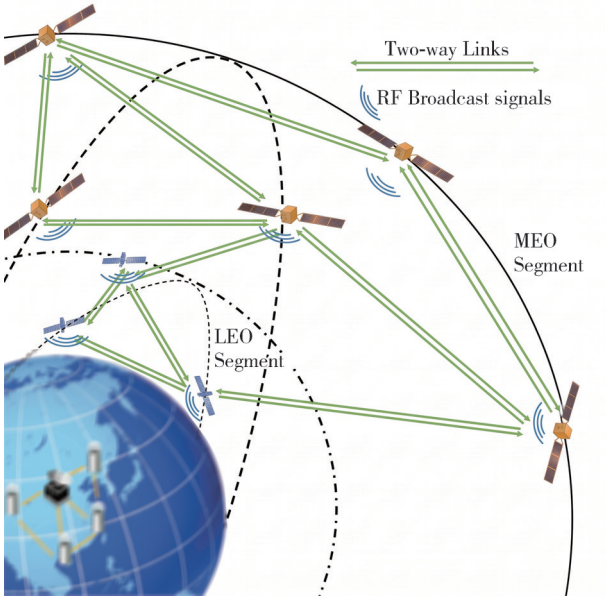


图 8　拓扑结构[32]

Fig. 8　Topological structure[32]

在具体工程实现与组网策略上，全球正在开展多种低轨导航增强体制的探索。一类是基于商业低轨通信星座的“通导一体化”模式[37]，如利用Iridium NEXT的卫星时空定位功能或Starlink的底层载波提取技术，这类模式通过复用庞大的通信星座资源，在下行宽带信号中隐蔽或叠加导航测距伪码，实现了极低成本的导航增强[38]。另一类则是建设专用的低轨导航增强星座。国际上，美国Xona的Pulsar星座通过高功率专有扩频信号将PPP收敛压缩至秒级，TrustPoint采用专有C频段构建抗干扰独立测距体制，欧洲空间局亦推进了LEO-PNT在轨演示计划；国内，以“微厘空间”试验卫星为例，该系统成功在轨验证了专用的导航信号播发技术。其核心技术独特性体现在采用了同频同时自干扰抑制技术（Co-frequency Co-time Self-interference Suppression Technology，CCST）[39]，对比见表2。因为低轨导航卫星不仅需要向地面大功率播发增强信号，同时还需要利用背靠背的天线实时接收高空GNSS的微弱信号来进行高精度的自主定轨与时间同步。在这个过程中，极易产生严重的射频阻塞与自激干扰。CCST技术的成功应用，在物理层和数字基带层有效隔离了收发信号，确保了星载GNSS接收机在播发大功率信号时依然能够覆盖90%以上的可见GNSS卫星，自主定轨精度达到厘米级，所播发的增强信号质量完全满足高标准要求[40]。

表 2　国内外典型低轨导航增强星座建设汇总

Tab. 2　Overview of key global and domestic LEO navigation augmentation constellation developments

名称	轨道构型与高度	信号体制与关键技术	增强定位收敛能力
微厘空间	约700 km，极轨与倾斜混合构型	L/S频段专用增强播发；采用CCST同频同时自干扰抑制技术	星载厘米级定轨，地面终端PPP收敛时间压缩至1 min内
Pulsar	约500～600 km，倾角与极轨混合构型	专有L/C频段扩频测距体制；高功率播发	具备强抗干扰与防欺骗能力，多路径抑制优异，地面PPP达秒级极速收敛
TrustPoint	约500 km，Walker倾斜对称构型	专有C频段独立测距信号体制；星载轻量化微纳PNT载荷	避开传统L频段射频拥挤与干扰，提供高安全性独立测距与高精度快速定位
LEO-PNT	约500～600 km，太阳同步轨道及多轨道面微星座	试验性双频/三频信号；与中轨Galileo联合解算体制	作为中轨导航的高动态几何增强节点，加速整周模糊度解算，提升复杂环境可用度

此外，从星座构型规划来看，低轨增强星座的设计需要运用复杂的数学工具。为了抵抗空间摄动并保证全球可见星数量的最优分布，现代低轨导航星座多采用多层异构对称构型[41]，并通过多目标非支配排序遗传算法或适应性并行遗传算法进行迭代优化[42]。这种优化能够在面对少数卫星因单粒子翻转或物理故障失效等极端状况时，依然保持极高的星座鲁棒性，使全球位置精度衰减因子维持在安全阈值以内[43]，确保了导航服务的可用性。

3　遥感卫星观测体系演变与高频次智能观测网

卫星遥感自苏联发射第一颗人造卫星起，便开启了人类从太空超脱地球重力束缚俯瞰母星的新纪元。早期的遥感卫星计划以美国的Landsat系列以及执行军事侦察的Corona计划为例，多由资金雄厚的国家级航天机构主导开发。这些航天器体积庞大，造价极其高昂，开发周期长达数年

甚至十年以上。在技术路线上，早期系统经历了从物理胶卷回收到光电探测器数字传输的转变。这些大型平台主要通过搭载精密的多光谱和全色传感器获取中低分辨率的地球图像，以支持宏观尺度的自然资源调查、地质制图与大尺度气候气象监测。这类系统虽然为地球科学研究与人类环境认知奠定了无可替代的数据基础，但其存在一个致命的缺陷：时间分辨率极低。受限于庞大的平台质量引起的轨道机动困难以及轨道设计，其重访同一地点的周期通常长达十余天甚至数周。这种漫长的更新频率，使其完全无法满足对突发地质灾害、现代高技术条件下的战场动态态势或宏观经济高频指标的实时监控需求[44]。

20世纪80年代末至90年代初，英国萨里大学及其衍生企业在全球范围内率先引入了现代微小卫星的设计理念。这一理念打破了航天器必须采用昂贵宇航级防辐射元器件和高度定制化设计的传统教条，转而拥抱工业界快速迭代的摩尔定律，大量采用标准化总线接口、模块化架构以及商业现货组件。这种“设计即能力”的新范式，以牺牲极端的在轨寿命为代价，换取了系统研发周期与制造成本的指数级下降。这一理念的成熟与工程化，直接孕育了21世纪商业高分辨率遥感巨型星座的全面爆发。

当代遥感卫星星座的发展呈现出两大极为显著的技术演进趋势[45]：一是空间分辨率的极限突破，逐步向亚米级甚至0.3 m级别的极高分辨率逼近；二是时间分辨率的飞跃，通过庞大的星座组网规模，将轨道重访周期从传统的周级大幅压缩至小时级甚至分钟级，真正实现了对地球表面特定区域的“准实时”监控[46]。

目前主流的商业遥感星座在技术体制和运营逻辑上展现出了各自独特的设计哲学。以美国Planet公司的星座系统为例，其旗下拥有两大互补的微小卫星星座：PlanetScope星座以及主打高分辨率的SkySat星座[47]，对比见表3。PlanetScope星座的规模极为庞大，由上百颗甚至数百颗极小型的PlanetScope微纳卫星组成。该星座在技术上的独特性在于采用了创新的“线阵扫描”理念，依托庞大的在轨数量和地球自转，实现了对全球陆地面积的每日全覆盖成像。尽管其单星空间分辨率仅为3 m级，无法看清细微的车辆特征，但其巨大的优势在于单幅图像的覆盖脚印面积宽广，能够在宏观上捕捉大尺度生态变化[46]。

表3 PlanetScope和SkySat的对比

Tab. 3 Comparison of PlanetScope and SkySat

对比维度	PlanetScope	SkySat
核心优势	极致的时间分辨率与覆盖广度，实现全球每日更新	亚米级高空间分辨率，具备灵活的定点凝视与视频拍摄能力
卫星体量与构型	超大规模微纳星座活跃卫星数，130+颗分布于太阳同步轨道及国际空间站轨道	敏捷型小卫星星座活跃卫星数21颗，分布于不同倾角的低地轨道
时间分辨率	全球每日覆盖采用线阵推扫的始终在线模式	高频次定制重访对全球特定目标区域，每天可实现5～12次的高频次重访
空间分辨率与波段	中高分辨率 多光谱优势分辨率：约3.0 m 波段：最新一代SuperDoves具备8个多光谱波段	高分辨率 分辨率：0.5 m(全色)/1.0 m(多光谱) 波段：4个多光谱波段+1个全色波段

SkySat卫星通过精密的光学载荷与稳定的姿态控制系统[48]，在极小的卫星平台上实现了高达0.5m级别的极致高分辨率。这种亚米级的高分辨率能够有效减少图像解译中的“混合像素”效应，即单个像素内混杂多种地物辐射特征，从而更精准地描绘细微物理特征。SkySat卫星具备一定的凝视成像能力，不仅能输出静态图像，还能生成短时间的高清视频，这为观测移动物体提供了全新的三维与动态信息维度。

中国在商业高分辨率遥感星座领域同样展现出了强大的技术创新力与工程执行力，最具代表性的无疑是“吉林一号”星座与四维高景星座[49]。“吉林一号”作为目前全球规模最大的商业光学遥感卫星星座之一，其宏伟的规划是部署超过300颗卫星，目前已有超过百颗卫星在轨组网运行[50]。该星座的技术独特性不仅在于提供0.5～0.75 m级别的全色高分辨率和多达26个波谱段的宽幅多光谱数据，更在于其出色的平台机动性能与“视频成像”能力[51-52]。通过超敏捷的三轴姿态控制技术，“吉林一号”卫星能够打破传统卫星只能垂直于轨道面进行推扫的限制，实现对地面热点区域的长时间高精度凝视。这种能力使得卫星能够拍摄长达数十秒的全彩色动态视频，动态追踪地面

车辆、海上舰船甚至高空飞行的飞机[53]。在近期的国际地缘敏感区域事件中，该星座的极高频重访与态势感知能力发挥了战略情报收集作用，引起了全球防务与情报界的广泛关注[54]。

近期发射组网的“四维高景”星座代表了中国在遥感卫星几何精度与抗抖动技术上的最新突破[55-56]。其搭载的超敏捷控制系统与采用的相机视轴实时监测技术，能够在太空中建立起亚角秒级的极高精度指向测量，使得图像即使在复杂的机动拍摄过程中也能保持边缘锐利，实现了真正的“防抖超清成像”。这种技术使得图像的无控定位精度达到了国际先进水平[57-58]，这一突破减少了影像处理对地面控制点实地测量的依赖，提升了数字高程模型、数字正射影像等专业测绘产品的生成效率。

与此同时，在全色、多光谱与 SAR 遥感之外，长波红外对地观测体系正成为低轨微小卫星星座的重要发展方向。当前微纳红外相机正向着数十米级高空间分辨率与数百公里超大幅宽演进，为构建高频次广域热态势感知网络奠定了物理基础。全球最新一代的遥感卫星体系正在经历一场从传统的“感-存-传”向“感-存-算一体化”架构的技术大跨越。传统的遥感作业模式下，卫星仅仅是一个简单的“太空相机”，在轨无差别地获取海量原始像素数据，将其存储于笨重的星载大容量固态存储器中。由于卫星过境地面接收站的时间窗口短暂，加之星地微波数据下传带宽受限，大量数据成为“沉睡的数据”，且下传后仍需由地面数据中心集群进行复杂的辐射定标与算法解译。这种模式导致了从事件发生到情报生成的巨大时间延迟。新一代智能星座通过在微小卫星上搭载经过空间抗辐射加固的高性能图形处理器或专用的低功耗人工智能处理芯片组，赋予了卫星强大的“边缘计算”能力。卫星能够在轨实时运行复杂的深度卷积神经网络算法，执行包括云层自动剔除、舰船自动识别分类、森林火点温度异常检测等高级任务。这种星上 AI 处理机制直接将海量的无价值像素丢弃，仅将提取出的高价值矢量目标信息或报警指令通过极低带宽的星间链路或窄带下行链路实时回传，将应急响应的链路时间从传统的小时级甚至天级压缩至几秒钟内。

4　“太行星座”的技术独特性与核心优势深度解析

在全球低轨空间轨道资源与频谱资源日益成为不可再生战略高地的背景下，由中北大学太行宇航研究院主导研发的“太行星座”，代表了中国顶尖高校与商业航天资本融合的力作[59]。以空天数据技术为核心驱动力，面向政府机构、企业客户及大众群体，提供高定制化的空天数据综合服务解决方案。

面对传统“烟囱式”卫星系统在覆盖连贯性、响应时效性及物理链路冗余度方面的固有局限，太行星座在顶层规划上彻底摒弃了孤立发展的陈旧思路，转而确立了以空天数据技术为核心驱动力的敏捷网络架构。该星座的物理层规划由 128 颗高性能卫星组成，轨道高度 500 km，其中 SAR 卫星 30 颗，红外卫星 63 颗，光学卫星 35 颗，如图 9 所示。其中红外卫星占据近半数的核心工程设计考量在于构建全天时广域热异常初筛预警网络，采用轻量化大视场长波红外探测载荷，单星实现了 20 m 空间分辨率以及大于 400 km 的超大幅宽。太行星座在 2031 年前通过四个阶段实现全球组网。这 128 颗卫星通过异构组网模式构建起一张具备极高空间鲁棒性与动态拓扑适应能力的全域泛在互联网络。这种异构组网的宏伟规划并非简单的同轨道面物理堆叠，而是通过 23 个轨道面的精密交织，实现了对全球表面的连续覆盖与对高价值战略热点的密集侦收，进而为构建具有高动态响应能力与经济可行性的融合型天基基础设施提供了系统性工程范式。

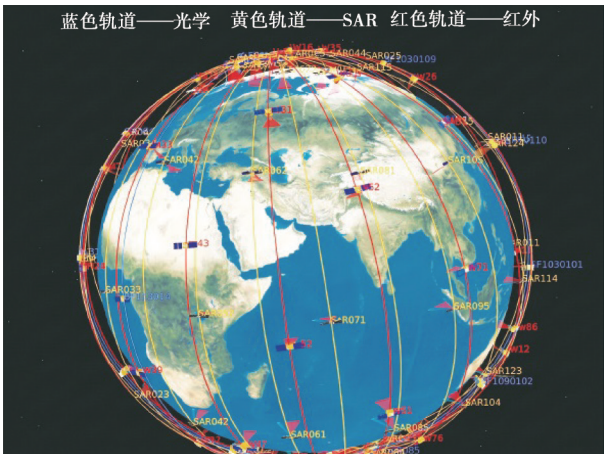


图 9　卫星布轨模拟图

Fig. 9　Simulation diagram of satellite orbital deployment

在轨道构型与系统性能验证上，太行星座基于 128 颗微小卫星的基本设置，通过 23 个轨道面构建了复合异构网络。基于开普勒轨道动力学积分模型与传感器刈幅交叠仿真，系统在覆盖与重访能力上表现优异：1）在我国及周边所在的中低

纬度核心观测带，倾斜轨道密集的星下点交割配合红外载荷大于400 km的超大幅宽与光学/SAR卫星±45°敏捷侧摆机动，使该区域平均时间重访周期严格优于1 h；2）在定位与空间几何基准方面，核心观测带内多星空间交会角集中分布于35°～75°的优良区间，三维位置精度衰减因子PDOP优于3.0，结合星载GNSS多模接收机自主精密定轨，地面目标无控制点平面几何定位精度达到米级，且雷达卫星具备高稳定性空间干涉基线以支持毫米级InSAR微形变反演；3）在通信传输与响应时效方面，单星配置X频段高速对地微波数传链路，通过“天数天算”将海量遥感原始图像在轨提炼为轻量化矢量目标结果，使下行数据传输量削减70%～90%，从而将端到端应急响应时效缩短至分钟级。太行星座与当前国内典型商业星座核心指标对比如表4所示。

表4 太行星座与国内典型知名商业星座核心技术指标对比

Tab. 4 Comparison of core technical indicators between Taihang Constellation and typical leading commercial constellations in China

对比维度	太行星座	吉林一号	四维高景
核心架构与轨道	128星异构组网，太阳同步轨道	规划300＋星，SSO太阳同步轨道为主	规划56星，多轨道面协同分布
主导载荷与模态	“SAR＋光学＋红外”三模协同	主攻高分光学全色、多光谱及宽幅成像	0.5 m/0.7 m极高分辨率光学成像＋0.5 m高分辨率X频段相控阵SAR载荷
核心技术亮点	三模态空天地海立体协同感知；载荷深度复用平台主控算力与配电，线束结构减重＞30%；InSAR毫米级形变反演	超敏捷三轴大角度快速机动跟踪；多波段高光谱覆盖；亚米级高清动态视频目标追踪	超高精度相机视轴高频抖动测量与实时补偿；高几何精度无控对地定位；防抖超清成像

太行星座在系统架构设计中通过多层次协同突破物理层瓶颈。1）在平台硬件层面，卫星打破传统平台与载荷的物理界限，将载荷控制、图像预处理板卡与卫星姿轨控单机、中心计算机集成于统一的高可靠微型化高速背板总线，载荷直接复用卫星平台的主控算力与电源管理系统，免除各载荷冗余的二次电源与分立机箱，使单星线束与结构重量减少30%以上，采用标准化热控解耦传导模块使平台零部件通用化率达80%以上；2）在信息处理层面，单星搭载空间抗辐射加固的“CPU＋FPGA＋NPU”异构算力池，构建天基边缘计算平台，遥感原始数据流通过高速DMA零拷贝技术直接送入共享高速显存，在轨实时运行轻量化多模态解译大模型，自动执行去云雾掩膜、热异常提取与动态目标识别，使下行数据传输量削减70%～90%，端到端应急响应时效缩短至分钟级；3）在射频与电磁兼容层面，针对遥感高指向稳定度与通信动态跟踪的需求，系统在载荷基座设计微振动阻尼隔离机构以保障敏捷滚转下的波束指向。

依托128颗卫星异构组网的物理架构，太行星座彻底打破了空间数据获取与传输的物理时空壁垒，衍生出一系列深层次、全维度的智能化应用场景（如图10），其核心应用矩阵高度聚焦于全域无缝覆盖、精准遥感与监测、国防安全与战略支撑及低空经济与智联四大前沿领域。在全域无缝覆盖应用维度，该星座充分利用低地球轨道巨大的信号空间增益与无视地表物理阻碍的天然属性，将宽带连接的触角延伸至传统地面蜂窝基站难以企及的海洋、极地与崇山峻岭之中，全面赋能偏远地区通信，从根本上抹平了全球物理空间所固有的数字鸿沟。与此同时，面对全球物联网设备呈指数级爆发的时代浪潮，太行星座展现出了极高的空间信道复用效率与庞大的网络接入容量，能够有效支撑海量设备连接，实现微波卫星通信与大范围物联网络的深度嵌套，从而为全球分布的工业传感器集群、远洋航运追踪系统以及无人值守环境监测节点提供极高可靠性与连贯性的数据回传双向链路。



图10 智能化应用场景

Fig. 10 Intelligent application scenarios

5 结语：低轨巨型星座引领空间信息网络新纪元

从整星设计来看，通导遥融合卫星必须同时承载前文所述的三大核心需求：通信要求相控阵波束快速扫描与激光链路精准指向，导航增强要

求向地面大功率播发信号的同时保持高灵敏GNSS自主定轨，遥感则要求敏捷姿态控制、相机视轴稳定防抖以及星上AI高负荷计算。针对这些功能在单星平台上的交织与冲突，系统在技术上形成了针对性的融合设计：一是引入第2节所述的“同频同时自干扰抑制技术”，在物理层和基带层有效隔离下行大功率播发对星载微弱GNSS接收信号的射频阻塞，保证自主定轨达到厘米级；二是以第1节所述的“相控阵电控跳波束”替代传统机械伺服天线，结合第3节的“相机视轴实时监测与敏捷姿态控制”，在实现微秒级波束扫描追踪通信终端的同时，避免了机械运动对遥感防抖超清成像的干扰；三是将第3节的“感-存-算一体化”星上边缘计算与第1节的“激光星间链”相结合，由星载AI芯片在轨直接识别提取高价值目标矢量信息，随后通过激光星间网络进行空间路由转发，避免海量原始像素占用星地下行传输通道。这些技术设计有效解决了多载荷共存时的射频自干扰、姿态扰动与数传带宽瓶颈，使卫星在保证遥感清晰成像的同时，兼顾了地面终端PPP分钟级快速收敛与低延迟空间通信能力，实现了天基信息在轨智能处理与快速分发的高效协同。

在这一国际技术演进的洪流中，中北大学太行宇航研究院规划的太行星座探索了天基遥感、宽带通信与天基计算一体化融合的新路径。通过多轨道面异构拓扑优化、星载一体化机电热集成与在轨边缘超算设计，为解决微小卫星平台资源受限与突发应急响应滞后提供了可行方案。随着太行星座先导试验星在轨验证的深入及后续工程的分期推进，多功能融合型低轨巨型星座的技术实践将被持续拓展，从而为我国空间信息网络基础设施的智能化演进提供重要的理论与工程参考。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献：

[1] Tatem A J, Goetz S J, Hay S I. Fifty years of earth observation satellites: views from above have lead to countless advances on the ground in both scientific knowledge and daily life [J]. American Scientist, 2008, 96(5): 390-398.

[2] Kramer H J, Cracknell A P. An overview of small satellites in remote sensing [J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(15): 4285-4337.

[3] Wang Q, Chen X M, Qi Q, et al. Integration of navigation and remote sensing in LEO satellite constellations [J]. IEEE Transactions on Communications, 2026, 74: 581-597.

[4] Inaltekin H, Bowyer M, Collings I B, et al. Future satellite communications: satellite constellations and connectivity from space [J]. ITU Journal on Future and Evolving Technologies, 2024, 5(2): 288-294.

[5] 张美婷，张琛琛. 卫星通信技术标准：演进、创新与天地融合新趋势[J]. 遥测遥控，2026，47(1)：113-121.
Zhang Meiting, Zhang Chenchen. Satellite communications technical standards: evolution, innovation, and the new trend of space-ground integration [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2026, 47(1): 113-121. (in Chinese)

[6] 邹恒光，惠腾飞，翟盛华，等. 卫星通信技术发展综述[J]. 空间电子技术，2025，22(S1)：1-19.
Zou Hengguang, Hui Tengfei, Zhai Shenghua, et al. A comprehensive review of the development of satellite communication technology [J]. Space Electronic Technology, 2025, 22(S1): 1-19. (in Chinese)

[7] 王炜，吴万渊，杨万卿. 数字化战略成就山航“闪电航空”[J]. 山东国资，2022(3)：29-31.

[8] Wen D Z, Zhou Y, Li X Y, et al. A survey on integrated sensing, communication, and computation [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2025, 27(5): 3058-3098.

[9] Zheng Y J. An overview of communication and orbital composition technologies based on starlink LEO satellite constellation from a technical perspective [J]. Theoretical and Natural Science, 2023, 18(1): 230-237.

[10] del Portillo I, Cameron B G, Crawley E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband [J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.

[11] 谢军，周会超，贾智尧. 激光星间链路发展及关键技术[J]. 航天技术与工程学报，2026，3(1)：1-14.
Xie Jun, Zhou Huichao, Jia Zhiyao. Development of laser intersatellite links and key technologies [J]. Journal of Space Technology and Engineering, 2026, 3(1): 1-14. (in Chinese)

[12] 范峰，汪勃，张若禹，等. 星间链路技术发展与标准化研究[J]. 宇航学报，2025，46(12)：2450-2461.
Fan Feng, Wang Bo, Zhang Ruoyu, et al. Research on development and standardization of inter-satellite

link technology[J]. Journal of Astronautics, 2025, 46(12): 2450-2461. (in Chinese)
[13] 夏方园, 汪勃, 张国亭, 等. 激光星间链路终端技术发展与展望[J]. 光学技术, 2023, 49(2): 175-183.
Xia Fangyuan, Wang Bo, Zhang Guoting, et al. Recent development and prospective of inter-satellite laser links terminal technology [J]. Optical Technique, 2023, 49(2): 175-183. (in Chinese)
[14] Gioulis M, Kamalakis T, Alexandropoulos D. Comprehensive optical inter-satellite communication model for low earth orbit constellations: analyzing transmission power requirements [J]. Photonics, 2025, 12(4): 392.
[15] 马宁, 武磊磊, 孙文宇, 等. 相控阵跳波束卫星上行链路多维资源分配建模与方法研究[J]. 无线电通信技术, 2025, 51(1): 114-123.
Ma Ning, Wu Leilei, Sun Wenyu, et al. Research on multi-dimensional resource allocation modeling and method for satellite uplink of phased array beam-hopping [J]. Radio Communications Technology, 2025, 51(1): 114-123. (in Chinese)
[16] 镐梦婷. 基于相控阵的跳波束波位优化及资源分配研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.
[17] 许海龙, 费立刚, 廉昕, 等. 相控阵天线对低轨星座通导融合信号测距性能的影响分析[J]. 航天工程大学学报, 2026, 3(1): 92-96.
Xu Hailong, Fei Ligang, Lian Xin, et al. Influence of phased array antennas on the ranging performance for communication-navigation integrated signals in LEO constellations [J]. Journal of Space Engineering University, 2026, 3(1): 92-96. (in Chinese)
[18] 李静玲, 王显煜, 甄立, 等. 面向手机直连的低轨卫星网络通信技术[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2026, 46(1): 1-12.
Li Jingling, Wang Xianyu, Zhen Li, et al. Overview of LEO satellite networking communication technology for direct-to-phone connectivity [J]. Chinese Space Science and Technology, 2026, 46(1): 1-12. (in Chinese)
[19] 张宇, 付瑞, 肖婧婷. 3GPP NTN手机直连卫星技术与广电应用分析[J]. 广播与电视技术, 2025, 52(11): 35-39.
Zhang Yu, Fu Rui, Xiao Jingting. Analysis of 3GPP NTN direct-to-cell technology for mobile phones and its application in broadcasting[J]. Radio & TV Broadcast Engineering, 2025, 52(11): 35-39. (in Chinese)
[20] 穆桐, 王显煜, 李静玲, 等. 手机直连卫星技术发展与展望[J]. 空间电子技术, 2025, 22(S1): 163-170.
Mu Tong, Wang Xianyu, Li Jingling, et al. Development and future prospects of direct-to-satellite technology for smartphones [J]. Space Electronic Technology, 2025, 22(S1): 163-170. (in Chinese)
[21] 高航, 赵军锁, 匡文渊. 卫星互联网安全威胁分析与体系化防御策略[J]. 中国科学: 信息科学, 2026, 56(3): 620-642.
Gao Hang, Zhao Junsuo, Kuang Wenyuan. Analysis of security threats and systematic defense strategies for satellite Internet[J]. Scientia Sinica (Informationis), 2026, 56(3): 620-642. (in Chinese)
[22] 马新辉. 低空智联网空天地协同技术研究: 关键挑战与对策建议[J]. 无线电工程, 2025, 55(9): 1755-1763.
Ma Xinhui. Air-space-ground collaborative technologies for low-altitude intelligent networks: key challenges and strategic recommendations[J]. Radio Engineering, 2025, 55(9): 1755-1763. (in Chinese)
[23] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18-21.
Liu Yanliang, Zhang Haiping, Xu Yantian, et al. Development status and trend of global navigation satellite system [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(1): 18-21. (in Chinese)
[24] NASA Earthdata. Global navigation satellite system [EB/OL]. [2026-04-15]. https://www.earthdata.nasa.gov/data/space-geodesy-techniques/gnss.
[25] Hein G W. Status, perspectives and trends of satellite navigation[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 22.
[26] 杨子辉, 薛彬. 北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势[J]. 导航定位学报, 2022, 10(1): 1-14.
Yang Zihui, Xue Bin. The developed procedures and developing trends of BeiDou satellite navigation system [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2022, 10(1): 1-14. (in Chinese)
[27] 赵耀升, 宋立丰, 毛基业, 等. "北斗"闪耀: 初探中国卫星导航产业发展之道[J]. 管理世界, 2021, 37(12): 217-236.
[28] 姚铮, 陆明泉. 新一代卫星导航系统信号设计原理与实现技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 258.
[29] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国北斗[EB/OL]. (2022-11-04)[2026-05-20]. https://www.gov.cn/zhengce/2022-11/04/content_5724523.htm.
[30] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0版)[EB/OL]. (2019-12-16)[2026-05-20]. http://www.beidou.gov.cn/yw/xwzx/201912/W020191227723202425641.pdf.
[31] Xue W, Hu M, Ruan Y J, et al. Research on design

and staged deployment of LEO navigation constellation for MEO navigation satellite failure[J]. Remote Sensing, 2024, 16(19): 3667.

[32] Ge H B, Li B F, Jia S, et al. LEO Enhanced global navigation satellite system (LeGNSS): progress, opportunities, and challenges[J]. Geo-spatial Information Science, 2022, 25(1): 1-13.

[33] 李敏, 黄腾达, 李文文, 等. 低轨导航增强技术发展综述[J]. 测绘地理信息, 2024, 49(1): 10-19.
Li Min, Huang Tengda, Li Wenwen, et al. Overview of low earth orbit(LEO) navigation augmentation technology[J]. Journal of Geomatics, 2024, 49(1): 10-19. (in Chinese)

[34] 田润, 崔志颖, 张爽娜, 等. 基于低轨通信星座的导航增强技术发展概述[J]. 导航定位与授时, 2021, 8(1): 66-81.
Tian Run, Cui Zhiying, Zhang Shuangna, et al. Overview of navigation augmentation technology based on LEO[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021, 8(1): 66-81. (in Chinese)

[35] 苏醒. 基于高中低轨卫星的全球实时厘米级导航系统理论与方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.

[36] 张小红, 马福建. 低轨导航增强GNSS发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087.
Zhang Xiaohong, Ma Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087. (in Chinese)

[37] 蔚保国, 鲍亚川, 杨梦焕, 等. 通导一体化概念框架与关键技术研究进展[J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 1-14.
Yu Baoguo, Bao Yachuan, Yang Menghuan, et al. Conceptual framework and research progress on communication and navigation integration[J]. Navigation Positioning and Timing, 2022, 9(2): 1-14. (in Chinese)

[38] 李建佳. 超宽带阵列高精度定位技术研究[D]. 北京: 中国电子科技集团公司电子科学研究院, 2022.

[39] Chen L, Lü F R, Yang Q W, et al. Performance evaluation of CentiSpace navigation augmentation experiment satellites[J]. Sensors, 2023, 23(12): 5704.

[40] 卢鋆, 宿晨庚, 吕飞仁, 等. 基于低轨星座的PNT性能提升技术与能力分析[J]. 航天器工程, 2023, 32(4): 1-11.
Lu Jun, Su Chengeng, Lü Feiren, et al. Analysis of navigation augmentation techniques and capabilities based on low earth orbit constellations[J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32(4): 1-11. (in Chinese)

[41] Qin C, Gao Y B, Wang Y H. The optimization of low Earth orbit satellite constellation visibility with genetic algorithm for improved navigation potential[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 30798.

[42] 马福建. 低轨导航增强星座优化与信号频率设计研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2021.

[43] 李怀建, 韦彦伯, 杜小菁. 基于遗传算法的低轨导航星座构形优化设计[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(4): 74-78.
Li Huaijian, Wei Yanbo, Du Xiaojing. LEO navigation constellation configuration optimization based on genetic algorithm[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(4): 74-78. (in Chinese)

[44] Committee on Earth Studies. The role of small satellites in NASA and NOAA earth observation programs[M]. Washington, D. C.: National Academies Press, 2000.

[45] 郭今昌. 商用高分辨率光学遥感卫星及平台技术分析[J]. 航天器工程, 2009, 18(2): 83-89.
Guo Jinchang. Technical analysis of high resolution commercial optical remote sensing satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2009, 18(2): 83-89. (in Chinese)

[46] Rand C F, Khan A L. How commercial SmallSats are revolutionizing the remote detection and mapping of snow algae[J]. Frontiers in Remote Sensing, 2025, 6: 1572973.

[47] 李栋, 董正宏, 刘晓昂. 遥感卫星应用发展现状及启示[J]. 中国航天, 2020(1): 46-53.
Li Dong, Dong Zhenghong, Liu Xiaoang. The present status and its enlightenment of remote sensing satellite application[J]. Aerospace China, 2020(1): 46-53. (in Chinese)

[48] 叶钊, 李熹微, 王超, 等. 微纳卫星光学载荷技术发展综述[J]. 航天器工程, 2016, 25(6): 122-130.
Ye Zhao, Li Xiwei, Wang Chao, et al. Survey of technological development of optical payload for micro-nano satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2016, 25(6): 122-130. (in Chinese)

[49] 李贝贝. 吉林一号卫星星座[J]. 卫星应用, 2020(3): F0004.

[50] 周钰哲. 商业航天高质量发展的理论内涵、国际镜鉴与中国路径[J]. 东南学术, 2026(2): 96-109.
Zhou Yuzhe. The theoretical connotation, international experiences and Chinese path of high-quality development in commercial aerospace[J]. Southeast Academic Research, 2026(2): 96-109. (in Chinese)

[51] 李树涛, 李聪妤, 康旭东. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 148-166.
Li Shutao, Li Congyu, Kang Xudong. Development status and future prospects of multi-source remote sens-

ing image fusion[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 148-166. (in Chinese)

[52] 徐伟, 金光, 王家骐. 吉林一号轻型高分辨率遥感卫星光学成像技术[J]. 光学 精密工程, 2017, 25(8): 1969-1978.
Xu Wei, Jin Guang, Wang Jiaqi. Optical imaging technology of JL-1 lightweight high resolution multispectral remote sensing satellite[J]. Optics and Precision Engineering, 2017, 25(8): 1969-1978. (in Chinese)

[53] Smid H H F. An analysis of Chinese remote sensing satellites [EB/OL]. (2022-09-26)[2026-04-15]. https://www.thespacereview.com/article/4453/1.

[54] USCC. China's remote sensing [EB/OL]. (2024-12)[2026-04-15]. https://www.uscc.gov/sites/default/files/2024-12/Chinas_Remote_Sensing.pdf.

[55] Xinhua. China focus: Chinese remote sensing satellite constellation to offer global services [EB/OL]. (2025-03-03)[2026-04-15]. http://english.news.cn/20250303/586b8abc0d5e43428383ac6c8f047204/c.html.

[56] 唐珂, 乔亦实, 黄涛, 等. 四维高景三号卫星系统技术特点及在轨应用[J]. 卫星应用, 2025(12): 22-27.

[57] 邓雨楠. 发射攀新高 宇航创佳绩: 航天科技集团2025年宇航发射任务盘点[N]. 中国航天报, 2026-01-02(1).

[58] 张山, 李雨思, 张倩. 中国商业航天首次编队绕飞控制技术解析: 以四维高景二号03/04星为例[J]. 测绘技术装备, 2026, 28(1): 94-100.
Zhang Shan, Li Yusi, Zhang Qian. Analysis of commercial spacecraft formation flying and rendezvous control technology in China: Taking the Siwei Gaojing-2 03/04 satellites as an example[J]. Geomatics Technology and Equipment, 2026, 28(1): 94-100. (in Chinese)

[59] 韩荣. "中北大学-太行星座"项目正式发布 [N]. 科技日报, 2025-01-22(1).