

星链星座技术体制分析和发展趋势展望

尚辉超, 冯广华, 魏笑, 崔翔, 吴迪

(中国星网网络系统研究院有限公司, 北京 100071)

摘要: 当前, 全球低轨卫星星座建设和卫星互联网商业化进程加速推进, 一个全球覆盖、泛在互联、深度融合的卫星通信网络正加快成形。星链是由美国太空探索技术公司提出的巨型卫星互联网星座计划, 该计划旨在通过部署数万颗低轨卫星为全球用户提供高速、低时延的卫星互联网服务, 目前已成为全球卫星数量最多、用户规模最大、应用场景最广、技术体制最先进的卫星互联网星座。基于此, 首先对包括星座构型和轨道设计、卫星平台设计、通信体制设计、干扰规避技术等星链星座技术体制进行分析; 随后在此分析基础上描述星链当前面临的严峻挑战, 并展望星链未来的发展趋势; 最后给出星链对我国低轨卫星星座建设的启示。

关键词: 卫星互联网; 星链星座; 技术体制; 无线通信网络

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2026011

Analysis of Starlink Constellation Technical System and Prospects for Development Trends

Shang Huichao, Feng Guanghua, Wei Xiao, Cui Xiang, Wu Di

China Satellite Network System Co., Ltd., Beijing 100071, China

Abstract: At present, the construction of global low-orbit satellite constellations and the commercialization process of satellite internet are accelerating, and a satellite communication network with global coverage, ubiquitous interconnection and deep integration is taking shape at a fast pace. Starlink is a giant satellite internet constellation project proposed by SpaceX, the plan aims to provide high-speed and low-latency satellite internet services to global users by deploying tens of thousands of low-orbit satellites. Currently, it has become the satellite internet constellation with the largest number of satellites, the largest user base, the widest application scenarios, and the most advanced technical system in the world. Based on this, the technical system of the Starlink constellation is first analyzed, including constellation configuration and orbit design, satellite platform design, communication system design, and interference avoidance technology. Subsequently, based on the analysis, the severe challenges currently faced by Starlink are outlined, and the future development trends of Starlink are explored. Finally, the implications of Starlink for the construction of China's low-orbit satellite constellations are presented.

Keywords: satellite internet, Starlink constellation, technical system, wireless communication network

0 引言

当前, 人类正迈入天地一体化的泛在互联时代, 随着全球数字化进程加速推进, 社会对无处不在、高速、可靠的网络连接需求激增, 而传统地面通信网络在覆盖范围上面临地理环境限制和高成本挑战, 难以真正实现

全球泛在连接。在此背景下, 低轨卫星互联网凭借其全球覆盖、性能优越、灵活部署等独特优势, 成为构建未来全球通信网络不可或缺的关键组成部分。

在这场重塑全球连接格局的竞赛中, 由美国太空探索技术公司 (SpaceX) 提出的星链 (Starlink) 计划无疑是最受瞩目、发展最为迅猛的引领者。作为全球首个实

现大规模部署并投入商业化运营的巨型卫星星座，星链旨在通过在低地球轨道部署数万颗卫星，构建密集覆盖全球的卫星互联网。截至目前，其已发射卫星数量、在轨正常运行卫星数量、服务用户规模及商业化应用广度均远超其他同类系统，确立了在该领域的绝对领先地位。另外，星链并非简单的卫星数量堆砌，其背后蕴含的技术体制创新，包括颠覆传统的星座构型与轨道设计、高度集成化和工业化的卫星平台、先进的通信载荷与激光星间链路技术及动态高效的干扰规避与频谱利用策略，共同构成了其核心竞争力的基石，更重新定义了大型低轨星座的技术范式和发展路径。

1 星链星座技术体制分析

星链是由 SpaceX 主导建设的低轨卫星互联网星座系统，旨在通过部署大规模低轨卫星构建全球高速通信网络，消除传统地面基础设施覆盖盲区，并为天地一体化通信奠定基础。Jonathan's Space Report 网站数据显示，截至 2025 年 9 月，星链已完成约 9 684 颗卫星发射（其中约 8 386 颗在轨运行），在全球约 140 个国家和地区推出服务，用户规模超 600 万，成为规模最大、部署最快的卫星星座系统。星链的核心使命是解决偏远地区（极地、海洋、沙漠等）、应急场景及未来 6G 融合的通信需求，同时探索军事、物联网等垂直领域的应用。本节聚焦星链的技术体制分析，主要从星座构型和轨道设计、卫星平台设计、通信体制设计和干扰规避技术 4 个方面展开论述。

1.1 星座构型和轨道设计

星链卫星互联网星座主要包含一代星座和二代星座，其星座构型参数见表 1。2016 年 11 月，SpaceX 首次向美国联邦通信委员会（federal communications commission, FCC）提交一代星座系统技术文件，其中包含 4 425 颗轨道高度为 1 110~1 325 km 的低轨卫星部署方案。2018 年 11 月、2019 年 8 月、2020 年 4 月，SpaceX 对该文件进行了 3 次修改，调整内容包括卫星轨道高度、卫星数量及星座排布等关键参数。2021 年 4 月，FCC 对 SpaceX 最后一次修改的技术文件进行了授权，至此，星链一代系统建设方案正式定型。星链一代星座系统第一阶段位于约 550 km 的轨道圈层，共部署 4 408 颗卫星^[1-2]；第二阶段为“V 频段星座”，作为星链一代的补充，位于约 340 km 的轨道圈层，计划部署 7 518 颗卫星。2022 年 12 月，FCC 称 SpaceX 将把“V 频段星座”有效载荷集成到星链二代卫星，不再单独部署 V 频段星座。

表 1 星链星座构型参数

星座名称	卫星数	轨道倾角	轨道高度/km	轨道平面数/个	每个轨道平面卫星数/颗	计划卫星数/颗
星链一代星座系统	4 408 颗 (第一阶段)	53°	550	72	22	1 584
		53.2°	540	72	22	1 584
		70°	570	36	20	720
		97.6°	560	6	58	348
		97.6°	560	4	43	172
	7 518 颗 (第二阶段)	42°	335.9	/	/	2 493
		48°	340.8	/	/	2 478
		53°	345.6	/	/	2 547
星链二代星座系统	29 988 颗	53°	340	48	110	5 280
		46°	345	48	110	5 280
		38°	350	48	110	5 280
		96.9°	360	30	120	3 600
		53°	525	28	120	3 360
		43°	530	28	120	3 360
		33°	535	28	120	3 360
		148°	604	12	12	144
		115.7°	614	18	18	324

SpaceX 于 2020 年 5 月向 FCC 提交包含 3 万颗卫星的技术文件，该星座代号为星链二代（Starlink Gen2）。2021 年 8 月，SpaceX 进一步提交星链二代修正申请文件，明确星链二代将在 340~614 km 不等的轨道圈层部署 29 988 颗卫星。2022 年 12 月，FCC 批准 SpaceX 部署 7 500 颗星链二代卫星，轨道高度设为 525/530/535 km^[3]。

星链的轨道设计采用“550 km 主层+340 km 增强层”的双层星座架构，这一设计在覆盖范围、传输时延、建设成本等方面实现动态平衡。通过主层 550 km 轨道的广域覆盖和增强层 340 km 轨道的更密集覆盖，有效改善了高纬度地区的覆盖质量；通过 340 km 的极低轨道设计显著降低了网络传输时延，从而提升了实时应用体验；同时星链的低轨道设计使发射成本更低，通过低轨卫星的覆盖补盲和热点区域精准服务，星链实现了发射成本与系统性能间的最佳平衡。

1.2 星链卫星平台设计

星链卫星平台是 SpaceX 低轨卫星星座系统的核心载体，其设计主要围绕模块化堆叠架构、电推进系统、通信载荷等方面展开，通过从 V0.9 到 V2.0/V3 的代际迭代，卫星通信性能、成本效率及在轨可靠性持续突破，为星链全球高速低时延的通信服务提供核心支撑^[3-4]。

星链卫星平台版本迭代与核心参数对比见表 2。SpaceX 在 2019 年 5 月发射首批 60 颗 V0.9 卫星，作为初代技术验证平台，该平台采用平板堆叠式设计，质量约

227 kg, 采用轻质铝合金框架, 搭载氦离子霍尔推进器, 可实现轨道爬升、位置维持与离轨功能; 通信系统配置4副Ku频段相控阵天线, 但未集成星间激光链路, 数据传输完全依赖地面信关站。V1.0卫星的单星质量增至260 kg, 材料结构升级为碳纤维复合材料与铝合金混合结构, 可确保100%大气层烧毁率以有效消除空间碎片风险; 通信系统新增Ka频段天线, 形成Ku/Ka双频段通信架构。V1.5卫星的核心突破在于星间激光链路的集成, 单星质量增至295 kg, 通过在平台边缘配置激光通信模块, 构建动态光网络拓扑, 实现端到端时延降低50%以上。V2Mini卫星是基于星舰发射延迟背景下的过渡方案, 基于猎鹰9号运载能力约束优化设计, 单星质量高达800 kg, 搭载E频段相控阵天线, 推进系统更新为氦离子霍尔推进器, 同时支持手机直连服务。V2.0卫星作为完整版设计, 原定由星舰发射, 单星质量约1 250 kg, 长度达7 m, 远超V2Mini卫星, 该卫星采用硅基相控阵技术, 天线增益提升至52 dBi。规划中的V3卫星将依托星舰运力实现平台能力全面跃升, 单星下行容量超1 Tbit/s, 预计2026年全面部署, 有望彻底解决偏远地区联网难题。

表2 星链卫星平台版本迭代与核心参数对比

版本	发射时间	重量	单星下行容量	关键技术突破	发射方式
V0.9	2019年	227 kg	较低(测试级)	氦离子推进器	猎鹰9号
V1.0	2019—2021年	260 kg	较V0.9有所提升	Ku/Ka双频段通信架构	猎鹰9号
V1.5	2021—2023年	295 kg	24 Gbit/s	新增星间激光链路	猎鹰9号
V2Mini	2023—2025年	800 kg	96 Gbit/s	E频段相控阵天线、支持手机直连服务	猎鹰9号
V2.0	原型测试中	1 250 kg	约为V1.0的10倍	硅基相控阵天线增益(52 dBi)	星舰
V3	预计2026年	未公开	大于1 Tbit/s	太比特吞吐量	星舰

纵观星链的6代卫星平台, 其迭代过程是航天工程领域快速迭代、批量验证、规模部署的实践典范。平板堆叠设计保障发射效率; 材料选择兼顾轻量化与完全烧蚀特性, 有效消除轨道碎片风险; 推进系统从氦气到氦气的升级, 实现比冲性能与成本控制的动态平衡; 通信载荷通过频段扩展、星间激光链路集成及天线技术迭代, 实现容量指数级增长。未来, V3卫星所代表的太比特级

容量跃升, 将依赖于更高频段开发、更大规模天线阵列和星上处理能力的技术突破, 这不仅将进一步验证巨型卫星平台的在轨可靠性, 还将为太空经济开辟高带宽服务、实时物联与泛在连接的全新应用场景, 重新定义近地轨道基础设施的规模化边界与技术极限。

1.3 星链通信体制设计

1.3.1 频率与带宽

星链一代卫星系统的上下行链路主要采用Ku频段和Ka频段进行通信, 用户侧传输链路主要采用Ku频段, 其中卫星到用户终端的下行链路频率范围为10.7~12.7 GHz, 总可用带宽2 GHz, 可同时支持至少8个波束, 在采用不同极化方式、空间复用等技术手段的情况下, 可进一步提升波束数量; 用户终端到卫星的上行链路频率范围为14.0~14.5 GHz, 总可用带宽500 MHz。信关站侧通信主要使用Ka频段, 其中下行链路频率范围为17.8~19.3 GHz, 上行链路频率范围为27.5~30.0 GHz^[5]。

与星链一代卫星系统仅采用Ku频段和Ka频段不同, 星链二代卫星系统采用Ku、Ka、E频段和L频段, 星链二代上下行链路频率范围和可用带宽见表3。星链二代下行用户链路以Ku频段为主, 用户终端可用带宽可达2 000 MHz; 上行用户链路覆盖Ku/Ka频段, 用户终端可用带宽最大可达125 MHz^[6]; 下行馈电链路以E频段(71.0~76.0 GHz)为主, 辅以Ka频段, 上行馈电链路则包含E频段(81.0~86.0 GHz)及Ka频段, 上下行馈电链路可用带宽最大可达5 GHz; 星链二代卫星系统新增手机直连功能, 增加L频段(1 910~1 995 MHz)专用链路, 复用地面移动通信频段, 使普通4G和5G手机无须改装即可直连卫星^[7]; 测控链路采用Ku频段, 其带宽需求远低于通信链路(用户/馈电链路), 主要传输低数据量的指令和状态包(速率通常为kbit/s至Mbit/s级), 具体数值尚未公开。

1.3.2 波形调制和多址接入

对于星链的波形调制技术, 星链摒弃卫星通信主流的DVB-S2X标准, 创新性引入地面移动通信的正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术, OFDM可在时域、频域进行细粒度的动态资源块分配, 支持海量终端的上行随机接入和数据传输; 同时, SpaceX选择OFDM技术路径, 可以直接利用地面通信产业的巨大规模效应降低研发成本和终端价格, 并实现技术的快速迭代。更重要的是, 通过采用与地面网络同源的技术, 星链为未来5G/6G星地融合网络的构建奠定了技术基础。

尽管SpaceX对星链通信技术采用技术秘密的方式进

表 3 星链二代上下行链路频率范围和可用带宽

链路类型	传输方向	频率范围	可用带宽
用户链路	下行(卫星→用户终端)	10.7~12.75 GHz 17.8~18.6 GHz 18.8~19.3 GHz 19.7~20.2 GHz	小于或等于 2 000 MHz(终端侧)
	上行(用户终端→卫星)	12.75~13.25 GHz 14.0~14.5 GHz 28.35~29.1 GHz 29.5~30.0 GHz	小于或等于 125 MHz(终端侧)
馈电链路	下行(卫星→信关站)	17.8~18.6 GHz 18.8~19.3 GHz 71.0~76.0 GHz	小于或等于 5 000 MHz
	上行(信关站→卫星)	27.5~29.1 GHz 29.5~30.0 GHz 81.0~86.0 GHz	小于或等于 5 000 MHz
手机直连链路	下行(卫星→手机)	1 990~1 995 MHz	小于或等于 5 MHz
	上行(手机→卫星)	1 910~1 915 MHz	小于或等于 5 MHz
测控链路	下行(卫星→测控站)	12.15~12.25 GHz 18.55~18.60 GHz	—
	上行(测控站→卫星)	13.85~14.00 GHz	—

行保护，相关技术细节未对外公开，但美国德州大学奥斯汀分校的学者对星链信号进行了破解，研究人员通过分析捕获的星链信号功率谱发现，其功率谱具有陡峭边缘，这与 OFDM 信号的功率谱特征相符^[8]。

星链的 Ku 频段信号下行信道结构^[8]如图 1 所示。星链 Ku 频段信号从 10.7 GHz 起依次排布 8 个信道，每个信道占用 250 MHz 带宽，其中有效信号带宽 240 MHz，保护带宽 10 MHz，快速傅里叶变换（fast fourier transform, FFT）点数为 1 024，当有 1 024 个子载波时，子载波间隔为 234.375 kHz，该数值为星链子载波的最小间隔（实际子载波数量或未达 1 024）；结合子载波间隔通道为 15 kHz 整数倍的行业设计惯例，可推测星链实际采用的子载波间隔为 240 kHz。在每个信道中，中间 4 个子载波均空闲，以避免直流干扰。此外，频率较低的两个信道，即中心频点为 F_{c1} 和 F_{c2} 的信道同样空闲，这可能是 SpaceX 为避免干扰 10.6~10.7 GHz 的射电天文频段的设计考量。

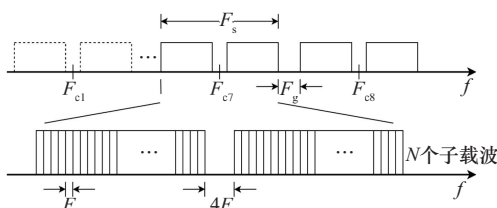


图 1 星链的 Ku 频段信号下行信道结构^[8]

星链信号帧结构如图 2 所示。每个 OFDM 符号长度为 4.4 μ s，其中包含循环前缀；帧保护间隔为一个 OFDM 符号长度与一个循环前缀长度之和，为 4.53 μ s。每个帧长度为 302 个 OFDM 符号长度加上帧保护间隔，因此系统每秒可传输 750 帧数据。每帧都以主同步序列（primary synchronization sequence, PSS）开始，随后为辅同步序列（secondary synchronization sequence, SSS），中间段为数据 OFDM 符号，末尾依次为尾码减一同步序列（coda-minus-one synchronization sequence, CM1SS）、尾同步序列（coda synchronization sequence, CSS）和帧保护间隔。星链下行链路信号参数见表 4。

对于星链的多址接入技术，尽管 SpaceX 并未公开相关多址技术细节，但从星链信号的分析结果来看，星链采用了正交频分多址（orthogonal frequency division multiple access, OFDMA）技术^[8-9]，每个信道划分为 1 024 个子载波，通过动态分配时频资源单元实现多用户并发传输。此外，星链采用相控阵天线，可形成多个波束，并通过在空间上区分用户，实现频率资源的复用，因此推测星链同时采用空分多址（space division multiple access, SDMA）技术。星链通过 OFDMA 和 SDMA 的结合实现时频空联合复用，其中 SDMA 在空间维度分离用户，OFDMA 在时间和频率维度分配资源，二者协同作用，进一步提升系统用户容量。

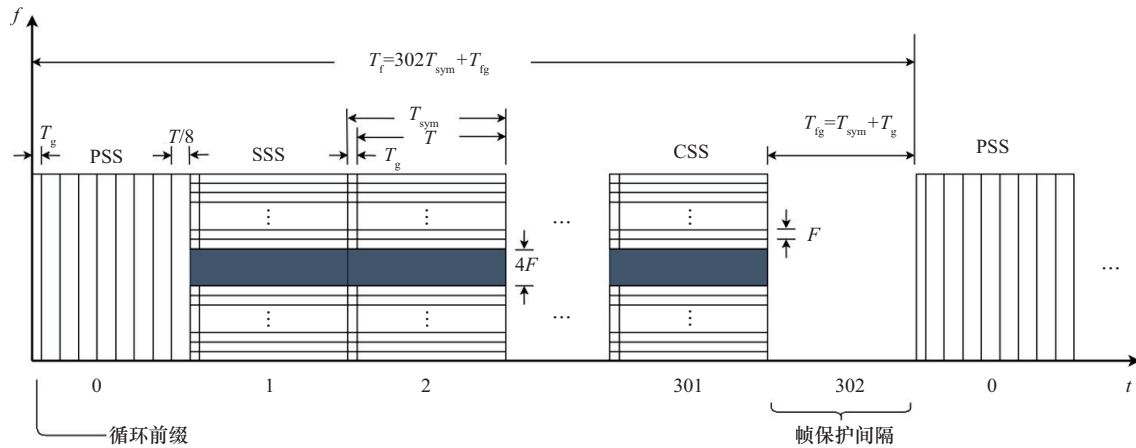


图 2 星链信号帧结构^[6]

表 4 星链下行链路信号参数

参数	符号	数值	单位
信号带宽	F_s	240	MHz
子载波数量	N	1 024	个
子载波间隔	$F = F_s/N$	234.375	kHz
可用的 OFDM 符号长度	$T = N/F_s$	64/15	μs
循环前缀占 $1/F_s$ 间隔数量	N_g	32	个
循环前缀长度	$T_g = N_g/F_s$	2/15	μs
OFDM 符号长度	$T_{\text{sym}} = T + T_g$	4.4	μs
帧周期	T_f	1/750	s
帧保护间隔	T_{fg}	4.53	μs
一个帧内非零符号数量	N_{sf}	302	个
一个帧内数据(非同步)符号数量	N_{sfd}	298	个
信道间隔	F_δ	250	MHz
信道保护间隔	$F_g = F_\delta - F_s$	10	MHz

1.3.3 传输速率及时延

星链卫星的传输速率和时延指标在多种应用场景下均有显著提升，星链传输速率和时延指标见表 5。在传输速率方面，星链普通用户的下载速率普遍为 50~250 Mbit/s，根据美国 Ookla 公司的 Speedtest 测速平台实测数据，星链网络美国用户的下载速率中位数从 2022 年第三季度的 53.95 Mbit/s 提升至 2025 年第一季度的 104.71 Mbit/s。航空场景中，2023 年星链曾承诺为卡塔尔航空提供 350 Mbit/s 的峰值下载速率，而在 2025 年实际部署中，卡塔尔航空的波音 777 机队实测峰值速率已提升至 500 Mbit/s。在手机直连场景下，2024 年 SpaceX 使用三星手机在 L 频段 (1 910~1 995 MHz) 实测峰值下载速率为 17 Mbit/s，该测试在卫星轨道高度仅 367 km (低于 550 km 目标高度)，且仅依托 6 颗卫星的条件下完成，实测丢包率为 15%，反映了初期技术的局限性，预计未来目标将基于 6G NTN 标准，将该场景下的峰值速率提升至 50 Mbit/s。在上传速

率方面，根据美国 Ookla 公司 2025 年第一季度实测结果，星链普通用户的整体上传速率中位数为 14.84 Mbit/s，仅有 17.4% 的星链 Speedtest 用户能达到美国 FCC 规定的宽带服务最低要求 (100 Mbit/s 下载速率、20 Mbit/s 上传速率)，这一现状主要受星链上传速率偏低的影响，相关性仍有较大改进空间，预计星链未来将通过卫星硬件升级、终端设备优化等方式将上传速率提升至 50 Mbit/s。

表 5 星链传输速率和时延指标

指标类型		当前性能	目标性能
传输速率	下载速率	普通用户 (中位值)	104.71 Mbit/s
		手机直连场景 (L 频段) (峰值)	17 Mbit/s
	航空场景 (峰值)	500 Mbit/s	
上传速率	普通用户 (中位值)	14.84 Mbit/s	
传输时延	普通用户 (中位值)	25.7 ms	
			15 ms

在传输时延方面，2025 年 7 月，SpaceX 官网发布波段切换技术公告，明确美国地区的传输时延中位数为 25.7 ms。未来 SpaceX 计划将卫星轨道高度从 550 km 降至 340 km，同时通过星间激光链路构建自主路由网络，减少地面中转跳数，并利用人工智能算法动态调度激光链路^[10]，预计终端到互联网接入点的传输时延将达到 15 ms。

1.3.4 波束和天线设计

随着星链系统迭代升级，其波束和天线设计得到显著优化。对于星链一代 (V1.0/V1.5)，无论是发射波束还是接收波束，用户侧均以 Ku 频段为主，馈电波束则集中于 Ka 频段。每颗卫星配置 4 副独立的平板相控阵天线，

可形成动态多波束，其中两副天线负责卫星与用户终端的通信，另外两副天线专门用于与地面信关站的数据回传，且每副天线均支持左右旋圆极化（LHCP/RHCP）复用以提升频谱效率。用户下行链路2 GHz带宽被划分为8个独立信道，每个信道带宽240 MHz、保护带宽10 MHz；波束采用六边形小区部署策略^[11]，相邻小区分配不同信道以避免干扰，波束形状随卫星位置动态变化，星下点呈近圆形，边缘则渐呈椭圆形。星链一代终端天线为相控阵天线，采用圆形平板设计，直径约0.48 m，同时搭配灵活机械结构保持对卫星的精准追踪；SpaceX专利US20180241122A1公开了该相控阵天线的工作原理，包括多层堆叠结构、耦合缝隙馈电机制、混合扫描策略等，该专利为星链终端的商业化落地提供了关键技术支撑，也成为低轨卫星相控阵天线的设计典范。

星链二代的天线和波束设计参数见表6。星链二代（V2Mini/V2.0）在继承Ku/Ka频段的基础上，新增E频段。其中，Ku频段波束用于用户链路，发射波束在指向星下点的对地视轴处增益最小为34 dBi，在指向覆盖边缘处增益最大为44 dBi；Ka频段波束用于用户链路和馈电链路，发射波束指向星下点处增益最小为34.5 dBi，覆盖边缘处增益最大为44.5 dBi；E频段波束仅用于与信关站进行通信，发射波束最小增益为42 dBi，最大增益为52 dBi^[6]。星链二代卫星配备相控阵天线和抛物面天线，相控阵天线主要负责与用户终端进行通信的用户链路（包括Ku、Ka频段），利用其波束成形和敏捷指向能力同

时生成多个动态波束，为不同区域的用户提供服务；抛物面天线则主要用于卫星与地面信关站间的馈电链路（Ka频段），其通常具备较高增益，适用于远距离点对点数据传输，可将用户数据稳定回传至地面网络。此外，星链为实现手机直连功能，V2Mini卫星配置了专门的中频个人通信服务（personal communications service, PCS）频谱天线，工作于L频段，支持现有4G/5G手机无须硬件升级、软件更新或外置设备，通过运营商漫游协议即可自动切换至卫星网络。每颗手机直连卫星配置4副相控阵天线，包括3副下行链路天线和1副上行链路天线。每副天线可独立控制并生成16个波束，单星共计可提供64个波束^[12]。星链二代终端天线也有显著升级，外形从第一代的圆形改为矩形，内部采用了高度芯片化的射频架构，可支持相控阵波束成形和数字信号处理功能。

1.3.5 MAC层调度机制

星链的物理层技术（如相控阵天线、高频段频谱、OFDM调制技术）和庞大的卫星星座，共同构成了一条理论上容量巨大的太空高速公路。然而，这条公路上的车辆（即用户数据流）如何有效、高速地通过，需要依赖媒体访问控制（medium access control, MAC）层调度机制，若无高效的MAC调度，再先进的卫星和技术也会因资源冲突和流量拥塞而无法充分发挥效用，最终导致网络容量浪费和用户体验恶化。

星链网络采用一种分级的两层流量调度机制^[13]，该机制包含一个全局控制器和一个星上本地控制器。全局

表6 星链二代的天线和波束设计参数

天线/波束类型	工作频段	主要用途	性能参数	技术特点
星载相控阵天线	Ku频段	用户链路	发射波束增益:34 dBi (星下点) ~ 44 dBi (边缘); 接收 G/T值:9.5~19.5 dB/K (星下点), 7.0~17.0 dB/K (边缘)	采用先进的相控阵波束成形和数字处理技术
	Ka频段		发射波束增益:34.5 dBi (星下点) ~ 44.5 dBi (边缘); 接收 G/T值:12.9~22.9 dB/K (星下点), 10.4~20.4 dB/K (边缘)	
星载抛物面天线	Ka频段	馈电链路	发射波束增益:34.5 dBi (星下点) ~ 44.5 dBi (边缘); 接收 G/T值:12.9 ~ 22.9 dB/K	用于与地面信关站通信
E频段天线	E频段	馈电链路	发射波束增益:42 ~ 52 dBi; 接收 G/T值:17.7 ~ 27.7 dB/K	仅用于与信关站通信; 同一频率可采用不同的极化方式 (LHCP/RHCP)
测控天线	TT&C频段	测控链路	数据速率一般不高,通常为 kbit/s 至 Mbit/s 级	使用全向天线; 可通过 Ka 频段(用于用户链路和馈电链路)和 E 频段(用于信关站馈电链路)的通信链路实现测控功能
手机直连 PCS 天线	L 频段	用户链路(手机直连)	用户侧实测峰值下载速率:17 Mbit/s; 丢包率:15%	大型专用相控阵天线,具有高增益和窄波束特性,单星可生成 64 个波束
普通终端天线	Ku/Ka 频段	用户链路	发射功率:2.44 W(较一代 4.03 W 降低约 39.5%); 天线增益:约 35 dBi	矩形相控阵天线,支持相控阵波束成形和数字信号处理

控制器负责以 15 s 为固定周期，为每个用户终端分配一颗服务卫星；卫星被分配后，星上本地控制器负责调度来自多个终端的数据流，采用类似轮询的调度机制实现数据传输协调。

星链的全局控制器具有明确的决策偏好：其一，倾向于选择仰角更高的卫星，这既能降低通信损耗，也符合国际电信联盟对静止轨道的保护规定；其二，在终端朝向方面，通常优先选择位于北侧的卫星；其三，调度器更偏好使用发射时间更新、当前处于太阳光照下的卫星，以优化整个星座的长期稳定性和卫星的能源利用率。当不得不选择处于地球阴影中的卫星时，则会进一步优先分配仰角较高的卫星，从而降低其通信功耗，节约宝贵的星上能源。

星上本地控制器根据终端缓存数据大小、业务优先级、信道状态等信息，做出比全局控制器更敏捷、更精细的调度决策。SpaceX 专利 US11540301B1 对星链卫星本地 MAC 调度器的设计、算法和工作原理进行了详细阐述，包括对半双工终端的优化调度、兼具效率和公平性的分箱策略、考虑链路自适应的调制编码方式的调度策略等。

1.4 星链干扰规避技术

通过对 SpaceX 向 FCC 提交的关于建设星链星座系统的相关技术文件的梳理分析，将星链星座系统所使用的干扰规避策略进行总结，具体见表 7。

波束控制是星链系统实现干扰规避的核心技术，其通过主动塑造无线电波的传播方向，从空间上规避干扰。相控阵天线是用户侧实现该功能的关键，与传统抛物面天线的固定波束发射模式不同，它可通过数字信号处理，动态控制成千上万个微小天线单元的相位和幅度，从而实时生成一个或多个指向特定卫星的窄波束。更为重要的是，当系统检测到干扰信号（无论是星链系统对其他系统产生干扰，还是自身受到外部干扰）时，天线可在干扰源或受扰系统的方向上形成一个“零陷”，即一个信号强度极低的区域。星链卫星同样搭载了先进相控阵天

线，具备类似的波束成形与零陷能力，能够主动调整其覆盖地面的波束形状，避开其他系统的地面站或卫星，实现了空间隔离的双向智能化调控。

星链系统为地球站（特别是用户终端）设置了一个较高的最小通信仰角（20°或以上），这意味着终端仅与地平线以上足够高度的卫星通信，而不会尝试连接贴近地平线的卫星。这一策略缩小了终端可选择连接的卫星范围，有效降低了与服务于同一区域的其他低轨卫星系统发生波束交叉的概率。

功率控制旨在“按需分配”发射功率，在保障自身通信链路质量的同时，最小化不必要的信号辐射。星链系统并非始终以最大功率发射信号，而是根据卫星轨道高度、终端与卫星间的实时距离、天气衰减效应及信道条件等因素，动态调整发射机的输出功率。例如，当一颗卫星运行在较低轨道（如 340 km）时，由于其与地面距离更近，路径损耗更小，因此它会以较低的等效全向辐射功率工作，既能维持可靠通信，又可避免对其他系统产生过强的信号溢出。

此外，任何天线除主瓣（能量主要辐射方向）外，都会有旁瓣（非主要方向的能量泄漏）。星链通过优化其用户终端的天线设计，如使用更大的天线口径和更先进的阵列布局，使天线生成一个主瓣增益极高、旁瓣增益极低的波束。这种高尖锐度的波束方向性意味着信号能量更集中地指向目标卫星，而向其他方向泄漏的能量被显著抑制，这直接减少了因天线旁瓣照射其他非目标卫星而造成的旁瓣干扰，为提升系统间的隔离度奠定了关键硬件基础。

角度隔离策略利用星链大规模星座的固有架构优势，通过系统级调度和路由规划实现规避干扰。由于在轨卫星数量众多，对于地面上的任何一个终端，其通信视野内通常同时存在多颗（可能高达十余颗）可提供服务的星链卫星。当系统预测或检测到当前服务卫星的通信链路与其他系统存在潜在干扰时，网络控制中心可以通知

表 7 星链星座的干扰规避策略

策略类别	规避策略	核心机制
波束控制	地球站和卫星的波束成形和零陷	通过相控阵天线动态调整波束指向，在干扰源或受扰方向形成信号零陷，提升空间隔离度
	提高最小通信仰角	限制地球站的波束活动范围，减少可见卫星数量，从而降低与其他系统发生干扰的概率
功率控制	自适应功率控制	根据卫星高度、链路条件等动态调整发射功率，在保障通信质量的同时最小化干扰
	地球站天线旁瓣抑制	通过优化天线设计，降低旁瓣增益，减少旁瓣辐射造成的离轴干扰
角度隔离	卫星分集与快速切换	利用星座卫星数量多的优势，在发生干扰时快速将终端切换到角度更优的卫星
	星间链路重建	当地链路干扰严重时，通过星间链路将数据迂回传输至其他卫星，再利用无干扰的星地链路回传

终端在毫秒级别内无缝切换到视野内另一颗不同角度的卫星。该切换动作会改变干扰链路的几何关系，增大干扰路径与受扰路径间的夹角，结合终端本身强大的旁瓣抑制能力，这一新角度可以让干扰电平降至可接受的水平以下。

星间链路重建是更为先进和彻底的一种角度隔离手段。星链卫星均搭载激光星间链路，当某条星地链路（如卫星A到地面站Z）被判定会产生有害干扰时，系统可以让卫星A将拟传输至地面站Z的数据通过激光链路转发至另一颗卫星B，再由卫星B与地面站Z建立连接。这样，原本卫星A直连地面站Z的干扰链路将被卫星A—卫星B—地面站Z的新传输路径所取代。卫星B与受扰系统间的空间夹角更大，从而在根本上避免了干扰，这使得星链系统能够灵活避开各类干扰热点区域。

2 挑战和未来发展方向

目前，星链已在全球覆盖能力、用户规模拓展和商业化落地等方面取得显著进展，然而，星链在快速发展过程中仍面临一系列严峻挑战，主要包括轨道设计和空间环境适应性挑战、通信性能和标准化挑战、干扰规避与系统间协调挑战等。

(1) 轨道设计和空间环境适应性挑战

星链在轨道设计方面采取了高度灵活的策略，可以通过持续调整卫星轨道参数以优化覆盖能力和运行性能。然而，随着全球低轨卫星星座项目的蓬勃开展，近地轨道空间的轨道资源越来越紧张，空间环境日益拥挤，星链也因此面临前所未有的轨道资源竞争压力和空间碎片的潜在碰撞风险。

星链二代将轨道高度降至340 km的轨道圈层，这种超低轨道设计虽降低了单星发射成本，却带来了严峻的空间环境适应性挑战。低轨道设计导致卫星面临大气阻力的持续侵蚀，特别是在太阳活动高峰期，地磁暴可使大气阻力骤增50%，进一步加剧卫星轨道衰减。而星链卫星的低成本设计在这一挑战面前显得尤为脆弱，当太阳活动加剧时，卫星搭载的霍尔推进器因推力不足，无法持续修正轨道，2024年全年已有316颗星链卫星因轨道衰减在大气层中被烧毁。因此，在应对动态且日益拥挤的空间环境时，星链的大规模星座的稳定运行正持续承受来自太阳活动、空间碎片及轨道资源竞争带来的多重压力。

(2) 通信性能和标准化挑战

星链虽实现全球覆盖，但核心性能指标仍存在先天局限。例如，终端连接密度受限，难以支撑智慧城市物

联等场景中每平方千米超万级的设备接入需求；在时延方面，虽计划通过激光星间链路将时延降至20 ms以下，但卫星轨道高度（如550 km）导致的传输时延无法从根本上消除，且卫星每2~3 min的频繁切换会引发时延波动，无法满足6G在远程手术、工业控制等场景中对微秒级低时延的要求。

另外，星链通信体制的重要发展趋势是与地面网络深度融合。尽管第三代合作伙伴计划（3GPP）已在R17及后续版本中制定非地面网络（non-terrestrial network, NTN）标准，但进展仍落后于星链的工程实践，这种滞后导致星链系统与现有地面5G/6G网络的深度融合、无缝漫游和互联互通仍存在技术壁垒，限制了其作为全球无缝覆盖的天地一体化网络组成部分的发展潜力。因此，如何与基于3GPP标准的地面通信网络深度融合，是星链未来发展面临的重大挑战。

(3) 干扰规避与系统间协调挑战

随着全球大规模星座系统的发展，星链通信链路的干扰问题不容忽视，干扰问题不仅来自系统内部（自干扰），还来自其他卫星系统（互干扰），特别是不同星座的轨道高度接近时，干扰风险会显著提升。干扰对星链系统服务性能也存在严重影响。研究表明，在未采取干扰规避措施的情况下，星链系统中，干扰噪声比（I/N）超标的时长占比，可能高达5.79%，部分场景下甚至达到16.75%^[14]。这意味着在某些时段，干扰可能导致链路质量显著下降甚至完全中断。因此，研发有效的干扰规避技术对保障星链服务质量至关重要。另外，随着低轨星座数量的持续增加，卫星系统间的干扰协调将成为星座运营中的常规挑战，这一问题的解决需要各星座系统间的协商甚至相关监管机构的介入。

因此，基于当前发展现状和面临的挑战，对星链未来发展方向预测如下。

(1) 星座架构优化和智能化管理

未来星链将致力于构建更智能、更稳定的星座系统。通过引入更先进的人工智能算法，星链将实现卫星自主协同避障、动态路由优化等功能，以减少轨道调整频率并提升星座整体稳定性^[15]。另外，除继续优化现有550 km左右轨道外，星链还将进一步发展极地轨道星座，例如2025年8月SpaceX发射V2Mini卫星到极地轨道，以增强对高纬度地区和极地的覆盖能力，服务航空、海事、科研及国防等领域。

(2) 通信技术演进与标准化

未来星链将持续提升其网络能力并拓展服务边界。计划

中的V3卫星下行容量较V2Mini提升10倍,达到1 Tbit/s,这是一项涉及卫星平台、链路、频谱和智能调度的系统性工程,包括巨型平台和星舰的高效发射、激光星间链路骨干网的形成、更高频段开发和已有频谱的融合、基于人工智能的资源调度等^[16-17]。星链也将更积极地参与3GPP等标准组织的活动,推动其技术方案与全球统一的NTN标准相融合,解决目前与地面网络互联互通的挑战,为更广阔的行业应用铺平道路^[18]。

(3) 空间可持续性与国际合作

随着星座规模不断扩大,空间可持续性的重要性日益凸显。星链将持续完善其自动避碰系统,并严格遵守与美国国家航空航天局等机构签订的协同避障协议。另外,预计SpaceX会继续迭代降低卫星亮度的技术,并履行卫星寿命末期主动离轨的承诺,以减轻对天文观测的干扰和减少空间碎片问题^[19-20]。

(4) 商业模式的多元化与垂直整合

未来星链的商业应用将向更多元化、垂直化的方向发展。除消费级互联网接入外,星链将更聚焦于海事通信、航空互联网、政府和应急通信、远程工业应用等附加值更高的垂直市场。另外,星盾项目已获美国国防部大量合同,未来星链很可能将继续深化与各国国防部门的合作,提供加密、抗干扰的军用通信服务。

星链的未来发展,既要不断攻克技术难题以提升自身网络性能和可靠性,也需妥善应对频谱资源、空间安全、天文界关切等外部挑战,并在此过程中探索更可持续的商业模式。星链的发展不仅关乎其自身的商业成败,更将在很大程度上塑造全球卫星互联网行业的技术路径、商业模式和竞争格局。

3 对我国星座建设的启示

星链的成功部署和高速发展,不仅标志着全球卫星互联网进入规模化应用的新阶段,也为我国设计建设自主可控的卫星互联网星座提供了宝贵的经验借鉴和启示。

(1) 采用分阶段的星座建设和技术迭代路线

星链采用快速发射、快速迭代的策略,初期以实现覆盖和提供基本服务为目标,后续通过技术升级不断提升其能力。因此,我国在制定清晰的星座规划和能力目标的基础上,星座建设应分阶段有序实施:例如,优先发射试验星,完成关键技术的在轨验证;设计可扩展、易升级的卫星平台,初期平台以确保可靠性和实现快速组网为核心目标,后续批次逐步集成更先进的载荷和能源系统,并支持以在轨重构方式进行软件升级。

(2) 坚持通信体制的自主创新和开放融合

星链的通信体制(如物理波形设计、调度策略、波束设计等)是其核心竞争力,且注重与地面网络的深度融合。因此,我国必须自主研发关键通信协议、基带芯片和信号处理算法等核心技术,确保关键核心技术自主可控。此外,在体制设计之初就应充分考虑与地面5G/6G网络的深度融合,使卫星网络成为地面通信网络的延伸,而非孤立运行的系统。

(3) 产业链整合和成本控制

星链的成功关键在于全产业链的垂直整合能力,从卫星设计到火箭发射,从网络运营到终端服务,实现端到端全流程管控。我国应着力构建自主可控的卫星制造产业链,推动卫星载荷和平台的标准化设计和批量化生产,加快可重复使用火箭的研发和应用,通过技术迭代和规模化应用降低成本,提升我国卫星互联网的市场竞争力。

4 结束语

本文系统性分析了星链星座的技术体制,研究表明,星链采用“550 km 主层+340 km 增强层”双层异构星座架构,在全球覆盖和区域容量间实现动态平衡;卫星平台通过V0.9到V3的快速迭代,实现了从验证星到太比特级通信能力的跨越,其核心在于大规模相控阵天线、激光星间链路、人工智能驱动的智能网络、高频段通信等关键技术的融合应用;在通信体制上,星链大胆引入地面移动通信的OFDM技术,结合Ku、Ka、E等多频段与相控阵多波束天线,构建了高动态的时频空联合资源调度能力,其两层调度机制与干扰规避策略,确保了数万颗卫星与百万级终端在复杂电磁环境下的有序、高效运行。

然而,星链在快速发展的同时,技术路线的内在矛盾和外部挑战也日益凸显:近地轨道空间日益拥挤,带来严峻的频谱资源竞争压力和空间安全风险;通信性能在支持海量物联网接入、满足6G低时延需求等方面仍存在局限;此外,与现有地面网络深度融合的技术壁垒、全球频谱与轨道协调的复杂性,均为其进一步发展设置了关键障碍。

展望未来,星链的发展将沿着技术跃进、标准融合、应用深化与空间合作的多重主线展开。V3卫星所代表的太比特级容量跃升,将依赖于更高频段开发、更大规模天线阵列和星上处理能力技术的突破,其应用重心也必将从消费级宽带接入,向海事、航空、政府与国防等价

值更高、要求更严的垂直领域深度拓展。

星链的实践为我国卫星互联网星座建设提供了重要参照。对星链星座技术体制、面临挑战及发展趋势的分析研究，对于准确把握全球卫星互联网技术的发展方向、推动我国低轨卫星星座的设计建设与可持续发展，具有重要的借鉴意义。

参考文献

- [1] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink 第一期星座发展历程及性能分析[J]. 卫星与网络, 2020(9): 46-49.
Liu S J, Xu F J, Liu L X, et al. Development and performance analysis of starlink phase I constellation[J]. Satellite & Network, 2020(9): 46-49.
- [2] 薛文, 胡敏, 阮永井, 等. 基于 TLE 的 Starlink 星座第一阶段部署情况分析[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(5): 24-33.
Xue W, Hu M, Ruan Y J, et al. Analysis of the first stage deployment of Starlink constellation based on TLE[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(5): 24-33.
- [3] 樊伟, 韩洪涛, 杨开. “星链”系统发展及发射部署情况分析[J]. 国际太空, 2024(10): 37-42.
Fan W, Han H T, Yang K. Analysis on the development and launch deployment of “Starlink” system[J]. Space International, 2024 (10): 37-42.
- [4] 阮永井, 胡敏, 薛文. 典型低轨大规模通信星座部署与覆盖分析[J]. 天地一体化信息网络, 2025, 6(2): 47-56.
Ruan Y J, Hu M, Xue W. Deployment and coverage analysis of typical large-scale LEO communication constellations[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2025, 6(2): 47-56.
- [5] 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.
- [6] 刘帅军, 徐帆江, 刘立祥, 等. Starlink 第二代系统介绍[J]. 卫星与网络, 2020(12): 62-65.
Liu S J, Xu F J, Liu L X, et al. Introduction of Starlink second generation system[J]. Satellite & Network, 2020(12): 62-65.
- [7] 朱璇, 魏巍. “星链”手机直连频率干扰规避能力分析[J]. 数字通信世界, 2025(7): 86-88.
Zhu X, Wei W. Analysis of frequency interference avoidance ability of “Starlink” direct to cell[J]. Digital Communication World, 2025(7): 86-88.
- [8] Humphreys T E, Iannucci P A, Komodromos Z M, et al. Signal structure of the Starlink Ku-band downlink[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2023, 59(5): 6016-6030.
- [9] Kozhaya S, Kanj H, Kassas Z M. Multi-constellation blind beacon estimation, Doppler tracking, and opportunistic positioning with OneWeb, Starlink, Iridium NEXT, and Orbcomm LEO satellites [C]//Proceedings of the 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Piscataway: IEEE Press, 2023: 1184-1195.
- [10] Wang G H, Yang F, Song J, et al. Optimization for dynamic laser inter-satellite link scheduling with routing: a multi-agent deep reinforcement learning approach[J]. IEEE Transactions on Communications, 2024, 72(5): 2762-2778.
- [11] Sayin A, Cherniakov M, Antoniou M. Passive radar using Starlink transmissions: a theoretical study[C]//Proceedings of the 2019 20th International Radar Symposium (IRS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-7.
- [12] 丁建瑞, 张博嘉, 范皓年, 等. 手机直连卫星: Starlink 面向存量手机的通信能力分析[J]. 移动通信, 2024, 48(9): 153-159.
Ding J R, Zhang B J, Fan H N, et al. Direct-to-phone satellite communication: analysis of Starlink communication capabilities for existing mobile devices[J]. Mobile Communications, 2024, 48(9): 153-159.
- [13] Bin Tanveer H, Puchol M, Singh R, et al. Making sense of constellations: methodologies for understanding Starlink’s scheduling algorithms[C]//Proceedings of the Companion of the 19th International Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies. New York: ACM, 2023: 37-43.
- [14] 张钊, 姚秀娟, 高翔, 等. NGSO 星座 Q/V 波段星间链路干扰规避技术[J]. 空间科学学报, 2023, 43(2): 352-360.
Zhang Z, Yao X J, Gao X, et al. Interference avoidance technology on Q/V band ISL between NGSO constellation systems[J]. Chinese Journal of Space Science, 2023, 43(2): 352-360.
- [15] 张佳鑫, 常朝阳, 张易隆, 等. 巨型星座路由技术综述[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(1): 2-13.
Zhang J X, Chang Z Y, Zhang Y L, et al. Survey on routing technology of mega constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(1): 2-13.
- [16] De Gaudenzi R. Satellite networks: past, present, and future challenges: part 1: mobile systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2025, 40(9): 4-14.
- [17] De Gaudenzi R. Satellite networks: past, present, and future challenges: part 2: broadband systems[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2025, 40(10): 4-14.
- [18] Fu I K, Charbit G, Medles A, et al. Satellite and terrestrial network convergence on the way toward 6G[J]. IEEE Wireless Communications, 2023, 30(1): 6-8.
- [19] 刘伟骏, 黎璐玫, 高健钦. 在轨卫星对射电天文的影响研究[J]. 中国无线电, 2025(4): 52-55.
Liu W J, Li L M, Gao J Q. Study on the impact of in-orbit satellites

on radio astronomy[J]. China Radio, 2025(4): 52-55.

[20] 林骁雄, 李新刚, 齐彧, 等. 国外超大规模星座自主碰撞规避技术进展[J]. 国际太空, 2025(7): 10-14.

Lin X X, Li X G, Qi Y, et al. Progress in autonomous collision avoidance technology of very large-scale constellations abroad[J]. Space International, 2025(7): 10-14.

[作者简介]



尚辉超 (1997-), 男, 中国星网网络系统研究院工程师, 主要研究方向为卫星互联网。



魏笑 (1999-), 女, 中国星网网络系统研究院工程师, 主要研究方向为卫星互联网。



崔翔 (1987-), 男, 中国星网网络系统研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网。



冯广华 (1982-), 男, 中国星网网络系统研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网。



吴迪 (1981-), 女, 中国星网网络系统研究院高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网。