

星链系统服务能力分析

王静贤¹, 虞志刚¹, 祝超², 孙家正¹, 雷璟¹

(1. 中国电子科技集团有限公司电子科学研究院, 北京 100041;

2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100000)

摘 要: 首先对星链星座发展现状进行概述; 然后从系统组成、卫星迭代版本、星座构型以及系统发展特点等方面对星链系统进行研究; 最后通过仿真对基于星链星座和地面光纤的端到端传输时延进行对比, 得出端到端基于不同传输路径的传输距离与时延的关系。通过链路估算, 从传输速率方面评估星链卫星对不同业务的服务水平, 并从单星覆盖、星座覆盖以及用户可见性方面对覆盖能力进行分析。

关键词: 星链星座; 系统组成; 传输时延; 传输速率; 覆盖能力

中图分类号: TN92

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2024022

Analysis of Starlink System Service Capabilities

WANG Jingxian¹, YU Zhigang¹, ZHU Chao², SUN Jiazheng¹, LEI Jing¹

1. China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100000, China

Abstract: This paper first provided an overview of the current status of the Starlink constellation development, then studied the Starlink system from aspects such as system composition, satellite iteration versions, constellation configuration, and system development characteristics. Finally, through simulation, a comparison of end-to-end transmission latency based on the Starlink constellation and terrestrial fiber optics was made, and the the relationship between the end-to-end transmission distance and the delay under different transmission paths was obtained. Moreover, through link estimation, the service level of Starlink satellites for different services could be evaluated from the perspective of transmission rate. Further, an analysis of the coverage capabilities of a single satellite and the constellation was conducted.

Keywords: Starlink constellation, system composition, transmission latency, transmission rate, coverage capability

0 引言

卫星网络凭借覆盖范围广、系统容量大、不受地理环境限制等方面的优势, 已发展成为地面网络的补充, 主要为远洋、航空和沙漠等地区提供网络通信服务。低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星星座支持全球无缝覆盖, 近些年得到迅猛发展和广泛关注^[1-2]。SpaceX公司、OneWeb公司和Telesat公司均提出了自己的低轨卫星星座建设项目, 为偏远地区用户提供互联网接入服务。

SpaceX公司的星链 (Starlink) 计划部署进展最快, 截至2024年5月23日, 共计划发射6 482颗卫星。星链官网显示, 星链卫星的最大下载速率超过150 Mbit/s, 上传速率超过25 Mbit/s, 传输时延低至25 ms。基于较强的通信服务能力, 星链星座已在近百个国家开通互联网接入服务, 注册用户数量超过270万^[3]。

同时, 星链系统还应用于军事领域, 不仅参与了美国空军、陆军组织的多项应用性能测试^[4-5], 还在一些冲突中发挥了应急通信、情报回传等天基信息支援作

收稿日期: 2024-05-07; 修回日期: 2024-08-08

基金项目: 航天某预研 (互联网XX项目); 国家自然科学基金资助项目 (No.62201534, No.61931017)

Foundation Items: Pre-research Project of Space System (XX Internet), The National Natural Science Foundation of China (No.62201534, No.61931017)

用^[5-7]。可见,低轨巨型星座的发展将开启全球卫星通信的新时代^[8-9]。

1 星链系统

1.1 系统组成

以星链为代表的低轨卫星互联网主要包括空间段、地面段以及用户段3个部分^[10-11],如图1所示。

(1) 空间段

空间段由低轨卫星星座组成。卫星星座采用位于不同轨道高度、具有不同轨道倾角的混合构型,实现大规模部署和多重覆盖。根据卫星平台搭载转发器类型的不同,可以分为透明转发式卫星和再生处理式卫星^[12],其中透明转发式卫星只完成转发作用,不对接收到的信号做任何处理。再生处理式卫星通过搭载射频和基带处理功能,不仅可以对接收到的信号进行放大、变频、滤波等处理,还可以实现信号数字再生,相当于移动基站上星的功能。

根据卫星之间是否有星间链路,是否实现星间路由,可以分为天星地网和天网地网两种工作模式^[13]。其中,在天星地网工作模式下,卫星间无星间链路连接,卫星将接收的用户数据直接转发至地面网络完成传输,卫星网络可以看作地面网络的延伸。天星地网模式只有在用户和地面站同时被同一颗卫星覆盖时才能进行实时业务传输。在天网地网工作模式下,卫星间由星间链路连接,地面信关站通过地面网络连接。

根据任务需求,用户数据可以经过卫星转发到另一端用户,也可以经过单跳或者多跳星间链路转发到信关站,再由地面网络完成传输。天网地网工作模式充分利用了卫星的广域覆盖优势和地面网络在通信容量方面的优势,实现了天地融合和优势互补,成为低轨卫星网络的主流发展趋势。

(2) 用户段

用户段包括各类用户终端。目前SpaceX公司推出了3代5个版本的星链终端。第一代碟形天线,具有UTA-201和UTA-211两个版本型号。第二代为方形天线,型号为UTA-212。与第一代相比,第二代天线体积有所减小,重量降低40%,便于携带,通信性能也有显著提升。在第二代的基础上,第三代天线面积增加了10%,路由覆盖面积由186 m²扩展至297 m²,三防等级从IP54提高到IP67,具备防尘能力,可在大风等较恶劣天气条件下接入星链卫星网络。

2022年6月,美国联邦通信委员会(FCC)批准了星链终端在移动平台上使用,意味着星链系统可以为陆地车辆、海上船舶、空中无人机等各类用户提供接入传输服务。同样,星链终端也根据不同用户类型,推出民众版、房车版、企业版、海事版以及航空版等不同版本,以满足不同应用场景下的多样化业务需求。

2023年11月,FCC同意SpaceX公司提出的手机直连卫星业务申请,通过与地面运营商合作,支持现有LTE终端接入,无须更换任何手机组件、升级系统、安装特

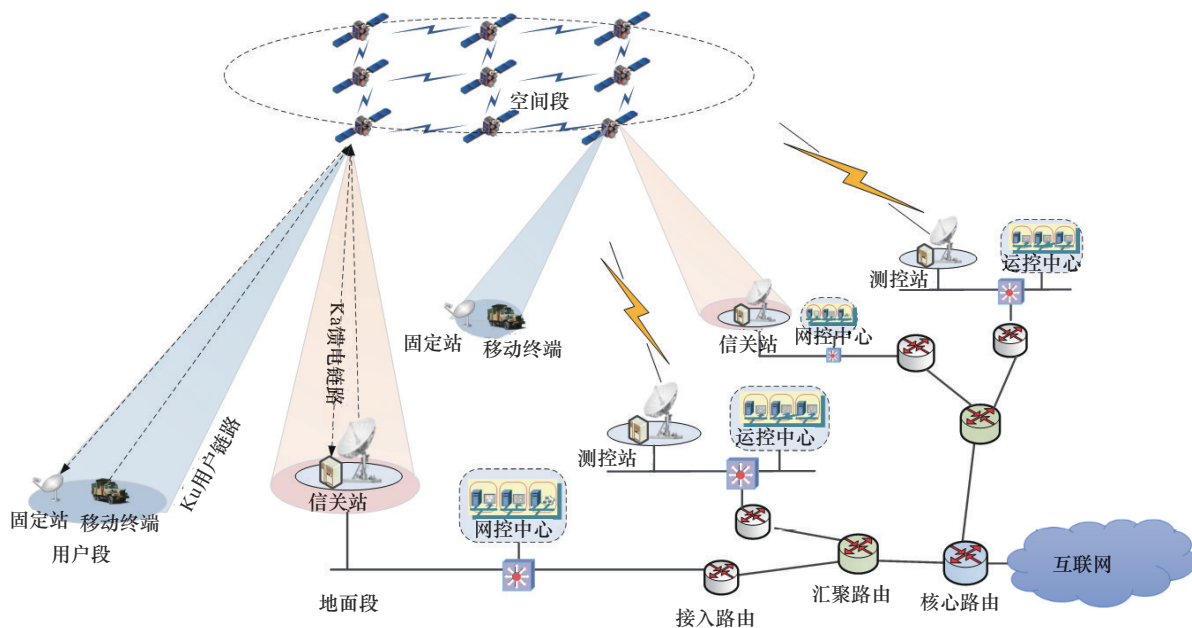


图1 系统组成

殊应用程序等，因此具有手机直连能力的星链卫星使用标准的LTE协议，支持发送文本、语音和数据业务^[14-16]。

(3) 地面段

地面段包括信关站、测控站、运控中心、网控中心等。

信关站负责接收地面或其他卫星传来的信号，然后放大、重新编码或转发这些信号，使其能够传输到另一个位置或覆盖更广阔的区域。这种功能使得远距离通信成为可能，无论是在地球上的不同地区还是地球与太空之间。天线系统是信关站的核心，星链系统每座信关站一般有8副高频高增益天线，实现高效数据传输和接收，优化信号质量，减少干扰，提高通信性能。针对低轨卫星快速移动导致频繁切换的特征，星链信关站的跟踪和定位系统能够利用算法和实时遥测数据，持续监测每颗卫星的确切位置和轨迹，从而调整天线波束，确保稳定连接。目前星链系统有150座正在运行的信关站，另外13座获得监管部门批准后仍在建设中，19座正在等待开工^[15]。

测控站主要用于监控和管理卫星群的健康状况和性能。通过从卫星收集遥测数据提供有关其状态、功率水平和整体健康状况的信息。地面操作员可以监控和分析这些数据，以识别潜在的问题，执行主动维护，并优化网络性能。测控系统使得地面操作员可以远程配置和控制卫星，确保卫星网络的平稳运行。星链系统在美国境内的东海岸和西海岸分别设置主站和副站，在海外其他国家也会设置测控站，信关站和测控站是可以共用的，例如美国华盛顿州布鲁斯特站。

运控中心一般通过网络管理系统（NMS）、运营支撑系统（OSS）和业务支撑系统（BSS）来管理卫星网络 and 用户服务，其主要功能包括：客户订阅和计费，自动化非接触式资源调配，确保按照最终用户服务级别协议提供服务，对多个远程网关和卫星实施集中控制。

网控中心是整个卫星通信系统运行的核心中枢，要实现对全网各地球站的参数设置、运行状态控制、信道资源按需分配和点到点卫星通信链路接续等实时控制功能。

1.2 卫星版本

经过不断迭代升级，目前星链卫星已经具有6个版本：试验星（TintinA/B）、V0.9、V1.0、V1.5、V2.0 Mini和V2，其中，V0.9、V1.0、V1.5用于构建第一代星座系统，V2.0 Mini和V2用于构建第二代星座系统。

2019年5月，SpaceX公司发射首批60颗星链V0.9卫

星和首批60颗V1.0卫星。2021年6月，首批3颗V1.5卫星入轨。上述3种类型星链卫星都采用平板设计，尺寸大约为3.2 m×1.6 m×0.2 m，安装有4副相控阵天线和单翼式太阳能电池板，每副相控阵天线板尺寸约为0.7 m×0.7 m，太阳能电池板展开后约为4 m×15 m。V1.0相比V0.9，增加了Ka频段，卫星重量从227 kg增加至260 kg；V1.5相比V1.0增加激光星间载荷，重量提升至295 kg。

SpaceX公司已经完成至少一颗星链V2.0卫星的原型机，长度达到7 m，重量达到1.25吨。作为V1.5和V2.0之间的过渡版本，SpaceX公司从2023年2月开始发射V2 Mini版本。V2 Mini单颗卫星重量790 kg，是一代的2倍多，宽度超过4.1 m，太阳翼向两侧展开之后整星宽度约30 m。这样Starlink V2 Mini版卫星的总面积超过了116 m²，是Starlink V1.5表面积的4倍多。Starlink V2 Mini版卫星配置了更强大的相控阵天线连接用户，并使用E频段回程连接地面站，使得每颗卫星的容量比早期版本增加了4倍。另外，V2系列配置了全新的氦气工质霍尔推进器，氦气电推进器重2.1 kg，功率4.2 kW，提供170 mN的推力，其推力和比冲分别是第一代的2.4倍和1.5倍。

Starlink V2 Mini中包括支持存量手机直连功能的卫星，截至2024年5月23日，该类型星链卫星数量达到38颗。由于现有手机天线增益较低，发射功率很小，当与530 km左右轨道高度的卫星连接时，通信链路长度将达到上千千米，将会有较大的传输路径损耗，因此该类型星链卫星配备了尺寸约为2.7 m×2.3 m的大型相控阵天线，创新性定制硅芯片以及先进的处理算法，来为地面上的手机接入提供通信条件^[17]。

各个版本的卫星特征见表1。

表 1 星链卫星各版本特征

对比项	V0.9	V1.0	V1.5	V2.0 Mini
卫星重量	227 kg	260 kg	295 kg	790 kg
太阳能电池板结构	单翼式	单翼式	单翼式	双翼式
推进器	氦气电推进	氦气电推进	氦气电推进	氦气电推进
通信频段	Ku	Ku、Ka	Ku、Ka、激光	Ku、Ka、E、激光、L/S

1.3 星座构型

星链星座轨道部署见表2。其中第一代星链卫星系统包括LEO和VLEO两类轨道高度，约1.2万颗卫星。LEO星座几经变化，从最初的4 425颗卫星，到轨道高度550 km、1 110 km、1 130 km、1 275 km和1 325 km的123个轨道面共计4 409颗卫星，最终在2020年9月将轨

道高度集中在 550 km 附近的 190 个轨道面上，共计 4 408 颗卫星。LEO 星座主要用于实现全球无缝覆盖^[18]。

表 2 星链星座轨道部署^[3]

星链系统		卫星 数量/颗	轨道 高度/km	轨道 倾角	备注
第一代星链 卫星系统	LEO 星座	1 584	550	53°	共计 11 926 颗 卫星
		1 584	540	53.2°	
		720	570	70°	
		348	560	97.6°	
		172	560	97.6°	
	VLEO 星座	2 493	335.9	42°	
		2 478	340.8	48°	
		2 547	345.6	53°	
第二代星链卫星系统		5 280	340	53°	共计 29 988 颗 卫星
		5 280	345	46°	
		5 280	350	38°	
		3 600	360	96.9°	
		3 360	525	53°	
		3 360	530	43°	
		3 360	535	33°	
		144	604	148°	
		324	614	115.7°	

VLEO 星座主要分布在 340 km 左右的轨道上，主要用于降低卫星传输时延，增强对中低纬度地区的热点覆盖，提升传输容量。2024 年 3 月 8 日，FCC 发文称推迟 SpaceX 公司关于部署 VLEO 星座卫星的请求。

2021 年 8 月 SpaceX 公司向 FCC 提交的关于第二代星链卫星系统的修订申请显示，星链二代卫星星座将首选配置 29 988 颗卫星，分别部署在 340 km 到 614 km 的 9 个轨道上。2022 年 12 月 1 日，FCC 只批准了部署其中 7 500 颗卫星，属于分别位于高度 525 km、倾角 53°，高度 530 km、倾角 43°，高度 535 km、倾角 33° 的 3 个壳层上的部分卫星，以响应有关太空碎片和干扰影响的相关问题。

1.4 发展特点

(1) 构建独立自成体系的产业链

SpaceX 公司基于独立研制设计，采用了从制造、火箭发射、应用服务到地面设备的垂直整合商业模式，形成产业链分工优势、成本降低优势和加速度优势，具体体现在以下方面。

a) 垂直整合：星链项目涵盖了从卫星制造、发射到地面终端设备的全产业链。这样的垂直整合有助于

SpaceX 更好地控制整个产品生命周期，提高效率和成本控制能力。

b) 自成体系：星链依托 SpaceX 公司自主研发的火箭和卫星技术，减少了对外部供应商的依赖，增强了项目的自主可控性。这对于确保技术秘密和进度控制都很重要。

c) 产业链优势：由于涵盖了产业链各环节，星链可以更好地把握市场需求，并快速响应。同时也可以充分利用各环节的协同效应，提升整体竞争力。

d) 独立性：星链作为 SpaceX 公司的独立子品牌，在定价、营销等方面都有较大的自主权，这有助于项目的快速推进和迭代。

(2) 基于技术创新降低生产成本

星链系统采用商业货架产品、组件模块化设计、流水线生产、一箭多星、火箭回收等创新技术，降低设备的造价和发射成本，具体体现在以下方面。

a) 商业货架产品：星链卫星采用了大量商用现成部件和组件，而不是完全自主研发，这大大降低了研发和制造成本。

b) 组件模块化设计：星链卫星采用标准化、模块化的设计，使得制造、维护和更新都更加灵活高效。

c) 流水线生产：星链利用工厂化的流水线生产方式，大幅提升了卫星制造效率。

d) 一箭多星：星链利用 SpaceX 公司的大型火箭一次性发射多颗卫星，大幅降低了单颗卫星的发射成本。

e) 火箭回收：SpaceX 公司开创性地实现了火箭的回收利用，这对降低发射成本也起到了重要作用。

(3) 采用互联网发展模式

与传统的先设计后建设的固定研发模式不同，星链系统在研发过程中基于互联网发展理念，坚持边设计、边研发、边建设、边使用原则，用版本迭代升级换取时间，用星座数量规模换取网络性能，驱动资本融合与产业可持续发展，具体体现在以下方面。

a) 边设计、边研发：星链不是先完成全部设计再进行研发，而是采取快速迭代的方式，不断优化设计并同步研发，这样可以更快地响应市场需求变化。

b) 边研发、边建设：星链也没有采取完全研发好后才开始建设的模式，而是将研发和建设并行进行，这种方式可以缩短整个项目周期。

c) 边建设、边使用：星链在部分地区提供服务时，仍在不断扩展卫星网络和地面设施。用户可以先享受到初期服务，而不必等待全网建设完成。

2 星链系统能力分析

根据参考文献[18]中对在轨星链卫星状态的分析,壳层4逐渐替代壳层1,成为星链系统主要提供服务的星座。因此,本节主要基于壳层4卫星,对星座的传输时延、传输速率和覆盖能力进行分析。星链壳层4的星座构型见表3。

表3 星链壳层4的星座构型

轨道面数/个	每轨卫星数量/颗	卫星数量/颗	轨道高度/km	轨道倾角
72	22	1 584	540	53.2°

2.1 时延分析

如图2所示,位于地面的用户终端需要连接至信关站时,有经过星链卫星网络和地面光纤网络两种路径。部署在壳层4的卫星携带星间激光载荷,可以通过星间链路(ISL)传输,已知星间链路用户终端的最小仰角为40°,信关站的最小仰角为25°。为简单起见,图2中只表示了用户终端的接入卫星和信关站的接入卫星,并假设中间经过的多条ISL均位于两颗接入卫星的连接弧段上,则当两颗接入卫星分别位于A点和B点时,经过卫星网络传输的时延最小;当两颗接入卫星分别位于A'点和B'点时,经过卫星网络传输的时延最大。经过卫星网络和地面网络的传输时延分别计算如下

$$T_s = (L_1 + L_2 + L_3)/c \quad (1)$$

$$T_g = d/(c/1.47) \quad (2)$$

其中, L_1 表示用户终端到其接入卫星节点之间的距离, L_2 表示星间链路传输距离, L_3 表示信关站到其接入卫星节点之间的距离, d 表示用户终端到信关站的地面距离, c 表示光速。

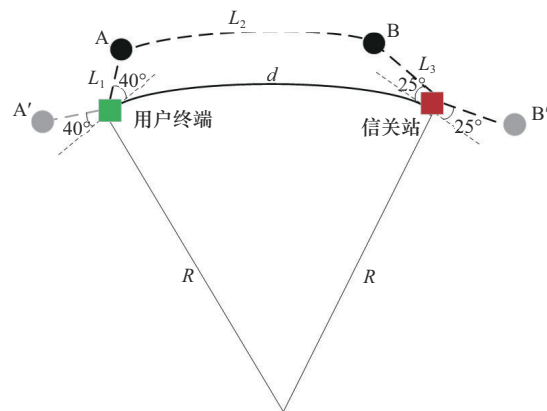
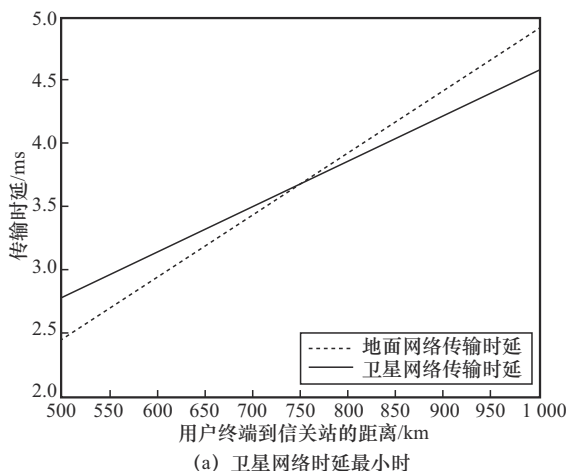


图2 用户终端与信关站传输路径示意

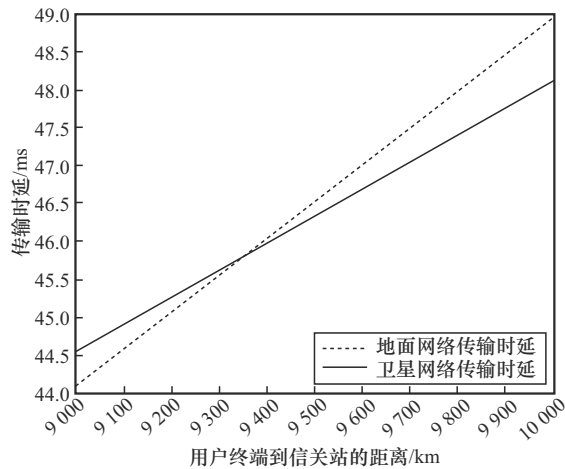
图3呈现了用户终端和信关站之间的距离对传输时延的影响,并将卫星网络传输时延和地面网络传输时延进行了对比。从图3中可以看出,对于轨道高度为540 km的卫星,在最优情况下,当用户终端和信关站之间的距离大于760 km时,卫星将带来更小的时延;在最差的情况下,当用户终端和信关站之间的距离大于9 340 km时,卫星网络传输时延更小。地面光纤网络传输和卫星网络传输之间的时延差异是由光纤折射率导致的光速折损以及卫星路径长度决定的,此处假设光纤的折射率为1.47。由于低轨卫星的高速移动,星链系统在提供服务时,传输时延在最小和最大范围内变化,变化周期与星间切换策略和服务卫星数量有关,因此,星链系统通过发射更多的卫星以支持用户选择最佳接入卫星节点,从而降低传输时延。

2.2 速率分析

目前星链主要支持宽带和移动两类业务,依据3GPP TS 36.213^[19]和参考文献[20-21]中的参数,进行链路传输



(a) 卫星网络时延最小时



(b) 卫星网络时延最大时

图3 传输时延对比

速率估算,得到各类业务场景下用户终端的上下行理论峰值传输速率见表4。

表4 链路预算

参数	宽带业务		移动业务	
	上行	下行	上行	下行
频率/GHz	14	10.7	1.91	1.99
带宽/MHz	125	250	5	5
EIRP/dBW	46	36.7	-7	38
接收端增益/(dB·K ⁻¹)	37.7	32.8	37.7	0
热噪声密度/(dBm·Hz ⁻¹)	-174	-174	-174	-174
传输速率/(Mbit·s ⁻¹)	500	1200	12	21

分析可见,宽带用户终端主要为SpaceX公司自研相控阵天线,在理想传输环境中,上行传输速率可达500 Mbit/s,下行传输速率可达1.2 Gbit/s;移动用户终端为LTE手机,在理想传输环境中,上行传输速率可达12 Mbit/s,下行传输速率可达21 Mbit/s。

2.3 覆盖分析

下面从单星覆盖性能、星座覆盖性能及用户可见性等方面对星链系统的覆盖性能进行分析。卫星覆盖情况如图4所示。

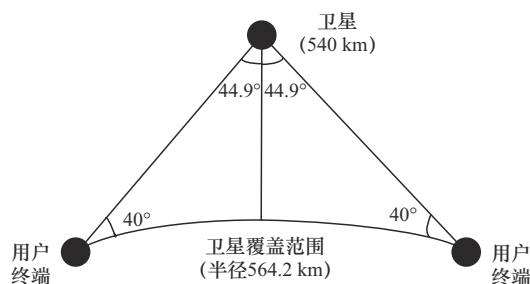


图4 卫星覆盖情况

(1) 单星覆盖性能

根据SpaceX公司的申请文件,用户终端只能与高于最小仰角的卫星进行通信。随着星座部署规模的增大,用户终端的最小仰角达到40°,进而提高用户链路的通信质量。以位于壳层4的卫星为例,卫星轨道高度约为540 km,则卫星可提供44.9°半锥角内的通信服务,对应的地面覆盖半径约为564.2 km,覆盖面积约为10⁶ km²。

如图5所示,星链卫星上装载相控阵天线,按需生成角度为1.5°的用户波束,星下点波束覆盖面积约为154 km²,假设每个波束足迹对应地面一个波位,则在单星覆盖范围内存在约6 494个波位。按照每颗卫星具有8个用户波束来计算,那么每个波束需要覆盖812个波位。通常

采用捷变跳波束方式,根据预规划的跳频图案对覆盖区域内的波位进行扫描,并对用户部署区域进行重点增强覆盖。

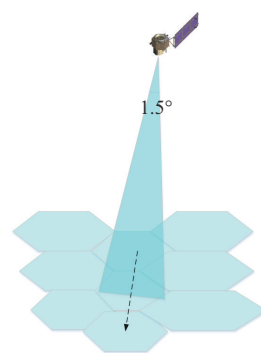


图5 波束覆盖情况

(2) 星座覆盖性能

基于STK和Matlab等仿真工具构建星链系统壳层4星座运行环境,并对星座的全球覆盖情况进行仿真,仿真时长设置为24 h。

图6中横纵坐标轴分别表示观测时间点和对应的全球覆盖百分比,从中可以看出仅星链系统壳层4全球的覆盖率就可在83%~83.7%。图7中横纵坐标轴分别表示纬度和对应的覆盖时长百分比。从图7中可以看出壳层4主要覆盖南北纬60°之间区域,可以为全球主要人口分布地区提供服务。在低纬度地区尚不能实现全天时覆盖,因此星链系统包括多种分布于不同轨道倾角和不同轨道高度的多个壳层卫星,进而在时间和空间上实现全球无缝覆盖,同时增大系统容量,为用户提供随遇接入能力。

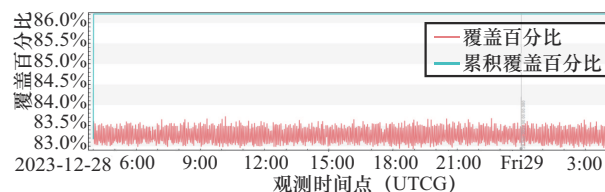


图6 星链全球覆盖率

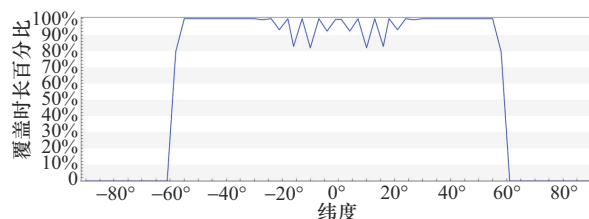


图7 星链星座覆盖时长百分比随经纬度变化关系

(3) 用户可见性

以位于华盛顿的用户为例（北纬 38.9° ，西经 77° ），分析壳层4卫星对用户的可见性。

从图8仿真结果可以看出，用户最多可见卫星数量达到28颗，至少可见11颗，在大多数时间内用户可见范围内的卫星数量超过20颗，其中同时可见22颗卫星的概率达到23%。星链星座通过多重冗余覆盖可以提高网络鲁棒性和通信容量。

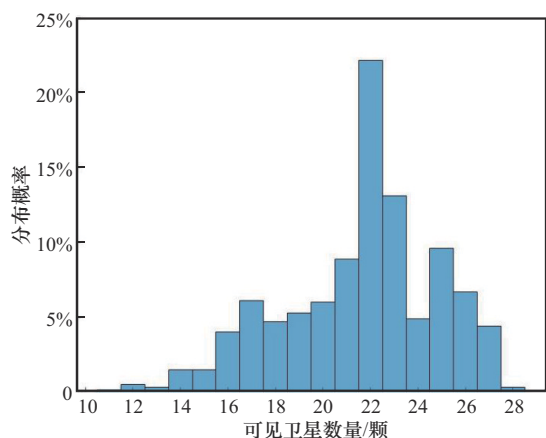


图8 用户可见卫星数量分布概率

图9统计了位于华盛顿的用户与单颗卫星连接时间的累积分布函数，从图中可以看出，由于低轨卫星快速移动特性，用户与卫星的最大连接时间为6.7 min，在50%概率情况下，连接时间短于6 min。在实际应用中，用户在选择接入卫星时，要综合考虑服务时长和通信质量，这将导致用户在卫星间切换更加频繁，产生较大的信令交互开销。

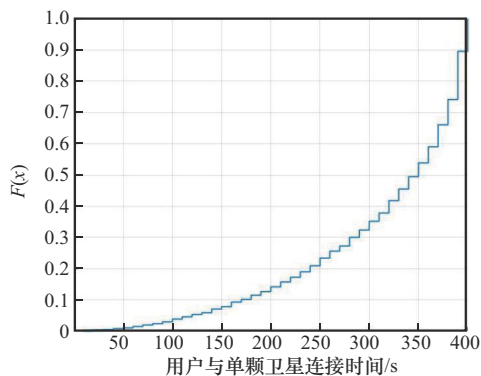


图9 用户与卫星连接时间分布函数

3 结束语

星链系统提供全球覆盖、高带宽、低时延卫星互联

网服务，在多领域具有广泛的应用潜力，对其开展研究具有重要的战略意义。本文从卫星系统组成架构、卫星迭代升级版本、星座构型、系统发展特点等方面对星链系统进行了概述，并以壳层4星座为例，通过仿真分析了星链系统的单个轨道层在传输时延、传输速率和覆盖性方面的服务保障能力，为后续对其应用场景的分析研究提供参考。

参考文献：

- [1] 刘旭光, 钱志升, 周继航, 等. “星链”卫星系统及国内卫星互联网星座发展思考[J]. 通信技术, 2022, 55(2): 197-204.
LIU X G, QIAN Z S, ZHOU J H, et al. Thinking on the development of “starlink” satellite system and domestic satellite Internet constellation[J]. Communications Technology, 2022, 55(2): 197-204.
- [2] PORTILLO I, CAMERON B, CRAWLEY E, et al. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Satellite & Network, 2019(7): 48-61.
- [3] FREEMAN R H. Overview: satellite constellations[J]. Journal of Space Operations & Communicator, 2020, 17(2).
- [4] 任远桢, 金胜, 鲁耀兵, 等. 星链计划发展现状与对抗思考[J]. 现代防御技术, 2022, 50(2): 11-17.
REN Y Z, JIN S, LU Y B, et al. Development status and countermeasures of star chain plan[J]. Modern Defense Technology, 2022, 50(2): 11-17.
- [5] 顾村锋, 杨阳, 杨博文, 等. “星链”威胁启示下的新型空天防御技术研究[J]. 空天防御, 2024, 7(2): 8-15.
GU C F, YANG Y, YANG B W, et al. Research on new aerospace defense technologies inspired by the threat of starlink system[J]. Air & Space Defense, 2024, 7(2): 8-15.
- [6] 凌海风, 李瑞, 柏林元, 等. 俄乌冲突中俄罗斯电子战装备及运用研究[J]. 航空兵器, 2023, 30(6): 32-36.
LING H F, LI R, BAI L Y, et al. Research on Russian electronic warfare equipment and application in russia-ukraine conflict[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(6): 32-36.
- [7] 胡智焕, 谢威, 刘若楠, 等. 俄乌冲突中无人艇海上作战模式的新突破[J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(1): 18-22.
HU Z H, XIE W, LIU R N, et al. New breakthrough in USV warfare mode in the russo-ukrainian conflict[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2024, 11(1): 18-22.
- [8] 程城人, 任仙海, 徐帅旗. 星链系统及其作战运用分析[J]. 指挥控制与仿真, 2024, 46(1): 154-160.
CHENG C R, REN X H, XU S Q. Starlink and its operational analy-

- sis[J]. Command Control & Simulation, 2024, 46(1): 154-160.
- [9] 高梓贺, 姚海鹏, 张磊, 等. 低轨巨型星座体系架构设计与关键技术分析[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 43-52.
- GAO Z H, YAO H P, ZHANG L, et al. Architecture design and key technologies analysis of LEO satellite mega-constellations[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 43-52.
- [10] CHEN Y, MA X, WU C N. The concept, technical architecture, applications and impacts of satellite Internet: a systematic literature review[J]. Heliyon, 2024, 10(13): e33793.
- [11] BEYAZ M. Satellite communications with 5G, B5G, and 6G: challenges and prospects[J]. International Journal of Communications, Network and System Sciences, 2024, 17(3): 31-49.
- [12] 刘冕, 赵晖, 胡一皓, 等. 低轨卫星L频段中继通信载荷技术研究[J]. 电讯技术, 2024, 64(1): 43-50.
- LIU M, ZHAO H, HU Y H, et al. Research on L-band relay communication payload technology for LEO satellites[J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64(1): 43-50.
- [13] 张更新, 廖磊瑶, 何元智. 面向空地海一体化的卫星通信关键技术研究[J]. 电信科学, 2023, 40(6): 11-24.
- ZHANG G X, LIAO L Y, HE Y Z. Research on key technologies of satellite communication oriented to the integration of air, space and sea[J]. Telecommunication Science, 2023, 40(6): 11-24.
- [14] 薛元星, 赵治, 段乔曼. 星链手机直连卫星业务商业模式及组网方式[J]. 天地一体化信息网络, 2024, 5(2): 85-91.
- XUE Y X, ZHAO Z, DUAN Q M. Starlink business model and network mode under the direct-to-satellite service of mobile phone [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2024, 5(2): 85-91.
- [15] 徐小涛, 李建国, 刘鹏. “星链”卫星移动通信系统的发展现状及启示[J]. 国防科技, 2022, 43(2): 15-19.
- XU X T, LI J G, LIU P. Development status of the Starlink satellite mobile communication system[J]. National Defense Technology, 2022, 43(2): 15-19.
- [16] 潘筱涵, 陆璐, 邓平科, 等. 基于天基极简核心网的星地协同组网架构, 技术及试验[J]. 电信科学, 2023, 40(6): 49-59.
- PAN X H, LU L, DENG P K, et al. Architecture, technology and experiment of satellite-ground cooperative networking based on space-based minimalist core network [J]. Telecommunication Science, 2023, 40(6): 49-59.
- [17] 张剑寅, 尼凌飞, 王汉白, 等. 面向星地融合的5G网络增强及关键技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(6): 38-48.
- ZHANG J Y, NI L F, WANG H B, et al. Research on the enhancement and key technologies of 5G network for satellite-terrestrial integration[J]. Telecommunications Science, 2024, 40(6): 38-48.
- [18] 王勇, 龙定央, 骆盛, 等. “星链”系统星座覆盖及应用分析[J]. 中国航天, 2021(8): 43-47.
- WANG Y, LONG D Y, LUO S, et al. Constellation coverage and application analysis of starlink system[J]. Aerospace China, 2021(8): 43-47.
- [19] 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (Release 15): TS 36.2B[S]. 2010.
- [20] OSORO O B, OUGHTON E J. A techno-economic framework for satellite networks applied to low earth orbit constellations: assessing starlink, OneWeb and kuiper[J]. IEEE Access, 2021, 9: 141611-141625.
- [21] 李元龙, 李志强. Starlink星座通信建模仿真分析[J]. 指挥控制与仿真, 2023, 45(4): 118-126.
- LI Y L, LI Z Q. Modeling and simulation analysis of Starlink constellation communication[J]. Command Control & Simulation, 2023, 45(4): 118-126.

[作者简介]



王静贤 (1989-), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为星地融合通信、无线移动通信。

虞志刚 (1989-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为天地一体化信息网络、空间智能计算等。

祝超 (1990-), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为卫星通信系统安全技术。

孙家正 (1998-), 男, 硕士生, 主要研究方向为太空安全。

雷璟 (1977-), 女, 研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为太空安全、网络空间安全、信息安全。