

典型低轨大规模通信星座部署与覆盖分析

阮永井, 胡 敏, 薛 文

(航天工程大学, 北京 101416)

摘 要: 低轨大规模通信星座因其庞大规模和快速部署能力, 成为通信领域的热点。其中, Starlink 和 OneWeb 已成功提供宽带互联网服务。首先概述这两个典型星座的发展现状。随后, 针对 Starlink, 着重从轨道分层设计和部署策略两个方面进行详细讨论, 并深入分析其覆盖性能以及潜在的商业应用前景。接着, 探讨 OneWeb 的部署模式、覆盖效能以及商业应用现状。最后, 总结 Starlink 与 OneWeb 这两者的异同, 并对未来低轨大规模通信星座的发展趋势进行展望。

关键词: Starlink; OneWeb; 轨道分层设计; 部署策略; 覆盖性能

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025017

Deployment and Coverage Analysis of Typical Large-Scale LEO Communication Constellations

RUAN Yongjing, HU Min, XUE Wen

Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract: Low Earth Orbit (LEO) large-scale communication constellations have emerged as a focal point in communication due to their substantial scale and rapid deployment capabilities. Among these constellations, Starlink and OneWeb have successfully offered broadband Internet services. This paper centers on these two representative constellations. Firstly, an overview of their current development status is provided. Subsequently, Starlink is examined in detail, focusing on its orbital layered design and deployment strategies, while an analysis of its coverage performance and potential commercial applications is conducted. Next, OneWeb's deployment model, coverage efficiency, and existing commercial applications are explored. Finally, a summary of the similarities and differences between Starlink and OneWeb is presented, and a forecast of the future development trends of LEO large-scale communication constellations is offered.

Keywords: Starlink, OneWeb, orbital layered design, deployment strategies, coverage performance

0 引言

低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 具有轨道高度低、传输时延小、路径损耗少等特性。近年来, 建设用于提供全球宽带服务的低轨星座成为卫星通信领域的新趋势。20 世纪 90 年代, Iridium 和 Globalstar 等星座开启了使用非地球静止轨道 (Non-Geostationary Orbit, NGSO) 从太空提供通信服务的趋势。然而, 由于技术难度大, 缺乏经济可行性, 最终, Iridium、Globalstar、Skybridge 和 Teledesic 等星座计划被迫破产重组或者取消^[1]。进入 21 世纪后, 随着航天技术的快速发展, 卫星

批量化生产、规模化发射技术不断成熟, 卫星制造周期大大缩短, 实现了小型化、模块化和批量化的生产, 卫星发射成本越来越低、发射方式越来越灵活。此外, 火箭的重复使用、一箭多星等技术的成熟, 大幅提升了卫星部署的效率^[2]。同时, 随着互联网的普及和移动通信技术的发展, 人类对全球通信覆盖和高速通信服务的需求不断增长, 低轨大规模通信星座再次引起了一些国家和运营商的关注, 而且星座规模也更加庞大^[3]。

目前, 全球已经有多家公司向美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 提出申请, 计划建立低轨巨型星座, 典型的有加拿大的 Telesat、英

国的 OneWeb、美国太空探索技术公司 (SpaceX) 的星链 (Starlink) 和亚马逊公司的 Kuiper, 其中, Starlink 和 OneWeb 星座规模大、部署建设最快, 并且已经开始为用户提供服务^[4]。本文主要围绕 Starlink、OneWeb 这两个典型低轨大规模通信星座展开分析, 包括覆盖性能与当前部署状态以及商业应用前景, 以期对未来的低轨大规模卫星互联网建设提供借鉴。

1 典型低轨大规模通信星座发展背景与现状

1.1 Starlink 星座的发展现状

2015 年 1 月, SpaceX 提出了其卫星通信星座 Starlink 的建设计划, 旨在为农村和偏远地区的用户以及全球用户提供高速互联网接入服务。2018 年 2 月, 在一次常规发射任务中, SpaceX 利用猎鹰九号 (Falcon 9) 火箭发射了两颗 Starlink 计划的试验星——丁丁-a 和丁丁-b, 用于对地通信的测试。2018 年 3 月, FCC 批准了 SpaceX 利用 4 425 颗 Starlink 星座卫星在美开展服务的申请, 采用 Ku 和 Ka 频段宽带卫星进行组网。2018 年 11 月, FCC 批准 Starlink 计划第二阶段的 7 518 颗卫星申请, 采用 Q/V 频段进行星座组网^[5]。按照相关规定, Starlink 须在 6 年内把至少半数的卫星部署入轨, 整个系统在 9 年内建成。2019 年 5 月, SpaceX 通过一箭 60 星的方式将第一批 Starlink 卫星送入轨道, 2019 年 11 月再次以一箭 60 星的方式发射一批卫星。随后 Starlink 星座开始了快速部署之路, 每月平均发射 1~2 次。随着卫星版本迭代升级, 卫星质量随之增加, 火箭单次发射的卫星数量也在改变。通过多次修改, 星座规模由早期向 FCC 提交的 4 425 颗调整为 4 408 颗, 轨道高度调整为 540~570 km (第二阶段的轨道高度调整为 340 km), 修改后 Starlink 星座第一阶段构型如图 1 所示。

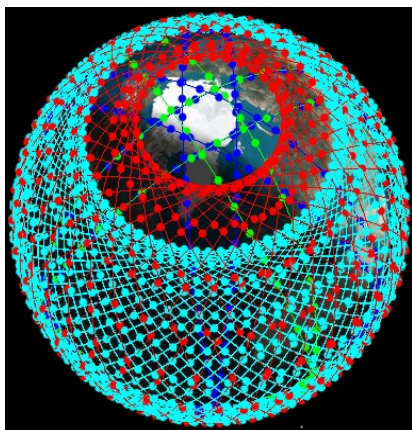


图 1 Starlink 星座第一阶段构型

2020 年 5 月 SpaceX 公司向 FCC 递交了 3 万颗卫星的详细资料, 星座代号为 Starlink Gen2^[6]。2022 年 12 月 2 日, SpaceX 公司正式发布了星盾 (Starshield) 卫星互联网星座项目。星盾专为政府用途设计, 可看作 Starlink 星座的军用版本, 最初侧重对地观测、卫星通信以及托管载荷 3 个领域。星盾星座具有如下特点: 高安全性和抗干扰能力、模块化设计、互操作性、快速开发和部署、弹性和扩展能力^[7]。Starlink 星座规模的扩大将根据需求情况调整, 目前发射的 Starlink 卫星已经采取了加设星间激光链路等升级措施。卫星在轨工作 4~5 年, 后续由型号更新、能力更强的卫星来替代。Starlink 卫星版本情况见表 1。

表 1 Starlink 卫星版本情况

卫星版本	发射时间	质量/kg	通信能力	轨道高度/km 倾角
V0.9	2019.5	227	没有星间通信能力, 采用 Ku 和 Ka 频段通信	550 53°
V1.0	2019.11~2021.5	260	没有星间通信能力, 采用 Ku 和 Ka 频段通信	550 53°
V1.5	2021.9~2023.7	295	具有星间激光通信能力, 采用 Ku 和 Ka 频段通信	540 53.22° 560 97.6°
V2.0mini	2023.7~	800	具有星间激光通信能力, 回程链路增加 E 频段通信	530 43°
V2.0	—	1 250	具有星间激光通信能力	—

根据 FCC 监管批文, SpaceX 最终将可发射和运营多达 1.2 万颗互联网卫星, 而根据 SpaceX 向国际电信联盟申报的材料, Starlink 星座的远期目标是部署多达 4.2 万颗卫星。Starlink 第一期的卫星总数为 11 926 颗, 按照预期进度, 2019~2024 年完成第一期的第一阶段 4 408 颗卫星的部署, 2024~2027 年完成第二阶段 7 518 颗卫星的部署; Starlink 第二期预备占位卫星 30 000 颗, 设计采用 Ku、Ka 和 E 频段, 计划 2033 年前后完成部署。2021 年 9 月之后发射的 Starlink 卫星都进行了升级, 配备了星间链路, 开始覆盖极地地区。

1.2 OneWeb 星座的发展现状

OneWeb 星座由 OneWeb 公司于 2014 年提出, 早期计划部署近 3 000 颗低轨卫星。星座建设主要为两个阶段: 第一阶段计划部署 648 颗 Ku/Ka 频段卫星的星座, 其星座

情况见表 2，轨道高度为 1 200 km，星座构型如图 2 所示。截至 2024 年 12 月 1 日第一阶段已完成部署。第二阶段为后期修改的，计划发射 6 372 颗卫星，具体星座情况见表 3^[6, 8]。OneWeb 星座摒弃了传统的星间链路设计，选择了一种创新的卫星联网策略，在全球范围内部署关口站以实现卫星间的互联互通。在用户通信层面，该星座采用了高效的 Ku 频段技术，而在关口站间的通信上，则选用了更为先进的 Ka 频段技术。

表 2 OneWeb 第一阶段星座情况

轨道高度/km	倾角	轨道面数/个	每个平面卫星数/颗	卫星总数/颗
1 200	87.9°	18	36	648

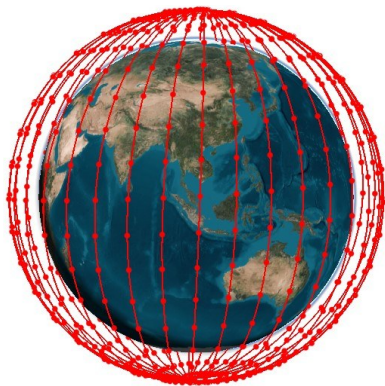


图 2 OneWeb 第一阶段星座构型

OneWeb 星座从规划、设计到批发射、入轨直至完成构建第一阶段低轨星座。OneWeb 星座于 2020 年 2 月正式开始组网，但在发射了 2 批 78 颗卫星后，在 3 月就宣告破产，直到 12 月 18 日恢复卫星发射^[9]，截至 2024 年 12 月 1 日已有 640 颗卫星发射入轨，其中 654 颗在轨运行^[10]。

表 3 OneWeb 第二阶段星座情况

轨道高度/km	倾角	轨道面数/个	每个平面卫星数/颗	卫星总数/颗
1 200	87.9°	36	49	1 764
1 200	55°	32	72	2 304
1 200	40°	32	72	2 304

2 Starlink 星座轨道部署与性能分析

2.1 Starlink 星座分层轨道设计

Starlink 星座采用“先美国本土全境覆盖、后完成全球覆盖”的建设思路，主要分为两期计划实施。其中，第一期计划的 11 926 颗卫星已获得 FCC 的批准，分两个阶段分别部署 4 408 颗和 7 518 颗卫星。第二期计划部署 3 万颗卫星，至今尚未获得 FCC 的批准。这两期星座的构

型都采用了分层轨道设计，根据向 FCC 提交的资料，两期计划的星座共分成了 19 个高度的轨道层，其中，第一期第一阶段有 5 个轨道层，第二阶段有 3 个轨道层，第二期有 11 个轨道层^[5-6]。Starlink 星座第一期和第二期计划部署轨道分别见表 4 和表 5。

表 4 Starlink 星座第一期计划部署轨道

类型	轨道高度 /km	倾角	轨道面数/个	每轨卫星数/颗	总计/颗
第一阶段	550	53°	72	22	1 584
	570	70°	36	20	720
	560	97.6°	6	58	348
	540	53.2°	72	22	1 584
	560	97.6°	4	43	172
第二阶段	345.6	53°	2 547	1	2 547
	340.8	48°	2 748	1	2 748
	335.9	42°	2 493	1	2 493

表 5 Starlink 星座第二期计划部署轨道

轨道高度/km	倾角	轨道面数/个	每轨卫星数/颗	总计/颗
580	87.7°	30	50	1 500
539.7	85°	30	50	1 500
532	80°	50	30	1 500
524.7	75°	30	50	1 500
517.8	70.1°	50	30	1 500
498.8	53°	75	60	4 500
488.4	53°	75	60	4 500
482.7	30°	75	60	4 500
345.5	53°	50	60	3 000
334.3	40°	50	60	3 000
328.3	30°	50	60	3 000

Starlink 星座采用分层轨道设计，一方面有利于星座的分阶段部署，同一批次的卫星可以进入同一轨道层中；另一方面，利用分层轨道设计可以逐渐提升星座系统的性能，使星座系统在部署建设的同时能够逐步实现应用，同时改善重点区域的服务性能。

在第一期近 1.2 万颗卫星中，第一阶段的 4 408 颗低轨道卫星用于解决有无问题，能够在全球范围内实现卫

星互联网信号覆盖；第二阶段的 7 518 颗极低轨道卫星则用来确保高密度用户地区的服务质量，防止同一地区卫星互联网用户过多而导致带宽不够、时延较大的情况出现^[6]。单层网络仅提供相同高度的卫星之间的相互通信，而多层网络则支持不同外壳中的卫星之间的通信。此外，多层轨道设计通过在不同的高度部署卫星，可以降低空间碰撞的风险，特别是在拥挤的低地球轨道区域。多层网络尽管更加复杂，但其在提供可持续的全球覆盖、无缝切换和可靠通信方面更加具有灵活性^[11]。

2.2 Starlink 星座部署分析

Starlink 星座建设项目的初期阶段要求把 4 408 颗卫星部署到低地球轨道上的 5 个轨道壳层，目前初期阶段的部署任务已经基本完成。据统计，截至 2024 年 11 月 30 日，Starlink 星座已经部署 8 个轨道壳层，进行了 215 批 Starlink 卫星发射，累计发射 7 479 颗卫星，其中 6 805 颗在轨运行^[12]，其实际部署情况如图 3 所示。

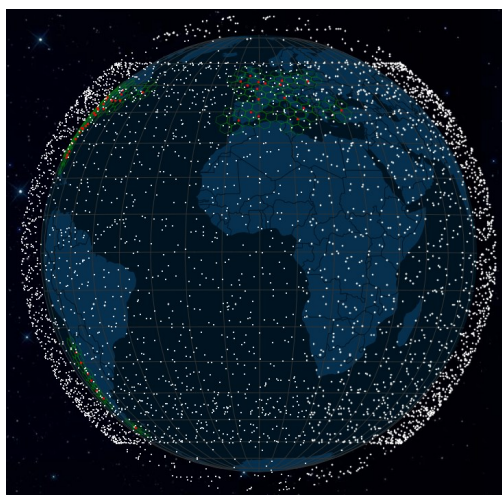


图 3 Starlink 星座实际部署情况示意

通过持续跟踪 Starlink 星座的发射，分析星座的部署现状，可以发现 Starlink 星座并没有完全按照申请的星座计划进行发射部署^[12]，例如，第 1 和第 4 轨道壳层分别实际部署 1 735 颗和 1 637 颗卫星，超过了之前计划的 1 584 颗，而且第 5 轨道壳层的轨道倾角由计划的 97.6° 变为 43°，此外，其他壳层也发生了变化。

同时，结合对星座每个批次发射部署的跟踪分析，可以发现每个批次的轨道面部署方式为：采用连续小推力和自然摄动力结合的方式使每批次卫星分成多组部署至多个轨道面。其中，连续小推力主要用于卫星的轨道爬升，而自然摄动力会使低轨卫星的轨道面产生进动，

升交点西退。升交点赤经漂移率公式为

$$\dot{\Omega} = -\frac{3J_2 R_E^2}{2a^2(1-e^2)^2} \sqrt{\frac{\mu}{a^3}} \cos i \quad (1)$$

其中， J_2 为地球摄动系数， R_E 地球赤道半径， μ 为地球引力常数， a 、 e 、 i 分别为卫星的长半轴、偏心率和倾角。

由式 (1) 可知，轨道面升交点赤经的改变需要时间积累，则同一批次发射的卫星需要在停泊轨道停留一定的时间，实现轨道面分离，各组在各自轨道面进行爬升。图 4 为第 75 批卫星的爬升数据，该批次卫星部署在高度为 570 km 的第二轨道壳层。

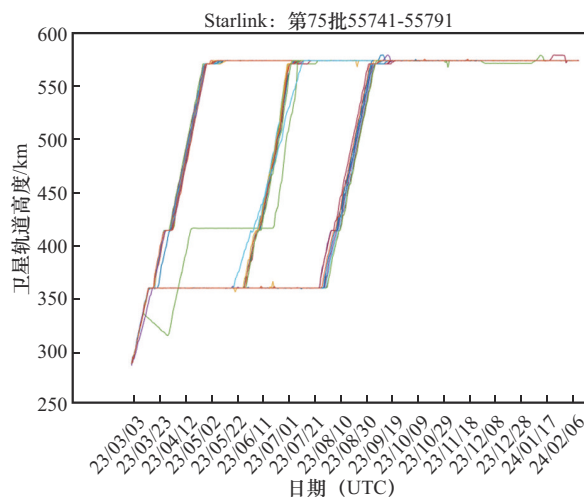


图 4 第 75 批卫星的爬升数据

由图 4 可以看出，该批次卫星主要分 3 组爬升，分别部署于 3 个轨道面。第 1 组卫星稍作停留后直接爬升到 570 km 的高度，第 2 组和第 3 组卫星在 360 km 左右停留且第 3 组卫星停留的间隔时间大于第 2 组，当各组卫星的轨道面升交点赤经积累到各自轨道面时，再进行轨道爬升，该过程大概持续了 6 个月。这种部署方式利用自然进动和星载推进器将卫星送入不同的轨道面，可有效减少燃料、降低成本，但部署过程所需时间较长。

Starlink 星座壳层的分阶段部署方案为：先进行少量轨道面部署，然后对轨道面进行逐层加密，最后完成全部的轨道面部署，通过不同批次的卫星对各轨道面进行均匀加密。例如，第 1 轨道壳层有 72 个轨道面，每个面间隔 5°。在部署时，卫星先后以 20° 和 10° 间隔的轨道面布满全球；接着部署 5° 间隔的轨道面，逐层加密；最后，完成壳层内 72 个轨道面部署^[13]。Starlink 星座实际部署情况见表 6。

表 6 Starlink 星座实际部署 (数据截至 2024.11.28)

轨道壳层	计划轨道高度/km	实际部署轨道高度/km	计划卫星数/颗	已发射卫星数/颗	在轨卫星数/颗	备注
1	550	547.25 549.70	1 584	1 751	996	覆盖全球南北纬 65° 区间, 约占地球表面积的 80%
2	570	572.00	720	408	389	建成后可覆盖全球地球表面积的约 94%
3	560	565.50 563.00	348	233	232	极地轨道, 覆盖南北极圈地区
4	540	547.25 549.70 542.00	1 584	1 621	1 445	增大覆盖密度, 大幅提升通信宽带, 全部配备星间链路
5	530	488	2 500	701	679	二代 Starlink 卫星开始部署; 原计划中 5 号壳层的倾角、高度和卫星总数分别被修改为 43°、530 km 和 2 500 颗; 实际部署的轨道高度为 488 km
6	523	559.10 488.00 444.00	0	1 540	658 159 487	6 号壳层的倾角为 43°, 形成了 3 个不同高度层。计划中 6 号壳层没有卫星, 根据部署情况, 猜测是将第一阶段的 5 号壳层调整后与 6、7、8 号壳层结合作为第 2 次申报通过的 7 500 颗卫星星座计划
7	525	481.70 551.80 447.00 551.80 463.00 475.20	2 500	845	0 47 147 0 84 438	星座计划中 7 号壳层的轨道倾角为 53.0°, 高度为 525 km, 实际部署倾角相差不大, 却形成了 6 个不同的高度层
8	535	359.00 355.00 339.00	2 500	324	202 1 55	8 号壳层的轨道倾角为 53.0°, 高度为 535 km, 实际部署倾角为 53.16°, 形成了 3 个不同的高度层

此外, Starlink 星座卫星在部署时易受不确定因素影响, 例如, 2022 年 2 月 4 日, 一场地磁暴导致大气密度少许上升, 使发射于第 4 轨道壳层的一批卫星所受阻力增大并且无法脱离安全模式进行轨道提升机动, 导致其中 38 颗卫星离轨再入并被烧毁。

2.3 Starlink 星座性能分析

Starlink 星座规模庞大, 不但在覆盖性能方面具有极大的优势, 而且在系统应用方面也具有很大的潜力。星座建成后, 其强大的覆盖性能可为全球提供实时全覆盖、高带宽、低时延的互联网接入服务, 不仅可用于偏远地区宽带接入、航空海事宽带服务落后地区教育卫生事业等方面, 还可用于各类灾害救援服务^[14-15]。

2.3.1 覆盖性能分析

覆盖性能是卫星星座在需要的时间和地点动态集中所需卫星容量的能力。针对 Starlink 标称星座第一阶段的 4 408 颗卫星, 本文初步分析了星座各轨道层的覆盖情况。

图 5 为 Starlink 星座第 1 轨道层 1 584 颗 53° 倾角卫星的星座示意。通过仿真分析可以发现, Starlink 星座第 1 轨道层的 1 584 颗卫星可实现南北纬 72.5° 之间区域的覆

盖, 主要覆盖区域在南北纬 65° 之间, 覆盖重数约为 20~40 重, 可以实现人口稠密地区的初步网络覆盖。

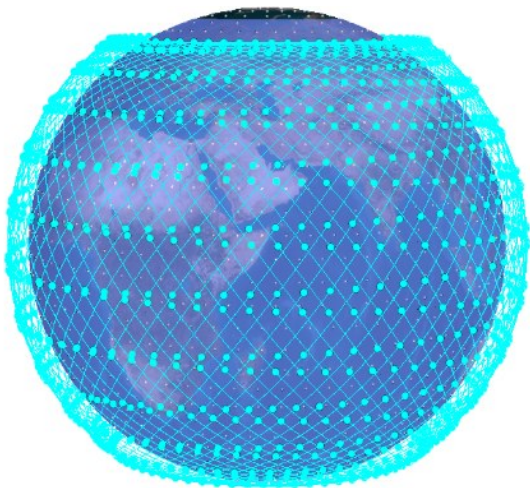


图 5 Starlink 星座第 1 轨道层星座示意

图 6 是在图 5 所示第 1 轨道层基础上增加部署第 2 轨道层的 720 颗 70° 倾角的卫星后的星座示意。通过仿真分析第 1+2 轨道层星座可知, 南北纬 87.5° 之间区域能够被

覆盖,覆盖重数颗可达40~60重。

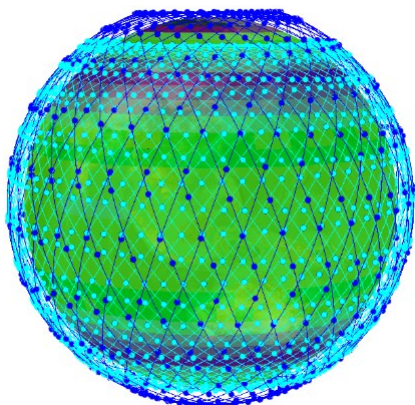


图6 Starlink星座第1+2轨道层星座示意

图7为图6所示第1+2轨道层的基础上继续增加第3轨道层的348颗97.6°极轨卫星后的星座示意。通过仿真其第1~3轨道层星座可以发现,第1~3轨道层的星座已经实现全球覆盖,覆盖重数主要为60~80重。此外,经过初步仿真分析可以看出,星座覆盖主要以人口覆盖为主。

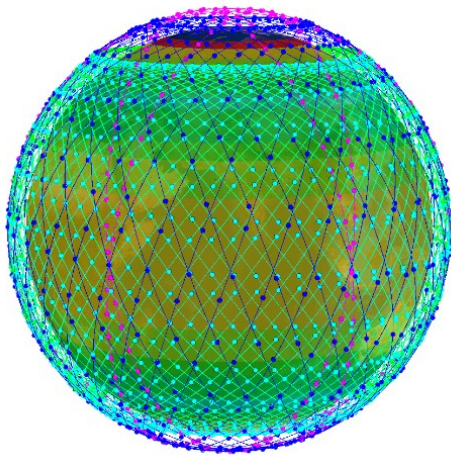


图7 Starlink星座第1+2+3轨道层星座示意

Starlink星座第一阶段的4408颗卫星全部部署完成后,将能够实现全球覆盖。世界主要人口分布地区的卫星覆盖重数将超过100重,继续部署后续的子星座将继续增加星座的覆盖重数,实现全球实时无缝覆盖,提高网络覆盖性能。但星座计划包含如此多的卫星,主要目的是增加卫星网络带宽,提高全球范围内的数据传输速率,从而提升高密度用户地区的服务质量。目前星座建设中的Starlink卫星已开始配备星间链路,可有效实现全球覆

盖,包括极地和海洋地区,并改善通信服务实现系统中卫星的负载均衡问题。

2.3.2 商业应用分析

Starlink卫星系统最初的目标是建设一个全天候、全天时、全球覆盖的高速卫星互联网星座,可随时随地为用户提供卫星通信功能和带宽互联网服务。Starlink星座的天基互联网计划能够实现星间互联互通,在通信方面,Starlink星座一方面能够实现全球无盲区波束覆盖,扩大通信范围;另一方面,Starlink星座能够实现低时延数据传输,为通信提供高速率保障。通过强大的通信能力,可将陆、海、空、天等信息联成一体,实现空天地一体化互联互通^[16]。Starlink星座已经在灾害救援、教育领域等多方面实现了应用。例如,2022年汤加火山喷发,在海底电缆被震断的情况下,Starlink为当地提供卫星互联网服务,恢复与外界联系^[17];费雷拉基金会(Ferreira Foundation)计划使用Starlink服务支持救灾行动,而SpaceX已向华盛顿州紧急管理部门提供Starlink卫星互联网服务的访问权限,以支持对危险野火的紧急响应;另外,Starlink星座在印度尼西亚等国落地,助力落后地区教育卫生事业发展。Starlink星座在多个领域具有广泛影响力和实用性,特别是在提供紧急通信服务、支持教育发展和灾害救援方面。2024年5月26日,津巴布韦电信监管机构批准了Starlink在该国运营,这意味着Starlink服务将在全球第100个市场开通,同时地面用户规模突破300万^[18]。

随着星座卫星功能不断升级,Starlink星座的应用范围已经不局限于宽带服务。Starlink卫星的轨道高度低,地面重访周期短,并且星座卫星间可实现互补,可搭载侦察、导航、气象等功能载荷,从而将星座系统拓展至卫星成像、导航、遥感和气象监测等应用领域^[16]。已有学者利用Starlink卫星信号的多普勒频率,采用多普勒定位方式进行了导航定位研究,研究人员成功使用6颗Starlink卫星以7.7 m的定位精度实现了定位,验证了利用Starlink卫星进行导航定位的可行性^[19-21]。

3 OneWeb星座轨道部署与性能分析

3.1 OneWeb星座部署分析

OneWeb星座第一阶段计划利用648颗部署在近地轨道的卫星实现服务区覆盖,提供全球宽带互联和物联服务。在向FCC提交的计划中,这些卫星将分布在高度为1200 km、倾角为87.9°的18个轨道面。

2024年10月20日,OneWeb的第20批卫星发射入轨,完成了OneWeb星座第一阶段的部署。从2019年2月

27日到2024年10月20日, OneWeb通过20次发射将660颗卫星部署入轨, 其中在轨运行654颗, 6颗卫星离轨。图8为截至2024年12月1日的OneWeb星座实际部署示意。

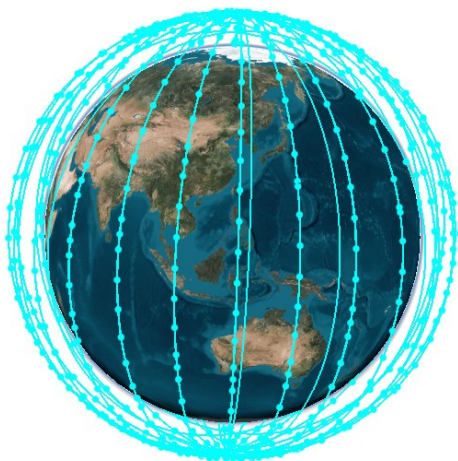


图8 OneWeb星座实际部署示意

通过对 OneWeb 星座的两行轨道根数数据进行分析, 发现星座实际部署与计划有所差异。星座实际在轨卫星 636 颗, 主要分布在 12 个轨道面, 轨道面间隔为 15° , 每个轨道面约 50 颗卫星, 但实际部署的轨道高度和倾角与星座计划标称位置均有差异, 而且不同轨道面上的倾角和半长轴之间也略有差异。不同的卫星之间有大 约 20 km 的轨道高度差, 轨道高度从 1 170 km 到 1 230 km 不等。这可能是在考虑星座长期演化之后而进行的偏置。对卫星轨道爬升数据进行处理, 得出第 2、第 4、第 6 以及第 11 批卫星部署高度变化情况, 如图 9~图 12 所示^[22]。

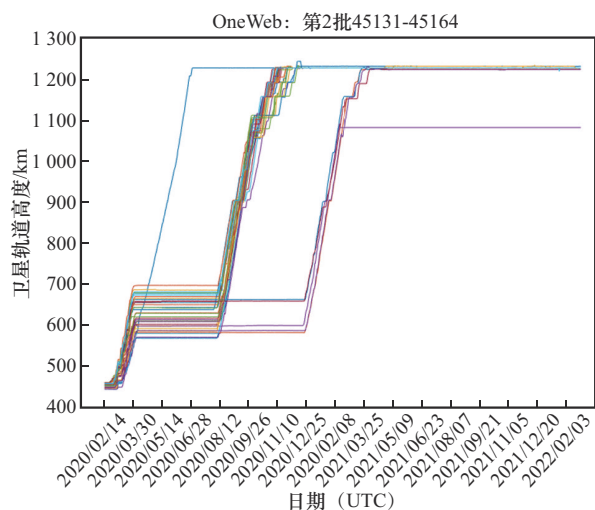


图9 第2批卫星部署高度变化

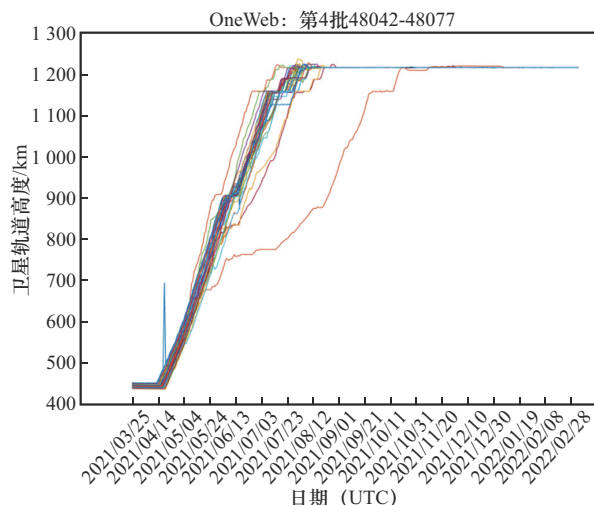


图10 第4批卫星部署高度变化

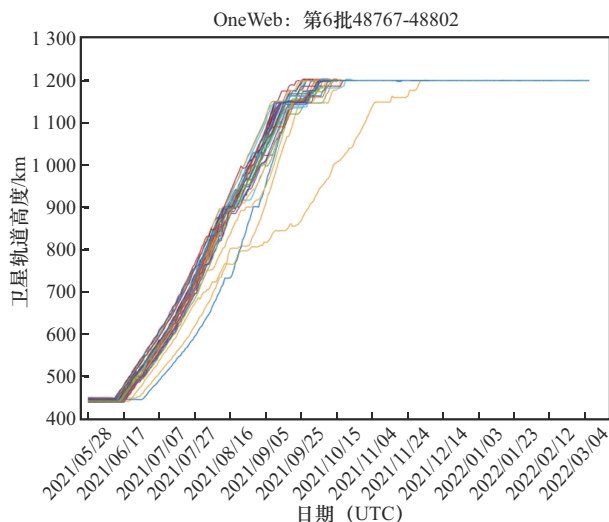


图11 第6批卫星部署高度变化

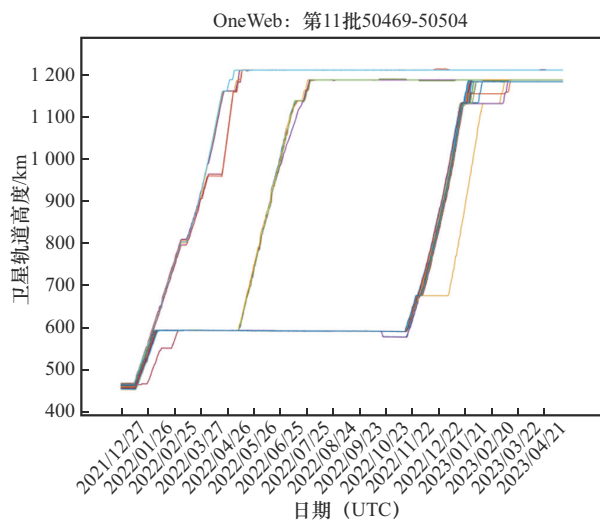


图12 第11批卫星部署高度变化

通过对各个批次数据进行分析可以发现：OneWeb 星座部署的爬升方式主要分为直接爬升和停泊轨道等待分组爬升两种。其中，第 1 批次及第 3~8 批次发射的卫星在火箭分离后直接爬升至标称轨道，而其他批次发射的卫星通过停泊轨道等待，采用经过不同时间进行分组抬升的方式爬升。

3.2 OneWeb 星座性能分析

OneWeb 星座是目前少数成功实现全球覆盖的低轨道商业通信卫星系统之一。当前星座没有设置星间链路，而是在全球共布设了 44 个关口站使卫星联网，星座采用 Ku 频段进行用户通信，Ka 频段进行关口站通信^[23]。OneWeb 星座可以为偏远地区的个人、企业用户、铁路、公路、海上作业、航空器以及应急救援等提供通信服务，星座系统同时还为各个应用场景设计了用户终端设备。

3.2.1 覆盖性能分析

OneWeb 星座的卫星设计使用寿命为 5 年，每颗卫星设计了 16 个 Ku 频段用户波束，单星的覆盖面积为 $1\,080\text{ km} \times 1\,080\text{ km}$ 。与 Starlink 星座第一阶段的多层混合结构不同，OneWeb 星座的第一阶段采用倾角为 87.9° 的单层近极轨道构型，如图 13 所示，该构型能够以较少的卫星数量实现良好的全球覆盖^[24]。通过对计划中的构型进行仿真分析，得到其对应的不同纬度的覆盖重数，如图 14 所示。

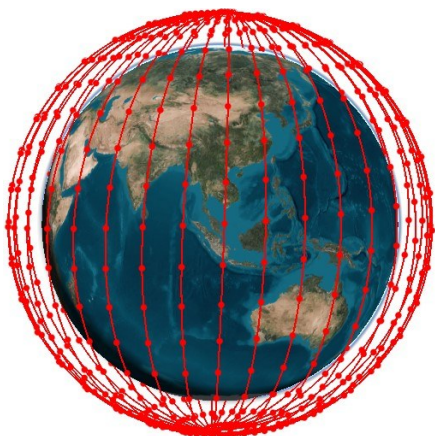


图 13 OneWeb 星座第一阶段构型

图 14 中的数据是 OneWeb 标称星座以 25° 仰角进行仿真得到的，可以看出，尽管星座只有 600 多颗卫星，但是近极轨道构型能够实现全球覆盖，覆盖能力随着纬度增加而逐渐增强，对 90°N 纬度地区覆盖能力达到最强。而在覆盖能力较差的赤道附近，覆盖重数也能达到 7 重以上，而两极地区的覆盖重数已经超过 50 重。这

样的覆盖特性确保了全球任何地点都能享受到服务，OneWeb 通过其 16 个 Ku 频段用户波束，实现了对全球的无缝覆盖。但世界人口主要分布在中低纬度区域，极地区域人口稀疏，星座采用近极轨道，两极上方卫星过于密集而低纬度地区分布稀疏，造成了卫星资源的浪费。星座通过卫星波束的多重覆盖来保证覆盖能力较弱的低纬度区域的通信质量^[25]。

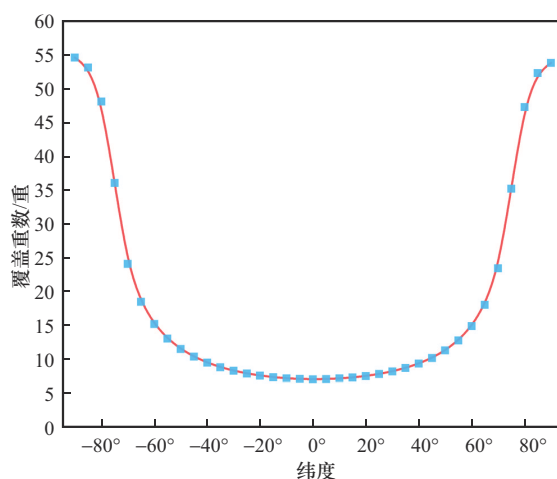


图 14 OneWeb 星座不同纬度覆盖重数

3.2.2 商业应用分析

OneWeb 星座不仅在偏远地区提供互联网接入，还在以下多个行业领域展现出巨大的潜力^[23,26]。

应急救援基础设施：OneWeb 星座能够为应急救援提供快速部署的网络连接，确保在发生自然灾害等紧急情况下，救援队伍能够迅速获得通信支持。

高空低时延宽带：为航空公司提供高空飞行中的宽带服务，允许乘客在空中继续使用智能手机和平板电脑上网。

海上的通信需求：满足海上作业单位和石化企业的通信需求，提供稳定可靠的通信服务。

低成本用户终端普及网络接入：通过社区网络为覆盖区域提供网络连接，为农村及偏远地区提供经济可行的网络接入解决方案。

4 结束语

OneWeb 和 Starlink 是目前典型的低轨大规模通信星座，两者提供的全球互联网接入服务存在一定程度的重叠，特别是在偏远地区、航空和海事领域。然而，它们在目标市场、技术特点、覆盖范围等方面均存在差异。在目标市场方面，OneWeb 星座更侧重于为农村和偏远地

区提供互联网接入, 而 Starlink 星座则旨在服务全球, 包括城市和农村地区; 在技术特点方面, OneWeb 星座系统采用了独特的全球关口站设计, 无星间传输, 而 Starlink 星座则依赖星间链路, 两者在时延和可靠性方面也有所不同; 在覆盖范围方面, OneWeb 星座对中低纬度地区的覆盖能力较弱, 而 Starlink 星座卫星数量庞大, 能够为全球提供低时延、高带宽的通信服务^[23]。

本文梳理了 Starlink 和 OneWeb 星座的发展现状, 并分别对两个星座的部署、覆盖以及商业应用进行了分析论述, 以期通过研究典型星座的发展经验, 结合自身体制优势, 采用创新商业模式, 突破关键技术, 从而加快低轨大规模卫星星座的发展。

参考文献:

- [1] ASHFORD E W. Non-Geo systems-where have all the satellites gone?[J]. *Acta Astronautica*, 2004, 55 (3): 649-657.
- [2] ZEZHONG L U, SHEN X, DEREN L I, et al. Multiple super-agile satellite collaborative mission planning for area target imaging[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, 117.
- [3] 胡敏, 阮永井, 陶雪峰, 等. 低轨大规模卫星星座理论与控制方法[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2024.
HU M, RUAN Y J, TAO X F, et al. Theory and control method of low earth orbit large scale satellite constellation[M]. Beijing: Beihang University Press, 2024.
- [4] PACHLER N, DEL PORTILLO I, CRAWLEY E F, et al. An updated comparison of four low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[C]// 2021 IEEE International Conference on Communications Workshops. [S.l.:s.n.], 2021: 14-23.
- [5] 杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. Starlink 计划卫星网络资料申报情况分析[J]. *天地一体化信息网络*, 2021, 2 (1): 60-68.
YANG W H, HUA G L, FENG Y, et al. Analysis of the Starlink satellite network filing application[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2021, 2 (1): 60-68.
- [6] 阮永井, 胡敏, 云朝明. 低轨巨型星座构型设计与控制研究进展与展望[J]. *中国空间科学技术*, 2022, 42 (1): 1-15.
RUAN Y J, HU M, YUN C M. Advances and prospects of the configuration design and control research of the LEO mega-constellations[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2022, 42 (1): 1-15.
- [7] 凌翔. SpaceX“Starlink”升级为“星盾”并与美国政府部门深度合作动向及安全挑战简析[J]. *互联网天地*, 2023(11): 26-29.
LING X. Analysis of the trend and security challenges of SpaceX's upgrading from “Starlink” to “Starshield” and deep cooperation with US government departments[J]. *China Internet*, 2023(11): 26-29.
- [8] 李博, 牡丹, 赵惠惠, 等. “一网”星座卫星研制情况简析[J]. *国际太空*, 2021, (9): 62-5.
LI B, DU D, ZHAO H H, et al. A brief analysis of the development of the “One Network” constellation satellite[J]. *Space International*, 2021, (9): 62-5.
- [9] SpaceNews. OneWeb 组网发射恢复联盟号送 36 颗卫星上天[J]. *卫星与网络*, 2020(12):76.
SpaceNews. OneWeb launches and restores alliance, sending 36 satellites into space[J]. *Satellite & Network*, 2020 (12):76.
- [10] 张祎莲, 王韵涵, 武珺. 2023 年国外通信卫星发展综述[J]. *国际太空*, 2024, (4): 21-27.
ZHANG Y L, WANG Y H, WU J. Overview of the development of foreign communication satellites in 2023[J]. *Space International*, 2024, (4): 21-27.
- [11] CAKAJ S. The parameters comparison of the “Starlink” LEO satellites constellation for different orbital shells[J]. *Frontiers in Communications Networks*, 2021, 2 (5): 1-15.
- [12] 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 (1): 1-15.
- [13] 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.
- [14] 方芳, 吴明阁. “星链”低轨星座的主要发展动向及分析[J]. *中国电子科学研究院学报*, 2021, 16 (9): 933-936.
WANG F, WU M G. Development trend and analysis of “Starlink” LEO satellites constellation[J]. *Journal of China Academy of Electronics and Information Technology*, 2021, 16 (9): 933-936.
- [15] 陈云雷, 李向龙, 王鑫鑫. 美国卫星互联网军事应用趋势及其影响研究[J]. *飞航导弹*, 2021, (2): 82-87.
CHEN Y L, LI X L, WANG X X. Research on military application trend and impact of US satellite Internet [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2021, (2): 82-87.
- [16] DoNews. SpaceX 可能用 Starlink 协助已经断网的汤加王国[EB]. 2022.
DoNews. SpaceX may use Starlink to assist the disconnected Kingdom of Tonga[EB]. 2022.
- [17] 李培松, 任重. 马斯克 Starlink 服务落地印尼[N]. *环球时报*, 2024.
LI P S, REN Z. Musk Starlink service landing in Indonesia[N]. *Global Times*, 2024.
- [18] KASSAS Z Z, NEINAVAI E M, KHALIFE J. Acquisition, Doppler tracking, and positioning with Starlink LEO satellites: first results[J].

- IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2021: 1.
- [19] 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, 11(2): 72-82.
- SHEN L R, LI S B, SUN H F, et al. Integrated navigation method based on Starlink opportunity signal/INS[J]. Navigation Positioning and Timing, 2024, 11(2): 72-82.
- [20] 袁祯平, 易建新, 万显荣, 等. 基于星链信标信号的多普勒定位方法与实验[J]. 系统工程与电子技术, 2024, 46(8): 2535-2545.
- YAUN Y P, YI J X, WAN X R, et al. Doppler positioning method and experiment based on Starlink beacon signal[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2024, 46(8): 2535-2545.
- [21] Jonathan's Space Pages. OneWeb Statistics [EB]. 2024.
- [22] VIKTOR. OneWeb vs Starlink: What We Know So Far [EB]. 2023.
- [23] 崔潇潇, 王琦, 范青松. 从“一网”(OneWeb)卫星探究卫星互联网面临的风险与挑战[J]. 国防科技工业, 2022, (6): 56-58.
- CUI X X, WANG Q, FAN Q S. Exploring the risks and challenges faced by satellite Internet from OneWeb satellite[J]. Defence Science & Technology Industry, 2022, (6): 56-58.
- [24] 王迪, 杨广华, 秘倩, 等. 大型低轨星座覆盖能力评估研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18 (8): 761-769.
- WANG D, YANG G H, MI Q, et al. Research on coverage capability evaluation of large LEO constellation[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2023, 18 (8): 761-769.
- [25] KOZHAYA S, KASSAS Z M. A first look at the OneWeb LEO

constellation: beacons, beams, and positioning[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2024: 1-7.

[作者简介]



阮永井 (1993-), 男, 博士, 主要研究方向为低轨大规模卫星星座设计。



胡敏 (1983-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为航天任务分析与设计研究。



薛文 (1995-), 男, 博士, 主要研究方向为低轨大规模卫星星座设计及导航星座设计研究。