

# Starlink 星座应用现状及分析

王羽<sup>1</sup>, 李清<sup>1</sup>, 李克军<sup>1</sup>, 蒋长林<sup>1</sup>, 王野<sup>1</sup>, 江勇<sup>1,2</sup>, 徐明伟<sup>1,3</sup>

(1. 鹏城实验室, 广东 深圳 518055;

2. 清华大学深圳国际研究生院, 广东 深圳 518055;

3. 清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

**摘 要:** Starlink 星座计划是目前全球最具前瞻性和影响力的低轨宽带卫星互联网星座。随着 Starlink 星座部署规模扩大, 其高频次的发射及批量卫星部署, 多样化卫星宽带服务提供, 全球终端用户的快速增长, 以及对军事应用的潜在支持和增强能力等应用潜力逐步显现。首先分析 Starlink 的在轨运行现状, 并将其互联网服务与其他卫星宽带服务提供商进行对比; 然后重点研究 Starlink 星间激光链路的应用特点及技术挑战, 探讨 Starlink 的军事应用现状及演化趋势; 最后总结 Starlink 的综合应用优势及面临的技术挑战, 为我国卫星网络设计提供依据。总体而言, 巨型 LEO 星座的建设及其应用不仅是卫星平台的实现, 还涉及卫星设计及工业化生产、发射能力支持、星座的运维、卫星组网、地面站配套等一系列的工业链能力集成。

**关键词:** 星链; 低轨宽带卫星星座; 激光星间链路

**中图分类号:** TN92

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-8930.2023023

## Application Status and Analysis of Starlink Constellation

WANG Yu<sup>1</sup>, LI Qing<sup>1</sup>, LI Kejun<sup>1</sup>, JIANG Changlin<sup>1</sup>, WANG Ye<sup>1</sup>, JIANG Yong<sup>1,2</sup>, XU Mingwei<sup>1,3</sup>

1. Peng Cheng Laboratory, Shenzhen 518055, China

2. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China

3. Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Starlink, a satellite broadband constellation operated by SpaceX, is currently the most influential and promising LEO broadband satellite constellation. With the expansion of the constellation deployment, its high-frequency launch and batch deployment of satellites, provision of diversified satellite broadband services, rapid growth of global user terminals, as well as potential support and capability enhancing for military are manifesting gradually. Firstly, the current status of Starlink's on-orbit operations were analyzed, and its internet services with other satellite broadband service providers was compared. Then, the application characteristics and technical challenges of Starlink's inter-satellite laser links were focused on, and Starlink's military application progress and the evolution trend were discussed. Finally, the comprehensive application advantages Starlink offers, and technical challenges faced by Starlink were summarized, which could serve as a stepping stone for the design of our country's satellite network. Overall, the construction and application of a mega LEO constellation like Starlink involves the chain integration of a series of components, ranging from satellite design and industrialized production, satellite launch facilities, constellation operation and maintenance, satellite networking, to global ground station supporting, rather than just the satellite platforms.

**Keywords:** Starlink, LEO broadband constellation, laser inter-satellite link

### 0 Starlink 项目概述

Starlink(星链)是由美国太空探索技术公司(SpaceX)

规划建设及运维的巨型低轨卫星星座,截至2022年11月8日,Starlink星座已完成3558颗卫星的发射,并获得全球44个国家及地区的卫星互联网接入服务授权。Starlink

收稿日期: 2022-12-16; 修回日期: 2023-04-12

通信作者: 李清, liq@pcl.ac.cn

基金项目: 鹏城实验室重大攻关项目(No. PCL2021A03-1); 国家自然科学基金资助项目(No. 61972189)

Foundation Items: The Major Key Project of PCL(No. PCL2021A03-1), The National Natural Science Foundation of China(No. 61972189)

表 1 Starlink 第一期第一阶段轨道设计及任务完成状态 (统计时间: 2022-8-1)

| 任务名称 | 轨道框架  |        | 轨道参数  |        |        | 任务完成状态  |          |
|------|-------|--------|-------|--------|--------|---------|----------|
|      | 高度/km | 卫星数量/颗 | 轨道倾角  | 轨道面数/个 | 卫星数量/颗 | 在轨活跃量/颗 | 失效或离轨量/颗 |
| 壳层 1 | 550   | 1 584  | 53.0° | 72     | 22     | 1 469   | 256      |
| 壳层 4 | 540   | 1 584  | 53.2° | 72     | 22     | 1411    | 65       |
| 壳层 2 | 570   | 720    | 70.0° | 36     | 20     | 50      | 1        |
| 壳层 3 | 560   | 348    | 97.6° | 6      | 58     | 187     | 10       |
| 壳层 5 |       | 172    |       | 4      | 43     | 0       | 0        |

星座建设规划分为两期,第一期建设分为两个阶段,其中第一阶段的部署规划包括倾角 53.0°、53.2°、70.0°和 97.6°的 5 个壳层,预计部署 4 408 颗卫星,任务完成状态见表 1。第一期第二阶段计划部署 7 518 颗卫星(尚未开始部署),轨道高度更低(约 340 km),包括轨道倾角 42.0°、48.0°和 53.0°的 3 个壳层<sup>[1]</sup>。SpaceX 针对 Starlink 星座已执行 65 次发射任务(统计截止日期:2022-11-8),发射卫星 3 558 颗,当前在轨活跃卫星 3 117 颗。不考虑前两次的实验性发射任务 Tintin (2 颗)和 v0.9 (60 颗),卫星在轨良好率为 3 117/(3 558-62)≈89%。

Starlink 2022 年 1 月 6 日至 10 月 28 日的 285 天内执行 32 次发射任务,将 1 615 颗卫星发射入轨。平均约 8.9 天执行一次发射,日均发射 5.7 颗卫星<sup>[3]</sup>。

## 1 Starlink 应用现状与分析

SpaceX 已完成 Starlink 第一期第一阶段倾角为 53.0°壳层 1 的部署,并以壳层 1 为主体向美国本土以及全球已获授权国家及地区的用户提供卫星宽带互联网服务。下面就 Starlink 星座在轨运行状态、宽带服务状况以及卫星宽带服务的地面服务授权情况进行分析。

### 1.1 Starlink 星座在轨运行现状

根据 SpaceX 的卫星网络申请资料<sup>[2]</sup>,Starlink 第一期第一阶段总共计划部署 4 408 颗卫星,分别位于倾角为 53.0°、53.2°、70°、97.6°的 5 个壳层<sup>[1]</sup>。这种不同倾角的多壳层设计平衡了卫星的地面覆盖率和卫星资源利用率,其中倾角 97.6°的两个壳层确保星座的高纬度地区覆盖。

表 2 统计了 Starlink 星座当前已部署卫星的在轨状态,数据统计日期 2022 年 11 月 8 日。其中,壳层 1 包含 72 个轨道面,在轨 1 496 颗卫星,每个轨道面平均在轨卫星 1 496/72≈21 颗,比星座规划的每个轨道面 22 颗少 1 颗。其中处于运营状态的卫星 1 280 颗,平均每个轨道面 1229/72≈18 颗;不在预定轨位的卫星 173 颗<sup>[4]</sup>。

表 2 Starlink 第一期第一阶段在轨卫星状态 (统计时间: 2022-11-8)

| 对比项          | 壳层 1  | 壳层 4  | 壳层 2 | 壳层 3 |
|--------------|-------|-------|------|------|
| 运营中卫星/颗      | 1 280 | 991   | 33   | 182  |
| 定位中卫星/颗      | 12    | 4     | 0    | 4    |
| 不在预定轨位卫星/颗   | 173   | 148   | 18   | 1    |
| 不在预定轨道高度卫星/颗 | 31    | 328   | 0    | 0    |
| 卫星总数/颗       | 1 496 | 1 471 | 51   | 187  |

表 3 列出了 Starlink 已完成部署的壳层 1 卫星在轨状态变化。统计时间分别为 2022-5-16、2022-8-1 和 2022-11-8,数据显示壳层 1 的在轨活跃卫星总数减少了 13 颗,不在预定轨位和不在预定轨道高度的卫星数量变化较大。该组统计数据显示了 Starlink 星座的卫星网络的高度动态性,这种动态性一方面是由于卫星运行参数的差异,另一方面源于维持巨型星座的稳定构型所需的在轨机动和调整<sup>[5]</sup>。

表 3 Starlink 在轨卫星动态数据统计比较

| 对比项          | 壳层 1 (轨道倾角 53.0°) |          |           |
|--------------|-------------------|----------|-----------|
| 统计时间         | 2022-5-16         | 2022-8-1 | 2022-11-8 |
| 运营中卫星/颗      | 1 284             | 1 229    | 1 280     |
| 定位中卫星/颗      | 36                | 35       | 12        |
| 不在预定轨位卫星/颗   | 155               | 230      | 173       |
| 不在预定轨道高度卫星/颗 | 34                | 29       | 31        |
| 卫星总数/颗       | 1 509             | 1 509    | 1 496     |

图 1~图 3 分别示意了 Starlink 第一期第一阶段各壳层轨道面内的卫星分布及状态(数据统计日期:2022-11-8,原始数据来源<sup>[4]</sup>),轨道面以卫星的升交点赤经(RAAN,图中横轴)识别。如图 1 所示,已完成部署的壳层 1 包含完整的 72 个轨道面,各轨道面间隔 5°,各轨道面处于运营状态的卫星平均 18 颗。倾角 53.0°的壳层 4 即将完成部署,其中约 67%的卫星处于运行状态(参见表 2 数据)。如图 2 所示,壳层 4 RAAN 为 31°的轨道面内有

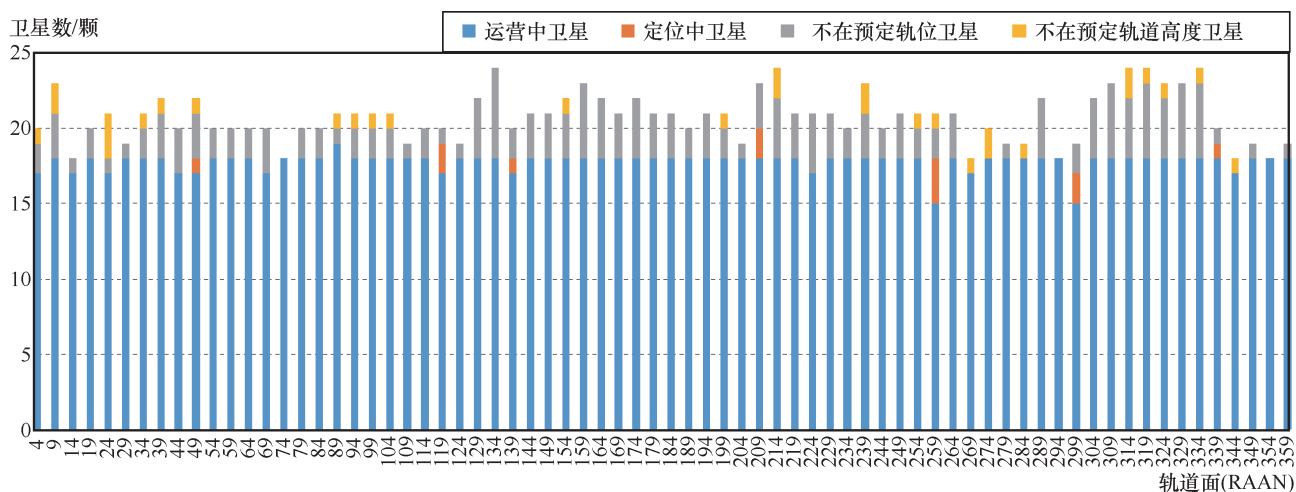


图1 Starlink 倾角 53.0°壳层 1 轨道面及卫星状态

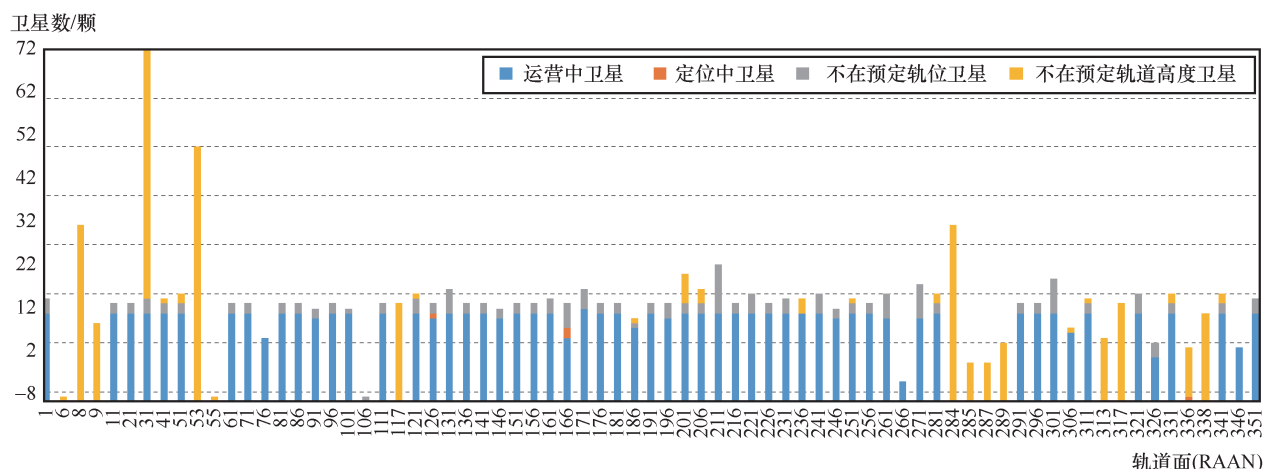
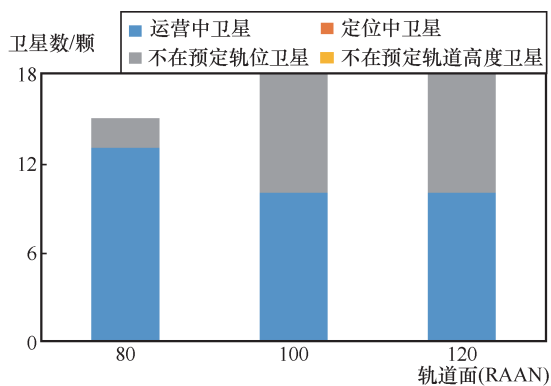
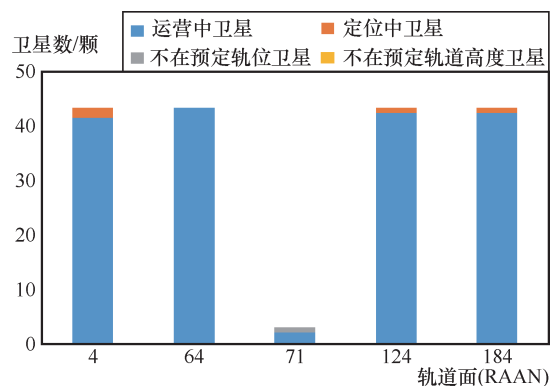


图2 Starlink 倾角 53.2°壳层 4 轨道面及卫星状态



(a) Starlink 壳层 2 轨道面及卫星状态



(b) Starlink 壳层 3 轨道面及卫星状态

图3 Starlink 壳层 2/壳层 3 轨道面及卫星状态

72 颗卫星在轨, 其中 18 颗为运营状态, 3 颗不在预定轨位, 多达 51 颗不在预定轨道高度, 这种动态性是 Starlink 进行星座动态部署及维持调整的反应。如图 3 所示, 倾角 70.0°的壳层 2 已部署 3 个轨道面, 其中 33 颗卫星处于运营状态; 倾角 97.6°的壳层 3 已部署 4 个轨道面, 其

中 182 颗卫星处于运营状态; 壳层 3 的部署增强了 Starlink 星座对极地地区的覆盖。

## 1.2 Starlink 的卫星宽带服务

2022 年 3 月, SpaceX 宣布 Starlink 的全球终端用户已达到 25 万<sup>[6]</sup>, 5 月增至 40 万<sup>[7]</sup>, 9 月增至 70 万<sup>[8]</sup>。与其他

通过卫星提供互联网宽带服务的运营商一样, Starlink 目前的终端用户主要是地面网络无法覆盖的用户。以美国为例, Starlink 并不是第一家提供卫星宽带网络服务的提供商, HughesNet 和 Viasat 是目前美国两大卫星互联网服务提供商。其中, HughesNet 是美国最大的宽带卫星互联网服务提供商, 拥有 158 万用户(2020 年第 3 季度数据)<sup>[6]</sup>。Viasat 公司则基于两颗 GEO 卫星 (ViaSat-1 和 ViaSat-2) 于 2012 年推出 Viasat Internet 宽带接入服务, 目前为美国的 687 000 位客户提供服务<sup>[9]</sup>。Viasat 另外还通过其 Exede 互联网技术提供成熟的机载 Wi-Fi 宽带服务。

SpaceX 是首家基于低轨 (LEO) 卫星面向终端用户提供大规模卫星宽带接入的服务提供商, HughesNet 和 Viasat 基于传统 GEO 卫星提供相关服务。将 Starlink、HughesNet 以及 Viasat 的卫星宽带接入服务数据进行比较, 在服务稳定性方面, HughesNet 的评估得分最高, 其连接速度 (带宽) 的稳定性最佳。Starlink 星座服务稳定性的负面报道较多, 其宽带互联网接入服务分别在 2021 年 8 月、2022 年 1 月以及 4 月出现大面积服务中断和断网的严重问题, 其中 2022 年 4 月网络核心连接中断持续了 30 min, 用户报告问题的持续时间长达 4 h。根据针对 Starlink 服务不间断监测的报道, 个别用户失去 Starlink 链接的事故几乎是持续不断地发生, 除了个别事故中指出例如由于暴雨等天气原因, 大部分的事故 Starlink 服务方并未给出任何解释<sup>[10-11]</sup>。

卫星互联网服务提供商比较见表 4, 由表可知, 在传

输时延上, Starlink 典型的时延 (20 ~ 40 ms) 只是 HughesNet 和 Viasat (450 ~ 700 ms) 的约二十分之一。在业务速率 (带宽) 上, Starlink 也具有明显优势。

卫星宽带服务的费用通常包括一次性的设备购买和每月的租赁或服务费用, 3 家服务提供商服务收费标准相近。Starlink 特别推出 Premium 版服务, 该服务一次性提供的终端设备能同时跟踪更多的卫星, 带宽预期在 150~500 Mbit/s, 初次购买费用为 2 500 美元, 每月服务费用为 500 美元。按照 Starlink 每月常规费用 110 美元计算, 70 万用户每月可给 SpaceX 带来约 7 700 万美元的营收。

2022 年 6 月, FCC 批准了 SpaceX 公司向船只、飞机和移动车辆提供 Starlink 服务的许可<sup>[10]</sup>。Starlink 是后来者, 更是一名超越者, 其正在改变人们对卫星宽带互联网的认识、理解及预期。

### 1.3 Starlink 的地面服务授权

虽然卫星互联网服务在技术上可以覆盖全球大部分甚至全部地区或人口, 但实际的宽带服务只能在已获得特定国家或地区的授权许可后才能提供。截至 2022 年 10 月, Starlink 已经在全球 44 个国家和地区获得地面服务授权许可。

## 2 Starlink 激光星间链路应用分析

根据空间平台搭载卫星能力的不同, 3GPP TR38.811 定义了两种典型传输架构: 一种是透明转发, 信号在卫星

表 4 卫星互联网服务提供商比较

| 对比项             | Starlink                                  | HughesNet                     | Viasat                              |
|-----------------|-------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| 卫星类型            | LEO                                       | GEO                           | GEO                                 |
| 宽带卫星互联网服务开始提供时间 | 2022 年                                    | 2012 年                        | 2012 年                              |
| 带宽              | 下行: 50 ~ 500 Mbit/s<br>上行: 10 ~ 40 Mbit/s | 下行: 25 Mbit/s<br>上行: 3 Mbit/s | 上行: 12 ~ 100 Mbit/s<br>下行: 3 Mbit/s |
| 典型时延            | 20 ~ 40 ms                                | 450 ~ 700 ms                  | 450 ~ 700 ms                        |
| 每月服务费用          | 110 ~ 500 美元                              | 65 ~ 160 美元                   | 100 ~ 300 美元                        |
| 一次性设备购买费用       | 599 美元或<br>2 500 美元 (Premium 版)           | 15 或 450 美元                   | 13 美元或 299 美元                       |
| 服务用户数/位         | 400 000<br>(2022 年 5 月)                   | 1 580 000<br>(2020 年第 3 季度)   | 687 000<br>(2015 年数据)               |
| 每月数据额度          | 不限                                        | 15 ~ 100 GB                   | 40 ~ 150 GB                         |

注: HughesNet 是 EchoStar 的全资子公司, 为美国超过 130 万用户提供高速卫星互联网服务。Viasat 为美国通信公司, 为全球用户提供高速卫星宽带服务, 业务涵盖军事和商业市场

上只进行频率转换、功率放大等过程;另一种是星上处理传输,卫星具有部分或全部基站功能。目前 Starlink 卫星星座提供服务仍然是基于透明转发的模式,这种模式下需要较多的地面信关站,用户终端与卫星之间建立了有效通信链路后,同时还需要有至少一个地面信关站与该卫星之间的有效通信链路。此外,地面站还需要连接地面互联网或移动网络,以便为终端用户提供相关内容服务。这种透明转发模式严重制约了 Starlink 业务向诸如极地等无法建设地面站的地区推广。

Starlink 星座 v1.5 的卫星均具有构建星间链路的 4 个激光通信模块,结合卫星平台的星上计算能力,采用激光星间链路(Laser Inter-Satellite Link, LISL)构建覆盖全球的卫星网络。按规划每颗卫星的 4 个 LISL 将分别连接到同一轨道面上的前后两颗卫星以及不同轨道面上的左右两颗相邻卫星,这种拓扑配置与铱星(Iridium)星座的星间链路配置(构型)相同,不同的是铱星星座星间链路基于 Ka 频段通信,带宽仅为约 10 Mbit/s<sup>[11]</sup>。

## 2.1 激光星间链路分类

Starlink 星座由位于不同规划壳层的卫星构成,不同壳层通过轨道高度、倾角、轨道面数(Orbital Planes, OPs)等加以间隔与区分。根据卫星之间不同壳层和轨道面之间的相对位置关系,卫星激光链路可分为轨道面内 LISL 和轨道面间 LISL,其中轨道面间 LISL 又分为 3 种类型<sup>[12]</sup>。

- (1) 轨道面内激光卫星间链路。
- (2) 轨道面间激光卫星间链路:
  - 相邻轨道面激光卫星间链路;
  - 邻近轨道面激光卫星间链路;
  - 交叉轨道面激光卫星间链路。

基于 Starlink 实时 TLE(Two-Line Orbital Element)数据<sup>[13]</sup>,针对 Starlink 星座倾角 53.2°壳层 4 运营状态的卫星进行仿真,仿真时间为 2022 年 6 月 13 日 4:00:00-6:00:00,仿真结果如图 4 和图 5 所示。如图 5 所示,以编号为 SL-3110 的卫星为参考,其同一轨道面前后相邻的卫星为 SL-3161 和 SL-3111,它们之间的星间链路类型为轨道面内 LISL。它们运行在同一轨道平面,以同样的高度和方向运动,其相互之间的位置和距离保持相对稳定状态,有利于 LISL 的捕获、跟踪与指向(Acquisition, Tracking and Pointing, ATP)。

编号 SL-3097、SL-3154、SL-3259、SL-3268 与 SL-3110 处于相邻轨道面上,且位置相对靠近,它们与 SL-3110 的星间链路类型为轨道面间相邻轨道面(Adjacen OP LISL,

AOPL)。编号 SL-3079 和 SL-3245 的卫星是 SL-3110 的邻近卫星,它们与 SL-3110 的星间链路类型为轨道面间邻近轨道面激光卫星间链路(Nearby OP LISL, NOPL)。同一壳层内相邻和邻近轨道面上的不同卫星轨道设计的高度相同,并以同样的速度运动,但轨道面的不同使得它们相互间的卫星运动方向不同,导致它们之间的相对速度不同,由此需要星载激光通信部件定期的捕获、跟踪与指向操作。图 5 中还示意了可与 SL-3110 建立轨道面间交叉轨道面激光卫星间链路(Crossing OP LISL, COPL)的候选卫星 SL-3203 与 SL-3310,它们与 SL-3110 的相对运动方向和速度变化较大,轨道面与 SL-3110 的轨道面夹角更大。

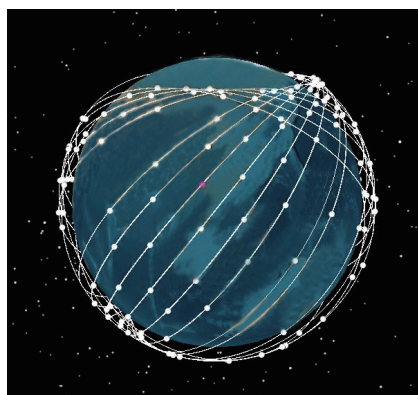


图4 Starlink 星座壳层 4 仿真

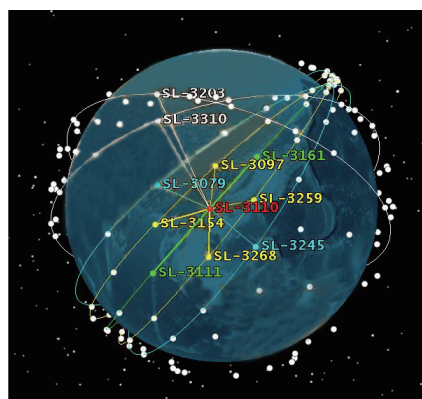


图5 Starlink 激光星间链路示意

## 2.2 永久 LISL 和临时 LISL

根据卫星间 LISL 链路保持的时间长短, LISL 也可以分为两类:永久 LISL 和临时 LISL。同一轨道平面内 LISL 是永久的,由于卫星运动速度和方向相同,相对容易建立和维护。相邻轨道面 LISL 和邻近轨道面 LISL 理论上也是永久的,但由于卫星的相对速度略有不同,需要持续的捕获、跟踪与指向,因此更难于建立和维护。

由于存在轨道面夹角,相邻轨道面(包括邻近轨道面)的卫星与卫星 SL-3110 的相对的左右位置会发生切换。如图 6 所示,在卫星由南向北运行的上升段,SL-3154 位于 SL-3110 的左后侧,SL-3268 在右后侧,经过北纬最高纬度后,二者相对 SL-3110 的位置左右换位。这种相邻(或邻近)卫星相对位置切换在卫星的每个轨道周期内发生两次,需要相应 LISL 的捕获、跟踪与指向操作,包括链路的临时关闭和切换,故这种永久 LISL 是相对的。

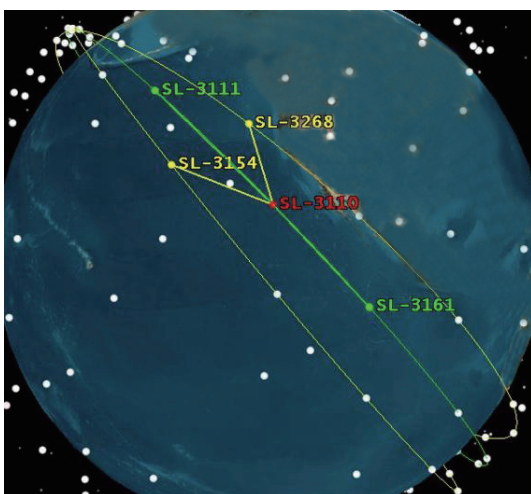
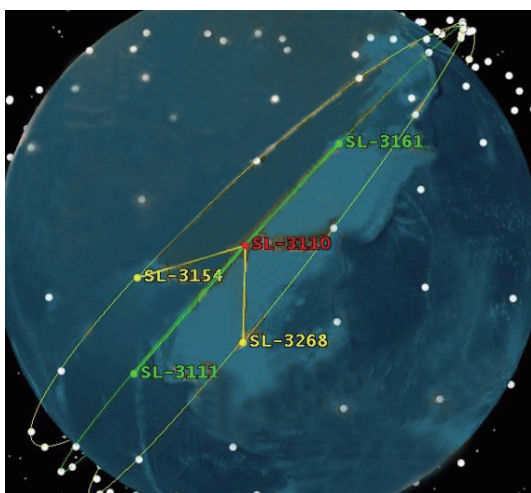


图6 相邻轨道面卫星相对位置切换示意

当在地球上空对地观察任何一个区域时,Starlink 星座内约一半卫星沿东北方向运行,而另一半沿东南方向运行。这些交叉轨道平面上的卫星以相对反方向移动,难于建立星间 LISL,这些 LISL 本质上是暂时的或间歇性的。这使得卫星网络中存在两个独立的网络:一个由沿东北方向运行的卫星组成;另一个由沿东南方向运行的卫星组成。

## 2.3 LISL 的动态性

### 2.3.1 相对位置的变化

根据上述对 Starlink 激光星间链路的分类以及对永久链路的分析,每颗 Starlink 卫星可以与同一轨道面的“前”“后”卫星以及邻近轨道面“左”“右”(或它们之间的组合)卫星建立“永久的”激光通信链路。在卫星的实际运行中,卫星之间在赤道附近的相对位置(距离)相比于南北极高纬度地区上空将出现剧烈变化。图 7 和图 8 示意了卫星间永久 LISL 的位置动态变化情况。

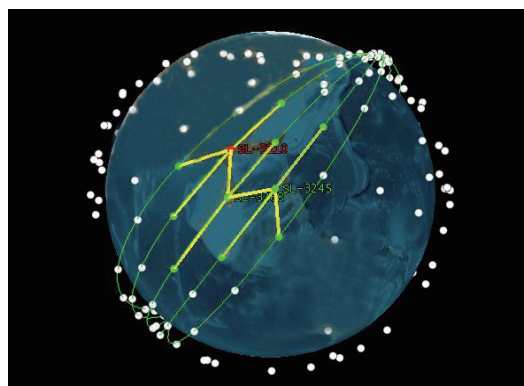


图7 星间 LISL 相对位置示意(赤道附近)

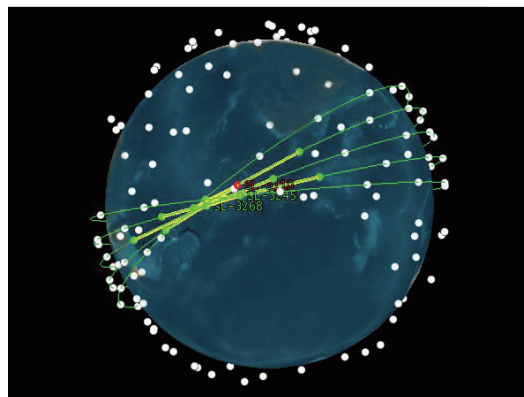


图8 星间 LISL 相对位置示意(高纬度地区)

下面基于 Starlink 实际运行数据,以最短路径树的计算实例进一步说明 LISL 的这种动态性。以倾角  $53.0^\circ$  壳层 1 的真实拓扑数据进行仿真,数据时间为 2022 年 3 月 9 日,该组数据共包括 1 488 颗在轨卫星。仿真时间为 2022-03-09 1:00:00,仿真时长为 24 h (1 440 min)。随机选取编号为 45370 (STARLINK-1281, 记为 SL-1281) 的卫星为路径计算的参考点(基准点),计算每分钟(分别记为  $t_0, t_1, \dots, t_{1440}$ )由 SL-1281 到其他卫星的最短路径树(记为  $T$ ),路径计算的权重为卫星间的空间视距。计算规则如下:每颗卫星建立 4 条 LISL,即维持 4 个邻居关系;优选同一轨

道面前后两颗以及左右相邻轨道面各一颗视距最近的卫星作为邻居,建立永久 LISL;如果在上一步中未找齐 4 个邻居,则全网搜索空间视距最近的卫星作为邻居;分别计算最短路径树  $T$  在间隔  $\Delta t$  ( $\Delta t=1 \text{ min}, 2 \text{ min}, 3 \text{ min}, \dots$ ) 下的拓扑变化  $\delta_T$ 。当 SL-1281 与某颗卫星的最短路径发生变化,则记  $\delta_T=\delta_T+1$ ,拓扑中卫星总数为 1 488 颗,  $\delta_T$  的最大值为 1 487 条。

考虑到卫星轨道运动的周期性,Starlink 卫星之间“永久 LISL”链路组成的网络拓扑反映在最短路径树上,也应该存在相应的周期性。经仿真验证这种网络拓扑的变化周期约为 48 min (为卫星绕地球一圈轨道周期 96 min 的一半),如图 9 所示。

图 9 中,纵轴为最短路径树拓扑变化值  $\delta_T$  相对于总计算路径 (本例中总计算路径=1 487 条) 的比率,即变化路径相对于总路径的百分比,横轴为拓扑变化计算的间隔  $\Delta t$ 。例如,若  $\Delta t=48$ ,则拓扑变化的计算时间间隔为 48 min。由图 9 可以直观看出最短路径树的变化周期约为 48 min,且卫星拓扑变化剧烈 ( $\Delta t$  在 4~44 min 之间均超过 50%)。本例只是以简单的空间视距 (即激光通信距离) 为度量进行了最短路径 (路由) 计算,实际的星间组网及其路由选择方案中,还需要考虑其他诸多因素,例如地面站的位置及分布、卫星激光接口部/组件的控制策略、星间链路特性等的影响。

### 2.3.2 轨道高度的影响

上面定义的星间永久 LISL 有一个隐含的假设,即卫星均按照预定设计的轨道倾角和高度稳定运行。实际情况并非如此,以倾角  $53.2^\circ$  壳层 4 的实际数据仿真,数据时

间为 2022 年 5 月 13 日,数据来源为 [starlink.sx](http://starlink.sx)<sup>[4]</sup>。其中在轨卫星 604 颗,处于运营状态的卫星 199 颗。按照预定设计,这些卫星 (特别是处于运营状态的卫星) 的轨道高度应该为 540 km (参见表 1),卫星的实际轨道分布如图 10 所示。由图 10 可以看出,实际卫星运行轨道高度分布在 540~560 km。

卫星运行轨道高度和运行周期密切相关,根据开普勒定理,由公式  $T=2\pi\sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$  可计算卫星的轨道周期  $T$ ,其中  $a$  为轨道半长轴,  $\mu$  为开普勒常数。对于轨道高度为 550 km 的近似圆形轨道,其运行周期约为 5 738.924 s;轨道高度 540 km 的运行周期约为 5 726.503 s。二者围绕地球运行一圈相差约 12.4 s,叠加二者运动速度的差异 (同样可以根据开普勒定理计算),随时间流逝卫星之间的空间相对位置会有变化。

根据 Starlink 已完成部署且拓扑相对稳定的倾角  $53.0^\circ$  壳层 1 运营中的卫星数据进行仿真验证,图 11 和图 12 示意了存在轨道高度差异的卫星之间长期运行的位置动态变化。其中,图 11 的初始拓扑 (即 2.3.1 小节示意卫星间相对位置变化的初始拓扑) 的仿真时间为 2022-05-13 4:00:00,可以看出初始拓扑卫星之间的相对位置间隔均匀。图 11 (a) 为实时仿真的三维效果;图 11 (b) 给出了卫星间拓扑连接图,并标识出了卫星编号以及卫星的轨道高度 (括号内数值,单位为 km),其中编号为 SL-3266 的卫星轨道高度最低,为 553 km,其次为 SL-3291,轨道高度为 554 km。

图 12 为图 11 的卫星拓扑运行一周后卫星之间的相

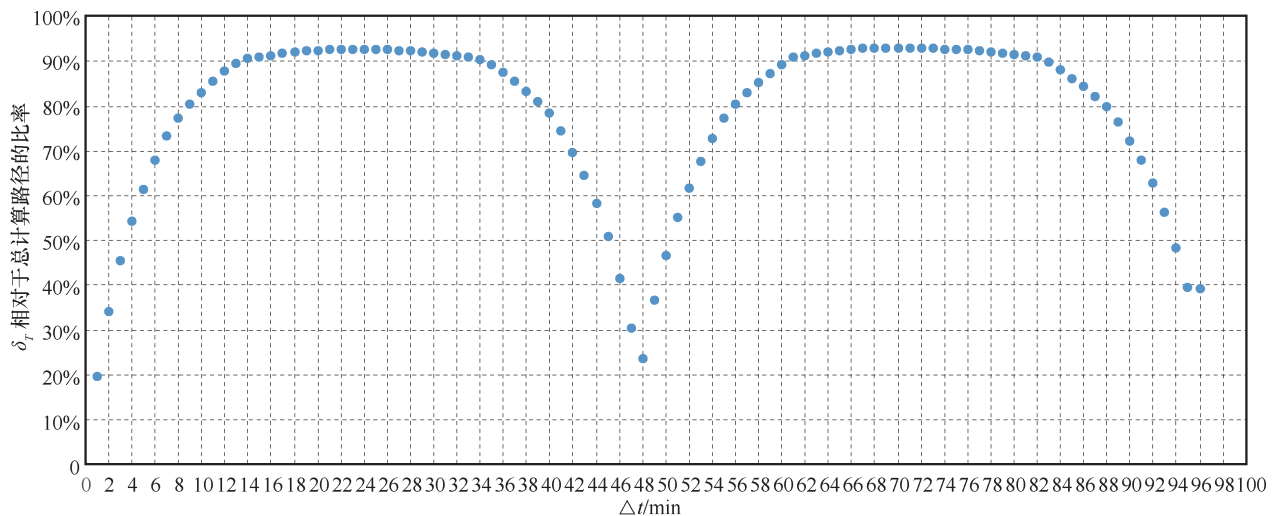


图 9 卫星空间距离最短路径树变化率示意

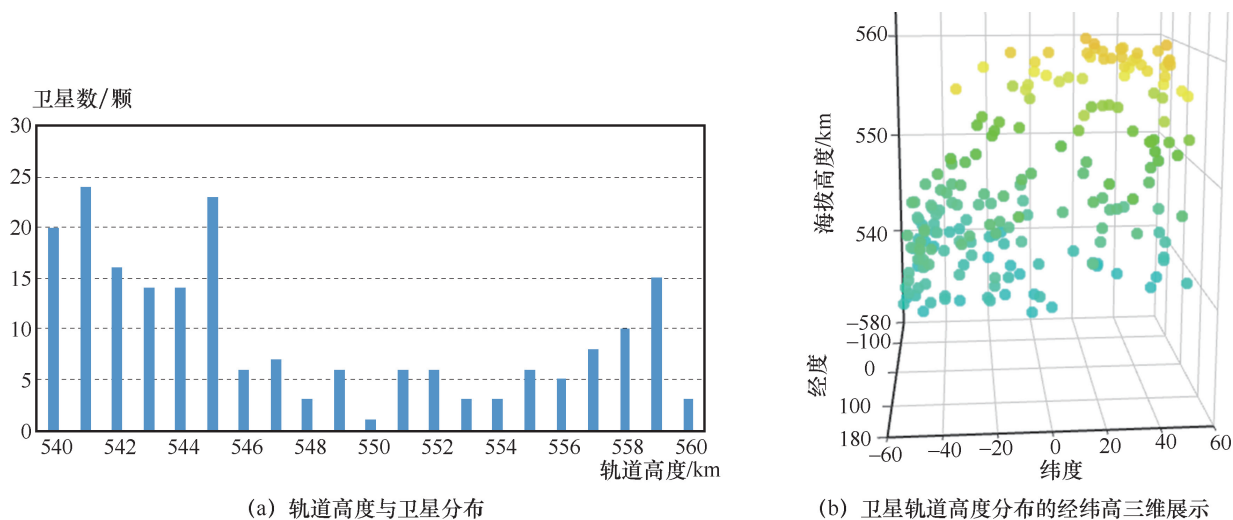


图 10 Starlink 在轨运营卫星运行高度分布示意

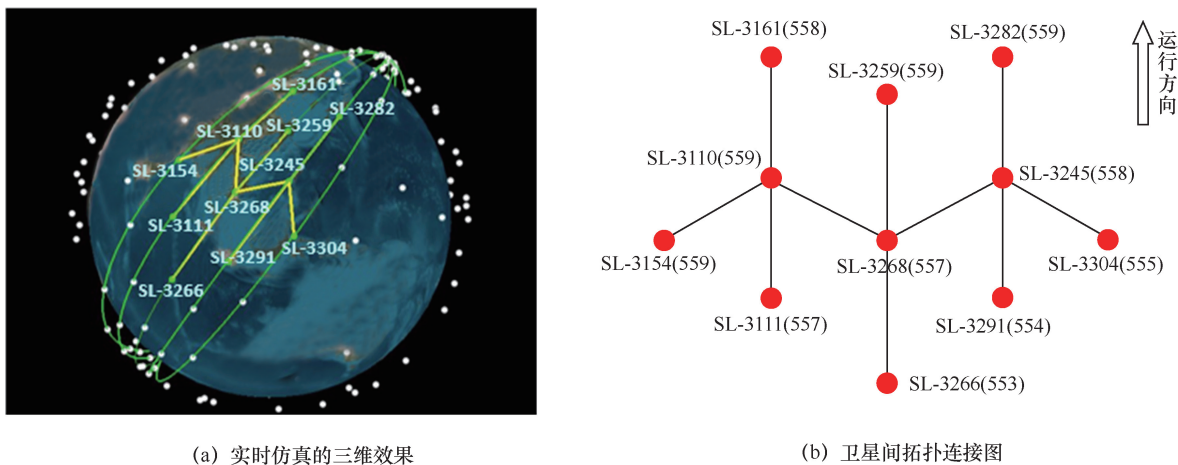


图 11 星间 LISL 相对位置示意 ( 仿真时间: 2022-05-13 4:00:00 )

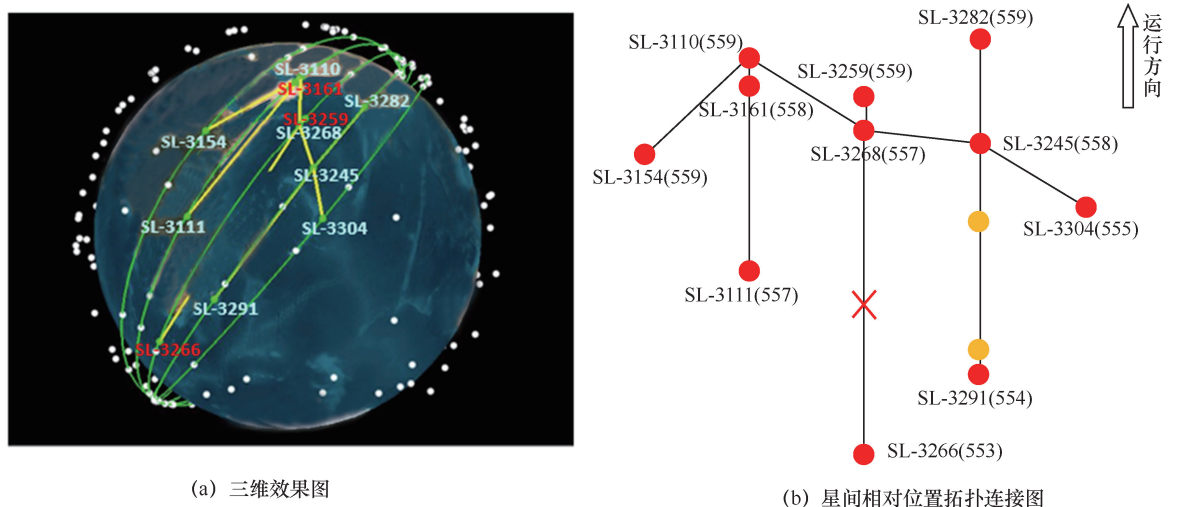


图 12 星间 LISL 相对位置示意 ( 运行一周后, 仿真时间: 2022-05-20 4:27:13 )

对位置(不考虑期间可能的卫星主动姿态调整)。无论从图12(a)的三维效果图或图12(b)的卫星间相对位置拓扑连接图,都可直观看出轨道高度差异随时间累积的卫星间相对位置动态变化,且轨道高度差异越大,相对位置的变化也越大。其中,卫星SL-3266(轨道高度最低)已运行到SL-3286空间激光通信视距之外,已无法在二者之间建立激光通信链路。卫星SL-3291与SL-3245之间相对位置变化也较明显,同一轨道面已经有两颗卫星(图中未示出卫星编号)与SL-3245的空间距离已短于(优于)SL-3291。此外,SL-3161已经由SL-3110的前方运行到其后方(沿运行方向看),而SL-3259已经接近SL-3268。

通过相对位置的变化以及轨道高度差异对LISL动态性的分析,可以认识到由“永久LISL”构成的卫星拓扑的动态性。由于低轨卫星星座所处轨道高度仍然受到轻微地球引力以及稀薄大气阻力的影响,稀薄大气对卫星运行的影响又与卫星的构型和姿态密切相关。对于由数千颗甚至上万颗卫星组成的巨型星座而言,维持卫星间拓扑(空间相对位置)的稳定性无疑是一个巨大的挑战。

### 3 Starlink 的应用优势及挑战

Starlink只是SpaceX面对太空探索的诸多项目之一,对Starlink星座的研究不可仅限于Starlink星座本身,Starlink星座的建设以及长期的运营维护是一个高度复杂的系统工程。作为商业运营的低轨宽带卫星星座,达到成本和收益的平衡是Starlink长期发展的必要条件。SpaceX目前每周能够制造约45颗Starlink卫星,每颗卫星的成本仅为数十万美元<sup>[14]</sup>。SpaceX可重复使用的猎鹰-9火箭也大大降低了Starlink星座的部署成本,这是其他竞争对手一时难以超越的应用能力和优势。Starlink另一巨大优势是可以依托SpaceX的技术创新能力。从技术应用角度而言,Starlink的发展之路仍然面临如下挑战。

(1)建造Starlink超大规模星座的成本和时间都将比预期的要长。目前SpaceX正在加紧其超级重型火箭星舰(Starship)的测试,但如此巨大规模的星座建设对拥有难以匹及的火箭技术及独立发射基础设施的SpaceX,将是一项巨大的挑战。

(2)大规模LEO星座激光星间链路组网的挑战。如以上有关Starlink星间链路的分析,对于由数千颗甚至上万颗卫星组成的星座而言,由于卫星运动的动态性,维持激光通信所需的卫星间网络拓扑的稳定性是一个巨大的挑战。

(3)运营星座需要复杂的软件并且成本很高。为保证卫星星座良好的在轨和服务状态,每颗在轨卫星都需要进行实时的监测和控制,卫星或地面中央通信处理计算机还必须跟踪可能同时使用相同频率的其他卫星系统及终端。

(4)地面网关的建设与维护。宽带业务内容的生产者和使用最终都在地面,终端用户的分布越广泛就越需要更多的地面站来提供服务。这些地面网关中的每一个都需要土地、房产、天线阵、电力设施、处理电子设备和通往互联网骨干网的线路和管道等。此外,地面网关还需要不间断地监测和维护。

(5)来自市场成熟的基于GEO的宽带服务提供商以及正在和即将建设的同类LEO宽带卫星星座的竞争。根据以上对Starlink当前宽带服务的分析,面对传统基于GEO的服务提供商,Starlink凭借其时延和带宽优势,能够获得更高的服务价格。但与Starlink同类型的其他多个同类型LEO宽带卫星星座正在加速部署及建设中,包括OneWeb星座<sup>[15]</sup>、亚马逊的ProjectKuiper<sup>[16]</sup>、加拿大Telesat Lightspeed<sup>[17]</sup>等项目,Starlink将面临带宽和时延性能类似的服务竞争压力。

### 4 结束语

Starlink星座凭借SpaceX在卫星制造、发射、通信等方面的创新和领先技术,在大规模低轨宽带通信卫星星座的建设和服务提供中走在了同类型LEO宽带星座前面。Starlink星座目前处于激光星间链路组网、传输和路由技术的验证阶段,也是其面临的最为艰巨的挑战之一。基于激光星间链路非透明转发模式的Starlink卫星网络将是SpaceX向飞机、船舶等应用场景拓展的关键,这种大规模的空间激光卫星网络同样具有潜在不可估量的应用价值。

### 参考文献:

- [1] Wikipedia. Wikipedia contributors, Starlink[EB]. 2022-11-12.
- [2] 杨文翰, 花国良, 冯岩, 等. 星链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.
- [3] Wikipedia. Wikipedia contributors, List of Starlink and Starshield launches[EB]. 2022-11-12.
- [4] MIKE P. Starlink coverage tracker[EB]. 2022-11-11.
- [5] 刘帅军, 徐帆江. Starlink 实际星座构型研判与仿真分析[EB]. 2022-10-17.  
LIU S J, XU F J. Research and simulation analysis of actual con-

stellation configuration of Starlink [EB]. 2022-10-17.

- [6] JEFF F. Starlink reaches 250,000 subscribers as it targets aviation and other markets[EB]. 2022-03-21.
- [7] MICHAEL S. SpaceX's Starlink satellite internet surpasses 400,000 subscribers globally[EB]. 2022-05-25.
- [8] CHRIS F. Starlink has 700,000 subs[EB]. 2022-09-19.
- [9] Wikipedia. Wikipedia contributors, Viasat (American company)[EB]. 2022-11-12.
- [10] SpaceNews. Starlink secures first cruise line customer with Royal Caribbean[EB]. 2022-8-30.
- [11] Iridium. Perfectly in sync, while traveling more than 30,000 kilometers per hour[EB]. 2022.
- [12] CELES T. Communications Satellites-Starlink[EB]. 2022-06-13.
- [13] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: a classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.
- [14] SpaceX. SpaceX's approach to Space sustainability and safety[EB]. 2022-02-22.
- [15] OneWeb. 2022. Space in the Future[EB]. 2022.
- [16] Amazon. Amazon makes historic launch investment to advance Project Kuiper[EB]. 2022.
- [17] Telesat Lightspeed. Affordable, quality internet everywhere[EB]. 2022.

#### [作者简介]



**王羽** (1972—), 男, 博士, 鹏城实验室高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网体系结构、网络仿真及验证技术。



**李清** (1985—), 男, 博士, 鹏城实验室副研究员, 主要研究方向为下一代互联网体系结构、卫星互联网。



**李克军** (1982—), 男, 硕士, 鹏城实验室工程师, 主要研究方向为卫星互联网体系结构、网络仿真及验证技术。



**蒋长林** (1980—), 男, 博士, 鹏城实验室高级工程师, 主要研究方向为卫星互联网体系结构、传输与路由机制。



**王野** (1983—), 男, 博士, 鹏城实验室副研究员, 主要研究方向为无线通信、计算机仿真、无线资源分配。



**江勇** (1975—), 男, 清华大学深圳国际研究生院教授, 主要研究方向为下一代互联网体系结构、卫星互联网。



**徐明伟** (1971—), 男, 清华大学教授, 主要研究方向为下一代互联网体系结构、卫星互联网。