

Network characteristics of leo satellite constellations A starlink-based measurement from end users

一、研究动机与问题定义

1、研究动机

在 6G 通信技术即将迈入实践阶段的背景下，低轨卫星网络（LSNs）被全球通信领域公认为实现“天地一体、全球无缝覆盖”的核心基础设施。与传统地球同步轨道（GEO）卫星相比，低轨卫星运行轨道高度仅为 180-2000 公里，远低于 GEO 卫星的 35780 公里，这一特性使其能显著降低信号传输延迟、提升通信吞吐量，成为突破地面网络覆盖局限的关键方案。

作为当前规模最大、用户基数最广的低轨卫星星座，SpaceX 的 Starlink 已部署超过 2000 颗卫星，获得美国联邦通信委员会（FCC）批准的卫星总数高达 12000 颗，下一代星座规模甚至有望扩展至 30000 颗，其商业部署进度与技术成熟度均处于行业领先地位。然而，尽管 Starlink 已服务全球超 40 万用户，现有研究仍存在明显短板：多数相关分析依赖理论建模或仿真工具（如 Hypatia、StarPerf 等），缺乏从终端用户视角出发的大规模、长周期、多场景实测数据支撑；零散的用户论坛讨论和短期测试无法全面揭示其在复杂环境下的网络性能波动规律；同时，Starlink 采用“即插即用”的黑盒服务模式，用户无法知晓卫星通信协议、星座调度机制等核心技术细节，其实际服务质量与地面网络的差异、环境因素的影响程度、全球覆盖的真实成效等关键问题尚未得到系统解答。

此外，低轨卫星网络的动态拓扑结构、增量部署带来的异构架构，以及太空与地面环境的复杂交互，均使其性能评估面临巨大挑战。因此，开展针对 Starlink 的系统性实测研究，不仅能填补现有研究的空白，更能为低轨卫星网络的优化设计、部署策略调整及 6G 基础设施规划提供重要的实践依据，具有重要的学术价值与产业指导意义。

2、核心研究问题

基于上述研究背景，本研究聚焦三大核心问题，旨在从终端用户视角全面解析 Starlink 的网络特性：

1. 当前 Starlink 的终端用户体验（包括吞吐量、延迟、稳定性等关键指标）能否达到现代地面宽带网络的水平？其与地面网络的核心差异体现在哪些方面？
2. 影响 Starlink 网络服务质量的关键因素有哪些？环境条件（地形、气象、太阳活动等）、硬件设备（不同代际接收碟）、网络拓扑（弯管中继策略）等因素如何作用于用户体验？
3. Starlink 是否已实现其宣称的“全球覆盖”能力？在偏远地区、极端地形等地面网络无法覆盖的场景中，其服务质量表现如何？面临哪些技术、实践及非技术层面的挑战？

二、系统设计解析

1、总体架构设计

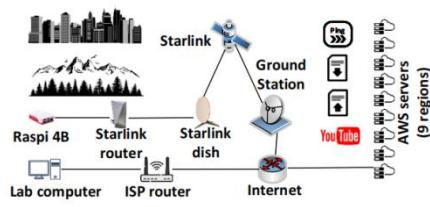


Fig. 1. Starlink measurement with diverse scenarios and tools.

本研究采用“终端-卫星-地面站-全球服务器”的端到端全链路测量架构，核心目标是实现多维度、跨场景、长周期的网络性能数据采集与分析。整体架构分为三大核心模块：

测量终端层：部署 4 套 Starlink 接收设备（3 套 Gen 1、1 套 Gen 2），分别安装于不同地理场景，作为数据采集的终端节点。每套终端搭配树莓派 4B(Raspi 4B) 作为数据处理单元，通过以太网或 WiFi 直接连接 Starlink 路由器，最大限度减少中间设备带来的信号干扰与性能损耗；同时配置 Emporia 智能插头，实时监测接收碟及配套设备的功耗数据。

目标服务器层：选取分布于全球 9 个关键地区的亚马逊云服务 (AWS) 节点作为数据通信的目标端，包括北美、东京、悉尼、新加坡、伦敦、开普敦等，覆盖跨洲、跨洋及高纬度等多样化通信场景，确保测量结果的全球代表性。

数据采集与分析层：基于 Python 开发自动化测试脚本，整合 iperf3、ping、traceroute、SCP 等多种网络测量工具，实现传输层吞吐量、网络层延迟与路由、应用层文件传输与视频流性能等多维度指标的同步采集；同时联动气象站数据、卫星轨道数据及地形信息，构建“性能-环境-拓扑”的关联分析模型。

2、关键组件设计

测量终端硬件配置

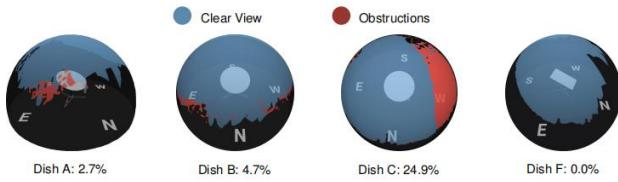


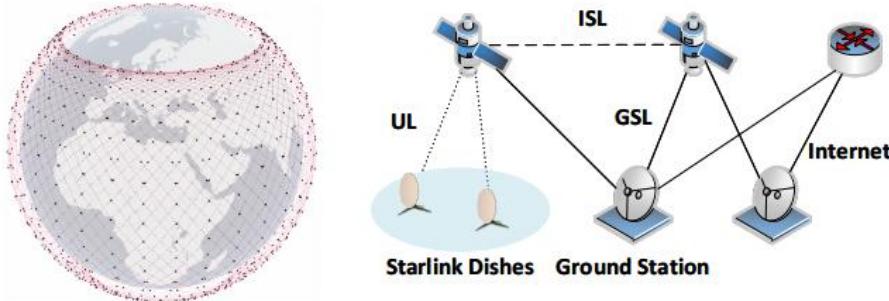
Fig. 3. Samples of Starlink visibility maps, together with obstruction ratios taken from the Starlink app logs. Dishes A and B are in Burnaby; dish F is in Koeye Point.

接收碟：采用 Starlink 的 Gen 1 与 Gen 2 两代产品，Gen 1 为圆形设计（直径 23.2 英寸，重量 7.3kg），Gen 2 为矩形设计（19×12 英寸，重量 4.2kg），后者在便携性与路由器带宽流（3x3 MU-MIMO）

上更具优势。通过对比两代设备的性能表现，分析硬件迭代对用户体验的影响。

辅助设备：树莓派 4B 负责执行自动化脚本、存储采集数据，其低功耗特性可避免对测量结果产生额外干扰；Emporia 智能插头采样频率为每小时一次，记录设备在不同工作状态（正常通信、雪花融化模式等）下的功耗变化；Starlink 移动 App 用于获取接收碟的天空可见性地图与遮挡率数据。

网络拓扑适配设计



(a) Starlink's first shell generated by Hypatia [2]. (b) Starlink's network structure.

Fig. 2. (a) The constellation of the Starlink's first shell; (b) The Starlink's network structure with ISLs, GSLs, and ULs.

基于 Starlink 当前采用的“弯管中继”(bent-pipe) 架构进行测量方案设计，即低轨卫星仅作为信号中继节点，不参与数据路由决策，需将地面终端的通信流量转发至地理上最近的地面站 (GS)，再由地面站接入全球互联网。研究通过

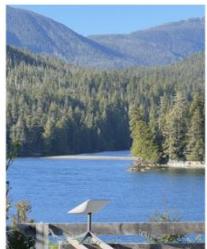
traceroute 工具验证这一架构的实际运行机制，重点分析其在跨洋通信等场景中的局限性。

环境数据联动设计

整合温哥华港气象站的每小时气象数据（包括降水量、温度、云层厚度等），同步记录测量期间的太阳风暴、地磁活动等空间天气事件；结合测量地点的地形数据（如城市开阔区、高山峡谷、高纬度海岸等），构建环境因素数据库，为分析天气、地形对网络性能的影响提供数据支撑。

三、关键技术创新

1、多场景、长周期的立体化实测方案



(a) Dish F (Gen 2) setup at Koeye point (Estuary of Koeye River).



(b) Google satellite map.



(a) The surrounding terrain map.



(b) High elevation mountains.

Fig. 13. (a) Dish F (Gen 2) setup at Koeye point (Estuary of Koeye River). (b) Google satellite map. Fig. 14. The terrain of the valley in Manning Park. (a) Terrain map; (b) surrounding mountains.

突破现有研究场景单一、周期较短的局限，首次实现长达 7 个月（2022 年 1 月至 7 月）的持续测量，覆盖城市开阔区、高纬度北岸河口、高山峡谷、温带雨林等多种异质地形。每个测量区域采集数据量超 300 万条，涵盖静态与动态、城市与偏远、平坦与复杂地形等多样化场景，全面捕捉 Starlink 在不同环境下的性能表现。

2、全栈多维度指标同步采集技术

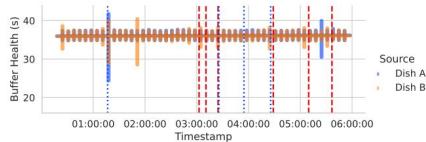


Fig. 16. Buffer health over time for 2-dish synchronous streaming. Each bar outlines the standard deviation for 7-min samples. Outages are highlighted by vertical dotted lines.

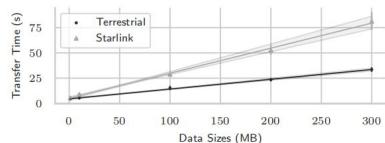


Fig. 9. Transfer time as a function of SCP data size (translucent area outlines regression estimates).

构建“物理层-网络层-传输层-应用层”的全栈指标采集体系，实现多维度数据的同步获取与关联分析：物理层涵盖接收碟遮挡率、设备功耗、环境温度与降水量；网络层包括端到端延迟、抖动、路由路径、网络中断频率；传输层包含 TCP/UDP 吞吐量、数据包丢失率、带宽利用率；应用层则关注 8K 视频流缓冲健康度、不同大小文件的 SCP 传输时间、Web 浏览延迟。同时整合 Starlink 官方 App 数据与 YouTube “技术宅统计”（Stats for nerds）工具数据，实现第三方工具与官方数据的交叉验证，提升测量结果的可信度。

3、多维度对比与控制变量设计

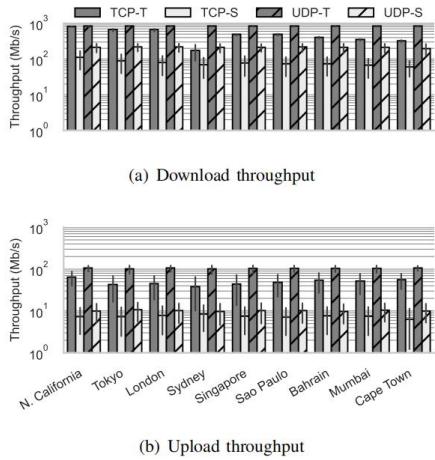


Fig. 8. Throughput measurements across different regions for the terrestrial (TCP-T/UDP-T) and Starlink (TCP-S/UDP-S) network, respectively. Vertical lines correspond to standard deviations of data samples.

采用“基准对比+变量控制”的实验设计思路，确保研究结论的科学性与准确性：与地面网络对比方面，以最大下载速度 800Mb/s 的地面有线电视网络作为基准，系统比较 Starlink 与地面网络在延迟、吞吐量、稳定性等指标上的差异；设备代际对比通过 Gen 1 与 Gen 2 接收碟的并行测试，分析硬件迭代对 TCP/UDP 性能的影响；场景对比关注同一设备在城市、偏远地区、移动场景下的性能差异，分离地形、卫星覆盖密度等因素的影响；环境对比则控制其他变量不变，重点分析降水、温度、太阳风暴等单一环境因素对网络性能的作用机制。

4、跨学科数据融合与非技术因素考量

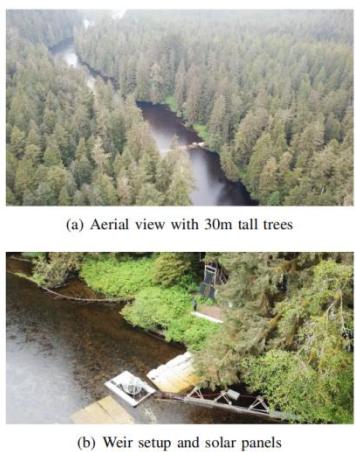


Fig. 20. An aerial view of the weir site upstream of the Koeye River in the Great Bear rainforest.

首次将网络技术测量与环境科学、人类学、生态学等学科数据相融合，突破传统网络性能研究的技术边界：技术与环境融合方面，建立降水量、温度与网络吞吐量、功耗的量化关联模型，量化天气因素的影响程度；技术与文化融合方面，在高纬度偏远地区实测中，纳入原住民（Heiltsuk 族）的文化传统、对“电磁污染”的担忧等非技术因素，分析全球覆盖面临的文化挑战。

四、实验设计与验证

1、实验场景设计

城市场景实验：理想环境下的性能上限验证

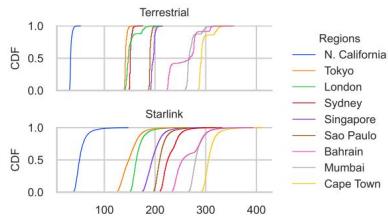


Fig. 4. Cumulative distribution of latency (ms) globally.

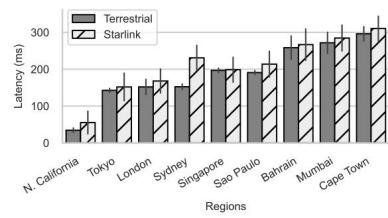


Fig. 5. Average latency in different regions. Vertical lines correspond to standard deviations of data samples.

实验地点：加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华都会区（伯纳比、高贵林），选取开阔居民区作为部署点，接收碟遮挡率仅为 2.7%-4.7%，无明显地形遮挡，代表 Starlink 的理想工作环境。实验目标：验证 Starlink 在卫星覆盖密集、环境干扰小的场景下的性能上限，与地面网络进行全面对比。核心测量指标：端到端延迟（覆盖全球 9 个 AWS 节点）、TCP/UDP 吞吐量、SCP 文件传输时间、视频流缓冲稳定性。

偏远地区实验：极端环境下的服务质量测试

选取两个典型偏远场景，验证 Starlink 在地面网络空白区域的服务能力：高纬度北岸河口场景（Koeye Point）位于北极圈以南 14°，属于 Starlink 服务覆盖边界，无地面网络、蜂窝网络及电力网格覆盖。部署 Gen 2 接收碟（便携性更强），测量结果显示下载吞吐量比城市场景低 68%，延迟长 11%-30%，且存在频繁中断，主要原因是该区域卫星与地面站覆盖密度较低，卫星切换时的链路建立耗时较长。高山峡谷场景（Manning Park）海拔 1000 米，周边山脉海拔超 2000 米，地形陡峭，无蜂窝网络覆盖。实验时该区域尚未被 Starlink 正式纳入服务范围，但可连接到卫星，实测延迟波动范围 90-350ms（最大波动超 1000ms），下载吞吐量平均仅 13Mb/s，每 1-3 分钟出现一次网络中断，即使 App 显示遮挡率仅 2%，复杂地形仍严重影响卫星信号传输。

专项验证实验：关键特性深度测试



Fig. 15. Starlink coverage map around Manning Park.

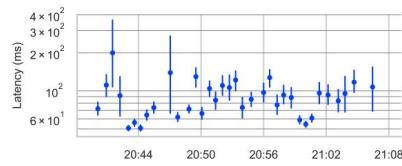


Fig. 18. Latency to N. California while in motion (vertical lines correspond to 95% confidence intervals).

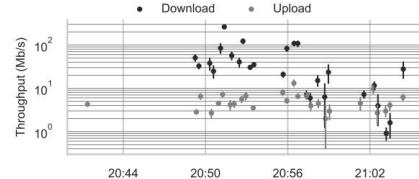


Fig. 19. Throughput to N. California while in motion (vertical lines correspond to 95% confidence intervals).

弯管架构稳定性测试：部署两套接收碟（A、B）在同一卫星覆盖范围内，同步播放 24 小时 8K YouTube 视频，监测缓冲中断情况。结果显示 37.5%（碟 A）和 15.79%（碟 B）的中断由弯管架构共同因素导致，验证了该架构的稳定性短板。
移动性测试：将 Gen 1 接收碟固定于面包车车顶，开启便携模式，以 40-70km/h

行驶 30 分钟，测试动态场景下的连接性能。实测平均延迟 100ms（最高 2800ms），每 16.5 秒出现一次中位数中断（持续 5 秒），下载吞吐量虽与静态场景相当（80–100Mb/s），但稳定性极差，难以满足移动场景需求。环境影响专项实验：通过控制变量法，单独分析降水、温度、太阳风暴的影响。结果显示，降水导致吞吐量平均下降 27%（大雨时下降超 50%），温度高于 12°C 时吞吐量下降 5%–26%，2022 年 2 月太阳风暴期间吞吐量从 100Mb/s 骤降至 5Mb/s。

数据验证方法



Fig. 17. A Gen-1 dish secured on the roof of a minivan.

定量对比分析采用累积分布函数（CDF）、均值、标准差等统计指标，量化 Starlink 与地面网络的性能差异。例如，通过 CDF 曲线对比，直观展示 Starlink 延迟分布的离散程度；

通过标准差计算，得出 Starlink 吞

吐量稳定性（50.71%）显著低于地面网络（34.44%）的结论。相关性验证利用皮尔逊相关系数分析不同地区延迟变化的关联性，验证“单跳弯管”路由策略的一致性。异常值分析针对悉尼地区延迟显著偏高（是地面网络的 3.4–43.6 倍）等异常数据，结合路由追踪结果，发现跨洋通信时 Starlink 需切换至地面网络通过海底光缆传输，揭示了弯管架构在跨洋场景中的局限性。交叉验证结合 Starlink App 的遮挡率数据、气象站的降水记录、YouTube 视频缓冲统计等多源数据，对同一性能波动现象进行交叉验证。例如，某时段吞吐量下降同时被 iperf3 数据、SCP 传输时间数据及视频缓冲中断数据记录，且与气象站的强降水记录时间吻合，确认降水是该次性能下降的主要原因。

五、局限与未来方向

1、研究局限

测量范围与场景局限性表现为偏远地区实验仅覆盖北美高纬度区域，未涉及南极、远洋、热带雨林等更极端场景；移动性测试仅持续 30 分钟，未涵盖长时间高速移动、复杂路况等实际应用场景，结论的普适性有待进一步验证。技术参数可访问性限制方面，Starlink 采用黑盒服务模式，无法获取卫星调度算法、带宽分配策略、信号调制方式等核心技术参数，难以深入分析性能波动的底层技术原因；同时无法单独测量接收碟、路由器等模块的独立功耗，只能获取整体功耗数据。非技术因素研究深度不足，文化挑战、生态影响等非技术因素的分析主要基于案例观察，缺乏大规模调研数据支撑，难以量化其对全球覆盖部署的实际影响程度。实验变量控制的复杂性体现在实际场景中，地形、气象、卫星覆盖密度等因素往往同时作用，尽管采用控制变量法，但仍难以完全排除交叉干扰，部分结论的因果关系需进一步验证。

2、未来研究方向

技术优化与新功能验证方面，需持续监测 Starlink 星间链路（ISL）、多跳弯管等新功能的部署效果，分析星间链路对跨洋通信延迟、稳定性的改善作用；扩展移动性测试场景，涵盖长时间高速行驶、航空、航海等场景，验证 Starlink 在交通工具上的适配能力；结合 ITU-R P.837-6 降水模型与云衰减模型，建立更精准的天气影响预测模型，为抗干扰技术优化提供支撑。场景与指标扩展方向，应将实测场景扩展至南极、热带雨林、远洋等未覆盖区域，完善全球不同环境下的性能数据库；增加应用层指标覆盖，包括在线游戏延迟、视频会议流畅度等实时交互类应用的性能评估，贴合用户实际使用需求。跨学科研究深化方面，需联

合人类学、环境科学团队，开展大规模跨区域调研，量化文化因素、生态保护对卫星部署的约束条件；探索低轨卫星网络与 5G/6G 地面网络的无缝融合方案，分析异构网络协同调度的性能增益与技术挑战。实验方法优化方向，应改进测量设备部署方式，将接收碟固定于屋顶以减少遮挡率波动，提高实验的可重复性；开发更精细的功耗测量方案，通过硬件改装等方式获取各模块独立功耗数据，深入分析功耗与性能的关联机制。

六、总结与启示

1、核心研究结论

性能特性方面，Starlink 平均下载吞吐量约 80Mb/s，基本满足宽带用户需求，但延迟（平均比地面网络高 10%）和吞吐量的波动性显著高于地面网络（延迟波动为地面网络的 3.8 倍），且存在频繁网络中断，难以满足对稳定性要求高的应用场景。环境敏感性方面，地形遮挡、降水、温度、太阳风暴等环境因素对性能影响显著。其中，降水导致吞吐量最大下降 50%，高温导致吞吐量下降 26%，太阳风暴可引发吞吐量骤降 95%，且设备功耗与环境密切相关（雨天、雪天功耗显著上升）。架构局限方面，当前“单跳弯管”架构仅能通过最近地面站接入网络，跨洋通信需依赖地面网络，导致部分地区延迟显著偏高；同时，弯管架构的稳定性不足，是网络中断的重要原因之一（占比 15.79%-37.5%）。

全球覆盖方面，Starlink 尚未实现真正的全球覆盖，高纬度、复杂地形等区域服务质量差，卫星与地面站覆盖密度不足是主要技术瓶颈；此外，原住民文化冲突、偏远地区供电困难、电磁污染担忧等非技术因素，也成为全球覆盖的重要障碍。移动性与设备迭代方面，Gen 2 设备在 TCP 上传性能上比 Gen 1 提升 76%，便携性优势明显，但移动场景下延迟波动大、中断频繁，启动时间长（3-20 分钟），暂无法满足实际移动应用需求。