

DOI:10.16356/j.1005-2615.2021.S.009

低轨卫星互联网技术架构及地面验证方法

王 崇, 郝珊珊, 康国栋, 徐 良, 周洪刚

(航天科工集团第二研究院航天科工空间工程发展有限公司, 北京 100854)

摘要: 为了满足全时段全地域高速数据速率需求以及应对各国对空间资源日益激烈的竞争, 被列入新基建范畴的低轨(Low earth orbit, LEO)卫星互联网已成为最具前景的解决方案之一。基于“通导遥一体化设计”理念, 本文提出一种以“星间组网+星上处理+跳波束”为主要特征的系统技术架构。该架构对星间激光通信、高速星上路由处理、宽带跳波束等各项关键技术进行分析, 并给出一种针对包含首颗发射卫星的低轨卫星互联网的地面试验验证方法。本文提出的卫星网络体系结构、关键技术解决方案和在轨验证结果, 对我国卫星互联网的建设和发展具有有益的探索和借鉴意义。

关键词: 低轨卫星互联网; 通导遥一体化; 跳波束; 地面验证; 卫星网络体系架构

中图分类号: V474 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2021)S-0057-05

System Architecture and Ground Verification for LEO Satellite Internet

WANG Chong, HAO Shanshan, KANG Guodong, XU Liang, ZHOU Honggang

(The Second Academy of China Aerospace Science and Industry Corporation, CASIC Space Engineering Development Co., Ltd., Beijing 100854, China)

Abstract: In order to meet the requirements of high-speed data rates at any time in any region, and cope with the increasing competition for space resources among countries, the low earth orbit (LEO) satellite Internet, which is included in new infrastructure construction category, has become one of the most promising solutions. In this paper, based on the design concept of integrating three satellite application functions together, that is, satellite communication, satellite navigation enhancement and satellite remote-sensing, we put forward a system architecture that takes “inter-satellite networking + high speed processing on board + beam hopping” as its main technical characteristics. Through the analysis of key technologies such as inter-satellite laser communication, high-speed satellite routing processing on board, and broadband beam-hopping, the proposed architecture provides a ground verification method for this LEO satellite system containing the first launched satellite. The satellite network architecture, critical technical solutions and in-orbit verification results proposed in this paper can serve as a useful exploration and reference for the construction and development of satellite Internet in China.

Key words: low earth orbit (LEO) satellite Internet; integration of satellite communication, satellite navigation and satellite remote-sensing; beam hopping; ground verification; satellite network architecture

当前, 国际上正围绕低轨(Low earth orbit, LEO)卫星互联网^[1-3]系统建设开展新一轮太空竞赛, 以 Starlink^[4-5]为代表的新兴低轨互联网星座系

统正在迅速部署。卫星互联网已纳入中国“新基建”范畴, 将成为践行“一带一路”倡议和构建全球人类命运共同体的重要性信息保障基础设施, 是网

收稿日期: 2021-05-10; **修订日期:** 2021-06-25

通信作者: 王崇, 男, 博士, E-mail: wendywendy618@126.com。

引用格式: 王崇, 郝珊珊, 康国栋, 等. 低轨卫星互联网技术架构及地面验证方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(S): 57-61. WANG Chong, HAO Shanshan, KANG Guodong, et al. System architecture and ground verification for LEO satellite internet[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(S): 57-61.

络强国和航天强国建设的重要内容。

针对低轨宽带卫星互联网系统特点,中国航天二院提出了以“星间组网+星上处理+跳波束”为技术特征的低轨卫星互联网系统技术架构和“通导遥一体化”设计理念,旨在为用户提供宽带通信为基础、通导遥相结合的天基综合信息服务。中国航天二院于2018年底发射了国内首颗低轨宽带通信技术验证卫星,并完整构建了包括卫星、信关站、用户站、综合运控中心在内的卫星互联网技术验证系统,在真实的空间环境及天地信道条件下,成功开展了低轨宽带通信技术验证。

本文首先提出了低轨卫星互联网系统技术架构,然后分析了该架构下的各项关键技术,最后介绍了低轨卫星互联网地面试验验证方法。

1 低轨卫星互联网技术架构

1.1 架构与组成

本文提出的低轨卫星互联网系统的技术架构以“星上处理+星间激光通信+跳波束”为技术特征,并携带低轨导航增强终端,实现融合通导遥一体化(图1)。系统由空间段、地面段、用户段3部分组成。空间段由数百颗乃至更多数量的小卫星构成低轨卫星星座,通过激光星间链路实现天基互联;地面段由信关站和综合运控中心组成;用户段包括固定式、机动式和便携式用户站,以及各类导航增强终端。

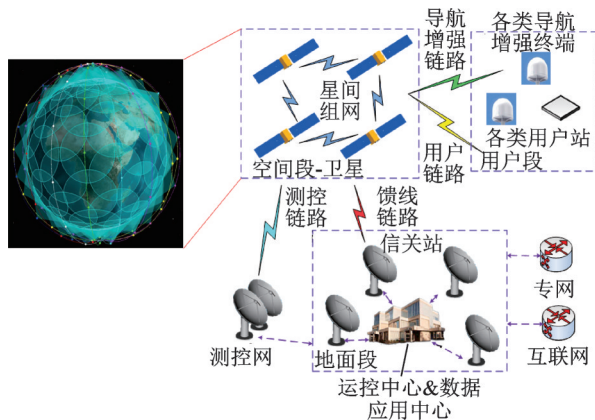


图1 低轨卫星互联网系统组成

Fig.1 Constitution of LEO satellite network system

1.2 组网方式

1.2.1 组网方式分析

目前,低轨星座组网主要存在2种方式:一种是以OneWeb^[6]为代表的无星间链路的低轨卫星网络;另一种是以Iridium为代表的基于星间链路的低轨卫星网络,Starlink^[4-5]也宣称将采用激光星间组网方式。

(1) 无星间链路的组网方式

无星间链路的组网方式本质上是“天星+地网”模式,卫星星座是一个有卫星全球覆盖能力的局部通信系统,卫星业务能否全球开展取决于能否在全球范围内部署信关站。

(2) 基于星间链路的组网方式

基于星间链路的组网方式本质上是“天网+地网”模式,是一个有全球覆盖能力的卫星通信系统,卫星业务^[7]的全球开展从技术上看依赖于全球布站,仅需部署少量信关站即可开展业务。

就全球范围内互联网接入而言,无星间链路的低轨星座难于支持无信关站覆盖的深海远洋等区域,难于真正实现一个全球性的低轨天基互联网系统;有星间链路的低轨星座可以从技术上摆脱海外建站的制约,提供真正的全球互联网接入服务。

1.2.2 星间链路实现形式分析

目前星间组网链路主要有两种实现方式:微波星间链和激光星间链。

激光通信^[8]与微波通信相比,具有传输速率快、通信容量大、抗电磁干扰性能强、保密性高等优点,且其通信终端体积小、功耗低,在空间应用领域具有良好应用前景,但技术成熟度相对较低。激光通信技术的发展和突破可解决现有微波手段空间传输瓶颈问题,对增强星间信息传输的速率、容量、安全性意义重大。

1.3 业务通信体制

当下,通信卫星已逐渐步入高通量时代^[9-10],低轨互联网星座也向大容量、高速率发展。Starlink星座、OneWeb星座的设计均采用Ku/Ka频段,通信速率高达1 Gbit/s,单星容量高达20 Gbit/s。

通常低轨星座系统中的单星覆盖范围较大(需要覆盖的角度范围通常可达几十度至上百度),若采用传统的固定多波束方式覆盖如此大的范围^[7],会造成巨大的星上资源负担,且地面终端的天线尺寸也因此不会太小、星地通信速率也不会太高。另外,传统固定多波束卫星将带宽和功率均匀分配给各个点波束,但由于地面业务的分布和需求是非均匀的,导致卫星系统的频率和能量资源利用率不高,实际通信容量大打折扣。基于有源相控阵技术的跳波束通信可有效解决上述矛盾,既支持高增益又可在较大范围内实现波束的灵活指向;既可通过少数跳波束实现能量汇聚和单波束带宽提升,又可通过波束按需在有用户的区域进行跳转来实现对多用户的服务。基于跳波束技术的卫星通信系统具有更好的灵活性以及更高的资源利用效率,能够很好地适应地面用户的不均匀分布和通信业务的动态变化(图2)。

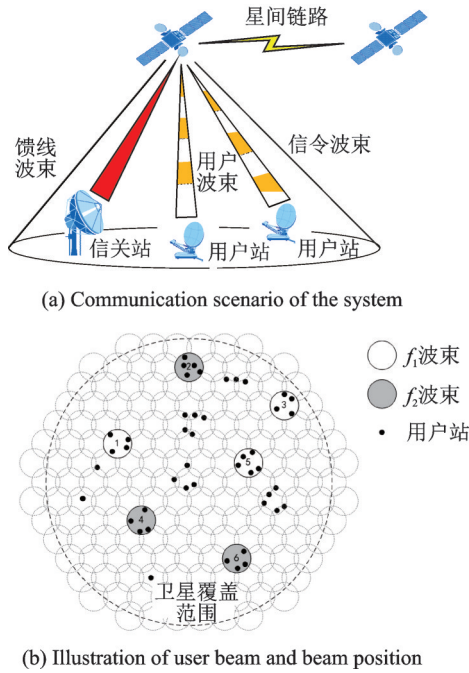


图2 跳波束体制示意图

Fig.2 Illustration of beam hopping mechanism.

目前尽管没有明确的调研材料表明 Starlink 采用了跳波束技术^[11-12],但针对其卫星形态进行分析,其有较大概率采用跳波束技术体制实现高速灵活的用户服务(图3)。另外,有资料表明,亚马逊公司提出的 Kuiper 星座计划,其卫星“使用先进的多用户波束相控阵天线”“以预编程的方式实现波束与合适虚拟点波束的映射”“支持多点波束同频的工作方式,可为服务区域内不同

位置的用户提供服务”。可见,“智能天线+跳波束”已成为低轨卫星互联网系统新的重要技术发展方向。

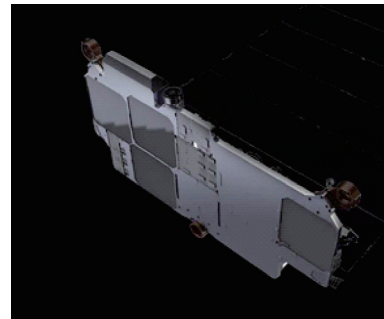


图3 Starlink 卫星示意图

Fig.3 Illustration of Starlink satellite

1.4 路由架构

低轨卫星互联网系统若采用了星上再生交换^[11]的方式,其应用会更加灵活,因此需要在网络技术方面满足多种应用需求,提升用户的业务体验。

针对业务的多样性需求和实时交换要求,可以采用 TCP-IP 协议,提供 QoS 保障机制,兼容 IPv4 和 IPv6,保证星地一体化通信。针对低轨卫星的运动性,卫星网络除了处理卫星间拓扑关系的变化,也需要维护入网用户的路由寻址^[13],解决移动性和切换问题。星上路由应支持地面上注路由表和自动生成路由表两种模式,以具有更大的灵活性。星载路由器架构设计如图4所示。

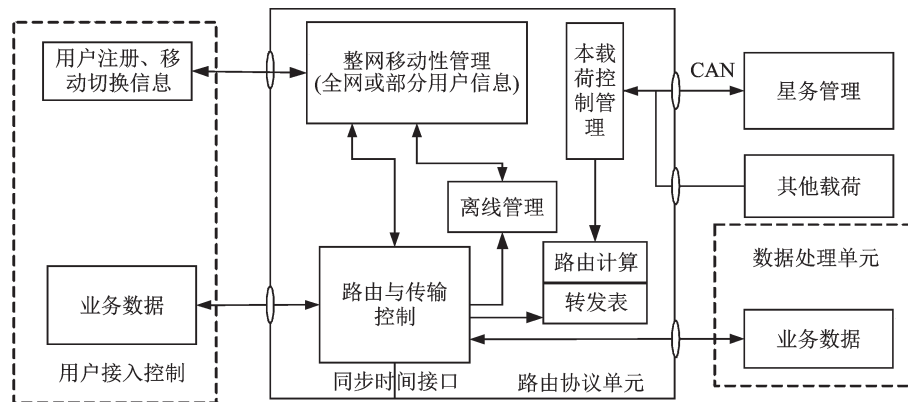


图4 星载路由器系统架构

Fig.4 Structure of satellite router system

2 关键技术分析

建设基于以上技术架构的通导遥一体的低轨卫星互联网,需要突破的技术主要包括:低成本/高可靠的低轨星间激光通信技术;基于跳波束的时空资源联合控制技术;基于低轨星座的导航增强技术;低成本批量化小卫星制造技术等。

2.1 低成本、高可靠低轨星间激光通信技术

低轨互联网星座的构建必将面临海量信息的接入和传输问题,卫星与卫星、卫星与地面高速数据传输的能力,成为制约低轨互联网星座发展的一个瓶颈。激光通信技术^[8]因其可实现极高的数据传输速率的显著特点,已成为卫星高速通信的首选

途径。目前卫星激光通信实际工程应用较少,大多仍处于通信试验验证阶段。试验验证的星载激光通信终端大多又是面向地球同步轨道(Geostationary earth orbit, GEO)-LEO、GEO-地面、LEO-地面等应用场景,试验时工作时间不长,对寿命和重量的要求也不十分严苛。相比之下,LEO-LEO低轨组网的激光终端则需要长时间在轨稳定工作,对具有小型化、低功耗、高可靠、长寿命特点且满足实用化、工程化要求的LEO-LEO低轨组网激光终端提出了迫切的需求。

当前星间激光通信终端成本过高。国内光电器件及组件的设计、工艺和生产水平较国际先进水平有一定差距,尤其是航天级的光电器件尚未形成产业化和规模化。而国外的高端光电类器件,如高灵敏度光学通信接收探测器、光调制器等基本处于技术封锁状态。

为了解决低成本与高质量、高可靠之间的矛盾,需要从总体设计上开展激光通信终端低成本与高质量、高可靠兼容性关键技术攻关。技术途径包括:合理选择通信体制,降低光放大、转台等调试难度与研制成本;开展整机减重设计、和卫星平台一体化设计;通过数值仿真和设计迭代优化通信链路设计,合理保留冗余;在工业级元器件在轨应用的考核、筛选和试验方法、选用使用流程等方面开展关键技术攻关。

2.2 基于跳波束的时空资源联合控制技术

低轨互联网星座如想用较少卫星数量实现Ka波段用户链路波束的全球覆盖,采用传统固定多波束覆盖方式的链路预算很难满足宽带通信需求,因此,采用跳波束技术^[11-12]是实现高通信带宽的有效途径,但同时也对时空资源如何实现有效的调度与控制提出了挑战。时空资源包括时隙资源和波束资源,星上分配用户可用波束/频点、时隙后,分别通知波束控制模块和基带处理模块,波束控制模块使波束在指定时间指向指定用户所在的空间,基带处理模块在指定时间收发指定用户的数据,最终实现某时刻波束指向某用户并与其数据交互的目标。

2.3 基于低轨星座的导航增强技术

利用低轨星座实现对全球导航卫星系统(Global navigation satellite system, GNSS)^[14]的增强包括以下3种途径:播发导航增强信息的信息级增强、发播更大功率和带宽导航信号的信号级增强和充当天基连续运行(卫星定位服务)参考站(Continuously operating reference stations, CORS)。需要突破的具体技术包括:(1)基于LEO星座的导航/导航增强新体制;(2)BDS/GPS增强信息的获取、处理与播发技术;(3)导航信号设计及有效载荷实现技术;

(4)新体制接收机信号处理技术及定位算法。

2.4 低成本批量化小卫星制造技术

快速低成本的卫星制造是建立卫星互联网产业链并使之得以良性发展的重要一环。需要打造基于数字孪生模型的小卫星数字化协同设计和云制造模式,强化资源的共享和协同,实现产业链上下游企业数字化集成;需要在元器件选用、单机生产试验、产品保障方面理清故障失效机理,针对性制定措施;全星座系统应在短时间内完成批产部署才能更好发挥星座效益,时间成本也是重要的控制量。可以借鉴导弹小批量生产经验,改革管理方法,创新研制、管理流程,降低时间成本。

3 地面验证方法

有别于GEO,LEO相对地面以较大的时空尺度运动,为星地信号传输带来了时延、多普勒频移及电平的动态变化,通信系统设计时需要充分考虑这些信道因素。低轨卫星互联网规模大,建设周期往往较长,在先期系统建设、未批产定型情况下,非常有必要在地面对通信系统进行充分验证,保证卫星在轨通信正常,特别对于星上处理体制的通信系统,更应该在地面构建逼近真实卫星在轨星地信道环境,解决LEO复杂星地信道环境下通信系统地面测试的难题。

地面试验验证包括内场和外场两阶段,内场主要在实验室环境下对系统功能性能进行验证,外场主要在外场空馈环境下对系统功能性能进行验证,是内场测试的补充和延伸。验证系统包括被测设备和测试设备,被测设备由通信载荷、信关站、用户站、综合运控中心组成,测试设备为信道模拟器、导航信号模拟器、平台接口模拟器等专用测试设备,以及信号源、频谱仪、示波器等通用测试仪器(图5)。

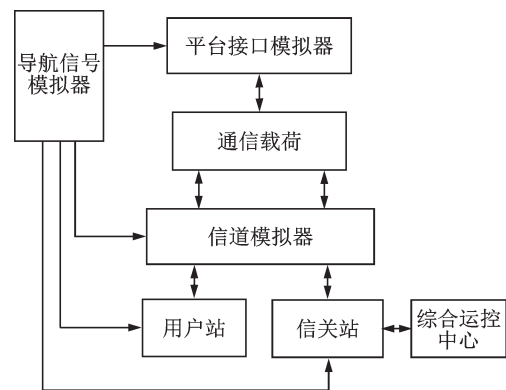


图5 地面验证环境

Fig.5 Ground verification environment

(1) 星地信道环境模拟

采用信道模拟器可以近乎真实的模拟星地上

下行链路动态多普勒、时延、衰减等信道特性,将信道模拟器接入信关站和通信载荷之间以及用户站和通信载荷之间,使构建的测试环境更接近实际星地通信环境。

(2) 系统同步

低轨卫星互联网通信载荷、信关站、用户站统一采用GPS/BDS时间信息,保证系统时间同步。地面验证阶段,采用导航信号模拟器通过有线或无线的方式提供模拟导航信号,从而保证整个通信系统时间统一。

(3) 卫星平台接口模拟

在整星环境下,卫星平台需要给通信载荷提供机械、供电、信息接口。通信系统地面验证阶段卫星仅有通信载荷参与,需要配套相应的平台接口模拟器以及供电系统,模拟器卫星平台与通信载荷通信及控制接口,保证试验阶段通信载荷安全、正常工作。

4 结 论

随着宽带互联网、广域物联网、人工智能等新兴领域的发展,对卫星互联网应用提出了更高的要求,大容量、多波束、低时延、低损耗、低成本成为卫星互联网技术发展的方向。本文围绕新时期卫星互联网建设与应用需求,提出以“星间组网+星上处理+跳波束”为主要技术特征的低轨卫星互联网系统技术架构和设计理念,并对星间激光通信、高速星上路由处理、宽带跳波束通信等关键技术进行了分析,并提出低轨卫星互联网地面试验验证方法,可为我国卫星互联网的建设与发展提供参考。后续将在此基础上继续坚持问题导向和创新驱动,加快关键技术攻关和试验卫星研制,助力国家卫星互联网建设与应用。

参考文献:

- [1] 高瓔园,王妮炜,陆洲. 卫星互联网星座发展研究与方案构想[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(8): 875-881.
GAO Yingyuan, WANG Niwei, LU Zhou. Satellite Internet constellation development research program[J]. Journal of Chinese Academy of Electric Science, 2019, 14(8): 875-881.
- [2] HU Y, LI V. Satellite-based internet: A tutorial[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(3): 154-162.
- [3] MUKHERJEE J, RAMAMURTHY B. Communication technologies and architectures for space network and interplanetary Internet[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(2): 881-897.
- [4] 张晟宇. 本质、技术与竞争: 漫谈Starlink星座[J]. 卫星与网络, 2018, 3: 18-20.
ZHANG Shengyu. Essence, technology and competition: A mangle about the Starlink constellation[J]. Satellite and Network, 2018, 3: 18-20.
- [5] MCDOWELL J. The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation[J]. Astrophysical Journal Letters, 2020, 892(2): 1-10.
- [6] 翟继强,李雄飞. OneWeb卫星系统及国内低轨卫星互联网系统发展思考[J]. 空间电子技术, 2017, 14(6): 1-7.
ZHAI Jiqiang, LI Xiongfei. Consideration on the development of OneWeb satellite system and domestic low orbit Internet satellite system[J]. Space Electronic, 2017, 14(6): 1-7.
- [7] MORELLO A, MIGNONE V. DVB-S2: The second generation standard for satellite broadband services[J]. Proceedings of IEEE, 2006, 94(1): 210-227.
- [8] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2017, 19(1): 57-96.
- [9] FENECH H, AMOS S, TOMATIS A, et al. High throughput satellite systems: An analytical approach[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2015, 51(1): 192-202.
- [10] KYRGAZOS A, EVANS B, THOMPSON P, et al. A terabit/second satellite system for European broadband access: A feasibility study[J]. International Journal of Satellite Communications and Networking, 2014, 32(2): 63-92.
- [11] PECORELLA T, FANTACCI R, LASACNI C, et al. Study and implementation of switching and beam-hopping techniques in satellites with on board processing[C]//Proceedings of International Workshop on Satellite and Space Communications. Salzburg, Austria: [s.n.], 2007.
- [12] LEI J, VAZQUEZ-CASTRO M. Multibeam satellite frequency/time duality study and capacity optimization[J]. Journal of Communications and Networks, 2011, 13(5): 472-480.
- [13] WOOD L, CLERGET A, ANDRIKOPOULOS I, et al. IP routing issues in satellite constellation networks[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(1): 69-92.
- [14] DOW J, NEILAN R, RIZOS C. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3/4): 191-198.