

低轨星座组网及地面IP路由技术适应性分析

何 辞¹, 张亚生^{1,2}, 孙晨华^{1,2}, 李旭东¹

(1.中国电子科技集团公司第五十四研究所, 河北 石家庄 050081;

2.通信网信息传输与分发技术国家级重点实验室, 河北 石家庄 050081)

摘要: 随着天地一体化信息网络重大项目天基接入网、星网低轨星座系统的推进, 如何解决星间互联低轨星座路由问题, 已提到工程可实现的紧迫程度。深入研究低轨星座的高动态特点, 分析地面IP路由技术的适应性, 是研究思路之一, 给出相关分析过程及结论, 可为星间互联低轨星座系统路由解决方案的确定提供重要依据和支撑。

关键词: 星间互联低轨星座; 天地一体化重大项目天基接入网; 星网低轨系统; 低轨星座; 路由技术

中图分类号: TN927.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.20200104

Analysis on Low-Earth-Orbit Constellation Networking and Adaptability of Ground IP Routing Technology

HE Ci, ZHANG Yasheng, SUN Chenhua, LI Xudong

The 54th Research Institute of CETC, Shijiazhuang 050081, China

Abstract: With the development of the national major project of space-integrated-ground information network including space-based access network and LEO constellation system, it is urgently to be solved how to deal with the routing problem of LEO constellation with inter-satellite communication. One of the research ideas is to study the high dynamic characteristics of LEO constellations and analyze the adaptability of ground-based IP routing technology. The correlation analysis process and conclusion were given, which could provide important basis and support for the routing solution of LEO constellation system with inter-satellite communication.

Key Words: LEO constellation system with inter-satellite communication, national major project of space-integrated-ground integrated information network, LEO system of satellite network, LEO constellation, routing technology

1 引言

低轨通信星座系统通常被简称为低轨星座系统, 这主要是因为在对地观测、导航、通信三大体系中, 对地观测多以单星为主, 一颗对地观测卫星就可以具备一定的服务能力^[1]; 导航体系, 目前以中高轨星座为主; 低轨通信卫星, 单星不具备全天候全天时通信能力, 而通信是具有突出的时间连续性特征的业务, 只有多星构成星座, 才能实现语音、视频等实时连续通信, 单颗低轨通信卫星只能支持存储转发短消息类通信业务^[2]。因此要实现低轨卫星通信, 必须发展星座系统。以天地一体化信息网络低轨接入网为例, 首先需要解决低轨星座通信相

关技术问题, 在此基础上可搭载导航增强、航空航海监视等载荷, 实现以通信为主的多功能星座系统^[3]。

2 国内外低轨星座类型

目前, 国外典型的在轨低轨星座系统有Iridium-next (铱星二代)、Orbcomm等, Iridium-next (铱星二代) 是目前全球唯一一个具有全星间链路和星间路由交换的低轨星座系统, 但是由于该星座以L频段低速移动业务为主, 路由交换容量小^[4], 相对于宽带业务星座而言, 实现难度小^[5]。OneWeb (一网) 星座系统, 以支持宽带业务为主, 卫星配置透明弯管载荷, 星间无链路, 星上无路

由交换。Starlink（星链）是宽带巨型星座系统，规划中有星间链路和路由交换，但是目前发射的多批次卫星均没有配置星间链路和星间路由交换功能。天地一体化重大项目低轨接入网，以不依赖全球布站实现全球宽带窄带业务通联为出发点，星间星地必须要解决IP业务在星座系统内的路由问题；星网低轨星座系统初期以透明为主，不配置路由交换功能，后续按需扩展星间链路和路由交换功能。表1给出了典型星座系统的基本情况。可以看出，针对宽带业务（以IP为主）和宽窄结合业务的低轨星座系统，需要高性能路由交换能力，目前全球范围内没有成熟技术可借鉴。

3 宽窄结合低轨星座场景构想

宽窄结合低轨星座系统轨道高度：800~1 000 km，卫星数量：60~240颗，配置宽窄结合的综合卫星和宽带卫星，基本星座由60颗综合星构成，可根据需要增加宽带星轨道面，提高星座宽带业务容量，星座演进构想如图1所示。

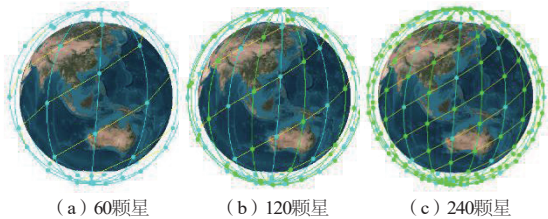


图1 星座演进构想

星座构型按照极轨星座考虑，配置同轨道面和异轨道面星间链路^[6]，支持宽带组网、低速移动组网，整个系统包含空间段卫星节点、地面段关口站、运控中心和用户终端，如图2所示。

4 低轨星座特点分析及对路由设计的要求

低轨星座与地面网络有很大不同，因此其星地一体

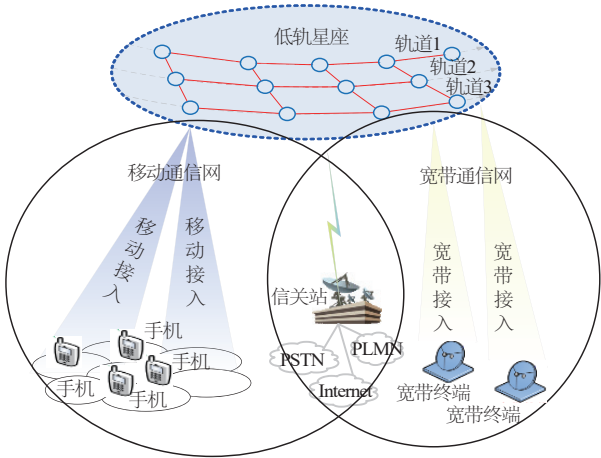


图2 低轨星座系统星地一体应用场景

化路由的设计和实现，需高度关注其差异性，作为路由设计的输入。以下从几个方面进行分析。

（1）卫星节点高动态引起的星地链路频繁通断，导致星地路由需频繁重计算和重收敛^[7]。以典型场景为例分析如下：仿真场景设置为轨道高度约800 km、极轨星座中的某地面站（三亚站）对某颗卫星的最小仰角10°，地面站对单颗卫星的可见次数及连通时长的仿真结果如图3所示。一天内，地面站可见卫星3次，可见时长随卫星每次经过地面站时与地面站相对位置的不同而变化，卫星过顶时最长可见时间为665 s（约11 min）。如图4所示，对于单个轨道面上卫星，地面站在1小时29

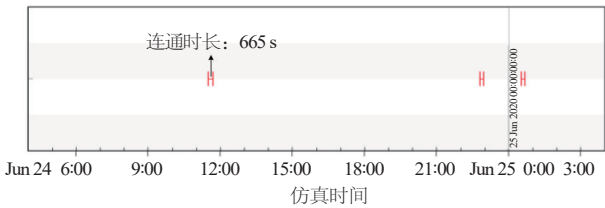


图3 地面站对单颗卫星可见次数及连通时长示意

表1 国内外典型低轨星座系统情况

典型系统	Iridium	Orbcomm	OneWeb	Starlink	天地一体化	星网系统
卫星数量	66颗	约40颗	720颗	数万颗（初期4 000颗）	60~240颗	约800颗
工作频段	L为主	VHF	Ku, Ka	Ku, Ka	L, Ka	Ka
星间链路	有	无	无	计划有，目前无	有	计划有
星间路由交换	有	无	无	计划有，目前无	有	计划中，部分卫星有
星上交换容量	不小于100 MB	无	无	10 GB以上	10 GB以上	10 GB以上
卫星在轨情况	在轨	在轨	试验星在轨	试验星在轨，无星间链路	先导星在轨（有星间链路和路由交换）	试验星在轨（无星间链路）

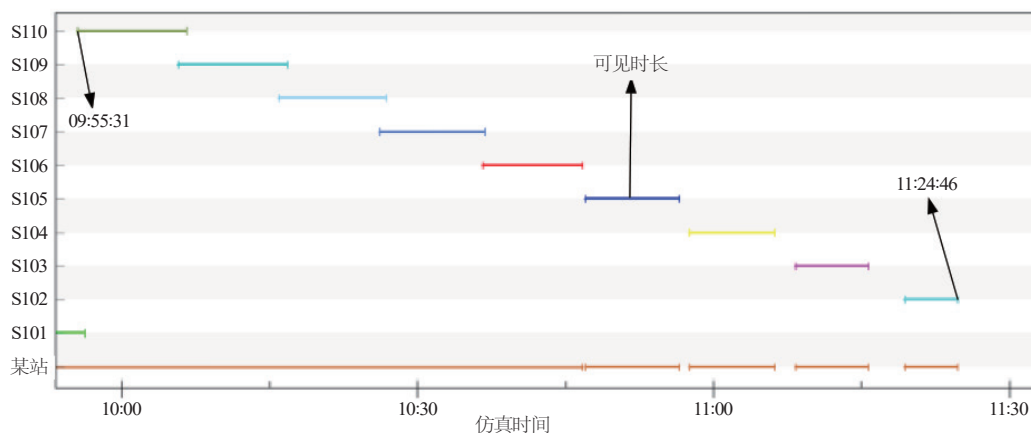
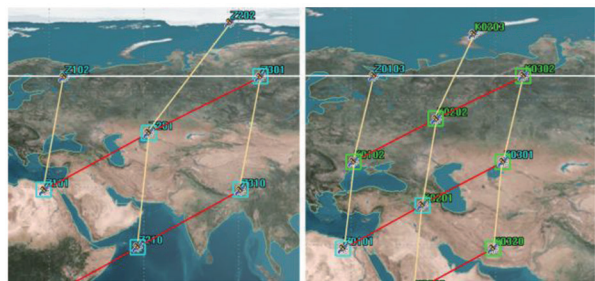


图4 地面站对单个轨道面卫星切换时间

分钟15秒内切换9次, 平均约10 min切换一次。对于用户终端而言, 其运行速度相对于卫星的运动可忽略不计, 用户终端对卫星的切换情况与地面站对卫星的切换情况类似。因此, 由于用户、地面站相对于卫星的频繁切换, 用户、地面站(馈电)星地路由需实现卫星节点高动态下路由的快速收敛, 以满足用户和地面站无缝切换卫星的设计目标^[8]。

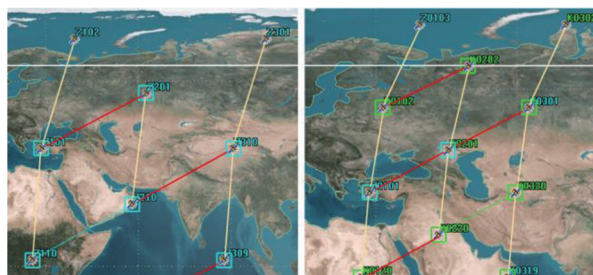
(2) 星间网络拓扑高动态引起星间拓扑频繁变化, 导致星间路由需频繁重计算和重收敛。主要由于极轨卫星在进/出极区时, 关闭异轨面星间链路, 而引起星间拓扑的周期性变化。现假定当卫星进入南北纬 65° 以上高纬度区域时, 卫星断开与其相连的异轨面星间链路, 当卫星离开南北纬 65° 以上高纬度区域时, 该卫星与相邻异轨面卫星重新建立链接。

构建轨道高度约800 km的60颗和240颗卫星的极轨星座仿真场景, 并分别从中选取相邻的3个轨道面, 仿真两个星座卫星由南向北进入北纬 65° 以上纬度区域时在同一时刻的星间链路变化情况。图5至图7中, 白色线段表示北纬 65° 纬度线, 红色线段表示异轨星间链路, 黄色线段表示同轨星间链路。



(a) 60颗卫星星座场景 (b) 240颗卫星星座场景

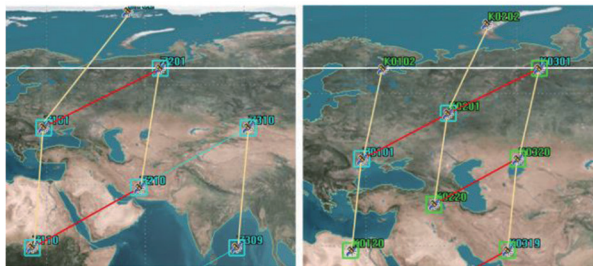
图5 开始时刻异轨星间链路拓扑



(a) 60颗卫星星座场景

(b) 240颗卫星星座场景

图6 152 s异轨星间链路拓扑



(a) 60颗卫星星座场景

(b) 240颗卫星星座场景

图7 304 s异轨星间链路拓扑

- 1) 开始时刻1、3轨道卫星在 65° 纬度线。
- 2) 152 s时, (a) 中星间链路未变化, (b) 中2轨道面202星飞行至 65° 纬度线, 异轨星间链路断开。
- 3) 304 s时, (a) 中2轨道面201星与(b)中1、3轨道面卫星飞行至 65° 纬度线, 星间链路断开。

60颗卫星场景中单轨道面有10颗卫星, 240颗卫星场景中单个轨道面有20颗卫星。当任意一颗卫星越过南北纬 65° 时, 星间链路拓扑均变化一次。图8中, 60颗卫星在102 min的卫星轨道周期内星间链路拓扑周期性变化40次, 最长拓扑稳定时间为234 s, 最短拓扑稳定时间为71 s。图9中, 240颗卫星在102 min的卫星轨道周期内星间

链路拓扑周期性变化80次,最长拓扑稳定时间为82 s,最短拓扑稳定时间为70 s。

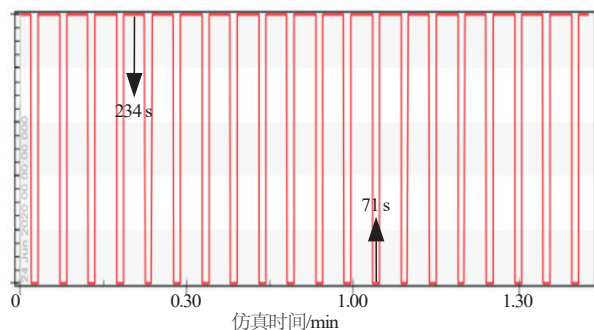


图8 60颗卫星时间片仿真

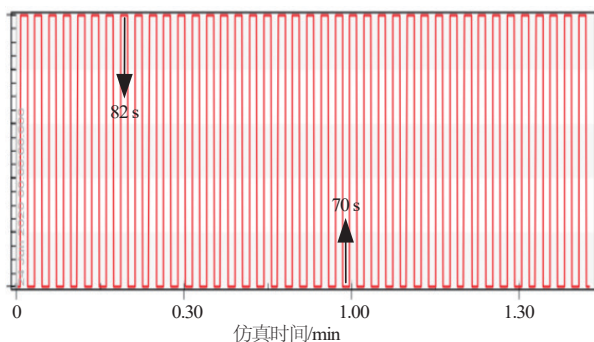


图9 240颗卫星时间片仿真

仿真结果总结见表2,同样的仿真时间内,240颗卫星场景的星间拓扑变化次数是60颗卫星场景的两倍。另外,两种场景下均存在最长和最短拓扑稳定时间,主要由于同轨或异轨卫星之间相位差,造成星座中某颗卫星进入南北纬65°区域与另外一颗卫星离开南北纬65°区域的时间不等。因此,星间路由设计需结合星间拓扑变化规律的属性,设计能满足拓扑变化频次和时长要求的、能快速收敛的路由协议^[9]。

表2 不同卫星数量下的拓扑稳定时间对比

对比项	60颗卫星	240颗卫星
变化次数/次	40	80
最长拓扑稳定时间/s	234	82
最短拓扑稳定时间/s	71	70

5 地面IP路由高动态低轨星座适应性仿真分析

通过网络测试云环境,对低轨星座节点及网络拓扑高动态这一关注点进行测试和分析。

网络测试云平台是将学术界和工业界中成熟的云平

台管理技术、主机及网络虚拟化技术和软件定义网络技术等核心思想引入网络仿真测试领域,并结合具体目标网络(如:地面网络、天基网络、天地一体化网络、深空网络等)特性全新研发的组网技术测试验证及演示平台。其能模拟各类网络拓扑及链路特性(连接关系、时延、带宽和误码);能模拟各类组网节点,且所模拟节点运行的代码与外部物理设备的代码一致;能支持大规模仿真测试场景的部署。

在网络测试云中构建了60颗(6×10)极轨星座的测试场景下,低轨星座卫星的运行轨迹由星座轨道仿真生成,星座网络中所有的组网节点(卫星、各类用户终端及信关站)均运行实际路由器中的标准OSPF路由软件,从协议的收敛性方面,评估卫星节点和网络拓扑高动态的极轨星座组网场景下,标准IP路由协议的适应性^[10]。

场景一为卫星节点高动态的测试场景,如图10、图11所示,地面终端ter1在01:20:50从G0112星移动切换至G0312星,01:21:26连接,路由收敛时间为36 s。

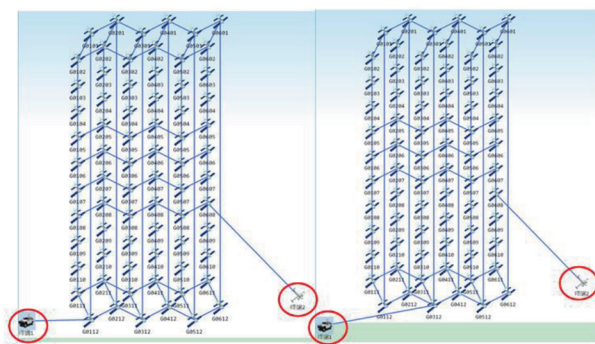


图10 卫星节点高动态测试场景

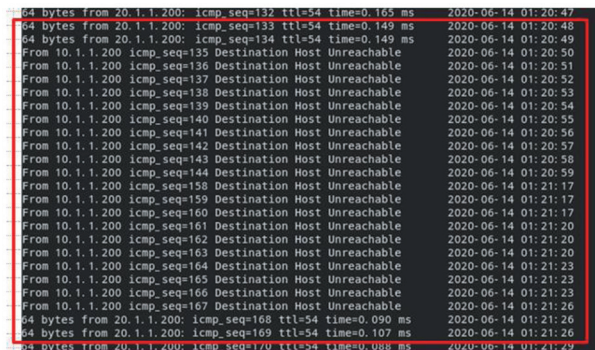


图11 节点高动态下的协议收敛时间

场景二为网络拓扑高动态的测试场景,如图12、图13所示,G0106卫星与G1210卫星通信过程中,低轨星座星间拓扑发生变化,从仿真结果可以看出路由协议收敛时间为38 s。

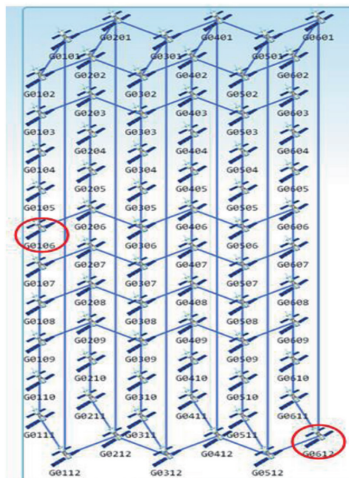


图12 星间拓扑高动态场景

64 bytes from 170.6.7.6: icmp_seq=298 ttl=54 time=0.190 ms	2020-06-13 10:37:33
64 bytes from 170.6.7.6: icmp_seq=299 ttl=54 time=0.161 ms	2020-06-13 10:37:35
4 bytes from 170.6.7.6: icmp_seq=300 ttl=54 time=0.182 ms	2020-06-13 10:37:36
4 bytes from 170.6.7.6: icmp_seq=338 ttl=54 time=0.160 ms	2020-06-13 10:38:14
64 bytes from 170.6.7.6: icmp_seq=339 ttl=54 time=0.101 ms	2020-06-13 10:38:15
64 bytes from 170.6.7.6: icmp_seq=340 ttl=54 time=0.167 ms	2020-06-13 10:38:16

图13 拓扑高动态下的协议收敛时间

由此可看出,无论是星间还是星地拓扑变化时,采用地面标准IP路由协议(以OSPF为例),协议收敛时间均为几十秒量级,而上一节仿真结论表明,60颗极轨星座拓扑会发生40次变化,而维持稳定星间拓扑的时间仅为几十秒量级。意味着地面标准IP路由协议刚经过几十秒的收敛,当前稳定的拓扑又开始变化,再次需要长时间的收敛,且此变化(路由震荡)会发生40次。由此可知,标准IP路由协议收敛时间过长,会严重影响用户通信质量,甚至会造成系统不可用。

6 结束语

本文以构建基于全星间链路的低轨天基接入网为背景,重点从卫星节点和网络拓扑高动态这一重要的、首要的、影响低轨星座路由协议的设计因素出发,在深入仿真分析低轨星座特点的基础上,基于网络测试云环境进行地面标准IP路由协议的收敛性能测试及适应性分析。结果表明:在高动态星间互联低轨星座系统中,标准IP路由协议无法直接满足低轨星座网络的组网应用需求,该论证结论可为低轨天基接入网星地一体路由架构和协议技术路线的选择提供参考。

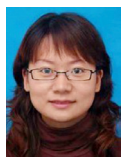
参考文献:

- [1] 肖永伟,孙晨华,赵伟松. 低轨通信星座发展的思考[J]. 国际太空,2018(11):24-32.
XIAO Y W, SUN C H, ZHAO W S. On the development of low-orbit communication constellations [J]. International Space, 2018(11)24-32
- [2] 孙晨华. 天基传输网络和天地一体化信息网络发展现状与问题思考[J]. 无线电工程, 2017,47(1):1-6.
SUN C H. Development status and problems of space-based transmission network and integrated information Network. Radio engineering, 2017,47(1)1-6.
- [3] 孙晨华,肖永伟,赵伟松,等. 天地一体化信息网络低轨移动及宽带通信星座发展设想[J]. 电信科学,2017,33(12):43-52.
SUN C H, XIAO Y W, ZHAO W S, et al. On the development of low-orbit mobile and broadband communication constellation in integrated heaven and earth information network[J]. Telecommunication Science,2017,33(12):43-52.)
- [4] GAO Z H, GUO Q, NA Z Y. Novel optimized routing algorithm for LEO satellite IP networks[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(6):917-925.
- [5] KUCUKATES R, ERSOY C. Minimum flow maximum residual routing in LEO satellite networks using routing set[J]. Wireless Networks, 2008, 14(4):501-517.
- [6] 陈愈杰. 一种基于LEO卫星的路由协议的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2018.
CHEN Y J. Design and implementation of a routing protocol based on LEO satellite[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications,2018.
- [7] 尹波,孙晨华,张俊哲. IP路由协议在MF-TDMA卫星系统中适应性研究[J]. 无线电通信技术,2008(5):5-8.
YIN B, SUN C H, ZHANG J Z. Adaptive research of IP routing protocol in MF-TDMA satellite system [J]. Radio Communications Technology, 2008(5):5-8.
- [8] 晏坚. 低轨卫星星座网络 IP 路由技术研究[D]. 北京:清华大学,2010.
YAN J. Research on IP routing technology of low-orbit satellite constellation network[D]. Beijing: Tsinghua University,2010.
- [9] 姚晔,朱立东,吴诗其. 具有星际链路的低轨卫星通信系统的路由策略研究[J]. 中国空间科学技术,2005, 25(4):47-53.
YAO H, ZHU L D, WU S Q. Research on routing strategy of low-orbit satellite communication system with interplanetary link[J].

China Space Science and Technology, 2005,25(4):47-53.

- [10] 孙晨华, 章劲松, 赵伟松, 等. 高低轨宽带卫星通信系统特点对比分析[J]. 无线电通信技术, 2020, 46(5): 505-510.
SUN C H, ZHANG J S, ZHAO W S, et al. Comparative analysis of characteristics of high and low orbit broadband satellite communication systems[J]. Radio Communications Technology, 2020, 46(5): 505-510.

[作者简介]



何辞 (1983—), 女, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级工程师, 主要研究方向为天基网络、天地一体化网络组网技术。



张亚生 (1969—), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所高级专家, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为天基网络、天地一体化网络组网技术。



孙晨华 (1964—), 女, 中国电子科技集团首席专家、中国电子科技集团公司第五十四研究所副总工程师, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为新一代卫星通信系统、天地一体化网络。



李旭东 (1991—), 男, 中国电子科技集团公司第五十四研究所助理工程师, 主要研究方向为卫星网络组网及星座仿真技术。