



专题：卫星互联网

一种 MEO 星座的覆盖性能及组网方案分析

赵艳宾^{1,2}, 王任宁³, 胡培培⁴

- (1. 北京国电高科科技有限公司, 北京 100094;
2. 保定市退役军人事务局, 河北 保定 071051;
3. 63861 部队, 吉林 白城 137000;
4. 北京建企动力科技工程有限公司, 北京 101100)

摘要: 地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星轨道位置资源稀缺已久, 巨型低轨卫星星座的发展浪潮使得低轨轨道资源也变得空前紧张, 中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 星座作为 GEO 和低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 星座的折中, 必将成为各国博弈的角逐场, 参考世界各 MEO 星座和我国国情, 提出了一种 (6+4) MEO 星座方案, 并使用 STK (Satellite Tool Kit) 软件对星座覆盖性能、星际链路特性和信关站选址及覆盖性能进行了仿真分析, 该方案通过地面站中继实现轨道间通信, 有效规避了利用星际链路实现轨际通信时存在的各种问题, 使系统得到简化、可靠性得到提高, 在全球低轨卫星轨道资源紧张的形势下具有很强的战略价值。

关键词: MEO 星座; 覆盖性能; 轨际通信; 组网方案

中图分类号: TN927+.23

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022068

Analysis on the coverage performance and networking scheme of an MEO constellation

ZHAO Yanbin^{1,2}, WANG Renning³, HU Peipei⁴

1. Beijing Guodian Hi-tech Science and Technology Ltd., Beijing 100094, China
2. Baoding Municipal Veterans Affairs Bureau, Baoding 071051, China
3. Unit 63861, Baicheng 137000, China
4. Beijing Jianqi Power Technology Engineering Ltd., Beijing 101100, China

Abstract: Geostationary earth orbit (GEO) satellite orbit position resources have been scarce for a long time. The development of giant low-orbit satellite constellations has made the low-orbit resources unprecedentedly scarce. As a compromise between GEO and low earth orbit (LEO) constellations, the medium earth orbit (MEO) constellation will surely become a battle field for all countries. Referring to various MEO constellations in the world and our national conditions, a (6+4) MEO constellation was proposed. STK (Satellite Tool Kit) was used to simulate and analyze the constellation coverage performance, inter-satellite link characteristics, gateway site selection and coverage performance. Inter-orbit communication was realized through ground station relay, effectively avoiding various problems

收稿日期: 2021-11-10; 修回日期: 2021-04-12

通信作者: 赵艳宾, 406663349@qq.com

through inter-satellite links. The system was more simple and steady. It's much valuable in strategy in the circumstance of global low-orbit resources scarce.

Key words: MEO constellation, coverage performance, inter-orbit communication, networking scheme

0 引言

地球静止轨道 (geostationary earth orbit, GEO) 卫星轨道位置资源紧张已久, 随着 5G、6G 以及物联网等通信技术和卫星制造、发射技术的进步, 卫星通信迎来了一股新的发展浪潮, 以“星链 (Starlink)”“OneWeb”为代表的多个超级低轨卫星星座计划为全球用户提供宽带互联网接入, 商业化竞争与大国博弈交织, 低轨轨道资源变得空前紧张^[1-2]。目前高轨、中轨、低轨 3 种星座组网方式中, GEO 星座单星覆盖面广、组网需要的卫星数少、覆盖范围固定、天线跟踪相对容易, 但通信距离大、传输时延长、对卫星和用户终端的有效全向辐射功率 (equivalent isotropically radiated power, EIRP) 要求高, 而且存在覆盖盲区, 典型星座有 INMARSAT 系统^[3]、Thuraya 系统^[4]、ACeS 系统^[5]。低地球轨道 (low earth orbit, LEO) 星座相对时延小, 最接近地面网络时延要求, 能够实现全球覆盖, 随着近年商业小卫星制造技术和发射技术的成熟, 成为全球热点新兴产业, 但 LEO 星座又存在组网需要卫星数目多、切换频繁、管理复杂等问题, 典型星座有 Iridium 系统^[6]、Globalstar 系统^[7]、Starlink 系统^[8]、Telesat 系统^[9]、OneWeb 系统^[10]等。中地球轨道 (medium earth orbit, MEO) 星座是高轨星座和低轨星座的折中, 相对于 GEO 系统, MEO 系统传输损耗小, 降低了对手持机和星载天线的要求, 研制手持机的难度与 LEO 系统大致相当, 传输时延约为 GEO 系统的 1/4, 使得通过 MEO 卫星的双跳通信易被用户接受, 而且可以实现全球无缝覆盖; 相对于 LEO 系统, MEO 卫星移动速度慢, 带来的卫星切换不是很频繁, 且卫星覆盖范围大, 星座需要的

卫星较少, 系统设计和管理的较简单。所以从某种程度来看, MEO 系统克服了 GEO 系统和 LEO 系统的缺点, 其业务性能、服务寿命、传输时延、技术和实施风险、系统复杂性及系统费用都在可以实现和接受的范围内, 适合提供全球通信服务^[11], 典型星座有中圆轨道 (intermediate circular orbit, ICO) 系统^[12]、O3b (other 3 billion) 系统^[13]等。ICO 系统在提出过程中, 曾对同步轨道、中轨道和低轨道进行反复论证, 最后确定选择 MEO 方案, 采用两个高度为 10 350 km、倾角为 45°的圆轨道, 共有 10 个卫星, 另外备份 2 个卫星。O3b 星座系统是目前全球唯一一个成功投入商业运营的 MEO 卫星通信系统, 系统整个星座并未对卫星数量进行限制, 一般采取 8 颗星一组的模式, 可以按需增加卫星数量, 实现在轨容量扩展。按照美国联邦通信委员会 (Federal Communications Commission, FCC) 批准条件, O3b 系统能够运营共计 42 颗中轨卫星, 兼用倾斜和赤道轨道, 成为一个全球性通信系统。O3b 第一代卫星均运行在高度为 8 062 km、倾角为 0.03°的赤道上空 MEO 轨道, 轨道周期为 287.92 min, 能够覆盖南、北纬 45°之间所有地方, 在南纬、北纬 45°~62°范围内也能提供一定的服务。虽然部分卫星系统项目停止或者公司破产重组, 但都只是商业上的失败, 作为星座设计技术上的经典案例, 对本文星座设计仍具有重要参考意义。3 种系统各有长短, 我国对 GEO、LEO 星座系统都已有所布局, 还需要对 MEO 星座系统进行布局, 抢占 MEO 轨道位置资源和技术市场先机, 本文价值在于为我国 MEO 星座系统如何组网规划提供参考。

卫星星座组网有两种途径: 一是通过星际链路实现, 如 Iridium 系统、Starlink 系统、Telesat



系统；二是通过地面信关站中继实现，如 ICO 系统、O3b 系统、Globalstar 系统、OneWeb 系统。在全球范围内布局地面信关站需要考量地形地貌、地缘政治等多重因素，OneWeb 系统计划部署 70 余个信关站，但依然难以实现全球无缝服务。基于星间链路及星上交换技术的组网方式可摆脱信关站部署障碍，对于实现全球服务能力、优化信关站部署规模存在重要意义。目前，我国在境外建立地面站受限，适宜采用星际链路组网，同时当卫星处于境内上空时又可以实现地面站中继组网，将两种组网方案的优势结合起来进行混合组网，可以建立以我国区域覆盖为主，同时兼顾全球的卫星通信系统。本文参考世界各 MEO 星座和我国国情，提出了一种 (6+4) MEO 星座方案，并使用 STK^[14]对星座覆盖性能、星际链路特性和信关站选址及覆盖性能进行了仿真分析^[15]，论证了该方案的可行性。

1 星座组成及覆盖性能分析

星座设计需要根据任务需求进行，基于当前我国国家利益在全球的拓展，星座应实现全球覆盖、提供基本接入，同时，我国是系统用户和业务最多的地区，是重点服务区，在系统容量上应提供更多接入点。基于以上需求，本文提出一种 MEO 星座，星座包含 10 颗 MEO 卫星，其中 6 颗均匀分布在赤道轨道平面内，相位角为 60° 、轨道倾角为 0° ；4 颗均匀分布在极地轨道平面内，相位角为 90° 、轨道倾角为 90° 。所有卫星轨道高度为 10 352 km，回归周期为 1 天，1 天内运行 4 圈。重点服务区域中心位置在 110°E ，应该使极地轨道卫星地面轨迹关于此中心位置左右对称，以取得对重点服务区域比较均匀的覆盖，计算可得极轨道的升交点赤经应为 89.6° ，4 颗卫星的真近点角分别为 0° 、 90° 、 180° 、 270° 。当极轨道卫星运行至赤道上空时，与相邻两颗赤道卫星的间隔分

别为 15° 和 45° ，使整个星座取得比较均匀的覆盖效果。这里选用赤道轨道卫星升交点赤经为 74.6° ，真近点角分别为 0° 、 60° 、 120° 、 180° 、 240° 、 300° 。(6+4) MEO 星座的 3D 效果如图 1 所示。

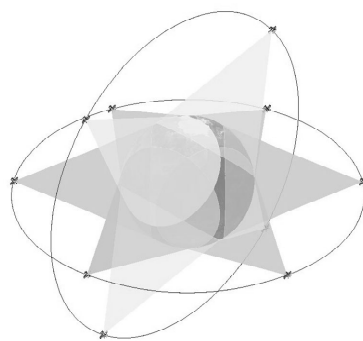


图 1 (6+4) MEO 星座的 3D 效果

星座的轨道要素确定后，使用 STK 对其 10° 最小仰角下的覆盖性能进行仿真，赤道轨道和极地轨道的覆盖特性（最低仰角 10° ）见表 1，该星座可实现全球服务区全时 100% 覆盖。星座的覆盖性能是在纬度方向带状分布的，即相同纬度带的覆盖性能相同。

表 1 赤道轨道和极地轨道的覆盖特性（最低仰角为 10° ）

轨道	全时覆盖区域	间断覆盖区域	盲区
赤道轨道	纬度 $0^\circ \sim 52.89^\circ$	纬度 $52.89^\circ \sim 57.7^\circ$	纬度 $57.7^\circ \sim 90^\circ$
极地轨道	纬度 $48.2^\circ \sim 90^\circ$	纬度 $0^\circ \sim 48.2^\circ$	无

2 组网方案分析

卫星之间是通过星际链路组网还是通过地面站组网需要综合考虑多种因素。一方面，我国要实现全球通信，信关站只能建立在我国境内，必须使用星际链路实现全球通信；另一方面，星际链路技术对卫星复杂度要求较高，技术难度比较大，且受功率、容量等限制，星上处理能力有限，在能使用地面站的地方应避免使用星际链路。下面对星际链路特性、信关站覆盖性能进行分析。

2.1 星际链路组网

使用星际链路组网有很多优点：传输条件好，星际链路信号不需要穿过大气层，没有大气吸收、雨衰、遮挡、多径效应等损耗，可以采用频率更高的波段或激光通信，实现大容量通信；传输效率高，星际链路中继比地面站双跳中继传播时延短，提高了传输效率，更容易满足实时业务的服务质量（quality of service, QoS）要求；组网方便，地面信关站的建设会受政治、经济、地理等方面的限制，而星际链路没有这些限制，系统路由选择和网络管理更加灵活方便；抗毁性强，所有卫星通过星际链路互联后，通信信号能不依赖于地面通信网络进行传输，极大地提高了系统抗干扰和抗摧毁能力；地面段压力小。采用星际链路减少了对地面信关站的数量需求，从而可大大降低地面段的复杂度和投资。但是采用星际链路也带来一些代价和难度：由于星际链路主要用作中继网络，对信噪比、带宽要求都比信关站链路高，给收发天线、射频设备、调制解调设备和基带处理设备提出了更高的要求，而且卫星必须具有星上处理和交换功能，以实现信号的星上选路和交换，卫星研制难度较大；作为中继链路，星际链路适合采用较高的工作频段或采用激光星际链路，但天线指向捕获困难，指向误差会降低天线增益；星际链路距离和指向特性变化幅度较大、较快时，需要精准灵敏的星际链路天线指向控制和功率控制技术。

本星座同轨道相邻卫星之间的相对位置比较固定，星际链路特性几乎不变，因此实现起来比较简单，通过计算得知， 10° 最小仰角下的星地距离为 10 352~14 500 km，传输时延为 35~48 ms，轨道内相邻星间距离为 $10\,352+6\,370=16\,722$ (km)，传输时延为 55.74 ms，隔一颗星的星际链路距离为 $16\,722\times 1.732=28\,962$ (km)，传输时延为 96 ms。可见，隔一颗星建立星际链路代价较大，且没有明显的优势，故轨道内只是在相邻星之间建立链路。

赤轨道面和极轨道面相互垂直，若按照距离最近的原则建立轨际链路，则某半个轨道周期（3 h）内两个轨道交点附近的链路建立情况见表 2，半个周期内要进行 4 次星际链路切换，链路持续时间分别为 30 min、30 min、1 h、1 h。其他时刻以及另一个交点附近的链路情况与此类似。轨际链路 JidiSat12-ChidaoSat13 的方位角、仰角及距离变化特性如图 2 所示，4:44—5:44 链路建立期间星际距离范围为 3 102~15 013 km，方位角范围为 $40^\circ\sim 0^\circ(360^\circ)\sim 246^\circ$ ，仰角范围为 $-27^\circ\sim -5.3^\circ$ ，距离变化速率范围为 $-6.06\sim 6.06$ km/s，角度变化速率范围为 $0.005\sim 0.128(^{\circ})/\text{s}$ 。可见，轨际链路的距离和指向变化范围很大，实现难度较大，应考虑通过地面站实现轨际通信。

表 2 某半个轨道周期（3 h）内两个轨道交点附近的链路建立情况

轨际链路	链路建立时间
JidiSat12-ChidaoSat13	04:44—05:44
JidiSat12-ChidaoSat12	05:44—06:14
JidiSat11-ChidaoSat12	06:14—06:44
JidiSat11-ChidaoSat11	06:44—07:44

2.2 地面信关站组网

信关站数目与位置直接关系到整个网络运行效率、所能提供服务的性能及系统可靠性等多个方面内容，是系统设计的一个重要课题。信关站的选择不仅要求节约投资、减少系统复杂度，还希望能够保证系统安全性和提高系统的稳健性等。信关站选择原则和要求如下^[1]：在满足系统性能（容量）要求的前提下，信关站的数目要尽可能少，信关站过多不仅增大系统投资，且会增加系统的复杂度；赤轨道信关站和极轨道信关站之间要求始终保持有连接，因为在该系统中，异轨道卫星之间星际链路实现难度较大，位于不同轨道卫星覆盖区下的用户之间通过卫星和信关站进行实时通信时，需要信关站之间的协同工作；

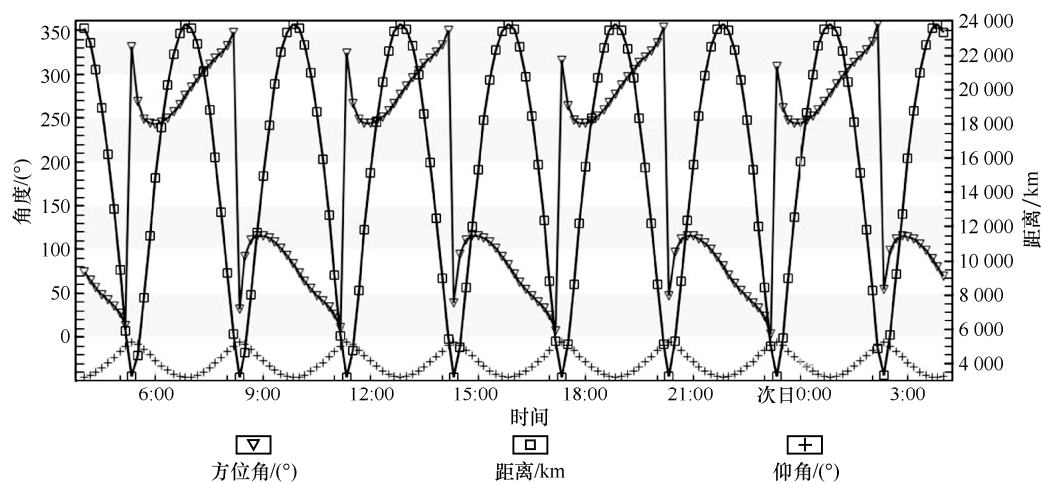


图2 轨际链路 JidiSat12-ChidaoSat13 的方位角、仰角及距离变化特性

信关站站址要求在我国自主控制的范围内，并且希望能够通过信关站与其他地面网（固定网与无线网）相连；在星座给定的条件下，要求信关站站址合理，使得实时覆盖区的面积尽可能大，所以一部分信关站要求尽量靠近边境；尽可能满足系统稳定性、稳健性要求，需要冗余一定的备份信关站，在某些信关站失效时，系统能够降级运行，但性能受到的影响相对较小。

表1指出，当地面站最低仰角为 10° 时，赤道轨道可以全时覆盖到纬度为 52.89° 内的区域，对 $52.89^\circ \sim 57.7^\circ$ 的地区是间断覆盖，其他高纬度覆盖不到，极地轨道对 48° 以上的高纬度地区是全时覆盖，对纬度 48.2° 内的区域是间断覆盖，故可以在纬度为 $48.2^\circ \sim 52.89^\circ$ 的区域，如呼伦贝尔，建立轨道间中继信关站，实现任何时候国外用户之间的通信。而且，通过图3所示的星座各个卫星对中国国土的覆盖情况也可以看出，任何时候，中国国土都可以同时连接到极地轨道星座和赤道星座，只要适当布局信关站，使得其中一些信关站与极地轨道通信，另外一些信关站与赤道轨道通信，即可通过两个或多个地面站中继来实现轨道间的通信。

参考ICO系统，假设每个信关站的容量为5 000路，每颗卫星容量为4 500路^[2]，国土大部

分时间是被3+1或3+2颗星覆盖，考虑到国土辽阔以及系统冗余量，对所有的可见星都要进行接入，5星容量为4 500×5路，地面至少需要5个接入信关站和1个中央信关站（网管中心所在站）。中央信关站可以建在北京。接入信关站要尽量靠近边境，使信关站覆盖范围尽量宽广，又能相互合作实现轨道间中继通信，如呼伦贝尔、乌鲁木齐、拉萨、海口、南京。呼伦贝尔单独可实现24 h轨道间中继通信，乌鲁木齐或拉萨与海口或南京搭配也可实现24 h轨道间中继通信。可见，轨道间通过地面站中继组网的抗毁性很强，而且，我国国土及周边的重点服务区用户都可以直接接入信关站进行通信，不用经过星际链路中继，服务质量更有保障。

2.3 方案性能对比

第2.1节分析指出轨际链路的距离和指向变化范围很大，轨际链路组网实现难度较大，第2.2节指出通过合理配置地面信关站可实现轨际通信，下面再分析一下两种轨际通信方案的时延特性，最终确定组网方案。赤道轨道覆盖不到 57.7° 以上的区域，极地轨道全时覆盖不到 48.2° 以下的区域，因此异轨道用户地面站中继时延最长的情况是极地轨道盲区用户在我国国土的地球另一侧，而赤道轨道盲区用户在南极附近，地面站中继时延（约

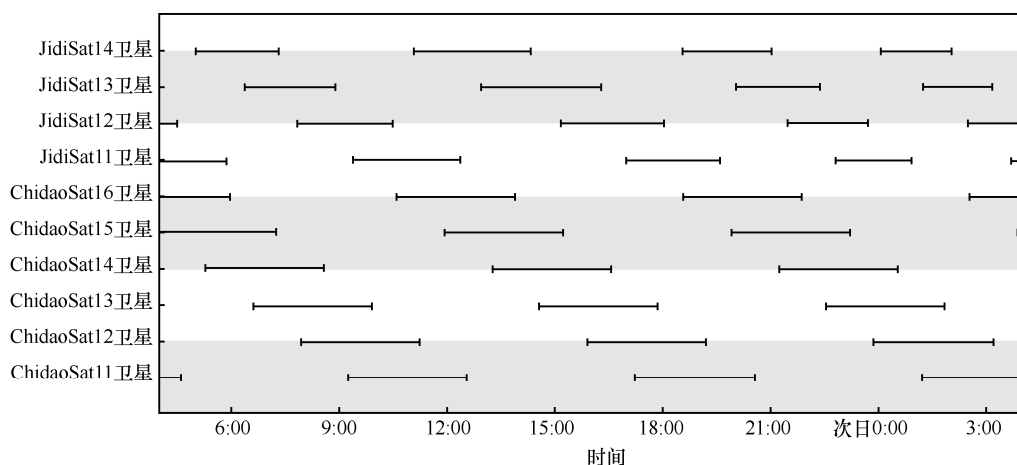


图3 星座各个卫星对中国国土的覆盖情况

400 ms) 比轨际链路中继时延 (约 200 ms) 要长很多; 地面站中继时延最短的情况是极地轨道盲区用户在中国国土的这一侧, 而赤道轨道盲区用户在北极附近, 地面站中继时延 (约 200 ms) 比轨际链路中继时延 (约 250 ms) 要稍短一点。其他地区用户传输时延介于二者之间, 大部分时间和地点都是轨际链路中继时延优于地面站中继。

轨际链路中继虽然具有时延短的优势, 但其时延也在 200 ms 以上, 来回将达到 400 ms 以上, 已经不能满足实时性要求, 而且还存在实现复杂、链路特性变化较大、对星上天线性能要求很高、链路管理麻烦等问题, 加之我国的境内通信业务量占整个业务量比重较大, 更适合通过地面站中继实现轨际通信。

基于以上分析, 本 MEO 星座组网方案选择混合组网: 同一个轨道内的相邻卫星间通过星际链路互连组网, 不同轨道间的卫星通过地面信关站实现互连组网。

3 结束语

当前国内对 LEO 星座研究较多, 对 MEO 星座研究较少, 本文提出一种 (6+4) MEO 星座, 用 STK 工具深入仿真分析了星座覆盖性能、星际链路特性、地面信关站配置及覆盖性能, 分析论

证了符合我国国情的混合组网方案, 本方案通过地面站中继实现轨道间通信, 有效规避了利用星际链路实现轨际通信时存在的各种问题, 系统组网简单、可靠性强, 在全球低轨卫星轨道资源紧张的形势下具有很强的战略意义。当然, MEO 星座系统作为 GEO 系统和 LEO 系统的折中, 缺点也是相对的, MEO 系统网络拓扑在周期性变化、系统设计和管理的复杂度较 GEO 系统更复杂, 实时性没有 LEO 系统更接近地面网络, 在后续与 5G、6G 等地面网络的融合中, 应用场景将受到影响, 但是, 从战略角度考虑, 我国仍应该在 MEO 领域提前布局谋划, 抢占 MEO 频率轨道资源, 抢占技术和市场先机。

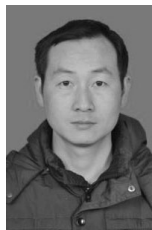
参考文献:

- [1] 纪凡策. 2020 年国外通信卫星发展综述[J]. 国际太空, 2021(2): 36-41.
JI F C. Overview of the development of foreign communication satellites in 2020[J]. Space International, 2021(2): 36-41.
- [2] 白卫岗, 盛敏, 杜盼盼. 6G 卫星物联网移动性管理: 挑战与关键技术[J]. 物联网学报, 2020, 4(1): 104-110.
BAI W G, SHENG M, DU P P. Mobility management of the 6G satellite IoT: challenges and key techniques[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(1): 104-110.
- [3] AIAA. Future development of the Inmarsat system[J]. Trends in Hearing, 2014, 18(18): 320-5.
- [4] SACHDEV D K. Thuraya mobile satellite system[J]. Success



- Stories in Satellite Systems, 2015: 121-140.
- [5] GEORGE S, SATAPATHY G, MANIKONDA V, et al. Build 8 of the airspace concept evaluation system[C]//Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Reston, Virginia: AIAA, 2011: 6373.
- [6] FINKELSTEIN S, SANFORD S H. Learning from corporate mistakes: the rise and fall of Iridium[J]. Organizational Dynamics, 2000, 29(2): 138-148.
- [7] OSTROVE W. Space systems forecast satellites & spacecraft[J]. Space Systems Forecast, 2012(12): 1.1-1.2.
- [8] 钟旻. Starlink 简介[J]. 数字通信世界, 2020(11): 1-4, 15.
ZHONG M. Brief introduction to starlink[J]. Digital Communication World, 2020, 2020(11): 1-4, 15.
- [9] DEL PORTILLO I, CAMERON B G, CRAWLEY E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband[J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 123-135.
- [10] 李喆, 孙冀伟, 尚炜, 等. 国外主要低轨互联网卫星星座进展及启示[J]. 中国航天, 2020(07): 48-51.
LI Z, SUN J W, SHANG W, et al. Progress and enlightenment of major LEO internet satellite constellations abroad[J]. Aerospace China, 2020(07): 48-51.
- [11] 徐逸群, 赵艳宾, 吴久银, 等. MEO 卫星移动通信系统体系结构分析[J]. 无线通信技术, 2010, 19(2): 28-32.
XU Y Q, ZHAO Y B, WU J Y, et al. Structure analysis of MEO satellite mobile communication system[J]. Wireless Communication Technology, 2010, 19(2): 28-32.
- [12] GHEDIA L, SMITH K, TITZER G. Satellite PCN—the ICO system[J]. International Journal of Satellite Communications, 1999, 17(4): 273-289.
- [13] 张有志, 王震华, 张更新. 欧洲 O3b 星座系统发展现状与分析[J]. 国际太空, 2017(3): 29-32.
ZHANG Y Z, WANG Z H, ZHANG G X. Status and analysis of O3b constellation system[J]. Space International, 2017(3): 29-32.
- [14] 吴昊, 王宇. 基于 STK 的 MEO 卫星通信系统的仿真与覆盖分析[J]. 电子设计工程, 2017, 25(22): 120-123, 127.
WU H, WANG Y. Simulation and coverage analysis of the constellation of the MEO satellite communication system based on STK[J]. Electronic Design Engineering, 2017, 25(22): 120-123, 127.
- [15] 李基, 邵琼玲. 基于 STK/Matlab 的 Walker 星座设计与优化[J]. 兵工自动化, 2017, 36(12): 67-70.
LI J, SHAO Q L. Design and optimization on walker constellation based on STK/Matlab[J]. Ordnance Industry Automation, 2017, 36(12): 67-70.
- [16] 刘刚. 非静止轨道卫星移动通信系统组网关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2003: 58-59.
LIU G. Research on the key technologies of networking in the NGSO satellite mobile communication systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2003: 58-59.
- [17] 张更新, 张杭. 移动卫星通信系统[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001: 736-744.
ZHANG G X, ZHANG H. Mobile satellite communication system[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2001: 736-744.

作者简介:



赵艳宾 (1981—), 男, 北京国电高科科技有限公司高级工程师, 主要研究方向为卫星物联网。



王任宁 (1990—), 男, 63861 部队工程师, 主要研究方向为无线通信。



胡培培 (1983—), 女, 北京建企动力科技工程有限公司工程师, 主要研究方向为卫星通信。