

基于天通卫星系统的天基测控技术

牛攀峰, 陈 宏, 齐 浩

(中国电信股份有限公司卫星应用技术研究院 北京 100035)

摘要: 针对卫星测控资源紧缺的现状, 为满足未来大规模卫星用户对测控资源的使用便利性这一需求, 研究利用天通卫星进行近地低轨卫星测控服务的能力。天通作为高轨移动通信卫星系统, 具有传输实时方便、服务安全可靠和综合效费比高等多方面的特点。首先, 分析了天通卫星对不同倾角、轨道高度卫星的测控覆盖时长, 以及对载人航天任务空间站和火箭进行测控的服务能力。然后, 基于天通民用系统现有的系统架构, 详细介绍了天通系统支持低轨测控的系统改造方案以及工作流程。最后, 结合目前的技术发展趋势和天通卫星能力现状, 描述了天通卫星在天基测控和低速中继两种任务场景中的应用前景。

关键词: 天通; 天基测控; 移动通信; 测控网元; 波束切换

中图分类号: V556.1; TN927

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2023)06-0043-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230802001

引用格式: 牛攀峰, 陈宏, 齐浩. 基于天通卫星系统的天基测控技术[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 43-50.

Space-based TT&C technology based on Tiantong satellite

NIU Panfeng, CHEN Hong, QI Hao

(China Telecom Corporation Limited Satellite Application Research Institute, Beijing 100035, China)

Abstract: In order to make the TT&C service more effective and convenient, and solve the problem of satellite TT&C resources shortage. The ability of using Tiantong satellites to support LEO TT&C is researched in this paper. As a GEO mobile communication satellite system, there are many advantages on Tiantong TT&C, such as the real-time transmission, reliable service, and low costing. We analyzed the service capabilities of Tiantong satellites for different LEO orbits. Besides LEO satellites, the space station and rocket are also considered in this paper. In order to support the space-based TT&C, the modification solution and detailed work flow are introduced based on the existing structure of Tiantong satellite mobile communication system. Finally, combined with the current technology development trend and Tiantong satellite capabilities, the application scene of space-based TT&C and low rate data relay is described.

Keywords: Tiantong; Space-based; Mobile communication; TT&C element; Beam switch

Citation: NIU Panfeng, CHEN Hong, QI Hao. Space-based TT&C technology based on Tiantong satellite [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 43-50.

引 言

近年来, 随着全球航天发射任务的逐年增长, 在轨航天器数量急剧增加, 卫星测控资源面临一定的挑战。一方面现有的地面测控资源无法满足所有在轨航天器测控需求, 另一方面地面测控站在地理位置上的分布范围有限, 无法实现全球覆盖。发展天基测控, 是对传统的地面测控网的有力补充, 是解决目前卫星测控资源冲突, 满足未来卫星用户对测控资源的使用便利性及拓展测控

网覆盖范围的一种有效手段^[1]。

目前, 较成熟的技术是发射高轨中继卫星进行天基测控, 如美国的 TDRSS 系统^[2-3]、我国的“天链”卫星系统等。但这些卫星系统的天线指向性要求高、能源消耗大、成本高, 很难实现海量服务和随机接入, 更适合于某些特殊用户。采用现有的移动通信卫星进行天基测控, 在降低一些可靠性的前提下, 完全能弥补这些缺陷, 目前国内外已有很多先例。例如, 美国早期分别进行了 Global Star 等中轨卫星对近地卫星进行测控的可行

性试验研究^[4,5]; 我国 2010 年发射的“遥感卫星九号”, 试验了利用北斗卫星短报文系统实现天基测控的关键技术^[6-9]; 2015 年, 新加坡南洋理工大学 VELOX-II 卫星搭载了新加坡创值公司生产的海事测控终端 IDRS, 验证了利用海事卫星系统实现天基测控的可行性, 目前 IDRS 已经成功助力 Capella 等卫星星座实现了准实时数据服务^[10]。

1 天基测控问题及任务需求

卫星测控的一个关键指标是覆盖率, 天基测控天然的具有高覆盖特性和多目标服务能力^[11,12], 利用现有高轨通信卫星能够实现大面积的覆盖, 极大提高低轨卫星测控实效性并降低成本, 结合测控终端的小型化和低功耗, 能有利于进一步的应用推广。此外, 低轨卫星在测控过程中需要不停地切换波束, 保障测控数据的连续性也是一个需要重点考虑的问题。天通卫星作为我国自主研制的首个高轨移动通信卫星系统, 具有天然的支持测控的优势。目前天基测控服务的对象包括运载火箭、中低轨卫星和载人航天器等^[13], 常见的任务需求有:

① 为卫星及运载火箭等各类低轨航天器提供测控服务;

② 为气象、海洋、资源勘探、测绘等卫星提供载荷低速率数据中继服务;

③ 为各类无人机、有人机、舰船等低空平台

用户提供低速率数据中继服务。

2 天通卫星支持低轨卫星测控能力分析

天通一号是我国首个自主研制的高轨移动通信卫星系统, 目前在轨共 3 颗星, 如图 1 所示。其中 01 星于 2016 年 8 月发射升空, 定点 101.4°E, 波束覆盖我国领土、领海以及第一岛链以内区域; 02 星于 2020 年 11 月发射, 定点 125.0°E, 覆盖韩国、日本等西太平洋海域; 03 星于 2021 年 1 月发射, 定点 81.5°E, 覆盖东南亚、澳大利亚达尔文港及周边海域。

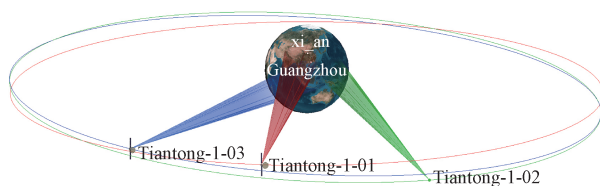


图 1 天通一号卫星移动通信系统

Fig. 1 Tiantong-1 satellite mobile communication system

2.1 对低轨卫星的测控能力分析

天通一号卫星系统 3 颗星对地表的覆盖率约为 9%, 表 1 为 3 颗星对轨道高度为 500 km、700 km 和倾角为 60°、97°情况下的卫星可见窗口计算结果。可以看出, 近地卫星的轨道高度越低, 测控覆盖效果越好; 相同轨道高度, 倾角越低测控覆盖效果越好。

表 1 天通卫星系统对近地卫星测控可见窗口统计

Table 1 Statistics of visible time for LEO by Tiantong

卫星类型	每天轨道覆盖率	平均每天覆盖次数	平均可见时间/s	最短可见时间/s	最长可见时间/s
500 km, 60°	6.04%	10.9	482.044	11.843	1 091.313
500 km, 97°	4.93%	9.1	467.714	5.370	1 028.859
700 km, 60°	5.56%	12.9	396.672	2.612	794.294
700 km, 97°	4.49%	8.7	448.511	6.390	1 038.713

天通卫星系统对低轨卫星, 平均每日覆盖次数为 10 次左右, 每次覆盖时间为 400 s 左右, 完全满足对低轨卫星的测控需求, 天通卫星对低轨卫星的轨道覆盖如图 2 所示。

2.2 对载人航天任务的测控能力分析

① 运载火箭覆盖能力

载人航天任务有两个主发射场, 一个是酒泉卫星发射中心, 主要负责神舟号载人飞船的发射;

另一个是文昌卫星发射中心, 主要负责天舟号货运飞船和实验舱的发射, 一般都是向东南方向的太平洋地区发射。通过仿真计算可以得到天通卫星覆盖了火箭飞行的绝大部分轨迹, 尤其是负责载人飞行任务的 CZ-2F 火箭, 可以作为火箭测控的有效补充手段。天通卫星对载人航天任务中火箭飞行轨迹的覆盖情况如图 3 所示。随着商业航天的快速发展, 未来天通还可以为更多的商业火箭提

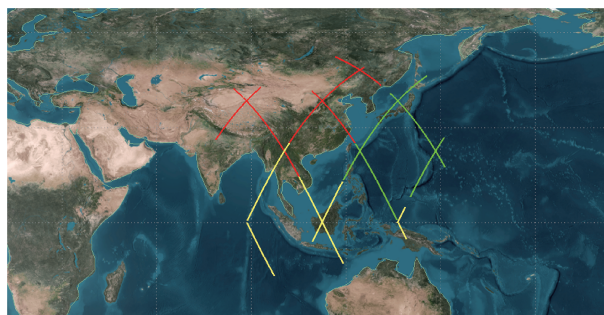


图2 天通卫星对低轨卫星(500 km, 60°)的轨道覆盖示意图

Fig. 2 Track coverage of LEO(500 km, 60°) by Tiantong

供测控服务^[14]。

② 空间站覆盖能力

表2 天通卫星系统对空间站测控可见窗口统计

Table 2 Statistics of visible time for space station by Tiantong

卫星类型	每天轨道覆盖率	平均每天覆盖次数	平均可见时间/s	最短可见时间/s	最长可见时间/s
CSS(中国空间站)	9.64%	12.6	662.479	30.322	1 147.185
ISS(国际空间站)	7.20%	12.4	502.204	11.441	1 145.111

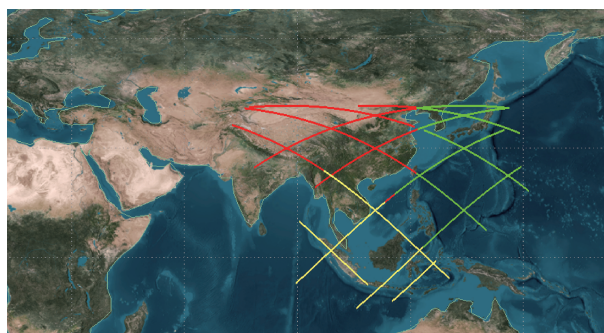


图4 天通卫星对我国空间站的轨道覆盖示意图

Fig. 4 Track coverage of CSS by Tiantong

3 天通卫星支持低轨卫星测控方案

3.1 测控系统组成结构

天通测控系统基于现有常规核心网的网元技术状态,实现数据公网、专网与低轨卫星用户测控中心的互联互通,通过灵活便利的接入组网方式,可以为测控用户提供不限时间、不限地点的测控服务能力。

基于天通一号卫星的测控系统组成如图5所示,包括天通分系统 and 应用分系统。天通分系统组成如下:

① 天通一号卫星



图3 天通卫星对火箭飞行轨迹覆盖示意图

Fig. 3 Track coverage of rocket by Tiantong

如表2所示,天通卫星系统对我国空间站的每日覆盖次数为12次左右,每次覆盖时间为662 s左右,对空间站的覆盖态势如图4所示。

作为测控系统的中继节点,转发测控应用数据;天通一号卫星基于东方红四号平台研制,发射重量5 400 kg,采用的是大口径环形卫星天线,设计寿命为12年,拥有109个点波束。用户链段为S频段,上行频段为1 980 MHz~2 010 MHz,下行频段为2 170 MHz~2 200 MHz,上下行传输为FDD/TDMA/FDMA方式,如图6所示。

② 测控应用终端

搭载于低轨卫星上,并与卫星平台相连,负责平台与测控中心之间的链路建立及测控应用数据收发;如图7所示,整个终端的重量约400 g,数据传输速率分2 kbps、4 kbps和8 kbps三档,可配备贴片天线或四臂螺旋天线。

③ 常规网元

由负责天通用户鉴权和身份认证的用户中心、负责天通空口资源管理的运控中心组成。

④ 测控网元

接入网具备区分常规终端业务和测控终端业务的能力,负责天通测控终端的随机接入和测控应用数据透传;测控网关负责天通测控终端状态管理、资源分配、身份管理等;测控服务器用于天通分系统与应用分系统之间的互联互通。

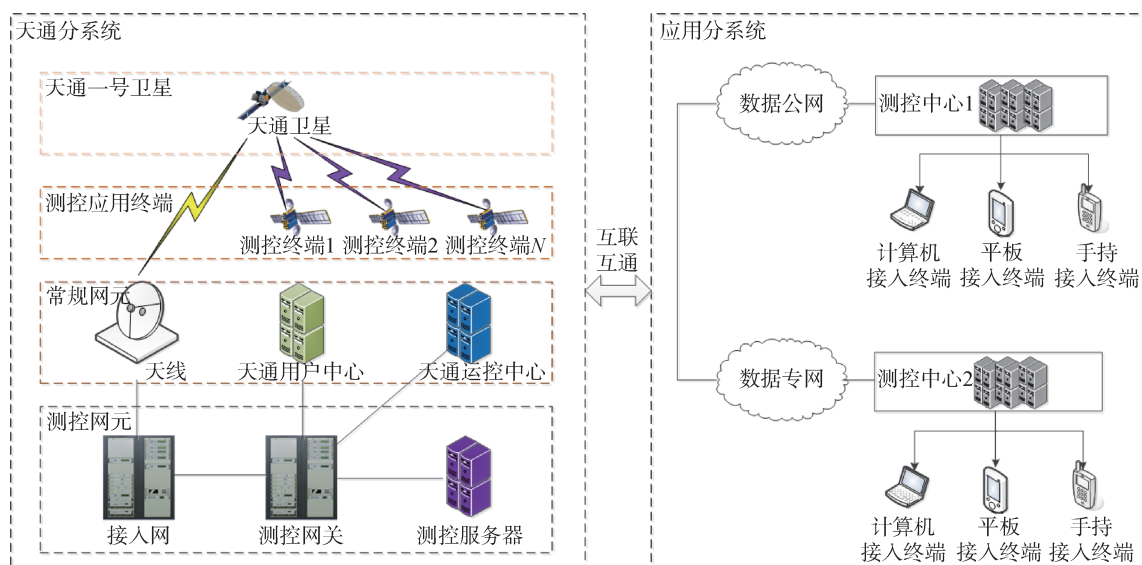


图 5 天通卫星支持低轨航天器测控方案

Fig. 5 TT&C scheme of LEO by Tiantong

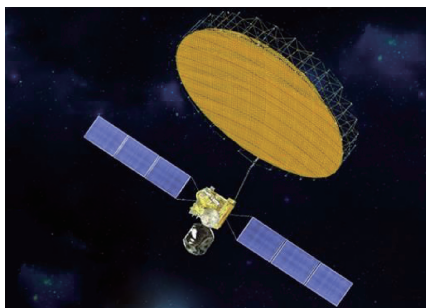


图 6 天通一号卫星

Fig. 6 Tiantong-1 satellite



图 7 天通卫星测控终端

Fig. 7 Tiantong TT&C terminal

3.2 测控通信流程

整个业务流程主要分为建链传输、波束切换、信息表更新三部分^[15], 如图 8 所示。

3.1.1 建链传输

建链传输主要完成在一个波束内的单个业务信道入网、认证、数据传输、退网等一系列过程,

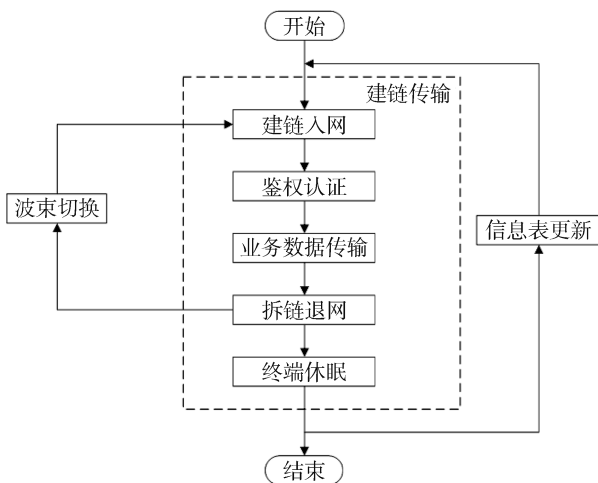


图 8 测控通信业务流程

Fig. 8 Tiantong TT&C work flow

具体步骤如下:

① 终端在运行过程中根据当前位置决定是否驶入波束覆盖区。如果进入波束覆盖区, 从存储信息中获取该波束的广播信息, 唤醒协议, 尝试建链过程;

② 为了保证系统安全性以及终端合法性, 测控网关和核心网签约服务器需要对终端进行鉴权认证。

③ 鉴权认证完成之后, 通过空口链路进行业务数据传输;

④ 网络侧判断业务传输由前一个业务信道切换到下一个业务信道之后, 在前一个业务信道发

起拆链退网流程。

⑤ 如果未进入波束覆盖区，则终端进行休眠，停留在低功耗状态。

3.1.2 波束切换

天通一号卫星采用多馈源在地面形成 109 个波束覆盖我国国土、领海及周边地区。低轨卫星运行在 500 km~1 000 km 左右的轨道高度，大概数十

秒就会发生一次波束切换。109 个波束两两相邻的波束都有交叠区，约有几十至上百公里，按低轨卫星运行速度，穿越交叠区需要几秒到十几秒。测控终端离开交叠区进入非驻留波束时需要切换，这个切换过程可以根据飞行轨迹在交叠区完成，如图 9 所示。整个切换过程采用双通道交替的工作模式。

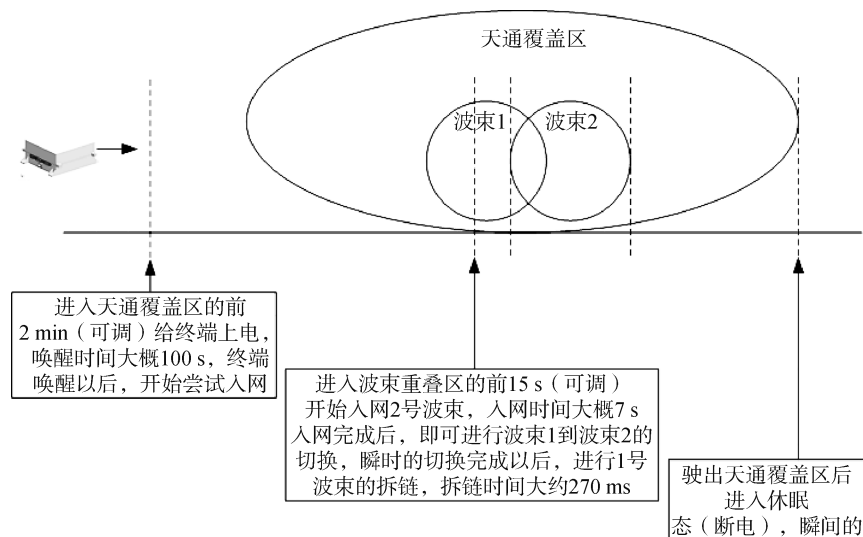


图 9 波束切换流程

Fig. 9 Communication beam switching process

3.1.3 信息表更新

天通测控终端根据接收的星历数据实时更新波束覆盖信息表，包括进出时间、波束号以及对应广播信息等。信息表更新时机如下：

① 航天器平台每天定时向中继终端发送星历数据；

② 航天器轨道变化后，航天器平台立即向中继终端发送最新的星历数据；

③ 地面遥控注入星历数据后，航天器平台立即向中继终端发送。

4 典型应用场景

4.1 测控服务

当用户星选择天通系统支持天基测控任务时，若测控目标在天通卫星可视空域，根据用户星星历计算空域覆盖波束序列，接入天通卫星通信系统进行任务支持。整个过程通过天通卫星网络与地面运营商通信网络的配合实现数据链路的贯通，如图 10 所示。

① 用户星测控中心进行测控

用户星经过天通卫星进行数据中继将遥测数据落地到天通民用信关站，信关站再转发数据到云端的测运控支撑平台进行集中处理或中转，数据最终经过地面运营商网络到达用户星测控中心；反方向则为遥控指令传输路径。

② 地面移动终端用户进行测控

用户星遥测数据经天通卫星落地到天通民用信关站，再经云端的测运控支撑平台转发至地面移动终端用户；反向则为遥控指令传输路径。

地面移动终端用户管理的遥测遥控数据可能为低安全的部分测控数据，同时须经过用户星测控中心的授权。此场景需要地面移动网络覆盖终端用户。

③ 天通终端用户进行测控服务

依托天通测控网元和天通现有移动业务通信能力提供测控服务，用户星遥测数据经天通卫星落地到天通民用信关站后，经过相关网元的鉴权和认证，再回传给天通卫星，最后通过天通业务段链路到达天通终端用户。同样，此场景须经过

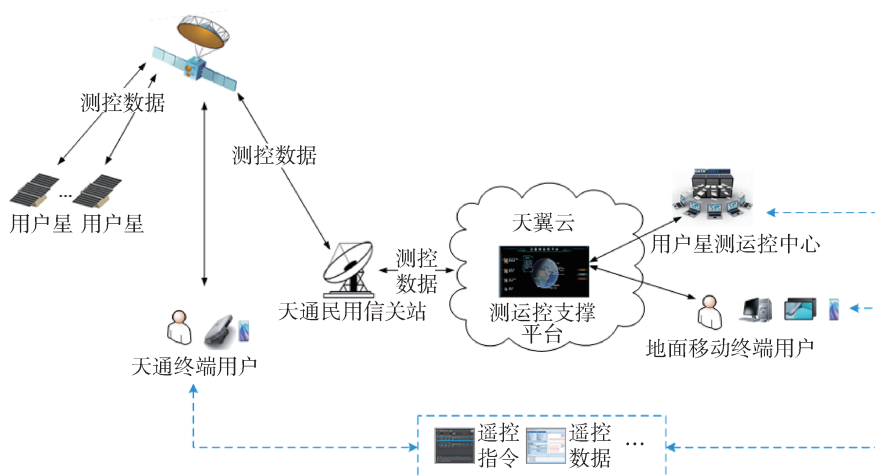


图 10 测控应用场景

Fig. 10 TT&C application scenarios

用户星测控中心的指定测控内容授权, 可完全不用考虑地面移动网络的覆盖。

4.2 低速数据中继服务

目前, 卫星应用场景正在朝着通导遥一体化的方向发展, 主要任务是提升天基遥感信息实时传输到用户智能终端的服务能力, 通过“天基信

息上手机”, 为用户提供便捷、泛在的通信、导航、遥感信息服务^[6]。结合系统自身能力, 天通卫星可在各种低速数据中继服务场景中提供支撑, 一定程度上达到应用场景融合的目的, 如图 11 所示。

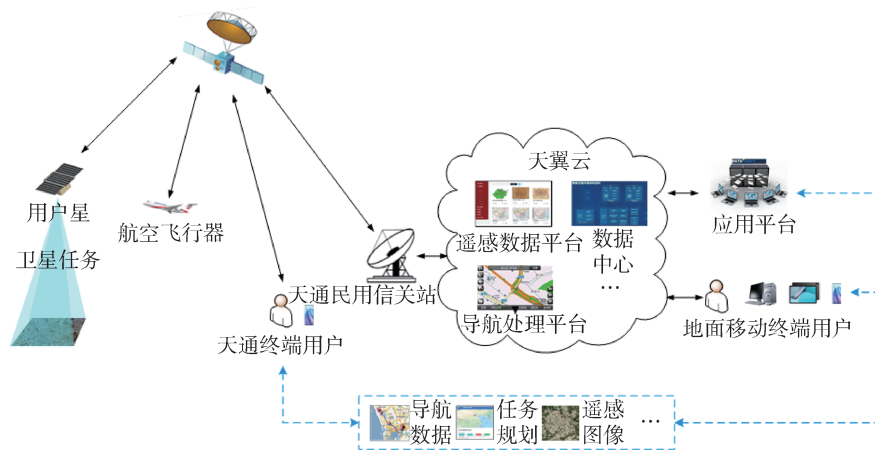


图 11 低速中继应用场景

Fig. 11 Low rate data communication relay application scenarios

低速数据中继服务主要针对各种空中平台和中低轨卫星, 比较典型的应用场景包括:

① 遥感图像下传

卫星具备一定的星上遥感图像处理能力, 通过在轨特征数据提取和遥感图片裁剪, 最终以缩略图的形式将其通过天通卫星中继快速传回地面应用平台、地面移动终端用户或直接传给天通终端用户, 实现遥感数据的实时或准实时获取。

② 通航平台管控

由于通过双通道模块解决了高速运动状态下的跨波束通信不间断的问题, 可以在通航平台场景中进行广泛的应用, 支撑民航建立基于天通网络的航空数据链通信、航空应急报警等各类实时通信系统, 保障地面蜂窝网无法覆盖的偏远地区无人机通信以及大尺域区域的综合状态管控任务等。

③ 应用场景融合

将各类卫星资源统一整合,并充分发挥卫星通信网络作为地面通信网络的补充、延伸作用,大力拓展卫星通信在全域感知、应急保障通信、立体化移动通信、偏远地区公众业务等应用场景及大时空尺度下的通信服务等应用,实现卫星和地面通信网络挖潜补全、提质增效,提供全区域、全维度和全业务的泛在服务^[17]。

5 结束语

利用天通卫星为近地航天器提供中继测控服务,每日覆盖次数为10次左右,每次持续时长约为400 s,完全能够满足中低轨航天器长期测控需求,而且得益于天通作为移动通信卫星系统的优势,其资源申请较传统的中继卫星更具有灵活性,还可实现海量用户同时工作和随机接入。通过与地面运营商网络的结合,任务场景更加丰富多样,除提供基础的天基测控服务外,还可进行多种低速数据中继服务,如卫星遥感缩略图实时下传、通航平台管控和其他融合应用等。基于天通卫星系统的天基测控技术必将在未来航天领域中发挥越来越重要的作用。

参考文献

- [1] 李艳华,卢满宏.天基测控系统应用发展趋势探讨[J].飞行器测控学报,2012,31(4):1-5.
LI Yanhua, LU Manhong. Trends of applications of space-based TT & C system[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(4): 1-5.
- [2] DAVID W H, KENNETH G. Commercial use of NASA's tracking and data relay satellite system for international communications[J]. Acta Astronautica, 1995, 37(1): 395-406.
- [3] HOGIE K, FLANDERS B, PAULSON D, et al. Low-cost receiver development for TDRSS DAS sustainment and cubesat applications[C]//IEEE Aerospace Conference, 2016: 1-7.
- [4] VOSS H D. TSAT Globalstar ELaN-5 extremely low earth orbit satellite[C]//28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite, 2014: 156-165.
- [5] VOSS H D, DAILEY J F, ORVI M B. Globalstar link: From reentry altitude and beyond[C]//30th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, 2016: 112-119.
- [6] 谢羿,欧阳佑,冉旭东,等.基于北斗全球系统的天基测控任务可行性分析[J].无线互联科技,2018,15(9):3-5,29.
XIE Yi, OUYANG Ji, RAN Xudong, et al. Analysis on the feasibility of space-based TT&C mission based on Beidou global system[J]. Wireless Internet Technology, 2018, 15(9): 3-5, 29.
- [7] 陈林,高帅和,刘武广,等.基于北斗导航系统的全球天基测控技术[J].电子信息对抗技术,2018,33(4):44-48.
CHEN Lin, GAO Shuaihe, LIU Wuguang, et al. Global space-based measurement and control based on Beidou navigation satellite system[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2018, 33(4): 44-48.
- [8] 周其辉,王海源,钟小荣,等.一种基于北斗三号短报文的天基全球化测控方法[C]//第十二届中国卫星导航年会论文集,2021:1-5.
ZHOU Qihui, WANG Haiyuan, ZHONG Xiaorong, et al. A global TT&C scheme based on Beidou-3 short message[C]//The 12th China Satellite Navigation Conference(CSNC), 2021: 1-5.
- [9] 关新锋,范竞往,王小岛,等.一种基于北斗RDSS短报文的天基测控方法[J].航天器工程,2019,28(3):20-26.
GUAN Xinfeng, FAN Jingwang, WANG Xiaodao, et al. A space-based TT&C method based on Beidou RDSS short message[J]. Spacecraft Engineering, 2019, 28(3): 20-26.
- [10] 李于衡,孙海忠,王旭康.近地卫星天基测控现状研究[J].无线电工程,2020,50(1):1-9.
LI Yuheng, SUN Haizhong, WANG Xukang. Research on space-based TT&C service for LEO satellites[J]. Radio Engineering, 2020, 50(1): 1-9.
- [11] 刘培杰,焦义文,吴涛,等.在轨航天器多目标测控现状与发展趋势[J].电讯技术,2021,61(10):1316-1323.
LIU Peijie, JIAO Yiwu, WU Tao, et al. Present status and development trends of multi-spacecraft TT&C[J]. Telecommunication Engineering, 2021, 61(10): 1316-1323.
- [12] 单长胜,李于衡,孙海忠.中继卫星支持海量航天器在轨测控技术[J].中国空间科学技术,2017,37(1):89-96.
SHAN Changsheng, LI Yuheng, SUN Haizhong. Tracking and data relay satellite system for huge number satellite control[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37(1): 89-96.
- [13] 刘保国,吴斌.中继卫星系统在我国航天测控中的应用[J].飞行器测控学报,2012,31(6):1-5.
LIU Baoguo, WU Bin. Application of TDRSS in Chinese space TT&C[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2012, 31(6): 1-5.

- [14] 魏伟, 陈三楚, 敦怡, 等. 用于卫星入轨段测控的箭载天基测控中继系统[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(6): 64-70.
WEI Wei, CHEN Sanchu, DUN Yi, et al. Space-based TT&C relay system of launch vehicle during satellite orbit entry[J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(6): 64-70.
- [15] 中国电信集团卫星通信有限公司. 基于高轨移动通信卫星的低轨航天器测控方法和系统: CN114079500A [P/OL]. 2022.02.22. <https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/documents/detail?prevPageTit=changgui>.
- [16] 李德仁, 沈欣. 我国天基信息实时智能服务系统发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(2): 1-6.
LI Deren, SHEN Xin. Research on the development strategy of real-time and intelligent space-based informa-

tion service system in China[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(2): 1-6.

- [17] 杨岭才. 关于快速形成我国天地一体通信运营能力的思考[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 1-10.
YANG Lingcai. Thoughts on the rapid formation of China's space-ground integrated communication operation capability[J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 1-10.

[作者简介]

- 牛攀峰 1986年生, 硕士, 工程师。
陈 宏 1982年生, 硕士, 技术总师。
齐 浩 1996年生, 硕士, 工程师。

(本文编辑: 杨秀丽)