

载人航天天基测控通信探析

曹正蕊, 张国亭, 刘保国, 刘贤锋, 冯志远
(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

摘要: 梳理了国内外空间站天基测控通信应用的概况, 针对近地载人航天对测控通信系统的高要求, 分析提出中继卫星系统的发展建议, 以及导航卫星和低轨卫星星座系统的特点优势。调整中继卫星轨位、增加中继激光链路、采用全景波束全时监控模式, 以及导航卫星和低轨卫星星座作为必要补充等途径, 可为载人航天测控通信提供更好的灵活性、可用性和效费比。为载人航天天基测控通信发展提供了参考依据。

关键词: 载人航天; 天基测控; 中继卫星; 导航卫星; 低轨卫星星座

中图分类号: V556; TN927 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)05-0001-07

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230604001

引用格式: 曹正蕊, 张国亭, 刘保国, 等. 载人航天天基测控通信探析[J]. 遥测遥控, 2023, 44(5): 1-7.

Study on space-based TT&C and communication for manned space flight

CAO Zhengrui, ZHANG Guoting, LIU Baoguo, LIU Xianfeng, FENG Zhiyuan
(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: The space-based TT&C and communication application for manned space flight are summed up, both at home and abroad. The development of tracking and data relay satellite system is proposed, and the advantages of navigational satellite and LEO satellite constellation systems are discussed, in response to the high requirements of TT&C for China's manned space flight. Orbital positions adjustment and deploying laser link on tracking and data relay satellite system, and using S-band multiple access (SMA) panoramic beam to monitor manned spacecraft at anytime and anyplace are needed. Navigational satellite and LEO satellite constellation systems are necessary supplements. These space-based TT&C and communication approaches are more flexible, usable and higher cost-effectiveness for manned space flight. The conclusion can provide reference bases for subsequent development of the space-based TT&C and communication for manned space flight.

Keywords: Manned space flight; TT&C; Tracking and data relay satellite; Navigational satellite; LEO satellite constellation

Citation: CAO Zhengrui, ZHANG Guoting, LIU Baoguo, et al. Study on space-based TT&C and communication for manned space flight [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(5): 1-7.

引 言

载人航天任务对测控通信系统的覆盖率、测量精度、数据传输速率、可靠性、实时性等均提出了高要求^[1]。天基测控具有覆盖范围大、通信频带宽、反向链路容量大等特点, 是测控系统发展的必然趋势^[2], 以中继卫星系统为主体、利用导航卫星测定轨的天基测控通信已在载人航天运载火箭升空、交会对接、载人航天器在轨运行、飞船再入返回、应急救援等方面均得到了应用^[3-8]。后续载人航天系列发射任务会更加频繁, 航天员在轨时间更长, 进行的各类操作与科学实验更多,

对长时连续测控、高速数传、多目标同时测控、资源高效调度等要求^[1]也更高。

近十年来, 天基测控和通信技术不断提升, 载人航天天基测控通信系统不断发展, 文献[9-14]重点关注中继卫星系统的多址、全景波束技术和星间激光链路技术; 中继卫星 SMA(S 频段多址, S-Band Multiple Access)资源已在载人空间站中得到应用^[15,16]; 文献[17-20]则对导航卫星系统的调制及跟踪技术, 以及基于导航系统的全球天基测控技术进行了研究; 文献[21]和文献[22]综述了低轨卫星星座系统的情况, 文献[23]提出了基于互联网星座进行飞船测控的构想。随着将使用在中继卫

星、导航卫星、低轨卫星星座的天基测控通信系统应用于低轨卫星^[24-35]和运载火箭^[36-38]的研究不断深入, 适合于近地载人航天测控通信的新型天基平台将更加多样有效, 可更好地满足任务需求, 天基测控通信必然将在载人航天中得到更加广泛的应用。

本文在归纳国际空间站中继测控通信支持和导航卫星系统应用概况的基础上, 对我国近地载人航天天基测控通信应用现状进行了梳理和需求分析, 提出了满足载人航天高覆盖率和数传速率需求的中继卫星系统发展建议, 以及中继卫星全景波束支持载人航天器的全时监控应用模式, 基于导航卫星和低轨卫星星座的特点优势, 讨论了进一步应用于载人航天的展望。研究成果对于载人航天天基测控通信发展具有一定的参考和借鉴意义。

1 国际空间站天基测控通信概况

国际空间站(International Space Station, ISS)天基测控通信手段主要包括覆盖全球的4个数据中继卫星系统^[39]和美国全球定位系统(Global Position System, GPS)^[40]。

1.1 中继测控通信支持

ISS与各成员国航天中心间的通信使用美国军民两用的跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)实现。TDRSS也称为天基网(Space Network, SN)^[41,42], 一般通过S频段和Ku频段通信链路^[43-45]为ISS在轨运行提供近乎连续的测控覆盖。对于ISS、航天飞机等航天器, 利用美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)天基网后, 其轨道覆盖率由过去地基网的15%左右提高到85%以上。通过TDRSS为ISS提供测控的示意图如图1所示。

各合伙国如想直接接收来自空间站的数据, 也可以直接建立自己的中继卫星系统。其中, 日本选择使用2020年发射的2枚数据中继卫星接替2017年退役的数据中继试验卫星与其“希望”号试验舱进行通信; 俄罗斯则将TDRSS作为其备份通信手段, 主要使用自己的测控设备实现ISS对应舱段的监控; 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)也使用数据中继试验卫星^[46]保障与国际空间站的通信。

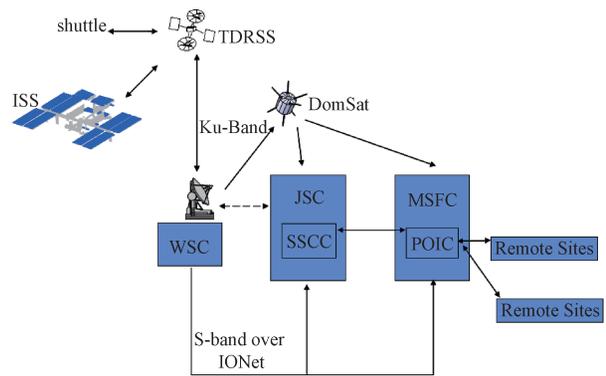


图 1 ISS 中控示意图

Fig.1 Sketch of TDRSS TT&C for ISS

1.2 导航卫星系统应用

全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)在任意气象条件下可以提供覆盖全球的实时、连续、高精度的位置和时间信息, 也是载人航天器重要的导航定位手段^[8]。ISS、航天飞机等使用全球定位系统(GPS)进行自身位置测量; 日本、欧洲各国使用GPS作为载人航天器交会对接绝对定位和相对测量的手段之一。

2 我国载人航天测控通信应用现状及需求

2.1 天基测控通信应用现状

针对载人航天任务, 我国现已构建起了规模适度、功能全面、技术先进的陆海天基一体化测控通信体系。天基测控通信应用主要包括中继卫星和导航卫星应用两方面。

2.1.1 中继卫星应用

天基中继卫星系统支持载人航天应用效能主要体现在将我国载人航天测控通信覆盖率从不足20%提高至80%以上^[47]。

载人航天发射(返回)任务中, 海上测控段部分型号同时使用测量船和中继卫星系统, 部分型号仅使用测量船或中继卫星系统。载人飞船发射, 部署1艘测量船为主承担飞船入轨段测控任务, 中继卫星与测量船搭接完成飞船测控; 货运飞船发射, 前期由测量船为主承担飞船入轨段测控任务, 自2022年开始, 后续任务测量船不再参试, 由中继卫星独立承担运载火箭、飞船入轨段测控任务; 空间站舱段发射, 部署1艘测量船承担运载火箭、空间站舱段入轨段测控任务, 中继卫星与测量船搭接完成舱段测控任务^[47]。

载人航天器测控以天基测控手段为主, 地基

测控手段重点提升关键事件的测控覆盖率和可靠性。入轨初期至交会对接期间,综合利用陆海天基测控资源进行支持。航天员出舱等关键事件及其任务准备,每圈需要由2~3颗中继卫星进行测控通信,地面测控站适当补充。航天员日常工作、平台日常操作、一般性空间应用及各领域事件,每圈由1~2个中继Ka频段波束进行测控通信,并增加二代中继卫星返向SMA链路常态支持^[48]。

2.1.2 导航卫星应用

我国载人航天器也配置了GNSS设备^[8]。载人航天器目前可同时处理我国北斗(BD)二代卫星定位系统、GPS和格洛纳斯(GLONASS)卫星定位信号,优先选择BD导航卫星观测量^[49]。载人航天较高程度利用导航卫星系统开展轨(弹)道测量,应用效益明显,梦天舱利用北斗短报文作为应急测控备份手段。北斗导航定位是载人航天运载火箭发射、航天器在轨运行的通用功能,完成弹道、轨道测量。

2.2 天基测控通信需求分析

后续在空间站运营阶段计划发射光学舱,并按照每年3~5次的总频度发射载人飞船、货运飞船及其他航天器。上述任务均需要天基测控手段支持。基于空间站舱段和飞船目前已上测控通信合作目标,天基测控通信需求主要来自于中继卫星和北斗导航系统。

2.2.1 中继卫星系统

一是增加资源。空间站长期运行阶段,综合考虑航天器天地往返、交会对接、航天员出舱、推进剂补加等关键事件,空间站组合体、光学舱各类载荷数据下传需求,以及各类临时任务与应急处置,对中继资源的需求极大,需增加卫星数量以适应空间站任务长期高可靠测控支持。

二是增大测控通信覆盖率。载人航天全天域、全天时的测控需求要求近100%测控通信覆盖率,需进一步优化轨位以提升中继卫星对载人航天器的覆盖率。

三是提升功能性能。需提高数传速率、加强多目标并行服务能力、缩短接力跟踪切换时间等。空间站光学舱科学数据传输量每天不小于20TB,仅靠中继手段回传;空间站多舱同时工作,需要多目标并行测控支持;中继卫星接力跟踪时,应尽量缩短两星之间的任务切换时间,为入轨初期与关键事件协同工作程序优化奠定基础。

四是资源保障方面,需强化资源申请时效性和实现多链路灵活配置。为了满足应急处置的高时效性要求,需优化中继资源的应急申请与链路调用流程;由于空间站舱段一般均配置KSA(Ka-band Single Access, Ka频段单址)及宽、窄波束SSA(S-band Single Access, S频段单址)多条链路,需实现多链路灵活配置,支持多频段多链路自由组合,提高飞控实施灵活性。

2.2.2 北斗导航系统

对于导航卫星的需求主要在测定轨。北斗卫星导航服务在范围、多目标支持能力、定位精度等方面已基本满足载人航天天基测控任务需求。北斗导航卫星携带的短报文终端可为载人航天提供中继卫星以外的天基测控手段,该手段可提供100%覆盖率的全域测控服务,大大提升了在轨测控安全性,拓展了在轨应用范围。北斗全球短报文的模式为用户航天器通过L频段链路接入北斗MEO(Medium Earth Orbit, 中地球轨道)卫星,进而基于北斗星间链路网络实现与境内端到端双向报文通信。14颗MEO卫星搭载全球短报文通信载荷,实现全球范围内双重覆盖,已基本满足梦天舱等载人航天的应急测控需求。

3 载人航天天基测控通信发展建议

3.1 中继卫星测控通信

3.1.1 提升测控通信覆盖率

目前有4颗一代和3颗二代中继卫星在轨工作,空间站上的中继终端设备与之配合,能够实现大于90%的测控通信覆盖率^[1]。为了进一步提高覆盖率,从轨位分布不均匀入手,短期内以国内站可见为原则进行轨位布局优化,减轻中继终端使用压力。以最东轨位向东扩展10°和15°为例进行计算,最西和最东轨位中继卫星对空间站的测控通信覆盖情况见表1。可见,空间站单舱三轴对地飞行时,覆盖率分别提高2%和4%(该数据同样适用于载人飞船、货运飞船、光学舱),最长中断时间分别减少超3分钟(204 s)和5分钟(320 s);空间站三舱组合体三轴对地飞行时,最长中断时间分别减少了超3分钟(199 s)和将近6分钟(346 s),向东扩展14°时能够实现100%连续测控通信覆盖。

3.1.2 提高高速数传速率

目前二代中继卫星单星数传速率最高为4×

表 1 中继卫星对空间站的测控通信覆盖
Fig. 1 TT&C coverage of different TDRS orbit positions

舱体构型		空间站单舱			空间站三舱	
飞行姿态		三轴对地	惯性	轨道系正向	三轴对地	轨道系正向
覆盖率	不东扩	90.16%	67.81%	89.48%	98.99%	96.67%
	东扩 9°	92.73%	68.74%	92.04%	99.72%	98.43%
	东扩 14°	94.12%	69.36%	93.44%	100%	99.16%
平均中断时间	不东扩	531.4 s	1 738.3 s	568.1 s	54.54 s	179.82 s
	东扩 9°	392.6 s	1 688 s	429.8 s	15.12 s	84.78 s
	东扩 14°	317.5 s	1 654.6 s	354.2 s	0 s	45.36 s
最长中断时间	不东扩	735 s	2 548.2 s	918.4 s	346 s	452.3 s
	东扩 9°	530.8 s	2 549.6 s	673.2 s	147.4 s	297.4 s
	东扩 14°	415.3 s	2 548.2 s	527.2 s	0 s	197.7 s

600 Mbit/s。为了进一步减少传输时间和提高传输效率, 迫切需要大幅提升高速链路的传输速率, 发展以多目标星间激光高速链路为标志的下一代中继系统, 返向单路速率提升至 2.5 Gbit/s。

3.1.3 构建全时监控系统

目前载人航天主要采用申请计划模式使用中继 KSA/SSA/SMA 连续业务资源。二代中继卫星配置了星间多址天线, 通过地面波束形成设备, 系统能够实现蜂窝状态常驻静态波束的全球覆盖, 可为上千个用户提供 SMA 短报文服务。用户无需进行申请计划操作, 即可随时随地接入系统。利用航天器在轨健康管理技术和基于 SMA 的全景波束、空间网络接入技术, 可构建载人航天器全时监控系统^[50], 支持随遇接入、快速抢救及问题排查。这种模式应用于航天员日常工作、平台日常操作、一般性空间应用及各领域事件, 可解决同时服务的低速用户数量不足问题。全景波束支持多目标监控, 可大幅节省中继单址波束资源; 随遇接入由航天员在轨发起, 可提高资源申请时效性。

3.2 北斗导航测控通信

北斗卫星导航系统不仅具备为用户提供导航定位和全球短报文测控的能力, 还可通过星间链路提供测控数据传输能力。北斗三号 Ka 相控阵星间链路在承载系统自身星间测量、数据传输等功能的基础上, 将剩余链路、时隙等资源通过时分方式为高价值航天器用户提供测控支持服务。目前北斗卫星已搭载的激光星间链路载荷, 可构建激光星间链路在轨试验系统, 具备为外部用户提供高速数传服务的能力。用户端需配置星间链路

终端, 使用前需提报需求, 使用时需服从北斗系统规划, 支持一次申请, 周期性、定制性服务。

受当前阶段北斗星间链路系统容量和对内服务资源占用的限制, 对外服务用户容量有限, 少量高价值航天器用户可以使用北斗星间链路测控数传支持服务, 但其作为高轨天基测控通信的手段之一, 也能进一步满足近地载人航天在天基资源、应急测控、高速数传等方面的需求。

3.3 低轨卫星星座测控通信

与地球同步轨道卫星相比, 低轨卫星星座具有如下优势: 一是覆盖面积广、多目标支持能力强, 全球覆盖、高纬度地区无盲区、地形遮挡效应弱、空间段组网灵活快速、单星信道容量大, 合理设计可满足载人航天多任务、多目标并行中远程测控通信业务需求; 二是传输延迟低、通信效率高, 在配备星间链路情况下, 1 000 km 左右轨道高度的低轨卫星星座通信传输时延与地面光缆接近, 通常不超过 50 ms, 较小的通信延时能够有效提升 IP 网络和测控数据链应用效能; 三是技术体制新、应用服务灵活, 未来低轨通信卫星将能够支持数字透明转发处理(DTP)、激光星间链路、星上自主处理、星上路由交换等一系列智能化技术, 在测控通信技术体制、任务模式切换、用户灵活支持方面具有较大潜力; 四是应用成本低、使用效费比高, 在实现一定全球测控覆盖率的前提下, 可以显著地减少测控终端和天线的体积、重量和功耗^[35], 从而有效降低成本, 提高使用效益。

利用以上特点优势, 基于低轨卫星星座的天基测控系统能够很好地解决目前地基和中继测控

覆盖范围有限、多目标测控能力不足、资源保障困难、使用成本较高的问题,为天基测控提供了良好的发展机会。未来,载人航天可发展基于低轨宽带通信卫星星座的天基测控数传技术体制和终端,作为现有同步轨道卫星通信系统的必要补充,提升天基测控通信保障能力。

4 结束语

载人航天中继测控通信系统已成为完成测控任务的主要方式,可通过调整中继卫星轨位提高覆盖率、下一代系统增加激光链路提高数传速率、采用全景波束支持载人航天器全时监控等方式进一步满足载人航天对测控通信系统的高要求。另外,导航卫星和低轨卫星星座系统以其特有的优势,可为载人航天测控通信提供更好的灵活性、可用性和效费比,可以作为中继卫星系统的必要补充,最大化发挥载人航天天基测控通信效益。

参考文献

- [1] 王忠贵. 载人空间站工程测控通信系统挑战和机遇[J]. 飞行器测控学报, 2013, 32(4): 281-285.
WANG Zhonggui. Challenges and opportunities facing TT&C and communication systems for China's manned space station program[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2013, 32(4): 281-285.
- [2] 刘靖, 宋岳鹏. 运载火箭天基测控S和Ka频段链路分析[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4): 1003-1008.
LIU Jing, SONG Yuepeng. S and Ka band link analysis of space-based launch vehicle TT&C[J]. Computer Measurement & Control, 2014, 22(4): 1003-1008.
- [3] 王家胜, 齐鑫. 为载人航天服务的中国数据中继卫星系统[J]. 中国科学, 2014, 44(3): 235-242.
WANG Jiasheng, QI Xin. China's data relay satellite system served for manned spaceflight[J]. Sci Sin Tech, 2014, 44(3): 235-242.
- [4] 孙宝升. 我国中继卫星系统在交会对接任务中的应用[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(3): 183-187.
SUN Baosheng. Application of China's TDRSS in space rendezvous and docking missions[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2014, 33(3): 183-187.
- [5] 易予生, 夏奕, 张璐, 等. 一种提高我国空间站中继测控覆盖率的方法[J]. 航天器工程, 2014, 23(2): 7-11.
YI Yusheng, XIA Yi, ZHANG Lu, et al. Method to improve TT&C coverage rate of relay antenna for Chinese space station[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(2): 7-11.
- [6] MEHRA N, SINGH R K, BERA S C. Mitigation of communication blackout during re-entry using static magnetic field[J]. Progress in Electromagnetics Research B, 2015, 63: 161-172.
- [7] 李于衡, 罗斌, 郭文鹤, 等. 中继卫星Ka频段支持飞船再入返回通信可行性分析[J]. 载人航天, 2015, 21(6): 582-588.
LI Yuheng, LUO Bin, GUO Wenge, et al. Feasibility analysis of using Ka-band of TDRS to support wireless communication for spacecraft reentry[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(6): 582-588.
- [8] 赵思浩, 郭佩, 张伟. 北斗卫星导航(区域)系统星座对中国载人航天器的服务能力仿真分析[J]. 载人航天, 2014, 20(2): 173-177.
ZHAO Sihao, GUO Pei, ZHANG Wei. Simulation and analysis on service ability of BeiDou navigation satellite (regional) system constellation for China's manned spacecrafts[J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(2): 173-177.
- [9] 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 system for huge number satellite control[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017, 37(1): 89-96.
- [10] ZHANG X, ZHU L, LI T, et al. Multiple-user transmission in space information networks: Architecture and key techniques[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 26(2): 17-23.
- [11] 曹正蕊, 孙宝升, 姚艳军, 等. 支持航天器全时监控的中继卫星全景波束技术[J]. 宇航学报, 2020, 41(11): 1434-1439.
CAO Zhengrui, SUN Baosheng, YAO Yanjun, et al. TDRS SMA for spacecraft on-orbit control[J]. Journal of Astronautics, 2020, 41(11): 1434-1439.
- [12] NASA/GSFC. Tracking and data relay satellite-missions enabled[EB/OL]. (2014-10-22) [2015-06-08]. <http://tdrs.gsfc.nasa.gov/tdrs/Missions-Enabled.html>.
- [13] 赵静, 赵尚弘, 李勇军, 等. 星间激光链路数据中继技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 3103-3110.
ZHAO Jing, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, et al. Advance on data relay technology for inter-satellite laser links[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(11): 3103-3110.
- [14] 张若凡, 张文睿, 张学娇, 等. 高轨卫星激光中继链路研究现状及发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 1-13.

- ZHANG Ruofan, ZHANG Wenrui, ZHANG Xuejiao, et al. Research status and development trend of high earth orbit satellite laser relay links[J]. *Advances in Laser and Optoelectronics*, 2021, 58(5): 1-13.
- [15] 王忠贵, 万鹏, 丁溯泉, 等. 宽波束中继技术在空间站任务中的应用研究[J]. *飞行器测控学报*, 2015, 34(2): 140-146.
- [16] 刘保国, 万鹏. 载人空间站中继卫星多址波束应用[J]. *国际太空*, 2021, 510(6): 14-19.
- [17] 李锐, 曾大治, 陆明泉. 卫星导航 MSK 扩频调制及跟踪技术研究[J]. *北京理工大学学报*, 2014, 34(4): 421-426.
- LI Rui, ZENG Dazhi, LU Mingquan. Study on MSK modulation and tracking technique for satellite navigation systems[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2014, 34(4): 421-426.
- [18] SU Chenggeng, GUO Shuren, ZHOU Hongwei. A substitute for BOC modulation based on SS-CPM[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 51(6): 942-950.
- [19] SU Chenggeng, GUO Shuren, ZHOU Hongwei, et al. Optimum waveform designed for GNSS signals based on PSWF[C]//2012 Proceedings of China Satellite Navigation Conference, 2012: 59-68.
- [20] 颜晓星, 车明, 高小娟. 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): 62-68.
- YAN Xiaoxing, CHE Ming, GAO Xiaojuan. Design of re-liable remote communication system based on BeiDou satellite[J]. *Electronic Information Countermeasure Technology*, 2018, 33(4): 62-68.
- [21] 王子剑, 杜欣军, 尹家伟, 等. 低轨卫星互联网发展与展望[J]. *电子技术应用*, 2020, 46(7): 49-52.
- WANG Zijian, DU Xinjun, YIN Jiawei, et al. Development and prospect of LEO satellite Internet[J]. *Electronic Technique*, 2020, 46(7): 49-52.
- [22] CALEB HENRY. LEO and MEO broadband constellations mega source of consternation[EB/OL]. [2019-05-13]. <http://spacenews.com/divining-what-the-stars-hold-in-store-for-broadband-megaconstellations>.
- [23] 何宇, 王丹, 魏传锋. 一种基于互联网星座的载人飞船测控模式构想[J]. *航天器工程*, 2020, 31(5): 9-14.
- HE Yu, WANG Dan, WEI Chuanfeng. TT&C modes for manned spacecraft based on LEO internet constellation[J]. *Spacecraft Engineering*, 2020, 31(5): 9-14.
- [24] Goddard Space Flight Center. Space Network User's Guide (SNUG) [EB/OL]. (2012-08-03) [2015-06-22]. <http://esc.gsfc.nasa.gov/assets/files/450-SNUG.pdf>.
- [25] 孙宝升, 耿淑敏, 尹曙明, 等. 中继卫星 S 频段多址系统应用服务模式[J]. *飞行器测控学报*, 2016, 35(1): 1-9.
- SUN Baosheng, GENG Shumin, YIN Shuming, et al. Application modes of TDRS SMA system[J]. *Journal of Spacecraft TT & C Technology*, 2015, 35(1): 1-9.
- [26] 王家胜. 中国数据中继卫星系统及其应用拓展[J]. *航天器工程*, 2013, 22(2): 1-6.
- WANG Jiasheng. China's data relay satellite system and its application prospect[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, 22(2): 1-6.
- [27] HOGIE K, FLANDERS B, PAULSON D. Low-cost receiver development for TDRSS DAS sustainment and cubesat applications[C]//IEEE Aerospace Conference, 2016: 121-128.
- [28] 黄缙, 刘希刚, 景泉, 等. 太阳同步轨道卫星中继测控天线覆盖特性优化研究[J]. *航天器工程*, 2015, 24(1): 90-96.
- HUANG Jin, LIU Xigang, JING Quan, et al. Study on coverage performance optimization for relay TT&C antenna of SSO satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2015, 24(1): 90-96.
- [29] 汪汇兵, 郑作亚, 欧阳斯达, 等. 天基中继传输在陆地遥感卫星影像获取中的应用分析[J]. *天地一体化信息网络*, 2020, 1(2): 103-108.
- WANG Huibing, ZHENG Zuoya, OUYANG Sida, et al. Application analysis of space-based relay in land resources satellite image acquisition[J]. *Space-Integrated-Ground Information Networks*, 2020, 1(2): 103-108.
- [30] 徐君, 叶钊, 黄敏, 等. 低轨卫星对中继卫星可视性计算方法及应用[J]. *航天器工程*, 2022, 31(4): 32-38.
- XU Jun, YE Zhao, HUANG Min, et al. Calculation method and application of visibility of TDRS by LEO satellite[J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(4): 32-38.
- [31] 谢羿, 欧阳佶, 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, (9): 3-5.
- 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(9): 3-5.
- [32] 刘莉, 赵佳媚, 王超杰. 北斗卫星系统在空间飞行器天基测控中的应用研究[J]. *计算机测量与控制*, 2018, 26(6): 107-109.
- LIU Li, ZHAO Jiamei, WANG Chaojie. Application research on BDS in spacecraft space-based TT&C[J]. *Computer Measurement & Control*, 2018, 26(6): 107-109.
- [33] 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): 20-25.
- 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): 20-25.
- [34] 朱向鹏, 党超, 刘涛, 等. 基于北斗报文通信系统的低轨航天器天基测控设计[J]. 航天器工程, 2020, 29(5): 19-25.
- [35] 李于衡, 孙海康, 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 Haikang, WANG Xukang. Research on space-based TT&C service for LEO satellite[J]. Radio Engineering, 2020, 50(1): 1-9.
- [36] 翟高伟, 梁晨光, 赵锦瑾, 等. 基于天链卫星的箭载Ka频段中继用户终端设计与实现[J]. 宇航总体技术, 2020, 4(4): 7-14.
ZHAI Gaowei, LIANG Chenguang, ZHAO Jinjin, et al. The design and implementation of general Ka-band terminal based on TDRSS[J]. Stronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(4): 7-14.
- [37] 王洋, 宫长辉, 张金刚, 等. 高码率全程天基测控关键技术研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2020(4): 112-116.
WANG Yang, GONG Changhui, ZHANG Jingang, et al. Research on key technologies of high-speed TT&C based on TDRSS over vehicle's whole flight[J]. Missiles Space Vehicles, 2020(4): 112-116.
- [38] 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.
- [39] 杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势[J]. 电讯技术, 2016, 56(1): 109-116.
YANG Hongjun. Latest development progress and trends of foreign data relay satellite system[J]. Telecommunication Engineering, 2016, 56(1): 109-116.
- [40] 郭丽红. “国际空间站”飞行控制及测控通信支持分析[J]. 国际太空, 2016, 454(10): 46-53.
GUO Lihong. Analysis on flight control and TT&C support of ISS[J]. Space International, 2016, 454(10): 46-53.
- [41] MAI T. Tracking and data relay satellite TDRS fleet[J]. 2019. https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/tdrs_fleet
- [42] CAMPBELL A. Tracking and Data Relay Satellite TDRS[J]. 2017. https://www.nasa.gov/directorates/heo/can/services/networks/tdrs_main
- [43] TORAL M, HECKLER G, POGORELC P, et al. Payload performance of third generation TDRS and future services. In: Proceedings of the 35th AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Trieste: AIAA, 2017: 1-9.
- [44] 郝玉涛, 刘保国, 王瑞军, 等. 国际空间站测控通信系统研究[J]. 载人航天, 2014, 20(2): 165-172.
HAO Yutao, LIU Baoguo, WANG Ruijun, et al. Research on TT&C system in international space station[J]. Manned Spaceflight, 2014, 20(2): 165-172.
- [45] 王瑞军, 李璐. 我国空间站运行的测控通信工作模式初探[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(2): 99-105.
WANG Ruijun, LI Tang. On operation modes of TT&C and communication[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2014, 33(2): 99-105.
- [46] BOBROVSKIY S, BARRIOS R, GIGGENBACH D, et al. Efal :Edrs feederlink from antarctic latitudes system architecture and operations concept[C]//International Conference on Space Optical Systems & Applications, CA, 2014: 1-12.
- [47] 王磊, 姬涛, 郑军, 等. 中继卫星系统发展应用分析及建议[J]. 中国科学, 2022, 52(2): 303-317.
WANG Lei, JI Tao, ZHENG Jun. Investigations and proposals for data relay satellite systems[J]. Science Sinica Technologica, 2022, 52(2): 303-317.
- [48] TANG Da, LI Tang, WAN Peng, et al. Research on the application of TDRSS for manned spacecraft[C]//Lecture Notes in Electrical Engineering, 2023: 673-680.
- [49] 陈晓光, 易予生, 丁凯. 我国载人航天器测控与通信技术发展[J]. 航天器工程, 2022, 31(6): 166-173.
CHEN Xiaoguang, YI Yusheng, DING Kai. Development of TT&C communications technology for China manned spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2022, 31(6): 166-173.
- [50] 孙宝升, 曹正蕊, 丁华. 基于中继卫星多址支持的卫星在轨健康管理模式[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(11): 1203-1206.
SUN Baosheng, CAO Zhengrui, DING Hua. A concept of satellites' health management based on TDRS SMA[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(11): 1203-1206.

[作者简介]

- 曹正蕊 1980年生, 博士, 助理研究员。
张国亭 1976年生, 硕士, 研究员。
刘保国 1969年生, 硕士, 研究员。
刘贤锋 1991年生, 博士, 助理研究员。
冯志远 1975年生, 硕士, 助理研究员。

(本文编辑: 杨秀丽)