0254-6124/2024/44(3)-0592-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WANG Zhenhe, SUN Baosheng, LIU Yonghua, ZHANG Limin, LI Peng, SHANGGUAN Yong, WANG Jian, LI Chao, SHI Jiangbo, YAO Zengli. International Lunar Research Station Communication Based on Satellite Double Relay (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(3): 592–605. DOI:10.11728/cjss2024.03.2023–0129

基于星星双中继的国际月球科研站的全时无缝通信

王振河[1] 孙宝升[2] 刘永桦[3]
张利民[1] 李 澎[1] 上官勇[1] 王 坚[1]
李 超[1] 史江博[1] 姚增利[1]

1(北京遥测技术研究所 北京 100094)

2(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

3(北京航空航天大学电子信息工程学院 北京 100191)

摘 要 2021年中国提出与相关国家、国际组织和国际合作伙伴共同开展国际月球科研站建设的建议, 引起多方广泛关注, 国际月球科研站工程建设按计划顺利推进. 国际月球科研站建设完成后, 与中国地面控制中心间保持全时无缝通信将是重要需求. 中国地面深空测控网设立的国外站, 长期来看可能存在一定风险, 例如降低中国地面深空测控网的可用性, 影响国际月球科研站与地面控制中心间的全时通信. 为此, 根据中国对月探测现状, 借鉴天链中继卫星系统的设计、建设、应用、发展实际, 提出一个“鹊桥–天链”星星双中继通信设想. 从几何可见性角度进行多种条件的覆盖仿真分析, 并从传输体制、链路设计、系统组成、捕获跟踪、工作流程、整体定位等多方面进行研究分析, 初步完成了基于星星双中继的国际月球科研站全时无缝通信研究. 在地面控制中心统一控制下, 通过地面深空测控网、星星双中继的综合利用, 国际月球科研站与地面控制中心间的全时无缝通信将具备完全实现的技术基础. 此外, 该设想也可为地月空间、行星际探测的其他航天器通信提供借鉴, 并可进一步促进中国地基测控网、天基测控网和深空测控网的融合发展.

关键词 国际月球科研站, 深空测控, 天链中继卫星, 月球中继卫星, 星间链路

中图分类号 V11

International Lunar Research Station Communication Based on Satellite Double Relay

WANG Zhenhe[1] SUN Baosheng[2] LIU Yonghua[3] ZHANG Limin[1]
LI Peng[1] SHANGGUAN Yong[1] WANG Jian[1]
LI Chao[1] SHI Jiangbo[1] YAO Zengli[1]

2023-11-14 收到原稿, 2024-01-17 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

1(*Beijing Research Institute of Telemetry*, *Beijing* 100094)

2(*Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology*, *Beijing* 100094)

3(*School of Electronics and Information Engineering*, *Beihang University*, *Beijing* 100191)

Abstract In 2021, China proposed the collaborative construction of the International Lunar Research Station with relevant countries, international organizations, and partners, which attracted wide attention from many parties, and the construction of the International Lunar Research Station project proceeded smoothly as planned. Upon completion, maintaining seamless communication with the ground control center will be crucial. However, foreign stations in China's ground deep space TT&C network may pose long-term risks such as reducing availability and affecting full-time communication between the lunar research station and the ground control center. To address this, a concept of Queqiao-TL satellite double relay communication is proposed based on China's lunar exploration status present and actual design of the TL relay satellite system. This idea has undergone coverage simulation analysis under various conditions from geometric visibility perspective and studied transmission systems, link designs, system composition, capture/tracking workflows for initial completion of full-time seamless communication research for the International Lunar Research Station using the satellite double relay technology. Under unified control of the ground control center, this approach provides a technical basis for achieving full-time seamless communication through comprehensive utilization of both ground deep space TT&C network and the satellite double relay technology. Furthermore, this concept can serve as a reference for spacecraft communications in Earth-Moon space and interplanetary exploration while promoting integration among China's ground-based, space-based and deep space TT&C network.

Key words International lunar research station, Deep space exploration, TDRSS, Lunar relay satellite, Inter-satellite link

0 引言

2021 年中国提出与相关国家、国际组织和国际合作伙伴共同开展国际月球科研站建设的建议[1]. 国际月球科研站将依据“总体规划、分步实施、边建边用”的原则, 按照三个阶段分步实施, 目标是建成综合性的月球基地. 这是一项时间跨越几十年甚至上百年的重大航天项目. 国际月球科研站将建在月球南极区域, 在其建设、运行、维护和改进过程中, 可能有航天员常驻月球科研站开展科学研究工作, 其重要性可能与在 LEO 轨道运行的中国空间站相当[2], 这将引出月球科研站与地面控制中心间应建立全时无缝通信的需求.

在嫦娥四号月球背面软着陆任务中[3–8], 通过运行于环绕地月 L2 点轨道的鹊桥月球中继卫星, 实现了嫦娥四号着陆器/巡视器与地面深空测控网的天地通信. 由于地球自转因素, 国内地面深空站只能与鹊桥月球中继卫星/月球探测器间断通信; 若要不间断通信, 则需采取国外建站的方式改善通信条件, 例如在西半球南美洲建站即可显著提升对鹊桥月球中继卫星/月球探测器的通信覆盖率. 但是长期来看, 国外建站容易受国际关系、当地政局和治安影响. 一旦航天员常驻国际月球科研站、月球基地, 这种风险将不容忽视.

天链中继卫星系统是中国重要的国家空间基础设施, 建设应用发展很快, 继 2008 年第一颗天链中继卫星成功发射运行后, 又相继成功发射和运行了两代多颗天链中继卫星[9,10]. 这一系统能为以中国空间站为代表的卫星、飞船、空间站等航天器提供高可靠、实时和全球覆盖的天基测控与数据中继服务[11–14], 并为多批次航天员在中国空间站的常驻提供重要的通信保障.

当前, 鹊桥、天链中继卫星间没有星间通信链路, 二者是相互独立的两套中继卫星系统. 借鉴中国空间站的成功运行实践, 基于中国国情, 为满足国际月球科研站与中国地面控制中心之间全时无缝通信需求,

有必要融合月球中继卫星、天链中继卫星 (简称天链星) 的优势, 对二者间的星间通信链路开展研究, 论证建设地月空间星星双中继系统.

1 中国现存中继卫星及其应用

1.1 月球中继卫星

鹊桥月球中继卫星于 2018 年 5 月 21 日成功发射, 设计寿命 5 年, 运行在地月拉格朗日 L2 点的 halo 轨道, 为嫦娥四号任务提供地月间中继通信服务, 是国际上首颗地球轨道外专用中继通信卫星. 由于设计寿命到期, 需发射鹊桥二号月球中继卫星继续为探月任务提供中继支持.

鹊桥二号月球中继卫星于 2024 年 3 月 20 日成功发射, 设计寿命 8 年, 运行在绕月轨道, 为嫦娥四号、六号、七号、八号等任务提供地月间中继通信服务.

本文结合嫦娥四号任务对鹊桥月球中继卫星开展分析.

1.1.1 系统结构

嫦娥四号对地通信系统主要由月面着陆器/巡视器、鹊桥月球中继卫星、地面深空测控网、地面应用系统等组成[3,4](见图 1).

着陆器/巡视器着陆区为月球背面区域, 通过 X 频段载荷与鹊桥月球中继卫星实现双向通信[3]; 鹊桥月球中继卫星位于地月拉格朗日 L2 点的 halo 轨道 (距月球约 8×10^4 km), 采用星上数据处理的再生转发模式. 星上安装有两幅天线. 其中, 4.2 m 口径伞状抛物面天线工作于 X 频段[3,4,15,16], 可分时与月面着陆器/巡视器、地面应用系统通信; S 频段低增益螺旋天线与地面深空测控网、地面应用系统配合, 实现双向测控和低速数据传输[17,18].

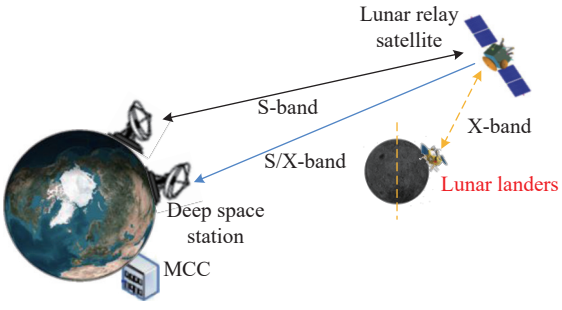


图 1 嫦娥四号单星中继通信链路

Fig. 1 Chang'E-4 system communication links

地面深空测控网主要包括佳木斯 66 m 深空站、喀什 35 m 深空站、阿根廷 35 m 深空站以及 3 套 18 m 测控站[3]. 地面应用系统当前主要包括密云 50 m、昆明 40 m 等多个数据接收站[3].

1.1.2 任务执行分析

由于月球自转周期与绕地球公转周期相同, 因此月球始终以同一面朝向地球. 着陆于月球背面的嫦娥四号着陆器/巡视器, 由于受月球遮挡, 无法与地面深空测控站/应用站直接进行测控数传通信. 因此, 需要月球中继卫星中继转发信号解决该问题. 地月 L2 平动点位于地球至月球连线的延长线上, 此处地球与月球的引力之和使得月球与月球中继卫星同步绕地球运行, 因此月球中继卫星能够连续对地球和月球背面同时可见, 提供全时段中继服务. 因此, 发射一颗环绕地月 L2 点的月球中继卫星, 即可建立地球与月球背面探测器的全时无缝中继通信链路, 从而有效支持月球背面着陆探测任务.

嫦娥四号着陆器/巡视器的控制核心为中国地面控制中心, 其控制信息的基本流程是, 地面控制中心通过通信网与地面深空测控网/应用系统所属的深空站、测控站连接, 经传输距离约 45×10^4 km 的地月空间无线信道与月球中继卫星实现信号双向收发, 月球中继卫星将双向信号再生中继转发, 经传输距离约 8×10^4 km 的星月空间无线信道[3,4,15], 完成与嫦娥四号着陆器/巡视器的双向信息传递, 实现地面控制中心控制月球探测器的目标. 由于地球自转, 当佳木斯、喀什等中国区域内的地面站处于面向月球的合适区域时, 具备与月球中继卫星双向通信的能力; 随着地球自转, 佳木斯、喀什等中国区域内的地面站将周期性地处于背向月球的区域, 此时因为地球遮挡, 地面站将不能与月球中继卫星进行双向通信. 资料表明, 国内深空站实现了对月球中继卫星约 60% 的通信覆盖率[19], 即平均每天约 10 h 不能进行地月间通信.

阿根廷 35 m 深空站的加入提高了嫦娥四号着陆器/巡视器的测控通信时长. 资料表明, 中国区域内的深空站与阿根廷站联合可实现对月球中继卫星约 90% 的通信覆盖率[19] , 即平均每天约 3 h 不能进行地月间通信. 阿根廷单站对月球中继卫星的通信覆盖贡献率约为 30%, 这充分表明阿根廷单站的重要性以及单点失效的风险性. 国外测控站容易受国际关系、当地政局和治安影响, 存在不确定因素.

地面深空测控网/应用系统在中国的探月工程、火星探测及行星际探测过程中发挥着重要作用, 持续做出重要贡献[19]. 针对建设运行国际月球科研站的新需求, 地面深空站与月球中继卫星间不能全时无缝通信的情况应引起重视并予以解决.

1.2 天链中继卫星

1.2.1 系统能力

天链中继卫星系统主要组成包括: 空间段, 包含东、中、西三个节点的中继卫星 (每个节点含多颗轨位邻近的中继卫星)[1,11]; 地面段, 包含运行控制系统和与各用户中心相连的通信网; 终端, 即应用于各种用户平台上的型谱化用户终端[20–22]. 其广泛应用于中国空间站、卫星、飞船、火箭、飞机、舰船等用户的测控、通信、数据中继任务, 在天基信息传输覆盖性、可靠性、实时性方面的优点已得到充分验证[20–26]. 天链中继卫星系统应用原理如图 2 所示.

1.2.2 能力分析

天链中继卫星系统能够实现快速建设与应用, 是需求牵引、技术驱动两种因素共同作用、相互促进的结果. 在需求牵引方面, 各类航天器、非航天器对中继卫星系统持续提出了天基测控与数据中继服务的明确需求, 且种类数量越来越多, 要求越来越迫切; 在技术驱动方面, 持续开展技术攻关, 大型可展开式网状天线、更先进调制技术、更高速率数据传输、S 频段多址 (SMA) 技术相继突破, 系统运行控制的自动化水平持续提升, 地面运维管控水平持续优化, 运行过程更加高效[11].

天链星星间天线的指向范围直接决定了服务用户平台的空域范围. 当前二代天链星星间天线的实际工作指向范围仅占其性能的一部分, 尚有部分指向性能处于闲置状态, 理论上完全可应用于地月空间深空目标通信; 同时, 其将占用天链星系统资源, 严重挤压天链星系统的服务效能. 因此, 在后续天链星上增加对天面天线应是合理的选择.

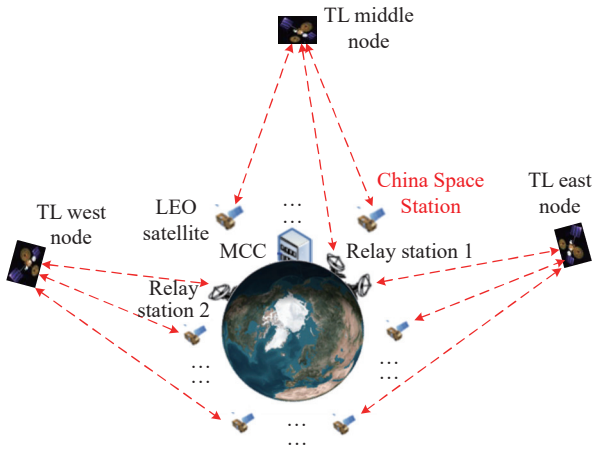


图 2 天链中继卫星系统应用

Fig. 2 Application of TL relay satellite system

借鉴该思路, 在未来天链星上安装天地一体化用户终端, 新增对天面天线; 在月球中继卫星上相应配置与天链星通信的设备. 综合利用现有系统资源, 增加一条地面控制中心与月球科研站间的新通信路径, 从而增加系统通信实时性和全时性.

2 星星双中继通信

2.1 覆盖性仿真分析

天链星对月球中继卫星的覆盖性分析仿真场景如下.

天链星: 采用当前天链卫星轨位.

月球中继卫星: 为更好地满足月球南极区域的国际月球科研站通信中继需求, 其轨道未必是地月拉格朗日 L2 点的 halo 轨道, 可能进行了轨道优化, 例如采用近月轨道、大椭圆轨道等. 由于与约 45×10^4 km 的星间距离相比, 月球中继卫星的轨道变化量为小量, 对覆盖性仿真分析结果影响有限. 因此, 此处仍采用已公开的地月拉格朗日 L2 点的 halo 轨道进行仿真分析. 同时, 为避免月球遮挡, 保持对国际月球科研站的全时无缝通信, 新轨道的月球中继卫星数量可能有多颗并采取接力方式通信.

2.1.1 当前天链星覆盖仿真

(1) 仿真条件. 天链星数量 3 颗, 分别位于东、中、西三个节点, 每颗卫星上的对地大天线转动范围假定为±45°圆锥角, 忽略地球遮挡因素. 仿真结果如图 3 和图 4 所示.

(2) 仿真结果. 分析图 3 和图 4 可以看出, 在天链星每天 24 h 运行周期内, 每颗天链星对月球中继卫星的几何可视时间接近 7 h, 三颗天链星叠加对月球中继卫星的几何可视时间约 18 h, 即对月球中继卫星覆盖率约为 75%.

(3) 仿真意义. 利用当前正在应用的天链中继卫星系统, 在后续发射的月球中继卫星上加装天链星用户终端. 通过在轨试验, 验证本文星星双中继设想的正确性和可行性, 为后续工程化应用奠定技术基础.

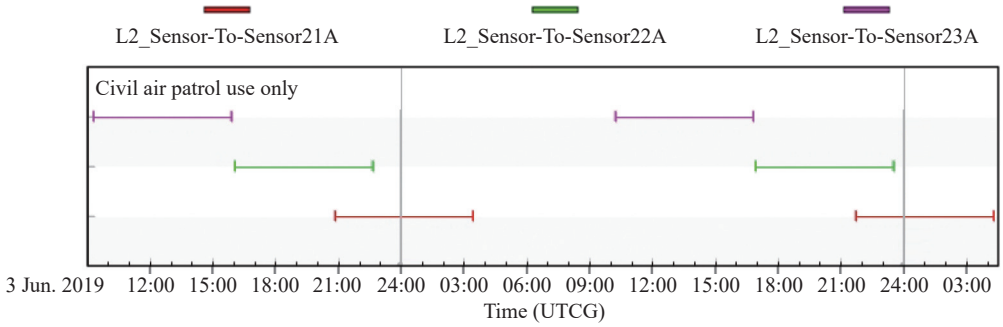


图 3 当前天链星覆盖仿真

Fig. 3 Coverage simulation of TL relay satellites at current orbit position

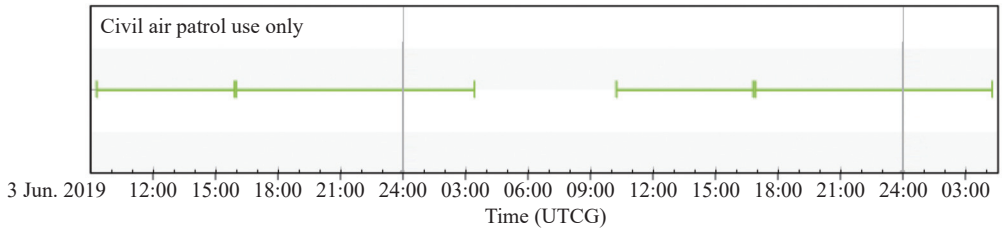


图 4 当前天链星覆盖效果仿真

Fig. 4 Simulation of coverage effect of TL relay satellites at current orbit position

同时也应看到, 其占用大量的天链中继卫星系统资源, 严重挤压天链中继卫星系统为以中国空间站为代表的卫星、飞船、火箭等航天器的服务效能. 因此, 需要在后续发射的天链星上增加对天面终端 (含对天面天线).

2.1.2 加装对天面天线的三节点天链星覆盖仿真

仿真条件为: 天链星数量 3 颗, 分别位于东、中、西三个节点, 每颗卫星上的对地面大天线转动范围假定为 ±45°圆锥角, 对天面大天线转动范围假定为±60°圆锥角.

2.1.2.1 对天与对地面星间天线均加入

分析图 5 和图 6 仿真结果可以看出, 在天链星每天 24 h 运行周期内, 每颗天链星对地面天线对月球中继卫星的几何可视时间接近 7 h, 对天面天线约 7.5 h; 三颗天链星对天、对地面天线覆盖范围叠加后对月球中继卫星的几何可视时间约 24 h, 即基本实现全时覆盖月球中继卫星 (忽略地球遮挡因素). 同样, 当天链星对地面星间天线用于月球中继卫星通信时, 将占用服务于中低轨航天器的天链星系统资源, 严重挤压天链中继卫星系统为以中国空间站为代表的卫星、飞船、火箭等航天器的服务效能. 因此, 有必要对仅使用对天面星间天线的情况进行分析.

2.1.2.2 仅加入对天面星间天线

分析图 5 中间的三段阶梯线段 (对天面天线的覆盖情况), 叠加覆盖时长约 19 h, 即仅使用对天面大天线, 对月球中继卫星的覆盖率约为 80%. 进一步分析表明, 若继续扩大天链星对天面天线的转动范围, 每颗天链星对天面 (深空) 天线对月球中继卫星的几何可视时间将增大, 东西两节点的覆盖时段将逐渐接近实现搭接, 中节点的作用将逐渐减弱甚至可以退出. 这说明通过扩大天链星对天面天线的转动范围, 无需中节点、仅利用东西两节点的天链星即可实现对月球中继卫星的连续长时间覆盖.

同时应看到, 由于三节点天链星的轨位分布已确定, 单纯依靠扩大对天面天线的转动范围不能实现对深空目标的全时覆盖. 因此, 需要在三节点天链星轨位外增加第四个节点布置天链星.

仿真意义在于其验证了星星双中继构思的工程有效性. 在实际工程应用中, 主要利用天链星的对天面天线执行对月球中继卫星的跟踪, 完成对国际月球科研站的通信任务. 确有必要时, 才调用天链星的对地面星间天线.

2.1.3 增加第四节点的天链星覆盖仿真

仿真条件为: 天链星数量 4 颗, 除原有的东、中、

西三个节点外, 将东西节点外侧的中间位置附近作为第四个节点布置天链星. 每颗卫星上的对地面大天线转动范围假定为±45°圆锥角, 对天面大天线转动范围假定为±60°圆锥角, 忽略地球遮挡因素.

2.1.3.1 对天与对地面天线均加入

仿真结果如图 7 和图 8 所示. 从图 7 和图 8 可以看出, 在天链星每天 24 h 的运行周期内, 每颗天链星对地面天线对月球中继卫星的几何可视时间接近 7 h, 对天面天线约 7.5 h; 四节点天链卫星对天、对地面天线覆盖范围叠加后对月球中继卫星的几何可视时间为 24 h, 即完全实现全时覆盖月球中继卫星.

2.1.3.2 仅加入对天面天线

仿真结果如图 9 和图 10 所示. 分析图 9 和图 10 可以看出, 在天链星每天 24 h 的运行周期内, 仅用四个节点天链星的对天面天线, 其覆盖范围叠加后对月球中继卫星的几何可视时间为 24 h, 即完全可以实现全时覆盖月球中继卫星.

通过设置第四个节点布置天链星, 整个天链中继

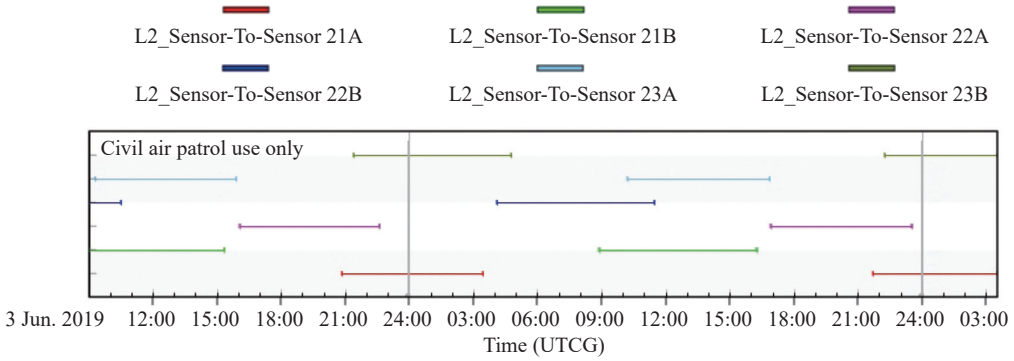


图 5 加装天地载荷的天链星覆盖仿真

Fig. 5 Coverage simulation of TL relay satellites with sky&Earth payloads

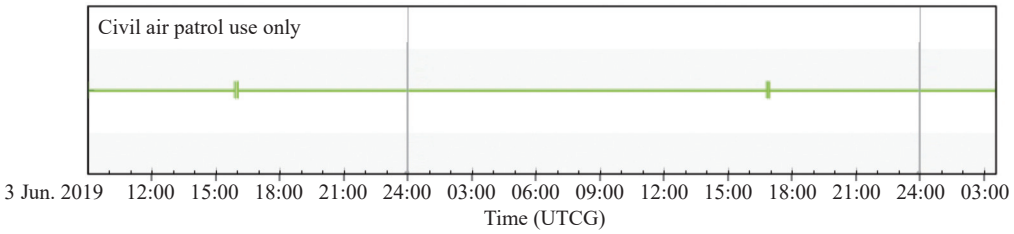


图 6 加装天地载荷的天链星覆盖效果仿真

Fig. 6 Simulation of coverage effect of TL relay satellites with sky&Earth payloads

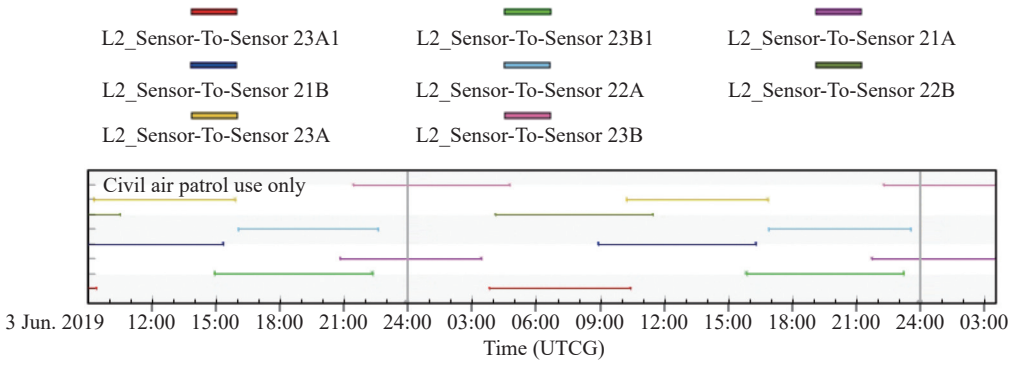


图 7 加装天地载荷的四节点天链星覆盖仿真

Fig. 7 Coverage simulation of 4-node TL relay satellites with sky&Earth payloads

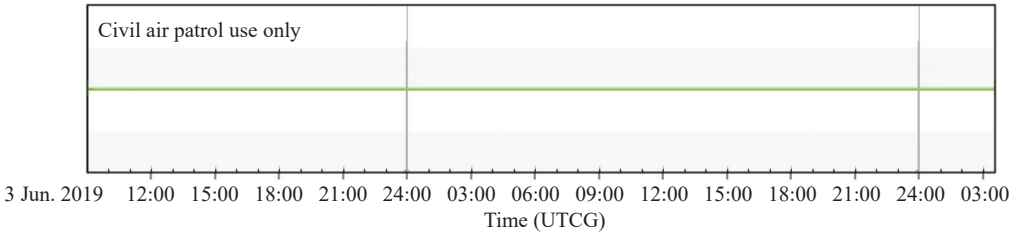


图 8 加装天地载荷的四节点天链星覆盖效果仿真

Fig. 8 Simulation of coverage effect of 4-node TL relay satellites with sky&Earth payloads

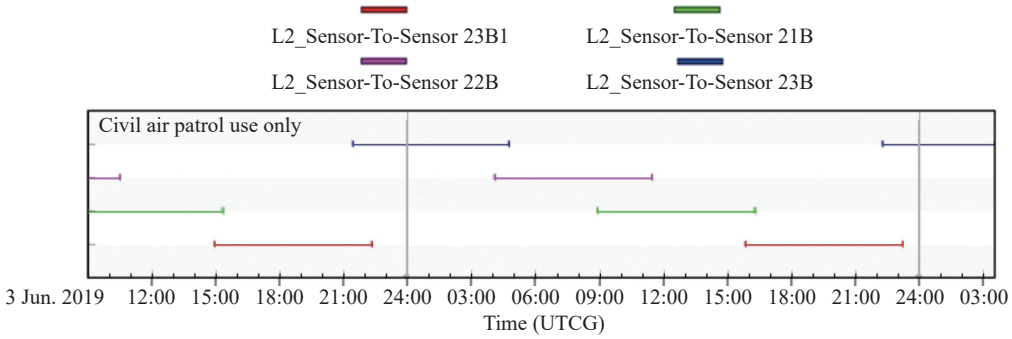


图 9 四节点天链星对天天线覆盖仿真

Fig. 9 Coverage simulation of 4-node TL relay satellites with sky payloads

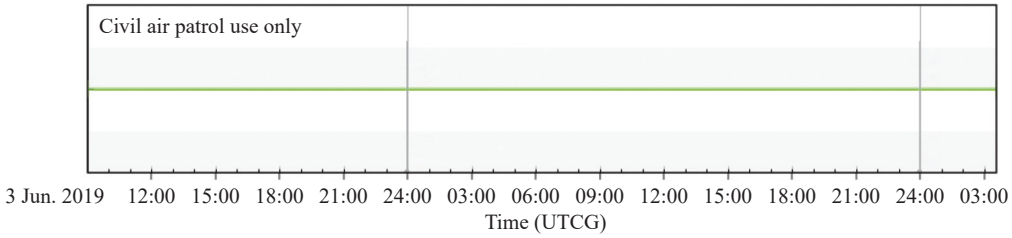


图 10 四节点天链星对天天线覆盖效果仿真

Fig. 10 Simulation of coverage effect of 4-node TL relay satellites with sky payloads

卫星系统可以升级到一个新的高度. 主要仿真结论如下.

(1) 仅用四个节点天链星的对天面天线, 可以实现对月球中继卫星的全时跟踪, 具备全时完成国际月球科研站通信任务的覆盖能力; 同时, 当 A 节点天链星的对天面天线执行国际月球科研站通信任务时, 其他节点天链星的对天面天线可执行地月空间、行星际探测活动中其他深空航天器的通信任务. 即不但具备为单个深空航天器 (例如国际月球科研站) 提供全时通信服务的能力, 而且可以同时为多个深空航天器提供通信服务.

(2) 天链星上的对地天线仍主要完成以中国空间站为代表的传统天基测控任务; 同时, 四节点天链星的分布形式, 可为除地球南北极区域外的所有地基目标提供天基测控服务, 从而显著提高系统效能.

(3) 通过在天链星上增加强化星上数据处理及星间网络路由的功能, 可准实时实现地基目标、近地目标、深空目标间的信息传递与交换.

2.1.4 仿真结论

表 1 列出了天链星覆盖月球中继卫星的仿真情况, 主要结论如下.

(1) 在现有天链星条件下, 对月球中继卫星覆盖率约 75%. 将严重挤占服务于中低轨航天器的天链星系统资源, 有必要在后续天链星上增加对天面天线.

(2) 三个节点天链星在增加对天面天线并联合对地面星间天线的条件下, 对月球中继卫星覆盖率可达

表 1 天链星覆盖月球中继卫星仿真情况

Table 1 Simulation of TL relay satellites covering on lunar relay satellites

天链星	当前在轨	加装对天载荷(三节点)		加装对天载荷(四节点)
星间天线	对地	对地+对天	仅对天	仅对天
假定天线转动范围	±45°圆锥角	±45°, ±60°圆锥角	±60°圆锥角	±60°圆锥角
覆盖率	75%	100%	80%	100%
扩大天线转动范围时的覆盖率	根据实际情况确定	100%, 重叠段增加	优于80%, 小于100%	100%, 重叠段增加, 第四节点天链星轨位选择更灵活
应用效果分析	需大量挤占服务于中低轨航天器的天链星系统资源	需大量挤占服务于中低轨航天器的天链星系统资源	性能居中	对天载荷服务深空航天器、对地载荷服务地球中低轨航天器, 均100%覆盖 星间链路天地分开; 同时发挥天链星节点作用, 准实时实现地基、近地、深空目标间的信息传递与交换

100%. 但是使用对地面星间天线将严重挤占服务于中低轨航天器的天链星系统资源, 建议仅使用对天面星间天线.

(3) 仅用三个节点天链星对天面天线条件下, 对月球中继卫星的覆盖率优于 80%; 扩大天线转动范围, 可以增加对月球中继卫星的覆盖率, 天链星东西两节点的覆盖时段将逐渐接近实现搭接, 中节点的作用将逐渐减弱甚至可以退出; 若要实现对月球中继卫星 100% 全覆盖, 需增加天链星第四个节点.

(4) 采用四个节点天链星对天面天线的条件下, 可轻松实现对月球中继卫星 100% 全覆盖; 天线转动范围增大时, 第四节点卫星轨位选择的灵活性也相应增加.

2.2 传输体制

工作方式: 信号双向传输、频分全双工.

调制方式: 测量通信一体化、UQPSK 调制方式; I 路调制测量帧用于星间测距, 低速率传输、扩频; Q 路调制通信帧业务数据用于星间业务数据信息传输, 兆量级的中速率数据传输、不扩频.

信道编码: I 和 Q 两路采取 LDPC 编码、卷积+RS 级联编码方式.

数据加扰: I 和 Q 两路数据均需加扰, 数据加扰以帧为单位进行, 参考 CCSDS 标准.

2.3 链路设计

2.3.1 双中继星间链路

天链星天线口径同现鹊桥月球中继卫星, 为 4.2 m 抛物面天线[3], 月球中继卫星对地/天链天线暂按 1 m 口径设计.

Ka 频段 1 m 口径抛物面天线, 其增益 G 的取值范围约为 44～48 dB, 此处取中位数 46 dB. 按常规考虑, 接收 G/T 值可取 15 dB·K^{-1}; 等效全向辐射功率 (Effective Isotropic Radiated Power, EIRP) 可取 60 dBw.

Ka 频段 4.2 m 口径伞状抛物面天线, 其增益 G 的取值范围约为 56～60 dB, 这里取中位数 58 dB. 按常规考虑, 接收 G/T 值可取 27 dB·K^{-1}; 发射 EIRP 值取 70 dBW.

星星间传输的无线信号需要星间天线动态跟踪, 系统标校后存在剩余误差, 导致天线不能完全对准, 将由此导致跟踪误差, 另外还有极化损失等误差项, 这些均归算为信号电平损失, 取值 2.5 dB.

UQPSK 调制解调体制, I 路传输测量信息、Q 路传输通信信息, 按 LDPC1/2 编码方式, 解调门限取值为: 1×10^{-7} 的误码率下, 理论解调门限 $E_b/N_0\leqslant$ 3.0 dB; 考虑解调损失时, 设计解调门限 $E_b/N_0\leqslant$ 4.3 dB.

设计采用 UQPSK 调制体制, 信号能量主要集中于通信 Q 支路. 星星双中继链路设计时, 暂按 Q 支路占用全部 EIRP 进行设计, 具体情况见表 2.

上述链路条件下, 天链星向月球中继卫星发送信息速率为 10 Mbit·s^{-1} 的前向信号, 链路 E_b/N_0 设计余量为 4.1 dB; 天链星接收月球中继卫星信息速率为 10 Mbit·s^{-1} 的返向信号, 链路 E_b/N_0 设计余量为 5.0 dB. 该组双向链路均满足 3 dB 余量条件, 说明技术可行, 具有实施性.

综上可知, 通过该星星微波双中继链路, 可双向传输 10 Mbit·s^{-1} 的通信信息速率. 为提高链路可用性, 初步考虑三档通信速率: 10 Mbit·s^{-1}, 8 Mbit·s^{-1},

表 2 星星双中继间星间微波链路预算

Table 2 Estimating of inter-satellite microwave link in satellite double relay

天链星	发信息 (10 Mbit·s^{-1})	收信息 (10 Mbit·s^{-1})
调制方式	UQPSK	UQPSK
编码方式	LDPC1/2	LDPC1/2
星间距离/km	450000	450000
工作频率/GHz	Ka频段	Ka频段
信息速率/(Mbit·s^{-1})	10.0	10.0
EIRP/dBW	70.0	60.0
空间损耗/dB	232.7	233.8
其他损耗/dB	2.5	2.5
总传播损耗L/dB	235.2	236.3
G_r/T_r /(dB·K^{-1})	15.0	27.0
接收(E_b/N_0)/dB	8.4	9.3
理论解调门限/dB	3.0	3.0
设计解调门限/dB	4.3	4.3
设计余量/dB	4.1	5.0

5 Mbit·s^{-1}. 这种信息传输能力可基本满足月球科研站与地面控制中心间的基本通信需求, 例如航天员与地面间工作生活的准全时基本通信保障; 对于面向各类科研试验任务的更高速率通信传输需求, 该星星微波双中继链路不能胜任, 需由地面深空测控网完成.

2.3.2 天链星地链路

星间微波中继的 10 Mbit·s^{-1} 双向数据经天链星处理转发对地传输时, 沿用现有服务于 LEO 卫星、空间站的天链星系统协议和设备.

天线: 共用天链星星地天线, 共用地面运控系统地面站大天线.

设备: 天链星上增加星间/星地链路频率转换设备、数据处理和网络路由设备; 地面运控系统增加相应收发处理设备.

对于天链中继卫星系统现有的星地链路, 星上、地面站 EIRP、G/T 值很大, 适应传输中国空间站多路百兆量级的高速数据[11]. 因此, 现有星地链路设计完全适应星星双中继的数据传输要求.

2.4 系统组成

星星双中继通信设备主要包括月球中继卫星一体化通信终端、天链星一体化通信终端、星地通信链路设备、地面通信网和控制中心. 国际月球科研站通信链路如图 11 所示. 图中月球科研站与月球中继星间的实际链路有多条.

2.4.1 月球中继卫星一体化通信终端

现有的对月、对地通信/数传链路设备按新要求迭代改进 (例如保留对月 X 频段大天线、对地 S 频段天线等). 同时, 为适应后续国际月球科研站全时通信需求, 需进行如下两方面调整.

(1) 对国际月球科研站方向. 现有鹊桥月球中继卫星 4.2 m 伞状抛物面天线与月面着陆器/巡视器、地面深空站的分时通信工作方式需改变[2], 后续的对月大天线应始终对准国际月球科研站区域, 保持全时通信且不能再分时转动对准地面深空站, 该需求要求月球中继卫星应增加对地面深空的 X 频段通信链路.

(2) 对地面控制中心方向. 需要月球中继卫星增加对天链中继卫星系统的 Ka 频段通信链路, 构建对地部分的星星双中继通信链路.

综合考虑, 为满足两方面需求, 后续月球中继卫星对地部分应增加 X/Ka 双频段通信终端, S 频段低速宽波束测控终端可单独配置, 并基于星上载荷质量、尺寸、功耗最优等原则进行一体化设计.

2.4.2 天链星一体化通信终端

现有的通信载荷按近地空间新要求迭代改进; 新增的对天面终端 (含天线) 与现有通信载荷联合, 基于星上载荷质量、尺寸、功耗最优原则进行一体化设

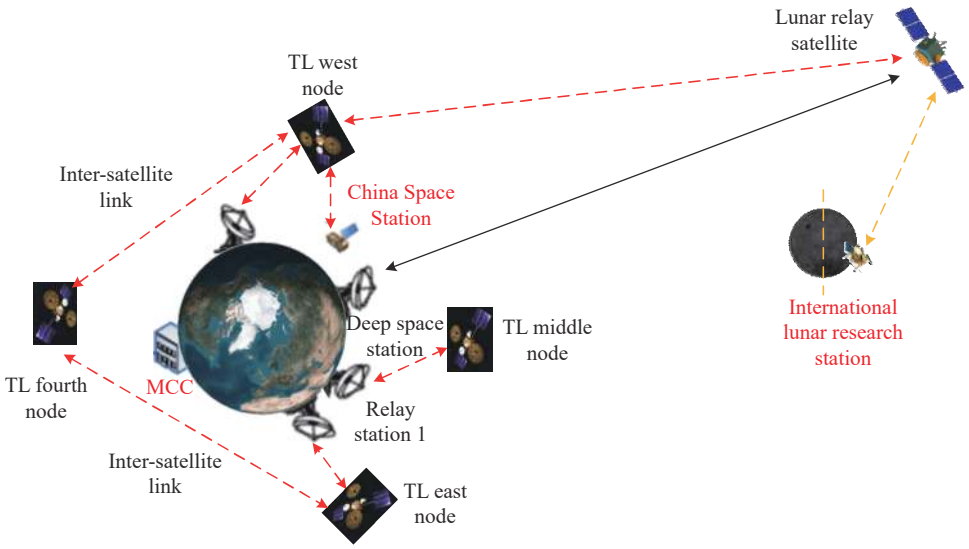


图 11 国际月球科研站通信链路

Fig. 11 Communication links of international lunar research station

计改造, 形成天链星一体化通信终端, 充分发挥其大天线动态跟踪、多节点中继星有机配合的全时无缝覆盖性能, 满足用户需求.

2.5 捕获跟踪

月球中继卫星 X/Ka 双频段通信终端需具备同时跟踪 X 频段地面深空站、Ka 频段天链星的能力. X 与 Ka 频段的频率比约为 1:3, 在其他条件相同情况下, 相应同口径天线的增益比约为 1:9, 波束宽度比约为 3:1, 即同口径天线, Ka 频段对应的波束宽度窄, 仅是 X 频段的三分之一, 形成同电轴的窄、宽两个波束. 由于跟踪天链星时采用 Ka 频段窄波束, 因此, 月球中继卫星 X/Ka 双频段天线应以天链星为主跟踪目标, 兼顾 X 频段宽波束覆盖地面深空站. 当天链星处于地月连线附近且位于地月之间时, 月球中继卫星 X/Ka 双频段天线的同电轴窄、宽两个波束均指向地球, 月球中继卫星对天链星、地面深空站均通视, 利于信号捕获跟踪, 月球中继卫星可以采用频分方式同时与天链星、地面深空站进行通信; 当天链星处于地月连线的法平面附近时, 月球中继卫星 X/Ka 双频段天线的同电轴窄、宽两个波束指向天链星并偏离地球, 不利于与地面深空站间的信号捕获跟踪. 不过, 月球中继卫星上安装的 S 频段低速宽波束测控终端天线应能够覆盖地球, 可正常与地面深空站进行测控.

2.6 工作流程

(1) 确定月球中继卫星轨道. 利用传统深空探测、星星双中继两种方法, 分别处理获取月球中继卫星轨道, 经比对、选优, 确定月球中继卫星轨道.

(2) 确定天链星轨道. 利用传统方法确定.

(3) 形成工作计划. 控制中心分别通过天链中继卫星系统和深空测控网, 获取天链星、月球中继卫星的轨道、姿态、终端遥测状态等相关信息, 根据需要, 形成任务工作计划.

(4) 计划上传. 控制中心通过天链中继卫星系统、深空测控网, 将任务工作计划分别发送至天链星和月球中继卫星.

(5) 捕获跟踪. 天链星、月球中继卫星的星间天线分别以程序跟踪方式指向预定位置; 通常月球中继卫星先发送 Ka 频段返向高速数据信号; 天链星采取无独立信标的快速捕获方式, 捕获接收月球中继卫星的返向信号, 按要求进行数据转发; 同时可根据要求转为自跟踪.

(6) 数据传输. 天链星可向月球中继卫星发送 Ka 频段前向信号, 月球中继卫星收到后, 按要求向国际月球科研站转发; 同时可根据要求转为自跟踪; 天链星、月球中继卫星实现双向自跟踪工作方式、稳定传输双向中高速数据; 若发送方信号停止, 则接收方自动转换为程序跟踪.

(7) 天线切换. 随着地球自转, 各节点天链星的对天/对地大天线适时切换, 接力跟踪月球中继卫星; 月球中继卫星的 X/Ka 天线也适时切换, 跟踪不同的天

链星, 在控制中心和月球科研站间实现双向通信.

2.7 系统定位

主要目的是提高系统可靠性, 满足月球科研站与地面中心间的基本通信, 例如满足与地面间的工作生活基本保障, 解决地面深空测控网海外建站存在的风险; 以 66 m 大天线[2] 为代表的地面深空测控网始终是系统主体, 能够有效满足月球科研站与地面中心间的高速率通信需求; 两套系统并联工作, 互为补充, 可有效提高全系统工作可靠性、覆盖性、实时性, 更好地完成各类科研试验任务.

2.8 主要性能比较

2.8.1 与地面深空测控网间

面向地月空间、国际月球科研站、未来综合性月球基地及相关深空探测的各类用户多种需求, 从系统实力、可靠性、实时性、覆盖率、数传能力、同时服务深空用户数、系统融合、性价比等多个方面, 基于现有分析条件, 比较了地面深空测控网、星星双中继系统的主要性能. 其中, 依据是否存在第四节点的天链星, 将星星双中继系统分为两种, 即三节点和四节点天链星系统. 具体分析情况分别见表 3 和表 4.

地面深空测控网、星星双中继两系统融合后, 分析可得如下主要结论.

(1) 可充分弥补地面深空网国外建站可靠性较弱的短板, 显著提高可靠性.

(2) 可充分弥补地面深空站同时服务深空用户数较少的现实, 面向未来用户需求, 显著提高同时服务深空用户数的能力.

(3) 两系统互为补充, 可有效提高全覆盖的健壮性和工程实现性.

(4) 高低数传速率按需传输, 更好地满足各类用户的各种应用需求.

(5) 国内控制中心统一调配国内外深空站、星星双中继、天链地面运控系统资源, 可更加有效、灵活、实时控制深空用户航天器.

(6) 可进一步促进中国地基测控网、天基测控网和深空测控网的融合创新.

2.8.2 与未来月球中继星座间

根据航天技术未来发展趋势, 后续需要在月球轨

表 3 两种系统性能比较 (三节点天链星系统)

Table 3 Comparison of performance between two systems (3 nodes TL relay satellite system)

项目	地面深空测控网	星星双中继	两系统合作融合
系统实力	国内深空站+国外阿根廷深空站	改造后的月球中继卫星、天链星(包含三个节点)	国内外深空站、星星双中继、天链地面运控系统, 由国内控制中心统一调配
可靠性	国内站可靠性高, 国外站弱, 整体可靠性较弱	中国空间设施, 由国内地面测控中心统一控制, 可靠性高	可靠性高
实时性	国内站实时性强, 国外站信息需通过卫通、跨洋通信传回国内, 较弱	中国空间设施, 由国内中心统一掌控, 实时性强	实时性强
覆盖率	约90%覆盖月球中继卫星	天链星的对天、对地天线配合, 可基本全覆盖月球中继卫星 仅有天链星的对天天线, 对月球中继卫星的覆盖率超过80%; 天线转动范围增加时, 覆盖率增加 天链星对天天线的转动范围大到一定程度时, 中节点天链星的覆盖率贡献可以忽略	具备全覆盖月球中继卫星的能力
数传能力	地面站天线口径大, 数传速率可达数百Mbit·s^{-1}	星载天线口径小, 数传速率可达10 Mbit·s^{-1}	高低数传速率按需传输, 更好地满足各类用户需求
同时服务能力	基本一天线跟踪一目标. 同时服务用户数较少	一颗天链星含对天、对地至少两副天线, 跟踪多目标的能力优于深空站. 同时服务用户数较多	两系统结合, 同时服务深空用户数多
系统融合	无	可进一步促进中国地基测控网、天基测控网和深空测控网的融合创新	
性价比	新建深空站耗资大, 功能相对单一, 性价比较弱	后续天链、鹊桥中继卫星载荷一体化改造, 系统综合利用, 性价比高	性价比高

表 4　两种系统性能比较 (四节点天链星系统)

Table 4　Comparison of performance between two systems (4 nodes TL relay satellite system)

项目	地面深空测控网	星星双中继	两系统合作融合
实力	国内深空站+阿根廷深空站	改造后的月球中继卫星、天链星(包含4个节点)	国内外深空站、星星双中继、天链地面运控系统, 由国内控制中心统一调配
可靠性	国内站可靠性高, 国外站弱, 整体可靠性较弱	中国空间设施, 由国内地面测控中心统一控制, 可靠性高	可靠性高
实时性	国内站实时性强, 国外站信息需通过卫通、跨洋通信传回国内, 实时性较弱	中国空间设施, 由国内中心统一掌控, 实时性强	实时性强
覆盖率	约90%覆盖月球中继卫星	天链星的对天、对地天线配合, 可全覆盖月球中继卫星 仅有天链星对天天线, 可全覆盖月球中继卫星 天链星对天天线的转动范围大到一定程度时, 中节点天链星的覆盖率贡献可以忽略 天链星功能界面更清晰. 通常, 对天天线执行深空任务, 对地天线执行天基测控任务	具备全覆盖月球中继卫星的能力
数传能力	地面站天线口径大, 数传速率可达数百Mbit·s^{-1}	星载天线口径小, 数传速率可达10 Mbit·s^{-1}	高低数传速率按需传输, 更好地满足各类用户需求
同时服务能力	基本一天线跟踪一目标. 同时服务用户数较少	一颗天链星含对天、对地至少两副天线, 跟踪多目标的能力优于深空站. 同时服务用户数较多	两系统结合, 同时服务深空用户数多
系统融合	无	可进一步促进中国地基测控网、天基测控网和深空测控网的融合创新	
性价比	新建深空站耗资大, 功能相对单一, 性价比较弱	后续天链、鹊桥中继卫星载荷一体化改造, 系统综合利用, 性价比高	性价比高

道建立月球中继星座, 例如可以在地月多个平动点附近部署月球中继卫星, 利用其实现对整个地月空间航天器的全域覆盖和高速通信. 该星座的星星地链路至少包含: 与深空航天器间的星间链路, 与地面控制中心间的星地链路. 该星座长期运行将面临以下问题: ① 星地链路若仅依靠现有地面深空网的可靠性问题; ② 深空航天器对于传统星地链路、新星星地链路的选择问题; ③ 星座的论证设计建设周期及经费.

按照本文思路改造后的天链中继卫星可作为未来月球中继星座的“先锋”而先行发射应用. 此时, 深空航天器与天链中继卫星进行星间通信. 月球中继星座的星地链路将包含天链中继卫星系统和地面深空测控网; 深空航天器可灵活选择与月球中继星座、天链中继星座、地面深空网通信; 相比需独立新建的月球中继星座, 通过充分继承改造即可发射使用的天链中继星座, 论证设计建设周期将缩减数年, 节省经费数亿元人民币.

3　结论与展望

天链中继卫星系统、鹊桥中继卫星系统在天基测控和月球探测等方面分别承担着重要作用, 在中国的航天事业、国民经济建设中持续发挥着越来越明显的作用, 为建设航天强国提供了重要支撑. 面向建设运行国际月球科研站全时无缝通信的任务需求, 本文提出将天链中继卫星系统与鹊桥月球中继卫星系统联合, 构建星星双中继系统, 并且与地面深空测控网紧密配合, 在地面控制中心与国际月球科研站之间搭建一套高可靠、全受控、准全时通信的地月“热线”; 同时, 在满足单个深空航天器 (例如国际月球科研站) 准全时通信服务基础上, 具备为多个深空航天器同时提供通信服务的能力, 尤其是对地月空间诸目标具有良好的工程可行性.

随着系统论证建设应用的持续推进和发展, 多种应用需求及应用场景将相继出现, 未来展望至少包含以下几方面.

(1) 星星双中继与地面深空测控网互为补充、有机融合, 稳妥可靠满足国际月球科研站等载人深空航天器全时无缝的通信需求.

(2) 为更好地发挥系统效能, 服务更多用户, 建议适时开展天链星第四节点的论证设计建设工作.

(3) 在星星双中继微波链路建设发展应用成熟的基础上, 适时开展激光链路的论证设计建设应用工作[27,28], 以显著提高通信速率.

(4) 地月空间、行星际探测的其他航天器可借鉴星星双中继思想, 优化完善其通信设计.

(5) 随着天链星天地一体化的持续应用, 可进一步促进地基测控网、天基测控网和深空测控网的融合发展, 为建设空天地综合测控网发挥有益作用.

参考文献

[1] The State Council Information Office of the People's Republic of China. China's Space Program: A 2021 Perspective[M]. Beijing: People's Publishing House, 2022 (中华人民共和国国务院新闻办公室. 2021 中国的航天 [M]. 北京: 人民出版社, 2022)

[2] 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 (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)

[3] WU Weiren, WANG Qiong, TANG Yuhua, *et al*. Design of Chang'e-4 lunar farside soft-landing mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, **4**(2): 111-117 (吴伟仁, 王琼, 唐玉华, 等. "嫦娥 4 号"月球背面软着陆任务设计 [J]. 深空探测学报, 2017, **4**(2): 111-117)

[4] XU Jin, ZHANG Aibing, HE Yifeng, *et al*. Research and analysis for relay communication system of Chang'e-4 lunar relay satellite[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(6): 506-514 (徐进, 张爱兵, 贺一峰, 等. "嫦娥 4 号"中继星中继通信方案研究与分析 [J]. 深空探测学报, 2018, **5**(6): 506-514)

[5] ZHANG Lihua, XIONG Liang, SUN Ji, *et al*. Technical characteristics of the relay communication satellite "Queqiao" for Chang'e-4 lunar farside exploration mission[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(2): 138-146 (张立华, 熊亮, 孙骥, 等. 嫦娥四号任务中继星"鹊桥"技术特点 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**(2): 138-146)

[6] GAO Shan, ZHOU Wenyan, ZHANG Lei, *et al*. Trajectory design and flight results for Chang'e 4-relay satellite[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(2): 156-165 (高珊, 周文艳, 张磊, 等. 嫦娥四号中继星任务轨道设计与实践 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**(2): 156-165)

[7] WANG Q, LIU J Z. A Chang'e-4 mission concept and Vision of future Chinese lunar exploration activities[J]. *Acta Astronautica*, 2016, **127**: 678-683

[8] YU Dengyun, WU Xueying, WU Weiren. Review of technology development for Chinese lunar exploration program[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2016, **3**(4): 307-314 (于登云, 吴学英, 吴伟仁. 我国探月工程技术发展综述 [J]. 深空探测学报, 2016, **3**(4): 307-314)

[9] WANG Jiasheng. China's data relay satellite system and its application prospect[J]. *Spacecraft Engineering*, 2013, **22**(1): 1-6 (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**(1): 1-6)

[10] Cao Z R, Sun B S, Yao Y J, *et al*. TDRS SMA for spacecraft on orbit control[J]. *J Astronaut*, 2020, **41**: 1434-1439 (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**: 1434-1439)

[11] WANG Lei, JI Tao, ZHENG Jun, *et al*. Investigations and proposals for data relay satellite systems[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2022, **52**(2): 303-317 (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: 技术科学, 2022, **52**(2): 303-317)

[12] WANG Jiasheng, QI Xin. China's data relay satellite system served for manned spaceflight[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, **44**(3): 235-242 (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: 技术科学, 2014, **44**(3): 235-242)

[13] 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 (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)

[14] ZHANG Qiang, PEI Yin, WANG Xiaohui, *et al*. Research on vehicle's telemetry command and communication system based on TDRSS[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, **35**(1): 18-22 (张强, 裴胤, 王小辉, 等. 基于中继卫星的运载火箭天基测控系统研究 [J]. 遥测遥控, 2014, **35**(1): 18-22)

[15] SUN Zezhou, WU Xueying, LIU Shi, *et al*. Design and verification of relay communication system for lunar farside exploration[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(2): 147-155 (孙泽洲, 吴学英, 刘适, 等. 地月中继链路系统设计与验证 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**(2): 147-155)

[16] CHEN Guohui, WANG Bo, HUA Yue, *et al*. The key technologies for radial rib deployable antenna of Chang'e-4 relay satellite[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2019, **49**(2): 166-174 (陈国辉, 王波, 华岳, 等. 嫦娥四号中继星伞状可展开天线关键技术研究 [J]. 中国科学: 技术科学, 2019, **49**(2): 166-174)

[17] YE Peijian, HUANG Jiangchuan, SUN Zezhou, *et al*. The process and experience in the development of Chinese lunar probe[J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2014, **44**(6): 543-558 (叶培建, 黄江川, 孙泽洲, 等. 中国月球探测器发展历程和经验初探 [J]. 中国科学: 技术科学, 2014, **44**(6): 543-558)

[18] WU Weiren, DONG Guangliang, LI Haitao. Engineering and Technology of Deep Space TT&C System[M]. Beijing: Science Press, 2013 (吴伟仁, 董光亮, 李海涛. 深空测控通信系统工程与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013)

[19] DONG Guangliang, LI Haitao, HAO Wanhong, *et al*. Development and future of China's deep space TT&C system[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, **5**(2): 99-114 (董光亮, 李海涛, 郝万宏, 等. 中国深空测控系统建设与技术发展 [J]. 深空探测学报, 2018, **5**(2): 99-114)

[20] HUANG Huiming. Reflections on development of the ground system of the first generation CTDRSS[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2012, **31**(5): 1-5 (黄惠明. 我国第一代中继卫星地面应用系统发展建设的思考 [J]. 飞行器测控学报, 2012, **31**(5): 1-5)

[21] LIU Baoguo, WU Bin. Application of TDRSS in Chinese space TT&C[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2012, **31**(6): 1-5 (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)

[22] WANG Zhenhe. Research on integrated design of TDRSS customer spacecraft terminals[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2009, **28**(5): 14-18 (王振河. TDRSS 航天器用户终端一体化设计初探 [J]. 飞行器测控学报, 2009, **28**(5): 14-18)

[23] ZHAI Zheng'an. Development of next generation data relay satellite systems[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2016, **35**(2): 89-97 (翟政安. 下一代数据中继卫星系统发展思考 [J]. 飞行器测控学报, 2016, **35**(2): 89-97)

[24] LI Yuheng, LUO Bin, GUO Wen'ge, *et al*. Feasibility analysis of using Ka-band of TRDS to support wireless communication for spacecraft reentry[J]. *Manned Spaceflight*, 2015, **21**(6): 582-588 (李于衡, 罗斌, 郭文鸽, 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)

[25] 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 (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)

[26] 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 (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)

[27] LUO Tong, WANG Weizhi, XUE Jiayin, *et al*. Status and development trends of deep space optical communication[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2022, **43**(4): 44-55 (罗彤, 王伟志, 薛佳音, 等. 深空光通信技术现状及发展趋势 [J]. 遥测遥控, 2022, **43**(4): 44-55)

[28] LIU Xiangnan, WANG Jianjun, LI Xiaoliang, *et al*. Laser communication proposal for solar system boundary exploration[J]. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2022, **43**(4): 62-69 (刘向南, 王建军, 李晓亮, 等. 面向太阳系边际探测的激光通信方案研究 [J]. 遥测遥控, 2022, **43**(4): 62-69)

作者简介



王振河 男, 1970 年 9 月出生于河南省郑州市, 现为北京遥测技术研究所高级工程师, 主要研究方向为航天测控、卫星通信、空间信息网络技术等.

E-mail: 13671039594@163.com