



# 中继卫星系统发展应用分析及建议

王磊\*, 姬涛, 郑军, 范丹丹

北京空间信息传输中心, 北京 102300

\* E-mail: wangleibsir@163.com

收稿日期: 2020-11-20; 接受日期: 2021-03-22; 网络版发表日期: 2021-04-27

国家自然科学基金重点项目(批准号: 91738302, 91438206)资助

**摘要** 我国中继卫星系统经过十几年的发展, 已成为遥感卫星等信息获取类空天平台的效能倍增器、空间信息共享枢纽以及高效天基信息网络基础设施. 本文梳理总结了国内外中继卫星系统的发展应用情况, 围绕天基资源高效利用这一核心, 指出制约系统应用效能提升的若干瓶颈问题, 深入分析这些问题的实质及难点, 并给出一套优化解决方案. 最后, 在提炼应用趋势基础上, 从进一步完备中继卫星体系、增强中继卫星综合能力以及提升全系统运维管控水平三个方面, 给出我国中继卫星系统的未来发展建议.

**关键词** 中继卫星系统, 天基信息网络, 资源管理, 任务调度, 星间链路, 激光通信

## 1 引言

中继卫星系统是在地面用户与用户目标之间提供实时测控和数据中继服务的系统<sup>[1]</sup>. 中继卫星通常部署于地球静止轨道或大椭圆轨道, 从高到低覆盖用户目标, 属于空间信息高速传输的骨干基础设施, 是一个国家航天力量与综合国力的集中体现<sup>[2-6]</sup>.

2008年4月, 我国发射第一颗地球静止轨道中继卫星, 是全球第5个建设中继卫星系统的国家. 十多年来, 一方面, 随着我国在国民经济多个领域不断深化航天应用、加强中低轨航天器部署建设, 中继卫星的使用需求增长迅猛; 另一方面, 随着中继链路捕获跟踪、大口径高增益网状天线等关键技术和设计制造工艺的突破<sup>[6-10]</sup>, 也极大地牵引和推动了我国中继卫星系统的建设和应用. 2012年7月, 我国初步建成由空间段、

地面段与用户段组成, 具备全球覆盖能力的中继卫星系统. 其中, 空间段由3颗天链一号中继卫星分东、中、西三个节点部署, 构成“三星组网、全球覆盖”的基本格局, 使我国成为继美国之后第二个具备中继卫星系统全球覆盖能力的国家<sup>[6]</sup>. 随后又在2016年12月和2019年3月发射了天链一号04星和天链二号01星. 天链二号中继卫星在任务规划、系统管理、任务运行方面相比天链一号显著进步, 进一步增强了我国中继卫星系统高速数据传输和多目标服务能力<sup>[11]</sup>. 中继卫星系统日益广泛的应用显著提升了我国航天测控和天基信息传输能力, 尤其是天链二号01星的成功发射并与天链一号系统组网运行, 标志着我国天基信息网络进入新的发展应用阶段.

基于我国国情, 中继卫星系统建设部署和拓展应用并行开展, 互为驱动. 地面应用系统通过提升自动

引用格式: 王磊, 姬涛, 郑军, 等. 中继卫星系统发展应用分析及建议. 中国科学: 技术科学, 2022, 52: 303-317  
Wang L, Ji T, Zheng J, et al. Investigations and proposals for data relay satellite systems (in Chinese). Sci Sin Tech, 2022, 52: 303-317, doi: 10.1360/SST-2020-0463

化管控水平、完善接口交互流程、优化用户协调机制等举措,不断改进地面运维管控水平,挖掘天基信息网络资源效能,为有效拓展中继卫星应用范围、提升服务质量奠定了坚实基础。近年来,我国中继卫星系统充分展现出天基信息网络覆盖率高、任务实效性好、数传能力强、资费比高等优势,已成为我国遥感卫星等信息获取类空天平台的效能倍增器、空间信息共享枢纽和高效天基测控基础设施,取得了显著的经济和社会效益,为我国建设航天强国提供了重要支撑<sup>[12,13]</sup>。

## 2 国外情况

美国最早于1964年开始对跟踪与数据中继卫星系统(tracking and data relay satellite system, TDRSS)开展预研,主要用于提升载人航天轨道覆盖率,以及降低中低轨航天器测控资源运行成本<sup>[1]</sup>。苏联和美国几乎同期将中继卫星发射升空,开启了天基测控通信的新时代。其他各航天大国紧随其后,很快意识到中继卫星系统的战略意义,启动发展各具特色的中继卫星系统,取得了显著的军事和经济效益<sup>[14]</sup>。

### 2.1 主要发展历程

#### (1) 苏联/俄罗斯

1982年,苏联开始部署第一代“急流”(Potok)GEO军用中继卫星,截至2000年共发射了10颗一代“急流”中继卫星,由于该型中继卫星设计寿命较短,现已全部退役<sup>[15]</sup>。俄罗斯于2011年9月开始部署第二代“鱼叉”(Garpun)GEO军用中继卫星<sup>[16]</sup>,目前在轨一颗。民用方面,苏联从20世纪70年代末开始研制“射线”系列中继卫星<sup>[17,18]</sup>,于1985~1995年先后发射5颗第一代“射线”(Luch)中继卫星,现已全部退役。第二代“射线”中继卫星于2011~2014年相继发射了3颗,分别位于东、中、西三个节点(167°E, 95°E和16°W),初步形成了三星全球覆盖星座,为国际空间站、中低轨卫星等用户目标提供天基测控与数据传输服务。

#### (2) 美国

美国的TDRSS由美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)管控,以民用为主,兼顾军用。1983年,该系统发射了第一颗中继卫星(TDRS-A,入轨后更名为TDRS-1,后续星命名方式相同),开始部署TDRSS,也称为天基网(space network,

SN)<sup>[19-21]</sup>。天基网与近地网(near earth network, NEN)、深空网(deep space network, DSN)共同组成NASA的空间通信与导航网络(space communication and navigation, SCaN)<sup>[22]</sup>。TDRSS主要为美国中低轨卫星、国际空间站、航空器、舰船、海洋浮标与运载火箭等用户提供S, Ku, Ka频段中继测控和数传服务。截至2021年03月, TDRSS已发射三代共13颗中继卫星,目前在轨服役10颗,其中第一代4颗,第二代3颗,第三代3颗;在新墨西哥州的白沙、西太平洋的关岛、马里兰州的布洛索姆角建设了地面终端站,构成全球最完备的中继卫星系统<sup>[1]</sup>。美国TDRSS发射与在轨运行情况见表1。

**第一代** 1983~1995年, NASA共部署了6颗TDRS,目前TDRS-1和TDRS-4已经离轨报废,其余4颗仍在轨服役。

**第二代** 为支持中低轨道航天器,特别是“自由”号空间站运行,同时考虑到第一代TDRS的寿命问题, NASA从2000年起,陆续发射3颗第二代TDRS(TDRS-8~TDRS-10)。这3颗星用来补充和增强第一代TDRS的功能,可以提供带宽更宽、频率选择更灵活的空间数据和图像中继。与第一代TDRS相比,二代TDRS最突出特点包括: S频段多址返向波束在星上进行波束形成;单址天线(single access antenna, SA)增加新的Ka频段单址业务;多址天线(multiple access antenna, MA)提升返向业务性能。为适应第二代TDRS功能, NASA还对白沙综合设施(WSC)进行了升级改造。

**第三代** 根据SCaN计划, NASA于2010年开始第三代中继卫星的研制,即TDRS-11~TDRS-13,到2017年8月已完成全部3颗TDRS的在轨部署。由于天基网由三代TDRS共同构成,系统运行管理的复杂性增大, NASA为便于对全系统软硬件实施统一维护,降低系统风险,启动了“天基网地面段增强计划”(space network ground segment sustainment, SGSS)<sup>[23]</sup>,更新升级了使用数十年的地面系统,并新建布洛索姆(Blossom Point)地面终端站。TDRSS虽已发展三代,但提供星间链路服务的有效载荷配置都是两副S/Ku(第一代)或S/Ku/Ka(第二、三代)单址天线和1副S频段多址相控阵天线,只是天线具体性能参数存在差异<sup>[24]</sup>。据公开文献<sup>[4]</sup>统计,2012年TDRSS平均执行中继任务规模超过835圈次/天,传输数据量超过34 Tb/d,中继任务持续总时长超过400 h/d。

表1 美国TDRSS发射在轨运行情况(截至2021年3月)

Table 1 TDRSS launch and in-orbit operation status (up to March, 2021)

代数	卫星	发射日期	轨道位置	状态
第一代	TDRS-1	1983.4.4	-	2010.6退役
	TDRS-2	1986.1.28	-	发射失败
	TDRS-3	1988.9.29	62.88°W	在轨工作
	TDRS-4	1989.3.13	-	2011.12退役
	TDRS-5	1991.8.2	168.68°W	在轨工作
	TDRS-6	1993.1.13	45.23°W	在轨工作
	TDRS-7	1995.7.13	85.71°E	在轨工作
第二代	TDRS-8	2000.6.30	89.44°E	在轨工作
	TDRS-9	2002.3.8	12.45°W	在轨工作
	TDRS-10	2002.12.4	171.04°W	在轨工作
第三代	TDRS-11	2013.1.31	174.22°W	在轨工作
	TDRS-12	2014.1.24	40.79°W	在轨工作
	TDRS-13	2017.8.18	48.81°W	在轨工作

2013年, NASA开始第四代天基中继体系结构的研究论证工作<sup>[25]</sup>, 随后启动“激光通信中继演示计划”(laser communications relay demonstration, LCRD)项目. LCRD计划将2个激光通信终端(OST-1和OST-2)和1个Ka频段通信终端(HBRF)安装在“空间测试计划”卫星上(the space test program satellite-6, STPSat-6), 另外, 配套在加利福尼亚州、夏威夷各建设1个光学地面站(OGS-1和OGS-2), 在白沙建设1个射频地面站(RFGS)和1个LCRD任务操控中心(LMOC)<sup>[26-28]</sup>. NASA已规划基于LCRD系统演示模拟的应用场景主要包括: 1个用户目标通过LCRD空间段与1个地面站之间实施数据中继; 2个用户目标之间通过LCRD空间段实施数据中继; 2个用户目标通过LCRD空间段同时与1个地面站实施数据中继; 1个用户目标直接对地数据下传. 这些演示试验重点在于验证NASA新一代中继卫星系统体系架构是否合理, 以及激光星间、激光星地以及微波星地和地面链路之间能否有效协同, 满足未来任务需求. 目前, LCRD项目已成功通过关键决策点评审, 进入开发整合与测试阶段, 计划2021年发射STPSat-6卫星至地球同步轨道, NASA开始为期2年的激光通信中继演示验证试验, 预计双向用户数据速率至少达到1.244 Gb/s. TDRSS首个空间激光中继节点的发射时间预计为2025年<sup>[29]</sup>, 开始正式建设部署第四代中继卫星系统.

### (3) 欧盟

2001年, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射了第一颗主要用于技术试验的地球静止轨道中继卫星Artemis<sup>[30]</sup>, 该星安装激光通信终端, 2003年4月Artemis开始为法国的SPOT-4光学卫星和ESA的Envisat雷达卫星提供高速数传服务. 其中SPOT-4使用Artemis激光中继链路, 而Envisat使用的是Ka频段中继链路. 在Artemis启动中继业务运营的10个月内, 共为SPOT-4提供了300次约合60小时的中继服务, 为Envisat提供了1370次约合330小时的中继服务.

2005年12月, Artemis与JAXA所属OICETS卫星的LUCE(laser utilizing communication equipment)载荷进行了双向激光通信链路实验. 2006年12月, Artemis还与飞行在6~10 km高度的Falcon-20飞机上的LOLA(liaison optique laser aeroportee-airborne optical laser link)激光通信终端开展中继试验, 取得成功, 2010年Artemis达到寿命期限. 2008年ESA提出建设“欧洲数据中继系统”(European data relay system, EDRS)<sup>[31-34]</sup>, 于2016年1月发射首星EDRS-A, 定点于9°E, EDRS-A与LEO卫星之间激光通信速率最高可达1.8 Gbps, Ka频段通信速率可达300 Mbps. 2019年8月发射EDRS-C, 部署在31°E附近, 成倍提升了EDRS系统容量. EDRS主要用途包括: 将用户遥控指令发送至用户卫星、提高自然灾害监测及响应能力、为政府及安全部门提供

加密传输服务、将“哨兵”等对地观测卫星和机载平台获取的数据实时传输给地面终端用户。EDRS的战略意义不仅在于满足欧盟航天活动对空间数据传输速率、传输量、实时性以及测控覆盖率日益增长的需求,还有助于欧盟摆脱对美属卫星地面站的依赖,争取空间活动战略独立性。

#### (4) 日本

日本1993年确定了分四步发展本国中继卫星系统的计划。前三步利用各种试验卫星对相关技术进行试验,待各项技术成熟后再发射两颗实用型中继卫星。2002年9月10日,日本成功将其首颗中继卫星(DRTS)送入地球同步轨道,主要用于支持“希望号”载人太空舱与国际空间站的对接,目前该星仍在轨运行<sup>[35]</sup>。2008年,日本启动了下一代中继卫星激光通信终端的研制。2011年,日本宇航局针对下一代中继卫星提出两套方案,一个采用光通信技术<sup>[36]</sup>,另一个没有采用光通信技术(在DRTS基础上提高了Ka频段反向链路的数据率)。日本于2020年11月发射中继卫星JDRS-1,该星采用光通信与射频通信相结合的方案,联合使用激光、S/Ka微波频段与“先进光学卫星”等低轨侦察卫星建立中继链路,激光通信的通信速率可达1.8 Gb/s,卫星使用寿命10~15年<sup>[37]</sup>。

## 2.2 特点分析

对国外中继卫星系统发展特点总结如下。

(1) 苏联/俄罗斯虽然是全球第一个部署中继卫星的国家,但相比美国,俄罗斯中继卫星有效载荷技术和系统建设发展较慢,短期内维持3~4颗准全球覆盖能力的可能性较大。

(2) 美国是全球中继卫星体系建设最完备、应用规模最大的国家,将继续维持并加强中继卫星系统的全球覆盖能力,并在大规模应用方面保持全球领先地位。

(3) 欧盟在全球首先实际部署中继卫星激光通信系统,在中继卫星激光链路技术领域全球领先,目标是建设具有全球覆盖能力的中继卫星系统,以争取在空间通信领域更多自主性。

(4) 日本在空间激光通信技术方面拥有优势,已成功开展多项空间激光通信试验。由于地面系统受限于国土可布局范围以及“二战”后国际形势,日本后续发展天基信息网络基础设施将更依赖于高速星间链路,

重点方向是具有更高速率的激光中继卫星,相比微波链路,可在更短的数传时间窗口内传输更多的数据量。

(5) 全球GEO轨位资源弥足珍贵,为了高效发挥系统效能,各国在中继卫星系统顶层架构设计论证时,基于各自需求,中继卫星有效载荷的配置策略及大系统总体方案存在差异(如平台搭载载荷、激光链路、Ka/Ku/S等微波链路、激光微波混合链路、相应频段链路数量以及地面站布局等),进而影响未来系统应用及在空间信息基础设施中的作用。

进一步,本文着眼于中继卫星系统应用服务,从中继卫星单星和系统两个层级梳理总结各国中继卫星应用能力,如表2所示。其中,中继卫星单星应用能力指标主要体现在星间链路最高传输速率、星间天线配置、单星同时服务用户目标数量、单星信息传输容量四个方面;系统能力指标主要有星座规模、系统覆盖范围和系统任务规模(即平均每日用户目标接入系统累计次数)。各国中继卫星系统的最新任务数据难以公开获取,但任务规模又是衡量系统应用效能的重要指标,因此,在表2中的系统级任务规模指标值是根据公开发表论文、国际航天主流网站以及用户目标等多方面信息综合评估得到。

## 3 国内情况

### 3.1 典型应用

我国中继卫星系统自建成以来,任务规模和用户数量快速增长。先后为载人航天、中低轨航天器、运载火箭、舰船、航空器等多类型用户目标提供了天基测控和数据中继服务,协同用户目标完成多样化任务,在维护国家空间安全、促进国民经济发展以及牵引天基信息网络创新发展等方面都发挥了重要作用,应用效能显著<sup>[12,13,38-50]</sup>。下面总结概述我国中继卫星系统支持的几类典型用户目标应用情况。

#### (1) 载人航天应用

2008年9月至今,我国中继卫星系统已执行多次载人航天任务,根据我国载人航天工程规划,空间站建设与运营均明确使用中继卫星系统作为天基测控通信手段,并与陆基、海基测控网共同构成我国新一代载人航天测控通信网<sup>[39-41]</sup>。

中继卫星系统支持载人航天应用效能主要体现

表2 国外典型中继卫星应用能力指标对比

Table 2 Comparison of application capability indexes of typical data relay satellites

国外典型 中继卫星	应用能力指标层次						
	单星级				系统级		
	星间链路最高传输速率(Mbit/s)	星间天线配置	单星同时服务用户目标数量	单星信息传输容量(Mbit/s)	星座规模	系统覆盖范围	任务规模(日均任务接入数)
美国TDRS	800(Ka)	2副单址(Ka/Ku/S)、1副多址相控阵(S)	2(单址服务)+5(多址服务)	≈3200	10	全球覆盖	近千量级
欧盟EDRS	1800(激光)	1副单址(激光)、1副单址(Ka)	2(单址服务)	≈2100	2	区域覆盖	数十量级
俄罗斯LUCH	150(Ku)	1副单址(Ku)、1副单址(S)	2(单址服务)	≈150	3	准全球覆盖	近百量级
日本JDRS	1800(激光)	1副单址(激光)、1副单址(Ka/S)	2(单址服务)	≈2100	1	区域覆盖	数十量级

在: (i) 为空间站和飞船在轨运行提供天基测控与数据中继传输服务, 为飞船从入轨至返回全程提供前向与返向图像、语音等业务; (ii) 将我国载人航天测控通信覆盖率从不足20%提高至80%以上<sup>[41]</sup>, 为出舱活动、交会对接、太空授课、天地通话等关键任务提供强有力的测控通信支持; (iii) 可为我国空间站提供多路百兆量级高速数传链路, 以支撑空间站日常运营。

#### (2) 中低轨航天器应用

我国中继卫星系统建成以来, 为遥感、测绘等多个系列中低轨航天器提供了长期、稳定、可靠的天基数据传输及天基测控服务<sup>[41,42]</sup>。为满足不同用户需求, 将有更多的中低轨航天器装载相应类型中继终端, 它们都需要中继卫星系统提供测控通信支持。

中继卫星系统支持中低轨航天器应用效能主要体现在: (i) 将中低轨航天器获取的数据以近实时方式中继回传至国内落地, 大幅提升我国航天器数据实时获取能力, 有利于充分挖掘航天器应用效能, 特别是抢险救灾等突发事件, 信息时效性显著提升; (ii) 增强对中低轨航天器的测控覆盖率和应急抢救处置能力, 有效减轻地基测控系统压力; (iii) 用户可通过提前申请、按需接入等多种方式灵活使用天链二号中继卫星提供的前返向SMA链路<sup>[43,44]</sup>, 可以更灵活地支持航天器测控业务。

#### (3) 火箭发射及早期测控段应用

2012年我国火箭发射任务开始基于中继卫星实施天基测控。截至2020年, 我国中继卫星系统已为多款火

箭型号发射及航天器早期测控任务提供了天基测控支持。火箭发射天基测控通常使用S频段中继链路, 可以有效拓展火箭发射测控覆盖范围, 弥补陆、海基测控盲区, 下传关键箭载遥测数据<sup>[45]</sup>。随着我国航天发射测控技术发展, 火箭天基测控信息传输速率逐步不断增大, 可以全程传输火箭实时图像, 支持方式也由单颗中继卫星跟踪发展到双星接力跟踪。近年来, 一些火箭型号也开始使用箭载Ka频段中继终端, 返向数传速率成倍提升<sup>[46]</sup>。

中继卫星系统支持火箭发射及早期测控段应用效能主要体现在: (i) 有效提升我国火箭发射测控覆盖率, 通过运控系统合理设计, 实现了对多款火箭型号天基测控全程可见, 特别是在首区测控弧段之外, 基于中继卫星实施天基测控的成本优势与灵活机动性优势凸显; (ii) 通过中继卫星下传火箭全部遥测和多路图像, 增强了火箭测控能力。

#### (4) 航海应用

我国中继卫星系统已成功支持远洋科考等多次重大航海任务, 装载特制中继终端的舰船类用户通过中继卫星系统实现与陆地台站的双向图像、语音传输, 为我国航海活动特别是远洋航行提供了安全可靠的通信手段<sup>[47]</sup>。

中继卫星系统支持航海应用效能主要体现在: (i) 在中继卫星覆盖范围内与岸基台站语音和数据的全天候、双向实时传输, 为航海活动提供了有力保障; (ii) 基于中继卫星星间天线宽波束和窄波束协同应用, 支

持更灵活的航海活动.

(5) 航空应用

我国中继卫星系统为飞机、飞艇等航空应用<sup>[48,49]</sup>提供远程、超视距天基测控与数据中继支持.

中继卫星系统支持航空应用效能主要体现在: (i) 利用中继卫星高速星间链路为航空器实时回传遥测、遥感等多类型数据, 提高任务时效性; (ii) 利用中继卫星系统广域覆盖优势, 为航空器提供全空域、全天候飞行保障, 延伸航空器的可控作用距离, 有效提升该类用户目标效能.

3.2 发展应用总结

总体来看, 我国中继卫星系统的应用情况可以从执行任务规模、支持任务类型、提供资源种类、服务目标能力、响应需求时效性等多个维度总结如下.

(1) 常态化中继任务规模和服务目标数量逐年快速递增;

(2) 任务类型向多样化、体系化方向发展, 可支持载人航天、遥感卫星等航天器类, 以及航空器、舰船、火箭等非航天器类任务, 天基测控与数据中继传输流程及终端设计已初步形成标准规范;

(3) 系统提供的服务资源种类更加丰富, 从天链一号中继卫星仅配置单址星间天线拓展到天链二号卫星同时配置单址和多址星间天线;

(4) 系统同时服务多目标能力增强, 从最初的单星、单波束、服务单用户目标逐步发展到多星、多波束、同时服务多个用户目标;

(5) 对用户目标覆盖性更好, 从单星、单弧段非连续跟踪目标发展到支持多星、多弧段接力跟踪用户目标, 从仅支持低轨道高度目标拓展到可覆盖同步转移轨道用户目标;

(6) 天链二号单址天线通信能力更强, 最高信息传输速率成倍提升;

(7) 地面运控系统对用户请求响应时效性以及执行任务的自动化水平不断改进, 系统任务准备时长显著压缩.

4 瓶颈问题分析及解决方案

为不断提升中继卫星用户服务质量(QoS)和服务体验(QoE), 本文从实际工程系统面临的瓶颈出发, 紧

密结合国内外中继卫星系统多年来应用情况, 梳理制约系统应用效能提升的主要环节及其关键瓶颈问题, 如图1所示.

(1) 在接口信息交互环节, “窗口化”的资源申请提报方式不易直接准确表征用户原始及多样化中继应用需求, 限制了地面运控系统拓展资源调度寻优空间, 实际应用表明这种申请提报方式不利于用户服务质量的持续改进.

(2) 在运控系统任务调度环节, 现有任务调度方法固定了中继卫星星间链路天线的任务准备时间, 长期应用表明这部分系统额外资源不能忽视.

(3) 在用户服务管理环节, 受限于中继卫星系统资源数量, 不同用户间客观存在着竞争关系, 为进一步提升系统综合服务管理能力, 并兼顾用户公平性, 系统在进行资源管理时, 需要分级分类引导不同用户, 促使用户间形成合作态势.

接下来, 我们分别对上述制约系统应用效能的关键瓶颈问题展开分析, 并初步提出一套总体解决方案, 为相关科研工程技术人员提供参考.

4.1 窗口化的资源申请提报方式

在用户中心(简称用户)与中继运控接口信息交互环节, 所有用户以时间窗口方式直接向中继运控提报中继资源使用申请, 不仅造成严重的资源申请冲突, 而且这种“窗口化”的需求表征方式难以准确表征不同用户目标固有的多样化应用需求, 如数据量传输、跟踪测量轨道覆盖、发生在特定时空范围内等中继应用需求. 如某遥感卫星的中继应用需求为: 对中继卫星系

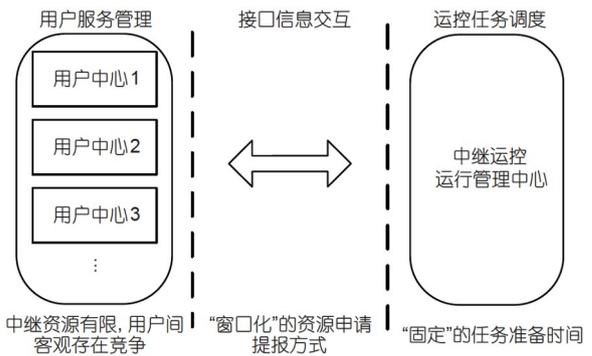


图1 中继卫星系统资源管理优化机制需要考虑的三个环节及其现实问题

Figure 1 Practical issues of three components that need to be considered in resource management of DRS system.

统的数据量传输需求, 即在某时刻前将该目标星载存储器上的一定量数据回传落地. 现实中大量中继应用需求难以直接采用时间窗口方式表征, 另外, 窗口化的申请方式还易导致资源冲突, 使得系统任务调度完成率以及用户服务质量提升困难. 如图2所示, 任务1和任务2分别申请A星一段时间窗口, 两个申请的时间窗口由于在时间维度存在交叠, 即使中继运控尝试在时间窗口内滑动消解冲突, 也只能调度完成一个任务. 以某任务规划周期为例, 用户中心1向中继C星提报申请71圈/次, 其中有29圈/次与其他用户的申请时间窗口冲突; 用户中心2向中继C星提报中继申请31圈/次, 其中有18圈/次与其他用户冲突, 可见, 窗口化的申请提报方式易导致中继资源使用冲突.

这一问题根源是, 传统需求提报采用的时间窗口化表征方式一般适用于单星、单类型天线资源, 忽略了中继卫星系统的多星、多天线以及全球通信可达能力, 不同轨位的多类型天线资源并不是相互孤立地为用户目标提供中继服务, 而是构成一个完整系统. 解决该问题的难点在于我们必须在系统资源能力以及中继运控的联合约束下, 对中继任务表征从时间窗口单一维度拓展到时间域、空间域等多个维度, 从固定方式描述转换为体现适当柔性. 通过大量实际任务数据的统计分析以及对用户原始需求调研, 我们发现中继卫星系统任务在时、空、频维度具有不同程度的调度柔性.

基于上述发现, 解决该问题的关键在于以全局视角分析系统所有可用资源, 面向全系统梳理用户多样化中继应用需求, 进而提取中继任务关键特征参量, 构建与全系统资源能力相匹配、具备一定柔性的中继任务特征描述模型. 在此基础上, 基于该模型设计用户目标中继应用需求预处理框架, 实现从用户需求源头

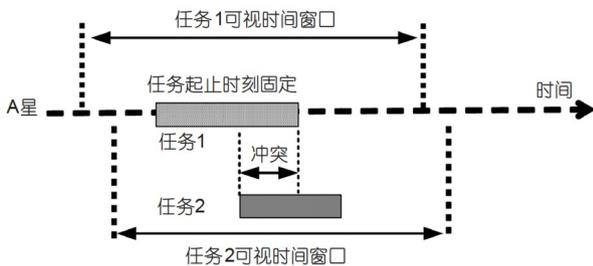


图2 窗口化的申请提报方式导致资源冲突示意图  
 Figure 2 Resource conflicts caused by the submission of time windows to system's operation management center.

拓展中继资源优化空间, 同时提升用户服务质量的目标. 为此, 本文初步设想如下: 在接口信息交互环节, 增加面向中继任务多维柔性表征的用户需求预处理模块, 主要功能是在满足用户目标工作约束的条件下, 将用户中继应用需求转换为多维特征参量表的多星、异构天线资源需求; 这些特征参量不仅能涵盖多样化用户需求, 还要为中继运控资源调度提供比“窗口化”提报方式更灵活的优化空间.

为此, 首先需要按类型梳理、归纳所有用户目标的中继应用需求和工作约束, 然后采用因果图方法从时间域、空间域、频域、内容重要程度不同维度提取影响中继任务调度结果的关键特征参量(如中继任务平均时长、中继任务开始时刻可延迟量、中继任务传输速率(或速率档位)、中继任务在时间和空间两个维度的分布、中继任务优先级等参量). 再基于中继资源需求可满足性快速评估与迭代, 完成用户应用需求到中继资源申请的预处理过程. 中继卫星系统用户需求预处理架构及与任务调度的关系如图3所示.

#### 4.2 固定的任务准备时间

在中继运控任务调度环节, 由于中继卫星间天线在任务准备过程中无法提供服务, “固定”的天线任务准备时间导致系统额外资源开销大. 如图4所示, 天线在执行相邻任务回扫过程中, 需要从上一任务结束点转动指向至下一任务等待点, 为了确保所有已列入天线调度序列的任务都能按计划开始, 中继运控根据单址天线在空间可能转动的最大角度, 为所有申请预留固定的任务准备时间. 这种任务调度方法本质上是

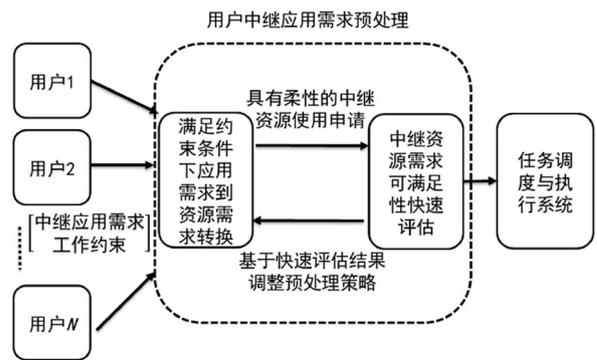


图3 中继卫星系统用户需求预处理架构及与任务调度关系  
 Figure 3 The preprocessing architecture of users' requirements of the DRS system and its relationship with mission scheduling.

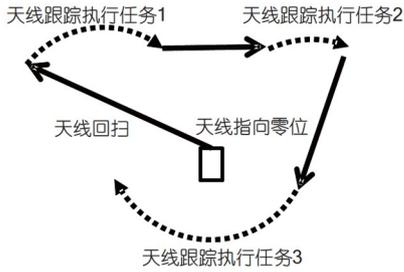


图4 中继卫星星间天线指向路径示意图  
Figure 4 Schematic diagram of the pointing path of the DRS inter-satellite antenna beam.

以增大系统调度任务的额外资源开销为代价,降低中继卫星系统任务调度问题(已被证明为NP-hard问题)的求解难度. 实际应用结果表明单址天线固定的任务准备时间导致的系统资源开销不能忽视.

这一问题根源是,由于中继卫星系统任务调度问题已被证明属于一类复杂的NP-hard问题,面对该难题,当前调度算法本质上是以增大系统的额外资源开销为代价,通过将中继卫星单址天线动态任务准备时间静态、简化处理,以降低这类NP-hard问题的求解难度. 然而,从提高中继卫星系统调度解的质量看,如果不将天线任务准备时间设置为调度问题的输入参量(静态、提前固定),而是作为该问题的一类决策参量,就可能进一步拓展可行解区域;但是,考虑单址天线任务准备时间的动态变化特性会引入更多的决策变量,模型参量之间约束关系也更为复杂,这就进一步增大了求解问题的难度. 解决该问题的难点在于,如果考虑中继卫星单址天线任务准备时间的动态特性,无论调度模型还是求解算法将更加复杂. 具体体现在:第一,由于决策变量和系统参数的增多,调度问题的优化目标和约束关系更加复杂,而现有的并行机调度模型已不能体现上述新的问题特征;第二,基于静态任务准备时间,现有调度算法较容易确定任务的开始时刻(调度结果输出的核心要素),而一旦考虑天线任务准备时间的动态特性,任务开始时刻就随相邻任务的时间、空间位置关系动态变化,给调度算法设计带来严峻挑战.

对此,我们的总体思路是,在中继运控任务调度环节,一方面将中继卫星天线任务准备时间的动态特性引入任务调度,探索新的建模思路;另一方面充分挖掘中继任务的时空特征信息,在算法机理方面提出更加高效的调度策略.

首先,将原调度问题转化为天线坐标系下的星间天线波束指向路径问题(原理如图5所示),并构建一个混合整数规划数学模型,模型体现该调度问题的关键特征有:单址天线任务准备时间动态变化、任务可视时间窗口约束、可用时间窗口不唯一、时间窗口内任务可滑动、任务优先级以及异质天线资源(单址天线、相控阵天线)工作特性差异. 考虑到天线的任务准备时间占用系统宝贵有限的可用资源是系统调度的主要代价,模型优化目标应是用尽可能少的天线资源完成尽可能多的高优先级任务. 因此,调度模型从用户需求满足情况和天线资源使用效率两方面出发,定义两个层次的优化目标,分别为最大化加权调度任务完成数和最小化天线任务准备总时长. 在设计任务调度模型求解算法时,突破原有经典算法思路的束缚,提出包含层次化调度策略的两阶段启发式方法,核心思想是利用中继任务的时空分布特征优化天线波束指向路径,使调度问题可行解寻优过程比现有算法更加高效,在可接受的算法计算耗时内显著提升调度解质量.

### 4.3 用户服务管理

在用户服务管理环节,由于中继卫星系统资源相比快速增长的用户需求极其有限,并且不同用户或者同一用户在不同时段对中继资源需求的紧迫程度存在差异,用户间客观存在着资源竞争关系. 特别是在常态化应用情况下,如果系统缺少有效的用户需求服务管

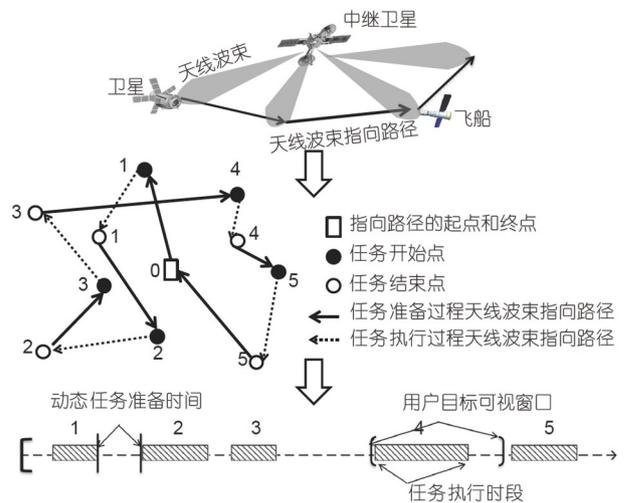


图5 基于中继卫星星间天线波束指向路径的任务调度原理  
Figure 5 Schematic diagram of the proposed mission scheduling method based on inter-satellite antenna beam pointing path.

理机制, 多个用户对中继资源的竞争容易导致严重的资源使用冲突, 这会显著增大中继运控实施冲突消解的工作压力, 还可能降低非高优先级用户的服务质量, 不利于系统服务能力的持续改进. 如图6所示, 当前中继卫星系统在每个任务规划周期进行的资源分配过程是相互独立进行的, 这就意味着用户在当前任务规划周期的资源竞争行为与其在后续任务规划周期的收益关联性很小. 在这种情况下, 用户对当前任务规划周期内的中继资源的竞争意识会更强, 系统难以通过优化资源管理和引导促进用户合作来实现提升全系统服务管理能力的目标.

这一问题根源是, 虽然中继卫星系统资源分配是以任务规划周期为单元重复进行的, 但由于用户在当前任务规划周期的资源竞争行为并不影响其在后续任务规划周期的收益, 基于博弈理论(game theory)分析这种资源分配模式属于“单次博弈”. 而对于像中继卫星这样具有周期性运控特点的系统, 资源分配“单次博弈”模式往往产生低效的纳什均衡解, 这也在实际应用场景中得到印证. 因此, 解决这一问题的关键是基于中继卫星系统运控的周期性特点, 充分考虑系统运行管理中心与用户的运行规律与行为特征, 将用户需求申报与中继运控任务调度协同考虑, 设计促使用户间合作并维持服务用户公平性的新方法. 解决问题的难点在于, 在实际应用场景中, 一方面, 运行管理中心并不完全掌握各用户真实需求信息, 难以直接准确监测到用户的资源竞争行为; 另一方面, 用户偏离合作行为发生后, 多用户间如何同步采取行动抑制不合理的资源竞争行为, 以确保整个系统的平稳高效运行.

对此, 我们的解决思路是基于重复博弈理论(repeated game theory)<sup>[38,51]</sup>, 将用户资源竞争与中继运控任务调度协同处理, 构建新型的系统资源分配重复博

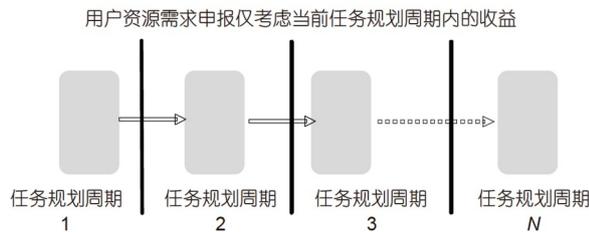


图6 当前各任务规划周期用户服务过程相互独立示意图  
Figure 6 Schematic diagram of the independent resource management process of each mission planning cycle of the current relay satellite system.

弈模型及其解算方法. 使得理性用户能够理解中继卫星系统资源分配过程是以任务规划周期为单元持续相当长时间(或者不能预测资源分配到底在何时结束), 各用户的最优目标转变为在整个重复博弈期间获取最大总体收益. 为了实现该目标, 用户就会考虑在每个任务规划周期内理性申报需求. 事实上, 中继卫星系统资源分配过程就是以任务规划周期为单元重复进行, 我们利用系统这个特点促使用户相互信任, 将用户长期收益与其在当前规划周期中的具体行为相关联, 通过构建基于重复博弈的合作机制协调用户申请行为, 建立用户间的长期信任与合作, 提升整个系统效能.

具体来说, 我们基于用户目标的真实收益构建用户博弈模型, 博弈模型中用户目标的收益由两部分组成, 分别为用户需求满足率和调度任务完成率. 用户需求满足率表示给该用户目标分配的天线资源与该用户所需资源总量的比值, 该参量反映用户目标需求的满足程度. 调度任务完成率为该用户的调度任务完成数与该用户使用申请总量的比值, 该参量反映用户的申请效率. 从上述定义可以直观看出: 某用户目标获得更高的收益, 等价于通过更高的申请效率获取更大的中继资源需求满足率, 这正是各用户追求的目标.

在构造博弈模型基础上, 推导出单次博弈的纳什均衡(NE), 从理论上进一步解释现实场景中客观存在的用户资源竞争行为及其后果. 接下来, 为了解决单次博弈导致低效纳什解的问题, 设计中继卫星系统资源分配重复博弈架构及方法, 将用户的资源需求申报与中继运控任务调度协同处理, 并配套设计高效的用户需求服务管理策略. 总体解决方案不仅要有效协调用户需求申报、降低系统资源冲突; 还要在确保系统稳定运行基础上最大化满足与保障用户需求. 本文提出的基于重复博弈的中继卫星系统资源分配总体架构和 workflows 如图7所示.

## 5 应用趋势及建议

中继卫星系统作为具有重大战略意义的天基信息网络基础设施, 其建设与应用有力推动了我国航天事业的发展, 已经取得巨大的社会、经济和国防效益, 是中国航天2030年实现整体跃升, 跻身航天强国的重要保证. 为了更好发挥我国中继卫星系统的作用, 下面简要分析中继卫星系统的应用趋势, 并在此基础上

给出未来发展建议。

### 5.1 应用发展趋势

#### (1) 面向更加多样化的用户目标与需求

根据我国航天发展规划, 中继卫星系统服务对象涵盖陆海空天等多类用户目标。从空间分布看, 包括高、中、低轨航天器, 飞机、飞艇等航空器, 以及地面和海上等目标; 从接入方式看, 包括单用户直接接入, 星座等多目标接入, 以及区域集中汇聚接入等方

式; 从数据传输模式看, 除现有模式外, 部分用户目标还需要系统提供更加灵活的端到端数据交互模式; 从中继业务对链路需求看, 测控类等低速率应用仅需中继卫星S频段宽波束支持, 而高速数传类应用则需中继卫星高频段、窄波束跟踪服务。尤其是空间站、遥感、气象等系列航天器, 由于目标原始数据产生速率较高, 需要更高性能的中继链路提供支持。

#### (2) 提高抗干扰等安全防护能力

载人航天、抢险救灾等任务对实时性、可靠性要求高, 需要中继卫星系统具备全天候、全天候, 以及复杂环境条件下信息可靠传输能力。为此, 中继卫星系统要从时间、空间、频谱多个维度, 综合采用天线波束优化设计、信号扩频等多种手段, 增强抗干扰等安全防护能力, 提高系统鲁棒性和复杂环境适应能力。

#### (3) 激光和微波链路协同应用

为满足空天信息传输容量快速增长的需求, 下一代中继卫星会向更高速率、更大宽带方向发展<sup>[52]</sup>。激光通信具有通信容量大、保密性强、结构轻便以及设备经济等优势, 但对大气环境较敏感; 微波链路特别是S频段受大气环境影响较小, 可有效弥补激光链路的不足。未来, 中继卫星系统将根据传输信道环境特点, 自适应灵活选择激光或微波链路, 并通过激光、微波混合交换网络协同应用, 大幅提升中继卫星系统容量与链路传输稳定性。

#### (4) 更加高效的系统服务模式

越来越多的用户对中继卫星系统提出了包括用户目标平台应急测控、遥感数据实时回传等应急使用需求, 这就要求系统能迅速响应应急需求, 支持用户目标快速接入, 并根据用户需求及任务的时空特征<sup>[53]</sup>, 高效完成用户需求与中继资源的匹配。当前系统采用的“申请+计划”传统服务模式难以高效满足应急需求; 另外, 一些新型用户目标具备自主健康和任务规划管理功能, 中继卫星系统可以支持对该类目标的在线感知, 不仅能够定期监测其健康状态, 还可根据目标自主发起的应用申请, 按需提供中继服务。即用户目标能够通过持续可用的低速链路向中继卫星系统告知任务申请和相关状态信息, 系统据此开展灵活高效的资源调配以满足用户需求。

#### (5) 人工智能与软件无线电技术相结合赋能系统运维管控

机器学习等人工智能技术与软件无线电技术相结

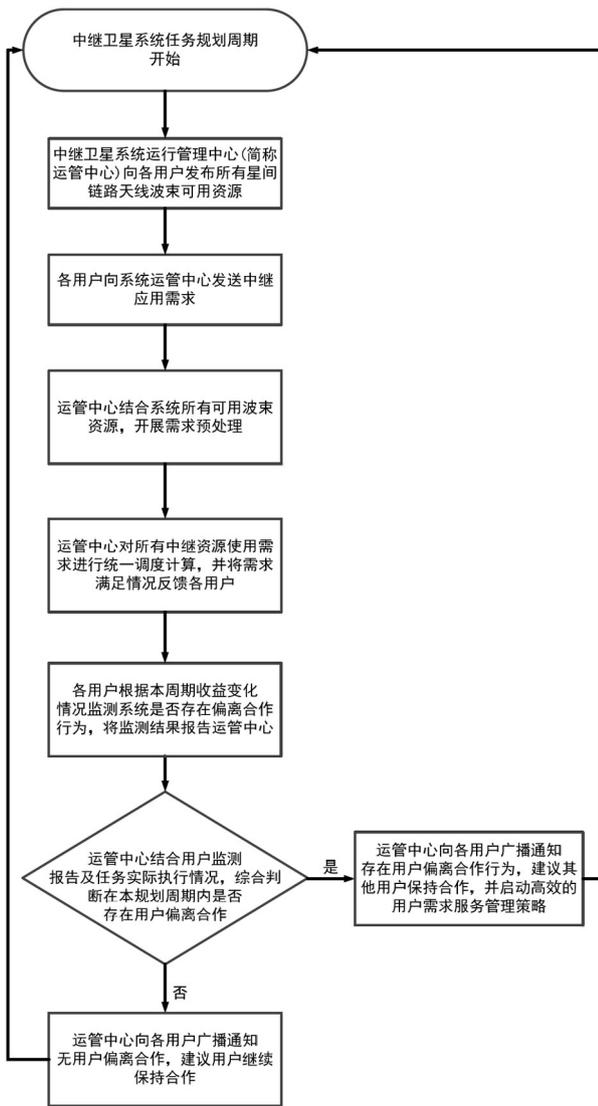


图 7 基于重复博弈的中继卫星系统资源分配总体架构及工作流程

Figure 7 Framework and workflow of the resource allocation in DRS system based on the repeated game theory.

合, 可以提高中继卫星系统吞吐量和运维管控的灵活性, 进一步提升系统性能<sup>[54-56]</sup>. 潜在的应用方向包括: 通过预测和深度强化学习方法自主配置中继通信链路, 支持自适应优化系统参数; 基于信息内容优化数据路由, 设计容错协议增强中继卫星、系统运管中心以及用户之间的数据交互能力; 基于历史数据、性能预测、调度需求以及优化目标等多维信息, 支持系统在轨动态配置参数, 借鉴软件定义方式实时更新卫星有效载荷功能, 支持从异常状态快速恢复.

## 5.2 发展建议

为支撑我国建设航天强国重大战略、“一带一路”倡议等, 满足日益增长得空间信息传输需求, 在借鉴我国中继卫星系统建设及应用经验基础上, 本文从完备中继卫星体系、提升有效载荷能力、提高运维管控水平三个方面, 对我国中继卫星系统未来发展进行思考, 提出后续工作方向.

### (1) 进一步完备中继卫星体系

根据我国航天发展规划, 中继卫星系统将在天基测控、载人航天以及应急指挥通联等经济、社会、国防等多个领域发挥更加重要的作用. 我国需要综合协同空间段、地面段与用户段的建设发展, 进一步完备中继卫星体系. 具体来说, 在空间段, 在GEO等地球轨道以及环月、环火等深空<sup>[57-60]</sup>谋划部署中继卫星, 并进一步通过激光星间链路连接骨干节点, 构建统一互联的空间信息网络. 还需要在同一节点部署多个中继卫星和备份星, 提高系统可用性. 近年来, 全球兴起在低轨构建带有星间链路的天基传输层网络, 可以为航空、航海、车载移动等用户目标提供跟踪与数据中继服务<sup>[61,62]</sup>, 其空间段通常由大量低轨卫星以及激光星间链路构成. 从广义上看, 这类天基网络与中继卫星系统具有很多相似点, 但相比传统的高轨中继卫星系统, 低轨系统具有时延小、覆盖性好、弹性强、应用广阔等方面优势, 全球低轨天基传输层网络的发展应用尤其需要我国关注. 通过完备中继卫星体系, 满足从更广阔的时间、空间维度支持多样化任务需求, 使整个中继卫星体系具备在轨备份能力, 形成多轨道层次、多频段互补增强的天基信息传输基础设施<sup>[2,63]</sup>. 在地面段, 综合多方因素, 择优在适当区域建设备份运行管理中心、地面终端站、测距转发站和标校站; 还要构建应急体系, 提高系统容灾抗毁能力和鲁棒性.

在用户段, 优化中继终端型谱, 进一步规范、简化中继终端设计标准, 大力推动中继卫星应用拓展.

### (2) 进一步提升中继卫星综合能力

遥感、测绘、气象等用户目标以及未来空间站对中继数据传输速率需求快速增长. 为此, 我国需要积极发展天基测控通信新技术、新体制, 研制微波、激光混合链路中继卫星, 配置更高频段(如Ku/Ka频段)相控阵天线, 并支持相控阵天线上自主标校; 进一步降低中继终端体积功耗、提高用户目标定轨精度, 满足用户更高速率传输需求; 通过将人工智能与软件无线电技术相结合以及柔性化载荷设计, 增强全系统抗干扰能力以及天基资源利用效率. 另外, 由于星间天线转速与任务准备时间相关, 可以通过增强中继卫星平台姿态控制能力, 进一步提高星间天线最大回扫转动速度, 同时拓展天线(波束)视场可调范围, 增强中继卫星综合能力, 推动空天信息技术跨越, 更有力地促进我国经济和社会发展.

### (3) 进一步提高系统运维管控水平

由于我国同步轨道轨位极其有限, 中继卫星系统是我国现阶段唯一具有全球覆盖能力的宽带卫星通信系统, 应用潜力巨大. 近年来我国空间任务需求快速增长, 还将在2022年前后完成空间站建造并开始运营<sup>[64]</sup>. 由于空间站日常运营对中继卫星系统资源属于刚性需求, 会进一步加剧中继任务需求与有限系统资源之间的矛盾. 作为多用户共用的空间信息资源, 如何在现有资源约束条件下提升我国中继卫星系统效能具有重大的理论研究意义和工程应用价值<sup>[65,66]</sup>. 因此, 如何基于我国国情和实际应用场景要求, 突破并有效解决本文第4节指出的瓶颈问题是实现天基资源高效利用的关键. 另外, 考虑到中继卫星系统的轨位分布、载荷功能以及用户需求将向更加多样化趋势发展, 地面运控系统有必要预先研究并构建统一高效的运维管控协议体系和建设方案, 提高系统运行管理自动化和智能化水平, 优化人机交互, 提升全系统资源效能.

## 6 结论

中继卫星系统是各航天大国实施天基信息设施建设的重点, 在载人航天、对地观测、应急通信等多个空天信息领域发挥了重要作用. 我国已初步建成具备全球覆盖能力的中继卫星系统, 取得了显著的应用效

益,为我国建设航天强国提供了重要支撑. 本文回顾并总结了国内外中继卫星发展及应用情况,重点针对制约系统服务质量与服务体验持续改进的若干技术瓶

颈,在运行管理层面设计提出一套系统资源优化利用机制及总体解决方案. 最后,研判中继卫星系统应用发展趋势,并给出有关建议.

**致谢** 中继卫星系统各类典型应用情况的梳理总结在单长胜、王瑛、满莉、常呈武、张国鹏、郑勇辉、许海龙、羌胜莉、敦怡、秦铭晨的协助下得以顺利完成,审稿人及编辑认真审阅、校对本文,提出了宝贵意见和建议,作者在此一并深表谢忱,并向所有奋战在我国中继卫星系统建设与应用一线的航天人致敬!

## 参考文献

- 1 Gramling J J, Chrissotimos N G. Three generations of NASA's tracking and data relay satellite system. In: Proceedings of the SpaceOps 2008 Conference. Heidelberg: AIAA, 2008. 1-11
- 2 Li D R, Shen X, Gong J Y, et al. On construction of China's space information network (in Chinese). Geomat Infor Sci Wuhan Univ, 2015, 40: 711-715 [李德仁, 沈欣, 龚健雅, 等. 论我国空间信息网络的构建. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40: 711-715]
- 3 Net M S, Selva D, Cameron B, et al. Results of the MIT space communication and navigation architecture study. In: Proceedings of the 2014 Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2014. 1-14
- 4 Net M S. Architecting Space Communication Networks. Dissertation for Master's Degree. Cambridge, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2014
- 5 Flaherty R J, Walker J Z, Zaleski R J, et al. 25 years of tracking and data relay satellite-operations. In: Proceedings of the SpaceOps 2008 Conference. Heidelberg: AIAA, 2008. 1-7
- 6 Wang J S, Qi X. China's data relay satellite system served for manned spaceflight (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2014, 44: 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. 中国科学: 技术科学, 2014, 44: 235-242]
- 7 Li X C. Inter-Satellite Link Antenna Tracking and Pointing System (in Chinese). Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013 [黎孝纯. 星间链路天线跟踪指向系统. 上海: 上海交通大学出版社, 2013]
- 8 Cui C M, Wang D J. Survey of gimbal drive assembly mechanism of inter-orbit link antenna for tracking and data relay satellites (in Chinese). *Aerospace Control Appl*, 2010, 36: 32-37 [崔赅旻, 王典军. 跟踪与数据中继卫星星间链路天线驱动机构技术综述. 空间控制技术与应用, 2010, 36: 32-37]
- 9 Chen G H, Wang B, Hua Y, et al. The key technologies for radial rib deployable antenna of Chang'e-4 relay satellite (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 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. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 166-174]
- 10 Miao C Q, Yang X Q, Liu J, et al. Research on acquisition and tracking of data relay satellite based on multi-user & multi-mission (in Chinese). *Aerospace Eng*, 2017, 26: 17-22 [苗常青, 杨显强, 刘江, 等. 多用户多任务的中继卫星捕获跟踪技术研究. 航天器工程, 2017, 26: 17-22]
- 11 People's Daily. China successfully launched the first satellite of the second-generation data relay satellite, Tianlian-2 01 (in Chinese). 2019, [http://www.xinhuanet.com/photo/2019-04/01/c\\_1124308174.htm](http://www.xinhuanet.com/photo/2019-04/01/c_1124308174.htm) [人民日报. 我国成功发射第二代数据中继卫星首星“天链二号01星”. 2019, [http://www.xinhuanet.com/photo/2019-04/01/c\\_1124308174.htm](http://www.xinhuanet.com/photo/2019-04/01/c_1124308174.htm)]
- 12 Wang J S. China's data relay satellite system and its application prospect (in Chinese). *Aerospace Eng*, 2013, 22: 1-6 [王家胜. 中国数据中继卫星系统及其应用拓展. 航天器工程, 2013, 22: 1-6]
- 13 Huang H M. Reflections and development of the ground system of the first generation CTDRSS (in Chinese). *J Spacecraft TT&C Tech*, 2012, 31: 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. 飞行器测控学报, 2012, 31: 1-5]
- 14 Yang H J. Latest development progress and trends of foreign data relay satellite systems (in Chinese). *Telecommun Eng*, 2016, 56: 109-116 [杨红俊. 国外数据中继卫星系统最新发展及未来趋势. 电讯技术, 2016, 56: 109-116]
- 15 Encyclopedia Astronautica. Potok. 2012, <http://www.astronautix.com/craft/potok.html>
- 16 Russian Space Web. Garpun. 2015, <http://www.russianspaceweb.com/garpun.html>
- 17 Russian Space Web. Luch-5 and 4 project. 2015, <http://www.russianspaceweb.com/luch5a.html>

- 18 Zhou S D, Wang Y S. Basic content of Russia Federation space program 2016–2025 (in Chinese). *Space Int*, 2017, 5: 14–18 [周生东, 王永生. 俄罗斯联邦2016–2025年航天计划基本内容. *国际太空*, 2017, 5: 14–18]
- 19 Goddard Space Flight Center/Exploration and Space Communications Projects Division. *Space Network Handbook*. Greenbelt: Goddard Space Flight Center, 2007
- 20 Mai T. Tracking and data relay satellite TDRS fleet. 2019, [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/tdrs\\_fleet](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/tdrs_fleet)
- 21 Campbell A. Tracking and Data Relay Satellite TDRS. 2017, [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/tdrs\\_main](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/services/networks/tdrs_main)
- 22 Space Communications and Navigation Office NASA Headquarters. Space Communications and Navigation (SCaN) network architecture definition document (ADD), Volume 1: Executary summary, revision 2. 2012, [http://www.nasa.gov/pdf/675092main\\_SCaN\\_ADD\\_Executive.pdf](http://www.nasa.gov/pdf/675092main_SCaN_ADD_Executive.pdf)
- 23 Gitlin T, Walyus K. NASA's space network ground segment sustainment project preparing for the future. 2013, [http://www.vadatech.com/media/pdf\\_SGSS-NASA-Paper-001.pdf](http://www.vadatech.com/media/pdf_SGSS-NASA-Paper-001.pdf)
- 24 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
- 25 NASA. NASA's space-based relay study: Overview and direction (SBRS white paper). 2013, <http://www.nasa.gov/sites/default/files/SBRWhitePaper3-7-2013.pdf>
- 26 Edwards B L, Israel D J. A geosynchronous orbit optical communications relay architecture. In: *Proceedings of the 2014 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE, 2014. 1–7
- 27 Israel D J, Edwards B L, Staren J W. Laser communications relay demonstration (LCRD) update and the path towards optical relay operations. In: *Proceedings of the 2017 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE, 2017. 1–6
- 28 NASA. What is the laser communications relay demonstration? 2020, [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/tdm/lcrd/overview.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/lcrd/overview.html)
- 29 Israel D J, Shaw H. Next-generation NASA earth-orbiting relay satellites: Fusing microwave and optical communications. In: *Proceedings of the 2018 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky: IEEE, 2018. 1–7
- 30 ESA. Artemis announcement of opportunity. 2010, <http://telecom.esa.int/telecom/media/document/ARTEMIS%20A0%20-%20Issue%2010.pdf>
- 31 ESA. European data relay system: The space data highway. 2018, [https://esamultimedia.esa.int/docs/telecom/EDRS\\_factsheet\\_EN.pdf](https://esamultimedia.esa.int/docs/telecom/EDRS_factsheet_EN.pdf)
- 32 Witting E M, Hauschildt H, Murrell A, et al. Status of the European data relay satellite system. In: *Proceedings of the International Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS)*. Ajaccio: ESA, 2012. 1–8
- 33 Lucente M, Re E, Rossi T, et al. Future perspectives for the new European data relay system. In: *Proceedings of the 2008 IEEE Aerospace Conference*. Montana: IEEE, 2008. 1–7
- 34 AIRBUS. SpaceDataHighway: 10000 successful laser connections-Reliability of 99.8 percent. 2018, <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2018/05/spacedatahighway-10,000-successful-laser-connections.html>
- 35 JAXA. Data relay test satellite “kodama” (DRTS). 2017, <http://global.jaxa.jp/projects/sat/drts/index.html>
- 36 Yamakawa S, Hanada T, Kohata H. R&D status of the next generation optical communication terminals in JAXA. In: *Proceedings of the 2011 International Conference on Space Optical System and Application*. Santa Monica: IEEE, 2011. 389–393
- 37 Chishiki Y, Yamakawa S, Takano Y, et al. Overview of optical data relay system in JAXA. In: *Proceedings of the SPIE 9739, Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVIII*, Spie Laser. Boulder, 2016. 1–5
- 38 Wang L, Jiang C, Kuang L, et al. High-efficient resource allocation in data relay satellite systems with users behavior coordination. *IEEE Trans Veh Technol*, 2018, 67: 12072–12085
- 39 Sun B S. Application of China's TDRSS in space rendezvous and docking missions (in Chinese). *J Spacecraft TT&C Tech*, 2014, 33: 183–187 [孙宝升. 我国中继卫星系统在交会对接中的应用. *飞行器测控学报*, 2014, 33: 183–187]
- 40 Li Y H, Luo B, Guo W G, et al. Feasibility analysis of using Ka-band of TDRS to support wireless communication for spacecraft reentry (in Chinese). *Manned Spaceflight*, 2015, 21: 582–588 [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. *载人航天*, 2015, 21: 582–588]
- 41 Liu B G, Wu B. Application of TDRSS in Chinese space TT&C (in Chinese). *J Spacecraft TT&C Tech*, 2012, 31: 1–5 [刘保国, 吴斌. 中继卫星系统在我国航天测控中的应用. *飞行器测控学报*, 2012, 31: 1–5]
- 42 Shan C S, Li Y H, Sun H Z. Tracking and data relay satellite system for huge number satellite control (in Chinese). *Chin Space Sci Tech*, 2017, 37: 89–96 [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. *中国空间科学技术*, 2017, 37: 89–96]
- 43 Sun B S, Cao Z R, Ding H. A concept of satellites' health management based on TDRS SMA (in Chinese). *Trans Beijing Inst Tech*, 2019, 39:

- 1203–1206 [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. 北京理工大学学报, 2019, 39: 1203–1206]
- 44 Cao Z R, Sun B S, Yao Y J, et al. TDRS SMA for spacecraft on orbit control (in Chinese). *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. 宇航学报, 2020, 41: 1434–1439]
- 45 Zhang Q, Pei Y, Wang X H. Research on vehicle's telemetry command and communication system based on TDRSS (in Chinese). *J Telemetry, Tracking Command*, 2014, 1: 18–22 [张强, 裴胤, 王小辉. 基于中继卫星的运载火箭天基测控系统研究. 遥测遥控, 2014, 1: 18–22]
- 46 Wang Y, Gong C H, Zhang J G, et al. Research on key technologies of high-speed TT&C based on TDRSS over vehicle's whole flight (in Chinese). *Missiles Space Vehicles*, 2020, 4: 112–116 [王洋, 宫长辉, 张金刚, 等. 高码率全程天基测控关键技术研究. 导弹与航天运载技术, 2020, 4: 112–116]
- 47 Li H Y, Xue G H, Zhou J, et al. Application prospect of tracking and data relay satellite system (TDRSS) in TT&C ship (in Chinese). *Telecommun Eng*, 2010, 50: 118–120 [李红艳, 薛国虎, 周江, 等. 跟踪与数据中继卫星系统在测量船上的应用前景. 电讯技术, 2010, 50: 118–120]
- 48 Meng L F. Satellite relay data link for UAVs (in Chinese). *J Spacecraft TT&C Tech*, 2012, 31: 24–27 [孟立峰. 无人机系统的卫星中继数据链. 飞行器测控学报, 2012, 31: 24–27]
- 49 Fang F, Zhang R, Ma Y W, et al. Discussion on guided space-based TT&C for new space vehicle (in Chinese). *Spacecraft Eng*, 2018, 4: 74–81 [方峰, 张睿, 马玉伟, 等. 临近空间飞行器采用引导式天基测控的探讨. 航天器工程, 2018, 4: 74–81]
- 50 Chai L. Technical characteristics analysis of the TT&C communication system for near space vehicle (in Chinese). *Spacecraft Eng*, 2010, 31: 1697–1705 [柴霖. 临近空间测控系统技术特征分析. 宇航学报, 2010, 31: 1697–1705]
- 51 Wang L, Jiang C X, Kuang L L, et al. Repeated game based cooperation mechanism for antenna beam resource allocation in TDRSS. In: *Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Communications (ICC 2018)*. Kansas City, 2018. 1–6
- 52 Sanchez M, Selva D, Cameron B, et al. Results of the MIT space communication and navigation architecture study. In: *Proceedings of the 2014 IEEE Aerospace Conference*. Big Sky, 2014. 1–14
- 53 Wang L, Kuang L L, Huang H M. TDRSS traffic model based on time and spatial characteristics (in Chinese). *J Tsinghua Univ (Sci & Technol)*, 2017, 57: 55–60 [王磊, 匡麟玲, 黄惠明. 基于时空特征的中继卫星系统业务模型. 清华学报(自然科学版), 2017, 57: 55–60]
- 54 Chelmins D T, Johnson S K, Chelmins D, et al. Lessons learned in the first year operating software defined radios in space. In: *Proceedings of the AIAA SPACE 2014 Conference and Exposition*. San Diego: AIAA, 2014. 1–6
- 55 Reinhart R C, Kacpura T J, Johnson S K, et al. NASA's space communications and navigation test bed aboard the international space station. *IEEE Aerosp Electron Syst Mag*, 2013, 28: 4–15
- 56 Ferreira P V R, Paffenroth R, Wyglinski A M, et al. Reinforcement learning for satellite communications: From LEO to deep space operations. *IEEE Commun Mag*, 2019, 57: 70–75
- 57 Zhang L H, Xiong L, Sun J, et al. Technical characteristics of the relay communication satellite “Queqiao” for Chang'e-4 lunar farside exploration mission (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 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. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 138–146]
- 58 Gao S, Zhou W Y, Zhang L, et al. Trajectory design and flight results for Chang'e 4-relay satellite (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 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. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 156–165]
- 59 Sun Z Z, Wu X Y, Liu S, et al. Design and verification of relay communication system for lunar farside exploration (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2019, 49: 147–155 [孙泽洲, 吴学英, 刘适, 等. 地月中继链路系统设计与验证. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 147–155]
- 60 Baoyin H X. Preface: Dynamics, guidance, navigation and control in Mars exploration (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2020, 50: 1125 [宝音贺西. 前言——火星探测中的动力学、制导、导航与控制. 中国科学: 技术科学, 2020, 50: 1125]
- 61 Erwin S. Space Force planning for a future of smaller, cheaper satellites. 2021, <https://spacenews.com/space-force-planning-for-a-future-of-smaller-cheaper-satellites>
- 62 del Portillo I, Cameron B G, Crawley E F. A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband. *Acta Astronaut*, 2019, 159: 123–135
- 63 Wang C T, Zhai L J, Xu X F. Development and prospects of space-terrestrial integrated information network (in Chinese). *Radio Commun Tech*, 2020, 46: 493–504 [汪春霆, 翟立君, 徐晓帆. 天地一体化信息网络发展与展望. 无线电通信技术, 2020, 46: 493–504]
- 64 people.cn. “China Space Day” in 2019: A space station is planned to be built around 2022 (in Chinese). 2019, <http://m.people.cn/n4/2019/0424/c1453-12625276.html> [人民网. 2019年“中国航天日”: 计划2022年前后建成空间站. 2019, <http://m.people.cn/n4/2019/0424/c1453-12625276>.

[html\]](#)

- 65 Wang L, Jiang C, Kuang L, et al. Mission scheduling in space network with antenna dynamic setup times. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 2019, 55: 31–45
- 66 Wang L, Jiang C X, Kuang L L, et al. TDRSS scheduling algorithm for non-uniform time-space distributed missions. In: Proceedings of the 2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017). Singapore, 2018. 1–6

## Investigations and proposals for data relay satellite systems

WANG Lei, JI Tao, ZHENG Jun & FAN DanDan

*Beijing Space Information Relay and Transmission Technology Center, Beijing 102300, China*

After more than ten years of development, China's data relay satellite (DRS) system has gradually become an efficient space-based information network infrastructure, which provides tracking services and high-bandwidth, near continuous, communications support for users' many types of spacecraft placed in lower altitude than the geosynchronous orbit. With rapid increase in space activities over the past decades in China, the demand for the DRS system is growing evidently. This paper, mainly from the perspective of application, gives a comprehensive review on the DRS systems worldwide and summarizes the application status of China's DRS system in these years. Then, we analyze the essence and difficulties of three key bottlenecks in actual DRS system and develop a set of comprehensive and effective solutions for those bottlenecks in the system resource management. Finally, on the basis of refining the application trends of such systems, we give some proposals for future construction and application of China's DRS system, which includes further completing the system, enhancing the relay satellites' capabilities, and improving the system operation efficiency. This paper aims to provide global perspectives and technical directions for decision-makers, scholars, and engineers related to the space information network. Moreover, for effectively solving the contradiction between the rapid growth of requirements and limited resources and promoting the capacity of China's DRS system, we point out the most important development trends, challenges, and work proposals from the perspective of actual applications.

**data relay satellite system (DRS system), space information network (SIN), resource management, mission scheduling, inter-satellite link, optical communication**

doi: [10.1360/SST-2020-0463](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0463)