

智能一体化航天测运控网络发展探析

张 威, 吴 涛, 马 宏, 焦义文, 蔡 洋

(航天工程大学电子与光学工程系, 北京 101416)

摘 要: 随着空间应用研究的不断拓展, 空间系统正朝着空间组网、一体化运行、智能服务的方向迅速发展。如何构建智能化、一体化的航天测运控网络成为我国未来航天测运控网络发展的关键问题。针对该问题, 首先对国内外航天测运控网络的发展现状进行剖析, 总结分析航天运控网络面向智能一体化发展存在的共性问题 and 挑战。在此基础上, 给出对智能一体化测运控网络内涵的理解, 并初步设计智能一体化测运控网络的体系架构, 进而对未来建设智能一体化测运控网络需要解决的关键技术问题进行探讨。

关键词: 航天测控网; 航天运控网; 智能一体化; 体系架构

中图分类号: V556

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021024

Discussion on the Development of Integrated and Intelligent Space TTC&OC Network

ZHANG Wei, WU Tao, MA Hong, JIAO Yiwen, CAI Yang

Department of Electronic and Optical Engineering, Space Engineering University, Beijing 101416, China

Abstract: With the continuous development of aerospace applied research, the space system is rapidly developing towards space networking, integrated operation and intelligent service. Therefore, how to construct an integrated and intelligent space TTC&OC network more and more becomes the key problem in developing our future national space TTC&OC network. Aiming at this problem, the development status of the space TTC&OC network at home and abroad were first analyzed, then the common problems and challenges of the space TTC&OC network for the development of intelligent integration were summarized and analyzed. On this basis, an interpretation of the integrated and intelligent space TTC&OC network was given. Preliminary design of the integrated and intelligent space TTC&OC network architecture was also given. Furthermore, some key technical problems in constructing the future integrated and intelligent space TTC&OC network were discussed.

Keywords: space tracking telemetry and command (TTC) network, space operation and command (OC) network, integrated and intelligent, architecture

1 引言

我国航天测运控网络担负着各类航天器的测控管理和任务应用。其职能和任务主要包括: 运载火箭的测控, 航天器早期轨道段和返回轨道段的测控, 航天器的长期管理(譬如飞行控制、碰撞规避、异常处置), 航天器的任务管控(譬如任务规划、操作控制、数据接收), 以及航天测运控站网资源的运行管理和调度使用。可以说, 航天测运控网络是我国航天任务指挥控制的核心, 是航天器能够稳定在轨运行并充分发挥效能的关键。我国当前的航天测运控网络已经圆满完成载人航

天等多项重大航天测控任务, 管理着在轨航天器, 为我国航天事业的发展做出了重大贡献, 有效地支撑了测绘、通信、导航、气象、海洋、空间探索等领域的应用与发展^[1]。随着空间应用研究的不断拓展, 空间系统正朝着空间组网、一体化运行、智能服务的方向迅速发展, 呈现出海量空间布点、分布式星群组网、立体多层分布、异构平台融合的新发展趋势, 对测控网的发展带来巨大冲击。此外, 我国空间利益的不断拓展等也要求现有的测控网朝着安全、弹性、灵活的方向发展。如何构建智能化、一体化的航天测运控网络成为我国未来

航天测控网络发展的关键问题。

2 航天测控网络的发展剖析

2.1 各国航天事业蓬勃发展

随着航天工业的进步，目前在航天领域出现了一些新的发展趋势。首先是低成本火箭发射技术的推动，其中最具代表性的是美国SpaceX公司^[2-3]，其猎鹰（Falcon）系列火箭单次发射报价甚至已降低到5 000万美元，低于我国长征系列火箭，而其2018年2月发射成功的大型猎鹰（Falcon Heavy）火箭的单次发射报价也仅为9 000万美元。此外，轨道科学公司（Orbital Sciences Corporation, OSC）等^[4]都是低成本火箭发射的代表，它们均已获得NASA等实际发射任务合同。更值得关注的是，2015年12月，SpaceX公司宣布“猎鹰-9”火箭将11颗人造卫星送入预定轨道后，第一级火箭顺利被回收，这是人类首次成功回收轨道运载火箭。2018年2月，SpaceX公司首次尝试回收火箭整流罩，虽然以失败告终，但仅有几百米的误差足以证明其离成功已不远。如果人类能够成熟掌握火箭回收与重复使用技术，未来航天发射的成本有望大大降低，真正的空间组网时代即将到来。以“猎鹰-9”为例，单次发射费用报价5 000万美元，火箭造价1 600万美元，但燃料费仅需要20万美元。如果能进一步回收两片造价共达600万美元的整流罩，将会进一步拉低成本。微小卫星平台逐渐成熟并走向实用。微小卫星一般研制周期较短、成本低，而且大量使用成熟商业级零件更进一步降低了其制造成本。尽管载荷能力、在轨时间有限，但是由于研制成本低，公斤级Cubesat卫星已大量应用于各类科学实验和在轨验证任务^[5]。

正是由于发射成本和制造成本的大幅下降，利用多颗微小卫星组网方式实现强大功能的空间网络正不断涌现。以对地观测为例，被谷歌收购的Skybox以及Planet Labs等初步创立的卫星公司正试图通过大量部署几十公斤级甚至公斤级的廉价低轨微小卫星形成对地观测网络^[6-7]，结合其地面站网络实现近实时的高分辨率对地观测。在通信领域，OneWeb、SpaceX等公司都正在筹建低轨小卫星组成的通信网络，为全球提供互联网接入。OneWeb计划发射650余颗轨道高度为1 200 km的卫星组成星座，为地面提供Ku频段的宽带接入服务^[8]。2016年12月OneWeb完成新一轮融资，并于2017年6月从美国联邦通信委员会（Federal Communications Commission, FCC）成功申请到低轨卫星通信网络运营执照。2018年12月，OneWeb公司创始人Greg Wyler宣布最终星座中卫星数量将会削减三分之一，但是仍有600余颗的可观数量^[9]。2020年，OneWeb虽因财务原因破产，但收购其频率使用权和相关

技术并继续建设是各航天大国正在谋划的方案。SpaceX公司的天基互联网星座系统Starlink将由多频段卫星组成，其中包含第一期1 584颗工作在550 km和2 824颗工作在1 100 km 近地轨道（Low Earth Orbit, LEO）上的Ka频段和Ku频段卫星，不远的未来还有二期7 518颗工作在340 km的甚低地球轨道（Very Low Earth Orbit, VLEO）上的V频段卫星，为全球提供无缝覆盖的高速宽带接入服务^[10]。2020年5月，SpaceX公司又向FCC申请了新一代大型星座，包含了3万余颗卫星。截至2021年3月底，Starlink已经完成1 205颗卫星的发射。而美国媒体发展基金（Media Development Investment Fund, MDIF）正在实施的一项名为“外联网”（OuterNet）的计划，将采用900~1 000颗轨道位置非常低的小卫星，利用Wi-Fi垃圾频段，向全球提供免费的Wi-Fi接入^[11]。

除此之外，世界其他航天大国也纷纷抛出自己的巨型低轨星座计划。俄罗斯的Yaliny系统计划利用135颗工作在600 km轨道高度的LEO卫星向全球提供网络覆盖。加拿大的Telesat LEO系统计划利用292颗工作在1 000 km轨道高度的卫星向全球提供宽带服务。韩国三星公司规划了4 600颗的空中互联网计划，意欲打造全球性廉价空中网络。印度也提出了包含600颗轨道高度为1 400 km LEO卫星的大型星座系统Astrome Technologies。

中国提出了“鸿雁星座”“虹云工程”“九天微星”“银河航天”等大型低轨星座系统^[12]。其中鸿雁星座将分3步走：先发射试验卫星，再发射54颗核心骨干星，最后形成300余颗卫星的完整星座系统。其首颗试验卫星“重庆号”已经于2018年12月发射成功。而虹云工程则将按照“1+4+156”3步来实现：第一步发射一颗技术试验星；第二步发射4颗业务试验星；第三步实现全部156颗卫星组网运行。虹云工程的首颗试验星“武汉号”也已经于2018年12月发射成功。2020年9月，中国正式向国际电信联盟（International Telecommunication Union, ITU）提交了中国低轨星座的轨道和频率申请资料，申请的两个星座代号分别为GW-A59和GW-2，总计星座数量为12 992颗，意味着我国将迈入巨型星座时代。

可以看出，未来的航天器是大数量、全球分布的，甚至可能在数量级上远超世界各国目前所管理的数量值。对于我国，如果仍然延续目前测控网络的发展方式，测控、运控、应用分离，专事专办、一事一型号，将很难适应未来航天快速发展组网的需求，在星座测控管理、发射测控支持等方面捉襟见肘。

2.2 航天测控网络发展

测控网是各国航天体系的重要组成部分，是航天

力量发挥效能的关键环节。本文对航天测控网络面向智能一体化的发展进行剖析,分析各航天大国面临的共性问题,引出主要的研究方向和解决思路。

2.2.1 测控网络趋向天地一体化

长期以来,陆海基测控一直是我国航天器测控的主要方式。经过多年的发展,我国已经建成了陆海基C频段测控网、S频段统一测控网以及一系列卫星数据接收处理站。这些系统已经成为我国目前主要的航天测控手段,圆满地完成载人航天等多项重大航天测控任务,为我国航天事业的发展做出了重大贡献。但随着空间科学活动逐步深入和空间应用研究的不断发展,航天任务日趋复杂,航天器数量呈现出爆发式增长的态势。如何保障未来超大量、多任务航天器正常在轨运行,对测控系统和测控网的体系构建和管理调度提出了新要求。目前我国运载火箭及中低轨卫星测控任务主要通过地基测控站完成,大部分测控资源囿于国内,其全域覆盖能力和利用效率受到一定限制。与地基测控系统不同,天基测控网络以地球同步轨道卫星、中轨道导航卫星为载体,覆盖范围大,数据传输实时性强,测控数据传输可靠性高,不易受大气环境的影响,向下可支持中低轨卫星的高动态持续测控、宽带数据实时传输,向上可支持深空探测的超远程精密测控、大时延可靠传输。

天基测控网中包含位于地球同步轨道的中继卫星系统和位于中轨的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)。比较有代表性的中继卫星系统包括美国已经发展到第三代的跟踪与数据中继卫星系统(Tracking and Data Relay Satellite System, TDRSS)^[13]、用于军事侦察的卫星数据系统(Satellite Data System, SDS)^[14]以及我国的天链中继卫星系统^[15]。中继卫星不仅转发用户的载荷数据,还前向转发控制信息,反向转发遥测信息,同时可通过双向测距测速的方式对用户航天器实现定轨。中继卫星能够有效提高地面测控网的测控覆盖率、导弹全程测量能力和多目标同时测控能力,并且能完成各类对地观测卫星、载人航天器的高速实时数据传输任务。GNSS中比较有代表性的是美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、欧盟的Galileo以及我国的北斗系统^[16]。GNSS从严格意义上讲并不是完整的测控系统,仅对低轨道航天器进行定轨服务,而不能提供遥测、遥控和数据接收功能。但用户航天器在利用GNSS进行定轨时,仅接收信号,自主确定位置,并且用户数量不受限制,是一种非常有效的测定轨辅助手段。

总体来看,目前世界各国的天基测控网络的测控精度、用户容量、管理模式、传输协议等方面与地基测控网络均有着较大差异,二者如何融合发展、资源

互通、优势互补,还有很多的技术问题需要探索。譬如:一体化测控网络体系架构设计、测控网络链路管理与拓扑控制、测控网络资源融合调度、测控用户的随遇接入技术等。

2.2.2 地面测控、运控以及应用系统一体化融合发展

目前测控网以及数据应用系统是我国航天体系的重要组成部分,是航天力量发挥效能的关键环节。狭义地讲,测控网主要负责卫星平台本身的测控管理(即常常提到的“工程测控”)。经过多年的发展,已经构建成了“陆、海、空、天”布局、全球分布、功能完备的网络体系,圆满地完成了多项重大航天任务,有力地支持了我国航天事业的发展。运控网则主要负责卫星有效载荷的测控管理以及载荷所产生的各种类型数据的接收(通常称为业务测控)。应用系统负责载荷数据的处理、信息产品的生成、数据的分析与研究,随着航天事业的不断发展,各航天大国甚至将“应用”提升到航天工程与任务的主体地位,譬如空间科学研究与探索,乃至于人们的日常生活。

由于我国运控网采用各自独立建设的发展模式,造成运控网的运行管理部门较多。仅按用途划分,就可包括资源卫星、气象卫星、海洋卫星、侦察卫星、通信卫星、导航卫星、科学探测卫星等运控网,同一用途种类的卫星又可能分属不同的管理部门。同时,运控网和测控网的相对分离,更导致整体呈现出独立建设、自成体系的状态:同一颗卫星多个部门控制,站网资源重复建设难以共享,载荷信息从接收到应用时间冗长。种种现象表明,这种测控、运控分离发展的模式制约了航天系统应用效能以及站网资源建设的效益发挥,面临着卫星管理效率低下、信息传输各成体系、信息难以共享融合、快速响应能力弱、系统的稳健性以及安全能力存在缺陷等问题。因此,未来测控、运控网将会朝着测控网络的融合方向快速发展,经过功能体系的重塑、信息应用能力的培育,测控网络将不再是狭义上的“工程测控网”,而能够同时实现对航天器的跟踪测量、遥测、遥控、数据接收,并对接收到的各类卫星数据进行融合处理、产品生成,能够及时、无缝地将信息产品分发到用户。测控、运控和应用一体化后的“测控网络”由统一的部门负责管理,统筹调度原有测控网和应用系统的资源,提供快速响应、网络化的测控和信息应用服务。

测控、运控以及应用一体化所面临的不仅是编制体制和发展模式的挑战,更多的是一体化过程中所面临的技术挑战,譬如测控与数据传输站网融合方案、平台载荷一体化管控方法、基础和专业数据的融合处理、信息

产品的快速生成、应用数据的优化分发等。

2.2.3 测控网络朝着通用化、智能化的方向阔步前进

随着以载人航天、探月为代表的航天技术的迅速发展,航天任务日益复杂,未来的航天器更是大数量、全球分布的,但航天器的空间组网、一体化运行、智能化服务离不开测控网的支撑。对于各航天大国,测控网普遍存在的问题是:由于不同的航天任务对航天测控系统提出了不同需求,各国在前期发展时都采用了面向不同的航天任务研制专用测控系统的做法。这就造成随着航天系统不断发展壮大,航天器数量越来越多,地面部署的测控系统也越来越多,支持维护费用不断上涨。

针对这种现状,美国提出了“企业级地面体系”(Enterprise Ground Architecture, EGA),其思路是构建一个通用的测控系统来完成其所有的军用卫星测控指挥与控制,包括采用通用和标准化的软硬件、接口以及网络配置、安全配置,提供通用化的测控服务等。通过这种方式打破多种测控系统“烟囱式”格局,从而提高测控网资源利用效率,增强测控网的安全性,降低运行维护成本。此外,EGA架构计划利用智能化、信息化技术,将多个地面测控站以及地面网络虚拟化,包括面向服务的体系架构、基于云的测控资源管理、测控系统软件定义组网(Software Defined Network, SDN)、网络功能虚拟化(Network Function Virtualization, NFV),并通过统一的骨干网络,譬如地面栅格(Global Information Grid, GIG),进行信息交互和应用产品分发^[7]。类似的,我国航天测控网也存在着软件随硬件定制,软硬件紧密耦合,系统研制完成后功能、性能固化等问题,使得大部分测控系统“一事一型号、出厂定终身”;一些新算法、新技术难以快速吸收利用,系统的性能提升困难,功能难以扩展,并且各类测控系统型谱复杂,日常维护困难,耗费了大量的人力和财力。类似美国提出EGA,我国测控网资源通用化的需求异常紧迫。

测控资源的通用化为测控网进一步自主、智能化管理提供了基础条件。利用通用化、软件化、虚拟化的测控资源,智能测控网络能够自主地对测控用户、测控业务、测控资源、传输信道、处理能力、数据分发等网络资源与行为进行智能认知,并依据认知结果实现测控网络效用的最大化。智能化的测控网络将最终打破测控资源之间的壁垒,减少对人力资源的依赖,提升网络用户容量,提高服务质量,允许用户航天器按需随遇接入;并通过各类测控资源的调配转移,提升整个测控网络的稳健性和安全性。无论是测控资源的通用化还是测控网都面临比较多的技术挑战。譬如测控资源的整合方法、测控网络的虚拟化技术、自主组网运行管理技术、智能

天线技术、智能路由技术、航天数据智能处理分发技术、测控网智能故障诊断与健康管理等。

3 智能一体化航天测运控网络体系架构初步设计

从上述航天测运控网络的发展趋势来看,未来航天测运控网络应是一体化、智能化的。其中,一体化的主要体现不仅包括狭义上测控和运控的一体化,还包括天基、地基测控网的一体化,乃至最终的测控网资源通用化。测运控网络智能化建立在测控网一体化、测控资源通用化的基础上,主要体现在测控网能够对用户、业务、资源、应用等方面进行感知,并依据感知结果学习、判断测控网的行为模式、行为规律和行为特点,进而对整网资源实现优化调度、整理转移,支持航天器按需随遇接入,并对航天信息产品融合处理、快速分发,最终达到一定约束条件下测控网络行为的最优化、测控网络效用的最大化。这里依据我国现有的天地资源,考虑我国不能全球布站的约束,对未来智能一体化测运控网络体系架构进行初步设计。根据未来智能一体化测运控网络中的节点属性、链路能力、任务特点、空间分布等,将其划分为以下几个主要组成部分,智能一体化航天测运控网络体系架构如图1所示。

(1) 天基测控骨干网:天基骨干网的卫星节点分布在3~5个不同的对地静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)位置上,每个轨道位置可能由多颗卫星组成卫星簇。物理上可能包括多颗分布式卫星,分别偏向于天线收发、跟踪定轨、交换存储、信息传输、数据处理、星簇管理、应用分发等功能。逻辑上可以看作一个卫星节点,簇内卫星相互协作,自主化运行,完成传统单颗天基测控卫星难以胜任的未来大数量卫星测运控、数据应用分发等任务。星簇内卫星成员通过高速的微波或激光链路实现信息的交互,并可随时根据需要增发成员加强功能、更新替换。各星簇内单个成员卫星的故障不会导致整个星簇故障,星簇通过自主的健康管理及时隔离失效卫星,重构簇内结构。整个天基骨干网则能够根据各星簇的任务情况,智能认知接入用户需求并实时判决分配测控资源。

(2) 地基云测控资源:对应现有的测控站网资源,结合前文的分析,未来测控站网资源将会逐步向测运控一体化、通用化、软件化、虚拟化的方向发展,并最终可以用云的概念来描述。这时,测控服务和服务质量成为测控网关注的主体,而具体采用哪副测控天线收发、哪些计算资源进行基带处理、哪些路径进行应用分发,则交由云测控资源的智能化调度中心去感知、学习、计算和判决。地基测控资源云中所包含的物理实体可包括

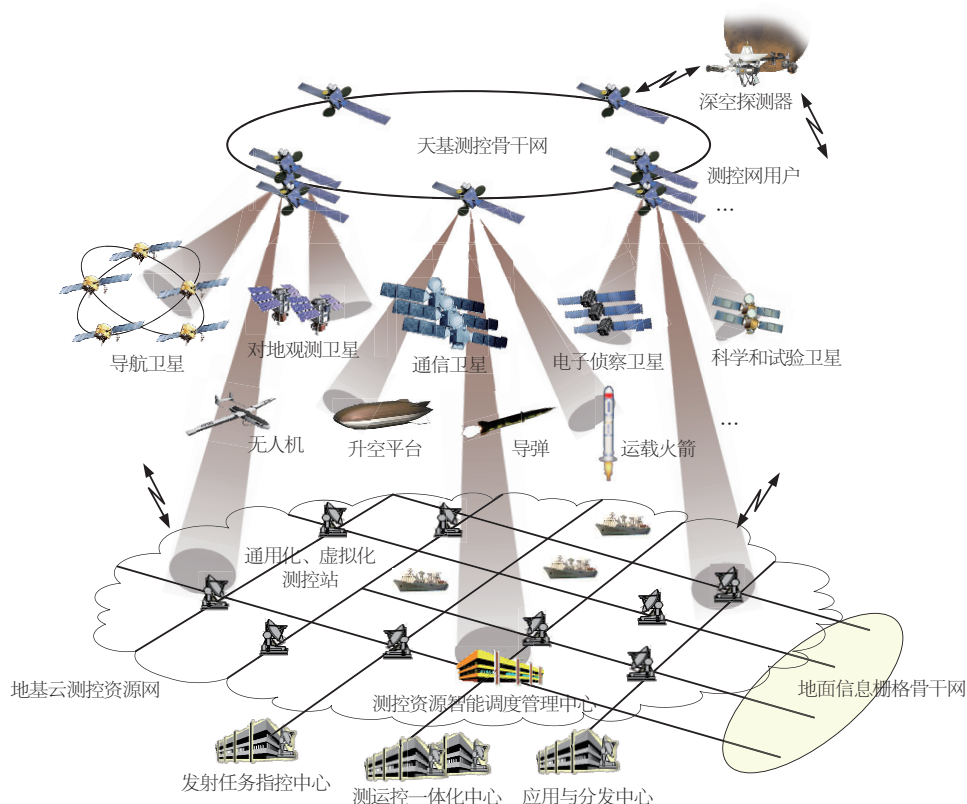


图1 智能一体化航天测控网络体系架构

数字化多波束多频段天线、基于通用平台和通用软件的数字基带、通用数据处理和应用分发平台等，以及将这些资源联系一起的地面信息栅格骨干网。逻辑上则把这些物理实体作为云资源的一部分，通过细节的模块化以及应用与平台的解耦合，实现云测控资源的共用、自由分配与调度。天基测控骨干网和地面云测控资源网形成天地双骨干的架构。

(3) 测控中心：测控中心是测控网络的“大脑”，负责一体化测控网中测控需求的解析、测控任务的制定、天地网络的管理维护、天地测控资源的智能调度、接收数据的融合处理、信息产品的高效分发等关键环节。从物理形式上看，测控中心可以集中建设也可以分布式建设；在逻辑功能上天基和地基，测控、运控与应用中心应是一体化的，主要包括发射任务指控中心、测控一体化中心、测控资源智能调度管理中心和应用与分发中心。

(4) 测控网用户：智能一体化航天测控网络的用户不仅包含遥感、通信、侦察、导航等各类卫星，还包含深空探测器、运载火箭、导弹、无人机、升空平台等各类飞行器。未来测控网面临的这些测控用户分布于不同的高度，数量巨大，且测控需求差异大。智能一

体化测控网在测控中心的指挥下，感知用户测控、数据传输、处理需求，优化调度分配测控资源，满足用户随时接入和高服务质量的需求。需要指出的是，全球导航卫星系统不仅是测控网的用户，也是测控定轨服务的重要提供者。

4 智能一体化测运控网络关键技术

相比传统测运控网络，智能一体化测运控网络具有以下显著特征。

(1) 用户节点类型多，网络具有异构性：智能一体化测运控网络的用户包含各类型卫星、深空探测器、火箭、导弹、无人机、升空平台等，这些测控用户节点需求差异大、技术体制不一，使得网络具有明显的异构性，给测控网资源的通用化和虚拟化带来一定困难。

(2) 空间分布上是立体多层的：智能一体化测运控网络中提供测控服务的平台和用户分布在从地面、低空、空间到深空不同的层面上，整个网络的拓扑呈现立体多层的特点。

(3) 网络行为复杂，动态性强：各类测控用户高速运动，且其业务需求会根据任务不断变化，从而导致网

络中的节点、链路随时间和空间不断变化,网络的空时行为复杂,网络具有高动态性。

综上所述,智能一体化测控网络节点类型众多,网络行为复杂,其特殊性和特点给网络的运行带来方方面面的挑战。本文对智能一体化测控网络未来建设、运行和管理所涉及的一些关键技术探讨如下。

4.1 体系架构顶层设计

在智能一体化测控网络体系架构方面,需要研究和突破的关键技术主要包括如下几种。

(1) 对一体化测控网络体系架构的细化。探索未来测控网络在服务多元化、智能化空间信息系统的具体架构形式,包括未来测控网络由哪些关键部分组成、相互之间的连接关系、工作的方式,分析天基测控网与地基测控网的有效融合方法,细化论证测控、运控系统分阶段实现一体化运行的方案、步骤。

(2) 研究基于云的测控网络构建技术。包括研究基于大数据和云架构的测控用户移动管控技术,实现航天器高覆盖、低成本、灵活响应的测控服务;研究软件化、标准化、通用化、智能化的地面站系统体系结构和资源池化技术,从而实现维护成本低、扩展能力好、整合性强、稳健性高的测控网络。

(3) 研究智能一体化测控网络的安全防护技术。从测控网络架构形式、运行模式、测控链路体制、拓扑控制方式等方面加强网络安全防护,提高测控网络在强对抗条件下的生存能力、复杂环境中完成任务的能力。

4.2 海量卫星的服务支撑

随着星座系统整体规模的不断增大,各类巨型星座遍地开花,智能一体化测控网络需要重点解决的问题就是如何完成对海量卫星的测控服务支撑^[18],研究和突破的关键技术主要包括以下几种。

(1) 全空域多目标测控系统的研制。基于相控阵、透镜天线、超材料等全空域多目标数字波束天线技术研究建设全空域多目标测控系统,在较低成本下实现单站同时对数十颗以上卫星的测控支撑。

(2) 构建在轨航天器与测控系统的按需随遇接入应用策略,建立海量航天器多目标测控管理新型模式,实现航天器按需接入、测控信息即时传输,提升服务质量和运行效率。

(3) 航天器自主导航与制导。研究基于导航卫星、新型惯性系统、脉冲星导航等方式的航天器自主导航与制导技术,减少卫星对地面测控系统的依赖性,提高卫星的在轨生存能力。

4.3 网络资源管理调度

海量测控目标同样对智能一体化测控网络的资源管理调度方面发出了挑战。在网络资源管理调度方面,需要研究和突破的关键技术主要包括以下几种。

(1) 研究认知测控网络顶层设计。构建能够对测控用户、测控业务、测控资源、传输信道、处理能力、数据分发等网络资源与行为进行智能认知的测控网络架构,并研究如何依据认知结果对整网资源实现优化调度、整理转移,达到相应约束条件下的测控网络行为最优化。

(2) 研究测控自主计算与自主组网技术。建立天地站网智能化调度管理与服务新型模式,通过测控网络的自主运行与网络拓扑控制,实现海量航天器、巨型星座的自主管理、按需接入、随遇接入以及天地网络高效运行,并提升在轨航天装备管控能力与效率,支撑用户无感使用,达到全流程无人操作、全系统高度自主运行的目的,从而大幅减少人在回路,降低对人员规模与能力的要求。

(3) 研究应急条件下站网资源高效调度技术。重点针对航天器应急测控、站网受损或失效等突发任务的应急快速响应决策问题,分析应急任务资源需求特点、系统应急响应模式特征、应急任务优先策略、应急资源调配策略,研究基于任务触发的资源动态管理与高效调度算法,通过面向应急任务的快速响应决策调度,实现应急任务测控资源快速保障。

4.4 数据的高效接收、处理和分发

在智能一体化测控网络的测控和业务数据的高效接收、处理和分发方面,需要研究和突破的关键技术主要包括以下几种。

(1) 研究智能测控系统天线新技术。针对如何有效地对同时过境的多颗用户卫星实施智能化测控管理,研究新型数字多波束天线和天线组阵技术,通过多个天线、多个波束、多个频率的灵活调用,提升测控站高全空域、多用户的接入能力;研究太赫兹测控天线新技术,有效拓展测控系统频段,以利于更高速的数据接收。

(2) 研究虚拟化测控综合基带技术,针对传统测控综合基带处理平台软件随硬件定制,软硬件紧密耦合,系统研制完成后功能、性能固化,难以适应智能测控服务要求等问题,研究基于高性能通用计算机的测控综合基带实现方法,包括开放式体系架构设计、标准化组件开发技术、组件动态管理与高效调度技术、测控信号实时处理技术以及灵活高效的中间件技术等,实现测控信号处理资源的软件化、通用化和虚拟化。

(3) 研究测控与数据传输数据网融合处理、分发应用方法,对基础和专业数据的融合处理,对大数据进行挖掘,快速形成信息产品,并研究应用数据的优化分发方式。

(4) 研究高效的测运控信息传输技术,包括组网中继传输、高效的网络编码、信道编码技术等,实现测运控信息的高效、可靠传输。

5 结束语

随着空间应用研究的不断拓展,空间系统正朝着空间组网、一体化运行、智能服务的方向迅速发展,要求未来测运控网络实现智能化与一体化。智能一体化测运控网络是今后航天领域一个新的制高点,随着空间系统和测运控网络的不断发展,更多问题、更深入的分析还有待进一步探讨。

参考文献:

- [1] 徐爱民, 张国亭. 对我国商业航天测控管理有关问题的初步探讨[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(3): 157-163.
XU A M, ZHANG G T. Discussions on TT&C management of commercial space in China[J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2017, 36(3): 157-163.
- [2] 王竞. 从SpaceX崛起看美国航天领域军民融合[J]. 国防科技, 2018, 39(3): 110-114.
WANG J. Civil military integration in American space field from the perspective of the rise of SpaceX[J]. Defense Technology Review, 2018, 39(3): 110-114.
- [3] 杨开, 米鑫. SpaceX公司重复使用运载火箭发展分析[J]. 国际太空, 2020(9): 13-17.
YANG K, MI X. Development analysis of SpaceX's reusable launch vehicle[J]. Space International, 2020(9): 13-17.
- [4] 吴勤, 张梦焱. 美国商业航天发展分析[J]. 国际太空, 2016(5): 6-11.
WU Q, ZHANG M T. Analysis of commercial space development in the United States[J]. Space International, 2016(5): 6-11.
- [5] WANG J, ZHANG R, YUAN J, et al. Multi-CubeSat relative position and attitude determination based on array signal detection in formation flying [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(6): 3378-3393.
- [6] 刘韬. Skybox公司高分辨率小微卫星星座开启商业遥感2.0时代[J]. 高分遥感应用, 2014(3): 70-71.
LIU T. Skybox company high resolution small and micro satellite constellation opens the era of business remote sensing 2.0[J]. RS Application, 2014(3): 70-71.
- [7] PAULSEN G. Nano-scale sample acquisition systems for small class exploration spacecraft [C]//American Geophysical Union Fall Meeting. [S.l.:s.n.], 2015: 1-4.
- [8] JIANG J, YAN S, PENG M G. Regional LEO satellite constellation design based on user requirements[C]//2018 IEEE International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2018: 855-860.
- [9] 沈淮. OneWeb倒下, 资本的耐心决定成败?[J]. 卫星与网络, 2020(3):4.
SHEN H. Oneweb goes bankrupt, capital's patience decides success or failure? [J]. Satellite and Network, 2020(3):4.
- [10] FOUST J. SpaceX's space-internet woes: Despite technical glitches, the company plans to launch the first of nearly 12 000 satellites in 2019[J]. IEEE Spectrum, 2019, 56(1): 50-51.
- [11] MAKHDUMA F S, PATEL C A, AGRAWAL S. Outernet: Crossing over data gap using cubesats [C]//2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-4.
- [12] 章罗娜, 马忠成, 饶建兵, 等. 低轨卫星互联网发展趋势及市场展望[J]. 国际太空, 2020(11): 28-31.
ZHANG L N, MA Z C, RAO J B, et al. Development trend and market prospect of LEO Satellite Internet[J]. Space International, 2020(11): 28-31.
- [13] LIU H, LIU C. Technology analysis and scheme design of aerospace vehicles TT&C and communication based on relay satellites[C]//IEEE 9th International Conference on Communication Software and Networks. Piscataway: IEEE Press, 2017: 794-797.
- [14] DAY D A . Relay in the sky: The satellite data system[J]. Journal of the British Interplanetary Society, 2006, 59(1):56-62.
- [15] 郑恩红. 我国第二代中继卫星首星发射成功[J]. 太空探索, 2019(5): 7.
ZHENG E H. Successful launch of the first satellite of China's second generation relay satellite[J]. Space Exploration, 2019(5): 7.
- [16] 陈恺. 基于北斗导航系统的全球天基测控技术[J]. 数码世界, 2020(11): 25-26.
CHEN K. Global space based TT&C technology based on Beidou navigation system[J]. Digital World, 2020(11): 25-26.
- [17] 杨红俊. 美国航天测控企业级地面体系的发展[J]. 电讯技术, 2017, 57(7): 841-848.
YANG H J. Development of U. S. military enterprise ground architecture for space TT&C[J]. Telecommunication Engineering, 2017, 57(7): 841-848.
- [18] 周笛, 盛敏, 郝琪, 等. 巨型星座系统的网络运维与资源管控技术[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(1): 26-35.

ZHOU D, SHENG M, HAO Q, et al. Network operation, maintenance and resource management in mega constellation system[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2020, 1(1): 26-35.

[作者简介]



张威（1987-），男，博士，航天工程大学电子与光学工程系讲师，主要研究方向为航天器测量与控制、航天测控网络资源优化管理。



吴涛（1981-），男，博士，航天工程大学电子与光学工程系副教授，主要研究方向为航天器测量与控制、航天测控网体系架构、航天测控信号处理。



马宏（1976-），男，博士，航天工程大学电子与光学工程系副教授，主要研究方向为航天测控网体系架构、深空测控、航天测控信号处理。



焦义文（1985-），男，博士，航天工程大学电子与光学工程系讲师，主要研究方向为虚拟无线电测控、深空测控、天线组阵。



蔡洋（1991-），男，博士，航天工程大学电子与光学工程系讲师，主要研究方向为电磁场技术、天线设计。