

国际空间站测控通信支持及未来发展分析

摘要：本文简要介绍支持国际空间站飞行控制与测控通信的主要设施(分属5个国家的7个控制中心、2个地面通信网和4个数据中继卫星系统)，并在分析国际空间站飞行控制与测控通信支持能力现状的基础上，展望其未来的发展趋势。

1998年11月，随着国际空间站第一舱“曙光”舱的发射，休斯敦和莫斯科的国际空间站飞控人员和工程保障队开始联合行动，实施对国际空间站的飞行控制和测控通信支持。此后，随着国际空间站的不断发展，参与的国家 and 组织逐渐增多，其飞行控制和测控通信基础设施也逐渐发展成为分属多个国家和组织、遍布世界各地的地基设施和天基设施组成的系统，支持多种接口协议和标准。

国际空间站的地基测控通信支持基础设施遍布美洲、欧洲等地，其中，在国际空间站飞行控制及测控通信支持中起主要作用的主要包括7个控制中心、连接控制中心的通信网(NASA综合业务网和ESA互联地面子网)和多个载荷控制中心以及若干地面站。此外，在太空中，还有4个国家或组织的数据中继卫星为国际空间站提供测控通信支持。由于数据中继卫星覆盖范围广，在国际空间站的测控通信支持中起着至关重要的作用。

一、地面控制中心

(一) 美国

美国休斯敦任务控制中心(MCC-H)，负责国际空间站的整体操作及安全，以及所有 NASA 硬件的发射、对接和集成。

亚拉巴马州亨茨维尔载荷操作与集成中心(POIC)，设在马歇尔航天飞行中心(MSFC)的载荷操作与集成中心(POIC)协调所有 NASA 载荷的操作、规划和安全。提供管理和集成载荷操作的能力，还依照个别载荷用户的要求，为其提供操作和控制他们的载荷和实验的能力。

(二) 俄罗斯

俄罗斯莫斯科任务控制中心(MCC-M)，负责俄罗斯舱段的发射、对接、集成和控制，以及同 NASA 协调自拜科努尔发射场的发射，并在休斯敦任务控制中心发生紧急情况失去控制能力时接管空间站的控制。

(三) 欧洲

德国奥伯法芬霍芬“哥伦布”控制中心(Col-CC)，是“哥伦布”舱的操作中心，主要职能是：星上和地面的任务规划；监视、控制“哥伦布”舱的技术系统以及有效载荷；提供和操作配套的互联地面子网(IGS)；协调对国际空间站上的欧洲有效载荷的操作；在自动转移飞行器(ATV)控制(ATV-CC)中心控制和操作 ATV 期间协调欧洲实验载荷的操作；培训地面操作团队。

法国图卢兹 ATV 控制中心，位于法国图卢兹，负责操作欧洲的 ATV，并与位于莫斯科和休斯敦的任务控制中心以及“哥伦布”控制中心合作，在任务和交会对接期间每周 7 天、每天 24h 工作。ATV 发射阶段，ATV 控制中心协同圭亚那航天中心工作。

(四) 日本

日本筑波航天中心 TKSC，负责控制日本的硬件和发射器，它

为日本空间实验舱建立了研发与运行、空间实验支持和航天员训练的设施，统称为空间站综合中心，其中，直接负责日本空间实验舱的操作及控制的是日本空间实验室运行控制中心，或任务控制室(MCR)，对在轨的日本实验舱进行运行控制，并为 H-2 转移飞行器(HTV)提供控制支持，同时对 NASA 的任务控制中心和航天员操作综合中心提供支援。HTV 地面控制中心设在筑波航天中心国际空间站综合中心内，它协同国际空间站的地面控制中心共同控制 HTV。

(五) 加拿大

加拿大魁北克移动业务系统(MSS)操作设施(MOC)。隶属加拿大航天局(CSA)，负责监测空间站 17.4m 的机械臂，并培训航天员取得站上遥控设备的操作资格。所有航天员都要到蒙特利尔附近的圣于贝尔进行两周的一般性培训(针对具体任务的培训在休斯敦进行)。该设施还对 MSS 进行支持，其指令将送到休斯敦的控制设施处。

二、连接多个控制中心的地面通信网

连接控制中心和地面站的通信网主要是 NASA 综合业务网(NISN)和 ESA 互联地面子网(IGS)。

(一) NASA 综合业务网(NISN)性能不断提升

20 世纪 90 年代末期，NASA 专用通信网设施上通信业务向商业化转型，为此将原有的多个地面网络组建为 NISN，同时开始采用 IP 协议提供服务，IP 化完成后，NISN 于 2005 年至 2006 年间进行了技术更新，替换掉陈旧、不可维护的系统，改进关键网络的可维护性和可靠性，优化网络连通性，优化网络带宽，以更好地为关键任务提供更可靠的服务。

2006—2012 年间，经过几年的建设及改进，至 2012 年年底，

NASA 骨干网络发展成为基于同步光纤网(SONET)构建的广域网,具备环路保护(FRR)能力,故障恢复时间短于 50 毫秒。主干环路上共有 9 个节点,其中有 5 个节点是运营商的节点,NASA 有 4 个中心位于主干环路上。NASA 其他的各个中心或站点以双直连的方式连接到 NASA 位于主干环路的中心或运营商的节点。主干环路的容量为 10 吉比特/秒,支路容量为 2.5 吉比特/秒,还有部分线路为 622 兆比特/秒和 155 兆比特/秒。

2012 年至今,NASA 利用网络改进与运营合同 NASA 综合通信业务(NICS),对 NISN 开展了进一步的改进,主要是合并 NISN 的广域网和各中心局域网及业务,将它们改造成一个无缝的、端到端的网络,提供航天任务要求的协作能力,在更安全的同时,更好地服务于空间探索。在 NICS 合同下,至 2015 年,NISN 的网络性能有了进一步的大幅提升。根据科学应用国际公司网站 2014 年 3 月 5 日消息,科学应用国际公司称其设计、开发并完成了 NASA 电信网的升级,性能提升 10 倍。不仅网络性能大幅提升,更增加了应急通信能力,部署了移动业务。

(二) ESA 互联地面子网(IGS)

ESA 为国际空间站欧洲部分“哥伦布”舱和 ATV 提供支持的地面通信网是 IGS。IGS 建设之初就采用了 IP 协议,并提出未来要提供“全 IP 业务”。IGS 早期设计为异步传输模式(ATM)网络,由于成本原因,除主要的国际合作伙伴和四个载荷控制中心站点通过 ATM 网络连接到哥伦布控制中心外,其他的站点都通过综合业务数字网(ISDN)连接到哥伦布控制中心;大约在 2009 年间,IGS 从 ATM/ISDN 链路向多协议标签交换(MPLS)/IP 链路迁移。

三、数据中继卫星系统

在国际空间站的飞行控制与测控通信中,目前在用或曾用的主要是美国的跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)、俄罗斯跟踪与

数据中继卫星，欧洲“阿特米斯”(ARTEMIS)试验中继卫星和日本的“数据中继试验卫星”(DRTS)，建设中的欧洲数据中继卫星(EDRS)系统将在2018年为国际空间站提供服务。

(一) 美国跟踪与数据中继卫星系统

NASA TDRSS 提供的测控通信能力包括：S、Ku、Ka 频段单址业务，S 频段多址业务，单向和双向测距及测速功能。

目前，NASA 空间段的 TDRS 卫星已发展到第三代。

1. 现状

至2016年11月，“跟踪与数据中继卫星系统”空间段处于工作轨道的有9颗中继卫星(4颗第一代TDRS，3颗第二代TDRS和2颗第三代TDRS)：TDRS-3、TDRS-5、TDRS-6、TDRS-7、TDRS-8、TDRS-9、TDRS-10、TDRS-11、TDRS-12。退役后位于超同步轨道的是TDRS-1和TDRS-4。

当前，NASA TDRSS 地面段主要由位于新墨西哥州的白沙综合设施、位于关岛的远程地面终端和位于马里兰州戈达德航天飞行中心(GSFC)的网络控制中心(NCC)组成，通过NASA综合业务网(NISN)连接。为了配合第三代TDRS卫星的部署，NASA开展了天基网地面段维持(SGSS)项目，项目于2011年启动，采用先进的技术和体系结构，对现有地面终端系统进行升级改造；并在马里兰州的布洛索姆角新增一个地面终端站。TDRSS地面系统升级预计在2016年年底完成。届时，“跟踪与数据中继卫星系统”的系统能力将会得到很大提高。

2. 未来发展

在第三代TDRSS部署期间，最值得关注的是NASA将增加TDRSS导航波束，即TDRSS卫星增强服务(TASS)。

提供TASS需要NASA全球差分GPS系统(GDGPS)所获取的GPS性能信息。GDGPS是喷气推进实验室(JPL)开发的高精度GPS增强系统，用来支持NASA科学任务所要求的实时定位、定

时和轨道确定需要。GDGPS 于 2000 年进入全面运行，在 2000 年可靠性就已达到 99.999%。

TASS 业务利用 GDGPS 系统获取的 GPS 性能信息，通过 TDRSS 卫星，用 S 频段向地球卫星广播 GDGPS 实时差分修正信息，从而实现卫星自主精确定轨、科学处理和地球轨道上的操作规划。TASS 信号还提供一个与 GPS 同步的测距信号。NASA 一直计划从第三代 TDRS 卫星开始提供 TDRSS 导航波束，即 TDRSS 卫星增强服务(TASS)。

NASA 在 2006 年发布了 TASS 系统的演示(测试)信号，在 2013 年开始进行的 SCaN 试验台新技术测试中，内容之一就是 TASS 进行测试。

第三代 TDRS 卫星中的第三颗卫星 TDRS - M 原计划于 2015 年发射升空，现已推迟至 2017 年发射，届时随着第三代 TDRS 卫星部署完成，该项服务投入运行指日可待。

第三代 TDRS 在实现低成本的同时，其载荷容量和通信带宽均有改进，将进一步提升 NASA 的跟踪与数据通信网络。

在第三代跟踪与数据中继卫星(TDRS)部署的同时，NASA 开始考虑 2020 年以后 TDRSS 的发展，正在进行的天基中继研究(SBRS)、激光通信中继演示验证(LCRD)、空间通信和导航(SCaN)试验平台项目涉及未来天基中继体系结构、激光通信技术、空间联网技术以及软件无线电技术等下一代 TDRS 的关键技术。

根据这些项目当前的进展和研究内容，经综合分析，第四代 TDRSS 的发展方向和原则为：第四代 TDRS 作为 NASA 未来空间通信与导航(SCaN)综合网的有机构成部分，仍将延续一体化、标准化的业务和接口环境，与 SCaN 一脉相承；在体系结构方面，受多种因素影响，可能采用更加开放灵活的体系结构，当前存在 4 种体系结构设想，将未来主流技术以多种配置部署，包括：专

用航天器(类似于现有的 TDRS),作为商业卫星或其他政府卫星的搭载载荷,具有分布式能力的小卫星簇,或者是这几种方法的综合;在具体技术上,目前已经明确会采用激光通信技术,对软件无线电技术和空间联网技术也在进行演示验证。

(二) 俄罗斯跟踪与数据中继卫星

苏联于 20 世纪 70 年代末和 80 年代初开始研制“射线”(或“波束”)系列中继卫星。该系列最后一颗老一代中继卫星于 1998 年退役。因此,在国际空间站开始发射至 2011 年 12 月间,俄罗斯无在轨运营的民用中继卫星。期间,国际空间站上的俄罗斯舱只能借助于美国 TDRSS 来扩大测控和通信的覆盖范围。2011 年下半年,俄罗斯重新开始发射数据中继卫星。

1. 现状

目前,俄罗斯第二代“射线”中继卫星系统已完成部署,目前在轨有 4 颗卫星,分别于 2011 年 12 月、2012 年 11 月、2014 年 4 月、2014 年 9 月发射入轨。“射线”-5 卫星工作在 S 频段和 Ku 频段,卫星在 Ku 频段和 S 频段的最高数据传输速率分别为 150 兆比特/秒和 5 兆比特/秒,和第一代“射线”卫星相比,已有明显提高。

2. 未来发展

“射线”-5 系列卫星的寿命约是 10 年,尽管俄罗斯卫星寿命均较短,根据当前俄罗斯二代中继系统刚刚完成部署的情况,短期内不会有较大的动作。

之前暂停的“射线”-4 计划和“叶尼塞”研发项目目前没有进一步的消息,据根特的太空页面(Gunter's space page)2014 年 9 月 24 日更新的消息,“叶尼塞”A1 将在 2015 年发射,但目前并没有该星发射的消息。该星基于 Ekspress-2000 平台,重量 3000kg,设计寿命 13 年。

在“2030 年及未来俄罗斯航天发展战略”中,俄明确提出要建

立统一的信息系统，确保在指挥控制机构、国家信息保障机构、近地轨道和深空设施、行星和太阳系天体表面转发信息。分析认为，“射线”中继卫星系统应该是其有机组成部分。

(三) ESA 数据中继卫星

欧洲航天局的“阿特米斯”试验中继卫星于 2001 年 7 月发射，除了进行新技术的试验外，还在 ESA 的自动转移飞行器任务中发挥了作用。ARTEMIS 数据中继卫星(21.5°East)的任务控制中心和地面站(13.5 米天线系统，Ka 波段)位于比利时的雷杜。

2009 年 2 月，ESA 启动欧洲数据中继卫星系统(EDRS)项目，EDRS 系统包括 2 个位于地球同步轨道的数据中继载荷和地面的操作部分(卫星/载荷控制中心，EDRS 任务和操作中心，若干地面站)以及 EDRS 用户地面部分。EDRS 系统将提供激光链路和 Ka 频段射频链路。

1. 现状

首个载荷 EDRS - A 已在 2016 年 1 月发射，激光通信终端传输速率高达 1.8 吉比特/秒，Ka 频段星间链路终端(ISL)传输速率 300 吉比特/秒，可在 EDRS 和地面站之间传输数据，还可用于支持国际空间站的上行指令发送以及试验数据回传至地面。针对国际空间站的数据中继将在 2018 年开始。

2. 未来发展

携带 EDRS - C 载荷和英国阿万蒂通信公司高度适应性卫星(Hylas) - 3 载荷的 EDRS - C 卫星将在 2017 年发射，定点在 31°E 的位置。这颗卫星将由德国 OHB 公司使用 SmallGEO 平台制造，当前正由 OHB 公司根据与 ESA 的合同进行开发。

ESA 正在为开发 EDRS 的第三个载荷做准备，第三个地球同步轨道节点将位于西太平洋上空，覆盖亚太地区，预计将在 2020 年搭载商业卫星发射，ESA 希望借此拓展 EDRS 的性能，使系统的覆盖范围增加一倍。

根据 ESA 资料, EDRS 远期目标中还要向“伽利略”导航系统提供服务, 具体为: EDRS 作为网络中心, 通过星间链路为“伽利略”卫星紧急情况下的完好性监测提供支持; EDRS 搭载载荷通过发送类似 GPS L1、L5 和“伽利略”的信号, 支持二代“欧洲静止导航增强系统”(EGNOS) 用户; EDRS 可提供全球的“伽利略”基准站与位于欧洲的控制中心之间的连接, 以增强该系统的独立性。

(四) 日本数据中继试验卫星

1. 现状

日本“数据中继试验卫星”于 2002 年 9 月发射成功, 并定位于东经 90° 的静止轨道, 它能转发日本地面站至中低轨道卫星的信号, 可以作为传输本国在轨民用遥感卫星图像以及侦察卫星所获信息的“中转站”。“数据中继试验卫星”工作于 S 和 Ka 频段。系统地面站设置在筑波空间中心(TKSC)、鸠山地球观测中心(EOC)及增田跟踪和数据处理站(MTDS)。

所有的系统都受筑波轨道间通信站的远程监视和控制。此外, “数据中继试验卫星”验证试验地面系统还有日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)基带处理设备位于 ESA 的雷杜站, 该设备也由筑波远程监控, 以实现 JAXA 低轨卫星和 ESA 的“阿特米斯”卫星之间的自主在轨实验操作。

2. 未来发展

JAXA 正在进行大量新的军民两用计划, 计划之一是 2 颗新一代数据中继卫星, 据日本雅虎新闻网 2014 年报道, JAXA 将在 2019 年发射地球静止轨道激光数据中继卫星, 为中低轨卫星提供数据中继服务。卫星将继承 DRTS 和 OICETS 的技术, 同时提供激光通信中继和 S、Ka 频段射频通信, 激光通信速度为 1.8 吉比特/秒。其地面站仍将设在筑波和鸠山。卫星运行寿命为 10 ~ 15 年。与其同时期发射的先进光学卫星将装载配套的通信载荷。

2015 财年, 日本航天开发预算下拨 32 亿日元, 启动激光数

据中继卫星的研制工作。

四、飞行控制与测控通信支持能力现状

(一) 国际空间站的飞行控制和测控通信支持

国际空间站的在轨操作由 NASA 统一协调，休斯敦任务控制中心对国际空间站运行控制负主要责任，每一个成员国负责管理各自的 ISS 舱段、有效载荷设备的操作。休斯敦任务控制中心负责协调空间站的所有活动，并且每隔两星期编制一个所有合伙者都必须遵循的操作计划。全球其他中心发出的指令都需由它协调和最后批准。

有效载荷操作和集成中心负责对国际空间站上所有实验室的科学研究活动进行协调。该中心把协调好的科学研究计划传送到休斯敦的空间站控制中心，在那里把研究计划归并入整个空间站的操作计划。

国际空间站与各成员国航天中心间的通信使用美国的 TDRSS 实现，各合伙国如想直接接收来自空间站的数据，也可以不通过美国的 TDRSS，直接建立自己的卫星通信系统。其中，日本可选择使用 DRTS 与其“希望”号试验舱进行通信；俄罗斯则将 TDRS 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，新一代“射线”系统建成后，成为其与 ISS 通信的重要手段。欧洲也同时使用 ARTEMIS 试验卫星保障与国际空间站的通信。

利用美国 TDRSS 进行通信时，由于存在信号盲区，因而并不能每天 24 小时都能与空间站保持联系。这种信号中断区在空间站每圈轨道运行中大约有 5 分钟，空间站每天约运行 16 圈。

所有 7 个控制中心都需通过白沙地面站接收来自 NASA TDRSS 的数据(白沙地面站接收的数据利用 NISN 和 IGS 把信息分送到日本、德国、法国、加拿大和俄罗斯的每个中心)。

国际空间站的指令和科学数据的上行和下行传输均采用标准协议，因而数据对所有国际合伙国都是相容的。

1. 美俄舱段飞行控制的指挥路径

美国在轨舱段(USOS)及载荷的指令经休斯敦任务控制中心、白沙地面设施和 TDRS 卫星上行。S 波段用于空间站的指挥、控制以及与乘员进行话音通信。Ku 波段用于大容量信号传输，如在空间站和控制中心之间举行电视会议。

俄罗斯在轨舱段及载荷的指令由莫斯科任务控制中心经地面站直接发射给其舱段，或经由“射线”卫星地面终端、“射线”卫星发给其舱段。

休斯敦任务控制中心和莫斯科任务控制中心互为备份。

2. 其他舱段的指挥路径

“哥伦布”舱和载荷的遥控指令通过休斯敦任务控制中心上行；“哥伦布”舱的下行遥测以 S 波段、Ku 波段通过休斯敦任务控制中心和亨茨维尔操作支持中心(POIC/HOSC)接收和处理。“哥伦布”控制中心也接收所有国际空间站状态的处理数据，接收来自休斯敦任务控制中心、亨茨维尔的操作支持中心、俄罗斯莫斯科任务控制中心的天/地链路数据。

位于筑波航天中心的日本“希望”号实验舱任务控制室通过两条通信线路访问在轨的日本“希望”号实验舱(JEM)：(1)通过位于休斯敦的任务控制中心和 NASA 的 TDRSS；(2)通过日本 JAXA 航天测控网站和 JAXA 的“数据中继试验卫星”。

(二) 国际空间站远程载荷操作能力分析

国际空间站的有效载荷依照其归属由各个国家分别操作管理，具体由分布于世界各地的载荷控制中心负责，且处于 NASA 马歇尔航天飞行中心的载荷操作与集成中心的指导和协调之下。

随着空间实验室向空间站的变迁，国际空间站上载荷的操作模式发生了本质性的变化：在航天飞机任务期间为期两周的密集

操作已经被面向国际空间站的连续操作所取代。大多数载荷操作人员分布在世界各地的载荷操作中心，通过远程操作的方式操作和监视他们的实验。这就导致对更多远程通信带宽、更长通信时间的需求。

POIC 为欧洲、日本和俄罗斯等提供管理和集成载荷操作所需的远程载荷操作能力，包括为合作伙伴提供遥测、遥控处理、语音通信和视频分配。

通过使用专用网络 (NISN, IGS) 和公共网络，空间站乘员、NASA 中心的操作人员以及遍布全球的大学、公司的研究人员密切合作，基于 IP 协议的高速可靠网络，完成 ISS 上的科学实验。POIC 提供的远程载荷操作能力通过高效费比地使用这些网络，延展远程任务支持系统的所及范围，这样不仅减少了对专门租用线路和旅行的需求，同时还提高了分布式工作组的协作能力。

(三) 运输工具的飞行控制与测控通信支持

承担 ISS 运输任务的主要有美国的航天飞机和商业运输飞船、俄罗斯“联盟”号和“进步”号飞船、ESA 的 ATV、日本的 HTV，这里，以 2008 年 ATV 任务为例介绍运输工具的飞行控制与测控通信支持。

ATV 是目前为止最先进的不载人货运飞船，主要承担为国际空间站运送货物的任务，并可充当空间站的拖船。

参与 2008 年 ATV 飞行任务的控制中心包括：ATV 控制中心、休斯敦任务控制中心和莫斯科任务控制中心。

在此次任务中，ATV 控制中心主要负责 ATV 的控制，具体包括：发射窗口、轨道参数、通信覆盖率、轨道机动参数计算和姿态确定等任务分析工作，负责与两个任务中心、TDRS、阿特米斯网络、法国圭亚那航天中心地面系统的协调，以及调相、变轨、离轨、再入、对接期间 ATV 管理、抬高国际空间站轨道机动飞行等飞行控制管理工作。所有的对接及操作都在 NASA 的监督下

进行。

莫斯科任务控制中心和休斯敦任务控制中心负责提供国际空间站绝对轨道，休斯敦任务控制中心还负责碎片碰撞预警。ATV 遥测数据可传输至位于 Mureaux 的 EADS 研制团队，研制团队利用专门研制的设备和硬件、软件工具为 ATV 控制中心提供飞控技术支持。

由于 ATV 通过俄罗斯舱段与国际空间站对接，对接任务需要莫斯科任务控制的配合。中心莫斯科任务控制中心在此次任务中主要负责：ATV 与国际空间站所有对接操作的任务控制；与国际空间站乘员的接口；通过俄罗斯“星辰”号舱与 ATV 建立联系；把 ATV 的操作整合进总的国际空间站操作日程等。

休斯敦任务控制中心在此次任务中的职责是：国际空间站任务的总指挥；为 ATV 任务提供 TDRS 链路；建立国际空间站的战术规划；领导和协调所有国际空间站的管理团队(包括规划、操作、安全、连接程序等)；国际空间站的碰撞规避预警；领导对所有异常事件的调查、研究。

ATV 飞行任务包括几个关键阶段：发射，轨道调整，交会对接，再入毁灭。

ATV 发射后，上升段由库鲁的测距站、大西洋中部的遥测站、位于亚迷尔群岛的机动站接力跟踪；其后，法国海军跟踪船 Monge、德国应用科学研究机构的雷达设备接力跟踪；这些雷达站还为澳大利亚和新西兰的遥测站提供目标轨道根数；火箭分离过程由新西兰地面站完成监控。

火箭分离前 4 分钟，ATV 上的 2 套互为冗余的 S 波段系统开始工作，直至几乎整个飞行过程，期间，通过 NASA 的 TDRSS 和 ESA 的 ARTEMIS 卫星及其配套地面传输网络与任务控制中心建立通信链路，具备前向发射 5000 条遥控指令、反向传送 35000 个遥测参数的能力。

多个控制中心、国际空间站和 ATV 之间通过数据中继卫星 (NASA 的 TDRSS 和 ESA 的 ARTEMIS 卫星) 和位于“哥伦布”控制中心的 IGS 网络中心保持联系和信息交换。

对 ATV 的遥控和遥测路由随不同的操作阶段(自由飞行、交会对接、对接上以后)而变,主要有 3 种途径:

——自由飞行阶段,通过休斯敦任务控制中心使用 NASA 的 TDRS 卫星,或通过雷杜任务控制中心使用 ARTEMIS 卫星与 ATV 联系;

——在接近和交会阶段,通过莫斯科任务控制中心、俄罗斯“星辰”号舱,使用“接近通信系统”与 ATV 联系;

——对接上以后,通过莫斯科任务控制中心,使用国际空间站的“星辰”号舱与 ATV 建立总线连接。

国际空间站和 ATV 在轨数据以及来自休斯敦任务控制中心、莫斯科任务控制中心和 ATV 控制中心的地面部分数据通过 IGS 收集,处理过的数据在 3 个控制中心间以数据业务系统(DaSS)协议交换。

ATV 控制中心通过 DaSS 协议以 CCSDS 标准包的形式与莫斯科任务控制中心交换遥控指令和遥测数据。DaSS 协议确保必要的安全级别和数据交换的标准化。在通过休斯敦任务控制中心的 TDRS 链路,ATV 控制中心以嵌入 CCSDS CLTU(指令链路传输单元)的加密包的形式发送遥控指令,以 CCSDS CADU(信道存取数据单元)的形式接收 ATV 的遥测数据。这些 CCSDS 数据帧通过标准协议在 ATV 控制中心和休斯敦任务控制中心之间交换。CNES 设备将各个方向的 CCSDS 数据转换成钟控连续比特流。由此,通过 TDRS 卫星建立到 ATV 的天/地通信链路。

五、未来发展趋势分析

在经历了地面支持网络的 IP 化之后,国际空间站与地面之间

的业务也在逐渐向 IP 化的方向发展。未来，随着 TDRSS 第三代卫星的部署，国际空间站的飞行控制和测控通信支持将获得更高的带宽和速率。由于数据中继卫星在国际空间站测控通信中的重要地位，其发展趋势将影响到国际空间站测控通信的发展趋势。而由于国际空间站的飞行控制和测控通信支持涉及多个国家和组织，未来引领技术发展方向的理念主要是：通用性、互相操作性、灵活性和可扩展性。在这些理念之上，则是系统结构一体化的发展趋势。

(一) IP 技术的应用不断深入

NISN 和 IGS 都已实现网络的 IP 化，并逐步开展了 IP 语音和 IP 视频业务。在国际空间站和地面之间，具有使用标准互联网协议的初步联网能力。

未来，NASA 将联网技术作为有待进一步开发的技术之一，可以想见，网络技术未来仍将在空间通信导航中发挥重要作用。在这样的大趋势下，IP 语音、IP 视频等 IP 业务也将在航天测控领域继续扮演重要角色。

随着空间通信导航体系中网络技术的深入应用与不断发展和成熟，可以预计，未来国际空间站的飞行控制和测控通信活动中必定会更多地应用 IP 技术。

(二) 工作频段向 Ka 频段发展

美国 TDRS - 8、TDRS - 9、TDRS - 10(即第二代卫星)支持 Ka 频段通信，正在研制的第 3 代跟踪与数据卫星 TDRS - K 和 L 卫星也支持 Ka 频段。俄罗斯“射线”-4 卫星上将安装工作在 Ka 波段的卫星间转发信道。ESA EDRS 系统提供激光链路和 Ka 频段射频链路。因此，国际空间站未来的测控通信支持频段将逐渐向 Ka 频段发展。

(三) 未来或将采用激光通信技术

ESA 正在部署的 EDRS 已经采用了激光通信技术，美国和日

本下一代中继卫星也已明确将采用激光通信技术。NASA 最近几年频繁开展激光通信技术试验，并特别计划了激光通信中继演示验证(LCRD)项目，以全面充分地验证空间激光通信链路与网络技术，该计划是 NASA 在第四代 TDRS 上提供激光通信业务的重要一步。

虽然还没有俄罗斯发展激光通信中继卫星的信息，但俄罗斯对激光通信技术的发展一直没有放松，2012—2013 年利用国际空间站完成了激光通信技术第一阶段的演示验证。

(四) 数据中继卫星系统发展促进系统间的互操作

天基网互操作计划的基本目的是国际合作和节省开支。1985 年，美国、日本和欧洲航天局成立了天基网互操作委员会(SNIP)。通过广泛的技术协调，已经解决了 S 频段互操作问题，在 ATV-1、HTV-1 的交会对接任务中，就使用了 TDRS 的 S 频段业务。Ka 频段空间网互操作问题，协调较为复杂，最后三方都同意前向链路使用 23 GHz，反向链路使用 25~27 GHz。未来，即使是采用激光通信技术的新一代中继卫星，仍可能将延续互操作。

(五) 未来空间计划引领系统结构一体化

国际空间站在未来的科学探测中具有重要作用。新的空间计划的牵引与技术发展的推动，使得国际空间站在未来面临着发展。在美国“星座”探月计划 C³I 系统中，就提出了一些新的理念与技术，这些理念与技术，必将促进国际空间站的飞行控制和测控通信的发展。虽然由于空间计划的改变，“星座”探月计划已经由其他计划取代，但分析认为这些理念与技术仍将影响新的计划以及空间站未来的飞行控制和测控通信，其中，比较值得关注的是系统结构一体化：建立一个松散耦合、互操作的系统结构，通过互操作性使飞行试验任务的所有元素结合为一体，如主要操作数据(指令、遥测、声音)采用通用格式、明确数据结构与处理逻辑的定义、通过数据重组使通用的数据驱动操作支持多功能的运载器、

采用抽象化的高级别通信协议，以此降低组合成本，增加更替系统的作用时间，从而提高整个试验项目的灵活性、性能和安全性。此外，功能性层次分区的设置阻隔了系统各部件之间由于更换而产生的影响。同时允许应用程序在传送数据时不应考虑接收数据，以降低接口成本。

六、结束语

综上所述，国际空间站通过遍布世界各地、分属不同国家和组织的 7 个控制中心、若干地面站以及覆盖全球的 4 个数据中继卫星系统，借助美国全球导航卫星系统 GPS 进行飞行控制和测控通信，其分布式控制中心是国际合作的结果，而非技术上的需要。

在长期的飞行控制和测控通信实践中，多个国家和组织间的飞行控制和测控通信设施间逐渐完善、建立了通过多种接口协议或标准交互的规程，通过合作，很多国家和组织的飞控、测控通信设施也得到了发展，系统的互操作性和通用性不断增强。

未来，在 IP 技术的应用不断深入的趋势下，在工作频段向 Ka 频段发展的趋势下，在未来空间计划引领系统结构一体化的趋势下，在天基网互操作的努力下，国际空间站的飞行控制与测控通信将得到更好的保障与支持。

(北京跟踪与通信技术研究所)