

## 2014—2017 年国外航天测控系统发展综述

2014—2017 年间，美国作为航天测控领域的强国继续更新和补充完善其测控通信系统，并完成了第三代跟踪与中继卫星 (TDRS) 系统的部署；俄罗斯重点完成了中继卫星系统的部署；欧洲航天局 (ESA) 作为中继卫星系统起步较晚的组织，率先部署首个实用的激光卫星通信系统。除了各政府航天机构，多个商业组织也加强了航天测控系统的部署与建设。与此同时，对于新技术的研发和试验也在不断推进，以激光通信技术、DTN 技术、脉冲导航技术等为代表的新技术研究获得了一定进展。

### 一、天基系统建设及应用

#### (一) 美国第 3 代 TDRS 完成部署

NASA 自 1976 年启动 TDRS 研制工作以来，已完成第二代 TDRS 的部署，并于 2013 年开启第三代 TDRS 的部署。

第三代 TDRS 共 3 颗 (TDRS - K、L、M)，设计寿命 15 年，可同时提供 3 个频段的服务能力：S 频段和高数据速率的 Ku、Ka 频段，Ka 频段数据传输速率 800 兆比特/秒。TDRS - K 在 2013 年 1 月 31 日成功发射，升空后更名 TDRS - 11。TDRS - L 在 2014 年 1 月 24 日成功发射，升空后更名 TDRS - 12。该系列的第三颗卫星 TDRS - M (TDRS - 13) 原计划 2015 年 12 月发射，但发射推迟至 2017 年进行。美国当地时间 2017 年 8 月 18 日，TDRS - M 从卡纳维拉尔角成功发射。该卫星此前因 1 部天线受损更换而推迟发射。

TDRS - M 卫星的成功发射标志着第三代 TDRS 卫星部署完

成。此后至 2020 年，跟踪与数据中继卫星系统都将处于良好状态，足以支持已有航天任务，包括支持国际空间站、“哈勃”太空望远镜和其他地球轨道卫星的通信。当前 NASA 已经就第四代 TDRS 卫星开展了一些研究工作，将有可能采用激光通信技术，并将可能在 2019 年进行激光通信卫星的试验。

此外，美国当地时间 2016 年 7 月 28 日，美成功发射一颗新型军用数据中继卫星“卫星数据系统”-3(SDS-3)。

## **(二) 俄罗斯新一代“射线”中继卫星系统部署完成**

俄罗斯自 2011 年下半年开始重新部署新一代“射线”系统。继“射线”-5A 于 2011 年 12 月 11 日发射，“射线”-5B 卫星于 2012 年 11 月 3 日发射之后，俄罗斯在 2014 年 4 月 28 日成功发射 1 颗第二代“射线”卫星，这标志着俄罗斯民用中继卫星“射线”系统的第二代中继卫星完成组网。随后，俄罗斯于当地时间 2014 年 9 月 28 日凌晨从拜科努尔航天发射场成功发射一颗“射线”中继卫星，为新一代“射线”多功能中继卫星系统增加了一颗在轨的冗余卫星。

“射线”中继卫星系统主要为国际空间站的俄罗斯舱段、低轨飞行的航天器、运载火箭及其上面级与地面设施之间的通信提供中继服务。“射线”-5 卫星在提供数据中继的同时，还可提供卫星导航增强服务。“射线”-5 卫星搭载着俄差分校正和监测系统(SDCM)的信号转发器，2014 年“射线”卫星的发射，也标志着俄罗斯 GLONASS 星级增强系 SDCM 空间段部署完成。据俄罗斯的数据，“射线”卫星系统发射后，俄境内的 GLONASS 定位精度将提高至与 GPS 系统相当。

2016 年，射线中继卫星系统已经开始为国际空间站的俄罗斯舱段及“联盟”火箭发射提供测控支持。

## **(三) 欧洲 EDRS 系统开始部署**

欧洲数据中继系统(EDRS)项目于 2008 年发布，被称为“太

空数据高速路”，系统采用激光通信技术，通过地球静止轨道数据中继卫星为近地轨道航天器与地面控制中心提供实时数据中继，通信速率达 1.8 吉比特/秒。EDRS 系统初期设计了 2 颗搭载载荷/卫星，后经论证增加为覆盖全球的 3 颗搭载载荷/卫星。

2016 年 1 月 30 日，EDRS 的首颗激光通信载荷 EDRS - A 搭载“欧卫”-9B (Eutelsat - 9B) 卫星由俄罗斯“质子”火箭发射进入地球静止轨道，并于 2016 年夏季开始服役。国际空间站的数据中继将在 2018 年开始。

按照规划，EDRS 将在 2020 年完成全星座 3 颗卫星/载荷的部署。EDRS 是第一个工程化的激光卫星通信与中继系统，可用于满足欧洲航天对空间通信数据传输速率、传输量和实时性日益增长的需求，摆脱对非欧洲地面站的依赖。

#### **(四) 日本下一代中继星将采用激光通信技术**

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 年发射地球静止同步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“数据中继试验卫星”(DRTS)和“光学轨道间通信工程试验卫星”(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。

#### **(五) 美空军使用 GPS 跟踪航天发射火箭**

2014 年 5 月 16 日，美国联合发射联盟(ULA)利用“德尔它”4 火箭发射最新一颗 GPS IIF 卫星的过程中，首次应用天基 GPS 卫星代替地基雷达跟踪运载火箭飞行轨迹并取得成功。2014 年 8 月 1 日，美空军成功发射第七颗 GPS - 2F 导航卫星。在此之后，空

军计划采用 GPS 信号跟踪火箭发射，以取代传统跟踪火箭发射的 C 波段雷达。而对未来的载人任务，东靶场仍将提供飞行终止和 C 频段雷达跟踪业务。

2014 年 8 月 14 日，数字地球公司“世界观测”-3 成像卫星成功发射入轨，这是首次完全依赖 GPS 进行跟踪的发射任务。这次任务具有里程碑意义，标志着未来空军从卡纳维拉尔角和范登堡空军基地的火箭发射跟踪将依赖于 GPS 信号。

### **(六) 美国商业公司计划构建商用数据中继系统**

据美国太空网 2016 年 7 月 26 日报道，Audacy 公司计划建造由 3 颗卫星和 2 个地面站组成的通信网络，为私营航天飞行活动提供所需的通信能力。商用数据中继系统包含 3 颗卫星、2 个地面站（分别部署在加州洛杉矶和东南亚），未来可能在欧洲建造第三个地面站。公司计划在 2019 年发射卫星。系统计划成本预计为 7.5 亿美元。

系统预计可同时支持大约 2000 颗立方体卫星，或者允许 12 个高容量用户和约 1000 个小容量用户同时共享带宽，未来也可能支持月球任务。商用数据中继系统将帮助商业卫星遥感公司（如加拿大地球直播公司、美国行星实验室公司等）向用户发送数据，帮助卫星发射公司监测火箭状态，或者帮助互联网服务商跟踪大型的卫星星座。

## **二、火星中继通信**

2014 年 9 月，印度火星轨道器成功进入火星轨道，开始其环绕火星的科学探测活动，按照计划，在此次活动期间，NASA 的深空网为其提供了深空通信保障。同期，NASA 的“火星大气和挥发性物质演化探测器”（MAVEN）也抵达火星轨道，与印度的轨道器不同的是，它未来将成为 NASA 火星中继通信的有机组成部分。NASA 正在进行的火星探测计划较多，包括 2 个现役巡视器、3 个

现役轨道器，以及计划 2018 年发射的“洞察”号着陆器和正在开发的“火星 2020”巡视器，此外，SpaceX 公司宣布 2018 年开展火星任务，根据协议，NASA 将为其提供深空通信与导航支持，因此，NASA 正在加快推进火星中继通信网建设。而欧洲与俄罗斯也在加紧步伐。

## **(一) NASA 加快推进火星中继通信网建设**

美国 NASA 已经在火星轨道上部署了“奥德赛”(Odyssey)和“火星勘测轨道器”(MRO)，作为向地球传输科学数据的中继卫星。将完成探测使命的科学轨道器作为中继通信卫星，保持火星着陆器与地球之间的通信，是多年来 NASA 进行火星探测、提高效费比的一种模式。

### **1. “火星大气和挥发性物质演化探测器”加入火星中继网络**

为了保持火星中继通信网，2014 年 9 月，“火星大气和挥发性物质演化探测器”(MAVEN)抵达火星轨道后，留在火星轨道上的轨道器携带的 Electra 无线电有效载荷(由喷气推进实验室提供并运行)已加入火星中继网络，但它仅在科学任务期间偶尔提供中继服务，进入任务扩展期才开始提供常规中继服务。

### **2. 寻求商业性火星通信中继设施**

2014 年 9 月至 2020 年间，NASA 基本没有发射火星轨道器的计划，因此，为免 2020 年左右出现中继通信能力缺口，NASA 在 2014 年 7 月发布“信息征求书”，探讨在未来的火星任务中利用商业火星轨道卫星提供低成本、高性能通信中继服务的可能性，试图寻求新的模式以维持和发展其火星通信中继设施。

### **3. 计划利用立方星进行深空中继尝试**

NASA 原计划 2016 年 3 月向火星发送“洞察”号新型探测器，一同发射的，还有 2 颗立方星，NASA 将借机开展立方星深空通信中继尝试，作为“洞察”号任务的附加能力验证任务，此次任务被命名为“火星立方 1 号”(MarCO)。这是人类首次深空立方星任

务，将为立方星应用于星际探索做出尝试。但此次发射因故取消，其下一次发射窗口是 26 个月以后(2018 年)。

#### 4. 未来利用激光通信升级火星通信中继设施

NASA 计划在 2020 年发射“火星 2020”巡视器，之后，在 2022 年发射新的火星通信轨道器，以此替代火星“奥德赛”，作为着陆任务的通信中继卫星，从而实现对火星通信中继设施的升级。新的轨道器也将携带健全的科学仪器，对火星进行遥感探测。“火星 2022”轨道器可能采用光通信程序包，从而改善传输速度和无线电系统的容量。

NASA 已在 2016 年选择了 5 家公司为未来火星轨道器任务开展概念研究，研究重点之一是通信，将对光学通信进行评估。

### (二) ESA 与俄罗斯合作的 TGO 轨道器进入火星轨道，未来将用于数据中继

ESA 与俄罗斯正在联合开展“火星生物学”(ExoMars)任务，2016 年 3 月 14 日，他们联合研制的“ExoMars 2016”火星探测器从哈萨克斯坦拜科努尔航天发射场发射升空，2016 年 10 月，探测器中的“微量气体轨道器”(TGO)按计划顺利进入火星轨道，开展工作，待 2019 年结束火星考察任务后，将转变角色，为后继火星表面探测任务提供中继通信服务，并持续工作至 2022 年 12 月。

## 三、地面测控网络

### (一) 美国空军卫星控制网推动部分星座的商业化运营，欲向通用地面系统过渡

在预算削减的背景下，考虑到面临的潜在威胁，美空军对空军卫星控制网(AFSCN)开展了评审，最终做出决定，将实现部分卫星的商业化运营，并将 AFSCN 的专用测控地面系统向通用地面系统过渡。美空军整合了运维合同降低成本，并升级了多个星座

的地面站，对地面站的升级也配合了向通用地面系统的过渡。

在推动卫星的商业化运营中，具有国际采办背景的“全带全球卫星通信”(WGS)星座成为首个试点项目。

为了建设通用地面系统，美空军已开展了“企业级地面服务”(EGS)项目。鉴于导弹预警星座正在进行 Block10 增量 2 新系统的部署与试验，空军可能将其作为采用通用地面系统的试点。EGS 预计在 2020 年代早期用于操控美军的各种卫星。空军官员认为启用通用地面系统可节省成本、提高能力和响应时间。

## (二) NASA 近地网提升地面站网络能力

NASA 近地网(NEN)正在加强其地面站网络，据 2016 年 4 月 16 日 NASA 网站报道，NASA 近期在阿拉斯加新安装了 1 部天线(AS-3 天线)，并规划将在南半球再安装几部天线，因此，近地网的能力正在进一步提升。

为向未来航天器提供通信服务，支持“猎户座”的第一个探测任务(EM-1)，NASA 已与空军达成协议，二者将重建发射通信站(LCS)，支持“猎户座”的载人航天飞行。上行链路站的新 S 频段地面跟踪天线设备已于 2016 年初装配完成。EM-1 预计在在 2017 年 12 月(最初计划)进行，因此，LCS 需在此之前具备 S 频段能力，未来，为了支持 EM-3，LCS 还将提供 C 频段能力。

除了加强地面站网络，近地网团队也在开发增加带宽的新能力，已经开始准备采纳激光通信技术。

## (三) NASA 深空网新的波束波导天线投入运行

2016 年 10 月 1 日，澳大利亚堪培拉的深空站-36(DSS-36)投入运行。DSS-36 位于澳大利亚堪培拉，口径 34 米，是 NASA “深空网孔径改进”项目建设的 4 座 34 米波束波导(BWG)天线之一。堪培拉的第一个新的 34 米波束波导天线 DSS-35 已在 2014 年 10 月 1 日投入运行。位于西班牙马德里的 2 个天线正在建造中：DSS-56 计划 2019 年 10 月投入运行，DSS-53 计划 2020 年

10 月投入运行。

当 4 座天线全部完成后,新的天线阵所能提供的能力(灵敏度和接收到信号的功率)将不亚于 70 米口径天线。

这些新天线支持机器人和载人火星任务,保障探测器与地球之间更大数量的下行科学和遥测、跟踪数据传输,以及上行的指令及指令返回传输。

#### (四) 俄为 ExoMars 项目建深空地面站

由于与 ESA 合作进行“火星生物学”(ExoMars)项目,俄罗斯新研发了用于此项目的地面无线电系统,据塔新社网站 2016 年 5 月 10 日报道,该系统的试验模型目前已完成,随后将进行适应性测试。新的地面通信设施将在 2017 年 9 月投入全面运行,服务于进入火星轨道的 ExoMars 火星探测器。新设施将使用 64 米天线,有 2 个样型,分别安装在 2 个地面站内,TNA-1500 型设在梅德韦泽伊·厄(Medvezhyi Ozyora),TNA-1500K 型则设在卡利亚津(Kalyazin),不仅可以服务于 ExoMars 项目,还可以与 NASA 和 ESA 的其他探测器通信。

#### (五) 商业测控进一步发展

##### 1. SES 公司的新卫星运管中心投入使用

全球卫星运营商 SES 公司全球排名第二,共有 50 多颗通信卫星。2014 年 7 月,其在美国新泽西州普林斯顿大学商业销售和卫星工程办公室设立的新卫星运管中心(SOC)投入使用,运管 23 颗广播电视和高速宽带服务卫星。新中心能够支持未来的需求增长,其最大运控能力是 100 颗卫星,还可以控制电推进卫星。该公司在卢森堡的全球总部则管理着其他的卫星。这 2 个中心能够对所有卫星提供实时服务和备份支持。

##### 2. KSAT 新建小卫星地面站,谋求提供全球性测控服务

2015 年 10 月,挪威康斯伯格卫星服务公司(KSAT)在巴拿马新建的地面站完成最终测试,该地面站主要服务于小卫星,具备



S 频段和超高频(UHF)天线。以极地测控站为优势的挪威康斯伯格卫星服务公司(KSAT)为了服务小卫星,提出了地面网络解决方案“KSAT light”。2016年1月,该公司在全球建立了20个小卫星地面站,同时,通过与其他国家空间组织的合作,优化地面站资源,谋求提供全球性测控服务。

### 3. 环球航天网络公司(USN)更名,利用SSC品牌效应扩大全球基础设施和服务范围

2016年1月1日,瑞典航天公司(SSC)将其子公司环球航天网络公司(USN)更名为SSC航天美国公司,SSC航天美国公司位于美国,主要提供商业性卫星运控服务,早在2009年就被SSC收购,更名后可以充分利用SSC品牌效应扩大全球基础设施和服务范围。

### 4. 德雷珀实验室与桥卫星公司合作,为其光通信网研发地面控制站

2015年9月,桥卫星公司宣布由德雷珀实验室为其开发地面控制站,应用于桥公司的激光通信系统,使用激光通信来改善卫星和高空无人机的数据传输。桥公司的激光通信系统主要是用于改善卫星(包括小卫星)数据的无线传输,利用德雷珀实验室的地面站运行、任务自主规划和高效数据交付技术,可以为未来的近地轨道任务提供快速、优化和安全可靠的数据传输。

## 四、相关研究和试验

### (一) 基础研究

#### 1. 美空军“通信/导航中断预报系统”卫星数据改善轨道衰减预测

2015年11月28日,美空军的“通信/导航中断预报系统”(C/NOFS)再入地球大气层烧毁。在服役的7年时间里,C/NOFS卫

星研究高度 40~600 英里的大气电离层，获取了可能引起轨道提前衰减的一系列全面观测数据，这些数据对于改善预测卫星轨道、轨道阻力以及不受控再入大气层的模型非常有用。

## 2. “深空原子钟”飞行演示验证

“深空原子钟”(DSAC)是 NASA 正在开发的小型化、超精确汞离子钟，稳定性比当前最好的导航原子钟高几个数量级，在实验室的频率稳定性达到了  $10^{-15}$ ，NASA 期望其在飞行验证中频率稳定性能达到  $10^{-14}$ ，未来的长期频率稳定性能达到  $10^{-15}$ 。该项目由喷气推进实验室管理，空间技术任务委员会资助。

该项目准备在 2017 年进行飞行演示验证，演示装置和有效载荷将搭载在萨里卫星技术公司的航天器上，由 SpaceX 的“猎鹰重型”火箭发射，进行为期 1 年的演示验证任务。飞行演示验证将推进 DSAC 从当前的 6 级技术成熟度发展到更高的技术成熟度，从而可以在未来应用于大量任务。目前尚无其最新消息。

## (二) 激光通信研究深入推进

### 1. NASA OPALS 项目在 2014—2015 年进行

NASA 利用国际空间站开展的“用于激光通信科学的光学有效载荷”(OPALS)项目是一项天地激光通信试验，2014 年 4 月 20 日，OPALS 随“龙”货运飞船抵达国际空间站，并于 2014 年 6 月 5 日成功演示了高清视频传输：利用 OPALS，NASA 将 175 兆比特的高清视频《你好，世界!》，用 3.5 秒从国际空间站成功传回地球，激光束功率 2.5 瓦，波长 1550 纳米，数据传输速率最高达到 50 兆比特/秒。由于利用商业成品建造，其成本限制在 0.2 亿美元之内。

### 2. NASA“激光通信中继演示”(LCRD)任务持续推进

为了全面充分地验证空间激光通信链路与网络技术，继 LLCD 计划之后，美国开展了另一项空间高速光通信演示验证计划——激光通信中继演示验证(LCRD)计划。

LCRD 计划将利用 LLCDC 所获得的知识、经验和技術，进一步演示验证 NASA 下一代跟踪与数据中继卫星的关键技术和近地/深空光通信技術，为未来 NASA 设计、建设和运行高效费比光通信系统和中继网络积累经验。LCRD 终端原计划搭载商业通信卫星于 2017 年发射升空，进行为期两年的试验。为减少风险和追求共同的技术利益，LCRD 终端将搭载空军的“空间试验计划卫星” (STPSat-6)，预计在 2019 年发射，计划运行两年时间，将使用国际空间站上的测试有效载荷以及位于加利福尼亚和夏威夷的两个专用地面站，模拟真实的通信支持。

### 3. NASA 研发小型化“空间光学通信与导航系统”

2015 年 10 月，NASA 研发成功一款小型化的“空间光通信与导航系统”，在实验室证明了技术概念与测量精度，该系统比 2013 年的 LLCDC 装置更小，所提供的数据传输速度相同，所实现的距离和速度测量更精确。

“空间光通信与导航系统”是电路试验板，使用可购买组件搭建，在实验室内，利用模拟的地面和空间终端，已经实现了 622 兆比特/秒的传输速率，速度测量精度优于 10 微米/秒，距离测量精度优于 20 微米，由于系统内集成了“快速傅里叶变换”算法实现的多普勒频率，因此可以实现精确测量。而 LLCDC 的速度测量精度是优于 10 毫米/秒，位置计算优于 12 毫米。

当前，研发人员正在改进技术，争取获得机会应用在立方体卫星上。

### 4. NASA 利用立方体卫星在轨演示验证卫星激光通信系统

“光学通信与传感器演示验证”(OCSD)立方体卫星项目是 NASA 2014 年规划的激光技术演示验证后续计划的组成部分，项目旨在利用立方体卫星演示验证空间激光通信。

2015 年 10 月 8 日，首颗 OCSD 卫星(OCSD-A，或 AeroCube-7A)以搭载方式从范登堡基地发射升空，进入运行轨道。OCSD-A

的评估重点是小卫星的精确定向和数据传输能力，但卫星入轨后姿态控制系统出现故障，无法演示星上激光通信系统功能。

NASA 后续计划是发射 2 颗类似的立方体卫星，OCSD-B 和 OCSD-C（又称 AeroCube-7B 和 AeroCube-7C），测试更高速率的激光通信，以及彼此之间互相接近的机动操作。这 2 颗卫星将搭载 OCSD-A 激光通信系统的简化版本。2017 年 11 月 12 日，OCSD 搭乘“天鹅座”货运飞船飞往国际空间站，将验证小卫星激光通信和交会对接技术，数据传输速率将达 200 兆比特/秒，相关技术可用于抵近详察、在轨服务和组网飞行。

### 5. NASA 激光通信深空应用研究项目

以 LLCSD 为基础，NASA 喷气推进实验室（JPL）和格伦研究中心在开展激光通信深空应用研究。JPL 开展的“深空光学通信”（DSOC）项目致力于研究激光通信对于任务数据速率、占用空间和功耗的改进作用，激光通信有助于解决所有这些挑战。格伦研究中心正在开展“一体化射频与光学通信”（iROC）项目，将在火星轨道部署一颗激光通信中继卫星，该卫星可从远距离航天器接收数据，并将数据中继传输至地球。该系统将使用射频和激光通信，促进 NASA 所有空间资产之间的互操作性。通过集成这两种通信系统，iROC 可为使用激光通信系统的新型航天器提供服务，也可使用射频通信系统的航天器（如“旅行者 1 号”）提供服务。

### 6. ESA 将借“小行星撞击任务”测试地球以远星间通信网络

2015 年 3 月，ESA 的“SysNova 创新”项目开始募集可选方案，准备在 2020 年 10 月“小行星撞击任务”（AIM）时，搭载并发射地球以远的欧洲首个立方星，并试验立方星、AIM 及其着陆器三者组成的星间通信网络。

AIM 作为技术验证任务，将对 ESA 未来深空探测中的多项工艺和技术进行试验，包括双向高带宽激光通信系统、深空星间链路。

## 7. 法日联合开展星地激光通信试验

2015 年, 根据法国航天局(CNES)与日本国家信息通信技术研究所(NICT)签订的有关“信息与通信技术”框架合作协议, 二者联合开展了星地之间的激光通信试验。试验分别在 6 月、7 月和 10 月进行, 完成了光学链路试验, 搜集了激光束在大气层中传播的数据。光学链路对大气条件更敏感, 这些数据可在后续研究中发挥重要作用。未来二者还将进行更多试验, 测试不同的链路参数, 并交换地面站数据进行结果对比。未来, 星地光学链路有望用于卫星观测数据的回传和卫星远距离通信。

## 8. 美国公司将建世界首个商业运营月球激光通信终端

2017 年 6 月底, 巴黎国际航空航天展上传出消息, 美国 Astrobotic(宇宙机器人)和 ATLAS 太空运营公司(以下简称“ATLAS”)将建造并运营首个月球激光通信终端, 从而在地月之间提供商业性激光通信链路。

ATLAS 的激光通信终端将搭载 Astrobotic 未来月球任务, 这将使 Astrobotic 向客户提供的数据传输服务速率达到 1 兆比特, 这意味着 Astrobotic 月球任务数据传输带宽将提升 1000 倍。地月之间使用激光通信将大幅增加数据传输带宽, 可为高清视频传输、数据密集型实验、虚拟现实体验提供保障, 是未来月球探测的基础性保障能力。

该激光通信链路将为月球任务通信带来变革。此前, 每次月球任务都需要一个通信方案。两家公司合作的激光通信链路将为 Astrobotic 公司的客户提供整体解决方案。

## (三) 国际空间站上应用或即将应用的新技术

### 1. DTN 技术在国际空间站上正式应用

据 NASA 网站报道, 2016 年 6 月, NASA 在国际空间站上构建了运行性的容延迟/中断网络(DTN)的网络服务。DTN 业务将有助于自动化操作, 改进国际空间站试验数据的有效性, 并将提

升带宽使用效率，增加返回地球的数据。

在国际空间站上，DTN 加载到了已有的“科学电视资源工具包”(TReK)，该软件包主要用于研究人员在其地面运控中心和国际空间站上搭载的载荷之间的数据发送和接收。国际空间站上的这项业务也将改进任务支持应用，包括操作文件传输。

该项业务首次作为操作性能使用，表明国际空间站开始成为进化中的太阳系互联网的一个节点。

## 2. 国际空间站上进行首次太空 4K 视频直播

据美国科技博客网站报道，2017 年 4 月 26 日，NASA 与亚马逊云服务事业部(AWS)合作，在国际空间站上进行了人类首次太空 4K 视频直播。

4K 视频就是所谓的超高清视频，其分辨率为  $4096 \times 2160$ ，即横向有 4000 个像素点，总像素超过 800 万，这样的视频对硬件配置、天地间网络传输速率要求很高。

视频直播中，航天员佩吉·惠特森博士和杰克·费舍尔向观众展示了一些惊奇的实验，由于 4K 的高质量和相对较浅的景深，直播具有很高的细节分辨率，使观众感觉如同在 Netflix 视频网站上观看主厨做菜。

太空 4K 视频直播具有技术优势和重要的应用前景。首先，在国际空间站上提供实验中的 4K 实况镜头，意味着航天员可以使用慢动作摄像机捕获质量极高的细节，并将结果实时传输给地球上的研究人员；其次，若能对国际空间站舷窗外的景色进行广播级采集，将具有巨大的潜在经济效益；第三，高分辨率视频采集和传输是深空探测(包括探火)所必须的一项关键能力，例如，在飞往火星时，利用 4K 视频能够对火星进行更好地提前观测和研究，这种先进的成像能力是决策过程与规划中至关重要的一种手段。

### 3. 增强现实技术即将登陆空间站

据电子欧洲 2017 年 4 月 27 日报道，芬兰国家技术研究中心在一个国际项目资助下，为欧空局开发了一种新的增强现实工具。未来，航天员可在空间严苛的条件下使用该工具执行维护任务。

芬兰国家技术研究中心领导的 EdcAR 项目(跨平台增强现实工程数据)为期两年，可以使航天员的作业指导书更加明确清晰。在空间站中，包括维护工作在内的任何工作都至关重要，必须及时无误地完成。为达到这一能力，需要长时间的练习，需要协调专家参与。由于航天员的时间极为宝贵，其任务和维护说明书必须清晰明确。

增强现实技术在系统中的使用有望能够减少失误，加快任务并改进指令清晰度。最大的好处在于可以实时定位需要维护的位置点。位置信息通过增强现实眼镜以文字、图片、视频和声音的形式及时明确地传送给航天员。系统会在航天员的增强现实眼镜上显示精细的可视化指令，引导他们按顺序逐步完成必要的步骤，如“现在按下这个按钮”“然后拨动那个拨杆”。

#### (四) 国际空间站上开展的相关试验

##### 1. NASA 向国际空间站发送首个外部观测仪用于研究脉冲星导航通信技术

作为 NASA 2016 年 4 月披露的“改变游戏规则发展”(GCD) 计划中即将进入飞行演示验证阶段的 6 个项目之一，“中子星内部构造探测器(NICER)/X 射线授时和导航技术空间站探测器(SEXTANT)”(Nicer/Sextant)原计划于 2017 年 3 月搭乘 SpaceX 公司第 11 次货运任务飞船(SpaceX-11)进入国际空间站，演示验证脉冲星导航通信技术。该次任务已于 2017 年 6 月发射，并顺利与国际空间站对接。

Nicer/Sextant 观测仪将使用 X 射线望远镜、硅元素探测仪和其他先进技术，来探测脉冲星发射的电磁脉冲中的 X 射线光子，

通过测量和利用专门算法开发出一种完整的平台自主导航解决方案。

Nicer/Sextant 研究组也将对 X 射线通信进行验证。据 NASA 网站 2016 年 11 月 28 日的消息, NASA 已经研制了“调制 X 射线源”(MXS), 能够发射高频 X 射线脉冲, 该设备将在 2018 年搭载执行国际空间站补给任务的运载器, 在飞行到国际空间站下方时向国际空间站上的 Nicer/Sextant 观测仪发送数据, 对 X 射线通信进行可行性演示验证。当前, MXS 的技术基本已经就绪。X 射线通信是一种每秒传送数据可达数千兆字节的潜在星际通信能力, 如果成功, 则可高速远程回传数据, 并可在高超声速飞行中通信。

## 2. 触觉感知技术试验

### (1) ESA 航天员通过触觉感知技术操控地面机器人

欧洲航天局(ESA)与代尔夫特理工大学合作, 开展了一项远程操控项目, 项目周期 18 个月, 具体成果是演示由国际空间站上的航天员操控地球地面上的机器人, 将一枚图钉放入一个小洞。2015 年 9 月 7 日, 成功进行了试验的演示验证。触觉感知可以帮助在远程操控中进行复杂的任务, 可以应用于深空探测。

### (2) 俄德利用触觉感知机器人进行太空遥操作

为了在未来建设月球基地或火星基地中使用机器人进行遥操作, 俄罗斯和德国航天机构开展了“回路”(Kontur)系统试验, 研发从载人航天器上遥控机器人进行远程操作的“远端临场”技术。试验共分 3 期: “回路”-1 已完成从地球通过测控系统控制国际空间站上机器人的试验; “回路”-2 在 2015 年完成了从国际空间站远程操控位于地面的人形机器人; “回路”-3 计划进行机器人集群控制试验。

## 3. NASA 开展小卫星“集群”控制试验

2016 年 5 月, 国际空间站部署了 2 颗“网络与运行演示验证卫星”(Nodes)立方体卫星, 演示验证了卫星间通信和自主指挥与



控制。

“网络与运行演示验证卫星”是艾姆斯研究中心以及 NASA 空间技术任务理事会资助的项目，以早前的“电话卫星”演示验证任务和“爱迪生小卫星网络演示验证”(EDSN)任务为基础，所演示的技术可以用于纳卫星群协同运行，并降低运行成本，对控制卫星星座非常重要。

## 五、结束语

纵观航天测控系统近几年的发展，天基系统不断更新和完善，在测控支持中所占比重逐渐增长，特别是 ESA EDRS 系统开始部署，激光通信技术带来强大的数据传输能力；作为深空探测的重点目标，火星中继通信依然是建设热点。地基测控网站部署更加完备，能力提升成为重点。伴随天基系统在测控支持中所占比重的增加，天地一体化测控成为发展趋势，最能体现该思路的美国的空通信导航(SCaN)综合网建设将在 2018 年初步完成。商业测控呈现发展态势，地基测控站数量呈增长之势，天基系统、地月通信、火星中继通信领域初现商业测控系统设想。

新技术正逐步发展，激光卫星通信技术和 DTN 技术已投入工程应用：ESA 作为中继卫星系统起步较晚的组织，率先部署了首个实用的激光卫星通信系统，激光通信技术在更广范围内的应用研究正在进一步深化；DTN 技术在国际空间站上应用，表明美国空通信与导航综合网(SCaN)的建设获得里程碑式进展。而 X 射线通信导航、脉冲星导航、触觉感知、小卫星集群控制等新技术还处在研究和演示验证阶段，这些技术将在未来极大地改进航天测控的手段，提升航天测控的精度与效率。实践表明，国际空间站依然是通信与导航新技术演示验证的最佳平台。