

第1章

绪论

1.1 行星际探测的发展历程

仰望星空、探索宇宙是人类永恒的追求与梦想。随着科学技术水平的发展,人类已经初步具备了通过航天活动来探索地球以外天体的能力。我国“嫦娥一号”月球探测任务的圆满成功,是继人造地球卫星、载人航天飞行取得成功之后我国航天事业发展的又一座里程碑,也开启了中国人走向深空、探索宇宙奥秘的新时代,标志着我国已经进入世界上具备深空探测能力的国家行列。随着我国探月工程“绕、落、回”三步走战略的有序推进,自主火星探测任务的顺利实施,对太阳系行星际探测的任务也已提上了议事日程^[1]。

行星际探测,即深空探测,指的是脱离地球引力场,进入太阳系空间和宇宙空间的探测活动。国际电信联盟(International Telecommunication Union,ITU)的《无线电规则》中将深空的边界定义为距离地球大于或等于 2.0×10^6 km 的空间,这一规定从 1990 年 3 月 16 日起生效^[2]。空间数据系统协商委员会(Consultative Committee for Space Data Systems,CCSDS)在其建议标准中也将距离地球 2.0×10^6 km 以远的航天活动定义为 B 类任务(深空任务)^[3]。从 1958 年 8 月 17 日美国发射第一个月球探测器“先驱者 0 号”开始,人类迈向太阳系的深空探测活动距今已有 60 余年的历史。人类业已开展的深空探测活动基本覆盖了太阳系的各类天体,包括太阳、除地球以外的太阳系其他七大行星及其卫星、小行星和彗星等,实现了飞越、撞击、环绕、软着陆、巡视、采样返回等多种探测方式。美国在 20 世纪 70 年代发射的“先驱者 10/11 号”(Pioneer 10/11)^[4] 和“旅行者 1/2 号”(Voyager 1/2)^[5] 已飞出太阳系边缘,正在奔向更加遥远的星际空间,其中“先驱者 10 号”正在飞向银河系的中心,而“先驱者 11 号”正在朝相反的方向飞行,“旅行者 1/2 号”正在朝另外两个方向飞行。2013 年 9 月 12 日,美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)宣布“旅行者 1 号”已经飞出太阳系,进入了由等离子体和电离气体占主导的星际空间,成为目前离地球最远的人造飞行器,也是第一个进入星际空间的人造物体。2012 年 8 月下旬,我国的“嫦娥二号”卫星与地球之间的距离突破了 2.0×10^6 km,进入了真正意义上的深空。2012 年 12 月,“嫦娥二号”在距离地球约 7.0×10^6 km 远的深空,对 4179 号小行星进行了飞越观测,并成功对其进行拍照。2020 年 11 月 24 日,我国首次月球无人采样返回任务实施,“嫦娥五号”探测器发射升空并进入预定轨道后,于 11 月 30 日完成组合体分

离；12月1日，“嫦娥五号”在月球正面预选着陆区着陆；12月2日，“嫦娥五号”着陆器和上升器组合体完成了月球钻取采样及封装；12月17日凌晨，“嫦娥五号”返回器携带月球样品着陆地球，任务圆满成功。2020年7月23日，我国首次自主火星探测任务实施，“天问一号”于2021年2月到达火星附近实施火星捕获；2021年5月成功实施降轨，着陆巡视器与环绕器分离，软着陆火星表面，火星车驶离着陆平台，目前其正接续开展巡视探测等工作。

目前，世界上各主要航天大国和组织都制定了20年乃至更长远的深空探测发展规划。2011年9月，由NASA、欧洲航天局(European Space Agency, ESA)、俄罗斯联邦航天局(Roscosmos)、日本宇宙航空开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)等14个国家或组织的航天局组成的国际空间探索协调工作组(International Space Exploration Coordination Group, ISECG)发布了《全球探测路线图》^[6]，并于2013年8月进行了修订。该路线图规划了未来25年通过国际合作实现持续探测月球、小行星和火星的途径，确定了探测目的地、任务目标、任务方案及探测准备活动等。ISECG提出的未来25年的空间探测活动的最终目标是实现载人火星探测。各个成员机构针对这一目标在路线图中提出了两种技术路线，一种是以NASA为主导提出的小行星优先路线，另一种是其他国家和组织提出的月球优先路线。两种路线的主要差异在2020年之后的载人探测任务规划上，一个是从地月拉格朗日L1点的深空居民点任务到载人小行星着陆探测，最终实现载人火星探测；另一个则是从月球探测到载人火星探测。在各个成员机构已经明确的2025年前的无人深空探测任务规划中，探测的重点仍然主要集中在火星，包括了着陆器/巡视器、轨道器和采样返回任务。2016年9月，美国SpaceX公司CEO埃隆·马斯克在第67届国际宇航大会上表示，SpaceX公司将开发大型火箭和飞船，用于将人类送往火星，并最终实现火星移民。此外，根据NASA于2020年4月2日公布的载人登月任务规划——“阿尔忒弥斯计划”^[7]，2024年前为工程第一阶段，计划实施五次飞行任务，其中“阿尔忒弥斯1号”为无人试验飞船，“阿尔忒弥斯2号”将进行载人环月飞行，“阿尔忒弥斯3号”将在月球南极载人着陆；2025年至2030年为工程第二阶段，计划在月球长期驻留。

综上所述，作为人类航天活动的重要方向和空间科学与技术创新的重要途径，行星际探测已成为当前和未来航天领域的发展重点，在拓展人类生存空间、证明国家科技实力等方面具有重要意义。

1.2 行星际通信的作用与挑战

随着行星际探测活动的持续推进,为探测提供遥测遥控等信息传输支撑的行星际网络将从地球表面、地球附近延伸至更遥远的空间,而载人深空探测活动所需的天地协同、医监医保则对行星际网络提出了更高的服务质量要求。将地球、月球、火星或其他地外天体构成的本地网络互连起来构成一个遍布太阳系空间的行星际网络,可为未来的行星际探测活动提供灵活、高效、可靠的通信手段。

现阶段行星际通信通常采用无线电信号进行天地之间的信息传输,即由地面深空站建立与深空探测器之间的无线链路来承载探测器平台管理、状态监视、科学数据回传等通信业务。与近地轨道空间航天器相比,深空航天器与地球之间的距离非常遥远、空间环境更加复杂多变且受到天体遮挡的影响,因此给无线电信号的传播带来了巨大的影响^[8-10],主要体现在以下几个方面。

1) 信号空间衰减大

无线电信号按照传播距离的平方衰减,遥远的距离将带来巨大的路径损耗,意味着同样强度的发射信号,接收方得到的信号将会更加微弱,可传输的有效信息量也将急剧下降,为了保证一定的信息量传输将会花费更大的代价。

2) 信号传输时延长

对于数亿千米远的深空航天器,无线电信号单向传输长达数小时,无法像近地轨道航天器那样对其进行实时(准实时)操作控制和状态监视;同时由于地球自转的影响,导致单个地面深空站无法实现对其不间断跟踪。

表1.1给出了太阳系主要天体及太阳系边缘与地球的距离以及与地球静止轨道(geostationary earth orbit,GEO)卫星相比较的信号衰减情况与传输时延情况。

表 1.1 空间信息传输的信号衰减情况与传输时延情况^[8]

太阳系行星/ 太阳系边缘	与地球最远 距离/ 10^6 km	与 GEO 卫星比较(0.036×10^6 km)		通信单向最 大时延/min
		距离倍数	路径损耗增加量/dB	
水星	221.9	6163.9	75.797	* 12.336
金星	261.0	7250.0	77.207	* 14.510
火星	401.3	11 147.2	80.943	* 22.310

续表

太阳系行星/ 太阳系边缘	与地球最远 距离/ 10^6 km	与 GEO 卫星比较(0.036×10^6 km)		通信单向最 大时延/min
		距离倍数	路径损耗增加量/dB	
木星	968.0	* 26 888.9	* 88.592	* 53.815
土星	1659.1	* 46 086.1	93.271	* 92.236
天王星	3155.1	87 641.7	98.854	* 175.405
海王星	4694.1	* 130 391.7	102.305	* 260.964
太阳系边缘	150 000.0	4 166 666.7	132.396	8333.333

注：本表格依据文献[1]条件(各行星与地球最远距离、GEO 卫星高度)以及真空光速($c = 299\ 792\ 458$ m/s)，对距离、路径损耗、通信单向最大时延三个参数进行了计算复核，对部分数据(*)进行了修正，补充了太阳系边缘的计算结果。

3) 信号中断概率较大

根据天体运行规律，太阳系各大行星及系内天体存在绕日公转及自转运动，这将会给行星表面通信设施与在轨探测器之间的无线链路带来星体遮挡影响，二者无法建立连续的直通链路，存在较大的信号中断概率。

1.3 行星际通信的现状、需求与解决方案

与当前国际上主要航天机构，如 NASA、ESA 等所采取的方法相同，我国深空探测系统仍然把测控通信系统作为深空航天器的跟踪测量、监视控制和信息交换的手段，通过地面深空站大口径天线或天线组阵，建立与深空航天器应答机之间的长距离、大时延通信连接，通过低噪温、高性能信道编码等技术实现极微弱信号的接收处理。2018 年，NASA 深空测控网配置主要包括：

(1) 美国加利福尼亚州戈尔德斯通测控站：拥有 1 个 70m 口径天线、1 个 34m 口径高效率天线(HEF)、3 个 34m 口径波束波导天线(BWG)；

(2) 西班牙马德里测控站：拥有 1 个 70m 口径天线、1 个 34m 口径高效率天线(HEF)、2 个 34m 口径波束波导天线(BWG)；

(3) 澳大利亚堪培拉测控站：拥有 1 个 70m 口径天线、1 个 34m 口径高效率天线(HEF)、3 个 34m 口径波束波导天线(BWG)。

根据规划，截至 2025 年，NASA 将在上述 3 个站点退役全部 70m 口径天线，转而每个站点均使用由 5 个 34m 口径波束波导天线(BWG)构成的天线组阵，其将具备 X 频段上行和 X 频段、Ka 频段下行能力，配置如图 1.1 所示。

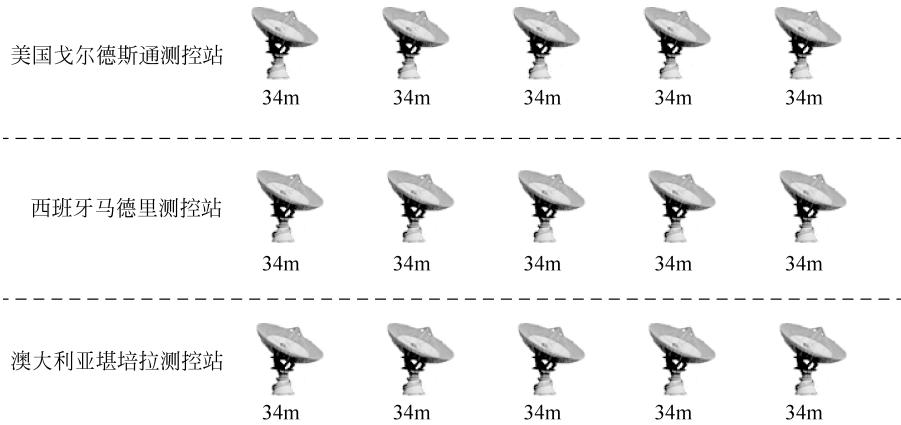


图 1.1 NASA 深空测控网 2025 年配置规划

尽管如此,随着未来探测器距离地球越来越远、探测器之间的关联越来越紧密、载人深空探测的数据传输量越来越大,构建行星际网络的需求日趋迫切。行星际网络可用于实现深空探测器与地球之间、探测器与行星表面网络之间、探测器与探测器之间的任务规划、飞行控制、数据传输等功能,其主要目标是基于用户的使用需求尽最大可能提供优质的信息传输服务。众所周知,用户对通信能力的需求是永无止境的,归纳起来主要有三点:①“高速”,若能够获取数据,则希望得到的数据更快更多,即骨干节点高速互联;②“互联”,若能够得到海量数据,则希望具有更多的高速通道,即接入链路灵活高效;③“智能”,若实现平台状态参数的便捷传输,则希望能够即时动态适应探测器终端状态的变化,即终端平台智能处理。

为了使行星际网络满足深空探测任务的上述需求,国内外相关机构与专家开展了广泛而深入的研究,提出了一系列解决方案。目前国际上普遍认可的主流解决方案^[8]主要包括天线组阵、激光通信、空间组网三种,且呈现出逐步递进、相辅相成的技术发展趋势。

1) 天线组阵

为了提高对远距离微弱信号的接收能力,NASA 深空网(deep space networks, DSN)从 20 世纪 70 年代就开始使用天线组阵技术。该技术是利用分布在不同地方的多个天线组成天线阵列,接收来自同一深空探测器发送的信号,并将来自各个天线的接收信号进行合成,从而获得所需的高信噪比接收信号,这是未来深空通信技术的一个重要发展方向^[11]。天线组阵技术涉及上下行链路,二者在实现手段上有着显著的区别。在天线组阵技术

的三大难点即上行链路组阵、软件合成器、大规模天线组阵(平方千米阵^[12])中,上行链路组阵的技术难度最大。NASA 经过十几年的努力,终于在 2006 年 2 月,利用其深空网在戈尔德斯通的两个 34m BWG 天线首次成功实现了对在轨的“火星环球探测者号”(Mars Global Surveyor, MGS)的上行组阵验证试验,但距离实用还有差距,目前国内外正在开展相关研究和开发工作。

2) 激光通信

同射频链路相比,激光链路的工作频段更高,这意味着衍射损失更小、传递信号能量的效率更高,因此激光链路在更低发射功率和更小孔径尺寸下,仍能达到很高的传输速率。此外,与需要用大口径天线、笨重馈源系统的射频链路相比,激光链路可以用更小的体积、重量实现相应功能,在与射频链路相同传输速率条件下可以显著减小用户的负担。随着未来深空探测活动的多样性带来的数据量增加,以及深空探测器向小型化、轻量化方向发展的趋势,对激光通信技术的研究需求愈发迫切。从长远来看,激光通信技术是未来深空探测任务解决高速数据传输问题所需的关键技术,势必在未来行星际通信网中起到主体作用。尽管如此,由于深空通信距离遥远,光学瞄准和跟踪窄波束信号非常困难;同时,深空探测任务还要应付各种各样的工作条件和轨道约束;此外,实用激光通信仍有一些难题需要克服^[13-15],包括高灵敏度小质量探测器、高效稳定的光源(放大器和激光器)、大型轻质航天器载望远镜、光束指向和控制系统的光机电装置等。

3) 空间组网

为应对深空通信所面临的挑战,空间组网从网络拓扑、接纳控制、业务综合、传输协议^[16-18]等方面提供了一套成体系的解决方案。最具代表性的研究项目是行星际网络(inter-planetary network, IPN),该项目发起于 1998 年,成员来自于不同国家和机构,其目标是致力于构建起一套有助于地球与太阳系中其他遥远的行星开展行星际通信的网络体系结构^[8],如图 1.2 所示。

未来地面互联网将通过边缘网关接入到 IPN 骨干网,实现与太阳系其他行星网络的互联、互通、互操作。各行星网络将支持不同协议并通过选择卫星网关与骨干网相连,且能无缝地完成协议间的转换。IPN 给出了行星际网络的基本架构,即“本地区域网络+IPN 骨干网”^[19],这也是目前国际上最为流行、应用最为普遍的网络架构,可作为行星际网络研究的理论基线。

结合国内外主流解决方案进行比较分析可知:天线组阵侧重于提升地球深空站的物理层信号发送与接收能力,属于设备级性能优化手段;激光

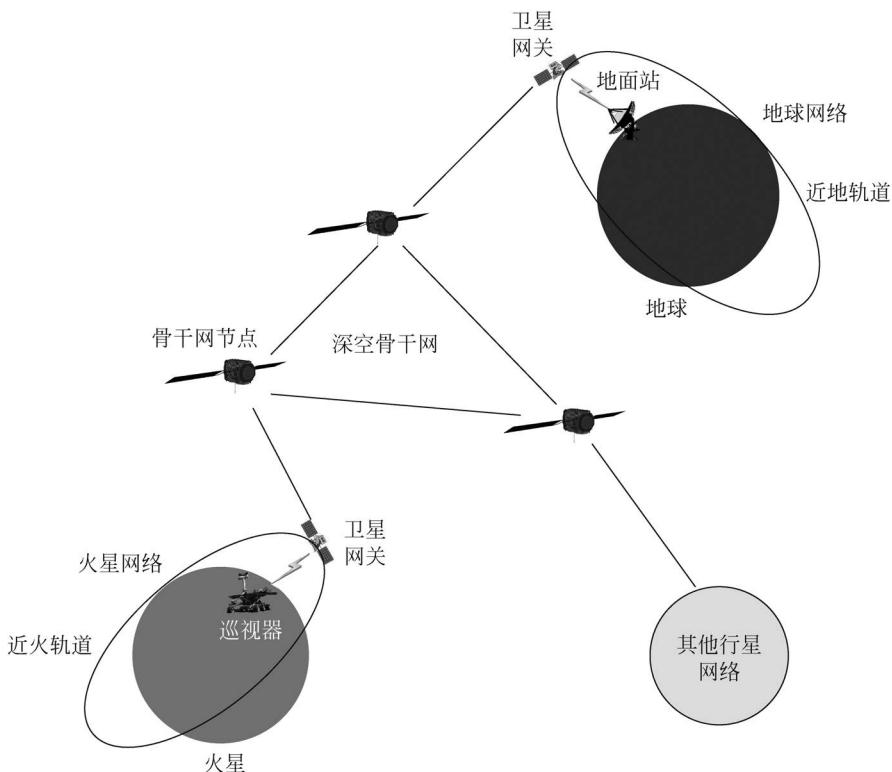


图 1.2 空间组网 IPN 架构

通信侧重于提升地球深空站与深空探测器之间的物理层信号发送与接收能力,属于链路级性能优化手段;空间组网侧重于从系统层面全方位提升任意两点之间的信息传输能力。三种手段各有所长、相辅相成:一方面天线组阵与激光通信技术的发展可以为空间组网提供更为强大的通信链路;另一方面天线组阵与激光通信在深空通信场景中都面临着技术瓶颈与数据量急剧增长带来的压力,空间组网的研究成果可以为二者提供更好的通信条件,如缩短点到点物理距离、合理分配接入用户、压缩待传输的信息等,这也将是本书的研究重点。

1.4 本书框架

未来人类将逐步实现对太阳系各大行星系统、小行星带以及太阳系边缘的探测,这些活动对深空通信提出了更高的服务质量需求。针对超远距

离、超长时间、探测器发射功率受限等因素对行星际通信能力带来的制约，本书围绕行星际网络信息传输系统性能优化目标，首先在第2章给出了行星际网络的体系结构设计，然后在第3、4、5章分别从行星际骨干网络、地外天体接入链路、地外天体表面设施三个层面系统性地给出了行星际网络信息传输性能提升方法，最后第6章给出了信息传输技术未来发展趋势并对行星际探测任务规划进行了展望。全书整体框架如图1.3所示。

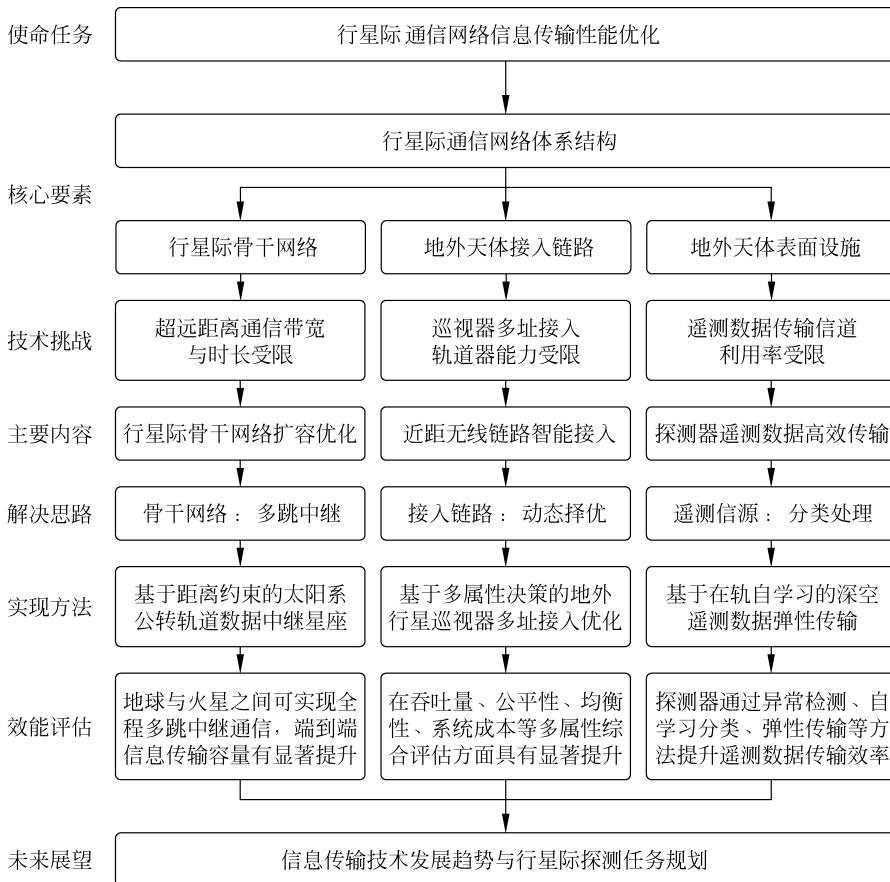


图1.3 本书整体框架

参考文献

- [1] 李海涛.深空测控通信系统设计原理与方法[M].北京：清华大学出版社，2014.
- [2] Radio regulations: 2008 ed [S/OL]. ITU-R-International Telecommunication

- Union/ITU Radio Communication Sector, 2008 [2022-05-04]. <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR>.
- [3] BOOK B. Radio frequency and modulation systems: CCSDS 401.0-B[R]. Washington D. C. : CCSDS, 2016.
 - [4] ANDERSON J D, LAING P A, LAU E L, et al. Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses data, of an apparent anomalous, weak, long-range acceleration [J]. Physical Review Letters, 1998, 14: 2858-2861.
 - [5] LUDWIG R, TAYLOR J. DESCANSO design and performance summary series article 4: Voyager telecommunications[R]. Washington D. C. : NASA, 2002: 1-6.
 - [6] International Space Exploration Coordination Group. The global exploration roadmap[R]. Washington D. C. : NASA, 2013.
 - [7] 美国重返月球阿尔忒弥斯计划[EB/OL]. 国家航天局探月与航天工程中心, 2020 [2022-06-14]. <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6759010/c6809841/content.html>.
 - [8] WAN P, ZHAN Y, PAN X. Solar system interplanetary communication networks: Architectures, technologies and developments [J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(1): 1-26.
 - [9] PAN X, ZHAN Y, WAN P, et al. Review of channel models for deep space communications[J]. Science China Information Sciences, 2018, 61(1): 1-12.
 - [10] 牟亚南. 深空通信调制技术研究与仿真[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
 - [11] LABELLE R C, ROCHBLATT D J. Calibration and performance measurements for the NASA deep space network aperture enhancement project (daep)[J]. Acta Astronautica, 2018, 147: 37-47.
 - [12] DEWDNEY P E, HALL P J, SCHILIZZI R T, et al. The square kilometre array [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(8): 1482-1496.
 - [13] BARBIER P R, RUSH D W, PLETT M L. Performance improvement of a laser communication link incorporating adaptive optics[C]//Proceedings of Conference on Artificial Turbulence for Imaging and Wave Propagation. Washington D. C. : SPIE, 1998: 93-102.
 - [14] VISWANATH A, KAUSHAL H, JAIN V K, et al. Evaluation of performance of ground to satellite free space optical link under turbulence conditions for different intensity[C]. Washington D. C. : SPIE, 2014.
 - [15] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: Challenges and mitigation techniques[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 19: 57-96.
 - [16] CERF V, BURLEIGH S, HOOKE A. Delay-tolerant networking architecture[J]. Network Working Group IETF, 2007.
 - [17] FALL K, FARRELL S. DTN: An architectural retrospective[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2008, 26(5): 828-836.