

## 中国深空测控网光通信技术途径分析与发展展望 (特约)

李海涛

(北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 深空光通信是满足未来深空探测高速数据传输的主要技术途径,也是未来中国深空测控网发展的主要技术方向。特别是伴随着智能化、网络化空间通信系统的发展,射频和光通信相结合的智能空间通信网络将成为支持未来深空探测任务的核心设施。文中结合中国未来月球和深空探测发展规划,以中国现有深空测控网的任务支持能力为基础,梳理了未来深空测控光通信的需求。在充分借鉴国内外最新研究成果的基础上,全面分析了建设深空光通信系统地球终端的技术途径。结合中国国情的实际,提出了分步进行系统建设、分阶段开展工程应用,构建天地基相结合的混合深空光通信地面系统,并最终形成中国完全自主的深空光通信认知网络的发展思路。

**关键词:** 深空测控网; 深空通信需求; 光通信技术; 技术途径

**中图分类号:** TN929.13      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.3788/IRLA20201003

## Technical approach analysis and development prospects of optical communication technology in China Deep Space TT&C Network(*Invited*)

Li Haitao

(Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Deep space optical communication is the main technical approach of high speed data transmission to meet the future deep space exploration, and the main technical direction for the China Deep Space TT&C Network development. Especially with the development of intelligent and networked space communication system, the intelligent space communication network combining RF and optical communication will become the core facilities to support future deep space exploration missions. This paper combines China future lunar and deep space exploration development plan, based on the mission support capability of China Deep Space TT&C Network, the requirements of future deep space optical communication are sorted out. On the basis of learning from the latest research results, this paper analyzes the technical approach of constructing the earth terminal of deep space optical communication system. Based on the actual situation of China, this paper puts forward the development idea of constructing the mixed deep space optical communication ground system with space relay terminal and earth terminal, and finally forming the cognitive network of deep space optical communication.

**Key words:** China Deep Space TT&C Network; requirements of deep space communications; optical communications technology; technical approach

收稿日期:2020-01-02; 修订日期:2020-02-26

基金项目:国家中长期科技发展规划重大专项(探月工程)

作者简介:李海涛(1973-),男,我国探月工程嫦娥四号任务测控系统总设计师、我国首次火星探测任务测控系统总设计师,硕士,主要从事深空测控技术研究和总体设计方面的研究工作。Email: lihaitao@bittt.cn

## 0 引言

深空探测是指脱离地球引力场,进入太阳系空间和宇宙空间的探测活动。关于深空探测的定义,一种是国际电信联盟 (ITU) 在《无线电规则》第 1.77 款中关于深空的规定为距离地球大于或等于  $2.0 \times 10^6$  km 的空间,这一规定从 1990 年 3 月 16 日起生效<sup>[1]</sup>,国际空间数据咨询委员会 (CCSDS) 在其建议标准书中也将距离地球  $2.0 \times 10^6$  km 以远的航天活动定义为 B 类任务 (即深空任务);另一种定义为对月球及以远的天体或空间开展的探测活动<sup>[2]</sup>。中国采用了第二种定义,将月球探测作为了深空探测的起点。

深空测控系统是用于深空探测任务航天器跟踪测量、监视控制和信息交换的专用系统,其在深空探测任务中具有不可替代的重要地位和作用<sup>[3]</sup>。通常,将地面的多个深空测控站组成的测控网称为深空网或深空测控网,特指专门用于深空航天器测控和数据传输的专用测控网。其特点是配有大口径抛物面天线、大功率发射机、极高灵敏度接收系统、信号处理系统以及高精度高稳定度时间频率系统,能完成对距离地球 200 万 km 以远深空航天器的测控任务<sup>[3]</sup>。

为了克服地球自转影响,实现对深空航天器的连续测控覆盖,深空测控网的布局通常是在全球范围内经度上间隔约  $120^\circ$  布站,这样就可以确保对距离地球表面距离在 3 万 km 以上的航天器进行连续测控,图 1 所示为 NASA 深空网布局对不同轨道高度航天器的测控覆盖示意<sup>[4]</sup>。综合考虑跟踪弧段和天线性能等因

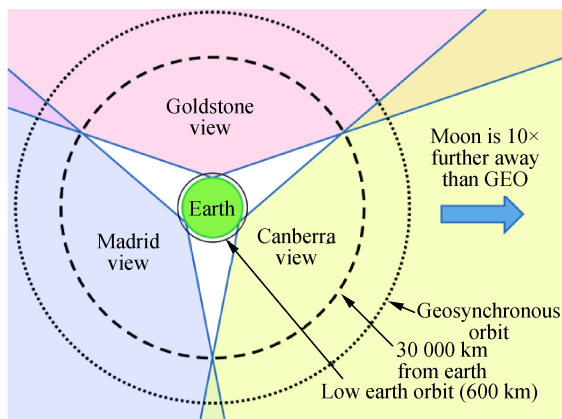


图 1 NASA 深空网对不同轨道高度航天器测控覆盖示意图<sup>[4]</sup>

Fig.1 Coverage of spacecraft at different orbital altitudes by NASA's Deep Space Network<sup>[4]</sup>

素。综合考虑跟踪弧段和天线性能等因素,深空站的站址纬度通常选择在南北纬  $30 \sim 40^\circ$  之间<sup>[5]</sup>。目前,美国、欧州航天局 (ESA)、中国等已经建立了深空测控网。俄罗斯、日本、印度、意大利、德国等国家也建设了自己的深空测控设备<sup>[6]</sup>。

我国深空测控网是伴随着探月工程“绕、落、回”三步走的战略步伐,历经了探月工程二期建设了国内两个深空站,初步具备了独立实施深空探测任务测控支持的能力;探月工程三期建设了位于南美洲的第三个深空站,从而形成了全球布局功能体系完备的深空测控网。北京航天飞行控制中心是我国月球与深空探测任务的操作控制中心<sup>[6]</sup>。

随着深空探测任务的不断深入和探测技术水平的不断提高,深空探测任务返回的数据量需求也随之不断增大。深空测控通信的射频频率也已经最初的 L 频段逐步发展到了 Ka 频段。迄今为止,国际上深空测控通信领域的研究已经认识到,通过将工作频率迁移到明显更高的光学频率,可以实现深空通信容量扩展的下一代重大飞跃。随着我国后续月球与深空探测任务的实施<sup>[7-10]</sup>,利用光通信技术提高深空数据返回能力也逐渐提上了日程。

## 1 我国深空测控网现状

目前,我国深空测控网由西部喀什地区 35 m 深空站、东部佳木斯地区 66 m 深空站和位于阿根廷西部内乌肯省萨帕拉地区的 35 m 深空站组成,可以实现对深空航天器接近 90% 的测控通信覆盖率,如图 2 所示。具备支持各类月球和深空探测任务的多频段遥测、遥控、数据接收和跟踪测量等功能,是目前世界上功能完备全球布局的三大深空测控网之一。

我国深空测控网采用了国际标准的 S、X 和

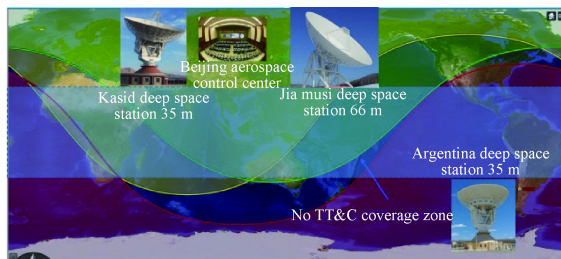


图 2 中国深空测控网  $10^\circ$  仰角测控覆盖示意<sup>[6]</sup>

Fig.2 Coverage of China Deep Space TT&C Network at  $10^\circ$  elevation<sup>[6]</sup>

Ka 三频段, 频率范围覆盖 NASA 和 ESA 深空站的频率范围, 符合国际电联和 CCSDS 的相关建议, 如表 1 所示。目前 S 和 X 频段上下行链路均可用, Ka 频段主要用于下行接收。我国深空测控系统在功能和性能上与美国、欧空局等所属的深空站处于同一水平<sup>[6]</sup>。

表 1 深空测控频段划分

Tab.1 Frequency band allocation for deep space TT&C

Frequency band	Uplink / MHz	Downlink / MHz
S-band	2 025-2 120	2 200-2 300
X-band	7 145-7 235	8 400-8 500
Ka-band	34 200-34 700	31 800-32 300

在 2018 年 5 月 21 日发射的嫦娥四号“鹊桥”中继星任务中, 我国深空测控网首次全网执行测控任务。国内喀什 35 m、佳木斯 66 m 和阿根廷 35 m 深空测控设备共同为鹊桥提供了 S 频段测控支持; 2018 年 12 月 8 日, 嫦娥四号探测器成功发射, 深空测控网的全部三个深空站为探测器任务提供了全程 X 频段测控通信支持。

即将在 2020 年实施的首次火星探测任务中, 我国深空测控网的测控通信支持距离将进一步延伸到 4 亿 km 远。为了提高深空测控网的数据接收能力, 我国正在喀什深空站建设 3 个 35 m 口径新天线, 与原有的 1 个 35 m 天线组成天线阵系统, 通过天线组阵接收技术, 使得喀什深空站在 X 频段深空任务测控数据接收能力达到与佳木斯深空站 66 m 深空测控设备相当的水平, 如图 3 所示。未来还计划在阿根廷深

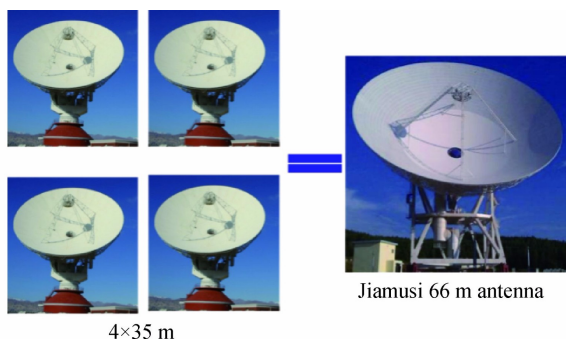


图 3 中国喀什深空站 4×35 m 天线组阵示意图<sup>[6]</sup>

Fig.3 Schematic diagram of 4×35 m antenna array of China Kashi deep space station<sup>[6]</sup>

空站构建类似的天线阵系统, 从而实现全网更强更远的测控通信能力。按照 NASA“新视野号”探测器的配置开展太阳系边际探测, 我国深空测控网在 100 AU (1 AU≈1.496 亿 km) 距离上可以支持的数传码速率最大为 130 bps, 佳木斯深空站上行配置 50 kW 发射机 (目前国内已经研制出样机)<sup>[11]</sup>, 100 AU 距离上行遥控码速率最大约为 160 bps, 100 AU 距离上行 12 码速率最大约为 160 bps<sup>[12]</sup>。

## 2 深空测控光通信需求

以“嫦娥四号”任务圆满成功为标志, 中国探月工程四期和深空探测工程全面拉开序幕。在完成计划 2020 年底实施的“嫦娥五号”任务之后, 还将实施“嫦娥六号”、“嫦娥七号”和“嫦娥八号”三次月球探测任务。“嫦娥六号”计划在月球南极进行采样返回; “嫦娥七号”是在月球南极一次综合探测, 包括对月球的地形地貌、物质成分、空间环境等进行一次综合探测; “嫦娥八号”除了继续进行科学探测试验以外, 还要进行一些关键技术的月面试验。中国未来深空探测工程将实施四次重大任务: 2020 年发射首个火星探测器, 一次实现火星环绕和着陆巡视探测; 2024 年前后进行一次小行星探测; 2028 年前后实施第二次火星探测任务, 进行火星表面采样返回, 开展火星构造、物质成分、火星环境等科学分析与研究; 2036 年前后开展木星系及行星际穿越探测。探测距离也从太阳系内行星的火星, 逐步延伸到外行星的木星和更远的行星际空间<sup>[6]</sup>。

深空探测的通信数据通常分为两类: 一类是现场感知数据, 主要是探测器拍摄的现场照片和视频信息; 一类是科学探测数据, 主要包括探测图像、合成孔径雷达和多频谱&混合谱成像探测仪获取的数据<sup>[13]</sup>。随着载人深空探测提上议事日程 (美国计划 2024 年将首位女宇航员送上月球南极、2033 年实现载人登陆火星), 未来深空探测的现场感知数据也会从现在的图像, 向视频乃至高清晰度数字电视 (HDTV) 发展, 数据传输速率需求将达到百兆量级, 如图 4 所示。

到 20 世纪 90 年代中期, NASA 已经基本上完成了对太阳系的初步勘察, 太阳系内所有行星去过至少

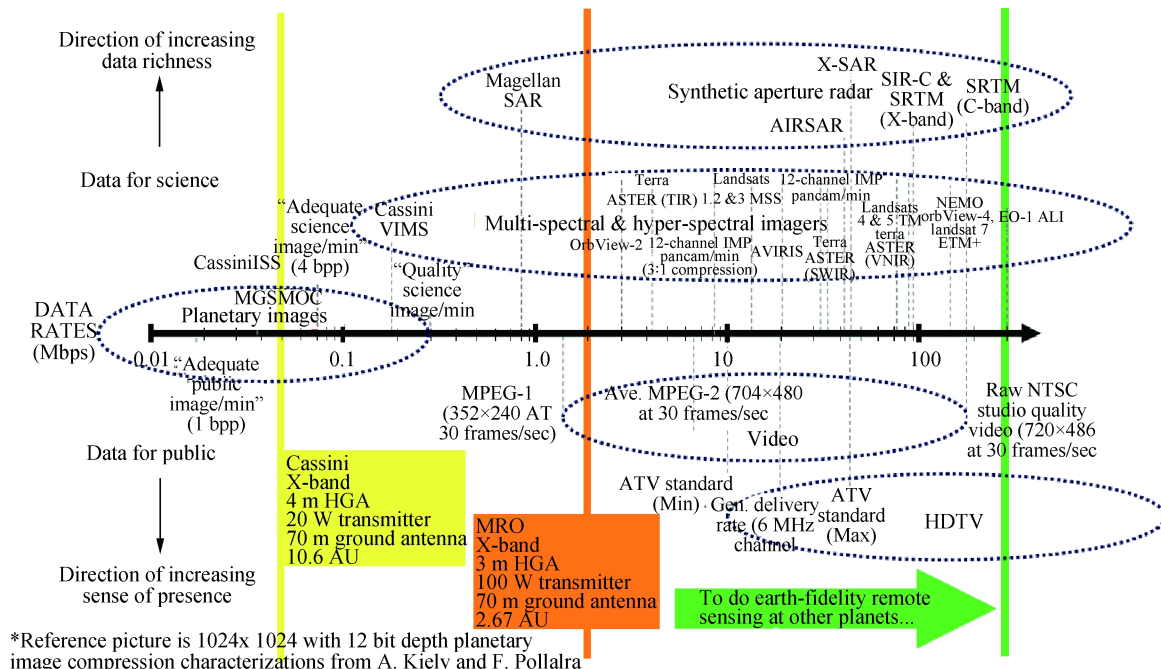


图 4 未来深空探测任务中对数据传输速率的需求<sup>[13]</sup>

Fig.4 Required for data transmission rate in deep space exploration missions<sup>[13]</sup>

一次,剩下的就是要回到这些目的地,对它们进行更详细地勘察研究。要获得高保真度的多光谱图像、合成孔径雷达观测和准实时视频,所需要的数据速率比太阳系初步勘察阶段的数据速率增加一个数量级以上。而且,为了能够像今天对地球进行遥感那样,以同样的精度对其他行星进行遥感,所需要的数据率比 1990 年代初期的数据率要高三个数量级以上<sup>[14]</sup>。

我国的后续月球探测任务和深空探测任务都需要开展对目标天体的详细勘察已经表面巡视探测和采样返回等任务,这些都对大数据量返回提出了更高的要求。即将于 2020 年 7 月实施的首次火星探测任务也是受限于天地通信链路性能而无法实现高分辨率成像数据的全部回传。特别是探测火星、木星系这些具有大气活动变化天体的探测任务需求尤为突出。

由于无线电信号按传播距离的平方衰减,深空探测任务遥远距离所带来巨大的信号路径损耗,意味着同样强度的发射信号,接收方得到的信号更加微弱,可传输的有效信息将急剧下降,或为保证一定的信息量传输花费更大的代价。为了弥补深空测控通信巨大的信号空间衰减,通常采用增大天线口径、增大射频发射功率、降低接收系统噪声温度、提高工作频

率、信道编译码技术、降低传输码速率、通过数据压缩降低信息传输数据量等措施。

从历史上看,提高测控通信工作频率,获得更有效的传输能力是一个有效的技术途径。NASA 深空网及其所支持的航天器向更高频率的迁移就是其深空通信能力稳定增长的最重要因素。在 20 世纪 60 年代使用 L 频段 (900 MHz) 和 S 频段 (深空分配的 2.29~2.30 MHz) 的频率。在 1977 年,X 频段 (8.4 GHz) 用于两个旅行者号探测器的主用下行链路。在 20 世纪 90 年代,NASA 致力于发射搭载有针对性科学载荷更小的航天器实施深空探测,将天地通信频率扩展到了 Ka 频段 (32 GHz)。NASA 在节省了航天器质量和功耗的同时,实现了与 X 频段相同的数据返回量。NASA 期望使用光学频率来实现进一步节省质量和功耗的目标<sup>[15]</sup>。图 5 所示为 NASA 深空网的测控通信能力发展历程<sup>[16]</sup>。图 6 给出了 NASA 深空网未来所采用的提高深空通信数据接收速率的技术途径和数据传输能力提高的预期效果<sup>[17]</sup>。美国在 2013 年 9 月发射的“月球大气与粉尘环境探测器”,对月地激光通信技术进行了演示验证,实现了月地间下行 622 Mb/s 和上行 20 Mb/s 的通信速率。

同射频 (RF) 通信链路相比,光通信工作频率 (约

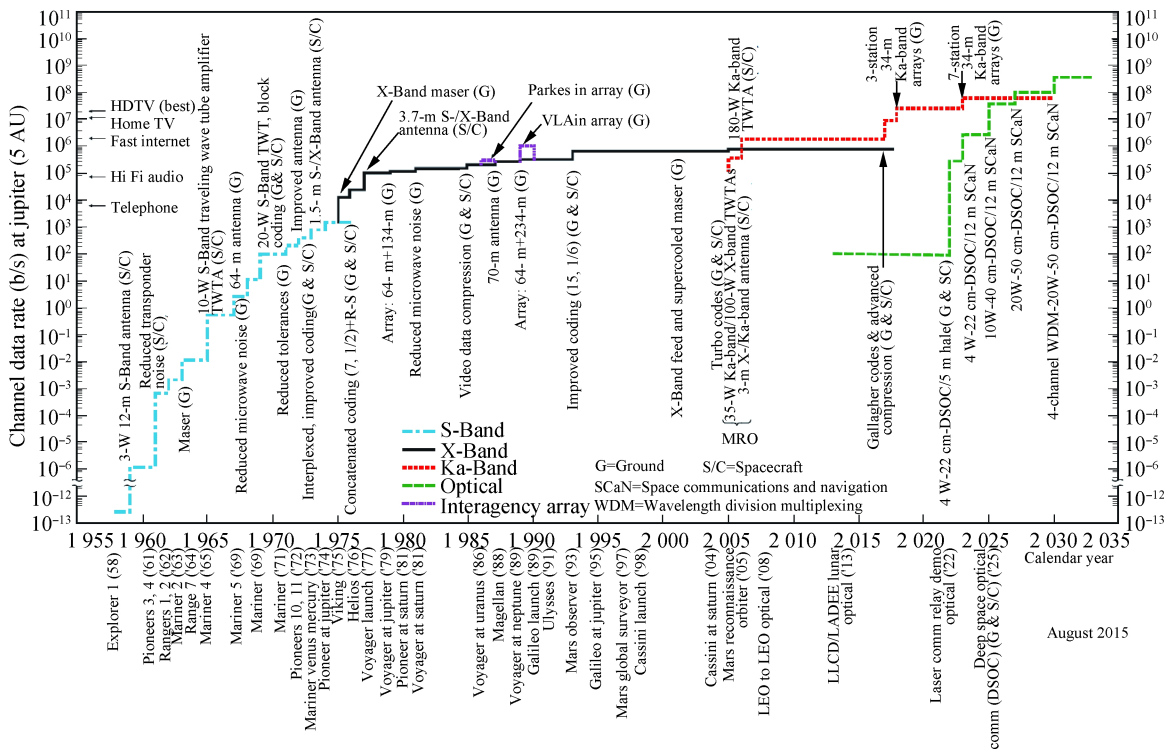


图 5 NASA 深空通信能力的发展历程<sup>[16]</sup>(在木星距离上)

Fig.5 Profile of NASA deep space communications capability<sup>[16]</sup>(At Jupiter)

	Data rate today		Data rate ~2020		Data rate ~2030		
Spacecraft capabilities	3 m antenna X-Band 100 W Xmitter		3 m antenna Ka-Band 180 W Xmitter		5 m antenna Ka-Band 200 W Xmitter		1 m antenna 1 550 nm 50 W Xmitter
DSN antennas	1×34 m	3×34 m	1×34 m	Equip to 3×34 m	1×34 m	Equip to 7×34 m	10 m optical
Mars (0.6 AU)	7 Mbps	20 Mbps	400 Mbps	*1.2 Gbps	*1.3 Gbps	*9.3 Gbps	5.5 Gbps
Mars (2.6 AU)	355 Kbps	1 Mbps	21 Mbps	64 Mbps	71 Mbps	*500 Mbps	300 Mbps
Jupiter	83 Kbps	250 Kbps	5 Mbps	15 Mbps	16 Mbps	115 Mbps	70 Mbps
Saturn	24 Kbps	71 Kbps	1.4 Mbps	4 Mbps	4.7 Mbps	33 Mbps	19 Mbps
Neptune	3 Kbps	8 Kbps	160 Kbps	470 Kbps	520 Kbps	3.7 Kbps	2.2 Mbps

图 6 NASA 深空网未来所采用的提高深空通信数据接收速率的技术途径和数据传输能力提高的预期效果<sup>[17]</sup>

Fig.6 Technical approaches adopted by NASA DSN in the future to improve the data reception rate and the expected effect of improved data transmission capacity<sup>[17]</sup>

为 200~300 THz) 要比 Ka 频段的 32 GHz 载频更高。这意味着衍射损失更小, 传递信号能量的效率更高, 使得光学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。图 7 所示为火星距离上的航天器所发射的 RF 波束和光束的扩散情况对比。当射频波束从火星到达地球时, 衍射使得信号扩散到 100 个地球直径宽的面积上, 而激光束的尺寸仅为 0.1 个地球直径宽, 这表示水平和垂直方向上的接收能量集中程度高 1 000 倍, 相当于功率密度提高

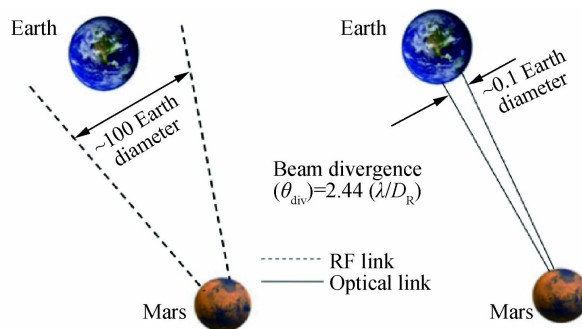


图 7 从火星发射到地球的射频波束和光束扩散对比<sup>[18]</sup>

Fig.7 Comparison of radio frequency beam and RF beam divergence from Mars toward Earth<sup>[18]</sup>

10<sup>6</sup> 倍<sup>[18]</sup>。这种相对 X 频段的波长平方增益约为 90 dB, 由于光通信中的量子效应和实际实施问题, 目前将其实际的增益限制在约 60 dB 左右。所以说, 光通信系统的核心优势就源自于其窄光束发散角, 可以用更小尺寸、更小质量和更低功耗的飞行系统提供射频 10~100 倍高的数据速率。而且还拥有射频频段几个数量级带宽扩展的不受限制的可用频谱 (在光频上是几十太赫兹, 而在射频上是几百兆赫)<sup>[19]</sup>。

NASA 已完成的一项研究比较了光通信和射频通信的能力。以离地球的距离为变量, 距离地球越远, 光通信比射频通信越有利。对于 20 AU(天王星) 距离 10 Mbit/s 数传速率, 4 AU(木星) 距离 100 Mbit/s 速率, 以及约 2.67 AU(火星最大距离) 距离 1 Gbit/s 速率, 光通信很有利。低于这些距离和数传速率, 光和射频通信的质量大致相当, 但光通信的功耗较小, 而射频通信所需的额外功率带来的质量增加不多, 仅 0.011 kg/W<sup>[20]</sup>。

对于深空探测任务而言, 光通信的主要优点包括: 更快、更轻。

(1) 更快: 更高的数据速率使任务数据能够在更

短的通信时间内完成下传, 从而减少航天器电源的使用, 同时还减少了支持任务所需的中继终端和地面站点数量;

(2) 更轻: 光通信飞行终端比传统的射频通信设备更小、更轻、所需要的能源更少, 星载通信系统体积、重量和功耗的减小可以使主任务增加的科学仪器或降低成本。

### 3 深空光通信技术途径分析

深空光通信技术是指以激光或空间自由光为载体, 通过望远镜进行深空通信的技术。深空激光通信链路通常由深空航天器上的激光通信飞行终端、光学信道、一个或多个地球终端组成, 如图 8 所示<sup>[21]</sup>。激光通信飞行终端从航天器接收下行数据流, 并将接收到的上行数据传送至航天器, 同时由载体航天器为其提供功率、控制、星历表、瞄准信息和粗略姿态控制。地球终端接收来自飞行激光通信终端的光学下行链路信号、发射光学上行链路通信信号或为航天器上飞行终端瞄准捕获与跟踪发送所需的地球引导信标信号。

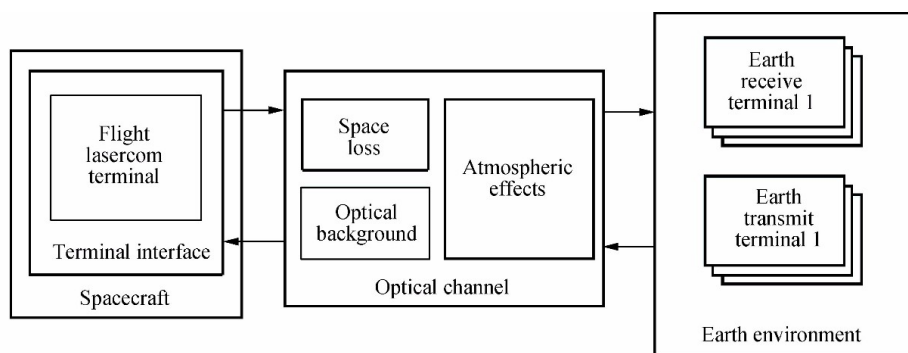


图 8 深空激光通信链路组成框图<sup>[21]</sup>

Fig.8 Block diagram of the deep space laser communication link<sup>[21]</sup>

从深空测控网的视角来看, 有效实现深空光通信的技术途径主要集中在如何实现地球终端高效的数据接收能力。目前, 主要的技术途径包括布设地面大口径光学地面站、射频光学一体化技术、天基中继 (光-射频中继和光-光中继) 技术以及基于认知的组网技术等。

#### 3.1 地面大口径光学终端网络

从覆盖性能来看, 与传统的深空测控网类似, 为

了确保不受地球自转的影响, 需要全球布站, 从而实现对深空航天器的连续覆盖。通常, 考虑在全球设置若干地面望远镜。地面光学望远镜网络的主要参数包括: 数据传输能力和误码率, 空间覆盖连续性, 地面望远镜站的合理位置。

地面光学望远镜网络的站址选择应尽量满足以下条件:

(1) 纬度接近赤道, 以便更好地跟踪位于太阳系

黄道面上的深空航天器。可考虑±40°的纬度范围内；

- (2) 经度上尽可能均匀分布, 相邻站点之间最小共同观测时间为 4 h, 以实现平稳交接;
- (3) 海外站点不受地缘政治的影响;
- (4) 一年内云层覆盖持续时间较短, 天气比较稳定, 且可预报;
- (5) 海拔高, 以获得高大气透过率和低天空辐射度;
- (6) 大气湍流影响小。

选择光通信地面终端站址十分关键, 因而地面终端站的位置需要认真选择, 使有云覆盖的天气最少。所选站址能维持与航天器联通时间百分比取决于站址和季节。某些站址的云层覆盖还存在昼夜的变化。

图 9 显示的是美国 Aqua 卫星在 2002~2015 年期间每日测量的全球平均下午云层覆盖情况<sup>[22]</sup>。笔者可以看到北美的美国西南部和墨西哥西部, 南美的智利北部和阿根廷西部, 非洲北部和南部非洲的西南, 亚洲西南部, 澳大利亚西部平均云覆盖较少。从气候

分布来看, 这些区域基本上都处在热带沙漠气候带内, 耦合性相当强, 如图 10 所示。国内几乎没有较好的区域可选, 只是青藏高原和塔克拉玛干沙漠相对较好。即使在美国西南部最好的站上, 单站的天气可用性通常也低于 70%。此外, 如果在部分多云天气里需要很多次重新捕获, 则单站可用性可能会进一步降低。

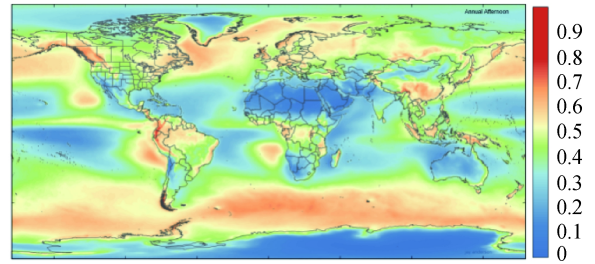


图 9 Aqua 卫星在 2002 年至 2015 年期间每日测量的全球平均下午云层覆盖图<sup>[22]</sup>

Fig.9 Average global afternoon cloud cover measured daily by the Aqua satellite between 2002 and 2015<sup>[22]</sup>

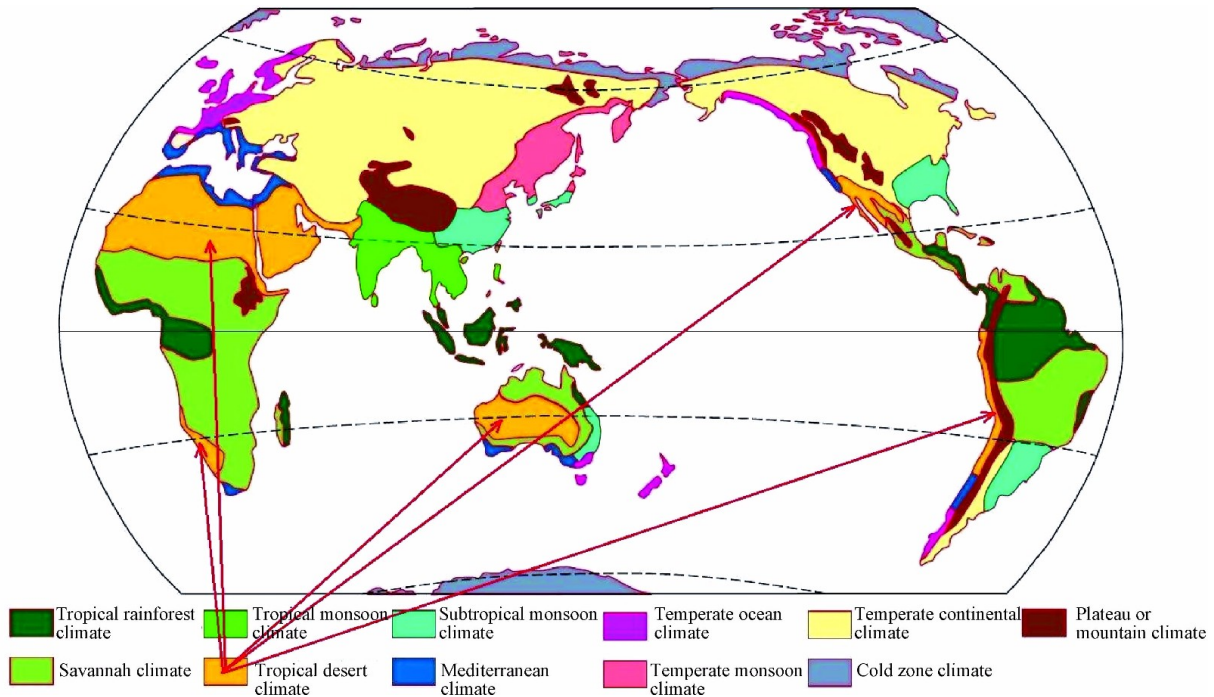


图 10 全球热带沙漠气候区域分布

Fig.10 Regional distribution of global tropical desert climate

要达到高天气可用度可以采用多个地面终端站的站间分集。如果  $N$  个站位于不相关的气象单元中,

且都能看到航天器, 每个站点的天气可用度为  $p$ , 则站网的可用性就是至少一个站能看到航天器的概率

$1-(1-p)^N$ , 当地面终端站的数量很多时多, 就可以达到需要的站网可用性。图 11 所示为一个全球布站的实例, 有 9 个光学地面站, 每个地面站的可用度为 67%, 则整个地面光学站网就能够达到 96% 的可用度<sup>[21]</sup>。

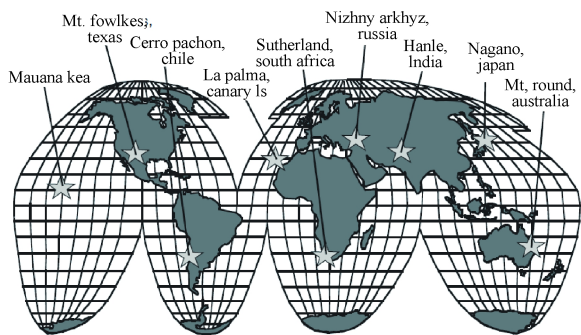


图 11 为减少天气影响导致通信中断而设计的光学地面站网实例<sup>[21]</sup>

Fig.11 Example of multi-site optical network designed for mitigation of weather-induced outages<sup>[21]</sup>

由于地面不同高度上的天空辐射度和大气透过率值不同。需要在孔径尺寸和站址高度之间进行折衷。当然, 配置小孔径望远镜的好处是成本低。不过, 由于缺少高度较高的合适山峰, 因此在较低的地方设置深空光通信所需要的大孔径望远镜 (10 m) 要更容易一些。NASA 的相关研究表明在海拔高度较低地面上更大孔径的望远镜可能满足需求 (即较低大气透过率和更强背景辐射轻度)。特别是在最差的大气条件下 (雾天), 10 m 孔径望远镜置于 1.2 km 高度上, 可使链路裕量接近 6 dB。反之, 置于 1.9 km 高度上 5 m 孔径望远镜就能在雾天满足链路需求。而在 2 km 左右高度上, 接近悬浮边界层的尾部, 雾天和晴天的性能基本相同<sup>[21]</sup>。

满足深空地面接收所需的有效孔径约为 10~12 m, 可通过单个大型望远镜或一组小型望远镜实现<sup>[19]</sup>。在图 12 中, 标记单元的矩形灰色轮廓表示一个阵列单元, 该阵列单元可以实现一个单个大孔径, 就是  $N$  个直径相等的单元将提供一个  $N/2$  倍大的有效直径。采用多个小望远镜组成的阵列, 加上高速数字信号处理技术, 进行深空光学信号的地面接收, 是接收深空光学信号的大孔径望远镜的一种可行的替代方案<sup>[9]</sup>。大孔径望远镜的建造和运行成本都很高, 并且一旦某一部件出现失效, 会导致单点故障, 从而丢失宝贵的数据。设计合理的阵列中, 某一单元失效,

即使不进行更换, 性能的降低很小; 但一旦出现故障时, 阵列也能切换到备份望远镜, 且不会显著增加成本。

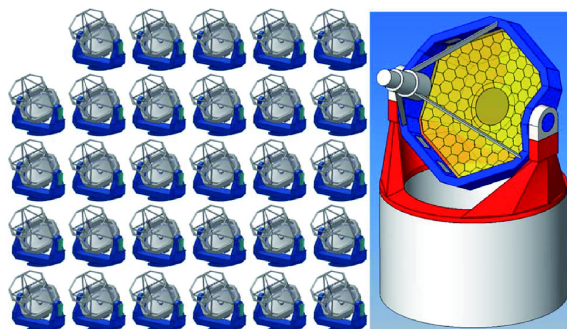


图 12 单台直径为 12 m 的分段主望远镜概念设计与一组直径为 2.2 m 的等效有效直径望远镜的比较<sup>[19]</sup>

Fig.12 Comparison of a single 12 m diameter segmented primary telescope conceptual design (right) and an array of 2.2 m diameter telescopes for an equivalent effective diameter<sup>[19]</sup>

### 3.2 地面射频/光学一体化系统

未来, 由于科学与探测仪器更加先进, 以及人类最终进入到其他行星系, 深空任务产生的平均数据将显著增长, 将呈数量级增加所需传输的数据率。根据喷气推进实验室 (JPL) 为 NASA 所做的下一代空间通信体系结构研究结果表明, 对于未来支持载人火星任务所需的光通信链路, 地面需要口径在 8~12 m 的大口径望远镜。建造和操作这种口径望远镜在技术上是没有任何问题的。尽管比同类口径的天文望远镜成本低, 但其投资仍然很大。NASA 从 2010 年 12 月起就开始研究将射频和光学系统结合在同一天线结构上的概念, 就是在现有或未来的 DSN 射频天线上增加光学反射镜。这是一种可能的低成本解决方案。最近的实验和工程研究已经使得这种混合射频/光学天线成为 NASA 当前推进深空光学通信应用的主要途径<sup>[23]</sup>。

为了研发深空任务使用的这种混合天线, NASA 希望将 8 m 的光学孔径集成到深空网 34 m 波束波导天线中, 用主球面镜及适当的校正光学设备及接收机元件替换 RF 副反射面后的 RF 面板。这种混合天线已进行了研究, 预期有足够的稳定性和指向能力, 天线 RF 性能仅有一小部分损失。图 13 所示为 34 m RF 天线内带有 8 m 光收集区的完整 64 单元



4 支撑杆的 RF/光学混合孔径, 34 m 波束波导天线上 的包括了射线路径的 RF/光学概念的侧视图。

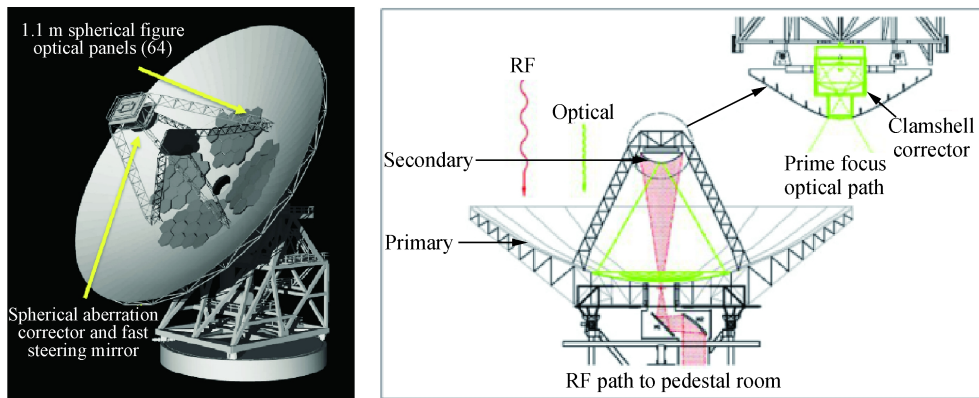


图 13 DSN 34 m 天线 RF/光学混合孔径概念示意<sup>[23-24]</sup>

Fig.13 RF/ optical hybrid aperture concepts of DSN 34 m antenna<sup>[23-24]</sup>

这一方案首先是应用了已有站点上的射频大口径天线系统,从而大大降低了选址建站和望远镜大型结构建设投入。既具备 RF 通信又具备光通信能力的深空探测任务,可以在站点无云层阻挡视线条件下使用光提供最高速率;在站点有云层覆盖时,使用数据率较低的 RF 频段发送最高优先级数据。这种方案既降低了应用光通信技术初期的地面系统建设的投入,又带来了任务使用的灵活性。

当然,这种方案对于期望以光通信为主任务系统不是最优选择,其光通信的使用效率必然会受到天气因素的影响,因为目前各个航天机构的深空站选址都是以射频通信为基本保障需求确定的站址,只有个别深空站的站址位置能够同时兼具射频和光通信支持能力,如 NASA 在美国加州的戈尔德斯通的深空站和 ESA 在澳大利亚西部新诺舍的深空站。

### 3.3 天基中继混合链路

由于云层覆盖、大气湍流、天空背景和强风都会影响到地面接收机链路的光学可用性和质量,而海洋和地缘政治又限制了光通信地面站的布设位置,故天基接收机为光通信单台接收机提供了最优的可用性,布设在地球轨道的接收机和深空探测器之间的光学星间链路提供了一个可用性很高的高带宽链路。

目前的研究提出了包括近地轨道、地球同步静止轨道、超同步静止轨道和日地拉格朗日 L4/L5 点在内的多种方案。这些方案大都是选择了通过天基中继

平台的对地射频和光学混合通信链路完成数据最终的传递,即在满足光通信条件下采用光通信手段,不满足则采用射频降速率传输。

天基中继的方案在技术上是可行性的,比如最为关键的大口径空间光学镜面方面,根据目前在激光通信领域已经取得的技术突破(每比特只需要少量光子),直径 2~3 m 的太空望远镜孔径足以支持来自火星的 Mbps 数据速率<sup>[25]</sup>。而 NASA 研发中的詹姆斯韦伯空间望远镜的孔径则已经达到了 6.5 m,完全可以满足未来载人火星任务的需求。

NASA 在 21 世纪初就曾提出过“综合”地球同步静止轨道中继的概念,可以支持从近地轨道到月球以及更远的深空任务。中继星的设计理念是类似目前 NASA TDRS 的增强:包括了一个用于深空激光通信的 2 m 孔径望远镜和一个较小的 30 cm 望远镜用于近地轨道高速激光通信并可支持距离地球约 100 万 mile 的日地平动点 L1 和 L2 任务。其设计概念如图 14 所示<sup>[26]</sup>。

最新的 NASA 下一代空间通信导航增强体系研究的成果中还提出了超同步静止轨道卫星架构以最大限度地提高“地月空间”、“火星”和深空任务的通信导航性能。超同步静止轨道卫星(轨道高度约 60 700 km,周期 48 h,倾角 45°)由下列有效载荷组成。每颗卫星配备了两个单址(SAs)天线,支持 S 频段和 Ka 频段,并通过一个扩展范围的跟踪架提供了对月球的覆

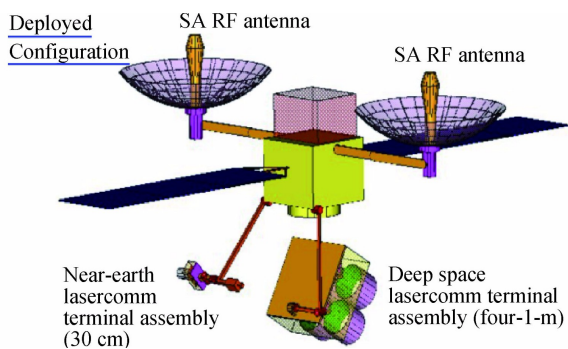


图 14 NASA“综合”地球同步轨道中继概念<sup>[26]</sup>

Fig.14 NASA "integrated" GEO relay concept<sup>[26]</sup>

盖。每颗卫星配有两个 Risley 棱镜激光望远镜,用于支持月球范围内的激光通信和导航。有一个带星载处理器火星阵列式激光通信终端,可以支持再生式激光通信链路,这个终端带有一个可以 360°转动的跟踪架,能够实现支持火星和其他深空任务激光通信的切换。图 15 给出了超同步静止轨道卫星设计概念<sup>[27]</sup>。

此外,为了确保载人火星探测任务不间断通信需求,还提出了在日地平动点 L4/L5 点布设地火激光通信中继节点,从而建立从火星轨道到地球同步静止轨道或地面的不间断通信链路。

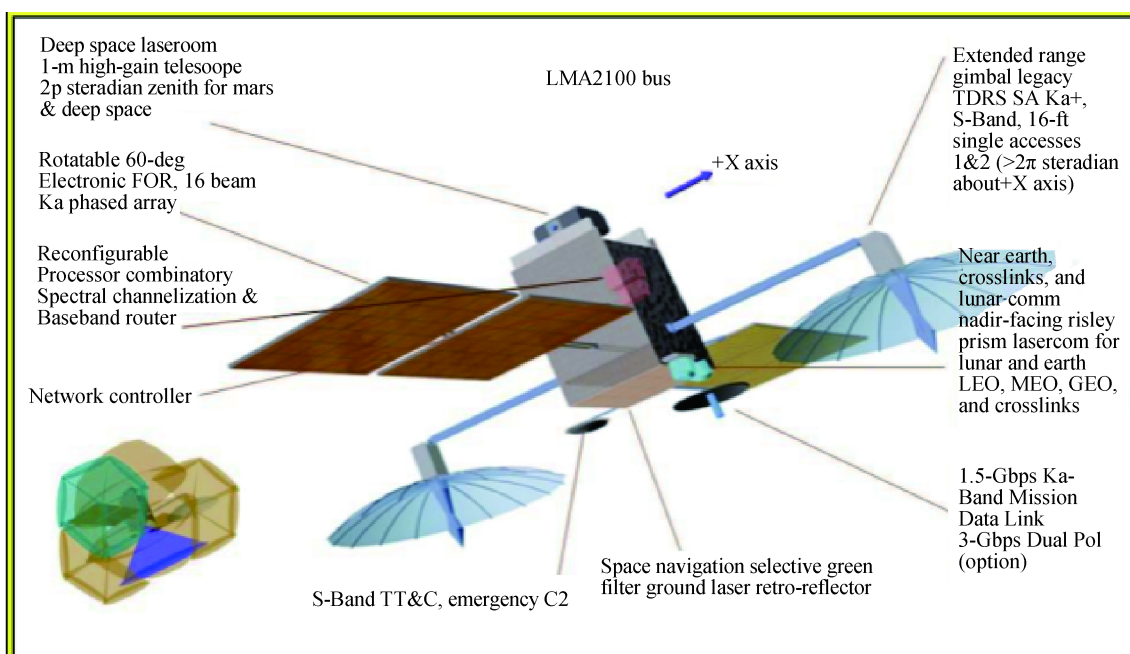


图 15 NASA 超地球同步静止轨道中继概念<sup>[27]</sup>

Fig.15 NASA super-geosynchronous geostationary relay concept<sup>[27]</sup>

但这种空间配置的光通信系统成本十分昂贵,并且极易发生单点故障,从而导致系统失效或系统可用度急剧降低。因此,只有类似载人火星探测这种需要长期支持的任务或者存在长期多深空任务支持需求的航天机构,构建高可靠、多节点的天基光通信中继系统采更有实际意义。从目前 NASA 在执行的《空间通信与导航网络 (SCaN) 体系架构定义文件 (ADD),第 1 卷:执行摘要》<sup>[28]</sup> 所给出的 2025 年空间通信与导航网络体系架构中,就包含了月球轨道和火星轨道以及深空探测器到地球轨道和地面的光通信链路,见图 16。

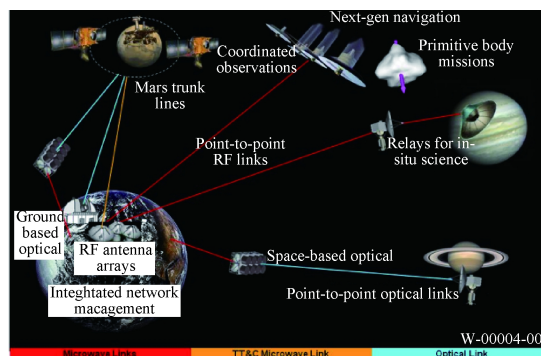


图 16 NASA SCaN 未来增强的深空任务支持<sup>[28]</sup>

Fig.16 NASA SCaN enhanced deep space domain capabilities<sup>[28]</sup>

### 3.4 认知空间通信网络

空间通信领域的认知网络概念是近几年兴起的一个新的技术方向。主要是面向未来空间通信所呈现的同时多任务流和网络化的发展趋势, 认知系统可以优化整个空间通信网络的性能, 改善任务航天器和空间通信基础设施之间的交互。随着系统自主性的增强, 任务航天器可以根据当前的数据传输需求协商访问通信服务。通过将人工智能和认知无线电技术集成到空间通信网络中, 将提高空间通信系统的效率、自主性和可靠性。

自适应无线电软件可以规避空间天气的有害影响, 增加科学和探索数据的返回。认知无线网络也可以建议与地面通信的备用数据路径。这些过程可以同时通过多条路径对数据进行优先排序和路由, 以避免干扰。认知无线电的人工智能也可以提前几个小时分配地面站下行链路, 而不是几周, 从而提高调度效率。此外, 认知无线电还可以通过减少对人工干预的需求来提高通信网络的运行效率。认知网络的概念如图 17 所示, 其所涉及的相关技术包括网络感知: (1) 综合的地面天气传感器; (2) 基于预测性能的动态链路切换; (3) 地面数据通信的自动化路由选择和融合。其他认知技术还包括: (1) 自适应编码调制; (2) 实现自配置的链路; (3) 基于可靠性的设施分配; (4) 认知安全综合<sup>[29]</sup>。

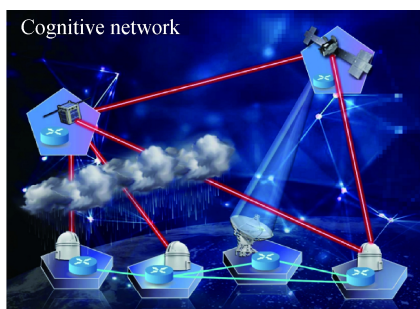


图 17 NASA 空间通信认知网络示意图<sup>[29]</sup>

Fig.17 Schematic diagram of NASA space communications cognitive network<sup>[29]</sup>

NASA SCaN 正在组织进行的认知通信技术研究就明确提出其目标就是通过增加链接、网络和服务调度的自主性来减轻任务用户日益增加的通信复杂性; 通过自动化技术, 包括人工智能和机器学习的最新成果、认知算法和相关方法可以增加任务的科学数据返

回量, 提高空间通信网络的资源利用率, 以及在不可预测或意外环境中的灵活性<sup>[30]</sup>。

对于深空光通信的应用而言, 通过认知网络可以实现深空航天器对地通信的过程中, 优化传输路径, 实现最优的数据传输效率, 即在码速率、调制方式、射频/光学路径选择等方面实现基于智能的最优化选择, 从而最大化实现深空光通信的优势, 降低其应用的风险。

## 4 我国深空测控光通信应用展望

我国深空测控网的光通信技术应用应该是非常有前景的, 随着我国月球和深空探测工程的不断推进, 载人月球探测任务也逐步提上议事日程, 对于高速数据通信的需求也越来越迫切。

从我国航天工程的实践经验来看, 特别是我国深空测控网的建设发展历程来看, 深空光通信应用的最佳技术路线应该是一个循序渐进的过程, 即先开展技术验证、再分步进行系统建设、分阶段开展工程应用, 最后进入全面应用阶段。

### 4.1 深空光通信技术验证

我国探月工程四期已经计划开展地月激光通信技术验证试验。在这个阶段, 通常依托国内现有的地面光学系统, 比如中国科学院系统所属的光学望远镜, 经过适应性改造后, 使其具备光学通信的能力。该阶段的主要任务是验证星上光通信终端所涉及的核心关键技术, 在地月空间开展工程应用可行性的验证。

由于该阶段只是技术验证, 其试验时间是可以根据任务实施的具体情况和地面系统所处的地理位置来合理安排的, 没有严格的任务约束和可靠性要求。因此, 该阶段地面不存在大规模地面系统建设。

### 4.2 深空光通信地面系统

从前面的技术途径分析不难看出, 从地缘和外交视角, 我国无法建设全球布局的高可用度深空光通信地面系统。那么未来我国的深空光通信系统应该是一个地基和天基相结合的混合系统。

这个系统在布局上, 首先应考虑尽量利用全球可用的地理位置, 主要包括墨西哥西部的下加州半岛、智利北部、非洲西南部 (南非和纳米比亚)、非洲西北部 (加那利群岛、摩洛哥、阿尔及利亚等)、西亚阿拉伯半岛和巴基斯坦等地区, 建设 5 套左右的地基 10 m

左右孔径光学系统。此外,还可以考虑在国内的青藏高原和云贵高原选址建设 2 套地基 10 m 左右孔径光学系统,来扩大覆盖范围(尽管这些地区的条件并非最优)。而处于国内站址和美洲站址之间的无覆盖区域只能考虑由天基系统来弥补。

同时可综合利用喀什深空站和阿根廷深空站的 35 m 口径测控天线构建等效光学孔径 6~8 m 的射频/光学混合系统,如图 18 所示。并通过多天线进行组阵进一步增大地面的等效光学孔径达到 12~16 m,以弥补气象因素的影响。这两个深空站的混合系统从建设难度和投资强度上看,更适合于初期地面系统的建设,也可以与专用的 10 m 口径光学地面站互为气象备份,从而提升全系统的可用度。

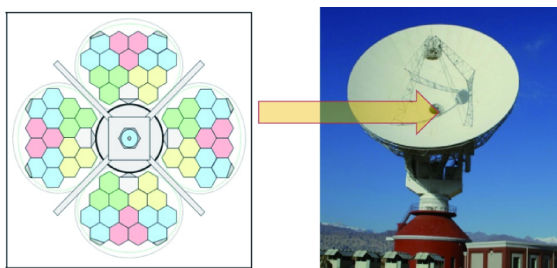


图 18 依托 35 m 深空测控天线构建射频/光学混合系统示意图<sup>[6]</sup>

Fig.18 Schematic diagram of 35 m deep space RF/optical hybrid system<sup>[6]</sup>

设想的未来我国深空光通信地面站系统(包括射频/光学混合系统站)总体布局如图 19 所示。

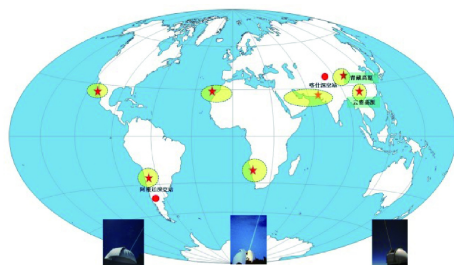


图 19 潜在深空光通信可选地面站址的分布示意图

Fig.19 Distribution of potential deep space optical communication ground sites

### 4.3 天基深空光通信系统

我国天基深空光通信系统的构建应与未来的第三代或第四代地球轨道数据中继卫星相结合,布设在太平洋上空的同步静止轨道上,系统配置宜采用 1~2 m 孔径的光学系统对深空通信目标,且具有星间光通信

链路,至少应具备支持月球和火星任务光通信的能力。这样来自深空的光通信数据经过太平洋上空的中继卫星间光学链路就可以传送到定点在我国大陆上空的中继卫星,再转换成 Ka 频段射频链路传送到地面。

未来还可以结合载人月球和火星探测任务的需求,逐步补充具备支持深空光通信能力的中继卫星数量,最终建成可实现连续覆盖的天基深空光通信系统。通过将人工智能技术和认知技术应用到链路性能优化、路由优化选择和资源自动调配等方面,最终形成我国完全自主的深空光通信认知网络,能够克服不利气象条件影响,以最优的性能支持我国月球和深空探测任务。

## 5 结束语

深空光通信技术具有独特的技术优势,能够满足以载人月球和深空探测任务为代表深空高速数据传输需求。天地基相结合的智能网络化光通信系统的可用度高、运用灵活,是未来我国建设深空光通信系统可行的途径。考虑到这种系统的复杂性和建设代价,应该从顶层做好我国的空间通信网络体系规划,将深空光通信系统融入其中,发挥最大效能。

### 参考文献:

- [1] Recommendations for Space Data System Standards CCSDS 401.0-B Radio Frequency and Modulation Systems-PART 1 Earthstations and Spacecraft[M]. UK:Consultative Committee for Space Data Systems, 2018.
- [2] Wu Weiren. Deep space exploration and deep space TT&C communication technology[C]//19th Annual Conference of Deep Space Exploration Technology Committee of Chinese Astronautical Society, 2019. (in Chinese)
- [3] Li Haitao. Principles and Design Methods of Deep Space TT&C System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014. (in Chinese)
- [4] Coverage of spacecraft at different orbital altitudes by NASA's deep space network[EB/OL]. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d1/DSNview.png>.
- [5] Li Haitao, Wang Hong, Dong Guangliang. Analysis of latitude selection of deep space station site [J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2009, 28(1): 1-6. (in Chinese)
- [6] Wu Weiren, Li Haitao, Li Zan, et al. Status and prospect of

- China's Deep Space TT&C Network [J]. *Scientia Sinica Informations*, 2020, 50(1): 87–108. (in Chinese)
- [7] Schier J S, John J R, Williams W D, et al. Space communication architecture supporting exploration and science: Plans and Studies for 2010-2030[C]// 1st Space Exploration Con, Continuing the Voyage of Discovery, 2005, 1: 2005–2517.
- [8] Williams W D, Michael Boroson, Don M L, et al. RF and optical communications: A comparison of high data rate returns from deep space in the 2020 timeframe[C]//Presented at the 12th Ka and Broad Band Commun. Conf, 2006: 27–29.
- [9] Hemmati H. Deep Space Optical Communications[M]. New York: Wiley, 2006.
- [10] Boone B G, Bruzzi J R, Bernard E K. Optical communications development for spacecraft applications [J]. *John Hopkins APL Tech*, 2004, 25(4): 306–315.
- [11] Dong Guangliang, Li Guomin, Wang Xinyong. China Deep Space Network: System Design and Key Technology (middle) S/X/Ka Band Deep Space TT&C System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)
- [12] Li Haitao. Development history and future prospect of China Deep Space TT&C Network[C]//2018, the 15th Annual Conference of Deep Space Exploration Technology Committee of Chinese Astronautical Society, 2018. (in Chinese)
- [13] Joseph W R, Jason A Z, Philip R, et al. Jet Propulsion Laboratory, JPL Strategic Technology Directions 2009[M]. US:Hydorgen Storge Engineering, Center of Excellenc, 2010: 28–29.
- [14] Cesarone R J, Abrahams D S, Shambayati S, et al. Deep space communications, visions trends and prospects[C]//2011 International Conference on Space Optical Systems and Applications, 2011: 412–425.
- [15] Hemmati H, Wilson K, Sue M K, et al. Comparative study of optical and radio-frequency communication systems for a deep-space mission[C]//The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report, 1997: 1–33.
- [16] Deep Space Communications Profile of Deep Space Communications Capability[EB/OL]. <https://descanso.jpl.nasa.gov/performmetrics/stairstep.pdf>
- [17] Barry Geldzahler, Les Deutsch. Future Plans for the Deep Space Network (DSN)[M]. US: Deep Space Network Space Communications and Navigation Office National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2009.
- [18] Franz J H, Jain V K. Optical Communications: Components and Systems[M]. Boca Raton: Narosa Publishing House, 2000.
- [19] Hamid Hemmati, Ivan B. Djordjevic. Deep-space optical communications: future perspectives and applications[C]// Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 2020–2039.
- [20] Space Communication Architecture Working Group (SCAWG). NASA Space Communication and Navigation Architecture Recommendations for 2005–2030[M].US: NANS, 2006.
- [21] H Hemmati. Deep Space Optical Communication[M]. Wang Ping , Sun Wei, translated. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [22] Map of global annual afternoon cloudiness derived from observations from the aqua satellite between 2002 and 2015[EB/OL]. <http://eclipsophile.com/wp-content/uploads/2016/01/Annual-Aqua-PM-globe.png>
- [23] Leslie J Deutsch. Toward a NASA deep space optical communications system[C]//2018 Space Ops Conference, 2018.
- [24] Troy M T. RF/Optical Hybrid Antenna[D]. US: The Interplanetary Network Progress Report, 2015.
- [25] Hurd W J, MacNeal B E, Gerardo G O, et al. Exo-atmospheric telescopes for deep space optical communications[C]//2006 IEEE Aerospace Conference, 2006.
- [26] Edwards B L, Liebrecht P E, Fitzgerald R J. Architectural options for a future deep space optical communications network[C]//Space OPS 2004 Conference, 2004.
- [27] Eric G B, Liang Chu, Julie L M. An enhanced architecture for the Next-Generation NASA SCaN study[C]//34th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2016.
- [28] Younes B A , Schier J S. Space Communications and Navigation (SCaN) Network Architecture Definition Document (ADD) Volume 1: Executive Summary[M]. US: NASA Headquarters, 2019.
- [29] Phil Liebrecht. SCaN next generation communications capabilities a beacon of light into NASA's future[C]//National Space-Based Positioning, Navigation, and Timing Advisory Board 19th Meeting, 2017.
- [30] Space Communications and Navigation Program——Cognitive Communications (Active Technology Project) [EB/OL]. [https://www.nasa.gov/multimedia/3d\\_resources/spacecomm.html](https://www.nasa.gov/multimedia/3d_resources/spacecomm.html).