



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

ssv技术及地月空间导航

第五组成员：
陆秋佚
孙凯旋
王琪琛
姜明奇

2024年11月25日



CONTENTS 目录

- 1 ssv技术
- 2 地月空间导航
- 3 展望与应用



0 ssv技术

1

1

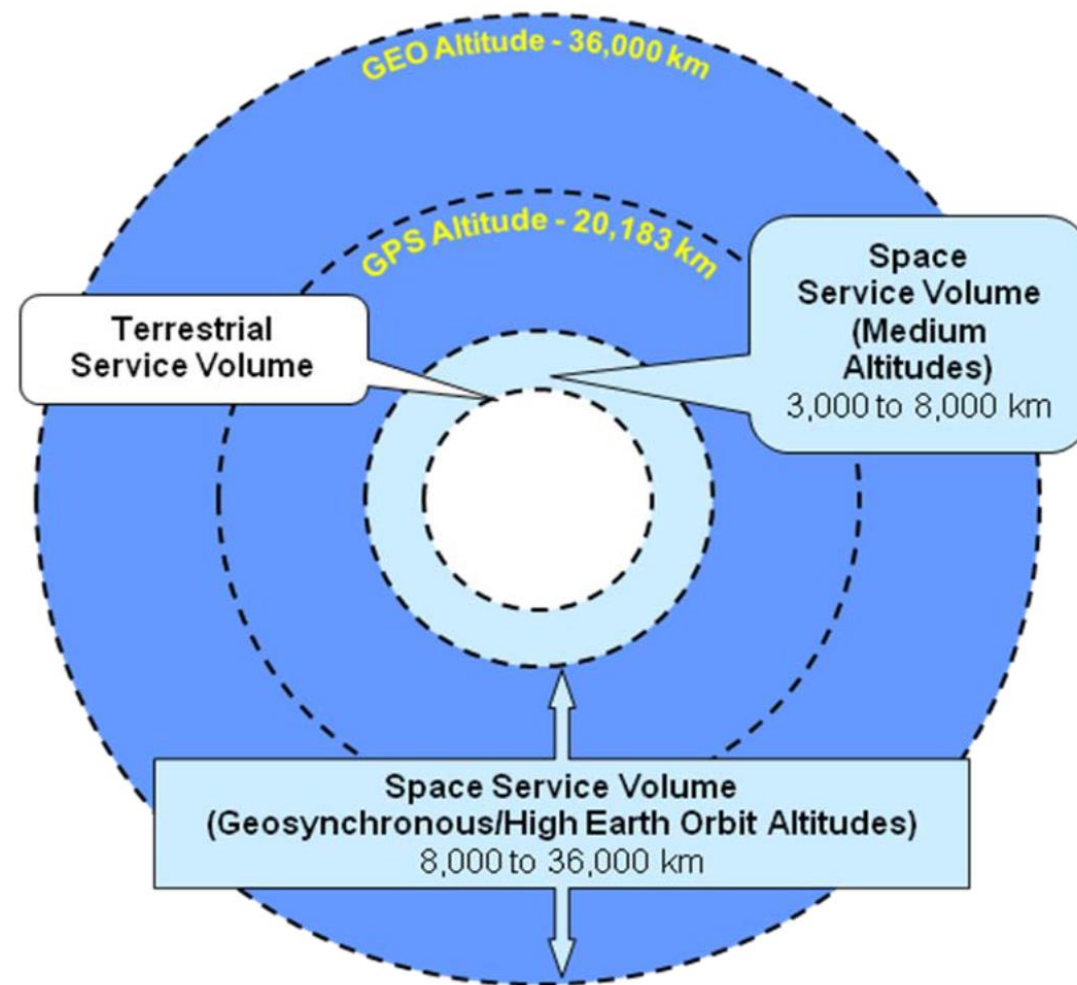
现今，卫星导航为在更广阔的领域和更立体的维度上满足广大用户的应用需求而不断发展。虽然卫星导航的建设和维护成本高昂，但通过兼容更多功能、服务更广泛的用户群体，可以最大限度地挖掘其潜在价值并平衡投入成本。这不仅大幅减轻了地面测量站和远洋测量船的工作负担，还充分发挥了卫星导航的服务能力。与此同时，随着当前及未来飞行任务向外层空间不断拓展，对中高轨道乃至深空探测器的导航需求日益迫切，使得卫星导航在中高轨道的应用愈发重要。

虽然GNSS的额定设计用户是地面及近地面用户，不过其星座布局和发射天线辐射特性决定了它可以在不影响“本职”任务的基础上，顺带为中高轨道用户提供便利。具体而言主要是，发射天线所辐射的一部分射频信号会**绕过地球本体穿越到地球对侧**而被对侧的在轨飞行器接收到。并且大量文献与飞行测试实验已经证明，导航卫星完全可以对外太空飞行器提供**定轨、定姿、时间同步**以及**相对导航**等一系列服务。



1

按空间高度对 GPS 定位、导航与授时服务进行划分的概念，很早就被美国提出了。但真正使得 SSV 变得广为人知的标志还要追溯到 2011 年 9 月在东京召开的 ICG 第六次大会 (ICG-6) 上，当时 James J. Miller 等分析了 GPS/GNSS SSV (Space Service Volume) 的概况，指出逐渐增多的未来太空任务要求卫星导航系统能够在 3000km—36000km 的高度范围内提供 PNT 服务。整个 GPS Service Volume 按离地面的高度划分为三部分：TSV、SSV Median Altitudes 和 SSV GSO/HEO Altitudes。其中 TSV 涉及 3000km 以下高度轨道（包括大多数 LEO）上的导航性能，SSV Median Altitudes 覆盖 3000km 至 8000km 高度，特点是用户接收机既有**天顶**方向的可见卫星又有**天底**方向的可见卫星，而覆盖 8000km 到 36000km 高度的 SSV GSO/HEO Altitudes 的用户几乎只能接收到来自于**天底**方向的卫星信号。GPS 对其服务空域的划分详见右图：

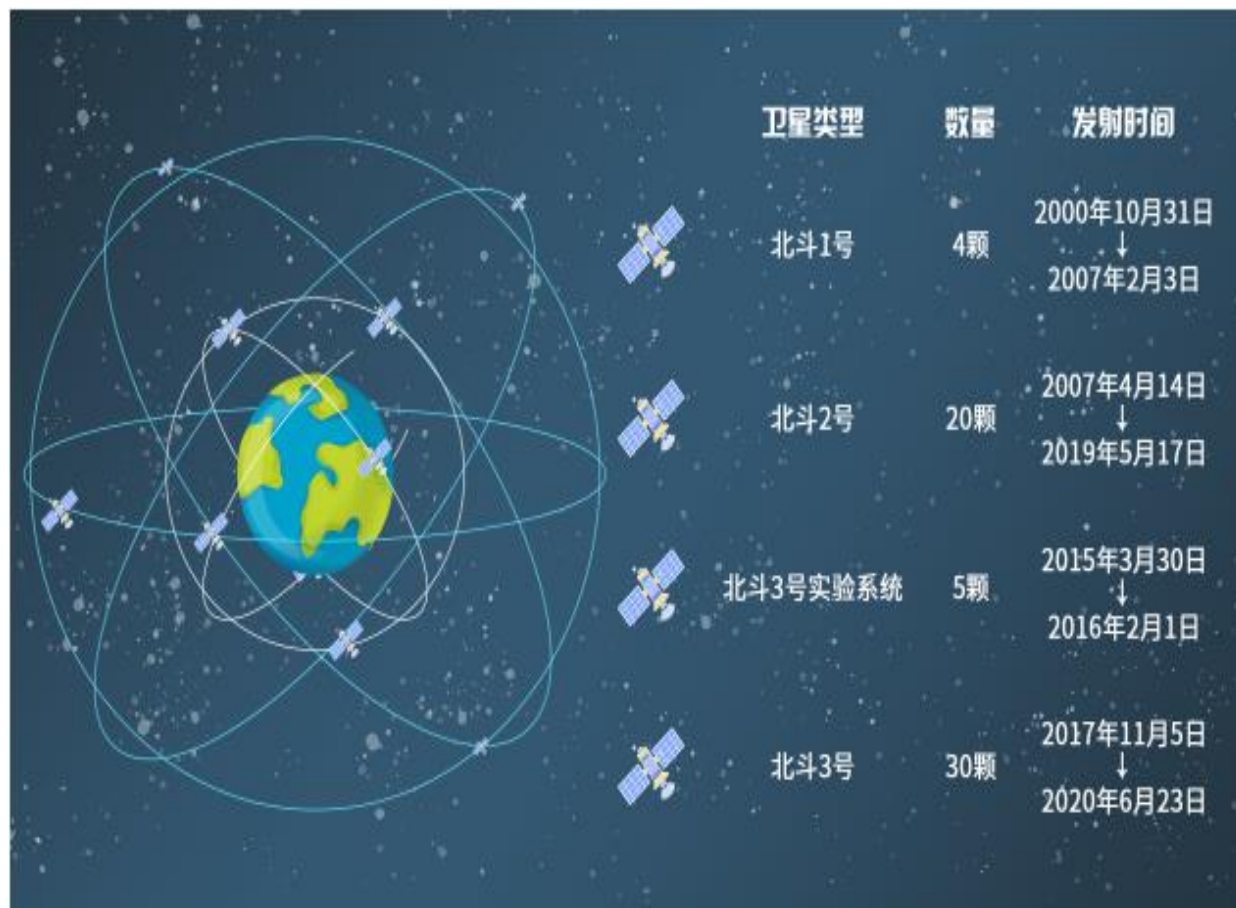


1

因为第一代和第二代的 GPS 原本为TSV 用户设计，所以 GPS-I 和 GPS-II 均未明确声明对 SSV 用户的覆盖服务能力，所以针对 SSV 用户服务性能的承诺一直是以 GPS-III 为实现目标的。得益于美国**航空宇航局**（NASA）**戈达德航天中心**

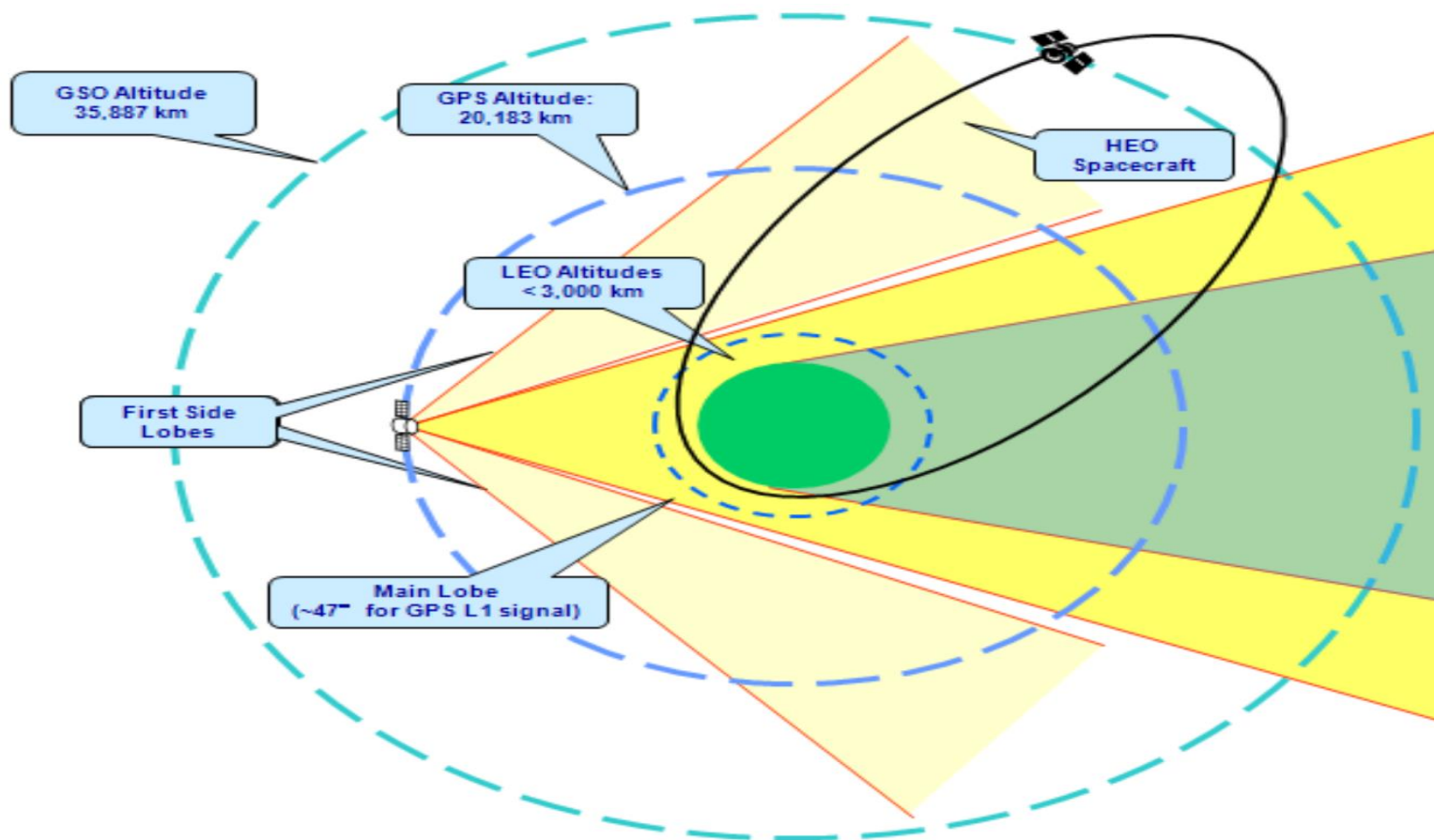
（GSFC）团队成员的积极宣讲与 ICG “GNSS性能提升，新服务与新能力”工作组的持续推进，目前 SSV 的概念基本上为广大卫星导航业内人士接受并熟知。与 GPS 所面临的状态一样，其他全球系统（GLONASS, Galileo 和北斗）和区域系统

（QZSS 和 IRNSS），都未在其原有设计中考虑兼顾SSV 的服务能力，因此各家承诺会在下一代的系统设计中尽可能地考虑各自系统的 SSV 服务性能。以**中国卫星导航管理办公室**（CSNO）为例，**北斗**系统已经按计划在2020年完成了组网的全球系统，并成功地提高了其SSV（假设为系统服务性能）等关键性能指标，为全球用户提供了更加可靠、高效的卫星导航服务。



1

狭义上的 SSV 问题可理解为：如何利用 GNSS 信号来保证中高轨道在轨飞行器的导航精度在要求的范围内。在这层意义下，SSV 反映的是：GNSS 在多大程度上能够满足 TSV 到地球同步轨道高度之间的用户的定轨要求。SSV 接收 GNSS 信号的几何示意图如下所示：



1

广义的SSV 是一个与中高轨 PNT (positing, navigating, timing) 服务相关的统一整体, 这表现在以下多个方面:

轨道高度范围不再局限于 3000km 到 36000km 的空间, 而是包含近地点在 3000km 以下的 HEO、GTO 飞行任务甚至利用地球对侧信号的 LEO 任务, 还包括 **36000km 以上**的其他天体的入射轨道和返回轨道;

导航所采用的传感器不再局限于 GNSS, 因为惯性导航器件基本是飞行器载体 的必备载荷之一, 所以 GNSS 与 INS 的组合方式是必然存在的一种选择; 此外 GNSS 与星敏感器组合的脉冲星导航, GNSS 与磁力计组合的地磁导航等等都 在广义 SSV 的范畴之内;

核心问题不仅仅局限于航天器 PNT 服务, 而是综合了所有与完成 PNT 服务相关的技术环节, 从收发天线装备设计到信号处理, 从性能评价到服务标准制定, 从算法优化到工程实现的方方面面都涵盖进来, 形成一项综合性的**系统工程**。

01 SSV的发展历程

空间服务空域这一概念最初是在 2000 年 2 月由 GPS 运行需求文档 ORD (Operational Requirements Document) 首次提出的。

2002 年 GPS 官方定义了 SSV 特征, 并于 2004 年将这一定义扩展到中地球轨道和非赤道平面轨道用户的导航问题当中。

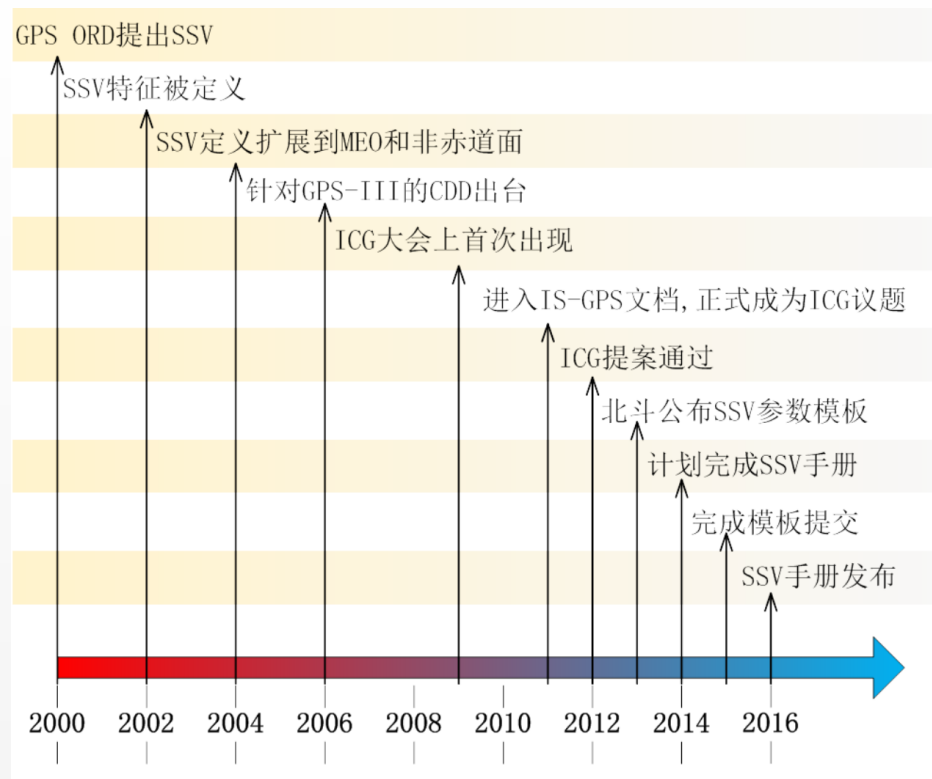
2006 年 9 月在美国导航学会 (ION) 会议上更新了 SSV 的定义和需求, 同年建立了针对 GPS III 的性能描述文档 CDD (Capability Description Document)。

2011 年 9 月 GPS 在接口规范 IS-GPS-200F 中正式加入了对 SSV 用户信号水平的说明, 明确了 SSV 用户对 L1/L2 信号的最小接收功率。

在 2012 年 11 月 ICG 第七届大会 (ICG-7) 上, 通过了 “GNSS 空间服务空域” 提案, 建议 ICG 关注 GNSS 的空间服务空域互操作的重要价值。

2013 年 11 月 ICG 第八届大会 (ICG-8) 中, 中方作了题为 “北斗空间服务空域参数与性能分析” 的报告, 展示了北斗在中高轨道应用中的优势, 表达了北斗积极推进 SSV 服务互操作的意愿。

2014 年 11 月 ICG 第九次大会 (ICG-9) 上, B 组计划完成《SSV 手册》, 2015 年 11 月 ICG 第十次大会 (ICG-10), 美、俄、中、欧、日、印均已提交各自系统的 SSV 性能模板。2016 年 11 月 ICG 第十一次大会 (ICG-11) 上, 各方以联合报告的形式对外发布了《互操作 SSV 手册》(V1.0)。



01 空间服务空域研究现状

SSV 用户所面临的信号是复杂多样的，根本特征归结为三个方面

远近效应



远近效应是通信领域常见的信号处理难题，它在 SSV 中表现为中高轨用户同一时刻接收到强弱功率悬殊的多个信号，导致弱信号完全淹没在强信号中而无法被检测到。

远近效应

• CDMA是一个自干扰系统，如果没有功控机制容易导致“远近效应”

一个UE
就能阻
塞整个
小区



信号被离基站
近的UE的信号
“淹没”，无
法通信

掩星现象



掩星现象是由特殊的观测条件造成的一种射频信号在密度不同的介质中传播而出现的路径弯折现象，因为电离层存在于60km~1000km高度上，恰好对穿越电离层传播到地球另一侧的一部分信号产生作用，而这部分信号又是 SSV 用户能够利用的，所以掩星观测对SSV是至关重要的，它一方面略微提高了SSV的信号可用性，另一方面又引入了电离层延迟使得测距精度下降。

低功率高动态共存



低功率、高动态往往是此消彼长的关系，对只受万有引力的SSV应用来说，**低轨航**天器接收到信号具有**高动态**和**相对较高的功率**，**高轨航**天器接收到的信号具有**低动态**和**相对较低的功率**，但在高轨航天器处于变轨状态时，确实会出现**低功率和高动态**共存的现象，给信号捕获跟踪带来更大的难度。



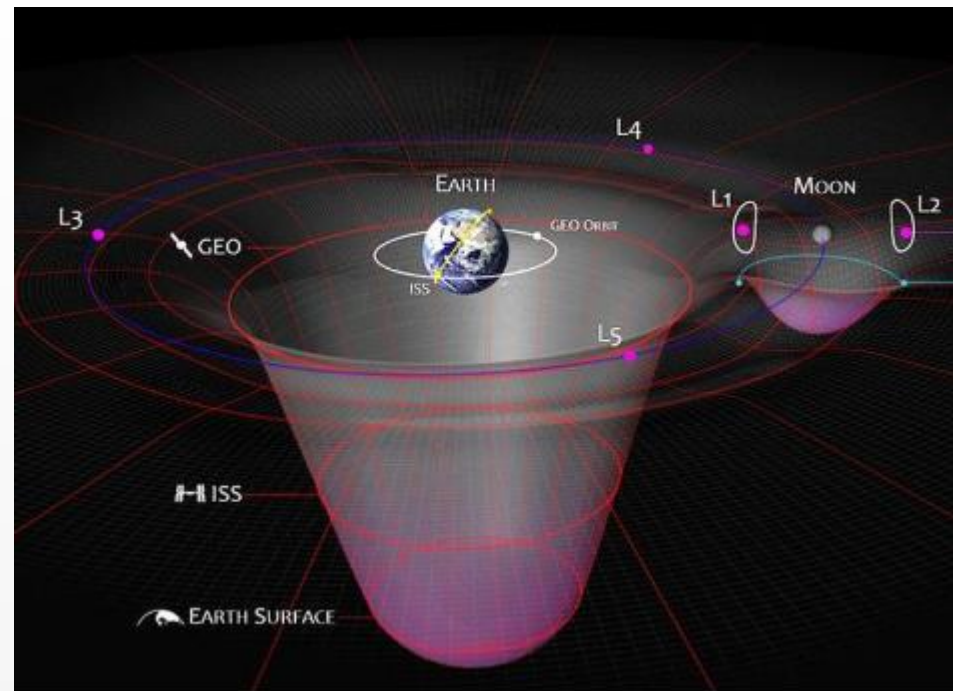
0 地月空间导航

2

02 地月空间导航研究背景

“地月空间”（Cislunar Space）一般指以**地球和月球引力为主导的区域**，主要由**近地空间、月球引力空间和地月转移空间**组成。地月空间中存在各类物质、能源、环境和位置等稀缺战略资源，是未来人类生存与发展的重要战略空间，已经取代近地空间成为新的制高点，成为世界航天大国竞相角逐的新疆域。

月球导航是月球探测“去、落、回”成功的前提，为环月飞行、月球轨道交会 对接远程引导、进入、下降及着陆、月面移动行走等各阶段月球任务提供必要支持和技术保障，具有重要的研究意义。未来的月球探测任务主要集中于载人登月和月球科学探测，相比于前期探测任务，**载人登月**任务需要重点考虑精确可靠到达、着陆月球并安全起飞返回地球，以月球资源开发、极区探测为目标的探月四期任务向“深度、精细化探测”转变。以上任务特点对导航的精度、自主性、连续性、实时性等方面提出了更高的要求。



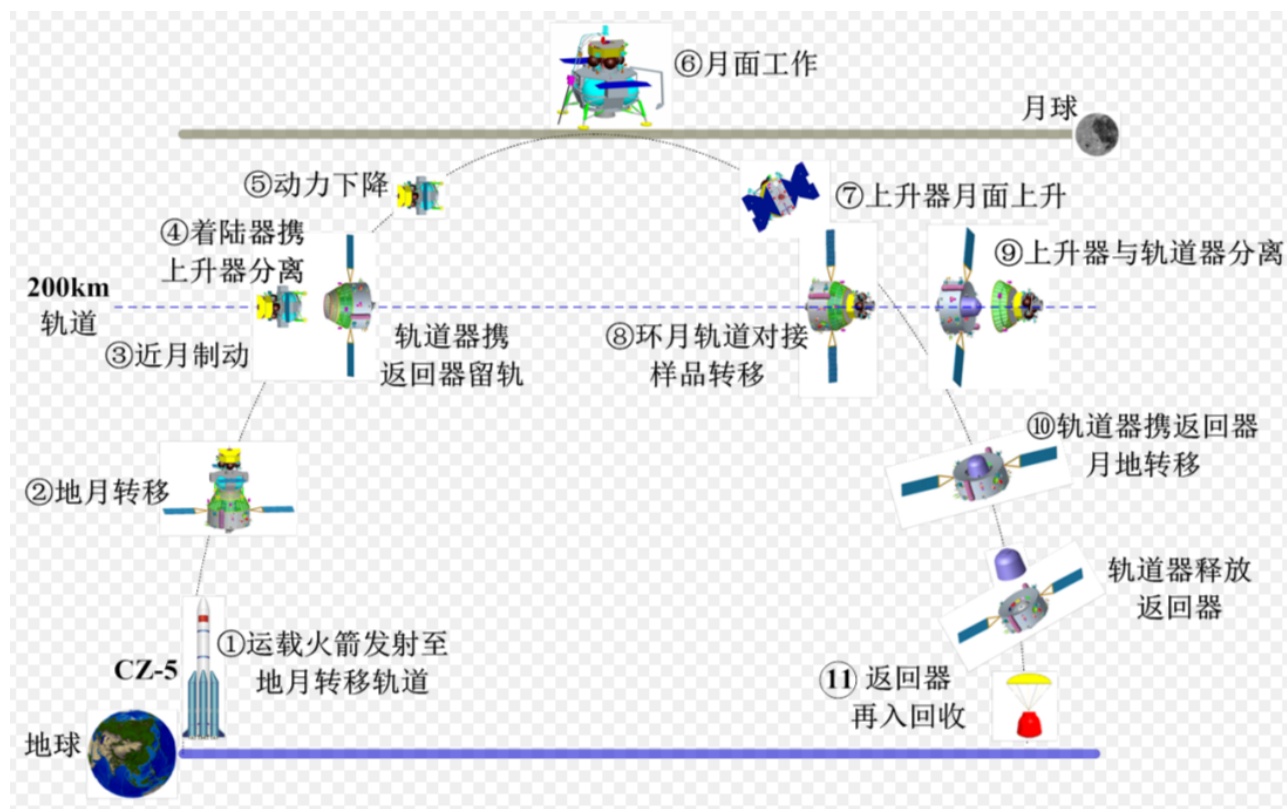
02 地月空间导航系统

地月空间导航系统能够为更多月面及近月面用户提供**更丰富、更高性能**的导航服务。构建环月圆轨道导航星座是满足月面及近月面用户导航定位需求的优选项，有研究表明通过 **11 颗**绕月卫星能够满足基本满足导航应用需求。2022 年 6月28日，全球首次地月空间立方星任务-“地月自主定位系统技术操作与导航实验”（CAPSTONE）航天器发射，其演示验证了不依赖地面跟踪技术使航天器确定其相对于月球位置的新型导航技术。NASA 希望建立能够在 CAPSTONE 和月 球勘测轨道飞行器（Lunar Reconnaissance Orbiter，LRO）之间进行导航和通信的系统。有研究表明，向**地月拉格朗日点附近发射4颗卫星**能够为航天器提供优于几十米精度的导航定位服务。通过星间测距建立地月空间导航系统的时空基准， 还可通过GNSS星间链路实现高精度时空基准建立与维持。



2 惯性导航及组合导航

惯性导航是目前地月空间航天器动力飞行段的主要导航方式，具有短时定位、测速精度高、不易受外界干扰等诸多优点，但由于惯性导航**受限于漂移误差的影响**，需要依靠其他测量系统进行周期性的漂移修正。地月空间自主导航路径上环境多变，航天器会经历不同飞行任务阶段，采用单一导航方法常常无法满足任务需求，通过几种导航方法搭配构成**多源信息源融合**组合导航系统能更好地应对地月空间中的突发状况，在地月空间导航策略中基于惯性器件的组合导航方法应用潜力巨大。在水手号、嫦娥五号等航天器的巡航段和进近段自主导航任务中惯性/天文组合方法得到应用。在美国的 Surveyor 任务、中国的嫦娥四号和五号软着陆任务中惯性/测距 /测速组合方法得到成功运用，高度测量精度达到分米级，速度测量精度达到分米/秒。在航天器交会对接阶段常采用**惯性/雷达/视觉相对测量**组合方法。



GNSS旁瓣信号导航

GNSS 主要为地球表面以及近地空间的用户提供导航定位及授时能力，地月空间航天器高度低于6000km时，GNSS 接收机主要接收主瓣信号，高度超过6000km时，GNSS 接收机接收到的主要是旁瓣信号。GNSS 旁瓣信号导航具有信号能量小、可视卫星数目少、精度因子（DOP）差、信号动态大等特点。随着地月空间活动的不断拓展，地基测量方法开始逐步往天基测量方法发展，出现了 GNSS 旁瓣信号导航和基于星间测距技术的导航方法。近年来，随着 GNSS 在高轨道应用验证和推广，利用 GNSS支持地月空间航天器自主导航已成为国内外研究的热点。

美国在新月球导航与通信系统架构中采用了地基和基于GNSS的天基测量融合方法。

美国深空门户任务计划在地月拉格朗日 L2 点上通过 GNSS 信号开展导航应用。

2014 年，我国在探月工程三期上开展了 GNSS 导航技术试验，接收到了距离地心10000km 到 60000km 的观测数据并成功获得了100m 的实时定位结果。

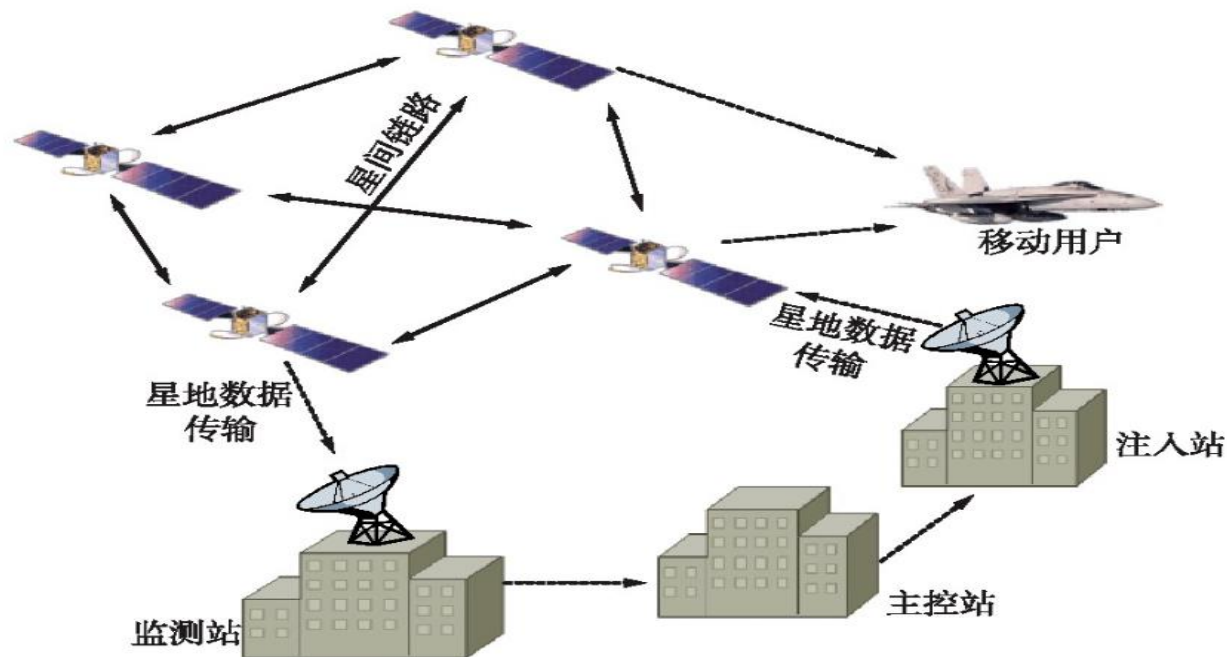
国外研制的超高灵敏度GNSS接收机能够接收200000km远的GNSS主瓣信号以及100000km远的GNSS旁瓣信号。

欧洲航天局的月球 GNSS 项目考虑通过 GNSS 系统开展月球探测导航任务。

2020 年，嫦娥五号探测器上也开展了GNSS导航试验。

2 星间测量导航

星间测量导航具有**自主性高、精度高等优势**，可分为**星间辐射跟踪、星间光子观测和量子定位**等方法。联动自主星际卫星轨道导航（Linked Autonomous Interplanetary Satellite Orbit Navigation, LiAISON）方法能够确定两个及以上航天器的相对或绝对轨道信息。美国Artemis 任务的验证星CAPSTONE 已经实际开展了LiAISON 导航技术验证试验，该方法在地月空间航天器自主导航中有重要应用潜力。



02 地球GNSS应用于地月空间导航的优势及局限性

近几年，各研究机构发现了GNSS应用于地月空间的优势，但GNSS也存在一定的局限性

优势

VS

局限性

全球导航卫星系统（Global Navigation Satellite System, GNSS）利用测距和计时实现天基无线电定位、导航和授时（positioning, navigation and timing, PNT）功能，可以通过接收GNSS天线旁瓣信号实现对月球用户的实时定位和时间同步。近几年，GNSS在实时获取月球航天器的位置、速度和时间信息方面的优势被国内外各研究机构识别，纷纷开展了GNSS应用于月球导航服务的研究。地球GNSS系统具备全天候提供精确的三维位置、三维速度和时间信息的能力。虽然GNSS系统主要针对地面或低空用户设计，但通过**接收GNSS漏信号同样可以实现对高轨及地月空间用户的实时定位和时间同步**，即GNSS空间服务段（space service volume, SSV）服务。

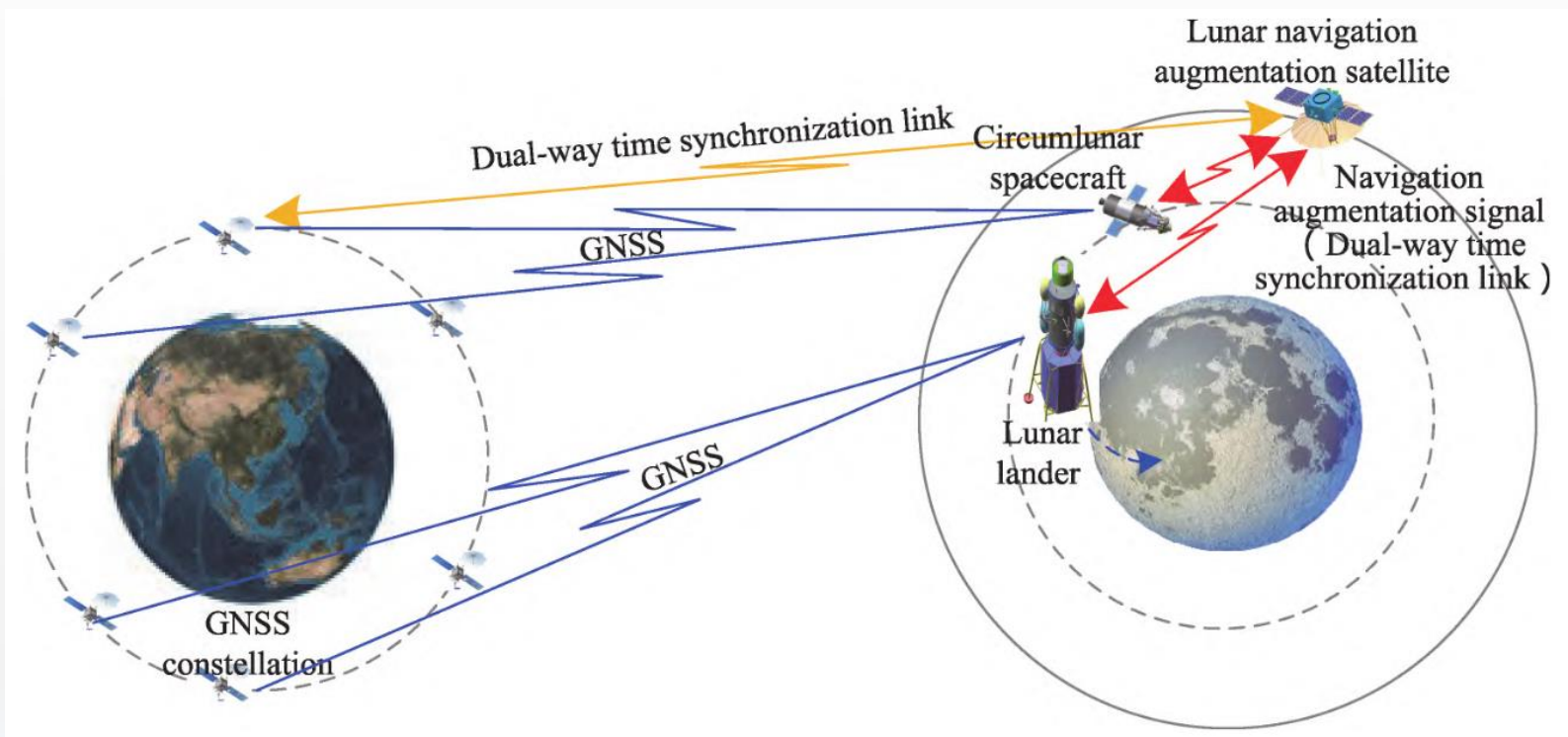
尽管地球GNSS信号具备支持地月空间飞行器导航的能力，但其**定位精度随着距地球距离的增加逐渐恶化**，到40万千米的位置单历元导航精度接近1000m。导致其精度恶化主要有两方面的原因：

空间距离远，链路衰减大，且GNSS主瓣信号大部分被地球遮挡，可接收到的导航信号来自于GNSS发射天线旁瓣。旁瓣信号相比于主瓣弱15~30dB，单北斗系统在20万千米以上时就进入临界点，定位精度急剧恶化，可见星可能不足4颗，大多数时段可能无法定位，需要多系统联合才能输出定位结果。

GNSS卫星空间分布相对于地月空间飞行器的观测几何差，可见卫星主要位于天顶区域，造成较大的定位误差。

02 基于地球GNSS和导航增强星的地月空间导航方案

针对**地球GNSS应用在地月空间定位性能恶化**的问题，通过**在环月轨道布设一颗地月空间导航增强星**，联合地球GNSS对月球用户进行实时导航定位。月球用户在接收地球GNSS漏信号和月球导航增强星测量信号的同时，建立地球GNSS与月球导航增强星、以及月球导航增强星与月球用户之间的双向时间比对链路，采用**无源和有源融合定位**的方式，为月球空间用户提供PNT服务。基于地球GNSS和导航增强星的地月空间导航系统组成如下图所示，主要包括地球空间段、月球空间段和用户段。地球空间段包括地球GNSS星座，月球空间段为环月轨道导航增强星，用户段由月球各类用户航天器组成，包括环月卫星、月面着陆和上升器、月球车和月面行走航天员等。



02 基于地球GNSS和导航增强星的地月空间导航方案

地月空间导航系统的导航定位方案具体可描述为：

月球导航增强星自主播发类GNSS的测量信号，通过增加月球空间的导航节点，改善月球用户的PDOP值，提升导航定位精度；

月球导航增强星分别建立与地球GNSS和月球用户的双向时间同步链路，进一步实现用户与GNSS的时间同步，获得用户与导航基准之间的钟差，解决无源导航定位中位置误差与钟差无法解耦的问题，进一步改善月球用户的观测几何，提高实时定位的精度；

接收通过月地双向链路播发的GNSS高精度星历产品，向月球用户广播；

同时支持为月球空间多用户提供实时双向测量与数据交换服务，实现导航与通信的融合。



0 展望与应用

3

提升定位精度：随着GNSS技术的发展，SSV技术有望通过**优化算法、增强信号接收和处理能力等方式**，进一步提升高轨及地月空间用户的定位精度。例如：通过**增加导航节点、优化导航卫星布局**等手段，可以改善用户的**观测几何**，从而减小定位误差。

实现时间同步与授时：SSV技术还可以为地月空间内的航天器提供**时间同步与授时服务**。通过建立**双向时间同步链路**，SSV技术可以确保航天器与地球之间的时间**保持高度一致**，为航天器的精确导航和定位提供时间基准。同时，时间同步服务还可以为航天器的科学实验、数据传输等提供精确的时间戳，确保数据的准确性和可靠性。

ssv技术在地月空间导航中的应用

1

2

3

5

4

增强信号可用性：在地月空间，由于**距离地球较远**，传统的GNSS信号可能会受到**干扰或衰减**。SSV技术通过优化信号接收和处理能力，如采用**高增益天线、增强信号发射功率、优化信号编码和调制方式等**，可以提高信号的**可用性和稳定性**，确保航天器能够持续、准确地接收和处理GNSS信号。

推动地月空间探测与开发：SSV技术的应用将进一步推动地月空间的探测与开发。通过提供精确的导航定位和时间同步服务，SSV技术可以为月球探测、小行星探测、火星探测等深空探测任务提供有力支持。

支持多任务协同与数据交换：在地月空间导航中，SSV技术还可以支持**多任务协同与数据交换**。通过为地月空间内的多个航天器提供实时**双向测量与数据交换服务**，SSV技术可以实现航天器之间的**信息共享和协同作业**，提高整个地月空间导航系统的效率和可靠性。

谢谢!

第五组

2024年11月25日