

# 全球卫星导航系统的新进展及 在载人航天中的应用

**摘要：**本文详细介绍了近来全球卫星导航系统(GNSS)的建设情况，包括美国GPS系统、俄罗斯GLONASS系统、欧洲“伽利略”(Galileo)系统、印度区域卫星导航系统、日本的准天顶卫星系统(QZSS)以及韩国要自主开发具备抗干扰能力的卫星导航系统等，最后简要分析了全球卫星导航系统在载人航天领域中的应用。

## 一、引言

全球卫星导航系统(GNSS)是个综合性概念，泛指全球所有的卫星导航系统，包括全球卫星导航系统、区域系统和广域增强系统(或者称为星基增强系统，SBAS)，因其全球、全天候、连续和高精度的特点，已经在遍及陆地、海洋、天空和太空的各类军事及民用领域得到广泛运用，成为目前最常见的导航技术。卫星导航已经成为一个跨学科跨行业的战略性产业，为人类带来了巨大的社会效益和经济效益。

在2020年前全世界已经投入运营和正在建设又有望建成的全球系统共有4个，它们是：美国的GPS系统、俄罗斯的GLONASS系统、中国的北斗(BeiDou)系统以及欧洲的Galileo系统，现在已经正式投入全球运营服务的全球系统有GPS和GLONASS，中国的北斗系统业已投入区域运营服务，Galileo则是在建设过程中。预

计中国的北斗系统和欧洲的 Galileo 系统将在 2020 年投入全球运营服务。

现在正在建设的区域系统有两个：日本的 QZSS(准天顶卫星系统)和印度的 IRNSS(印度无线电导航系统)。

目前，所有建设全球卫星导航系统的国家都在同时建设它们的星基增强系统，其中有美国的 WAAS(广域增强系统)、俄罗斯的 SDCM(差分修正监测系统)、欧洲的 EGNOS(欧洲“伽利略”导航重叠系统)、中国已经包含在北斗区域服务系统内的星基增强系统以及日本的 MSAS(多功能卫星增强系统)与印度的 GAGAN(GPS 加上静地卫星增强导航)。

近年来，世界卫星导航领域发展迅速，多个国家卫星导航系统的发展取得了里程碑式的阶段性成果，卫星导航领域竞争态势加剧。美国第二代 GPS 卫星星座全部建设完成，开始加速推进第三代系统的建设；俄罗斯 GLONASS 导航卫星系统建成了俄“国家高精度卫星定位网”，形成了覆盖全俄的高精度导航系统；欧盟“伽利略”卫星导航系统新卫星发射顺利，正式宣布启动“伽利略初始服务”；印度完成了由 7 颗卫星组成的区域卫星导航系统(IRNSS)星座的建设，成为世界上第 5 个具有自主卫星导航能力的国家；2017 年 10 月 10 日，日本发射了“指路”4 号卫星，日本将从 2018 年 4 月 1 日起开始运用这一自有导航卫星系统“准天顶”卫星系统，到 2023 年拥有 7 颗导航卫星，从而达到不依赖 GPS 系统也能实现高精度定位的目标；针对当前高对抗环境，韩国也决定自主开发具备抗干扰能力的导航卫星系统，以提供打击重要目标并实施“精确作战”的能力。

## 二、全球卫星导航系统的发展

### (一) 美国

2016 年，美国联邦航空局(FAA)发布了国家空域系统(NAS)

导航战略，从战略上为美国未来导航的发展指明了方向，同时，增加对导航领域的资金投入，在《2017 财年美国国防预算申请》中，重点投资的 5 个项目其中包括“全球定位系统运行控制系统”（GPS OCX）。

2016 年 2 月 5 日，美国成功发射第 12 颗也是最后一颗 GPS IIF 卫星，完成了第二代 GPS 卫星星座的建设。GPS IIF-12 部署到星座中的 F 轨道面，取代 2000 年发射的 GPS IIF 2-6 卫星（转为备用卫星），以增强 GPS 星座的现代化导航覆盖范围。作为未来构成 GPS 星座主干的 GPS IIF 卫星，比以往的 GPS 卫星具有更高精确度、附加信号、增强的抗干扰能力和更长的设计寿命。通过先进原子钟技术实现了更高的精度，可以将时间误差控制在一天 8 纳秒以内，GPS 的定位精度提升至 3 米。目前，在轨 GPS 卫星包括了 12 颗 GPS IIR，7 颗 GPS IIR-M 和 12 颗 GPS IIF。

与此同时，美国还在加速发展第三代 GPS 系统的建设。该系统将进一步延长使用寿命、提高精度、增强抗干扰能力，预计首颗卫星将于 2023 年发射。GPS III 卫星寿命将提高至 15 年，GPS III-A 卫星定位精度将达到 0.9 米，而 GPS III-C 将达到 0.15 米，它将为全球的军用和民用定位、导航和定时（PNT）用户提供新的未来能力。GPS III 具有 4 个民用信号：L1 C/A、L1C、L2C、L5。它是首颗使用 L1C 信号的卫星，它具有 4 个军用信号：L1/L2 P（Y）、L2/L2M。

GPS 的地面控制系统经过了 4 个阶段：1970—1980 年地面演示阶段；1980—2007 年第一代地面系统（OCS）；2007—2016 年第二代地面系统（AEP）；2016 年启动了下一代操作控制系统（OCX）建设。GPS 下一代操作控制系统（OCX）将指挥所有现代和传统的 GPS 卫星，负责管理所有的军用民用导航信号，为下一代 GPS 操作提供改进的网络安全和弹性能力。

GPS 应用范围非常广，不仅涉及军用行业，还涵盖了民间的

各行各业。美国国会已经强制要求 2018 年开始所有军用 GPS 接收机(MGUE)必须采用 M 码。这种新的现代化 GPS 接收机将能够极大地提高当前和未来 PNT 威胁对抗能力,可在导航战环境下传统接收机无法发挥效能时,实现军事应用。

## (二) 俄罗斯

近年来,俄罗斯 GLONASS 系统星座建设速度明显加快,成功发射了 2 颗 GLONASS - M 导航卫星,对 GLONASS 星座进行了补充,预计 2020 年可实现全部卫星组网。目前,在轨的 GLONASS 卫星为 27 颗。GLONASS 卫星已经发展了 2 代 3 种型号,分别为 GLONASS、GLONASS - M 和 GLONASS - K 卫星。GLONASS - K 采用全新设计,是新一代 GLONASS 卫星,分为 GLONASS - K1、GLONASS - K2 两个型号。GLONASS - K1 为实验卫星,采用改进的星钟,稳定度达到  $5 \times 10^{-14}$ ,在 L3 频段增加了首个 CDMA 信号,L3OC 用于民用。GLONASS - K2 是 GLONASS - K1 卫星的改进型号,再增加 3 个 CDMA 信号,使其拥有 4 个 CDMA 信号,其中 2 个民用,2 个军用,星座系统的稳定度将达到  $1 \times 10^{-14}$ 。此外,俄罗斯还在研制 GLONASS - KM 卫星,将再增加 4 个 CDMA 信号,使卫星信号达到 12 个,成为导航信号最多的全球卫星定位系统。

在星座更新换代上,俄罗斯计划在 2020 年前发射 13 颗 GLONASS - M 卫星和 22 颗 GLONASS - K 卫星,2017 — 2020 年形成全部由 GLONASS - K 或更新一代卫星(GLONASS - KM)组成的星座。

俄罗斯还于 2016 年底完成了“国家高精度卫星定位网”(NVSY)的建设,使 GLONASS 卫星导航系统的定位精度提高 1 倍,达到厘米级。俄罗斯于 2015 年 7 月开始布设“国家高精度卫星定位网”,把 600 多个 GLONASS 系统的卫星基准站纳入其中。该项目通过建设多个大型高精度定位地区网,旨在形成覆盖全俄

的高精度导航系统，为用户有保障地提供一周 7 天 24 小时全天候定位导航服务。

与 GPS 不同，GLONASS 采用频分多址(FDMA)的信号体制，卫星靠频率不同来区分；GPS 采用码分多址(CDMA)体制，根据调制码不同区分卫星。FDMA 信号不利于与 CDMA 信号互操作，在定位精度上也弱于 CDMA 信号，阻碍了 GLONASS 的商业化应用。近几年，俄罗斯在升级导航星座的同时，也注重了导航信号的革新，开始增播 CDMA 信号。GLONASS - K1 上发送了系统首个 CDMA 信号 L30C。GLONASS - K2 将发射 4 个 CDMA 信号，L10C、L30C 为民用，L15C、L25C 为军用。GLONASS - KM 上将增加 L5 载波，其 CDMA 信号将达到 8 个，其中包括 2 个能与 GPS 和 Galileo 兼容互操作的信号。

### (三) 欧盟

“伽利略”卫星导航系统是由欧盟主导的新一代民用全球卫星导航系统，是继美国的 GPS 系统、俄罗斯的 GLONASS 系统以及中国北斗系统之后第 4 个全球卫星导航系统，由欧洲自主研发，提供全球、全天候的实时定位、导航和授时服务。

2016 年，欧洲“伽利略”卫星导航系统取得重大进展，完成 6 颗新的“伽利略”卫星的部署，使卫星在轨数量达到 18 颗。“伽利略”系统于 2016 年 12 月 15 日开始正式向全球提供初始导航定位服务，其免费定位精度可达到 1 米以内，付费服务精度达到厘米以内。至此，欧洲“伽利略”卫星导航系统正式步入稳定发展的快车道。

“伽利略”系统初始服务提供 3 种类型的服务，包括开放服务、授权服务和搜索与救援服务(SAR)。在目前在轨的 18 颗“伽利略”卫星中，有 11 颗可用于开放服务和授权服务，12 颗用于 SAR 服务。

至 2020 年，“伽利略”系统将完成全部 30 颗卫星的组网，由

2 个地面控制中心和 30 颗卫星组成，卫星运行在 3 个夹角为  $120^\circ$  的地球中圆轨道，每个面上有 9 颗卫星和 1 颗备份星，具备全面运行能力。投入使用后 Galileo 将与 GPS 在 L1 和 L5 频点上实现兼容和互用。

#### (四) 印度

近来，印度卫星导航系统发展迅速，分别于 2016 年 1 月 20 日、3 月 10 日和 4 月 28 日成功发射了 IRNSS-1F, 1KNSS-1F 和 IRNSS-1G 共 3 颗印度区域卫星导航系统 (IRNSS) 系列区域导航卫星，按计划完成了由 7 颗卫星组成的基本导航星座的构建，实现了对印度全境及南亚和印度洋地区导航信号的覆盖，覆盖印度及周边 1500 千米以内的范围，成为继美国、俄罗斯、中国和欧洲之后第 5 个拥有自主卫星导航能力的国家。2016 年 9 月，继 IRNSS 的 7 颗卫星完成部署后，印度决定今后为 IRNSS 建造 2 颗备份卫星，以 IRNSS 系统为基础，发展印度的全球卫星导航系统。最终，印度的卫星导航系统将与美国 GPS 和欧洲 Galileo 系统实现互操作。

IRNSS 由空间段、地面控制段以及用户段组成，其中空间段由 7 颗导航卫星组成导航星座。地面控制段包括控制主控站、系统时间基准中心、监测站、上行信号注入站以及系统数据通信网络组成。用户段是指所有军用和民用接收机，接收机可以安装在导弹、飞机、舰船等武器装备以及士兵的手持仪器中。

地面控制段跟踪并估计导航卫星的轨道，以确保系统的完好性；另外地面站还要监测卫星的健康状态，并通过系统软件修正电离层和时钟偏差。

空间段由“3GEO + 4IGSO”轨道卫星组成区域导航星座。IRNSS 地面控制段主控中心及各监测站在印度境内，包括印度导航中心 INC、测距和完好性监测站 IRIMS、C 频段 CDMA 测距站 IRCDR、系统数据通信网络 IRDCN、飞行控制署 SCF。多模式型

号的 IRNSS 用户接收机可以同时接收美国 GPS、俄罗斯 GLONASS 以及欧洲 Galileo 导航系统的卫星信号，可以进一步提高用户的定位精度、服务的连续性和可用性。IRNSS 将会提供两种类型的服务，“标准服务 SPS”和“有限/授权服务 RS”。印度区域卫星导航系统是一套独立的区域导航卫星系统。印度区域卫星导航信号在设计上可以实现与 GPS 和 Galileo 兼容互操作。

根据印度空间研究组织 ISRO 的设计方案，印度区域卫星导航系统 IRNSS 的 7 颗导航卫星完成组网后，将能为印度及其周边 1500~2000 千米范围内的用户提供全天候、全天时的精确定位、导航及授时服务，系统覆盖范围在东经  $40^{\circ}$  ~  $125^{\circ}$ ，南纬  $30^{\circ}$  ~ 北纬  $45^{\circ}$  之间。

印度区域卫星导航系统的定位精度在印度洋区域优于 20m ( $2\sigma$ )，在印度本土及邻近国家定位精度优于 10m，比 GPS 民用单频接收机 15m 定位精度高。系统采用局域增强后，能够进一步提高用户定位精度。

## (五) 日本

日本的准天顶卫星系统(QZSS)是日本按照“先增强，后独立，兼容渐进”的发展思路建设的区域性卫星导航系统。2012—2017 年为研发阶段，2018—2032 年为运营阶段。2018 年建成 4 颗准天顶卫星组成的卫星星座，未来以 QZSS 系统为基础进行扩展，发展独立自主的区域卫星导航系统(JRANS)。要求 JRANS 能够独立连续地提供 PNT 服务，同时，要与当前和现代化后的 GPS 具有良好的兼容与互操作性。

日本的准天顶卫星系统(QZSS)可为 GPS 提供区域增强，可将日本民用信号的精度从 10 米提高到 1 米以内。从 2018 年开始全面启用由“3IGSO+1GEO”构成的 QZSS，再以此为基础进行扩展升级，在 2020 年后建成一个由“4IGSO+3GEO”构成的区域导航系统。

日本准天顶卫星系统(QZSS)第二颗“指路”卫星在2017年6月进行发射。2017年8月下旬,将第3颗“指路”卫星送入轨道,2017年10月,将第4颗“指路”卫星送入轨道。日本计划在2018年4月1日起开始运行这一自有卫星导航系统。第2颗、第3颗和第4颗卫星均采用同样的配置。这是一个区域性的卫星导航系统,所发射的信号与GPS系统的卫星一样,所以它相当于是GPS系统在日本及其海域的一个补充。作为美国GPS的辅助应用,最小可将定位误差降至6厘米。

QZS发射之后,在日本及东南亚地区,GPS用户可以很方便地使用该系统获得相当高的定位精度,QZSS的高完好性也能更好地满足用户需求。由于与GPS信号的兼容性好,该系统未来的用户估计会很多。在日本、其周边海域和东南亚包括中国东南的部分地区,尤其对山区或视野遮挡严重的用户来说,QZS的高仰角非常有用,这是QZSS系统特有的优势。

## (六) 韩国

韩国针对目前国内严重依赖GPS的现状,认为有必要构建本土的卫星导航系统。韩国决定自主开发具备抗干扰能力的卫星导航系统,使其具备打击重要目标并实施“精确作战”的能力。韩军的研发目标是打造覆盖周边地区的区域卫星导航系统,而非覆盖全球,因此,该系统最多可能只需要18颗卫星。

韩国计划先期开发有关卫星导航的核心技术,再纳入宇宙开发计划,发射6~8颗导航卫星,以及3~4颗监控卫星,以便实施24小时不间断精确定位,其误差可控制在数米之内,在时间同步上可精确到10毫秒的级别。韩国国防部对本土的导航卫星非常自信,认为韩军用卫星系统不但精确可靠,而且具备较强的抗干扰能力,目前相关的研发方案已在制定之中。

### 三、全球卫星导航系统在载人航天领域中的应用

#### (一) 卫星导航系统在航天飞机上的应用

研究表明，卫星导航系统几乎可以用在包括航天飞机在内的所有飞行器发射段的入轨控制、初轨捕获、在轨飞行时的轨道测量、返回轨道捕获的计算、飞行器间对接时的相对运动状态测量等各个阶段。星载 GPS 的航天应用能从 200 千米的低轨道空间向上延伸到 36000 千米的地球同步轨道空间。由于 GPS 卫星的全球覆盖的特点，在太空中(尤其是轨道机动频繁的近地轨道)，航天飞机可以在其飞行的任意时间同时获得十几颗 GPS 卫星的测量数据，其数据更新率不低于 1 赫兹。利用这些测量数据可以实时或者近似实时地确定航天飞机的运动状态。

#### (二) 卫星导航系统在国际空间站上的应用

卫星导航星座能够确保为空间站授时提供至少超过 4 颗可用卫星，完全满足导航和授时的信号可用性。ISS 美国段和俄罗斯段各装有 2 台 GPS 接收机，同时俄罗斯段还有 2 台 GLONASS 接收机负责导航与授时。

国际空间站上的导航、制导与控制分系统能完成以下功能：

##### (1) 状态确定

站上飞行软件利用周期性更新的接收数据通过运动学算法计算空间站的位置和速度信息。接收数据来自于两套 GPS 接收机及处理器中的一个，或来自于俄罗斯运动控制系统(MCS)的 GLONASS 接收机，或来自于地面上注入的数据。俄罗斯在轨段的运动控制系统能与美国 GN&C 的复分接器交换数据。

##### (2) 姿态确定

俄罗斯在轨段的 MCS(主控站)提供姿态测量的备份能力，与美国 GN&C(制导、导航与控制)系统的复分接器连续进行数据交

换。俄罗斯的敏感器包括星跟踪器、太阳敏感器、地平敏感器、磁强计、速率陀螺和 GLONASS 接收机。

### (3) 指向和支持(P&S)

指向和支持(P&S)计算 ISS 与太阳的位置矢量, 以及太阳的升降时间, 将这些信息提供给外部有源热控系统, 以便控制热辐射器的指向。这些信息还将为电源管理控制器所利用, 控制美国太阳能电池翼的旋转角度, 保证其正确指向太阳。

P&S 计算 ISS 与中继卫星的位置矢量以及升降时间, 并将信息提供给通信和跟踪系统, 以控制天线的指向。

P&S 还计算 ISS 的总体质量和质量分布(动量矩和惯量积), 考虑了有效载荷连同移动服务系统的移动、空间站遥控操作系统、日本实验舱遥控操作系统和俄罗斯在轨段遥控操作系统的影响。P&S 还计算有效载荷质量和质心, 并将 GPS 时间提供给指令和控制(C&C)复分接器, 以同步所有复分接器的时间。

## (三) 卫星导航系统在交会对接过程中的应用

对 GPS/GLONASS 系统而言, 航天器的交会对接过程是其在空间应用的一个重要领域, 也是能充分发挥其优势的一个领域。卫星导航用于空间站及到访航天器交会对接过程的导航、定位和授时。到访航天器与 ISS 的交会对接过程中, 涉及两者绝对位置、速度、时间、姿态的测量。目前利用 GPS、GLONASS 系统或二者结合的系统实现上述目标的测量。由于交会对接的各个阶段不同, 可以使用伪码定位来分别实现较粗的绝对定位和较精细的相对定位。目前, ISS 到访航天器中, ATV、HTV、“联盟”号、“进步”号、“龙”飞船均使用了 GPS/GLONASS 导航, 但是航天飞机与 ISS 的交会对接过程中没有使用 GPS 导航。俄罗斯 GLONASS 为空间站的俄罗斯段提供导航和授时。

到目前为止, 地面和空中的实验已经证明 GPS 卫星定位系统的不同应用模式能够满足空间飞行器交会对接, 特别是交会过程

中的绝大多数测量要求。

以 ATV 交会对接过程为例进行典型航天器导航卫星应用分析。在整个任务期间，ATV 绝对姿态与角速率估计值，要以很高的可靠性自主连续地获得。调相机动是由地面 ATV-CC 计算的，ATV 绝对位置与速度也要在地面被估计，因此 ATV 接收到的 GPS 粗数据需下传到地面 ATV-CC。

#### (1) 全程绝对导航

整个飞行阶段，应用“绝对姿态与漂移估计”(AADE)，连续估计飞行器姿态与角速率。

#### (2) 地面导引绝对导航

地面导引期间，应用 ATV 上 GPS 接收机的遥测数据，在地面执行绝对位置与速度估计。

#### (3) 自主导引相对导航

自主导引交会期间，应用相对 GPS 导航，星上卡尔曼滤波器应用 ATV GPS 与 ISS GPS 原始测量，仅对 ATV 相对轨迹的状态矢量提供自主导航功能。GPS 导航卫星的原始状态矢量提供数据(伪距与岁差动)是精确同步的，求差可消除电离层误差。软件单元“飞行控制监测”(FCM)应用 ATV GPS 与 ISS GPS 的精确解(PVt)作为监测相对轨迹的独立手段。

### (四) 卫星导航系统在载人航天搜救中的应用

载人航天是航天领域中技术难度最大、控制系统最复杂、风险也最大的工程，为了保障航天员随飞船返回舱返回地面后的安全，应用 GPS 技术对预测和判断航天员的安全状况、缩短寻找返回舱和营救航天员的时间，实现着陆场区搜索救援指挥决策的科学化、智能化、自动化有着重要的意义。全球卫星定位系统(GPS)可以提供全球范围内的紧急事件的搜救服务。

“伽利略”(Galileo)系统的主要特点是多载频、多服务、多用户。它除具有与 GPS 相同的全球导航定位功能外，还具有全球搜

索救援(SAR)、通信等功能。它的建成明显改善全球卫星导航定位领域的质量。它通过近乎实时的检测和仅仅几米的定位精度,以改善现有的全球搜索与救援系统的性能。携带 Galileo 接收机的遇险用户的具体定位精度将由现有系统的 5 千米提高到利用 Galileo 系统情况下的 10 米内。

与导航数据相关的双向通信服务的出发点是将未来的 Galileo 系统与已有的无线电通信(GSM/UMTS)以及其他卫星网有机结合起来,为无线通信用户提供更多更强的优质服务。这两种增加的服务都是基于 Galileo 系统的通信功能,将会进一步拓宽导航卫星系统的应用市场,为各类用户提供更好的服务,尤其对于一些空间飞行器的定轨与控制问题,如飞机编队、空间站等交会对接,有着非常重要的意义。

俄罗斯在 GLONASS 卫星导航系统的下一代 GLONASS-K1、K2 卫星中搭载了 SAR 功能。当前全球卫星导航系统包括 GPS、Galileo 和 GLONASS,均通过搭载搜救载荷为全球搜救系统提供空间段服务,可以通过中轨道导航卫星无线电测定业务(RNSS)业务载荷与搜救载荷的系统集成,从而大幅提高传统 COSPAS-SARSAT 的搜索与救援能力。

## 四、结束语

全球卫星导航系统及其产业当前正经历前所未有的三大转变:从单一的 GPS 时代转变为多星座并存兼容的 GNSS 新时代,卫星导航体系全球化和增强多模化;从以卫星导航为应用主体转变为 PNT(定位、导航、授时)与移动通信和因特网等信息载体融合的新阶段,导致信息融合化和产业一体化;从经销应用产品为主逐步转变为运营服务为主的新局面,导致应用规模化和服务大众化。三大趋势发展的直接结果是使应用领域扩大,应用规模跃升,大众化市场和产业化服务迅速形成。

研究表明，卫星导航系统几乎可以用在包括航天飞机在内的所有载人航天飞行器发射段的入轨控制、初轨捕获、在轨飞行时的轨道测量、返回轨道捕获的计算、飞行器间对接时的相对运动状态测量、载人航天飞行器安全返回以及着陆场区搜索救援等各个阶段。

载人航天是航天领域中技术难度最大、控制系统最复杂、风险也最大的工程，为了保障航天员随飞船返回舱返回地面后的安全，应用 GPS 等技术对预测和判断航天员的安全状况、缩短寻找返回舱和营救航天员的时间，实现着陆场区搜索救援指挥决策的科学化、智能化和自动化有着重要的意义。

(北京跟踪与通信技术研究所)