

Engineering Achievements

北斗三号导航星座的工程创新与发展

谢军, 康成斌

China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

1. 引言

2020年6月23日, 北斗三号全球卫星导航系统(BDS-3, 简称北斗三号系统)组网工程的最后一颗地球静止轨道卫星(GEO-3)成功发射, 标志着北斗全球卫星导航系统星座部署全面完成以及北斗导航卫星系统“三步走”发展战略的成功实施。北斗导航卫星系统提供的定位导航授时(PNT)及特色服务已经广泛融入国民经济和国防安全的各类核心基础设施中, 促进了社会生产方式变革和产业结构升级。

2. 北斗三号系统概述

北斗三号系统由空间段卫星星座、地面段系统(包括主控站、监测站、上行注入站等)和用户终端(用户机)等组成[1], 其中空间段卫星星座工程是整个系统的核心组成部分。按照全球范围提供基本PNT服务、中国及周边地区提供特色服务的要求, 在北斗二号区域星座系统基础上, 将北斗三号系统设计成由三颗地球静止轨道(GEO)卫星、三颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和24颗中圆地球轨道(MEO)卫星(即3GEO+3IGSO+24MEO, 图1)组成的混合星座。

通过改进卫星导航信号体制、提高星载原子钟性能和测量精度、建立星间链路、提升短报文服务能力等技术手段, 北斗三号系统实现了全球导航服务、性能提高、业务稳定运行以及与其他全球卫星导航系统

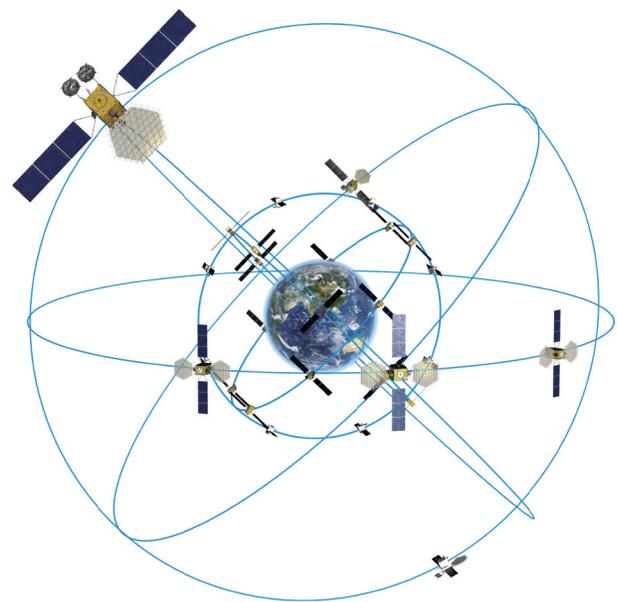


图1. 北斗三号系统星座构成示意图。

(GNSS)兼容互操作等目标。北斗三号系统的主要特点与作用如下。

2.1. 混合星座的多样服务

北斗三号系统空间段由地球静止轨道卫星、倾斜地球同步轨道卫星和中圆地球轨道卫星, 共30颗卫星组成[2]。混合星座提供的多样服务功能在国际卫星导航系统体系中独具特色。北斗三号系统融合了导航定位和通信数传技术的优势, 与国外其他全球卫星导航系统相

比，在提供基本PNT服务功能的基础上，突出了高精度服务、短报文和位置服务。北斗三号系统可提供六大星基服务（表1）：三种服务面向全球，包括导航定位授时（RNSS）、全球短报文通信（GSMC）和国际搜救（SAR）服务；三种服务面向中国及周边地区，包括星基增强（SBAS）、精密单点定位（PPP）和区域短报文通信（RSMC）[3]。北斗三号系统提供的服务功能更好地满足了用户的多元化需求，其技术方案和系统成果引领了全球卫星导航系统技术体系多功能聚合的发展趋势。

北斗三号系统工程的建设充分发挥了混合星座的技术特点，即边建设、边试验、边应用。2018年12月，北斗三号系统的PNT基本服务已向全球开通，服务性能不断提升[4]；2019年12月全球短报文通信、国际搜救服务已具备能力；2020年星基增强、精密单点定位和区域短报文通信服务将形成能力。

2.2. 万物互联的时空基准

北斗三号系统星座通过在星上配置高精度、高稳定性的时频系统，作为时空基准的基础设施，可为全球用户提供全天候、全天时、高精度的基本PNT服务，具有统一、精确、易用、廉价的独特优势，实现了地面、海面、航空、低轨航天器用户的时间基准和空间基准的建立与维持，起到了统一时空基准下获取用户或物体时间信息和位置信息服务的重要作用，是信息社会万物互联

和万物智能的基础。

北斗三号系统是航天科学技术和时空基准要求的完美结合，利用空间分布的多颗卫星组成星座，在统一时间和坐标系中通过地面站对卫星位置与轨道精确测量，将卫星作为标准位置与时间的导航台站，以播发无线电导航信号为载体，将时空基准信息广泛传递给覆盖范围内的无限用户。据统计，当今信息化社会中80%以上的信息数据都与位置、时间相关。北斗系统与移动通信、大数据、人工智能等技术的融合，必将为万物互联的智能时代带来巨大的支撑和推进作用。

2.3. 世界一流的空间基础设施

利用全球分布的多个地面监测站组成的国际全球连续监测评估系统（iGMAS）的监测数据进行评估，结果表明：2020年北斗三号系统的平均空间信号精度（SISRE）为0.47 m，优于GPS系统和GLONASS系统（表2），且其独立提供的导航信号服务性能已经达到国际先进水平。

2020年系统测试结果表明：北斗三号系统所有频点信号水平定位精度均优于4 m，其中平稳过渡信号B1I水平定位精度为3 m，新体制信号B1C水平定位精度优于2 m（图2、图3）。

北斗三号系统工程高度重视国际合作和国际化发展，在有限频率资源下，星上采用多种技术对导航信

表1 全球卫星导航系统服务功能

Service	BDS	GPS	GLONASS	Galileo
RNSS	○	○	○	○
SBAS	○	×	×	×
PPP	○	×	×	○
RSMC	○	×	×	×
GSMC	○	×	×	×
SAR	○	○	○	○

The ○ symbol marks available services and × represents unavailable services. RNSS: radio navigation satellite service; SBAS: satellite-based augmentation service; PPP: precision point positioning; RSMC: regional short-message communication; GSMC: global short-message communication; SAR: international search and rescue.

表2 四大全球卫星导航系统的空间信号精度

GNSS	SISRE (95%)	
	Performance standard (m)	Assessment result (m)
BDS-3	≤ 1.0	0.47
GPS	≤ 7.8	0.51
GLONASS	≤ 18.0	3.70
GALILEO	≤ 2.0	0.27

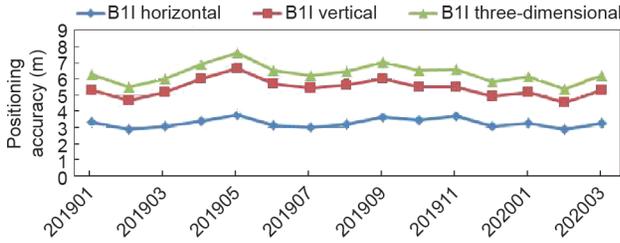


图2. 北斗三号系统平稳过渡信号B1I定位精度。

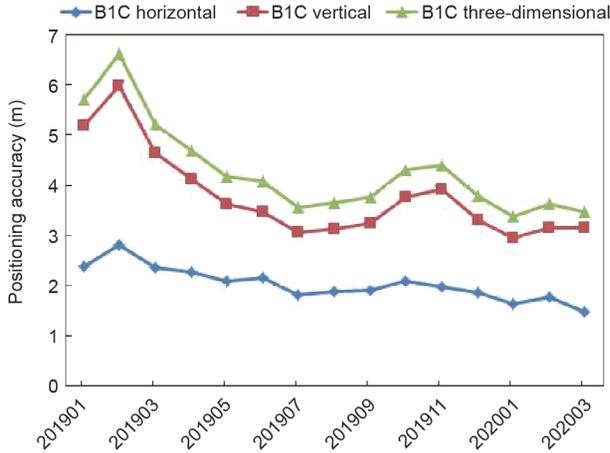


图3. 北斗三号系统新体制信号B1C定位精度。

号体制进行改进和优化；在B1频点上设计播发专用导航信号，实现了与美国GPS、俄罗斯GLONASS等其他卫星导航系统的兼容与互操作，使全球用户可以享用多个卫星导航系统联合提供的优质服务，进一步提升用户体验，为世界卫星导航系统的融合发展做出了重要贡献。测试结果表明：相较于使用某个单一全球卫星导航系统提供导航定位服务，用户联合使用北斗、GPS、GLONASS和Galileo四个系统，服务定位性能将提升50%以上。

3. 主要技术突破

3.1. 导航信号创新性设计

导航信号是全球卫星导航系统设计与服务性能承载的核心。基于GPS、GLONASS等系统的早期设计建设，北斗导航卫星系统主要选择了卫星导航的信号频率及带宽，因此其可用的导航信号频率资源极为有限。北斗三号系统的信号体制设计坚持自主创新、兼容操作的要求，以服务用户的性能提升、平稳过渡、功能综合为目标，创新性提出了新型三频的导航信号体制（图4）。

北斗三号系统在播发新型全球导航信号的同时，播

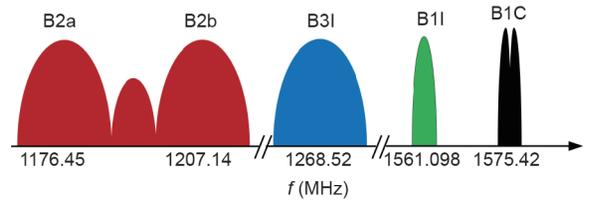


图4. 北斗三号系统导航信号示意图。

发了北斗二号系统B1I、B3I等平稳过渡信号（表3），保证了北斗二号系统用户终端的继续使用[5]。在北斗导航卫星系统B1信号频点和B2信号频点上，分别设计了正交复用二进制偏移载波（QMBOC）、非对称恒包络二进制偏移载波（ACE-BOC）调制方式，在实现与其他全球卫星导航系统导航信号兼容互操作性的同时，保证了系统的自主可控。系统设计采用了多载波信号恒包络复合技术，具有信号频域稀疏、时域恒包络等特点，有效地利用无线电射频信号非连续频谱资源，提高了导航信号的测距精度和抗干扰能力。北斗三号系统卫星的导航信号结构灵活，用户接收方式多样。

3.2. 星间链路跨越式发展

国外的GPS、Galileo等全球卫星导航系统均依靠在全球范围内布设一定数量地面站的方式，实现其在全球范围内良好的服务性能。针对北斗卫星导航系统建设面临的不在全球布站、中圆地球轨道卫星观测弧段短等问题，北斗三号系统创新性地提出了“国内地面站+星间链路”（domestic ground stations plus inter-satellite links）的技术方案，利用星间链路持续进行全星座星间精密测量并提供数据传输，实现全星座精密定轨与时间同步，构建全球卫星导航系统，保证全球系统导航业务运行，确保全球系统服务性能指标的均匀性。

通过在北斗三号系统卫星上配置无线电测量通信设备，实现了所有卫星之间的伪距测量与双向通信，从而达到提高星座精密定轨与时间同步精度、支持全天候境外卫星在轨管理的目标。基于星间链路的北斗三号星座系统，具有显著的信息网络属性（图5）。

北斗三号系统星间链路采用Ka频段相控阵技术、时分半双工体制。按照混合星座中各个轨道上每颗卫星的在轨工作状态，星上综合信息控制单元按照一定的网络路由规划、建链策略，控制卫星上相控阵链路的信号波束指向，建立周期变化的星间链路，从而完成不同卫星相互间的精密测距和数据传输。北斗三号系统星间链路具备更高的测距精度、更优的数据传输能力和更强的

表3 北斗三号系统服务与导航信号

Service type	Signals	Broadcasting satellites
RNSS open service	B1C	IGSO/MEO
	B1I (BDS-2)	MEO/GEO/IGSO
	B2a	IGSO/MEO
	B2b	IGSO/MEO
	B3I (BDS-2)	MEO/GEO/IGSO
SBAS open service	B1C, B2a	GEO
PPP	B2b	GEO
RNSS authorized service	B1A	IGSO/MEO
	B3A	MEO/GEO/IGSO
	B3Q (BDS-2)	MEO/GEO/IGSO
SBAS authorized service	B1A	GEO
Short-message service	B2b	IGSO/MEO

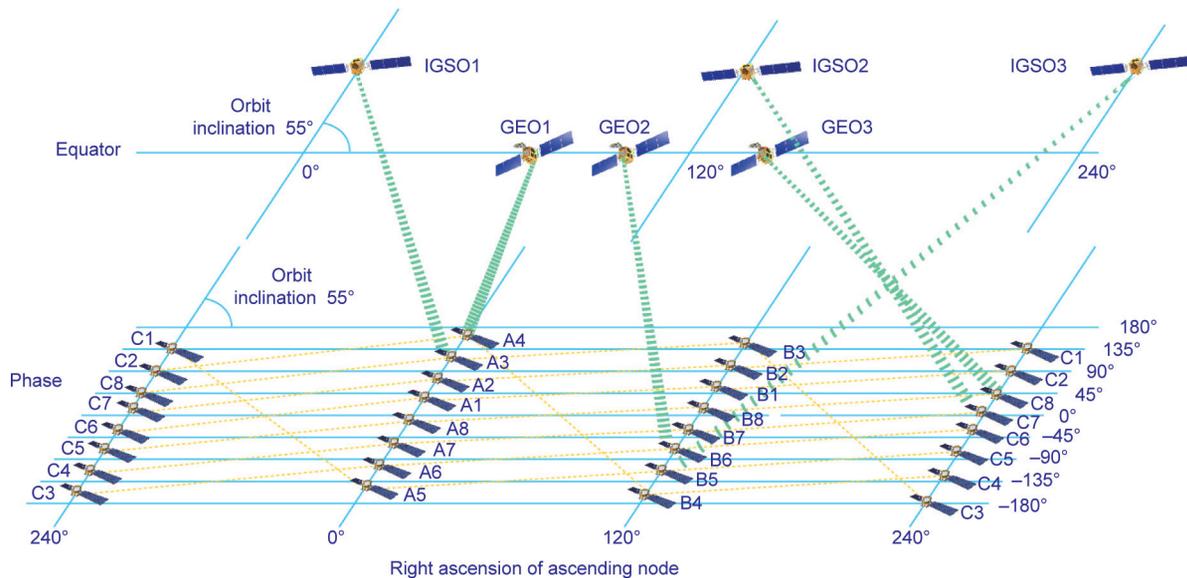


图5. 北斗三号系统星间链路示意图。

抗干扰能力，在全球卫星导航系统中处于领先水平。北斗三号系统在轨测试结果表明：相对仅利用星地测量数据，在利用星间链路数据后，北斗三号系统的中圆地球轨道卫星的轨道预报精度从0.4 m提升到0.15 m，钟差预报误差从3 ns减小到1 ns，导航星座实现了“一站式管理”。

3.3. 星载原子钟持续升级

星载原子钟是导航卫星发播高性能导航信号的核心产品，用于产生星上高精度时间频率基准信号，其性能指标优劣直接决定了卫星导航系统的PNT服务精度。北斗三号系统卫星设计研制了新一代国产化的铷原子钟[图6(a)]，产品具有高集成、高性能、高可靠的特点，

能够满足卫星平台高集成的承载条件，其天稳度性能进入 10^{-14} 量级，达到国际先进水平。

北斗三号系统卫星同时配置了氢原子钟[图6(b)]，进一步提升了卫星导航系统的定位、授时精度和星座自主运行能力，实现了更优的频率稳定度、频率准确度及日漂移率。氢原子钟的天稳度性能进入 10^{-15} 量级。

北斗三号系统星座充分发挥了各类原子钟的特点，利用混合钟组配置实现了高性能、高可靠的星载时频系统，实现了时频系统时频信号的无缝切换，显著提升了北斗三号卫星的时频性能和服务精度。

3.4. 短报文通信能力拓展

短报文通信与位置报告功能是北斗三号系统导航通

信融合设计思想的最佳体现。北斗三号系统卫星在继承北斗二号系统区域有源技术体制的基础上进一步提升了其服务能力。北斗三号系统的区域短报文服务与位置报告功能实现了其在中国及周边地区信号体制的平稳过渡，可保证北斗二号系统用户继续使用，并且通过优化卫星天线设计，将转发器通道和天线波束数量增加至6路等措施（图7），提高卫星的辐射信号功率，进而大幅提升服务能力。

相比北斗二号系统，通过提高卫星播发信号的功率和改进信号体制等措施，在保证原有用户使用感受平稳过渡的情况下，北斗三号系统信号服务容量提升10倍，达到每小时1000万次以上；短报文通信单条信息长度由120个汉字提升为1000个汉字；用户发射功率降至1/10。

同时，通过在三颗地球静止轨道卫星上配置可动点波束，使得服务范围拓展到印度洋和太平洋。另外，基



图6. 北斗三号系统的星载原子钟。(a) 星载铯原子钟；(b) 星载氢原子钟。

于中圆地球轨道卫星“全球覆盖，星间互联”的特点，北斗三号系统通过在中圆地球轨道卫星上配置基于处理和转发体制的报文通信接收机，将短报文通信服务能力拓展到全球，实现对全球范围以 15° 仰角双重覆盖、以 30° 仰角单重覆盖，向全球用户提供报文通信、位置报告、应急搜救等业务（图8）。

3.5. 卫星实现自主可控与组批研制

导航卫星的高密度批量生产能力是实现北斗三号系统快速组网的重要保障。北斗三号系统卫星研制项目组自主开发了国内首个全桁架式卫星平台（图9），解决了中圆地球轨道卫星直接入轨一箭多星发射的难题，满足了快速组网的任务需求。该卫星平台在卫星承载效率、

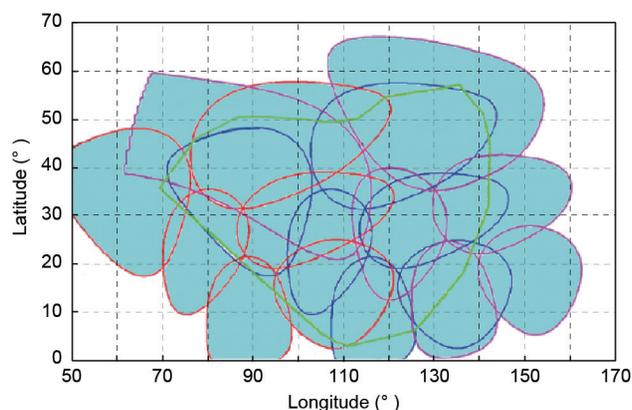


图7. 区域短报文S波段信号服务覆盖区。

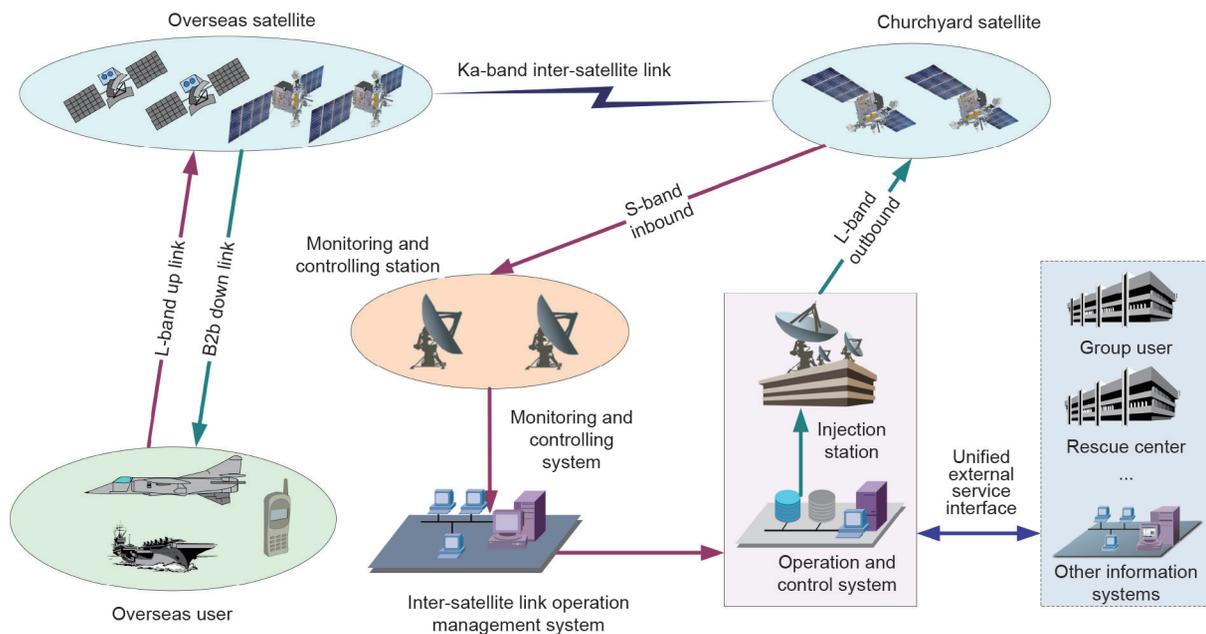


图8. 北斗三号系统全球短报文服务示意图。

载荷平台重量比、功率质量比等方面达到了国际先进水平。

按照工程建设和组批研制项目群管理要求，北斗三号系统卫星研制项目组提出了资源动态配置、研制流程再造、批产技术状态控制、质量控制、集成测试等方面的新措施和新方法，实现了每年12颗整星并行总装和测试的研制能力，有力支撑了北斗三号系统在3年内完成30颗卫星的高密度发射组网。北斗三号系统组网工程2020年提前半年完成建设，创造了全球卫星导航星座组网的“中国速度”。

北斗三号系统卫星在设计初期，就明确提出了国产化与自主可控的要求，建立了北斗导航卫星器部件产品国产化研制、验证和应用的一体化体系。卫星总体和单机产品研制单位秉承原始创新、自主发展理念，突破了星载原子钟、行波管放大器、大功率微波开关等核心关键技术，实现了星载产品100%国产化和核心器部件的自主可控。

4. 发展与展望

随着大众用户需求的提高，以及现代科学技术水平的发展，北斗卫星导航系统的服务能力将持续发展并不断升级。与其他全球卫星导航系统一样，基于无线电信号测量和传输技术的北斗卫星导航系统信号具有落地电平低、穿透力差、易受干扰等固有脆弱性和局限性，特别是在深空、水下、室内等环境下使用时受限。为此，中国已着手开展下一代北斗卫星导航系统的论证研究工作，在充分发挥天基混合星座卫星导航系统服务能力的基础上，融合多种导航技术手段，打造更加精确可信的时空基准核心，发展综合PNT体系，为经济发展和国家安全提供更加强健的时空信息保障[6]。

第一，按照体系融合的发展思路，建设“更加泛在、更加融合、更加智能”的国家综合PNT体系。根据不同

的使用场景环境为用户提供PNT服务差异化的解决方案，实现由深空到深海的立体服务覆盖，具备由公里级定位精度到分米、厘米级定位精度的多样化服务能力，满足用户对“更加泛在、更高精度、更加安全”的时空信息服务的需求（表4）。

第二，持续强化北斗卫星导航系统的核心和基石作用，打造“更精、更强、更广、更智能”的北斗卫星导航系统服务能力。构建天地一体化的时空基准网和导航信息服务网，突破时空基准天基化、卫星系统智能化、导航信息服务网络化等关键技术，构建高中低轨混合星座，建设“基准统一、覆盖无缝、安全可靠、高效便捷”的国家综合PNT体系。

第三，建设卫星导航补充、备份、增强系统。通过将现有北斗卫星导航系统与低轨通信星座相结合，建设基于低轨卫星星座的导航增强系统，实现全球备份PNT服务能力，提升北斗卫星导航系统在复杂环境下的服务性能。通过北斗卫星导航系统与地面移动通信5G/6G技术相融合，填补室内PNT服务短板，实现室内外无缝定位；通过升级建设远程陆基导航系统，在海上形成极端条件下备份PNT基本能力；同时，积极探索X射线脉冲

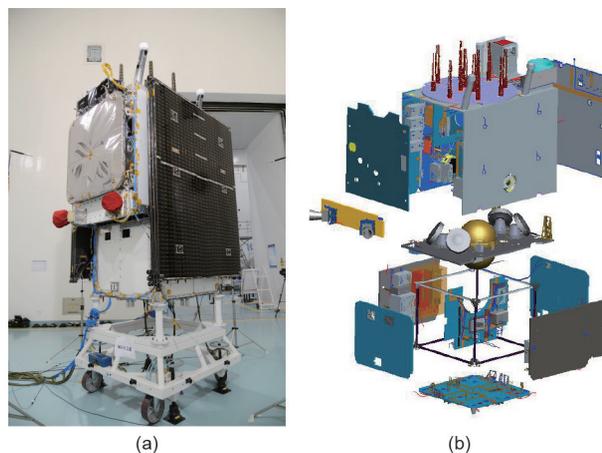


图9. 北斗三号系统中圆地球轨道卫星示意图。(a)中圆地球轨道卫星；(b)卫星结构爆炸图。

表4 中国的PNT体系

Navigation system	Service area	Service capability
Pulsar navigation system	Deep space	Deep space navigation service
Lagrangian point satellite navigation system	Earth-Moon	Earth-Moon navigation service
GEO, IGSO, and MEO satellite navigation system	36 000 km	Global basic navigation satellite service
LEO satellite navigation augmentation and backup system	30 km	Power augment global high-accuracy service
Fifth generation (5G) mobile communications, underwater navigation, and micro-navigation	Underwater; location-base; and complex environment	Great promotion of PNT service capacity in complex environment

星导航技术，为人类探索深空活动提供PNT保障；发展微PNT技术，实现与卫星无线电导航的协调发展。

References

- [1] The State Council Information Office. White paper on China's BeiDou navigation satellite system. Beijing: People's Publishing House; 2016. Chinese.
- [2] Xie J, Wang H, Li P, Meng Y. Satellite navigation technology. Beijing: Beijing Institute of Technology Press; 2018. Chinese.
- [3] Guo S, Cai H, Meng Y, Geng C, Jia X, Mao Y. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance. *Acta Geod Cartogr Sin* 2019;48(7):810-21.
- [4] Ran C. Construction and development of BeiDou navigation satellite system. *Satell Appl* 2019;7:8-11. Chinese.
- [5] Xie J, Wang J. Innovation and technical characteristics of BDS-3. *Space Int* 2017;11:4-7. Chinese.
- [6] Xie J, Liu Q, Bian L. Development vision of national comprehensive PNT architecture based on BeiDou navigation satellite system. *Space Electron Technol* 2017;14(5):1-6.