

# PNT 体系视角下卫星导航与不依赖卫星导航 技术融合发展研究

郭树人<sup>1\*</sup>, 姜坤<sup>1,2</sup>, 李星<sup>1</sup>, 刘刚<sup>3</sup>, 李平<sup>4</sup>, 李林泽<sup>5</sup>, 郭思远<sup>5</sup>

(1. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 2. 中国科学院空天信息创新研究院, 北京 100094; 3. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 4. 中国空间技术研究院, 北京 100094; 5. 北京卫星导航中心, 北京 100094)

**摘要:** 卫星导航自问世以来以其全天候、全天时、低成本的优势, 成为广泛使用的导航定位授时 (PNT) 方式; 但在应用层面, 为了规避对卫星导航单一手段的过度依赖, “不依赖卫星导航技术” 概念被提出并受到重视, 如何准确把握两者之间的关系成为现实而迫切的问题。本文概述了卫星导航技术特征与体系定位, 进而基于 PNT 体系视角, 对比分析了惯性导航、匹配导航、无线电导航 (除卫星导航外) 等典型不依赖卫星导航技术的性能、成本、应用场景; 辨析了卫星导航与不依赖卫星导航的关系, 明晰了卫星导航作为最大共性需求满足者、体系核心与基石的总体定位, 量化分析了卫星导航与不依赖卫星导航技术融合的效能。我国 PNT 体系的科学发展, 需要创新突破不依赖卫星导航技术, 促进卫星导航和不依赖卫星导航技术深度融合, 同时加快低轨导航系统建设, 提升卫星导航性能并最大化体系贡献率。

**关键词:** PNT 体系; 卫星导航; 不依赖卫星导航; 技术融合; 体系发展

中图分类号: P228 文献标识码: A

## Integrated Development of Satellite and Satellite-Independent Navigation Technologies from the Perspective of PNT System

Guo Shuren<sup>1\*</sup>, Jiang Kun<sup>1,2</sup>, Li Xing<sup>1</sup>, Liu Gang<sup>3</sup>, Li Ping<sup>4</sup>, Li Linze<sup>5</sup>, Guo Siyuan<sup>5</sup>

(1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications Technology, Beijing 100094, China; 2. Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 3. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 5. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Satellite navigation has all-weather, all-time, and low-cost advantages and has become the most widely used means of positioning, navigation, and timing (PNT) service since its inception. However, to avoid excessive reliance on the single means of satellite navigation at the application level, the concept of satellite-independent navigation technology has been proposed and received attention. How to accurately understand the relationship between satellite and satellite-independent navigation technologies has become a realistic and urgent issue. The technological characteristics and system positioning of satellite navigation are summarized in

收稿日期: 2023-01-15; 修回日期: 2023-03-18

通讯作者: \*郭树人, 北京跟踪与通信技术研究所研究员, 研究方向为导航定位授时体系、卫星导航总体技术; E-mail: gsr888@tom.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“国家时空信息安全战略研究”(2022-XY-131)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

this study. The performances, costs, and application scenarios of typical satellite independent navigation technologies such as inertial navigation, matching navigation, and radio navigation (except for satellite navigation) are comparatively analyzed from a PNT system perspective. The relationship between satellite and satellite-independent navigation technologies is comprehensively analyzed. The overall positioning of satellite navigation as the most common demand satisfied and the core and cornerstone of the PNT system is further clarified. Additionally, the fusion efficiency is quantitatively analyzed. The scientific development of China's PNT system requires the innovative development of satellite-independent navigation technologies, and the deep integration of satellite and satellite-independent navigation technologies should be promoted. Moreover, the construction of low-orbit navigation systems should be accelerated to improve satellite navigation performance and maximizing system contribution.

**Keywords:** positioning, navigation, and timing system; satellite navigation; satellite-independent navigation; technology integration; system development

## 一、前言

时间和空间是宇宙万物运行的基本属性，现代社会运行对精准可靠的定位导航授时（PNT）信息高度依赖<sup>[1]</sup>。全球卫星导航系统（GNSS）以全天候、全天时、低成本的优势，成为当前社会运用最广泛的PNT手段，普及应用于交通运输、电力、金融等领域，转化催生了基于位置服务的新兴产业<sup>[2-4]</sup>。然而，随着经济社会、国防建设对卫星导航依赖度的不断加深<sup>[5,6]</sup>，卫星导航信号弱、易被遮挡和干扰、不能覆盖室内/水下/深空等固有缺陷凸显。整体上，统筹发展各类PNT技术弹性互备的综合PNT体系成为各方共识<sup>[7]</sup>。

美国作为GNSS领域的“先行者”，针对全球定位系统（GPS）面临的潜在威胁，着力构建国家综合PNT体系<sup>[8,9]</sup>。在将GPS作为国家PNT体系的基石，加强核心地位并提升系统安全性、可靠性的同时，积极发展不同物理机制、不同工作模式的不依赖卫星导航技术（以下简称不依赖技术），旨在促进多PNT手段融合应用，提升PNT体系的弹性及韧性<sup>[10]</sup>；先后发布了国家PNT体系执行计划<sup>[8]</sup>，全源导航定位、伪卫星导航、微自主PNT、随机信号导航等PNT新技术研究计划<sup>[11]</sup>，基于GPS融合无线电PNT源、自主PNT系统以构建全球、区域、自主3层PNT体系计划<sup>[12]</sup>，以多样化PNT系统提高关键基础设施韧性的国家PNT韧性提升研发计划，弹性PNT参考架构及PNT体系弹性概念功能等级<sup>[13]</sup>。我国在北斗卫星导航系统（北斗系统）全面建成及推广应用的基础上，就综合PNT体系展开了前瞻探索：论述了综合PNT体系、弹性PNT体系、智能PNT的基本概念，综合PNT、智能PNT关联的核心技术，综合PNT与微PNT的关系<sup>[7,14-16]</sup>；提出了“5+1+N”的综合PNT体系发展构想<sup>[17]</sup>，基于北斗系统

的国家综合PNT体系概念、建设目标及思路<sup>[1]</sup>，形成了PNT体系弹性的指标分类<sup>[18]</sup>、多源自主导航系统未来发展技术体系<sup>[19]</sup>。

整体上，国内外关于PNT体系的已有研究分布在体系架构、基本概念、发展策略、核心技术方面。PNT体系概念覆盖面宽、技术类别繁多，加之各类技术都有适用场景及局限性、对体系的贡献率存在差异性，在不同工程背景、约束条件下的相关体系建设思路与设计结果不尽相同。例如，近年来不依赖技术概念成为关注热点，一些讨论可能放大了其在特定场景下的补充备份作用，忽视了工程应用的局限性<sup>[20,21]</sup>。因此，准确理解、科学把握各类PNT技术的体系定位及相互关系，是开展体系设计的重要前提。

本文采取满足最大共性需求、提供标准化解解决方案的体系建设思路，从卫星导航和不依赖技术两方面着手，分析各类PNT技术的体系定位、相互关系、融合效能；坚持以卫星导航为核心及基石，卫星导航与不依赖技术融合的体系发展思路，分析深度融合所能提供的效能增量。可以认为，强调不依赖技术的重要性与保持卫星导航系统的核心地位是辩证统一的，以协调发展、深度融合更好增强PNT综合能力。

## 二、卫星导航技术特征与体系定位

### （一）具有高精度、低成本的特征，是应用最为广泛的PNT手段

时间是国际计量委员会定义的7大基本物理量之一，也是当前测量精度最高的物理量（精度优于 $10^{-18}$ ，准确度可达 $10^{-15}$ ），还是唯一可通过电磁波实现远距离、高精度传递的物理量。GNSS的运行与服务均基于时差测量，导航卫星配置的高精度原子钟，天频率稳定度达到 $10^{-15}$ 量级<sup>[22]</sup>，系统服务精度

达到实时米级、近实时分米级、后处理毫米级。GNSS建立了独立、连续、稳定的时间基准，可为各类PNT手段、用户提供广域统一的时空信息，一体化实现定位与授时。这是仅能提供定位服务的惯性导航、匹配导航等手段无法比拟的。

GNSS作为天基系统，仅利用约30颗卫星即实现全球覆盖；作为单向广播系统，不限制用户数量。以当前全球保有的 $6.5 \times 10^9$ 部卫星导航终端计算<sup>[23]</sup>，分摊到单个用户的建设成本不足0.5美元，以较低的成本体现了极高的效益。同时，卫星导航终端芯片便于配置到各类设备中，支持卫星导航功能集成到手机、可穿戴设备、汽车等大众应用；显著的经济社会效益驱动了技术快速更新，使用户体验、使用成本等均有明显改善。

## （二）作为最大共性需求的满足者，是PNT体系的核心和基石

GNSS是当前唯一兼具全球性、高精度、低成本特征的PNT技术，覆盖地表至数万千米高度的广阔空间，适应人、物、车和各类平台的应用需求，不受季节、天气、地理空间、载体动态变化的约束；在军事应用方面几乎渗透至所有的武器装备、作战单元、信息系统，在民用方面则拓展至几乎所有的关键基础设施、移动载体、手机，成为最大共性需求满足者。GNSS也是仅有的统一地理空间和惯性空间的时空基础设施，其他基于PNT技术的时空基准溯源主要手段。若缺失卫星导航，PNT体系将趋于碎片化。

GNSS是国际PNT领域竞争与合作的标志性系统，论证系统能力的升级换代，部署新技术、新卫星、新服务成为潮流<sup>[24]</sup>。以美国为例，始终将GPS作为国家PNT体系的核心（包括军用和民用领域），“仍然相信GPS是一个非常强大的系统，目标不是取代它，而是在GPS降级的环境中增强GPS的可信度，进而提供可靠的PNT能力”<sup>[25]</sup>；加快GPS现代化进程，研发新一代GPS新技术试验卫星，切实提升未来GPS的抗干扰能力与韧性；以全球高精度覆盖为目标的Xona低轨导航星座试验卫星成功入轨，成为后续300余颗卫星部署的开端<sup>[26]</sup>。俄罗斯、欧盟启动了格洛纳斯、伽利略系统的现代化升级过程，日本、印度计划扩大现有区域卫星导航系统的星座规模以提升服务性能。

## 三、不依赖技术特征与体系定位

### （一）不依赖技术特征

不依赖技术是在PNT体系语境下，对卫星导航以外所有PNT技术的统称；作为对卫星导航的补充、备份和增强，与卫星导航共同构成了PNT体系。不依赖技术按照物理机制主要分为惯性导航、匹配导航、无线电导航、新兴导航等（见表1）。

#### 1. 惯性导航技术

惯性导航作为一种全自主导航技术，不发射、不吸收外界的声、光、电等信息，对外界干扰“免疫”，具有良好的隐蔽性和环境适应性<sup>[27]</sup>，广泛应用于海、陆、空、天等领域的武器装备，成为核心导航与制导部件、高价值装备的保底PNT手段<sup>[28]</sup>。当前，惯性导航、卫星导航共同占据着导航技术的主导地位<sup>[29]</sup>。惯性导航可弥补卫星导航的短时、局域不可用等局限，但无法提供时间信息，误差累积效应明显（定位精度随时间快速降低），需要不断进行外部校准；在装备应用时还需初始校准等过程，增加了综合应用成本。

#### 2. 匹配导航技术

匹配导航技术细分为重力匹配、磁力匹配、影像匹配、景象匹配等<sup>[30]</sup>；将实际测量数据与预存数据库数据进行特征匹配以确定用户位置，属于自主无源定位导航手段，对无线电干扰“免疫”。受数据库构建精度、用户测量终端匹配精度等的限制，匹配导航难以提供稳定、高精度的定位信息（精度通常在百米到千米级）。由于装备应用需依赖事先制备的高精度、高分辨率物理场图，技术保障难度大且成本高，加之易受场分布、气候、天气等因素的制约，匹配导航难以实现连续导航；较多作为惯性导航的辅助手段，用于特征点校准。

#### 3. 无线电导航技术

无线电导航技术在专用高精度导航系统中应用较多，如航空领域的仪表着陆系统、伏尔航路导航系统、测距仪、塔康<sup>[31]</sup>，航海领域的罗兰系统<sup>[32]</sup>，航天领域的飞行器测控系统，位于室内的超宽带系统，基于通信系统的各种PNT技术（WiFi、第五代移动通信（5G）、铱星）<sup>[33]</sup>。这类导航技术的应用依赖地面、空间等区域部署的信标网络，适用区域与场景通常受限，与卫星导航一样存在信号被拒止的风险。

表1 典型PNT技术的能力特征

PNT技术		定位精度	授时精度	应用范围	限制条件	终端成本
惯性导航	传统惯导	1~2 n mile/ 1~15 d	—	全球	需要外部不断校准, 质量体积成本较高, 中小平台难以应用	百万元量级
	微惯导	10 m/3 min	—		需要外部不断校准	百元到千元量级
匹配导航	重力导航	百米量级	—	重力特征明显 区域	需要现势性较高的 重力场图	定制终端, 百万元量级
	磁力导航	百米级	—	磁力特征明显 区域	需要现势性较高的 重力场图	定制终端, 万元量级
无线电导航	卫星导航	米级	十纳秒级	全球开阔空间	无法覆盖室内等遮蔽 环境	十元量级
	低轨通信导航	百米级	百纳秒级	全球通信覆盖 区域	需要占用通信时隙、 频率、功率等资源	千元量级 (寄生于通信 终端)
	地面移动通信 导航	十米级	百纳秒到 微秒级	区域, 单站覆盖 30~50 m	需要占用通信时隙、 频率、功率等资源, 以及地面高密度布站	千元量级 (寄生于通信 终端)
	WiFi / 蓝牙	米级	—	局域, 单站覆盖 10~30 m	需要地面高密度布站	十元量级
	超宽带	分米级	纳秒级	局域, 单站覆盖 千米量级	需要地面中密度布站	定制终端, 百元到千元 量级
	Locata地基导航	分米级	纳秒级	局域, 单站覆盖 千米量级	需要地面中密度布站	定制终端, 千元量级
	陆基远程导航 (增强罗兰/ 甚低频导航)	百米量级	百纳秒级	广域, 单站覆盖 0.15~1×10 <sup>4</sup> km	需要地面低密度布站	定制终端, 十万元量级

#### 4. 新兴导航技术

近年来涌现了一批新兴导航技术, 包括脉冲星导航<sup>[34]</sup>、量子导航<sup>[35]</sup>、仿生导航<sup>[36]</sup>等; 多为适用于特殊场景的前沿技术, 技术探索有待深化, 加之都存在一定的应用局限性, 距离工程化有较大差距。

#### (二) 不依赖技术在PNT体系中的定位

各种不依赖技术均为满足专业使用需求而生, 属于特定场景下的适配技术, 支持了航海、航空、航天等装备应用以及飞行器精确制导等技术的发展, 至今仍有鲜明的应用价值; 但受物理机制所限, 精度不高 (数十米到千米级), 终端体积质量大、成本高, 应用区域及场景有局限性。

当前, 高价值、高安全要求的大型平台通常将自主导航 (主要是惯性导航) 技术作为“主用”“保底”手段, 辅以卫星导航以修正积累误差; 这

是不依赖技术的传统应用领域。而在单兵、“蜂群”“狼群”“鱼群”等低成本、小型化平台上, 卫星导航技术是标准配置; 不依赖技术受成本、体积、质量、功耗所限, 难以适配。因此, 以芯片原子钟、微机电系统惯性测量单元为代表的微自主技术, 以通信导航融合技术为代表的各类无线电导航技术等, 成为不依赖技术的未来发展重点<sup>[37]</sup>。

整体来看, 不依赖技术只是在PNT体系语境下的一种分类说法, 意在强调这些技术与卫星导航相比具有相对独立、适应专有场景、没有共因失效问题等特点, 但并不意味着较卫星导航技术具有优越性。尽管如此, 提出不依赖技术这一概念确有现实意义: 强化应用底线思维, 关注单纯依赖卫星导航的潜在风险, 强调多手段融合共用; 聚焦卫星导航能力的短板弱项, 明确安全性与坚韧性方面的发展重点; 梳理各类不依赖技术的优势与局限, 明确低

成本、小型化的主攻发展方向。

#### 四、卫星导航与不依赖技术融合效能分析

没有任何一种PNT技术能够独立满足所有应用需求，需要按照体系化思维来统筹发展卫星导航和不依赖技术，发挥各类技术的互补优势，以深度融合实现能力互补和体系增效。

##### (一) 补充备份，扩展服务范围以提升体系弹性

###### 1. 场景互补

卫星导航能够实现全球开阔空间的广域覆盖，但在遮蔽环境下性能明显下降，也无法覆盖水下、室内、深空等场景。惯性导航不受应用场景限制，可弥补卫星导航短时/区域被拒止的能力空缺。5G、水声、脉冲星导航等技术，是室内、水下、深空等卫星导航覆盖空白区域的良好补充手段。

###### 2. 弹性互备

在地球开阔空间，各种无线电导航技术在一定区域内可以互为应用备份。如在室内，超宽带、WiFi、蓝牙、5G等技术可以互为导航应用备份。

##### (二) 融合增效，显著提高体系效能

###### 1. 卫星导航与不依赖技术交互支撑

卫星导航可为不依赖技术基础设施的建设及运行提供时空基准。卫星导航、其他无线电技术可为惯性导航提供初始定位、定向等阵地保障，为各类匹配导航制备高精度、高分辨率的物理场图提供时空信息支持。

###### 2. 卫星导航与惯性导航融合赋能

惯性导航具有自主性、抗干扰性、隐蔽性好，可高速连续输出导航参数的优点，但导航误差随时间累积。卫星导航具有定位和测速精度高、导航结果没有累积误差等优点，但在遮挡、高动态、强干扰环境下无法跟踪卫星信号。两者组合使用即实现优势互补，常见方式有松组合、紧组合、深组合(见图1)<sup>[38]</sup>。

以深组合方式为例，惯性导航信息可用于辅助卫星导航信号跟踪，卫星导航定位结果可用于修正惯性导航误差，从而抑制惯性导航误差发散。惯性导航解算结果反映了载体的动态，结合卫星导航电文解算的卫星位置、速度，可预估卫星导航信号载

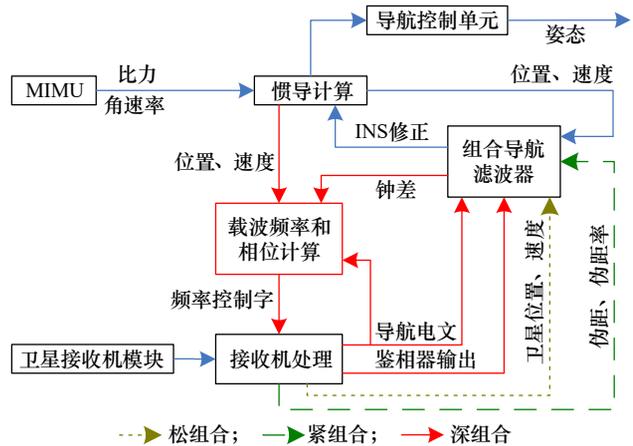


图1 卫星导航与惯性导航组合原理图  
注：MUMU表示微惯性测量单元；INS表示惯性导航系统。

波多普勒频率，从而压缩卫星导航接收机锁相环(PLL)带宽，增强卫星导航接收机的抗干扰能力和动态能力。

基于普通晶振条件，通过仿真得到惯性导航辅助下使用不同带宽跟踪环路时，卫星导航接收机PLL相位颤动随卫星导航信号载噪比的变化情况(见图2)。结果表明，在惯性导航辅助速度误差为0.1 m/s时，卫星导航接收机PLL可采用1 Hz噪声带宽工作，跟踪灵敏度为15 dB/Hz，比通常采用的25 Hz噪声带宽跟踪环路(信号载噪比为26 dB/Hz)提高抗干扰门限约11 dB，展示了卫星导航与惯性导航深度融合的应用效能。若使用更高精度的晶振，还可进一步提升抗干扰性能。

###### 3. 卫星导航与通信融合赋能

卫星导航和通信在基础设施、技术原理、服务对象等方面具有高度相似性，融合后的增量显著、效费比高。卫星导航系统可为各类通信系统提供广

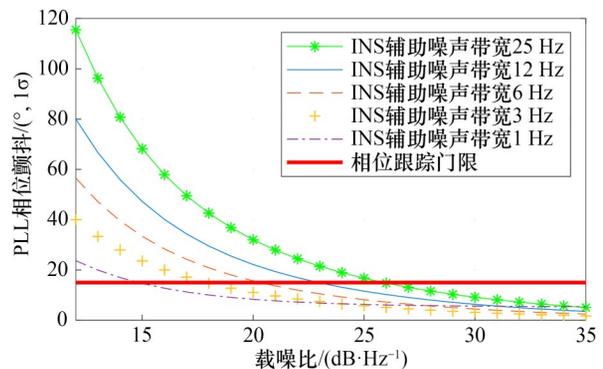


图2 惯性导航辅助后卫星导航PLL相位颤动随噪声带宽的变化曲线

域高精度的时空基准,提升通信系统的时间同步精度,进而优化通信效率。通信系统可利用大带宽、高速率、高功率的通信链路,播发卫星导航系统导航电文,从而将卫星导航终端开机冷启动时间从分钟级缩短至秒级。在通信系统概略位置、时间以及导航电文的辅助下,可进一步提升卫星导航的信号捕获灵敏度。

卫星导航终端可通过增加相干积分时间来提高信号的捕获灵敏度<sup>[39]</sup>。基于通信系统播发的卫星导航电文、概略位置 and 时间的辅助,卫星导航接收机可计算出相对于导航卫星的动态和多普勒频率,能够采取较长的相干积分时间,进而提升捕获灵敏。根据不同相干积分时间下的信号捕获灵敏度(见图3)可知,无辅助捕获时的卫星导航接收机相干积分时间通常不超过10 ms;通信辅助后可明显加大相干积分时间,典型情况下提升20倍左右(200 ms),相比无辅助捕获提高灵敏度10 dB以上。

### (三) 融合应用, 促进体系建设提质增效

当前手机中的卫星导航芯片成本仅在10元左右,而性能远高于20多年前的单兵背负式GPS接收机(价值超过1万美元),这得益于技术进步以及融合发展理念。卫星导航开放使用,牵引技术发展进而实现应用终端的低成本、小型化,进一步带动用户规模扩大(数十亿个),以市场规模促进了相关技术进步;发展了通信增强(A-GNSS)技术,集成了重力/陀螺仪/加速度计/磁力计/气压计等功能,显著缩短了卫星导航定位冷启动时间,弥补了卫星导航短时不可用的能力空缺,改善了用户体验并形成系统发展的良性循环。

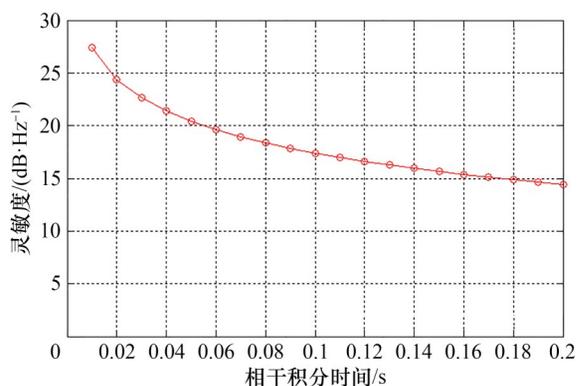


图3 不同相干积分时间对应的捕获灵敏度

卫星导航与不依赖技术融合使用,同样可以显著提升效能并降低成本。也要注意,目前用户规模小、技术生态封闭、各方认识不到位,特别是片面理解“不依赖”概念,使得体系化应用仅处于组合层面,融合深度明显不足。即使在GNSS先发国家,也有类似认识:现在低于5美元的手机芯片,就可以接收全球四大导航系统200路的测距信号、实现厘米级的载波相位测量,这种能力在军用接收机中却找不到;与低成本惯性组件相结合,将使PNT几乎不受干扰、欺骗等威胁的影响<sup>[40]</sup>。这表明,未来卫星导航与不依赖技术融合发展的提升空间巨大。

## 五、PNT体系发展的思考和建议

### (一) 坚持体系融合理念, 创新发展不依赖技术, 实现卫星导航和不依赖技术融合发展

受当前的技术水平、建设成本、基础工艺的制约,不依赖技术的发展与应用水平仍然不高。随着科学技术、新兴产业的发展变革,如新材料研发和加工制造等水平不断提升、商业航天迅猛发展,传统惯导和时钟的微型、低成本化逐步成为现实,陆基远程导航系统性能继续增强,基于5G、低轨通信星座的新型PNT能力生成迎来发展机遇,催生了新机理、新概念导航技术的蓬勃发展。

卫星导航与不依赖技术融合,实质表现为以硬件为核心的传统技术、以软件为核心的信息技术之间的融合。需要关联各方打破认知偏差和技术壁垒,创建适应技术更新迭代的信息化装备管理模式,形成规模化应用的良性生态环境。①通过体系化设计,实现各类PNT技术在时空基准方面的融合统一、在基础设施方面的融合共享、在跨系统联系方面的融合互通,促进系统层的有机融合。②采用模块化、开放式系统方法,规范标准接口,建立多源融合、“即插即用”软件架构,按需实现适应各类场景的弹性PNT解决方案,促进终端层的弹性融合。③发挥各类建设主体的积极性,利用其资金、技术、市场、应用基础等方面的优势,突出民商体制的创新性、灵活性、低成本导向;形成良性竞争、相互促进、共同发展的运行机制及管理模式,保持“建、用相长”的有机循环,实现体系“快、好、省”建设。

## (二) 加快建设低轨导航系统, 大幅提升卫星导航性能, 追求最为优化的体系贡献率

低轨星座已是卫星导航领域的新技术支撑, 装备发展和博弈的新焦点。当前的卫星导航系统性能已接近米级的精度上限, 而低轨星座以其轨道低、地速高、规模大的特点, 在增强卫星导航系统综合性能方面具有独特优势: 可实现全球分米级甚至厘米级定位, 易实现更高的信号落地功率以提升导航接收机的抗干扰能力, 不依赖海外建站运行, 显著提高星座冗余度<sup>[41,42]</sup>。我国具有卫星导航系统建设的先行优势, 有望快速实现低轨导航增强能力。在国际民商低轨导航增强星座快速发展的背景下, 我国涌现了“微厘空间一号”“箭旅镜像”“天枢一号”等低轨导航增强星座方案, 目前进入规模化组网部署的准备阶段, 在国际上处于领跑态势。

低轨通信星座PNT实质上是一种利用通信信号的无线电导航技术, 也可视为一种减配版的卫星导航技术; 在通信信号覆盖区域向特定用户提供降级的PNT服务, 成为卫星导航的补充与增强, 具有集约高效的“通导”融合特征。然而术业有专攻, 追求共性的努力往往以牺牲个性为代价。卫星导航技术经过数十年的发展, 已将高精度、高连续、全球覆盖等能力发挥到了极致程度。低轨通信星座受星座构型、信号体制等边界约束无法做到最优的PNT性能, 如要实现与卫星导航相同的性能, 极大的工程实现难度将导致综合建设成本不降反增。因此, 需要理性看待低轨通信星座的PNT能力, 尽量契合本国装备发展实际构建特色建设方案, 追求最为优化的体系贡献率。

### 利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

**Received date:** January 15, 2023; **Revised date:** March 18, 2023

**Corresponding author:** Guo Shuren is a research fellow from the School of Humanities and Social Sciences (School of Public Administration) of Beihang University. His major research fields include science and technology policy, government reform and governance. E-mail: gsr888@tom.com

**Funding project:** Chinese Academy of Engineering project “Research on National Spatiotemporal Information Security Strategy” (2022-XY-131)

### 参考文献

[1] 谢军, 刘庆军, 边朗. 基于北斗系统的国家综合定位导航授时(PNT)体系发展设想[J]. 空间电子技术, 2017, 14(5): 1-6.

- Xie J, Liu Q J, Bian L. Development assumption of national comprehensive PNT architecture based on Beidou navigation satellite system [J]. *Space Electronic Technology*, 2017, 14(5): 1-6.
- [2] 李静, 龙强, 臧志斌, 等. 北斗卫星导航系统在电力行业的应用研究[J]. *电力信息与通信技术*. 2022, 20(10): 87-97.
- Li J, Long Q, Zang Z B, et al. Beidou navigation satellite system and its application in power industry [J]. *Electric Power Information and Communication Technology*, 2022, 20(10): 87-97.
- [3] 孟俊, 王洵, 马智伟, 等. 北斗产业化赋能交通运输行业高质量发展[J]. *卫星应用*, 2021 (7): 58-62.
- Meng J, Wang X, Ma Z W, et al. Beidou industrialization enables high-quality development of transportation industry [J]. *Satellite Application*, 2021 (7): 58-62.
- [4] 刘通, 李仲林, 孙长麟. 北斗卫星导航系统的应用分析[J]. *信息与电脑*, 2022, 34(7): 7-9.
- Liu T, Li Z L, Sun C L. Application analysis of Beidou navigation satellite system [J]. *China Computer & Communication*, 2022, 34(7): 7-9.
- [5] 唐斌, 郑冲, 章林锋, 等. 美国导航战新进展与启示[J]. *导航定位与授时*, 2020, 7(4): 110-116.
- Tang B, Zheng C, Zhang L F, et al. New progress and implication of United States navigation warfare [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2020, 7(4): 110-116.
- [6] 李冀. 国外提升卫星信号在拒止环境下导航定位能力的新技术[J]. *导航定位学报*, 2013, 1(2): 55-59.
- Li J. New technologies developed for promoting PNT capability in GPS denial environment [J]. *Journal of Navigation and Positioning*, 2013, 1(2): 55-59.
- [7] 杨元喜. 综合PNT体系及其关键技术[J]. *测绘学报*, 2016, 45(5): 505-510.
- Yang Y X. Concept of comprehensive PNT and related key technologies [J]. *Acta Geodactica et Cartographica Sinica*. 2016, 45(5): 505-510.
- [8] U.S. Department of Transportation. National positioning, navigation, and timing architecture implementation plan [EB/OL]. (2019-10-18)[2023-02-15]. <https://www.transportation.gov/pnt/national-positioning-navigation-and-timing-pnt-architecture>.
- [9] McNeff J. Changing the game changer—The way ahead for military PNT [J]. *Inside GNSS*, 2010, 5(8): 44-51.
- [10] National Security Space Office. National positioning navigation and timing architecture study: Final report [EB/OL]. (2008-09-10)[2023-02-15]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/16923>.
- [11] 赵利平, 席欢, 张永红, 等. 不依赖卫星的新型导航技术发展分析[J]. *卫星应用*, 2016 (5): 45-48.
- Zhao L P, Xi H, Zhang Y H, et al. Analysis on the development of new satellite independent navigation technology [J]. *Satellite Application*, 2016 (5): 45-48.
- [12] Chief Information Officer, U.S. Department of Defense. Strategy for the DoD PNT enterprise [R]. Washington DC: Chief Information Officer, U.S. Department of Defense, 2018.
- [13] U. S. Department of Homeland Security. Resilient positioning, navigation, and timing(PNT) reference architecture [EB/OL]. (2022-06-09)[2023-02-15]. <https://www.dhs.gov/science-and-technology/publication/resilient-pnt-reference-architecture>.

- [14] 杨元喜, 李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT [J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1249–1254.  
Yang Y X, Li X Y. Micro-PNT and comprehensive PNT [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2017, 46(10): 1249–1254.
- [15] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架 [J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 893–898.  
Yang Y X. Resilient PNT concept frame [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica. 2018, 47(7): 893–898.
- [16] 杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT 智能服务 [J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1006–1012.  
Yang Y X, Yang C, Ren X. PNT intelligent services [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(8): 1006–1012.
- [17] 杨长风. 中国北斗导航系统综合定位导航授时体系发展构想 [J]. 中国科技产业, 2018 (6): 32–35.  
Yang C F. Development concept of integrated positioning, navigation and timing system of China's Beidou navigation system [J]. Science & Technology Industry of China, 2018 (6): 32–35.
- [18] 卞鸿巍, 徐江宁, 何泓洋, 等. 国家综合 PNT 体系弹性概念 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(9): 1265–1272.  
Bian H W, Xu J N, He H Y, et al. The concept of resilience of national comprehensive PNT system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9): 1265–1272.
- [19] 王巍, 孟凡琛, 阚宝玺. 国家综合 PNT 体系下的多源自主导航系统技术 [J]. 导航与控制, 2022, 21(3): 1–10.  
Wang W, Meng F C, Kan B X. Multi-source autonomous navigation system technology under national comprehensive PNT system [J]. Navigation and Control, 2022, 21(3): 1–10.
- [20] 美国加紧研制不依赖卫星的新一代导航系统 [J]. 瞭望, 2014, 49: 7.  
The United States is stepping up the development of a new generation of satellite independent navigation systems [J]. Outlook, 2014, 49: 7.
- [21] Government Accountability Office. Defense navigation capabilities: DOD is developing positioning, navigation, and timing technologies to complement GPS GAO-21-320SP [EB/OL]. (2021-05-10)[2023-02-15]. <https://www.gao.gov/products/gao-21-320sp>.
- [22] 卢鋈, 武建峰, 袁海波, 等. 北斗三号系统时频体系设计与实现 [EB/OL]. (2021-12-09)[2022-03-22]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200529>.  
Lu J, Wu J F, Yuan H B, et al. Design and implementation of time and frequency architecture for Beidou-3 system [EB/OL]. (2021-12-09)[2022-03-22]. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200529>.
- [23] 中国卫星导航系统管理办公室. 新时代的中国北斗 [M]. 北京: 人民出版社, 2022.  
China Satellite Navigation Office. China's Beidou navigation satellite system in the new era [M]. Beijing: People's Publishing House, 2022.
- [24] 熊超, 刘宗毅, 卢传芳, 等. 国外卫星导航系统发展现状与趋势 [J]. 导航定位学报, 2021, 9(3): 13–19.  
Xiong C, Liu Z Y, Lu C F, et al. Review and analysis of status and development trend of the foreign satellite navigation systems [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(3): 13–19.
- [25] 葛悦涛, 薛连莉, 李婕敏. 美国陆军 PNT 能力发展趋势分析 [J]. 导航定位与授时, 2019, 6(2): 12–18.  
Ge Y T, Xue L L, Li J M. Analysis of the development of US army PNT capability [J]. Navigation Positioning & Timing, 2019, 6(2): 12–18.
- [26] Xona's private 'precision' GNSS satellite readies for launch [EB/OL]. (2022-05-10)[2023-02-15]. <https://aviationweek.com/aerospace/commercial-space/xonas-private-precision-gnss-satellite-readies-launch>.
- [27] 王大轶, 李茂登, 黄翔宇. 航天器多源信息融合自主导航技术 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018.  
Wang D Y, Li M D, Huang X Y. Spacecraft autonomous navigation technology based on multi-source information fusion [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2018.
- [28] 薛连莉, 翟峻仪, 葛悦涛. 2020 年国外惯性技术与回顾 [J]. 导航定位与授时, 2021, 8(3): 59–67.  
Xue L L, Zhai J Y, Ge Y T. Development and review of foreign inertial technology in 2020 [J]. Navigation Positioning & Timing, 2021, 8(3): 59–67.
- [29] 王巍, 邢朝洋, 冯文帅. 自主导航技术发展现状与趋势 [J]. 航空学报, 2021, 42(11): 525049.  
Wang W, Xing C Y, Feng W S. State of the art and perspectives of autonomous navigation technology [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(11): 525049.
- [30] 杨元喜. 导航与定位若干注记 [J]. 导航定位学报, 2015, 3(3): 1–4.  
Yang Y X. Notes of navigation and positioning [J]. Journal of Navigation and Positioning, 2015, 3(3): 1–4.
- [31] 李海亭, 李伟. 陆基无线电近着陆系统现状与展望 [J]. 现代导航, 2019, 10(6): 418–422.  
Li H T, Li W. Status and prospect of land-based radio approach and landing system [J]. Modern Navigation, 2019, 10(6): 418–422.
- [32] 陈奕宇, 吴苗, 梁益丰. 陆基长波导航定位模式优劣分析 [J]. 舰船电子工程, 2019, 39(12): 58–60.  
Chen Y Y, Wu M, Liang Y F. Analysis and discussion on the advantages and disadvantages of long wave navigation and positioning modes on land [J]. Ship Electronic Engineering, 2019, 39(12): 58–60.
- [33] 邓中亮, 王翰华, 刘京融. 通信导航融合定位技术发展综述 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(2): 15–25.  
Deng Z L, Wang H H, Liu J R. Status and trend of communication-navigation integrated positioning technology [J]. Navigation Positioning & Timing, 2022, 9(2): 15–25.
- [34] 姜坤, 焦文海, 郝晓龙, 等. 脉冲星试验 01 星科学试验与成果 [J]. 航空学报, 2023, 44(3): 526611.  
Jiang K, Jiao W H, Hao X L, et al. Scientific experiments and achievements of XPNV-1 [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(3): 526611.
- [35] 吴德伟, 苗强, 何思璇, 等. 量子传感的导航应用研究现状与展望 [J]. 空军工程大学学报, 2021, 22(6): 67–76.  
Wu D W, Miao Q, He S X, et al. A study of existing status and prospects for quantum sensor in navigation [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2021, 22(6): 67–76.
- [36] 胡小平, 毛军, 范晨, 等. 仿生导航技术综述 [J]. 导航定位与授时, 2020, 7(4): 1–10.  
Hu X P, Mao J, Fan C, et al. Bionic navigation technology: A survey [J]. Navigation Positioning & Timing, 2020, 7(4): 1–10.
- [37] 杨文钰, 李东兵, 隋毅, 等. 2020 年国外不依赖卫星的导航技术

- 发展综述 [J]. 飞航导弹, 2021 (1): 25–30.
- Yang W Y, Li D B, Sui Y, et al. Overview of the development of satellite independent navigation technology abroad in 2020 [J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021 (1): 25–30.
- [38] 张帆. 捷联惯性导航与卫星导航紧组合系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学(博士学位论文), 2021.
- Zhang F. Key technologies for SINS/GNSS tightly coupled integrated navigation system [D]. Harbin: Harbin Engineering University(Doctoral dissertation), 2021.
- [39] 刘家兴, 郑晋军, 聂欣. 辅助 GNSS 对传统和现代化信号综合接收灵敏度的改善 [C]. 南昌: 第十二届中国卫星导航年会, 2021.
- Liu J X, Zheng J J, Nie X. Improvement of overall receiving sensitivity of traditional and modern signals by assisted GNSS [C]. Nanchang: The 12th China Satellite Navigation Conference, 2021.
- [40] Cozzens T. Brad Parkinson offers 5 ways to protect, improve PNT [EB/OL]. (2021-02-01)[2023-02-15]. <https://www.gpsworld.com/brad-parkinson-offers-5-ways-to-protect-improve-pnt/>.
- [41] 袁洪, 陈潇, 罗瑞丹, 等. 对低轨导航系统发展趋势的思考 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 1–11.
- Yuan H, Chen X, Luo R D, et al. Review of the development trend of LEO-based navigation system [J]. Navigation Positioning & Timing, 2022, 9(1): 1–11.
- [42] Khalife J, Neinavaie M, Kassas Z M. The first carrier phase tracking and positioning results with starlink LEO satellite signals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, 2022, 58(2): 1487–1491.