

不依赖卫星的定位导航与授时体系研究

魏毅寅¹, 郑 辛¹, 刘 垒², 徐海刚², 李 俊²

(1. 中国航天科工集团有限公司, 北京 100048;

2. 北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘 要: 定位导航与授时 (positioning, navigation and timing, PNT) 体系是支撑人类社会发展的基础设施。当前以卫星为核心的天基 PNT 应用广泛, 但在卫星拒止环境下面临严峻挑战。通过总结天基 PNT 在国民经济发展与国防建设中的重大作用, 分析天基 PNT 的脆弱性与依赖风险, 明确了对不依赖卫星的 PNT 体系的迫切需求。提出了不依赖卫星的 PNT 体系概念与特征, 即以“惯导+时钟”为核心增强基础 PNT 能力, 利用外源传感器多源融合提高精度保持能力, 在卫星拒止条件下为用户提供可承载的高性能 PNT 服务。基于现有技术基础重点发展微小型、高精度、低成本惯导技术, 微时钟技术以及智能融合技术是有效途径, 能够实现不依赖卫星的 PNT 覆盖性、精确性与可承载性的全面提升。

关键词: 不依赖卫星的定位导航与授时; 多源融合; 定位导航与授时体系; 卫星拒止; 综述

中图分类号: TP273

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2023)05-0001-06

Review on satellite-independent positioning, navigation and timing system

WEI Yiyin¹, ZHENG Xin¹, LIU Lei², XU Haigang², LI Jun²

(1. China Aerospace Science and Industry Corporation Limited, Beijing 100048, China;

2 Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: The positioning, navigation, and timing (PNT) system is the infrastructure that supports the development of human society. Currently, the space-based PNT system with satellites as the core is widely used, but it faces severe challenges in satellite-denied environments. It is cleared that there is an urgent need for the satellite-independent PNT system by summarizing the significant role of space-based PNT in national economic development and national defense construction, and analyzing the vulnerability and dependency risks of space-based PNT. The concept and characteristics of the satellite-independent PNT system is proposed, which is, using “inertial navigation+clock” as the core to enhance basic PNT capabilities, utilizing multi-source fusion of external sensors to improve precision retention ability, and providing users with high-performance PNT services that can be carried in satellite-denied conditions. Based on the existing technological foundation, it is an effective way to achieve comprehensive improvement in the coverage, accuracy, and carrying capacity of the satellite-independent PNT, by focusing on the development of micro, high-precision, and low-cost inertial navigation technology, micro clock technology, and intelligent fusion technology.

Key words: Satellite-independent PNT; Multi-source fusion; Positioning, navigation and timing

收稿日期: 2023-10-10; **修订日期:** 2023-11-03

作者简介: 魏毅寅(1962-), 男, 博士, 中国工程院院士, 主要从事飞行器导航与控制方向的研究。

system; Satellite-denied; Review

0 引言

定位导航与授时信息是支撑现代人类社会正常运转的核心基础信息,是推动交通、金融、通信、电力等行业发展和支撑武器装备精确打击、体系化作战等国防安全建设的关键。其中,基于卫星的定位导航与授时体系,即天基定位导航与授时体系(positioning, navigation and timing system, PNT),建立了统一的时间、空间基准,正在深刻影响着当代社会发展,也显著改变了现代战争形态。然而,随着反卫技术和电子对抗技术的快速发展与普遍应用,针对卫星的直接毁伤和信号干扰使天基 PNT 面临着巨大挑战,其脆弱性日益凸显。

2021年5月,美国政府问责局发布专项报告,质疑美国防部将全球定位系统(global positioning system, GPS)优先作为 PNT 能力核心基石的做法,提出应“考虑最具弹性的技术作为应用于军事任务的 PNT 基石,而不是默认使用 GPS”^[1]。这反映出 PNT 信息安全问题已引起美国政府的高度重视。如何在卫星拒止条件下实现精确定位导航与授时,已成为亟待解决的重大现实问题。

1 天基 PNT 现状

以 GPS 和北斗为典型代表的天基 PNT 体系为军民领域提供了一种广泛而普惠的定位导航与授时途径,已成为支撑国家经济发展与国防建设的重大基础设施。同时,天基 PNT 也存在信号覆盖受限、信号弱易受干扰、星座和地面控制系统存在受攻击风险等脆弱性问题。

1.1 国民经济发展高度依赖天基 PNT

在国民经济领域,新兴业态与商业模式大多以天基 PNT 服务为基础,前沿技术的市场转化通常也是以 PNT 信息可用为前提,海量社会组织与生命个体依赖于不间断的 PNT 服务。天基 PNT 已成为国民经济领域高精度位置和时间服务不可或缺的基础设施,为电信网络/移动通信的高速信息交互、电力设施运行、实时金融服务、个人出行与智能交通、公共安全和灾害监测、精准农业、港口物流、大尺度地球物理/气象科学研究等提供了精确的时空信息,已成为国民经济发展的基础。一旦天基 PNT 服务中断或受到操控,国民经济将遭受重

创^[2],社会治理可能出现混乱与倒退。

美国国土安全部评估“美国部分关键基础设施越来越依赖 GPS 和基于 GPS 的服务”,“从长远看,这种威胁会对美国国家、国土和经济安全构成越来越大的风险”^[3]。2017 年英国咨询机构“创新英国”(Innovate UK)评估,天基 PNT 中断对英国经济的影响可达每天 12.5 亿美元。2019 年美国商务部和国土安全部预估天基 PNT 能力丧失对经济的直接影响达到每天 10 亿美元^[3]。此外,由于天基 PNT 与电力、交通、金融、物流等行业关键基础设施深度集成,其服务中断所造成的间接损失更为严重。

1.2 打赢现代高科技战争高度依赖天基 PNT

在国防领域,天基 PNT 在各类武器装备精确打击与体系化协同作战中发挥了至关重要的作用,成为打赢现代高科技战争的关键。

(1) 武器精确打击能力高度依赖天基 PNT

天基 PNT 为武器装备提供高精度导航信息,在现代战争中实现了“外科手术”式精确打击。当前在精确打击武器、无人平台、侦察感知等装备中,70%以上依赖卫星;制导炮弹、单兵和微小型无人装备等完全依赖卫星。俄乌冲突伊始,俄罗斯发射了“口径”巡航导弹、“伊斯坎德尔-M”弹道导弹等百余枚导弹,采用“惯性+卫星+雷达/光学末制导”方式,对乌克兰军事目标实现精准打击;乌克兰使用美国的“海马斯”火箭炮,采用卫星导航,实现快速精确攻击。可以说没有天基 PNT 的支撑,大量武器装备就无法实现精确打击。

(2) 体系化协同作战高度依赖天基 PNT

天基 PNT 统一的时间、空间基准,显著增强了战场实时感知能力、同步通信能力及后勤支援行动能力,支撑实现无特征地形机动、全天候昼夜跨域协同、分布式指挥与控制等军事行动,使部队联合作战能力大幅提升,带来了作战模式的重大变革。俄乌冲突中,乌方通过美国麦克斯科技公司(Maxar)及地球观测公司(Capella Space)卫星侦察到了俄罗斯地面部队动向,以天基 PNT 信息辅助实现战场实时侦察感知;乌军使用美国电子侦察装备探测“里尔-3”“克拉苏哈-4”等俄电子战装备信号,准确定位后使用自杀式无人机和反辐射导弹进行有效打击,GPS 信息服务支撑了从侦察到精确打击的协同指挥与控制全过程。可以说,没有天基 PNT 的支撑,体系化作战将无法

有效运转。

1.3 大国博弈背景下天基 PNT 的脆弱性逐渐凸显

(1) 天基 PNT 服务范围受限

只有稳定接收到卫星信号才能实现准确定位,而在城市地下空间、室内、山区、隧道、矿井、丛林,以及水下等特殊区域,卫星信号无法到达或不能稳定覆盖,导致天基 PNT 服务范围受限。

(2) 导航信号弱,易受干扰和诱骗

电子干扰或欺骗环境下无法准确定位。其中卫星导航信号弱,易受干扰,4~8 W 功率的干扰就可影响 200 km 范围。2017 年 4 月,美国对叙利亚的沙伊拉特空军基地发射 59 枚战斧导弹,36 枚受俄罗斯的“杠杆-AV”电子战系统干扰偏离目标。俄乌冲突中,俄罗斯在 25 万个移动基站安装 GPS 干扰机,有效限制了北约对克里米亚、黑海等地区的实时侦察与打击,同时在战场上对 GPS 信号进行实时干扰,使乌军被迫放弃使用无人机进行实时侦察。此外,通过信号诱骗也可以有效影响使用,2018 年,俄罗斯在叙利亚使用 GPS 欺骗信号诱使敌方多架携带爆炸物的无人机在指定地点降落^[3]。

(3) 导航星座和地面控制系统存在受攻击风险

针对卫星星座研发的反卫导弹、激光/电磁武器发展迅猛,针对地面控制系统的网络攻击日趋频繁。2021 年 11 月,俄罗斯利用直升式反卫星武器 DA-ASAT 击中轨道高度约 670 km 的“宇宙-1408”卫星^[4];2022 年 5 月,俄政府高级官员声称,俄军已批量装备“佩列斯韦特”激光武器系统,可在 5 s 内致盲轨道高度在 1500 km 左右的低轨卫星;美国联

邦商业机会网(federal business opportunities, FBO)披露,美国曾在 GPS 地面控制系统升级过程中,出现 GPS 接收机不兼容问题,导致美空军至少 86 种武器系统瘫痪。

综上所述,对天基 PNT 的高度依赖已成为关系国家安全与经济发展的重大现实问题,必须寻求一种替代和补充的技术途径,要求其在满足精度需求的同时,还应具备突出的自主性与安全性,难以被干扰和破坏,覆盖范围与时间不受限制,且体积、质量、功耗和成本(size, weight, power and cost, SWaP-C)可承受,也就是一种“全空域、全时域、高精度、高可靠、高效费比的定位导航与授时服务能力”。为此,提出基于“惯导+时钟+多源融合”的不依赖卫星的定位导航与授时体系。

2 不依赖卫星的 PNT 体系

2.1 概念内涵

不依赖卫星的定位导航与授时体系旨在卫星拒止环境下提供全空域、全时域、高精度、高可靠、高效费比的定位导航与授时服务能力,以发展“惯导+时钟”提升基础 PNT 能力作为保底手段,利用人工智能技术,融合陆基无线电、通信网络、电视广播、视觉、天文、地磁等各类 PNT 手段,实现能力增强、补充与无缝衔接,在典型使用场景下具备与天基 PNT 相当的功能与性能,有效解决国防建设和经济发展领域面临的 PNT 信息安全重大问题。其概念与内涵如图 1 所示。

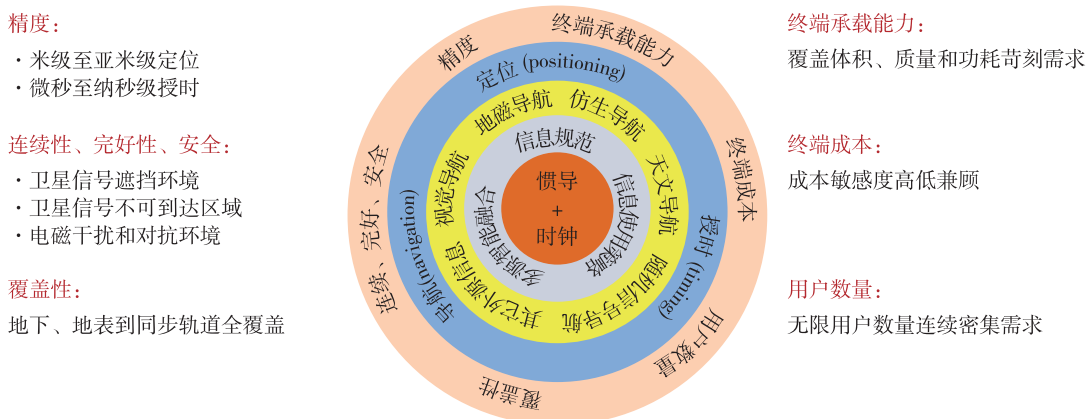


图 1 不依赖卫星的定位导航与授时体系概念内涵

Fig. 1 Concept of satellite-independent PNT system

实现不依赖卫星的 PNT 体系,关键在于:一是发展惯性导航与微时钟技术,提升精度,增强基础导航与授时能力;二是发展即插即用的多源智能融合技术,延长精度保持时间,全面提升 PNT 性能。

2.2 惯性导航技术

惯性导航系统通过自身内置的陀螺和加速度计敏感,计算获得位置、航向、速度等导航信息,从

原理上不受外界电磁干扰,具有突出的自主性,在不依赖卫星的 PNT 体系中,是基础导航能力和自主性的根本保证。

惯性导航系统的核心是陀螺,基于其工作原理,惯性导航技术可划分为四代:机电陀螺惯导技术、光学陀螺惯导技术、振动陀螺惯导技术和原子陀螺惯导技术,如图 2 所示。

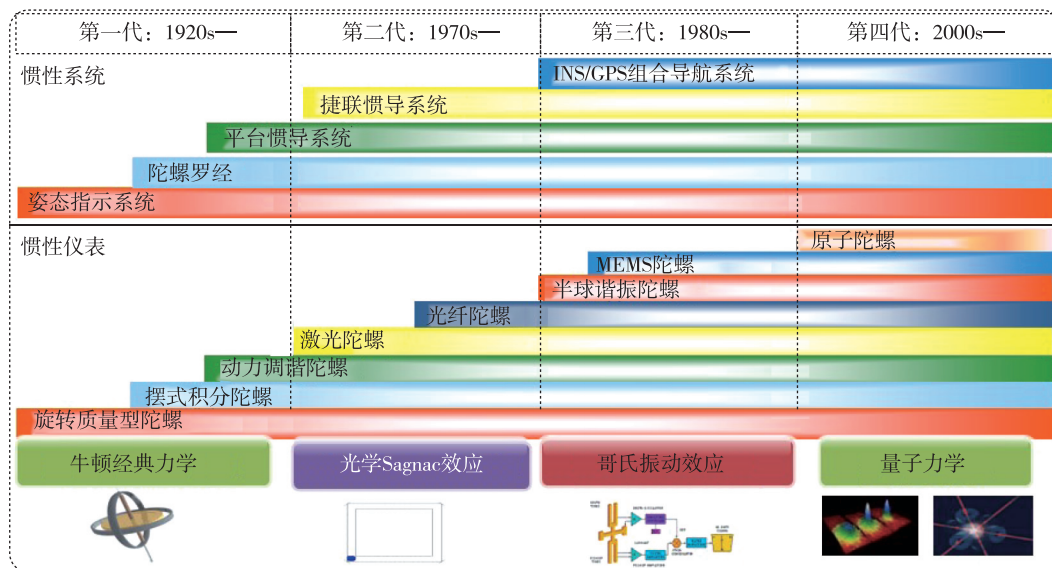


图 2 四代惯性导航技术

Fig. 2 Four generations of inertial navigation technology

第一代是机电陀螺惯导技术,特点是精度高,但体积、质量大,价格昂贵,典型产品有静电、三浮、动调等陀螺及平台惯导,主要满足早期核潜艇、洲际导弹等战略装备精确打击与导航控制需求。

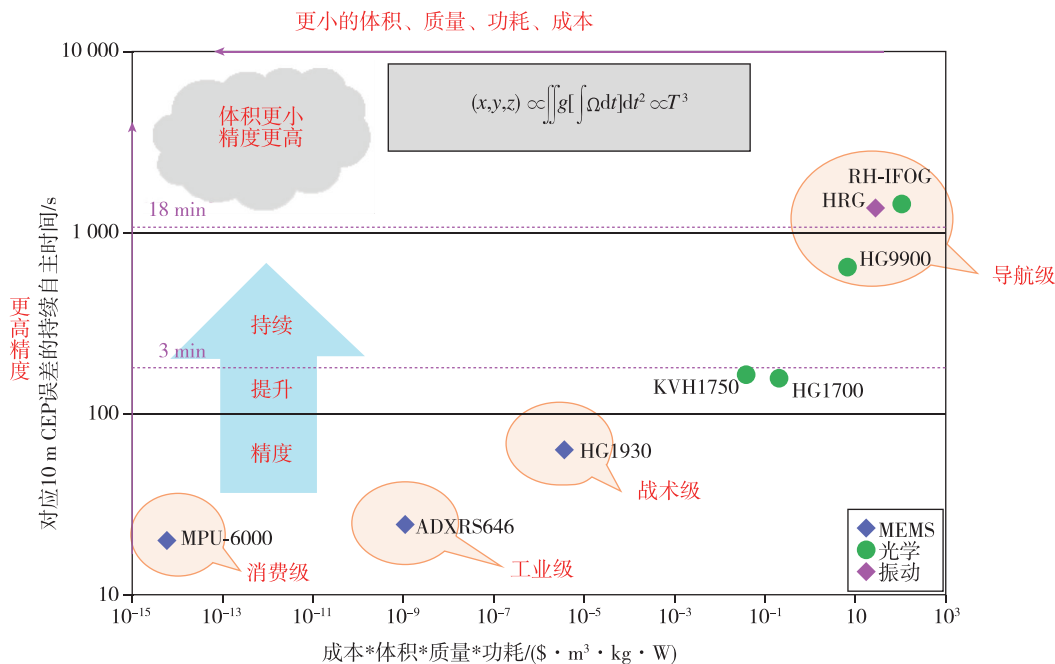
第二代是光学陀螺惯导技术,特点是启动快、动态范围大、成本适中,典型产品有光纤、激光等陀螺及捷联惯导,目前已广泛应用于舰船、飞机、导弹、战车等领域,替代第一代机电陀螺惯导,满足了大量战术武器及部分战略武器与平台自主导航需求。未来主要向两个方向发展:一是超高精度光学陀螺,大幅提升精度,全面满足战略武器装备发展需求;二是集成光学陀螺,大幅降低体积、质量、功耗与成本,满足战术武器不断发展的综合需求。

第三代是振动陀螺惯导技术,特点是体积更小、成本更低,典型产品有半球谐振、微机电等陀螺及捷联惯导。其中,微机电惯导与卫星导航组合已广泛用于制导弹药、微小型无人装备、单兵等领域,满足了常规环境下微小型装备的导航需求;半球谐振陀螺惯导已开始战术武器装备中逐步推广应

用^[5]。未来主要向两个方向发展:一是高精度硅微机电陀螺惯导,实现一定时间内 10 m 自主导航精度,且体积、质量、成本与卫星导航终端相当,满足卫星拒止环境下微小型装备导航需求;二是半球谐振陀螺惯导,实现更长时间内高精度自主导航,以更优的 SWaP-C 综合性能满足卫星拒止环境下战略、战术武器装备导航需求。

第四代是原子陀螺惯导技术,具有超高精度潜力,主要方向是核磁共振陀螺、无自旋交换弛豫 (spin-exchange relaxation-free, SERF) 陀螺、原子干涉陀螺等,目前处于实验室探索研究阶段。

整体来看,惯性导航技术的发展就是在持续提升精度的同时不断优化体积、质量、成本、功耗等综合性能,从而实现所有武器装备“用得上、用得起”,如图 3 所示。特别是,通过进一步发展第二代惯导技术,全面发展第三代惯导技术,完全能够支撑不依赖卫星的 PNT 体系对基础导航能力与自主性的核心需求。

图3 惯导技术发展趋势^[6]Fig. 3 Inertial navigation technology development trend^[6]

2.3 微时钟技术

惯导系统内置晶振,具备基本的守时/授时能力,通过采用高精度微时钟替换晶振,可以实现守时/授时精度数量级提升,满足卫星拒止环境下国防领域体系化协同作战与经济领域时间同步的需求。

目前,微时钟技术快速发展,芯片原子钟典型产品稳定度优于 3×10^{-10} ,硅基微时钟稳定度优于 1×10^{-8} ,已具备工程应用条件。未来,通过攻关可进一步提升稳定度、体积等综合性能,有力支撑不依赖卫星 PNT 体系基础守时/授时能力与自主性需求。

2.4 多源融合技术

惯导与微时钟的误差会随时间累积,当其他 PNT 信息可用时,通过多源融合技术修正累积误差,能使 PNT 信息精度保持时间大幅延长。其重点是制定多源融合策略,突破多源智能融合算法,进一步提升各类 PNT 传感器性能,并加强 PNT 基础支撑能力建设。

(1) 多源融合策略

多源融合需充分利用一切可用的外部 PNT 信息,涉及多种传感器与信息源,多种传感器技术机理、接口模式、时空基准都存在差异,因此需要进行规划与设计,制定统一标准规范,保障多种 PNT 信息的可用、能用与好用。重点包括三方面:一是在多源信息基准的传递方面,针对传感器及信息类别

差异,制定时空基准转换、传感器接口与 PNT 信息规范,形成多源信息基准传递策略;二是针对多源 PNT 信息融合需求,制定信息评价标准,形成 PNT 信息优选与故障重构策略;三是针对同类信息存在共模干扰问题,形成 PNT 信息冗余配置策略,提升可靠性与强壮性。

(2) 多源融合算法

多源融合算法通过采用因子图等数学工具,来处理组合导航系统中导航传感器接入接出、环境动态干扰等因素的影响,实现所有 PNT 信息无缝融合,获得最优导航结果。发展重点包括两方面:一是针对复杂战场环境下运动状态、空间环境、信息环境等不确定扰动影响,实现多源导航信息可用性、可信性和完备性的定性和量化,支撑多源导航信息高效利用;二是针对光、电、磁、力、声传感器信息的数学模型、噪声类型、信号质量等差异,从算法与软件层面实现异源、异构、异质、异步多源导航信息建模与智能化融合。

美国空军研究实验室采用惯性+视觉/磁力计/气压计等传感器完成多源融合技术验证,在无卫星信号的环境下实现高精度定位导航,定位精度优于 10 m,并先后在各类舰艇、飞机和车辆上完成了演示。

(3) 多源 PNT 基础能力

基础能力体现在基础设施和基础信息数据库两方面,为多源 PNT 提供信息源或参考基准的支撑。

其中前者主要包括:以甚低频定位系统、增强罗兰为代表的陆基 PNT 系统,以及提供可用于定位的无线电信号的通信基站、无线网络等设施。特别是甚低频定位系统,具有全球可用、抗干扰能力强、理论精度与 GPS 相当的优势,美国海军在 2019 年完成的测距试验中,定位精度 450 m,预测修正后误差小于 40 m^[6],是天基 PNT 的潜在备份系统之一。

基础信息数据库是数字化与模型化的时空参考基准,包括地球物理信息(地磁、重力、地形、景象等)、天体物理信息(恒星、脉冲星)等,相关传感器通过数据匹配实现 PNT 信息转换与输出。目前景象匹配可实现米级定位,天文导航可实现角秒级姿态测量,未来地磁、重力、脉冲星等基础信息数据库需进一步提高分辨率与精度,满足深海、深空等特殊领域 PNT 需求。

(4)多源 PNT 传感器

多源融合是不依赖卫星的 PNT 系统的性能倍增器,其精度提升效果与用户可承载性很大程度上取决于 PNT 传感器。如,无人机采用惯导+相机融合的方式可使定位精度达到 10 m;无人车采用微惯导+激光雷达融合实现了亚米级定位精度。未来发展重点是各类 PNT 传感器模块化、芯片化,并与惯导系统实现集成应用;如气压传感器、磁传感器已经实现商用芯片化,重点在于集成应用与融合模式创新;视觉、天文、重力、仿生等传感器重点向模块化、芯片化、低成本方向发展,并实现与惯导的一体化集成。

整体来看,通过进一步发展多源融合策略、算法、PNT 传感器与基础支撑能力,可有效抑制惯导与微时钟的误差累积,支撑不依赖卫星的 PNT 体系对长时间精度保持能力的需求。

2.5 应用前景

不依赖卫星的定位导航与授时体系,在卫星导航不可用或强电子对抗环境下,具备以下能力:

1)覆盖性:在强对抗环境下和地下空间、室内、山区、隧道、矿井、丛林、水下、深空及地外星体等区域,具备海、陆、空、天全空域覆盖的高精度定位导航与授时能力,并具有极高的连续性、完好性和可用性。

2)精确性:与卫星导航相当,满足高速通信、智慧城市、智能交通、精准农业和武器装备精确打击、无人平台精确到达、态势侦察感知、实时指挥控制

等国民经济与国防建设发展需求。

3)可承载性:体积、质量、功耗及成本显著降低,可满足民用海量、无限、连续、密集定位导航与授时的需求和武器装备低成本、大批量的需求。

3 结论

综上所述,不依赖卫星的 PNT 体系具有重大的现实需求和良好的技术基础,我们应抓住战略机遇,全力推进,尽快建设形成能力,覆盖水下、地面、空中、太空、深空等全空域,全面解决卫星拒止情况下 PNT 安全的现实问题,满足国防与经济领域的重大需求。

参考文献

- [1] GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. Defense navigation capabilities: DOD is developing positioning, navigation, and timing technologies to complement GPS[EB/OL]. <https://www.gao.gov/products/gao-21-320sp>. [2021-05-11].
- [2] THE WHITE HOUSE. Executive order 13905 strengthening national resilience through responsible use of positioning, navigation, and timing services[EB/OL]. <https://trumpwhitehouse.archives.gov/presidential-actions/executive-order-strengthening-national-resilience-responsible-use-positioning-navigation-timing-services/>. [2020-02-12].
- [3] US DOD. Strategy for the department of defense positioning, navigation and timing (PNT) enterprise-ensuring a US military PNT advantage[EB/OL]. <https://rm-tfnd.org/wp-content/uploads/DoD-PNT-Strategy.pdf>. [2019-08-15].
- [4] GOVERNMENT ACCOUNTABILITY OFFICE. GPS Alternatives: DOD is developing navigation systems but is not measuring overall progress[EB/OL]. <https://www.gao.gov/products/gao-22-106010>. [2022-08-05].
- [5] DIMITRIOS D, GUILLAUME G. High-end inertial sensors for defense, aerospace & industrial applications (market and technology report 2020)[R]. Lyon, France: YOLE DÉVELOPPEMENT, 2020.
- [6] BURKE J. DARPA positioning, navigation, and timing (PNT) technology and their impacts on GPS users[C]// Alexandria: 23rd Meeting of Space-Based Positioning, Navigation and Timing. National Space-Based PNT Advisory Board, 2019.

(编辑:黄利华)