

国家综合PNT体系弹性概念

卞鸿巍, 许江宁, 何泓洋, 王荣颖, 马恒

引用本文:

卞鸿巍, 许江宁, 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 Hongwei, XU Jiangning, HE Hongyang, et al. The Concept of Resilience of National Comprehensive PNT System[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(9): 1265–1272.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

激光雷达点云树木建模研究进展与展望

Progress and Prospect of LiDAR Point Clouds to 3D Tree Models

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(2): 203–220 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190275>

模糊决策理论的地磁图适配性分析

Suitability Analysis of Geomagnetic Map Based on Fuzzy Decision Theory

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 118–124 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180280>

可持续城市化与国土空间优化

Sustainable Urbanization and Territorial Spatial Optimization

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 1–11 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20200365>

基于相空间重构和高斯过程回归的对流层延迟预测

Tropospheric Delay Prediction Based on Phase Space Reconstruction and Gaussian Process Regression

武汉大学学报·信息科学版. 2021, 46(1): 103–110 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190018>

GPS测得的2018年夏威夷6.9级地震与火山喷发地壳运动

Crustal Motions Observed from GPS Observations for the M6.9 Earthquake in Hawaii and the Eruption of the Kilauea Volcano in 2018

武汉大学学报·信息科学版. 2019, 44(8): 1191–1197,1204 <https://doi.org/10.13203/j.whugis20180463>



国家综合PNT体系弹性概念

卞鸿巍¹ 许江宁¹ 何泓洋¹ 王荣颖¹ 马恒¹

¹ 海军工程大学电气工程学院,湖北 武汉,430033

摘要:对当前中美两国各自提出的弹性PNT(positioning, navigation, and timing)概念进行了深入分析,并指出相互之间的差异和问题。特别针对未来国家综合PNT体系的主要需求特点,从弹性概念的内涵入手,提出PNT体系弹性能力的指标可分为外力干扰特性、内在技术特性和性能效果特性三类;同时,考虑到不同层次的PNT体系设计差异问题,将PNT弹性化问题分为用户级弹性、系统级弹性和体系级弹性三个层次。笔者试图通过上述工作为中国在PNT体系领域的理论研究工作提供帮助。

关键词:PNT体系;弹性PNT;PNT弹性指标

中图分类号:P228

文献标志码:A

简言之,定位导航授时(positioning, navigation, and timing, PNT)体系核心目标有3个,分别为定位服务、导航服务和授时服务。定位用于所在空间所关注的动、静态目标与节点的定位支持;导航用于所在空间载体的机动航行的正确引导服务;授时用于所在空间各类目标和节点的时间授时与保持。国家PNT体系即为建立中国关注的时空物理区域的时空基准基础设施,提供用户PNT信息支持的技术产品以及应用运行组织与管理的综合体系。

2020年7月31日,中国北斗三号系统正式开通服务,国家又明确提出了建设北斗综合PNT体系的宏伟目标^[1]。未来,中国将建成更加泛在、更加融合、更加智能的综合PNT体系^[2-7]。瞄准这一重大需求,针对北斗系统的脆弱、盲区以及单一PNT技术的不足,提出研究适合中国的、以北斗为核心、多源PNT机理互补与信息融合的国家综合PNT体系顶层架构的设计问题意义重大。近年来,在中国PNT研究领域,“弹性”的概念逐渐引起国内本领域的关注。追本溯源,国际上最早将“弹性”与PNT体系相联系是2017年杨元喜院士发文提出的弹性化PNT体系^[4]概念,2020年,科技部又发布“地球探测与导航”重点研发专项项目指南,其中提出国家PNT体系弹性化架构设计与关键技术示范验证的项目需求,以此为标

志,综合PNT体系的“弹性化”正式成为国家层面PNT体系的一个研究热点。

由于PNT领域专业跨度极大,不同领域间的专业交流需要基于基本一致的概念理解。而一个重要的新概念的定义和内涵必须首先进行深入研究 and 明确,这是开展相关研究工作,特别是顶层设计规划的重要前提。为此,本文对当前中美两国各自对PNT与“弹性”能力和“弹性化”架构的联系与差异入手,通过深入梳理分析,特别针对未来国家综合PNT体系的主要特点,从“弹性”概念的内涵入手,分析提出PNT体系弹性性能指标种类,通过对综合PNT体系进行层次划分,进一步探讨分析不同PNT体系层次弹性的内涵与内容。通过上述工作,试图能够对推进中国PNT体系领域的相关理论研究工作提供帮助。

1 美国弹性概念辨析

1.1 美国PNT弹性概念注重能力特征

“弹性”是近年来美国PNT领域频现的概念,如弹性PNT(resilient PNT, RPNT),类似概念还有美国国防部提出的可信PNT(assured PNT, AsPNT),美国联邦航空局提出的可选择的PNT(alternative PNT, AlPNT)等;类似的表述还有柔性PNT(flexible PNT, FPNT)和自适应PNT

收稿日期:2021-05-17

项目资助:国家自然科学基金(41804076)。

第一作者:卞鸿巍,教授,博士生导师,主要从事惯性导航技术及应用方面的研究。bianhongwei@yahoo.com.cn

通讯作者:何泓洋,博士,讲师。xgdhehongyang@163.com

(adaptive PNT, AdPNT)^[8-16]等。

在一段时期,美国并未对各种PNT弹性相关概念进行统一和明确,上述提法更多的是体现出美国不同部门从各自不同的侧面将“弹性”视为一种重要的PNT能力,这一能力与精确、快速开发、可靠性、互补、稳健等能力特性并列。深入分析美国各种弹性PNT概念频繁提出的背景原因,可以看到是在当前美国PNT发展阶段特别针对GPS(global positioning system)的脆弱性而提出的。美国对GPS的评价^[17-21]是:这一系统总体上是一个老旧系统,已经长达半个世纪。其脆弱性体现在其原理的脆弱、信号的脆弱和技术的脆弱等方面。并认为GPS阶段是其PNT发展的初级阶段,而PNT体系的需求及建设牵引将是促使GPS技术全面升级的重要机遇和抓手。“弹性”便是在这一大背景下,与其他各种概念竞相提出,可能源自不同的侧重,但其宗旨和目的却是高度共识,即达到不依赖GNSS(global navigation satellite system)情况,确保以PNT能力为基础的各项系统和任务的有效达成。

这一概念同时也成为国际关注的热点,目前一些跨国军工企业对弹性PNT给出的定义为^[25]:弹性PNT是通过将定位、导航和定时技术与非传统和新兴技术的融合,以提高海、陆、空、天等各领域关键任务应用的可靠性、性能和安全性。这一定义也基本体现出美国弹性PNT的要点。

1.2 美国实现PNT弹性能力的主要方式

美国弹性PNT建设的目标是在更加复杂和恶劣条件下实现更加强大的PNT能力。围绕这一目标,在技术路线方面主要从强化GPS和拓展非GPS两个方向入手;在系统技术层级方面,则同时注重和兼顾应用终端与宏观系统不同层面。最终将各类技术和系统无缝集成,将全部的PNT资源和能力整合为一个紧密的整体。

1) 强化GPS方面与拓展非GPS方面

在强化GPS方面,美国十分明确GPS在PNT体系中的核心地位,并强调在支撑PNT体系方面没有其他系统可以取代GPS。在这一领域,美军一方面大量投入促使GPS系统自身不断升级,如将卫星数量增至30颗以上,增加星上信号功率可调、高速星间星地链路、点波束增强、搜索与救援和被动激光测距等导航战能力;2018年又开始研发新一代GPS III F卫星,并计划2034年前完成部署;2019年美空军首批先锋项目中即加

入研制NTS-3(navigation technology satellite-3)GPS地球静止轨道补充卫星星座,在NTS-3中将验证多种综合先进技术和新的概念操作,如遭遇电子威胁下的卫导新信号部署的在轨可再编程等快速恢复能力、相控阵天线波束操控定向增强等。验证成熟的技术将不断支撑GPS系统顺利过渡至下一代,以有效增强美国PNT能力。另一方面不断研发用户层级的各种抗干扰新技术,如美国陆军的“阔盾”(BroadShield)技术,美空军的“奇米拉”(Chimera)码片-电文数据完整性认证技术等。

在拓展非GNSS方面,则是广泛拓展技术途径,无所不用,没有技术限制。内求自主,以从惯性装置和量子钟等为代表,产品覆盖从低端到高端,如突出强调利用小型激光陀螺及量子钟技术构建小型化、便携式惯性基自主模块,可以应用于海、陆、空、天、潜、地、室等各类平台;可穿戴的个人救援设备(personal rescue device, PDR)等以微PNT技术为主要特征的技术装备群以及使用冷原子干涉测量技术进行高精度导航而无需长时间依赖外部位置确定的精密惯性导航系统(precision inertial navigation systems, PINS)。外求多源、异源、全源。拓展人为信息源设施建设,同时大量利用各类自然信息源。在人为拓展信息源设施建设方面,开展增建低轨卫星网和星基授时定位信号源发布、eLORAN(enhanced loran)的增强和完善,以及其他备用PNT信号源建设等^[22]。充分利用自然信号源方面,采用包括各类机会信号(signal of opportunity, SoOP)接入、环境物理场信号利用、智能无人平台的同步定位与建图(simultaneous localization and mapping, SLAM)技术等。

2) 应用终端层面与宏观系统层面

PNT弹性能力最终体现为终端的PNT能力,相应的PNT终端是多种弹性PNT技术的汇聚点,即应用终端层面,表现为微观层面的小平台终端硬件的集成化、小型化和模块化;软件则基于更加灵活的快速模块化开发架构,采取多源、全源等多种新型信息融合理论和算法。在宏观层面,注重大系统的节点协同组网,以及在更大的体系层面,借助云平台、大数据、人工智能等体系技术实现对特定任务和功能的体系支持,如美国陆军开发的配合支持PDR的个人救援支持系统(personal rescue signal system, PRSS)等。所以,从硬软件集成技术与体系层面的网络化信

息化大数据等技术提升PNT弹性性能。

总之,现阶段美国着眼弹性PNT的发展目标希望实现在体系能力上能够从GPS为主、其他方式共存的方式向面向PNT信息服务能力支持的无缝紧密的完整体系转变。在具体应用上,如所谓应用场景上,有充足的独立于GPS之外的手段可供选择。总之,确保具备明显强悍于对手的PNT能力优势^[23]。

必须指出,尽管总体上美国在这一方面有着明确的投入,并取得了有代表性的技术与装备进展。但美国十分清醒地指出^[26],这条建设道路并不平坦。他们对当前真实的技术发展评价是:精度不高、使用不便、研发速度慢、短期推广难。这些困难应当是合理可信的,体现了未来世界各强国PNT体系建设以及战略竞争中都必须面对和克服的困难。

2 中国弹性PNT概念的发展与分析

2.1 中国弹性PNT概念注重架构设计

与美国PNT建设采取多领域、多系统、先分头并进、后统筹整合的发展策略不同,中国更强调符合国情的、稳健的PNT体系顶层设计与规划,并且更加注重PNT体系架构设计的“弹性化”。总体来看,美国的弹性PNT着重于“能力”,强调信息源的灵活运用;而中国学者提出的“弹性PNT”包括信息源弹性集成、函数模型弹性优化、随机模型弹性调整以及多源数据融合方法的弹性,其中弹性集成与美国提出的弹性PNT类似,而弹性函数模型和弹性随机模型以及弹性数据融合则是中国学者特有的。中国弹性PNT的概念是直接着眼未来PNT体系架构设计的核心理念,由重要的能力特性上升为架构设计的核心思想。这是“弹性”概念的技术内涵在PNT体系建设中多方位的深化和拓展,也成为未来中国特色的PNT体系一种设计理念。

为深入准确理解这一概念,需要深入分析中国现有的弹性PNT的定义,即弹性PNT以综合PNT信息为基础,以多源PNT传感器优化集成平台,以函数模型弹性调整和随机模型弹性优化为手段,融合生成适应多种复杂环境的PNT信息,使其具备高可用性、高连续性和高可靠性^[24]。

可以看到,中国弹性PNT以综合PNT信息为基础,并主要从以下4个方面进行诠释:(1)架构角度:基于不同原理、不同信息源的PNT系统需形成网络;信息要多元化,功能要空天地一体

化,运控手段要云平台化。(2)终端角度:传感器的高度集成化和小型化,PNT终端要稳健化^[25-27]。(3)信息角度:PNT的时空基准要归一化,PNT信息融合要自适应化。(4)应用角度:服务模式要智能化,实现智能化服务^[4]。

在综合PNT的核心技术方面,文献[4]提出加强多项关键技术的研究,如多源信息的同化和归一化问题、超稳芯片级原子钟技术、超稳惯导器件和自主导航传感器、多源传感器的芯片化集成、量子导航系统及组合导航理论与装备等;并对多源PNT传感器优化集成平台、函数模型弹性调整和随机模型弹性优化等进行了较为详细的阐释。

2.2 国家PNT体系架构特点分析

根据PNT技术的需求与发展,未来国家PNT体系架构的建设有以下主要特点。

1)未来PNT体系是基于现有BDS(BeiDou navigation satellite system)系统延拓的PNT全空间覆盖体系,其面向的全空间体系将覆盖中国关注的深空、水下、室内、地下等多种复杂场景,这些不同场景的需求特殊、技术限制差异大,是当前PNT体系建设中较为薄弱的地方。与BDS系统2020年前主要着眼全球开阔区域的PNT服务建设不同,在未来PNT建设阶段,BDS的作用不仅是现有系统的拓展、深化和完善,而且还将作为全球系统PNT架构的主干,成为拓展至各不同特殊场景的PNT基准信息支撑;同时BDS也可利用其报文通讯或其他通讯结合的方式实现对不同拓展领域PNT状态监测与控制支持,形成全空间PNT体系的信息基准支持、状态监控和信息收集等的信息主干,并围绕BDS,将未来国家全空间PNT体系打造为一个整体信息体系。

2)综合PNT体系是以弹性为特征的整体体系

未来关注的深空、水下、室内、地下等不同应用场景,均为BDS系统信息传输阻遏和受限的区域。不同领域由于所在空间介质的差异,其技术体制均不同。如深空将更加借助于脉冲星等太空自然天体资源,以及光学、无线电等观测手段;水中则更加依赖惯性、水声和海洋物理场,以及相应的水声、重力、地磁等多源获取手段。这些技术体制不同,展现出的体系拓扑结构和装备形态也不同。在顶层构建规划的过程中,不仅要深刻分析各特殊应用领域需求、体系架构、产品技术形态、运行管理等,同时还要充分研究和实现

不同介质间系统的信息传输、共享与融合利用。

简言之,国家PNT体系既要支持各应用领域自成体系,同时又要联合形成全空间、全时的大体系,其着眼于实现体系、技术、信息、应用的全空域全时域覆盖。因此必须具备系统实体架构、技术架构、运行架构、应用架构的弹性。所以可以认为,PNT架构的弹性是架构拓扑的一致性、功能适应的强壮性、形态应用的灵活性、技术发展的开放性、体系覆盖的普遍性的总体结合。

2.3 中国PNT弹性概念的要点

分析目前中国弹性PNT的代表性论述,其要点如下:

1)弹性PNT是在综合PNT基础上的弹性。在PNT架构等要点方面,国内文献以文字表述为主,尚未提出具体的架构解析模型或拓扑模型等;所提出的弹性PNT注重硬件平台的集成化设计与弹性融合理论研究。在平台集成方面,尚有许多具体内容需拓展深化。如用户终端弹性能力达成的基础仍旧以惯性基多源信息融合技术为主^[28-30],所以基于惯性基的相关集成技术仍旧是未来PNT终端具备弹性能力的关键。

2)在弹性PNT相关理论方面,目前提出的主要理论仍属经典的导航最优估计理论范畴,表述上还有较大拓展空间。一是在最优估计领域,尚未将近年来多源导航、随机信号导航、链状因子图、联邦滤波、多模型并行滤波等适应动态接入的新算法架构纳入^[31-33];二是尚未纳入针对信息融合全过程的信息处理流程,如信号故障检测、可用性分析,特别是备受关注的抗干扰防欺骗等信息处理;三是尚未将事后处理、伴随学习、机器学习等重要的建模与估计方法全面纳入信息处理统一框架;四是全源中对于环境信息导航基准判断识别利用与导航路径规划的双重处理尚未提及,而这类技术不仅与环境匹配等导航手段密切相关,同时还是导航引导的核心内容,SLAM算法即为此类技术的典型代表。总之,在系统研究面向未来弹性PNT的信息融合方法方面,尚需构建一个抽象框架将相关方法能够尽可能统一纳入。

3)中国弹性PNT架构中已明确提出将云平台作为PNT完整体系的信息主干架构,同时基于云平台等网络和计算能力提供信息软件服务内容,其中运控云平台化、服务智能化等值得关注。在未来进行弹性PNT体系设计中,上述思想均有着复杂和丰富的拓展。国家弹性PNT架构

涉及多种应用场景,每种应用场景其实就是一个子体系,国家PNT架构是子体系的体系,其在信息架构上应体现出传感器物理层、网络物理层、数据层、协议层、信息层、服务层等多种体系层次。这些层次既能面对不同的应用体系,又能开放地面向未来各种技术发展。针对弹性PNT体系建设,从工程角度的基础设施建设、试验验证评估、布设维护和运控组织管理等体系化研究内容尚未纳入进行讨论。

3 PNT体系弹性指标分析

在此进一步深入分析弹性思想,在充分分析弹性概念的内涵与外延的基础上,给出PNT弹性指标应包含的3种类型。通过对PNT体系层级的进一步划分,分析3种PNT层次架构的弹性化设计内涵。

3.1 弹性概念的内涵

弹性概念总体可以表述为:在外力之下,物体外在表现形式可受激出现较大形变,但内在特性保持稳定;尽管内部各部分间联系方式可能发生变化,但相互间的关联关系始终保持不变;依靠物体内在各部分强韧的联系和抵抗外力的能力,物体内在的统一性和整体性不被破坏。当外力撤出后,物体能够迅速恢复原有特性。弹性性能不仅可以确保物体在多种外力作用之下,通过消解抵抗化解外力影响,保持自身完好;而且也表现为功能上可适应于多种外部环境的灵活适应能力。必须指出,弹性应当有外力的压力边界,不存在无限压力下的弹性。

3.2 弹性指标剖析

弹性性能的度量应当明确其指标体系及主要典型性指标,确定指标形式采取量化或定性描述的不同形式。根据上述特性,弹性能力的指标可考虑分为以下三类。

1)外力干扰特性,主要指描述外力形式特征与范围的指标,主要包括外力作用形式,外力强度范围,外力施加时间范围等。

2)内在技术特性,主要指描述在应对外力干扰下的系统自身调整能力的指标,主要包括系统数据处理调整,系统参数调整,系统模型调整,系统结构调整,系统受激增强调整等。其中信息获取与处理的弹性能力是PNT体系弹性能力设计的重点。

3)性能效果特性,主要描述PNT系统在应对外力干扰下所表现的最终战技功能指标。可在

现有技术指标体系,通过对不同指标的弹性量化范围调整的方式论证实实现PNT弹性指标。既可以确保与现有指标体系兼容,也可充分研究不同外力下的指标可能的调整范围,使系统性能得到准确全面的表述。

此外,在传统的力学概念范畴,与“弹性”相对的概念是“塑性”。“塑性”反映系统或物体维持自身边界外形的能力。需要注意,“弹性”反映了边界维持的灵活性,但必须具有系统自身与外力环境之间的界限,尽管系统的虚实边界形式可以改变,但无论系统大小,边界必须保持,而不是类似于完全开放域的气态特征。所以,从定性的角度来看,弹性是原则性和灵活性的一种完好的综合体现。从技术创新更替等层面,弹性还内含有开放性的思想。

3.3 PNT体系层级划分与弹性能力分析

PNT体系内部结构复杂,产品形态多样。从实际应用、体系结构、信息方式和形式规模等角度,可以从低到高、从小到大依次分为用户级、子体系级和体系级3个层次。上述层次的划分可以方便PNT体系针对不同问题和侧重进行研究和设计。在弹性设计方面,不同层次的PNT所面对的问题存在较为明显的差异,并且在面临的外力干扰方面,上一级层次将包含下一级外力干扰,应对外力影响的手段和能力也更强。

1)PNT用户级弹性

本层次主要指PNT终端用户系统。对于用户级系统,弹性性能表现为系统在各种复杂外部影响下,通过内在力量联系的重组和调整变化,达到抵御外力影响和保持自身原有功能的能力。同时外力作用下系统始终保持有效的恢复能力,而不产生结构性质变。对于PNT终端用户,其系统装备外形及边界清晰可见,如单兵PNT系统、载体PNT系统等。其弹性能力也是在终端层面针对GNSS阻遏等各种干扰限制,具备、展现出连续、稳健、可靠的PNT性能。这是中美两国大部分PNT弹性应用所关注的重点。

2)PNT子体系级弹性

本层次主要指具体的PNT子体系(或系统)。以功能服务划分,则可定义PNT系统,如单兵救援系统、高德行车导航系统等;以应用环境领域划分,则可定义PNT子体系,如水下、地下、室内、深空PNT子体系等。子体系(或系统)边界体现为面向用户的服务能力的边界。其能力由子体系整体支撑,边界存在、可评估但不可见。子体

系内多种信息设施和手段在外力干扰下,采取唤醒、阻遏、强化、增补、备份等手段,也通过子体系整体抵御外力,强化内在的信息获取支持能力和信息处理能力,达到子体系范围内任务达成所需PNT服务能力的连续、稳健、可靠。近岸水下PNT子体系、远洋深海PNT子体系、地下、室内、深空PNT子体系均可归于此类,也是现阶段中美等国PNT体系建设的要点。

3)PNT体系级弹性

本层次主要指国家综合PNT体系。国家PNT体系级是PNT子体系的体系,本层次不仅有信息架构主干、服务架构主干、技术架构主干、应用架构主干、管理架构主干、产业架构主干等,同时也涵盖水下、地下、室内、深空等各种特定环境的应用体系,并且这些体系将紧密有机地打造为一个整体,为全空域、全时域与国家相关的军事、经济、民生等重大活动提供PNT信息支持,通过系统论证可将此作为本层次PNT体系的能力边界。本层次面临的外力涵盖所有子体系级和用户级所受的外力,同时也面临体系层面的总体外力,即体系级别的干扰攻击,如摧毁星座、摧毁陆基台站、切断海底光缆、攻击控制中心和信息处理中心等。现阶段首要解决的问题是如何建立全空间综合PNT体系,确保全时、全空间范围内能够对抗来自多方位、多环境外力的综合干扰下,实现综合PNT体系的弹性能力。未来将进一步研究应对更高烈度的外力攻击和破坏。

可以看到,这一复杂体系的边界在理论上存在,但是不仅不可见,而且动态变化。在不同时期、不同阶段,其需求和实际发展状态都会不同,是一个分阶段逐步完善、不断深化、持续发展的过程。具体地说,也就是对应未来5年、15年、30年等的不同阶段。所以,这一复杂体系弹性的衡量,必须指明阶段性的具体指标。同时其对于新技术发展的兼容性和开放性,将成为复杂体系弹性架构设计的一项重要关注指标。

4 结 语

本文深入分析了中美在PNT领域弹性概念的特点和差异,针对当前中国PNT发展的需求,从PNT体系化架构设计层面,讨论了未来弹性化PNT体系建设的特点和目标。从深入剖析弹性的概念内涵入手,提出了弹性化指标的3种类别,并在此基础上进一步将PNT体系分为用户级、子体系级、体系3个层次,并分别进行讨论。通过本

文的分析,希望能使综合PNT体系弹性的概念进一步明确,同时特别提出应重视PNT体系弹性设计指标的研究,这是今后指导PNT体系弹性设计的重要设计牵引指标和能力评估指标,希望能够为国内当前深化PNT体系领域的理论研究提供有益的参考。

参 考 文 献

- [1] The CPC Central Committee, The State Council and the Central Military Commission Sent a Congratulatory Message on the Completion and Opening of the BeiDou-3 Global Navigation Satellite System [DB/OL]. (2020-07-31). <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/0801/c419242-31806289.html>(中共中央,国务院,中央军委. 中共中央国务院中央军委对北斗三号全球卫星导航系统建成开通的贺电 [DB/OL]. (2020-07-31. <http://cpc.people.com.cn/n1/2020/0801/c419242-31806289.html>)
- [2] Yang Changfeng. Development Concept of Integrated Positioning, Navigation and Timing System of China's BeiDou Navigation System[J]. *Technology Industry of China*, 2018(6): 32-35 (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)
- [3] Yang Yuanxi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-509 (杨元喜. 综合PNT体系及其关键技术[J]. 测绘学报, 2016, 45(5): 505-509)
- [4] Yang Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 893-898(杨元喜, 弹性PNT基本框架[J]. 测绘学报, 2018, 47(7): 893-898)
- [5] Yang Yuanxi, Yang Cheng, Ren Xia. PNT Intelligent Services[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2021, 50(8): 1 006-1 012(杨元喜, 杨诚, 任夏. PNT智能服务[J]. 测绘学报, 2021, 50(8): 1 006-1 012)
- [6] Xu Jiangning. Analysis on Underwater PNT System and Key Technologies [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(1): 1-6 (许江宁. 浅析水下PNT体系及其关键技术[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(1): 1-6)
- [7] Xie Jun, Liu Qingjun, Bian Lang. Development Assumption of National Comprehensive PNT Architecture Based on BeiDou Navigation Satellite System [J]. *Space Electronic Technology*, 2017(5): 1-6(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(5): 1-6)
- [8] Department of Transportation and Department of Defense of USA. National Position, Navigation and Timing Architecture Implementation Plan [R]. Washington D C, 2010
- [9] DoD Chief Information Officer of USA. Strategy for the DoD PNT Enterprise[R]. Washington D C, 2018
- [10] DoD of USA. National Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Architecture [DB/OL]. (2019-11-18). <https://www.transportation.gov/pnt-national-positioning-navigation-and-timing-pnt-architecture>
- [11] Nichols M. DoD CIO Seeks Positioning, Navigation & Timing Enterprise Support[OL]. (2018-02-15). <https://blog.executivebiz.com/2018/02/dod-cio-seeks-positioning-navigation-timing-enterprise-support/>
- [12] National Security Space Office. National Positioning Navigation and Timing Architecture Study Final Report[R]. USA, 2008
- [13] Lo S C, Enge P. Capacity Study of Multilateration (MLAT) Based Navigation for Alternative Position Navigation and Timing (APNT) Services for Aviation[J]. *Navigation: Journal of the institute of navigation*, 2012, 59(4): 263-279
- [14] Kim O J, Kim C W, Song J. A Single Distance Measuring Equipment (DME) Station-Based Positioning System for Alternative Position Navigation and Timing (APNT) [J]. *Navigation: Journal of the Institute of Navigation*, 2015, 62(4): 313-327
- [15] Jo S H, Kang Y. Alternative Positioning, Navigation and Timing Using Multilateration in a Terminal Control Area[J]. *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 2015, 23(3): 35-41
- [16] Xue Lianli, Yin Xiaotong, Xu Yue, et al. Analysis on《Strategy for the Department of Defense Positioning, Navigation and Timing (PNT) Enterprise—Ensuring a US Military PNT Advantage》[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2020(4): 1-9 (薛连莉, 尹晓桐, 徐月, 等. 美国《国防部定位、导航与授时体系战略》报告解析[J]. 飞航导弹, 2020(4): 1-9)
- [17] Dana G. US Department of Defense PNT Strategy: GPS is not Enough[OL]. (2019-11-04). <https://rntfnd.org/2019/10/04/us-department-of-defense-pnt-strategy-gps-is-not-enough-gps-world/>
- [18] Ding Hong. DARPA is Developing Five GPS Independent Navigation and Timing Technologies[OL]. <http://www.dsti.net/>, 2014(丁宏. 美国 DARPA 正在开发 5 种不依赖 GPS 的定位导航与授时技术

- [OL]. 国防科技信息网,2014)
- [19] Wen Sulì, Zhang Guoqing. The Technology Progress of PNT in GPS Limited Conditions[J]. *Tactical Missile Technology*, 2014(6):81-86 (文苏丽,张国庆. 美国GPS受限条件下导航定位技术的新发展[J]. 战术导弹技术,2014(6):81-86)
- [20] John B. DARPA Positioning, Navigation, and Timing (PNT) Technology and Their Impacts on GPS Users [C]//23rd Meeting of Space-Based Positioning, Navigation and Timing, 会议地点, 2019
- [21] Li Naihe, Zhang Yonghong, Xi Huan. The New Technology of PNT Being Developed By US and Analysis[J]. *Satellite Application*, 2015(12): 34-37 (李耐和,张永红,席欢. 美国正在开发的PNT新技术及几点认识[J]. 卫星应用, 2015(12): 34-37)
- [22] Zhang Fengguo, Zhang Hongbo. American PNT Architecture Research Methods [J]. *GNSS World of China*, 2016, 41(1): 24-31 (张凤国,张红波. 美国PNT体系结构研究方法[J]. 全球定位系统, 2016, 41(1): 24-31)
- [23] Mcneff J. Changing the Game Changer—The Way Ahead for Military PNT [J]. *Inside GNSS*, 2010, 5(8): 44-45
- [24] Huang Cai, Zhao Sihao. Present Situation and Outlook of National Positioning, Navigation and Timing Infrastructures [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(5):19-26 (黄才,赵思浩. 国家定位导航授时基础设施现状及能力展望[J]. 导航定位与授时,2017,4(5):19-26)
- [25] Yang Yuanxi, Li Xiaoyan. Micro-PNT and Comprehensive PNT [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10):1 249-1 254 (杨元喜,李晓燕. 微PNT与综合PNT[J]. 测绘学报,2017,46(10):1 249-1 254)
- [26] Liu Yang, Li Sihai, Fu Qiangwen, et al. Chip-scale Atomic Clock Aided INS/GNSS Integrated Navigation System Spoofing Detection Method [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2019, 27(5): 654-660 (刘洋,李四海,付强文,等. 芯片级原子钟辅助的惯性/卫星组合导航系统欺骗检测方法[J]. 中国惯性技术学报,2019,27(5):654-660)
- [27] Li Mo, Chen Feiliang, Luo Xiaojia, et al. Basic Principle, Key Technology and Research Progress of Atomic Chip [J]. *Acta Phys Sin*, 2021, 70(2):56-75 (李沫,陈飞良,罗小嘉,等. 原子芯片的基本原理、关键技术及研究进展[J]. 物理学报,2021,70(2):56-75)
- [28] Yang Yuanxi. Adaptive Dynamic Navigation and Positioning [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2006 (杨元喜. 自适应动态导航定位[M]. 北京:测绘出版社,2006)
- [29] Niu Xiaoji, Ban Yalong, Zhang Tisheng, et al. Research Progress and Prospects of GNSS/INS Deep Integration [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(10):2 895-2 908 (牛小骥,班亚龙,张提升,等. GNSS/INS深组合技术研究进展与展望[J]. 航空学报,2016,37(10):2 895-2 908)
- [30] Dai Haifa, Bian Hongwei, Wang Rongying, et al. An Improved Multi-sensor Data Adaptive Fusion Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(10):1602-1609 (戴海发,卞鸿巍,王荣颖,等. 一种改进的多传感器数据自适应融合方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020,45(10):1602-1609)
- [31] Fan Shiwei, Zhang Ya, Hao Qiang, et al. Cooperative Positioning and Error Estimation Algorithm Based on Factor Graph [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2021, 43(2): 499-507 (范世伟,张亚,郝强,等. 基于因子图的协同定位与误差估计算法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 499-507)
- [32] Dai Haifa, Bian Hongwei, Ma Heng, et al. Application of Robust Incremental Smoothing Algorithm Based on Factor Graph in Integrated Navigation of Unmanned Surface Vehicle [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2018, 26(6):778-786 (戴海发,卞鸿巍,马恒,等. 基于因子图的鲁棒性增量平滑算法的水面无人艇组合导航方法[J]. 中国惯性技术学报,2018,26(6):778-786)
- [33] Dai Haifa, Bian Hongwei, Ma Heng, et al. Unified Theoretical Framework Construction of All Source Positioning and Navigation [J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2018, 5(6):9-16 (戴海发,卞鸿巍,马恒,等. 全源定位与导航的统一理论框架构建[J]. 导航定位与授时,2018,5(6):9-16)

The Concept of Resilience of National Comprehensive PNT System

BIAN Hongwei¹ XU Jiangning¹ HE Hongyang¹ WANG Rongying¹ MA Heng¹

¹ College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

Abstract: We make an in-depth analysis of the concept of resilient PNT(positioning, navigation, and timing) system put forward by the United States and China, and point out their differences. Especially in view of the main requirements of the future national comprehensive PNT system, the concept of resilience is expounded that the resilient index of the PNT system can be divided into three categories: external force interference characteristic, internal technical characteristic and performance effect characteristic. At the same time, considering the differences of different levels of PNT system design, PNT flexibility is divided into three levels: user-level resilience, system-level resilience and system-level resilience. Based on the above work, it tries to help promote the theoretical research in the field of PNT system in China.

Key words: positioning, navigation, and timing (PNT) system; resilient PNT; PNT resilient qualification

First author: BIAN Hongwei, professor. He is involved in inertial navigation technology and its application. E-mail: bianhongwei@yahoo.com.cn

Corresponding author: HE Hongyang, PhD, lecturer. E-mail: xgdhehongyang@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41804076).

引文格式: BIAN Hongwei, XU Jiangning, HE Hongyang, et al. The Concept of Resilience of National Comprehensive PNT System[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(9):1265-1272. DOI:10.13203/j.whugis20210241(卞鸿巍, 许江宁, 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. DOI:10.13203/j.whugis20210241)