

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2022.03.004

# 水下 PNT 体系信息架构及关键问题

卞鸿巍, 许江宁, 何泓洋, 马恒, 王荣颖

(海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 卫星导航系统固有的弱点与脆弱性制约了其水下应用, 因此针对水下用户的定位导航授时(PNT)信息需求, 迫切需要建设可提供全时全域、实用有效、安全可靠的水下 PNT 体系。针对水下 PNT 体系的顶层设计问题, 重点探讨了 PNT 体系架构的核心信息架构设计及相关关键问题。系统分析了水下 PNT 体系建设的特殊性以及水下用户对于水下 PNT 服务的需求。在水下 PNT 体系构建原则的基础上, 重点介绍了感知层、预处理参量层、本地时空参数层、环境信息层、多源信息融合层、系统应用服务层、体系服务管理层等七层水下 PNT 信息体系架构。总结了水下 PNT 体系构建时所涉及的关键科学问题和技术问题, 并分析了后续水下 PNT 体系的主要研究方向。

**关键词:** 水下 PNT; PNT 信息架构; PNT 体系技术

**中图分类号:** U666.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-8110(2022)03-0031-09

## Information Architecture and Key Issues of Underwater PNT System

BIAN Hong-wei, XU Jiang-ning, HE Hong-yang, MA Heng, WANG Rong-ying

(School of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The inherent weakness and vulnerability of satellite navigation system restrict its underwater application. Therefore, it is urgent to build an underwater PNT (UPNT) system that can provide real-time, all-domain, practical, effective, safe and reliable PNT information service for underwater users. Aiming at the top-level design of UPNT system, this paper focuses on the core information architecture design and related key issues of PNT architecture. The particularity of UPNT system construction and the requirements of the users for UPNT service are analyzed systematically. The principles in the construction of UPNT system is proposed, and the seven-layer information architecture of UPNT is emphasized, which includes perception layer, pretreatment parameters layer, local space-time parameter layer, environmental information layer, multi-source information fusion layer, system application service layer and service management layer. The main scientific and technical problems involved in the construction of UPNT system are summarized. And the subsequent research directions of UPNT system are discussed.

**Key words:** Underwater PNT; PNT information architecture; PNT hierarchy technology

**收稿日期:** 2022-02-05; **修订日期:** 2022-03-04

**基金项目:** 国家科技重大专项项目(GFZX03010105280501); 国家自然科学基金(41804076)

**作者简介:** 卞鸿巍(1972-), 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事惯性导航技术、极区导航技术及信息融合方面的研究。

**通信作者:** 何泓洋(1990-), 博士, 讲师, 主要从事水下 PNT 技术方面的研究。

## 0 引言

定位导航授时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)体系是为交通、运输、电信、电力、基础科研、军事行动和人们日常生活等国防、经济和社会领域服务的国家重大基础设施<sup>[1-3]</sup>。80%以上的人类生产活动信息都与PNT有关<sup>[4-5]</sup>。综合PNT体系<sup>[6-7]</sup>是由时空基准、服务系统、应用系统,以及支撑其发展的基础技术研发、联合协调机制、政策法规标准等综合保障条件多个相关联的要素组成的有机整体,能够提供全时域、全空域、精确、连续、可靠的位置、时间、速度等信息,是一个广泛的、高层次的国家战略体系。综合PNT体系是国家信息建设的基石。

随着北斗卫星导航系统的建设和发展,我国已形成以北斗系统为代表的天基PNT系统,PNT服务也由此带来了革命性的变化。但由于卫星导航系统固有的弱点与脆弱性,制约了水下PNT的可用性和稳健性<sup>[1,7-8]</sup>。因此,构建水下PNT体系,为水下载体提供全时全域、实用有效、安全可靠的PNT信息服务,满足不断增长的国家安全、经济、民用、科研和商业的需要<sup>[9-12]</sup>,就显得尤为迫切。

然而,海洋环境和水介质的固有特性使得水下PNT相对于水面环境面临更大的挑战<sup>[13]</sup>。现有基础设施建设、装备技术水平和信息服务保障能力远远不能满足水下载体长期安全航行和执行任务的需求。随着未来海上作战样式的变革,必将对水下PNT能力提出新的更高要求。因此,将水下PNT

体系作为综合PNT体系的重要组成部分进行统筹规划和建设具有重大意义。

目前,水下PNT技术已成为美、俄、欧等国家和地区PNT发展的重要方向<sup>[14]</sup>。代表系统有2001年法国ASCA公司设计的全球首套水下GPS目标跟踪系统,2002年德国Arstech公司开发的GPS浮标阵水下定位系统,2016年英国BEA Systems公司研发的深海定位导航系统(POSYDON)(DARPA支持),以及俄罗斯圣彼得堡海洋仪器康采恩研制的水下GLONASS系统等<sup>[15-16]</sup>。

国内杨元喜院士于2017年发文,提出了我国弹性PNT体系的概念<sup>[17]</sup>。国内多家单位也在水下PNT体系新型惯性基多源信息融合理论、全源定位与导航的统一理论框架、INS/DVL/重力/GNSS的多源组合导航系统以及面向复杂应用的导航智能决策与协同等领域取得多项研究成果<sup>[18-19]</sup>。未来国家弹性PNT体系力求实现不同应用领域体系架构拓扑的一致性、功能适应的强壮性、形态应用的灵活性、技术发展的开放性、体系覆盖的普遍性等。着眼这一目标,目前国内在PNT体系信息架构、技术架构、实体架构、运控架构、应用架构等领域的研究还处于起步阶段。

信息架构是PNT体系架构的核心。本文从水下PNT体系建设的特殊性出发,系统分析了水下用户对于水下PNT服务的需求以及水下PNT体系构建时所遵循的原则,提出了水下PNT信息体系架构构想(如图1所示),并总结了其中涉及的科学问题和技术问题,阐明了后续水下PNT体系的研究方向。

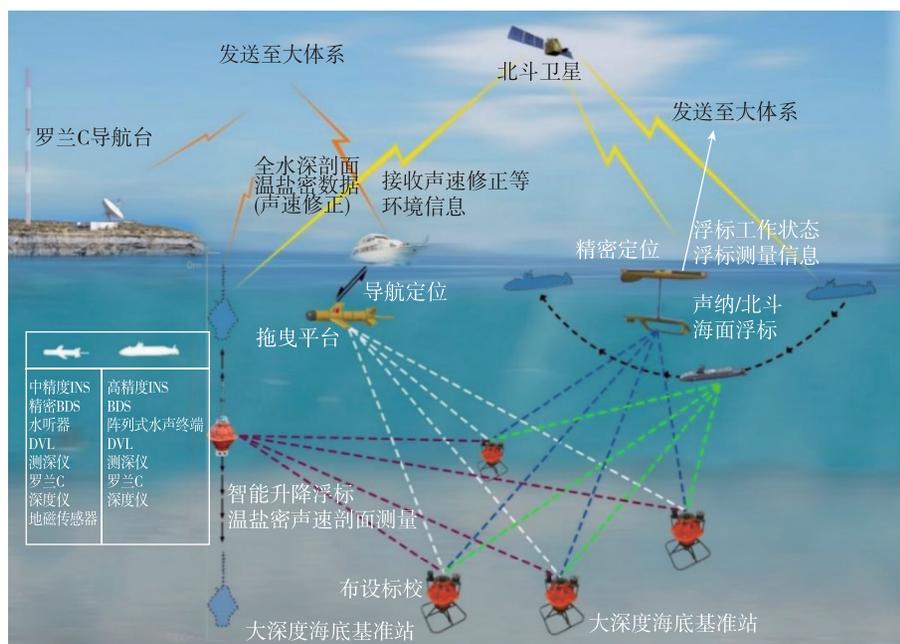


图1 水下PNT体系构想

Fig. 1 Conception of UPNT system

## 1 水下 PNT 体系特殊性及其所需遵循的原则

PNT 体系是一个复杂、开放的系统,在进行水下 PNT 体系构建时需要充分考虑水下 PNT 的特殊性,不仅要考虑整个系统的整体,还要考虑每个子系统的特性,所以需要有针对性地分析构建时所需遵循的原则,为水下载体提供安全可靠的 PNT 服务。

1) 水下 PNT 技术体系必须基于多元异质技术体制

与基于无线电技术体制的卫星导航系统可以应用于全球大气空间不同,水下 PNT 体系无法采用单一技术体制实现全球、全海域、全深度和全时应用需求。卫星导航信号可以全时、全海域,且精度最高,但几乎无法入水;水声导航信号可以在水中全深度应用,是目前定位精度仅次于卫星导航的技术体制,但作用距离受限,难以形成导航卫星通过太空部署而具备的全球覆盖能力,相反其布设区域和全时自主能力十分有限,需根据需要,随建随用,且布设维护受不同海域条件影响显著;岸基无线电导航系统信号可以入水,且覆盖区域显著大于水声导航技术,是 PNT 水下应用极具应用潜力的技术选择,但其入水深度也十分有限,极限深度仅数十米,难以做到全深度,且无法覆盖远岸大洋,更无法达到全球覆盖;惯性导航技术可以全海域全深度并通达全球,短时可具备较高精度,但长时间需要借助卫导、水声等外部系统进行定期修正,无法全时保精度自主工作,且随着自主工作时间越长,技术、功耗、体积、成本等要求越高,在低成本水下应用领域以现有技术难以大面积应用;各类匹配导航定位技术可以实现水下大部分海域、全深度自主应用,但在背景信息特征不明显区域应用受限,且受限于水下相应物理场测量能力和技术水平。所以,水下 PNT 技术体系无法基于单一技术体制,从根本上是多元异质技术体制,这是水下 PNT 技术体系不同于卫星导航系统建设的本质特点。

由于水下 PNT 体系必须基于多元异质技术体制,使其具备两个显著的技术发展需求和特点。一是不同技术体制面向不同用户需求的自身技术体系建设,以及相应的工程系统的建设发展;二是围绕不同用户需求的异质技术间的跨界技术整合,以及与水面、空中跨介质的系统与体系整合。为成功

实现上述两者的协调发展,应将水下 PNT 体系建设的体系顶层规划与设计摆在首要地位。

2) 水下 PNT 技术体系设计应充分贯彻系统工程思想

与卫星导航重大系统工程建设更多依托天基和航天相关技术不同,水下综合 PNT 体系将更多依托海基和海洋相关技术,与现有的海洋测绘、通信、探测、水文、气象、海洋信息技术等多个专业领域关系密切、深度关联,并受到已有技术发展的影响和制约。因此,建设水下 PNT 体系,需要充分利用已有的技术资源,分析结合不同领域的技术特点和建设发展规律,从水下 PNT 建设需求的角度,牵引相关技术领域发展,并推动技术领域的深度交叉,产生一批新技术;将水下 PNT 技术渗透进当前技术体系的同时,又通过将不同领域技术无缝融合形成更大的技术体系。但由于历史上各领域建设形式独立分散,所以迫切需要从顶层统筹规划,优化资源,协调发展。

水下 PNT 体系跨专业交叉、跨领域交叉的特点鲜明,又涉及军民等多种应用,是一项综合性极强的复杂系统工程。所以需要采取系统工程的思想,遵循系统工程的原则方法,开展水下 PNT 技术体系的相关设计与建设。水下 PNT 技术体系顶层设计涉及未来各类水下 PNT 用户的需求分析、关键支撑技术、顶层架构、体系技术、工程建设维护、试验演示评估等多方面内容,需要明确水下 PNT 体系的基本框架、实现途径、关键技术、机制体制、边界条件、接口关系和信息融合方式等一系列要素,并实现与北斗综合 PNT 体系的无缝对接融合。

3) 水下 PNT 技术体系建设应充分考虑国情和技术发展的时代特点

水下 PNT 技术体系建设在世界范围内总体来说仍旧是一个新生事物,其概念内涵、功能定位、体系架构均处于不断发展和完善的过程之中。美军最先提出概念,美俄等大国也进行了相关系统建设<sup>[20-22]</sup>,但之前 GPS 和 GLONASS 卫星导航系统全球应用的技术成熟度相比差距较大<sup>[23-26]</sup>。我国水下 PNT 体系设计必须符合国情实际,服从国家军事战略与经济建设需求,结合周边海域特点和技术优势,充分借鉴北斗卫星导航系统分阶段由区域到全球稳步发展的成功经验,科学稳妥论证水下 PNT 技术体系建设的能力需求和技术发展目标,不断丰富完善水下 PNT 体系的特点内涵和技术架构。

当前军事作战样式发展变化迅速,民用海洋利用方式复杂多样,新的用户需求不断变化;与此同时,各种与水下 PNT 相关的新技术不断涌现并迅速发展,如数字海洋、透明海洋的海洋信息技术,水文气象等多类型海洋大数据建设,各种基础性海洋工程技术发展,以及基于人工智能快速发展的智能探测与信息技术领域等。这些技术发展的时代特点要求水下 PNT 技术体系既要具备稳定的核心技术架构,同时也要具备对新技术的弹性和开放性;既能满足近期国家发展需求,也能为未来长远建设奠定基础。

4)水下 PNT 技术体系建设应突出产业建设牵引和工程实用的评价标准

水下 PNT 技术体系研究服务于北斗综合 PNT 重大工程建设,其目标是建设全面提升国家水下 PNT 多样化信息服务保障的基础性技术能力。涉及前沿技术攻关、关键技术突破、成熟技术转化、工程技术应用推广等多种技术状态,要充分考虑水下 PNT 建设海洋工程技术要求的复杂性。与卫星导航系统建设面临的困难不同,水下 PNT 建设涉及的大量布设施工与使用维护工作将面临近海大陆架、岛礁、远岸深海、大洋等不同海域,以及不同水深、不同周边形势的差异,限制因素多,技术复杂。因此,各项技术研究中的工程实用效能的验证与评估对推动未来具体建设十分重要。

水下 PNT 体系的技术支撑涉及的领域、部门、企业多,技术研究需要关注不同维度下的用户装备与技术层次划分。技术研究应便于形成相应的各类标准、规范、接口、协议,尽可能贴近引导未来相关产业的建设发展。

## 2 水下 PNT 体系架构

针对水下 PNT 体系的特殊性,系统性地分析了水下 PNT 体系的构建原则,提出了 PNT 三级体系、七层信息架构。值得注意的是,PNT 体系的弹性化是未来发展的必然趋势,其概念、内涵以及实现方法在文献[1]和文献[23]中进行了详细阐述。考虑到未来水下 PNT 体系的弹性化特点,本文提出了基于用户、子体系、体系的三级弹性化水下 PNT 体系,以及基于感知层、预处理参量层、本地时空参数层、环境信息层、多源信息融合层、系统应用服务层和体系服务管理层等七层 PNT 信息感知、处理与服务架构(如图 2 所示)。

### 2.1 感知层

感知层作为 PNT 体系设计的第一层,其功能是通过 PNT 测量传感器感知来自其所在位置的环境物理量和人设系统传输物理量。该层的核心是传感器技术,传感器设计的精度、动态特性、可靠性、测量范围等综合性能受到机理、材料、工艺等约束;多传感器共性集成设计时,应解决干扰兼容、物理几何位置统一等问题。传感器的测量精度等性能是后续处理的基础和前提。

### 2.2 预处理参量层

预处理参量层是 PNT 体系设计的第二层,其功能是通过解调、解码、滤波等方式,将由感知层获取的各物理量电测量值等转化为可进行 PNT 参数解算使用的时空基础参元。该层的核心是各类数字与信号处理技术,即对于人为信号,基于信号体制解调解码完成信号参数测量,通过各种数据处理等方式提高时空相关基础参元的解算性能。

### 2.3 本地时空参数层

本地时空参数层是 PNT 体系设计的第三层,其功能是各 PNT 子传感器完成不同机理和坐标系下的时空参量解算,以来自预处理参量层输出的时空基础参元等作为输入,输出位置、速度、航向、姿态、时间等时空参量。在该层不再涉及信号体制,其核心为各类 PNT 解算方法,算法涉及人为(或自然)的外部基准设施的拓扑结构和几何分布等,得到的各类时空参量包含不同的误差特性。单一系统中可独立输出时空参量,并可用于后续多源信息融合,该层得到的信息已具有较强的可读性。

### 2.4 环境信息层

环境信息层是 PNT 体系设计的第四层,其功能是基于环境感知这一关键技术,依托环境感知传感器获取来自测量环境物理量、直接获取相关数据库和各类环境信息等,并通过多种方式获取各类环境物理信息与环境移动目标信息,例如重力/重力梯度背景场,磁力/磁力梯度背景场,水体的温度、盐度、密度,水下地形地貌和洋流信息等。该层的核心是包含环境测量传感器和信息获取设备,甚至包含对 PNT 体系的感知层、预处理参量层的环境感知与获取能力,本层对应本地时空参数层;支持其他层的数据处理,如下一层多源信息融合层的信息融合,以及第七层体系服务管理层的路径规划和导航引导等。

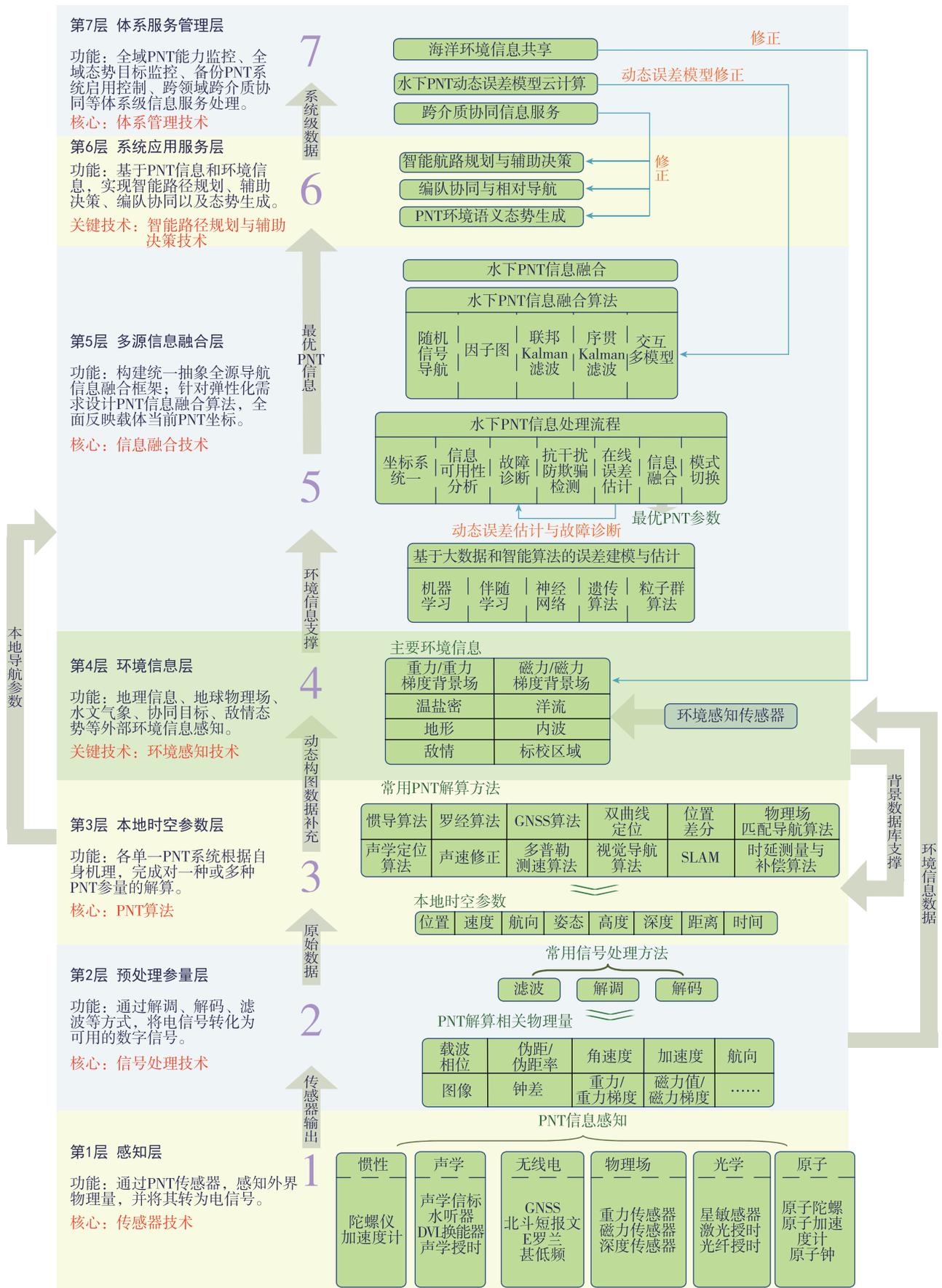


图 2 水下 PNT 体系信息架构

Fig. 2 Information architecture of UPNT system

## 2.5 多源信息融合层

多源信息融合层的功能是构建统一抽象的全源导航信息融合框架,在涵盖传统 PNT 最优估计算法的基础上,纳入包含机器学习、随机接入等新算法,建立信息融合全过程信息处理流程结构。通过处理来自本地时空参数层的各子系统信息、各类环境信息等,得到精确、弹性、可靠、强壮的本地 PNT 参数。

## 2.6 系统应用服务层

本层基于 PNT 信息、环境参数和任务需求等,实现各种应用场景导航等各类信息应用服务,包括实现智能路径规划、辅助决策、相对导航及 PNT 环境语义态势生成,提供导航等各类 PNT 相关信息服务支持,其核心在于导航规划与协同决策等算法。

## 2.7 体系服务管理层

体系服务管理层的功能是实现全域 PNT 能力监控、全域态势目标监控、备份 PNT 系统启用控制、跨领域跨介质协同等体系级信息服务处理,明确以北斗导航系统为核心实现跨介跨域协同等体系级 PNT 信息服务,将来自 PNT 体系及通信、水文气象等其他体系级信息系统的基础信息转化为全域 PNT 信息服务、运行维护等体系信息服务,其核心为体系管理技术。

# 3 关键科学和技术问题

## 3.1 关键科学问题

水下 PNT 体系研究主要涉及国家 PNT 体系弹性化架构设计,惯性基多源 PNT 信息弹性化统一融合理论与算法,跨域、跨介、跨体制 PNT 体系时空统一基准网构建机理和弹性化 PNT 能力测试评估理论 4 个关键科学问题:

1) 国家 PNT 体系弹性化架构设计,是跨领域、跨专业、全时、全域 PNT 复杂大系统顶层设计的科学问题,对设计理念的研究有助于清晰把握 PNT 体系的本质特点,推动未来形成 PNT 话语体系和规范标准,并对未来顶层规划和建设决策提供理论支持。

2) 惯性基多源 PNT 信息弹性化统一融合理论与算法,是实现弹性、精准、稳健的 PNT 信息解算的关键<sup>[27]</sup>。

3) 跨域、跨介、跨体制 PNT 体系时空统一基准网构建,是依托北斗向水下、地下、深空等领域拓

展,构建国家综合 PNT 体系的基础。

4) 弹性化 PNT 能力测试评估理论,是系统研究解决测绘、水声、导航等多学科交叉 PNT 体系建设、应用、评估的重要科学问题。

## 3.2 关键技术问题

惯性导航系统是当前唯一能向水下载体导航提供必要的全部数据的设备,其最为突出的优点是工作完全独立,不受外界干扰和破坏,隐蔽性能好,具有极其重要的应用价值<sup>[1,28-29]</sup>。然而,惯性导航系统的主要缺点是定位误差随时间的积累而增大,难以满足长期和高精度的导航定位要求。因此,必须开展高精度惯性器件及系统技术研究,同时利用外部辅助定位导航信息源,开展惯性基多源定位导航技术研究,主要包括水下高精度惯性基多源信息融合技术和惯性基多传感器信息融合 PNT 终端集成技术。

水下高精度惯性基多源信息融合技术,主要抑制复杂环境干扰引起的水声定位性能下降,从而确保实现连续、稳定的高精度导航定位;惯性基多传感器信息融合 PNT 终端集成技术,是基于硬软件工程设计实现 PNT 用户最终能力的关键。

电磁信号水下衰减速度极快,几乎无法透过海水,经过数十年的发展,声信号成为当前已知最有效的水下信息载体<sup>[1,30]</sup>。近十多年来,基于声学手段的水下目标的定位与导航技术和相关装备研发被各国列为具有战略意义的科研计划之中。

所以,水声定位导航技术不仅是一种重要的水下定位手段,也是未来水下 PNT 体系架构不可或缺的定位导航技术<sup>[1]</sup>。复杂海洋环境高精度水下声学 PNT 关键技术,对确保用户在水下指定工作范围内实现高精度导航定位至关重要。

除此之外,高精度水下导航动态基准与重构技术是 PNT 水下测试领域的经典难题,所以必须构建高精度水下动态基准。

# 4 未来水下 PNT 研究方向

## 4.1 国家 PNT 体系弹性化架构设计方案

采取系统工程、信息论等方法,多维、多角度研究体系架构,从定量表征 PNT 体系抵御外力干扰破坏能力的角度,提出了 PNT 弹性化体系指标,对相关设计评估实现量化牵引;从规模尺度角度,提出了 PNT 体系的用户、子体系、体系三级层次划分和七层 PNT 体系信息架构。

在此基础上,进一步研究信息—技术—产品—系统—服务应用/布控维护—产业/部门,直至国家层面的 PNT 分层架构。

通过深空、地下、水下、室内等不同应用领域体系架构的解决方案设计,检验和深化架构设计原则。

#### 4.2 惯性基多源 PNT 信息融合关键技术

惯性基多源 PNT 信息融合关键技术研究主要解决惯性基弹性化统一融合理论架构与算法模型问题,梳理归纳多种应用场景惯性基信息融合算法,着眼弹性化需求,设计多源信息融合统一理论框架<sup>[31]</sup>。在此基础上,研究不同精度惯性基信息融合模型和算法,基于水声信标 SLAM 算法,提升惯性基平台水下动态定位精度,进一步构建惯性基 PNT 系统仿真平台,对提出的理论与模型进行仿真验证评估。

#### 4.3 水下声学弹性化 PNT 系统关键技术

水下声学弹性化 PNT 系统关键技术研究主要实现水下声学弹性化 PNT 系统。

完成水下 PNT 系统方案设计;开展大深度海底双频基准站、智能升降浮标、海面北斗声学浮标等技术攻关和样机研制;在此基础上,设计由潜标、浮标、升降标组成的混合立体型水面/水下声学弹性化 PNT 系统,为更加灵活、多样的三维水下基准体系提供设计经验。

采取远海面精密定位、跨介柔性基准偏差补偿、海底信标精密标定、海天高程统一等多种关键技术,综合解决跨域、跨介、跨体制 PNT 时空基准统一问题,实现海底基准点高精度定位;采取加装高精度时钟、宽带编码水声通信,实现定位信号周期性同步发射,完成用户平台静默条件下的导航定位;采取声速分层反演和全潜深参数测量,实现声速传播误差的准确修正;基于钟差精密修正等技术,使阵内区域水平定位提升至与卫星导航定位同等水平。

#### 4.4 水面/水下弹性化 PNT 系统集成与陆上模拟仿真技术

水面/水下弹性化 PNT 系统集成与陆上模拟仿真技术重点设计惯性基多源 PNT 传感器原型样机,它是水下拖曳平台等用户 PNT 终端。

研制惯性基 PNT 核心传感组件,搭建通用信息融合平台,研制原型样机,完成从单机到系统的实验室功能和性能测试;完成系统在水面/水下模

拟环境下的仿真、演示与评估,并对海试试验方案制定提供技术支撑。

为有效抑制复杂环境造成水声性能下降,采取水声/惯导深组合技术,在抑制水声数据噪声的同时,实现惯导积累误差的高精度重调修正。

研究基于识别的潜标空间位置,确定最佳水声定位轨迹。通过环境分析、航路控制(SLAM),使组合导航系统性能处于最优状态,采取智能控制融合等多种手段实现稳定高精度定位,保证所有关键技术自主可控,为未来制定相关国内标准规范奠定基础。

#### 4.5 水面/水下弹性化 PNT 试验验证评估

水面/水下弹性化 PNT 系统试验验证与评估充分考虑评测问题的复杂性,可采取拖曳平台+智能升降浮标+大型水下平台试验评估方案,完成系统性能验证;并科学规划 PNT 性能评估的试验方案设计、系统搭建、试验组织、数据处理和性能评估等各环节,完成验证评估,保证试验方案灵活多变,在确保试验顺利完成的同时,为专业瓶颈问题的技术攻关留出合理空间。

### 5 结束语

水下 PNT 体系建设具有跨学科、跨领域交叉的特点,与测绘、通信、探测、海洋信息技术、海洋大数据、人工智能等多个专业领域深度关联,涉及军民多种应用。目前,各领域存在建设分散、重复建设资源浪费的风险,需要从国家层面统筹规划、优化资源、协调发展。因此,迫切需要开展水下 PNT 体系架构研究,本文从水下 PNT 的特点分析入手,充分考虑时代发展特点,对 PNT 体系建设需要遵循的原则、水下 PNT 信息体系架构,以及关键科学技术问题和未来研究方向进行了系统分析和探讨,以期为本领域的相关研究提供参考。在此基础上,今后应进一步明确水下 PNT 体系架构、实现途径、关键技术、机制体制、边界条件、接口关系和信息融合方式等,并在未来实现与北斗综合 PNT 体系的无缝无感对接。

#### 参考文献

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] Engler E, Hoppe M, Ritterbusch J, et al. Guidelines for the coordinated enhancement of the maritime position, navigation and time data system[J]. *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie*, 2016, 45(117):44-53.
- [3] Kim O, Kim C, Song J, et al. 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.
- [4] Jo S, Kang J. 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.
- [5] Van Dyke K. National PNT architecture implementation[C]//*Proceedings of FAA APNT Industry Day*, 2012.
- [6] 杨元喜, 李晓燕. 微 PNT 与综合 PNT[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10):1249-1254.  
Yang Yuanxi, Li Xiaoyan. Micro-PNT and comprehensive PNT[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1249-1254(in Chinese).
- [7] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. *测绘学报*, 2016, 45(5):505-509.  
Yang Yuanxi. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-509(in Chinese).
- [8] Mcneff J. Changing the game changer—the way ahead for military PNT[J]. *Inside GNSS*, 2010, 5(8): 44-51.
- [9] 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.
- [10] Willemenot E, Morvan P Y, Pelletier H, et al. Subsea positioning by merging inertial and acoustic technologies [C]//*Proceedings of OCEANS 2009-EUROPE*. IEEE, 2009: 1-8.
- [11] 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):81-87.  
Wen Suli, Zhang Guoqing. The technology progress of PNT in GPS limited conditions[J]. *Tactical Missile Technology*, 2014(6): 81-87(in Chinese).
- [12] 张风国, 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.  
Zhang Fengguo, Zhang Hongbo. Study method of US PNT architecture[J]. *GNSS World of China*, 2016, 41(1): 24-31(in Chinese).
- [13] 廖春发. 美国 PNT 体系结构的现状与发展趋势[J]. *卫星应用*, 2011(2):69-76.  
Liao Chunfa. Current situation and development trend of US PNT architecture [J]. *Satellite Application*, 2011(2):69-76(in Chinese).
- [14] National Security Space Office. National positioning navigation and timing architecture study final report [R]. USA, 2008.
- [15] 李东兵, 杨文钰, 沈玉芄. 美国不依赖 GPS 的 PNT 技术发展现状研究[J]. *飞航导弹*, 2020(12):93-98.  
Li Dongbing, Yang Wenyu, Shen Yupeng. Research on the development status of the US PNT technology independent of GPS[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2020(12):93-98(in Chinese).
- [16] 薛连莉, 尹晓桐, 沈玉芄, 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): 82-89.  
Xue Lianli, Yin Xiaotong, Shen Yupeng, et al. Analysis of ‘strategy for the department of defense positioning, navigation and timing (PNT) enterprise’[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2020(4): 82-89(in Chinese).
- [17] Yang Y. Resilient PNT concept frame[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(3):1-7.
- [18] 梁益丰, 许江宁, 吴苗, 等. AUV 导航技术概述[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(15):152-156+171.  
Liang Yifeng, Xu Jiangning, Wu Miao, et al. Survey of AUV navigation technology[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(15):152-156+171(in Chinese).
- [19] 许江宁, 朱涛, 卞鸿巍. 惯性传感技术发展展望[J]. *海军工程大学学报*, 2007(3):1-5+11.  
Xu Jiangning, Zhu Tao, Bian Hongwei. Development and prospects of inertial sensor technology [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2007(3): 1-5+11(in Chinese).
- [20] 孙大军, 郑翠娥. 水声导航、定位技术发展趋势探讨 [J]. *海洋技术学报*, 2015, 34(3):64-68.  
Sun Dajun, Zheng Cui'e. Study on the development trend of underwater acoustic navigation and positioning technologies[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2015, 34(3):64-68(in Chinese).
- [21] 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.  
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(in Chinese).
- [22] 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.
- Xu Jiangning. Analysis on underwater PNT system and key technologies[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2017, 4(1): 1-6(in Chinese).
- [23] 杨元喜. 弹性 PNT 基本框架[J]. *测绘学报*, 2018, 47(7): 893-898.
- Yang Yuanxi. Resilient PNT concept frame[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(7): 893-898(in Chinese).
- [24] DoD Chief Information Officer of USA. Strategy for the DoD PNT enterprise[R]. Washington DC, 2018.
- [25] Department of Transportation and Department of Defense of USA. National position, navigation and timing architecture implementation plan[R]. Washington DC, 2010.
- [26] National Security Space Office. National positioning navigation and timing architecture study final report [R]. USA, 2008.
- [27] 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.
- 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(in Chinese).
- [28] 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.
- 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(in Chinese).
- [29] Mcneff J. Changing the game changer—the way ahead for military PNT[J]. *Inside GNSS*, 2010, 5(8): 44-45.
- [30] 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.
- 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(in Chinese).

(编辑:李瑾)