



以北斗系统为核心的国家安全PNT体系发展趋势

杨元喜^{1,2*}, 任夏^{1,2}, 贾小林^{1,2}, 孙碧娇^{1,2}

1. 地理信息工程国家重点实验室, 西安 710054;

2. 西安测绘研究所, 西安 710054

* 通讯作者, E-mail: yuanxi_yang@163.com

收稿日期: 2022-04-10; 收修改稿日期: 2022-11-24; 接受日期: 2023-01-19; 网络版发表日期: 2023-04-06

国家自然科学基金重点项目(批准号: 41931076)、崂山实验室科技创新项目(编号: LSKJ202205101)、国家自然科学基金青年科学基金项目(批准号: 41904042)和国家重点研发计划项目(编号: 2020YFB0505800)资助

摘要 卫星导航系统具有脆弱性, 为了确保核心基础设施定位、导航和定时(PNT)的安全, 必须构建多物理原理混合的安全PNT体系. 本文首先分析了现有北斗卫星导航系统自身能力增强途径, 包括北斗星间链路的能力增强, 北斗静止轨道(GEO)、倾斜同步轨道(IGSO)卫星的能力增强和低轨卫星配合的北斗系统PNT服务能力增强; 其次, 以北斗卫星导航系统为核心, 描述了无缝覆盖深空、深海的综合PNT基础设施建设的主要内容, 包括深空PNT星座、深海PNT声呐信标网络和地基低频/甚低频长波台网PNT体系. 在此基础上, 论述了与综合PNT和各类自主感知PNT信息配套的弹性PNT应用关键技术, 包括弹性PNT传感器集成、弹性PNT函数模型和弹性随机模型. 作为未来PNT应用的发展方向, 文章最后论述了PNT应用的环境智能感知、PNT函数模型和随机模型智能优化以及多源PNT信息智能融合等智能PNT核心要素.

关键词 安全PNT体系, 综合PNT基础设施, 弹性PNT应用, 智能PNT应用

1 引言

北斗全球卫星导航系统(BeiDou Global Satellite Navigation System, BDS-3)建成并提供服务, 标志着中国天基时空信息服务基础设施建设取得了决定性进展, 国家核心基础设施、国防建设、经济建设有了自主可控的时空信息支撑(Yang等, 2020, 2021). 但是, 与其他全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)服务类似, 北斗卫星导航系统提供的时空信息服务具有天然的脆弱性, 无线电导航系统(Radio Navigation Satellite System, RNSS)信号落地电

平低, 穿透力差, 不能为地下、水下和室内等非暴露空间用户提供服务. 甚至, 由于高楼、树丛等障碍物遮挡以及其他电磁环境的干扰, 也可能造成现有天基时空信息服务失效. 此外, 由于GNSS星座的局限性, 现有GNSS星座在南北极地区的服务性能也相对较弱(杨元喜和徐君毅, 2016).

美国决策者一直把定位、导航和定时(Positioning, Navigation and Timing, PNT)视作美国国家经济与国防安全的基石和重要基础设施, 并担心GPS PNT的脆弱性和安全性, 于是倡导在构建新的PNT基础设施的同时, 改变PNT应用规则(Mcneff, 2010). 美国国防

中文引用格式: 杨元喜, 任夏, 贾小林, 孙碧娇. 2023. 以北斗系统为核心的国家安全PNT体系发展趋势. 中国科学: 地球科学, 53(5): 917-927, doi: 10.1360/SSTe-2022-0103

英文引用格式: Yang Y, Ren X, Jia X, Sun B. 2023. Development trends of the national secure PNT system based on BDS. Science China Earth Sciences, 66(5): 929-938, <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1069-7>

部和交通部早在2010年就已经开始谋划构建国家新的PNT体系,并计划于2025年前建成(U.S. Department of Transportation and Department of Defense, 2010).在美国启动国家PNT体系研究的基础上,2010年美国国防先进研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)启动了微PNT(micro-PNT)研究计划,即强调利用微机械设备开发微PNT组件(Dalal, 2012),构建体积小、功耗低、性能优的微PNT终端.美国GPS之父Parkinson教授也多次提出GPS应用的PTA概念,即保护、坚韧和增强(Protect, Toughen and Augment)(Parkinson, 2015, 2017).2015~2018年间,美国政府颁布多项与国家弹性和安全PNT相关法案,核心是强调建设地基PNT系统作为GPS的备份和补充(U.S. Senate, 2015, 2017, 2018).

需要指出的是,PNT的中文经常被解释为“定位、导航和授时”,其实“Timing”是指用户端利用外部授时信息和自身守时信息共同确定时间的过程.美国交通部官网对“Timing”定义为“The ability to acquire and maintain accurate and precise time from a standard (Coordinated Universal Time, or UTC), anywhere in the world and within user-defined timeliness parameters. Timing also includes time transfer”,包括时间的获取、维持和传递(U.S. Department of Transportation, 2017).因此,本文将“Timing”释义为“定时”.

早在中国北斗全球卫星导航系统建成之前,中国学者就已经认识到单一的卫星导航定位系统存在结构性风险,开始探索中国PNT体系建设方向.2016年提出构建基于不同物理原理的“综合PNT”体系,构建从深空到深海无缝的、多物理原理的PNT信息源体系(杨元喜, 2016).综合PNT体系只解决PNT信息源的多源供给,但是对于重大基础设施和高连续用户的PNT需求而言,还必须解决用户端多元信息融合问题,于是,2018年提出了“弹性PNT”理论框架(杨元喜, 2018),以实现不同环境下多源PNT传感器的弹性集成、函数模型和随机模型的弹性优化以及多源数据的弹性融合,确保用户PNT服务的高连续性和高可用性.

自从中国学者提出弹性PNT理论框架后,弹性PNT理论和技术很快成为学界研究热点.2020年,美国总统特朗普签署“Strengthening National Resilience Through Responsible Use of Positioning, Navigation and Timing Services”行政令,核心是通过国家和地方

机构共同参与负责任地使用PNT服务,以确保美国基础设施不受PNT服务中断的影响(Executive Office of the President, 2020).国外也有多名学者从较为宏观的角度对弹性PNT体系的特征进行了描述(Aresta, 2017; Scholz, 2020).

我们知道,国家重大基础设施几乎都对PNT服务有极高要求,否则基础设施的安全运行将会出现问题,如交通、金融、电力、通信等.没有安全可靠的PNT保障,很难确保这些基础设施的正常运行.GNSS提供的PNT服务有时不能保证连续、可靠、稳定,基于此,必须从四个方面入手,构建高安全PNT体系:(1)增强GNSS星座,提升GNSS的PNT服务性能,减少GNSS故障造成的PNT服务中断;(2)建设基于不同物理原理的综合PNT基础设施,拓展PNT信息源,形成多源PNT信息互补,同时也拓展PNT服务空域(从深空到深海、从室外到室内);(3)发展多源感知的弹性PNT用户终端,使其在复杂环境下能自主感知PNT信息,自主选用PNT信息源,确保PNT服务的连续性可靠性;(4)发展智能PNT应用体系,用户可根据不同场景智能化集成可用的、可靠的PNT信息源,并实现多源PNT信息的智能融合.

本文试图从天基PNT增强、综合PNT基础设施增强和用户终端弹性增强等方面描述安全PNT的体系架构,分析其核心技术瓶颈,探讨未来安全PNT发展方向.

2 天基PNT增强

天基PNT依然是全球PNT服务的最核心基础设施.GNSS星座一般部署在25000km以上的高空,中国北斗卫星导航系统还配置了36000km的地球静止轨道(Geostationary Orbit, GEO)卫星和倾斜同步轨道(Inclined Geosynchronous Orbit, IGSO)卫星.国际电联《无线电规则》明确规定(The World Radiocommunication Conference Resolution 609, 2007),单星发射的任意角度1164~1215MHz频段RNSS信号,到达地面的功率通量密度(pfd)不超过 $-129\text{dBW m}^{-2}\text{ MHz}^{-1}$;此外,所有RNSS系统发射的信号到达万米高度的航空无线电导航载体(指飞机)的集总等效功率通量密度(aepfd)不超过 $-121.5\text{dBW m}^{-2}\text{ MHz}^{-1}$.如此低的落地电平,导致GNSS信号很容易被干扰和遮挡.其次,无线电

PNT信号无论加密与否, 都容易被欺骗. 此外, 天基GNSS系统都需要地面跟踪系统和运行控制系统的支持, 否则无法实施对卫星轨道参数和卫星钟差参数的更新. 鉴于此, 可以从星间链路增强、高轨卫星增强和低轨卫星增强三个方面增强现有北斗卫星导航, 提升天基PNT服务性能(如图1所示).

2.1 星间链路增强

北斗卫星导航系统星座内的星间链路(inter-satellite link, ISL)是北斗全球PNT服务性能提升的重要途径之一. Ka相控阵星间链路和部分激光星间链路, 一方面搭建了卫星之间的信息传输通道, 可以实现北斗导航卫星之间的信息传递, 为全球短报文信息传输、国际搜救的信息通达提供了便捷信道; 另一方面可以实现卫星之间的距离观测和时间同步, 实现短时间的卫星轨道自主测定与维持(Ren等, 2017, 2019; 杨元喜和任夏, 2018; Yang Y F等, 2021); 此外, 北斗卫星之间的精确测距可以显著提升卫星之间的几何约束, 在仅有部分轨道弧段精确定轨的前提下, 可以确保全弧段高精度轨道测定(杨元喜等, 2018; Yang等, 2020, 2021). 由于北斗星座部分卫星携带了高稳定、高精度氢钟, 通过星间链路进行卫星钟信息传递, 采用拟稳平差, 可以构建以高精度卫星氢钟为参考, 全星座卫星钟共同维持的拟稳天基自主守时体系, 能够显著提升星座间共同守时的精度(Yang Y X等, 2021; Yang Y F等, 2021).

2.2 北斗高轨星座增强

北斗星座的GEO卫星是北斗卫星导航系统区域PNT服务能力提升和服务功能拓展的重要支持(Yang等, 2020, 2021). 一方面, GEO卫星为亚太地区用户提供了不间断的区域PNT服务信号, 增强了用户PNT可用性, 即使用户仅收到一颗中圆轨道(Medium Earth Orbit, MEO)卫星信号, 在三颗GEO卫星的支持下也能实现基本PNT服务; 另一方面, 基于GEO卫星支持的北斗导航系统实现了中国及周边地区的区域星基增强服务(BeiDou Satellite-Based Augmentation System, BDSBAS)(Li等, 2020)和星基精密单点定位(BDS-3 Precise Point Positioning, PPP-B2b)服务(Yang等, 2022); 此外, GEO卫星还提供区域短报文通信和双向授时服务.

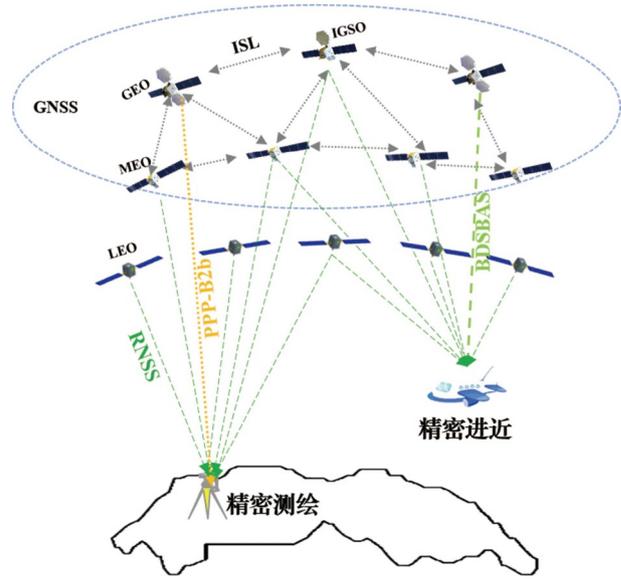


图1 天基PNT增强示意图

ISL表示星间链路, PPP-B2b表示用于精密单点定位的B2b信号, BDSBAS表示北斗星基增强信号

北斗IGSO卫星信号也是区域PNT服务增强的重要信息源, 而且IGSO卫星可以减少GEO卫星服务的所谓“南墙效应”, 即用户南端的GEO卫星受挡, IGSO卫星可以顶替GEO卫星实现GEO卫星的某些特殊服务能力. 一方面, IGSO卫星可以提升亚太地区用户可见卫星的数量, 减小定位精度衰减(Position Dilution of Precision, PDOP)因子; 另一方面, IGSO卫星只要携带短报文收发设备即可参与区域短报文服务. 如果向IGSO卫星上传星基增强改正数、PPP精密轨道和精密钟差及码间偏差等参数, 则IGSO卫星可以参与BDS-3的BDSBAS服务和PPP-B2b服务(Yang等, 2020, 2022). 其实日本的QZSS系统已经实现了区域精密单点定位服务.

2.3 低轨星座增强

低轨星座是GNSS服务增强的重要手段. 由于低轨卫星播发的信号传播距离相对较短, 落地电平往往高于BDS-3播发的信号强度, 有助于提升信号的穿透力, 提高信号的抗干扰能力, 更便于信号功率增强; 低轨卫星与北斗中高轨卫星整体进行轨道测定, 能够增强北斗卫星轨道的测定精度, 间接地增强北斗卫星导航系统的PNT服务能力(Zhao等, 2017; 杨宇飞等, 2020);

此外, 由于低轨卫星对地面用户而言相对速度快, 多普勒效应相对显著, 便于利用多普勒效应提高测速精度; 同样, 由于低轨卫星几何构型变化相对较快, 导致各观测历元之间的相关性相对较低, 可有效改善PNT参数的解算性能, 进而提高载波相位模糊参数解算的收敛速度(张小红和马福建, 2019)。

低轨卫星还可以参与精密单点定位服务。一方面, 低轨卫星与中高轨北斗卫星形成整体星座, 改善用户PNT服务的卫星可用性, 显著减小精度衰减因子, 提升PNT服务性能, 即使在没有额外的全球地面跟踪情况下, 也可以提升单点定位性能; 另一方面, 低轨星座可以参与播发北斗卫星导航系统精密轨道和卫星钟差改正数, 在全球跟踪系统的支持下, 实现北斗卫星精密轨道和精密钟差改正数播发的全球覆盖性, 拓展现有北斗PPP-B2b服务范围。

3 综合PNT基础设施

综合PNT体系是各种基于不同物理原理的PNT信息源的集合(杨元喜, 2016), 包括综合PNT基础设施和综合PNT应用系统。综合PNT基础设施指需要人工建

设的大型PNT信息源, 如拉格朗日点导航星座、中高轨GNSS星座、低轨导航增强星座、地基导航增强站网、室内定位信标网、海面定位浮标网、海底声呐信标网等(如图2所示); 综合PNT应用系统是指集成的可用PNT传感器, 如脉冲星射线、重磁场等天然PNT信息源接收设备, 以及惯导、小型原子钟等PNT传感器。综合PNT体系的重要特点是: PNT信息物理原理的差异性, 信息源分布的泛在性, 时空基准的统一性。综合PNT体系的显著优点是: 可以克服单一PNT信息覆盖范围的局限性, 提升从深空到深海无缝PNT服务的可用性; 克服单一PNT信息故障造成的PNT服务中断风险, 尤其是克服无线电PNT服务的干扰和欺骗造成的影响, 实现复杂环境下PNT服务的连续性; 补偿单一PNT可能的系统误差影响, 提高PNT服务的精确性; 多源PNT信息融合, 还可以提升PNT服务的可靠性和安全性。本节主要描述综合PNT体系中的基础设施部分。

3.1 深空PNT基础设施

深空PNT基础设施主要是深空卫星导航星座。深空飞行器安全导航、深空环境监测和深空科学研究都需要位置时间信息, 目前深空PNT保障主要依靠天文

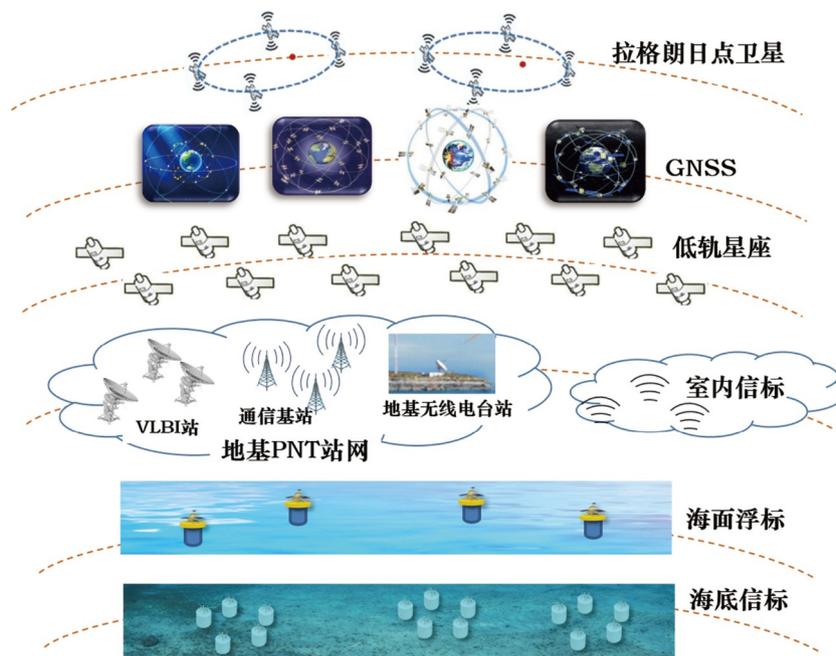


图2 综合PNT基础设施示意图
GNSS表示全球导航卫星系统, VLBI表示甚长基线干涉测量

导航和地基甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)等方法, 未来也可以采用脉冲星导航(帅平等, 2006; 毛悦等, 2009). 脉冲星是银河系之外的致密天体, 半径仅有10km, 其质量却是太阳质量的1.44~3.2倍, 是除黑洞外密度最大的天体. 脉冲星射线具有良好的周期稳定性, 利用脉冲星X射线的周期稳定性进行时差测量, 可以测定两点之间的距离. 但是脉冲星不属于基础设施, 为了构建可控的深空PNT基础设施, 我们认为应该在深空适当位置布设深空导航星座. 深空导航星座应该优选地月拉格朗日点和日地拉格朗日点布设, 宜采用与北斗卫星导航系统同频点的信号和相同的信号调制模式, 也可以设计成与北斗导航信号互操作信号. 此外, 为了实现与北斗系统的整体PNT服务, 地月和日地拉格朗日星座可以设置上下天线, 对下天线协助北斗星座播发导航电文, 为近地用户提供更好的PNT服务, 对上天线可以与北斗卫星星座的旁瓣弱信号一起为深空用户提供PNT服务.

3.2 深海PNT基础设施

深海PNT基础设施主要指海底控制点网, 即海底声呐信标网. 海底声呐信标网首先涉及海底方舱研制、信标布放点勘选、信标点本身的精确定位策略, 以及不同海洋环境的声呐观测模型构建及其相应的数据处理策略(杨元喜等, 2017, 2020; Yang和Qin, 2021; Qin等, 2022, 2023). 近几年, 中国学者在海洋水下导航定位研究领域做了大量卓有成效的研究和探索, 在南海某海区布设了大于3000m水深的海底信标网, 采用圆形观测和交叉十字(或井字型)观测相结合的海底观测构型(杨元喜等, 2020; 曾安敏等, 2021), 试验结果表明, 海底信标测定精度达到0.3米左右; 利用神经网络学习法构建了海洋声速场模型(Wang等, 2020a)和等效声速模型(Xin等, 2018)等, 构建了顾及海洋环境的广义水下弹性声呐观测模型(Yang和Qin, 2021; Qin等, 2022), 实现了水下厘米级定位; 建立了海底定位与导航声呐观测随机模型(辛明真等, 2020), 尝试了海洋水下导航定位系列算法, 如抗差自适应无味滤波(Unscented Kalman filter, UKF)(Wang等, 2020b; Qin等, 2023)、附加深度差和水平距离约束的深海控制点差分定位算法(孙文舟等, 2019)等. 为了适时标校水下载体惯性导航误差积累, 未来应该建立海底“接力信标网”, 即相隔数百海里布设一组声呐信标, 实现水下载

体米级或十米级标校, 增强水下载体的长航时精确定位和导航能力.

3.3 地基PNT基础设施

作为国家综合PNT体系建设的重要组成部分, 地基无线电PNT基础设施必须得到加强. 这里的地基无线电PNT基础设施不是指地基GNSS增强(Ground-Based Augmentation System, GBAS), 而是指远程无线电PNT技术和发展正旺的5G地基通信基站网络. 因为GBAS只解决地基监测站覆盖范围内的精度增强, 不解决几何覆盖增强, 也不解决信号功率增强, 更不能作为GNSS的替补.

相比于天基GNSS的PNT服务能力, 地基低频和甚低频PNT信号具有更强的抗干扰防欺骗能力. 20世纪中期, 远程地基无线电导航技术曾经得到长足发展, 并获得广泛应用. 美国率先开始远程导航(Long Range Navigation, Loran)技术研究(简称罗兰导航技术)(Fuentes, 1987; 胡安平, 2018), 形成了能够覆盖全球的完整的地基导航体系, 后来又带动了欧米伽、恰卡、阿尔法等在内的多种基于低频或甚低频的远程地基导航系统. 罗兰C和恰卡采用低频(Low Frequency, LF)频段发射脉冲信号, 提供区域陆基远程(当时一般限于2000km)无线电导航和授时服务; 欧米伽、阿尔法系统采用甚低频(Very Low Frequency, VLF)频段发射脉冲信号, 提供全球覆盖(一般可以大于5000km)导航与授时服务. 这些低频和甚低频地基PNT系统为当时全球航空航海导航授时提供了强有力支持. 由于GNSS的出现, 地基无线电PNT服务的优越性得不到体现, 于是大多数地基无线电PNT基础设施都停止了运行与维护. 随着GNSS脆弱性的显现, 发达国家(尤其是美国和俄罗斯)又开始重启、重建或完善地基无线电PNT基础设施, 并将其作为GNSS的补充. 美国重启罗兰C系统, 俄罗斯用“天蝎座”系统替代原来的恰卡发射机网络. “天蝎座”系统可以覆盖更远距离, 通过单一控制台站即可实现全网统一控制, 具备自动维护发射信号参数、抑制残余无线电脉冲等优点(甄卫民和丁长春, 2019). 重新建设或改进的地基无线电PNT基础设施无论是服务范围还是服务性能都较20世纪中期的相应设施能力更强, 能够满足关键基础设施对PNT服务性能的要求, 也能够满足飞机航路导航、终端区导航、非精密进近, 船只航路导航、低能见度下安全进

入港口等PNT保障需求。

中国也先后建立了长河系列低频导航台站(王智等, 2011), 在未来的地基无线电PNT基础设施方面, 除了继续升级改造现有地基长波导航台站外, 还应增加建立分布更加合理的地基低频和甚低频PNT台网, 形成几乎全球覆盖的、并与北斗PNT系统形成互补的无线电PNT体系。但是, 地基低频和甚低频PNT保障终端的小型化和低功耗化仍需付出艰苦的努力。

领土范围内的地基蜂窝无线电通信(尤其5G)基站网络也可作为国家PNT重要基础设施的组成部分。蜂窝无线电基站网络可以为基站覆盖范围内的用户提供PNT服务(Liu等, 2020; Zhang等, 2022), 至少可以作为国内重要基础设施PNT保障的重要补充手段。

4 弹性PNT应用模式

弹性PNT(Resilient PNT)是用户灵活集成PNT信息、灵活使用PNT的关键。综合PNT为用户提供多源的PNT信息源, 但是要真正实现用户使用PNT的安全可靠, 还必须建立弹性化PNT使用策略, 研发弹性PNT终端, 形成弹性化PNT应用模式。弹性PNT类似于柔性PNT(Flexible PNT)或自适应PNT(Yang等, 2001; Yang和Gao, 2006)。早期的自适应PNT侧重多类PNT信息源的随机模型自适应, 以达到最佳平衡各类PNT信息源的作用。而弹性PNT则包括弹性硬件集成, 观测模型和动力学模型弹性优化以及多源PNT信息随机模型的弹性调整, 最终实现多源PNT信息的弹性融合(杨元喜和高为广, 2004)。

4.1 弹性PNT信息集成

弹性PNT信息集成是多源PNT信息应用的基础。弹性PNT的目标是多源PNT信息能够相互补充, 相互支持, 甚至相互替代。于是, 弹性PNT首先必须有冗余PNT信息, 没有冗余则不可能有“弹性”选择。显然, 综合PNT是弹性PNT的重要基础。在无任何干扰、欺骗和遮挡的情况下, 深空、近地空间和地表用户可以优先集成无线电PNT, 包括GNSS信号及其星基和地基GNSS增强信号、深空拉格朗日星座PNT信号、地基低频和甚低频无线电PNT信号以及蜂窝等无线电PNT信号。一旦无线电信号被遮挡、干扰或欺骗, 则惯性导航信息(李荣冰等, 2004)、天文导航信息(包括脉冲星

PNT信息)、光学导航信息、量子感知(邹宏新, 2014)等自主PNT信息都可作为弹性PNT信息源。

不同PNT应用环境应该采用不同的弹性化集成策略(如图3所示)。例如, 深空用户可以集成天文导航信息(含脉冲星时空信息)、VLBI以及GNSS旁瓣信号; 海洋水下用户可以使用布设在海底的声呐信标提供的PNT信息或海面浮标提供的声呐信息以及地球重力场、磁力场和海底地形等匹配信息源; 室内用户可以使用伪卫星无线电PNT信息、脉冲无线电(Ultra Wide Band, UWB)信息(庞艳等, 2005)、Wi-Fi和蓝牙定位信息(王睿等, 2011)以及声学、光学、雷达、视觉(El-Sheim和Li, 2021)定位信息等。

此外, 惯性导航传感器感知的速度和加速度信息(李荣冰等, 2004; El-Sheim和Youssef, 2020)、基于量子感知的PNT信息(包括量子时钟信息、量子感知物理场扰动信息和量子惯性导航信息等)(邹宏新, 2014), 以及微型原子钟(杨元喜和李晓燕, 2017)信息等都可作为弹性PNT集成的信息源。

显然, 弹性PNT信息集成包括综合PNT基础设施提供的PNT信息和各类传感器在自然界感知的PNT信息。弹性PNT集成追求微型化集成, 强调低功耗, 强调可用性(availability)和可靠性(reliability), 于是微型化PNT是弹性PNT(杨元喜和李晓燕, 2017)发展的主要方向之一。

4.2 弹性PNT函数模型

弹性函数模型是弹性PNT信息融合的基础。在复杂环境下, PNT信息对背景环境的敏感度是不同的。弹性函数模型优化强调不同环境下各类PNT观测模型能够自动补偿各类系统误差(杨元喜, 2018)。通常, 各类PNT观测模型是固定的, 即使存在系统误差, 一般也是施加系统误差改正, 使观测模型简化。但是弹性PNT函数模型优化强调在多源PNT常用观测模型的基础上, 附加包含待估参数的弹性修正项, 在多源PNT信息融合过程中, 或在某些先验信息的支持下, 与PNT参数一起解算。当然, 可以通过参数约化方式消除这些非PNT待估参数。

弹性函数模型优化的核心是系统误差补偿。我们知道, 任何观测模型或动力学模型都是某种意义上的近似, 基本不存在完全准确的函数模型, 无论是非线性模型的线性化, 还是动力学模型的简化都会存在残

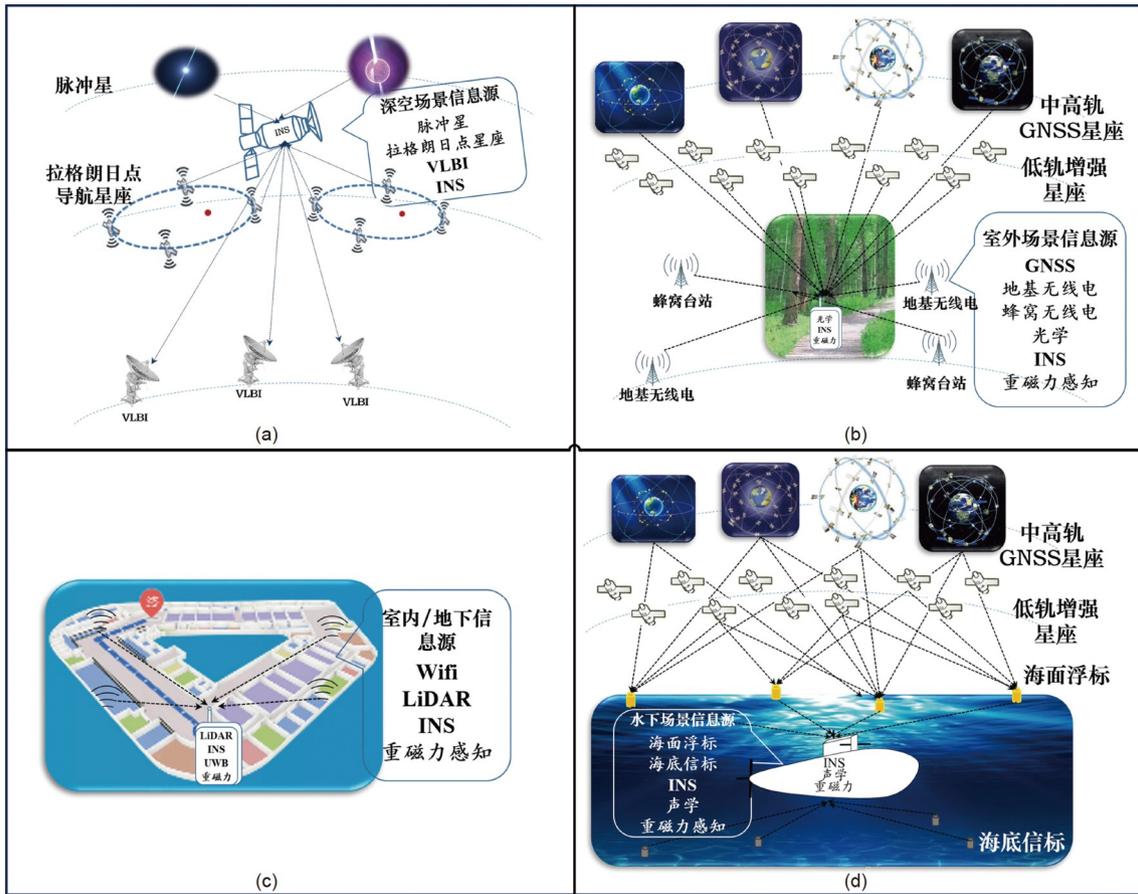


图3 典型场景的信息弹性集成策略

余的模型误差。在复杂城市环境、山区、深空、深海、室内和地下，各类PNT感知信息都会含有特有的系统误差，通常是随时间不断变化的系统误差。多源PNT信息融合为揭示各类PNT信息的系统误差提供了重要支撑，因为多物理原理的PNT信息对环境的敏感性是不同的，误差性质也是不同的，这些误差本身通常具有补偿性。只要在函数模型中设置合适的弹性误差修正项，即可在数据融合准则下求得这些系统误差项，或补偿这些系统误差影响。深海弹性声呐观测模型(Yang和Qin, 2021; Qin等, 2022)就是一种极好的尝试。

4.3 弹性PNT随机模型

弹性随机模型是指各类PNT感知信息不确定度的度量模型。同一PNT信息源在不同环境下PNT信息的不确定度并不相同，弹性PNT随机模型强调PNT随机

模型与相应观测信息的实际不确定度自适应。弹性随机模型研究成果较为丰富，其中方差分量估计(杨元喜和徐天河, 2003)是被广泛使用的随机模型调整算法，自适应Kalman滤波(Yang等, 2001; Yang和Gao, 2006)所使用的自适应因子也主要用于调整不同PNT信息的随机模型。

弹性随机模型的核心是有可靠的函数模型作为基础，一旦函数模型出现偏差甚至异常，则会影响随机模型，于是必须攻克函数模型与随机模型整体优化难题。为了控制异常误差对随机模型的影响，基于抗差估计理论的随机模型优化应该成为弹性PNT随机模型的研究重点之一。

弹性PNT信息集成、弹性函数模型优化和弹性随机模型调整的主要目的是弹性PNT信息融合，弹性化PNT研究才刚刚起步，理论、算法、模式都需要深入研究。

5 智能PNT应用模式

无论是综合PNT还是弹性PNT, 其核心都是要确保用户PNT使用的安全性、连续性、精确性和可靠性. 由于PNT应用环境的千变万化, 弹性PNT应用模式还应被赋予智能化要素, 向智能PNT应用模式发展(杨元喜等, 2021b). 智能PNT应用包括用户智能感知、多源信息智能集成以及函数模型、随机模型智能优化三个核心内容(如图4所示).

5.1 PNT用户智能感知与多源信息智能集成

用户智能感知是智能PNT应用的前提. 用户处于特定的环境中, PNT信息源的可用性、可靠性和精确性不同; 同时, 用户有特定的PNT需求, 对PNT信息的时效性、安全性和精度要求也不同. 因此, 智能PNT应用须首先识别用户所处环境, 理解用户需求, 再依据环境与用户需求进行PNT信息源的智能选择和集成, 如此才有可能提供与用户需求及其所处环境相匹配的PNT应用服务. 例如, 水下用户不可能接收到GNSS信号, 则水下用户PNT信息集成时应智能化转为“惯性导航(INS)/声呐信号定位/地磁场匹配/重力场匹配/地形匹配”集成模式, 一旦水下潜器浮出海面, 则自动切换成“地基无线电信号/GNSS信号/INS”模式.

应该指出, 智能集成必须是弹性集成, 但是弹性集成不一定赋予“智能”, 于是, 弹性集成不一定包含PNT智能. 此外, 弹性PNT信息集成需要有先验用户需求和用户环境信息的支持, 如果将用户需求和环境的智能识别、感知和挖掘纳入弹性PNT信息集成, 则弹性PNT信息集成即具备了智能集成要素.

5.2 PNT函数模型和随机模型智能优化

智能PNT模型是提升PNT应用智能化的基础. 利用智能学习可以实时或准实时优化PNT观测模型和随机模型, 使观测模型适应于观测环境, 使随机模型适应于观测的不确定度. 凡是具有先验信息的模型改进可以纳入监督学习, 凡是没有先验信息支持的PNT模型优化可以纳入非监督学习. 例如, 有学者提出利用监督学习法判断GNSS的多路径信号和非视距信号, 可以改进各类GNSS信号观测模型、控制多路径误差影响(朱彬等, 2021), 这类基于智能学习的模型改进属于PNT智能化模型优化. 需要注意的是, “函数模型智能优化”包括“函数模型弹性优化”, 但是, 弹性优化不一定是智能优化; 同理, “随机模型智能优化”包括“随机模型弹性调整”, 但是弹性调整不一定是智能化的调整. 当对函数模型、随机模型的弹性优化融入智能化要素, 则即可实现对函数模型、随机模型的智能优化.

PNT智能模型优化是多源PNT信息智能融合的基础. 多源PNT融合不是所有PNT信息的简单加权平均, 而是基于各类PNT信息的可靠性(包括连续性)、精确性和不确定性等多要素综合平衡的智能融合. 没有PNT信息可靠性的智能学习与智能判断, 不可能建立可靠的、优化的PNT观测模型; 没有PNT信息不确定性的智能跟踪与智能评估, 不可能实现PNT随机模型的智能调整; 没有PNT智能函数模型和智能随机模型的支持, 多PNT信息源的智能融合就不可能实现, 同样, 智能PNT应用就得不到保障. 在大多数PNT应用环境下, 通过智能学习能够获得PNT观测模型的系统偏差, 进而优化PNT函数模型; 同样通过智能学习, 也能感知各类PNT随机模型的适应性及其偏差, 为PNT随机模型优化提供支持(杨元喜等, 2021a).

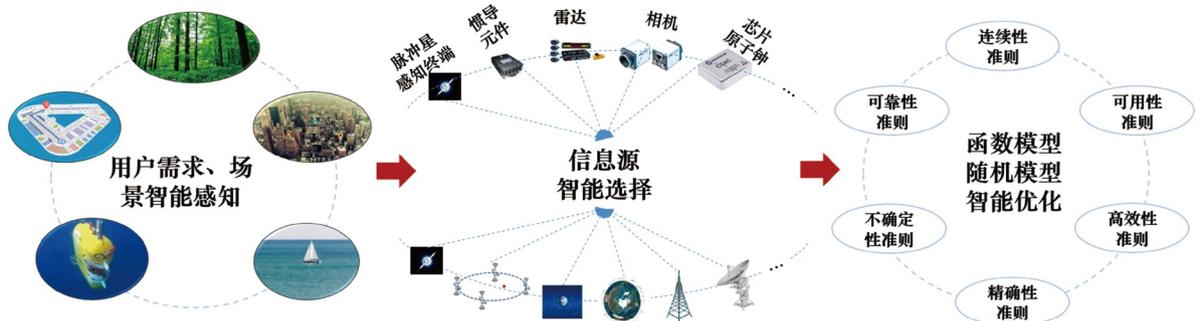


图4 智能PNT核心要素

6 结束语

无论是现在还是将来, GNSS都是PNT体系的核心, 因为GNSS的服务范围、服务性能以及服务普及性、灵活性都是其他PNT信息源无法比拟的。但是GNSS PNT在信号强度、穿透性、抗干扰、防欺骗等方面都有其天然的脆弱性。为了提升PNT服务的安全性、坚韧性和覆盖性, 必须建立从深空到深海, 全域无缝的PNT基础设施体系及其相应的弹性PNT和智能PNT应用体系。

(1) 作为PNT服务体系的核心, 必须首先利用现有北斗星座的星间链路, 提升北斗卫星导航系统的自主时空基准维持能力和自主PNT服务能力; 进而充分利用北斗GEO和IGSO卫星, 提升北斗系统星基增强能力和星基精密单点定位能力; 同时利用低轨卫星星座提升北斗卫星系统的抗干扰、防欺骗性能, 并实现PNT能力增强。

(2) 作为重要基础设施安全运行的核心基础, 必须构建功能强大、信息源丰富的国家综合PNT基础设施, 建设深空导航星座和深海声呐信标网络系统, 为深空和深海用户提供PNT服务; 加强地基低频和甚低频长波PNT台站建设, 作为北斗全球PNT服务的重要备份; 地基5G基站也可作为境内重要基础设施的备份PNT服务系统。

(3) 在综合PNT基础设施以及其他自主PNT感知信息的支持下, 必须构建适应各类复杂环境的弹性PNT应用模式, 从弹性PNT传感器集成、弹性函数模型、弹性随机模型和弹性数据融合等方面构建理论严密、高可用、高连续、高稳健、高可靠、高安全的PNT应用系统。

(4) 智能PNT用户感知、智能函数模型优化和智能随机模型改进以及相应多源PNT智能融合是PNT智能应用的前提, 也是未来PNT智能化发展的主要方向之一。

(5) 以北斗为核心的安全PNT体系是中国PNT体系发展的必然趋势, 综合PNT、弹性PNT和智能PNT是实现安全PNT的重要手段。综合PNT提供了全域、无缝、多源的PNT信息源; 弹性PNT面向用户, 提供弹性的多源PNT应用模式; 智能PNT是弹性PNT的进一步发展, 核心在于将知识学习、智能感知和智能优化要素融入PNT应用的各个环节。

参考文献

- 胡安平. 2018. 陆基超远程无线电导航发展研究. 导航定位与授时, 5: 1-6
- 李荣冰, 刘建业, 曾庆化, 华冰. 2004. 基于MEMS技术的微型惯性导航系统的发展现状. 中国惯性技术学报, 12: 88-94
- 毛悦, 宋小勇, 冯来平. 2009. X射线脉冲星导航可见性分析. 武汉大学学报(信息科学版), 34: 222-225
- 庞艳, 张立军, 陈常嘉. 2005. 时间平均改进的UWB精确定位算法. 北京交通大学学报, 29: 60-63
- 帅平, 陈绍龙, 吴一帆, 张春青, 李平. 2006. X射线脉冲星导航技术及应用前景分析. 中国航天, 10: 27-32
- 孙文舟, 殷晓冬, 曾安敏, 暴景阳. 2019. 附加深度差和水平距离约束的深海控制点差分定位算法. 测绘学报, 48: 1190-1196
- 王睿, 赵方, 彭金华, 罗海勇, 陆波, 陆涛. 2011. 基于Wi-Fi和蓝牙融合的室内定位算法. 计算机研究与发展, 48(增刊): 28-33
- 王智, 严建华, 张洪源. 2011. 长河二号导航系统及其技术更新. 数字通信世界, (6): 86-87
- 辛明真, 阳凡林, 薛树强, 王振杰, 韩云峰. 2020. 顾及波束入射角的常梯度声线跟踪水下定位算法. 测绘学报, 49: 1535-1542
- 杨宇飞, 杨元喜, 徐军毅, 许扬胤, 赵昂. 2020. 低轨卫星对导航卫星星座轨道测定的增强作用. 武汉大学学报(信息科学版), 45: 46-52
- 杨元喜. 2016. 综合PNT体系及其关键技术. 测绘学报, 45: 505-510
- 杨元喜. 2018. 弹性PNT基本框架. 测绘学报, 47: 893-898
- 杨元喜, 高为广. 2004. 基于多传感器观测信息抗差估计的自适应融合导航. 武汉大学学报(信息科学版), 29: 885-888
- 杨元喜, 郭海荣, 何海波. 2021a. 导航定位原理. 北京: 国防工业出版社
- 杨元喜, 李晓燕. 2017. 微PNT与综合PNT. 测绘学报, 46: 1249-1254
- 杨元喜, 刘焱雄, 孙大军, 徐天河, 薛树强, 韩云峰, 曾安敏. 2020. 海底大地基准网建设及其关键技术. 中国科学: 地球科学, 50: 936-945
- 杨元喜, 任夏. 2018. 自主卫星导航的空间基准维持. 武汉大学学报(信息科学版), 43: 1780-1786
- 杨元喜, 徐君毅. 2016. 北斗在极区导航定位性能分析. 武汉大学学报(信息科学版), 41: 15-20
- 杨元喜, 徐天河, 薛树强. 2017. 我国海洋大地测量基准与海洋导航技术研究进展与展望. 测绘学报, 46: 1-8
- 杨元喜, 徐天河. 2003. 基于移动开窗法协方差估计和方差分量估计的自适应滤波. 武汉大学学报(信息科学版), 28: 714-718
- 杨元喜, 许扬胤, 李金龙, 杨诚. 2018. 北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析. 中国科学: 地球科学, 48: 584-594
- 杨元喜, 杨诚, 任夏. 2021b. PNT智能服务. 测绘学报, 50: 1006-1012
- 曾安敏, 杨元喜, 明锋, 马越原. 2021. 海底大地基准点圆走航模式定位模型及分析. 测绘学报, 50: 939-952

- 张小红, 马福建. 2019. 低轨导航增强GNSS发展综述. *测绘学报*, 48: 1073–1087
- 甄卫民, 丁长春. 2019. 陆基远程和超远程无线电导航系统发展现状与趋势. *全球定位系统*, 44: 10–15
- 朱彬, 杨诚, 刘岩. 2021. GNSS 多径信号 3 种非监督学习方法分析与比较. *测绘学报*, 50: 1762–1771
- 邹宏新. 2014. 新一代惯性导航技术——量子导航. *国防科技*, 35: 19–24
- Aresta C. 2017. Resilience of the PNT Systems: A Portuguese case study [EB/OL]. [2021-07-28]. <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/21053/1/ASPOF%20Catarina%20Matos%20Aresta%20-%20Resilience%20of%20the%20PNT%20systems%20-%20A%20portugueses%20case%20study.pdf>
- Dalal M. 2012. Low Noise, Low power interface circuits and systems for high frequency resonant Micro-Gyroscopes. Doctoral Dissertation. Atlanta: Georgia Institute of Technology
- El-Sheimy N, Youssef A. 2020. Inertial sensors technologies for navigation applications: State of the art and future trends. *Satell Navig*, 1: 9
- El-Sheimy N, Li Y. 2021. Indoor navigation: State of the art and future trends. *Satell Navig*, 2: 88–110
- Executive Office of the President. Strengthening national resilience through responsible use of positioning, navigation, and timing services [EB/OL]. (2020-02-18). [2022-07-07] <https://www.federalregister.gov/documents/2020/02/18/2020-03337/strengthening-national-resilience-through-responsible-use-of-positioning-navigation-and-timing>
- Fuentes A F. 1987. LORAN-C in the 21st century. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2: 8–10
- Li R, Zheng S Y, Wang E, Chen J P, Feng S J, Wang D, Dai L. 2020. Advances in BeiDou Navigation Satellite System (BDS) and satellite navigation augmentation technologies. *Satell Navig*, 1: 126–148
- Liu J N, Gao K F, Guo W F, Cui J S, Guo C. 2020. Role, path, and vision of “5G + BDS/GNSS”. *Satell Navig*, 1: 23
- Mneff J. 2010. Changing the game changer, the way ahead for military PNT. (2010-10-25). [2022-6-20]. <https://insidegnss.com/military-pnt-the-way-ahead>
- Parkinson B. 2015. Assured PNT strengths and synergies [EB/OL]. [2022-01-31]. <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2015-06/parkinson2.pdf>
- Parkinson B. 2017. Assuring PNT for all [EB/OL]. [2022-01-31]. <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2017-11/parkinson.pdf>
- Qin X, Yang Y, Sun B. 2022. The refined resilient model for underwater acoustic positioning. *Ocean Eng*, 266: 112795
- Qin X, Yang Y, Sun B. 2023. A robust method to estimate the coordinates of seafloor stations by direct-path ranging. *Mar Geodesy*, 46: 83–98
- Ren X, Yang Y, Zhu J, Xu T. 2017. Orbit determination of the Next-Generation Beidou satellites with intersatellite link measurements and a priori orbit constraints. *Adv Space Res*, 60: 2155–2165
- Ren X, Yang Y, Zhu J, Xu T. 2019. Comparing satellite orbit determination by batch processing and extended Kalman filtering using inter-satellite link measurements of the next-generation BeiDou satellites. *GPS Solut*, 23: 25
- Scholz A. 2020. Resilient PNT system concepts for critical infrastructure [EB/OL]. [2021-07-28]. <https://www.gps.gov/cgsic/meetings/2020/scholz.pdf>
- The World Radiocommunication Conference Resolution 609. 2007. Protection of aeronautical radionavigation service systems from the equivalent power flux-density produced by radionavigation-satellite service networks and systems in the 1164-1215MHz frequency band. [2020-06-20]. https://www.itu.int/en/ITU-R/space/Res609%20CM%20Documents/RES-609_e.pdf
- U.S. Department of Transportation and Department of Defense. 2010. National positioning, navigation, and timing architecture implementation plan. (2010-07-28). [2020-06-20]. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/18293>
- U.S. Department of Transportation. What is positioning, navigation and timing (PNT)? [EB/OL]. (2017-06-13). [2020-06-20]. <https://www.transportation.gov/pnt/what-positioning-navigation-and-timing-pnt>
- U.S. Senate. 2015. National positioning, navigation and timing resilience and security Act of 2015 [EB/OL]. (2017-12-12). [2020-06-20]. <https://www.congress.gov/bill/114th-congress/house-bill/1678/text?r=6&s=5>
- U.S. Senate. 2017. National timing resilience and security act of 2017 [EB/OL]. (2017-12-12). [2020-06-20]. <https://www.congress.gov/bill/115th-congress/senate-bill/2220/text?q=%7B%22search%22%3A%22timing+resilience%22%7D&r=2&s=6>
- U.S. Senate. 2018. National timing resilience and security act of 2018 [EB/OL]. (2018-11-4). [2020-06-20]. <https://rntfnd.org/wp-content/uploads/National-Timing-Security-and-Resilience-Act-of-2018.pdf>
- Wang J, Xu T, Nie W, Yu X. 2020a. The construction of sound speed field based on back propagation neural network in the global ocean. *Mar Geodesy*, 43: 621–642
- Wang J, Xu T, Wang Z. 2020b. Adaptive robust unscented Kalman filter for AUV acoustic navigation. *Sensors*, 20: 60
- Xin M, Yang F, Wang F, Shi B, Zhang K, Liu H. 2018. A TOA/AOA underwater acoustic positioning system based on the equivalent sound speed. *J Navigation*, 71: 1431–1440
- Yang Y F, Yang Y X, Hu X, Tang C, Guo R, Zhou S, Xu J, Pan J, Su M.

2021. BeiDou-3 broadcast clock estimation by integration of observations of regional tracking stations and inter-satellite links. *GPS Solut*, 25: 57
- Yang Y X, He H B, Xu G. 2001. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning. *J Geodesy*, 75: 109–116
- Yang Y X, Gao W G. 2006. An optimal adaptive Kalman filter. *J Geodesy*, 80: 177–183
- Yang Y X, Mao Y, Sun B J. 2020. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system. *Satell Navig*, 1: 1–8
- Yang Y X, Liu L, Li J L, Yang Y F, Zhang T Q, Mao Y, Sun B J, Ren X. 2021. Featured services and performance of BDS-3. *Sci Bull*, 66: 2135–2143
- Yang Y X, Qin X P. 2021. Resilient observation models for seafloor geodetic positioning. *J Geod*, 95: 79
- Yang Y X, Ding Q, Gao W G, Li J L, Xu Y Y, Sun B J. 2022. Principle and performance of BDSBAS and PPP-B2b of BDS-3. *Satell Navig*, 3: 5
- Zhang W, Yang Y X, Zeng A M, Xu Y Y. 2022. A GNSS/5G integrated three-dimensional positioning scheme based on D2D communication. *Remote Sens*, 14: 1517–1536
- Zhao Q L, Wang C, Guo J, Yang G L, Liao M, Ma H Y, Liu J N. 2017. Enhanced orbit determination for BeiDou satellites with FengYun-3C onboard GNSS data. *GPS Solut*, 21: 1179–1190

(责任编辑: 熊熊)