

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.05.003

国家定位导航授时基础设施现状及能力展望

黄才¹, 赵思浩²

(1. 北京空间技术研制试验中心, 北京 100094;

2. 清华大学电子工程系, 北京 100084)

摘要:定位导航授时基础设施对国家安全和国民经济发展具有重要的支撑和促进作用。为适应未来用户数量、服务质量等方面攀升的需求,有必要提升国家定位导航授时基础设施的服务能力。全面介绍了国内外定位导航授时相关基础设施的发展现状,展望了我国定位导航授时能力的发展方向。

关键词:定位;导航;授时;能力展望

中图分类号:TN967

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2017)05-0019-08

Present Situation and Outlook of National Positioning, Navigation and Timing Infrastructures

HUANG Cai¹, ZHAO Si-hao²

(1. Beijing Space Technology Development and Experiment Center, Beijing 100094, China;

2. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The capability of positioning, navigation and timing infrastructures is essential to support national security and to promote economic development. It is a necessity to upgrade the service capability of positioning, navigation and timing infrastructures to satisfy the rising demand from the quantity of users and the quality of services. The current situation of the development of positioning, navigation and timing infrastructures globally and domestically is reviewed comprehensively. The development directions of China's positioning, navigation and timing capability are presented.

Key words: Positioning; Navigation; Timing; Capability outlook

0 引言

随着对各种自然现象、物理规律认识的不断深入以及对国内外各种相关技术的认识和工程经验的吸收,定位、导航与授时(PNT)也在国民经济的方方面面发挥着更广泛的作用和更深远的影响。当今,时间、空间信息已经成为信息化社会的基础资源,可以为用户提供 PNT 信息的系统和技术数量众多,发展迅速;其中,PNT 基础设施是指具有一

定规模,可以为一定数量用户提供 PNT 服务的系统。现有的 PNT 基础设施,典型的如北斗卫星导航系统、移动通信系统、航天测控网、长河二号等具有各自的优势和特点,在满足各类军民应用需求方面发挥了巨大的作用。随着国家利益的全球化拓展,国家安全、经济发展都对 PNT 能力提出了更高要求。以上所述的 PNT 基础设施的局限性逐步凸显,如北斗卫星导航系统由于用户接收信号电平很低^[1],在干扰、遮挡等恶劣环境下无法提供可靠的

收稿日期:2017-03-12;修订日期:2017-04-23

基金项目:国家自然科学基金联合基金项目(U1333203)

作者简介:黄才(1986-),男,高级工程师,主要研究方向为导航定位技术、航天器测控技术。

PNT 服务;仅依靠移动通信网络定位精度较低,误差通常在百米至千米量级^[2];航天测控网已经可以支持嫦娥系列月球探测器的定位导航任务,但现有系统的服务距离、延时、精度等能力无法满足未来更远的深空任务如火星探测等的需求^[3]。可见,现有 PNT 基础设施已经无法完全满足各行各业现有及未来的应用需求,因此,进一步提升国家 PNT 能力、开展顶层设计、发展新兴技术手段已经成为大势所趋。

本文对国内外 PNT 基础设施的现状进行综述,阐述了各类系统的特点与应用领域,分析了现有 PNT 基础设施的局限与差距,对我国 PNT 能力的发展进行了展望。

1 国外定位导航授时基础设施发展现状

基于对系统内部和外部条件的依赖情况,可以将 PNT 基础设施划分为独立系统和增强系统两大类。其中,独立系统不需依靠本系统之外的元素即可提供 PNT 服务,而增强系统则是针对某些应用和需求为独立 PNT 系统提供增强功能。

1.1 独立定位导航授时系统

当前具备最广泛覆盖范围和最大用户数量的 PNT 基础设施是全球导航卫星系统(GNSS)。其中美国的全球定位系统(GPS)是首个投入运营的导航卫星系统,包括空间段、控制段和用户段,空间段星座由 24 颗卫星组成,分别在 6 个地心轨道面内,每个面内有 4 颗卫星工作,其中 1 颗是备份星。空间段卫星对外播发导航信号,用户设备通过接收和处理这些信号完成对自身位置、速度、时间信息的提取和解算^[4]。

另一个与 GPS 同时期开始开发的 GNSS 是苏联的全球导航卫星系统(GLONASS),该系统标称星座具有 24 颗卫星。GLONASS 提供两种导航信号:标准精密导航信号(SP)和高精密导航信号(HP)。它的组成和功能与美国的 GPS 相类似,可用于海上、空中、陆地等各类用户的定位、测速及精密定时等^[5]。

21 世纪初期,欧洲开始研发伽利略系统(Galileo),该系统可为全球用户提供高精度时间和三维位置信息,同时具备与 GPS 的兼容和互操作特性。Galileo 提供 4 种服务:公开服务、生命安全服务、商用服务和公共特许服务。Galileo 还具备基于国际搜救系统的全球搜索与救援功能,其每颗卫星上装

有转发器,可将用户发出的求救信号转发到救援合作中心,以便启动救援工作^[6]。

根据其自身的条件和需求,日本也自主开发了区域卫星导航系统——准天顶卫星系统(QZSS),该系统卫星运行于大椭圆非对称“8”字形地球同步轨道,因此对于地面用户而言,卫星信号来自高仰角区域,可以服务于闹市区和中纬山区的通信与定位,向日本及附近区域发射测距信号,同时也发送其他 GNSS 的修正信号。QZSS 由 3 颗分置于相间 120° 的 3 个轨道面上的卫星组成,轨道周期为 23h56min,倾角 45°,偏心率 0.1,轨道高度为 31500~40000km^[7]。

为满足印度对可靠 PNT 服务的需求,印度开展了区域导航卫星系统(IRNSS)的研发工作。系统星座由 7 颗卫星组成,其中包括 3 颗地球静止轨道(GEO)卫星和 4 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星,可覆盖全印度及整个南亚区域,已于 2016 年 4 月发射完成^[8]。

其他具有代表性的无线电导航系统包括远距离无线电导航系统(LORAN)、伏尔/测距装置(VOR/DME)和战术空军导航系统(TACAN),以及航天器跟踪测量系统等等。LORAN 是一整套独立的系统,使用双曲线定位的原理为海岸附近区域的用户提供 PNT 服务。现代化后的系统称为 eLORAN,可以为非精密进近的航空应用、海港出入、地面移动电话、精密时间和频率应用提供服务。LORAN 可以作为 GPS 服务降级或不可用时的一种保障手段,因此 GPS 与 LORAN 的组合使用可以提高 PNT 服务的可靠性,在生命安全导航和精密时钟服务当中仍具有重要应用^[9]。

VOR/DME 和 TACAN 是在民用和军用航空中使用广泛的无线电测距系统,TACAN 为军用航空用户提供在航期间的方位和测距导航服务^[10],VOR/DME 则为民用航空用户提供相同服务^[11]。仪表着陆系统(ILS),也称为盲降系统,在飞机精密进近和着陆引导当中具有广泛应用,该系统利用甚高频信号为飞机提供着陆路线服务。

为完成对航天器的跟踪与控制,跟踪系统必不可少,该系统可通过地面天线跟踪特定目标,也可以使用天基设施如中继卫星完成跟踪任务,通常使用双向应答的方式获取目标距离,也可结合目标的动力学模型对其轨迹进行跟踪^[12]。中继卫星系统由在轨 GEO 和地面站组成,为航天飞机、国际空间

站和美国航空航天局(NASA)用户提供数据、语音和视频服务,以及定位和定轨信息。此外,还可以向其他卫星播发全球差分 GPS 实时改正信息以支持自主精密定轨、科学研究和用于安排飞行计划。信号通过 NASA 中继卫星的 S 频段播发,其中也包含与 GPS 同步的测距信号^[13]。

另外,日常使用的移动通信网络可以通过基站与移动电话之间的通信提供授时服务以及较低精度的定位服务,例如 E911 服务可以给出精度在百米量级的呼叫者位置信息^[14]。

1.2 定位导航授时增强系统

增强系统针对某些应用和需求为独立 PNT 基础设施提供增强和辅助,用户可以获得比独立系统更优的性能。增强系统按照信号源部署的位置可以分为天基和地基增强系统,从服务区域大小的角度也可分为广域和局域增强系统。

(1) 天基增强系统

天基增强系统中具有代表性的是美国空军运营的广域增强系统(WAAS),用于为 GPS 用户提供更高的精度、可用性和完好性。该系统由 2 颗地球同步轨道卫星、2 个主控站、3 个上行站、25 个参考站组成,系统对 GPS 的误差参数进行计算和广播,广播信号与 GPS 信号兼容,可为美国南部范围内航空用户的起飞、在途、降落和进近提供服务。与 WAAS 类似的是日本气象卫星系统(MTSAT)、欧洲地球同步导航重叠服务(EGNOS)和印度地球同步增强导航系统(GAGAN)^[13]。

(2) 地基增强系统

全球差分全球定位系统(GDGPS)是美国喷气推进实验室(JPL)开发并运营的地基增强系统,可以为 NASA 科学任务提供高精度 GPS 增强信息;连续运行参考站(CORS)是美国国家海洋和大气局管理的地基 GPS 增强系统,负责在全球 650 多个站点间收集和分发 GPS 数据,用于精密定位和大气建模^[15]。国际 GNSS 服务(IGS),前身为国际 GPS 服务组织,该网络由来自 80 个国家的 350 个地面监控站组成,通过系统中的数据处理中心完成精确的卫星轨道计算,并以星历形式向全世界播发^[16],IGS 提供的高质量数据和产品被用于地球科学研究等多个领域^[13]。

一个典型的局域增强系统是美国的联合精密进近着陆系统(JPALS),该系统实时计算 GPS 差分改正信息并使用加密信息向用户播发,为军用飞机提供高精度位置信息以完成着舰、着陆的精密导引。

2 我国定位导航授时基础设施发展现状

经过多年的探索和发展,我国也陆续建成了若干提供 PNT 服务的基础设施,典型的如北斗卫星导航系统、航天测控网、长河二号、移动通信网络、无线电信标-差分系统、连续运行参考站系统、水声定位系统、地面无线通信定位系统等。本节将一一进行介绍。

我国自 20 世纪 80 年代就开始探索适合国情的卫星导航系统。2000 年建成了北斗一号卫星导航系统,通过 3 颗在中国上方的 GEO 卫星为中国区域范围内用户提供定位、授时服务。由于用户需要与卫星、地面站进行双向通信,其用户容量有限;同时双星定位需要使用高程参考信息,定位精度大约在 20m 量级^[17]。

北斗卫星导航(区域)系统已经于 2012 年底投入正式运营,其星座组成包括 5 颗 GEO 卫星、5 颗 IGSO 卫星和 4 颗中圆地球轨道(MEO)卫星组成,如图 1 所示。覆盖区域包括中国、澳大利亚及其周边区域。2020 年将建成覆盖全球的导航星座,包括 5 颗 GEO 卫星、27 颗 MEO 卫星和 3 颗 IGSO 卫星。北斗系统的开放信号能够提供优于 10m 的绝对定位精度、优于 0.2m/s 的绝对测速精度和优于 20ns 的授时精度^[1, 17]。目前北斗系统已经为地面、航空、航海、低轨航天器提供 PNT 服务^[18-19]。

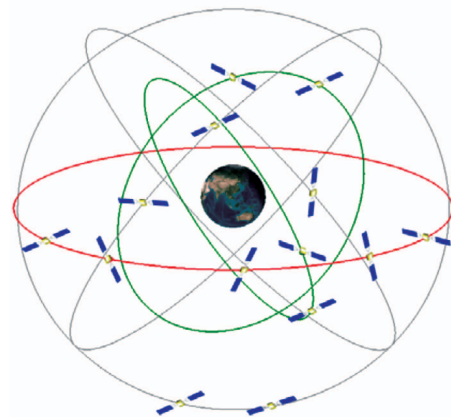


图 1 北斗系统星座

Fig. 1 Constellation of BeiDou system

为完成对各类航天器的测控与跟踪,我国自主建立了较为完备的航天测控网,目前用于航天器测量与通信的地面站与航天器之间通过双向通信实现测距,地面站经过数据处理后实现对航天器的定轨^[3, 20-21]。航天地面测控网主要为航天器提供

PNT 服务,对于探月等近深空任务具备一定的测距定轨能力。地面测控站分布如图 2 所示。

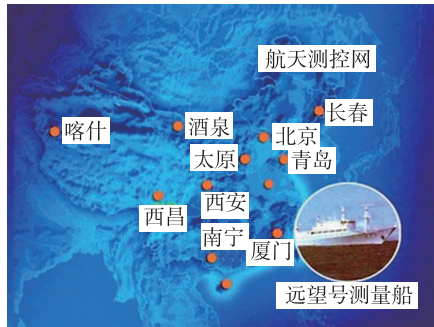


图 2 地面测控站分布

Fig. 2 Distribution of ground Telemetry, Track & Command stations

作为航天测控网的重要组成部分,中继卫星系统为中低轨道的航天器与航天器之间、航天器与地面站之间提供数据中继、连续跟踪与测控服务,我国目前建成的天链 1 号系统共计 3 颗 GEO 卫星^[22],对中低轨道航天器覆盖率达到 85% 以上^[23](图 3)。中继卫星与航天器之间通过双向测距码实

现测距功能,通过地面站解算得到航天器轨道和位置信息。对中低轨道航天器的轨道测量精度约 20m 量级^[24]。

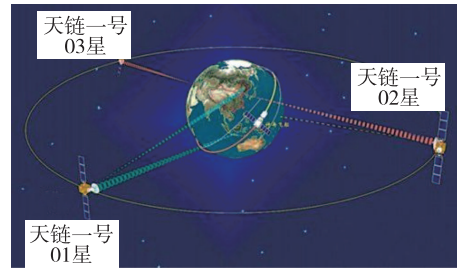


图 3 天链中继卫星系统

Fig. 3 Tianlian Tracking Data Relay Satellite System

另一种具有广泛应用的陆基导航系统是长河二号,这是一种类似美国罗兰-C 的无线电导航系统,我国目前建设了 6 个地面发射台、3 个系统工作局监测站和 3 个台链控制中心。3 个台链的覆盖范围北起日本海,东至西太平洋,南达南沙群岛^[25]。系统提供 PNT 服务,具备发播军用标准时间的功能。长河二号台站系统组成如图 4 所示。

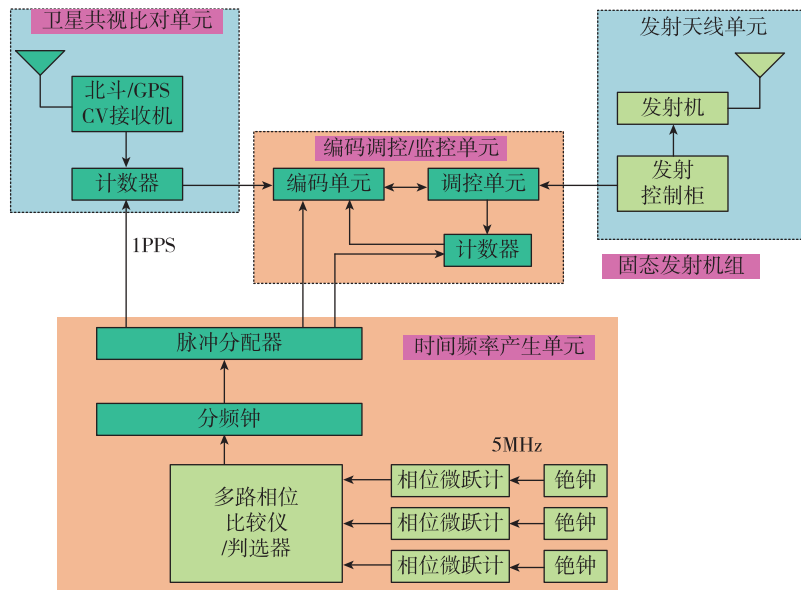


图 4 长河二号台站设备连接框图

Fig. 4 Devices of Changhe 2 Station

该系统用户设备接收发射台站信号,测量不同台站信号的到达时间差,利用多组测量值完成双曲线二维定位,或通过测定信号到达时间完成三维定位。

长河二号主要为地面、海面和低空飞行器提供

PNT 服务,定位精度在千米量级。在星基导航系统受限等情况下,长河二号可以作为补充和备份手段独立提供 PNT 服务,并且其发射功率大,干扰比较困难,具有一定的安全性优势。

民用的移动通信网设计之初并没有考虑用于

PNT。在 1996 年美国联邦通信委员会(FCC)公布 E-911 定位需求后,才逐步开展移动定位方面的研究与应用。依赖移动通信网络自身可以完成用户的定位功能,但定位精度、可用性等较低,仅提供较为粗略的位置估计^[26]。移动通信网络提供服务的范围受限于基站的布设,仅能为地面、浅表(有基站覆盖)及低空飞行器提供服务。

作为一种 GPS 的增强系统,无线电信标-差分 GPS(RBN-DGPS)利用航海无线电信标播发台播发 DGPS 修正信息,向用户提供较高精度的导航服务,在选择可用性(SA)政策执行期间起到一定作用(图 5)。该系统使用伪距差分技术,差分定位精度在 10m 量级,覆盖我国鸭绿江口至西沙群岛的沿海区域^[27-28]。

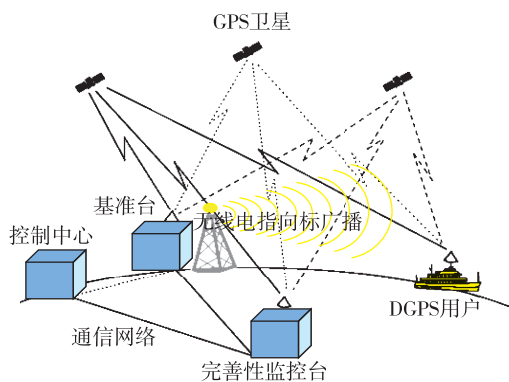


图 5 无线电信标-差分全球定位系统原理

Fig. 5 Principle of RBN-DGPS

我国也开展了连续运行参考站的建设,该系统通过对 GPS 等 GNSS 卫星信号的不间断观测获取该地区 and 该时段的局域精密星历以及其他改正参数,并将这些信息按格式存储和播发给用户。用户设备接收参考站信息,利用 RTK 技术获得高精度位置信息。连续运行参考站单站服务范围在 100km 以内,可以提供 RTK 实时定位、静态事后差分定位等服务。本质上而言,是一种 GNSS 增强系统^[29-30]。

水声定位是当前应用较为广泛的水下定位技术,通常分为超短基线(<10m)、短基线(50m)、长基线(6000m)系统,定位精度为基线的 1% 左右。以长基线系统为例,需要在水底安装 3 个以上位置精确已知的应答器,基线长度不超过几千米,同时用户设备需要配置收发信机接收和应答水底应答器的信号^[31-33]。

近年来,也出现了基于 GNSS 的水下定位系统,通过测定水面浮标位置并与水下用户、工作站通信获取水下用户位置^[32]。示意图如图 6 所示。

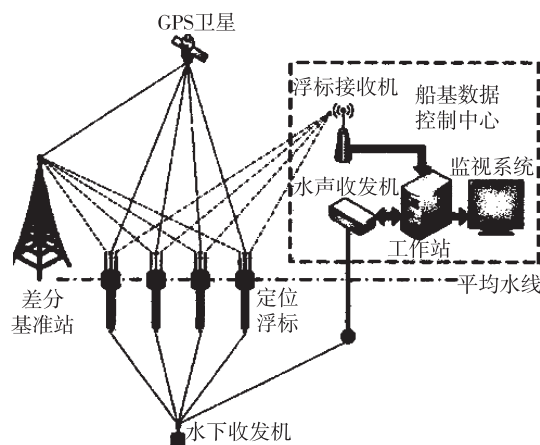


图 6 基于 GPS 的水下定位系统

Fig. 6 GPS-based underwater positioning system

该系统关注于解决室内外高精度无缝定位问题,该系统整合北斗系统、通信卫星、移动通信基站、WiFi 接入点等多种导航信息源,目前系统正在实施部署当中,具备室外亚米级,室内优于 3m 的定位精度^[34-35]。

除以上 PNT 基础设施之外,用户还可以通过一些自主配置的设备和技术手段获取定位导航和时间信息,例如使用惯性传感器、时钟、雷达、重力传感器、视觉传感器、磁力传感器、气压计、天文导航、脉冲星导航、地图匹配等。

3 现有定位导航授时基础设施能力差距

(1) 单系统服务范围受限

目前在地表和低高度空间内,北斗卫星导航系统覆盖区域仅在中国和西太平洋部分区域,覆盖范围较小,对于地表附近大范围内使用的武器和飞行器、海外人员和设备无法提供可靠的 PNT 服务。在地表北斗系统服务范围外,只能依靠 GPS、GLO-NASS 等国卫星导航系统或依靠用户配置的自主手段如惯导完成 PNT 任务。在中高轨道航天器飞行区域内(如 1000km 以上、月球轨道、深空等),北斗区域系统或正在部署中的北斗全球系统、中继卫星系统都无法对用户提供良好的覆盖能力。

其他基于无线电的 PNT 基础设施同样受到空间范围的限制,如长河二号目前服务范围主要在我国沿海区域,且高度范围有限;航天地面测控网站

点数量较少,分布稀疏,仅能对航天器部分弧段提供跟踪服务;中继卫星天线波束较窄,且用户数量有限;移动通信网、连续运行参考站、羲和系统需要依靠大量基站覆盖地面区域,但地下、水下、空间的服务能力不足;水下声学定位系统对于标校和部署要求较高,且受限于基线长度,工作范围有限。

(2)复杂电磁环境下抗干扰能力不足

射频信号受到电磁干扰导致工作能力下降是所有基于无线电的 PNT 基础设施共同面临的问题,而这个问题在 GNSS 领域尤为突出。以北斗系统为例,接收机在区域覆盖范围内接收到的信号最低为 -161dBW 左右,信号电平低,容易受到有意/无意的电磁干扰,同时抗欺骗能力有限;在遮挡、地下、水下等无线电信号严重衰减的环境下无法获取可靠的基于 GNSS 的 PNT 信息。另外对于有完好性/安全性要求的用户,卫星导航系统告警速度有限,如北斗系统卫星载荷异常的告警时间可能在分钟量级,无法满足某些应用如生命安全服务的需求。

(3)各基础设施互联互通不足

各个 PNT 基础设施相互之间缺乏统一规划和部署,沟通协调有限。由于面向的应用场景、用户群体和使用需求的不同,设计目标和实现的技术路线存在差异,也为各基础设施的互联互通造成了障碍,重复建设和个体能力不足的现象并存。

4 定位导航授时基础设施的发展趋势

PNT 系统的体系化发展成为未来的主要方向。随着 GPS 的成熟和广泛应用,美国获得全球持续有效导航能力的需求日益迫切,并明确提出 2025 年建成由 GPS、地面无线电、无线网络、伪卫星、天文导航等众多系统和技术组成的国家 PNT 体系。

同时也可以看到,卫星导航系统将是未来国家 PNT 体系中最重要基础设施之一。美、俄正在重点推进卫星导航系统现代化。GPS 现代化提出了军民频谱分离、更新军码、增加发射功率、区域功率增强等措施将进一步提高抗干扰和反利用能力。俄罗斯 GLONASS-K、GLONASS-KM 卫星将采用激光星间链路等多种先进技术,设计寿命延长至 15 年。原子钟、抗干扰、星间链路等技术的发展将使卫星导航系统向更高精度、抗毁顽存、功能多样、持续自主导航的方向发展。

随着各类行业应用对 PNT 需求的多样性和细分特点,单一 PNT 基础设施无疑无法满足所有需

求,因此多系统深度融合的特征更加明显。例如,卫星导航系统的兼容与互操作成为大势所趋;卫星导航、惯性导航、无线电导航、重力导航、磁力导航、地形匹配导航、天文导航、脉冲星导航等多手段组合运用将成为未来 PNT 体系化发展的重要趋势。

5 国家定位导航授时能力展望

借鉴国外 PNT 基础设施的发展情况,结合现有国家主要的 PNT 基础设施与相关技术的现状和未来可能的发展趋势,本章对我国未来 PNT 能力发展进行展望。

5.1 更广的服务范围

未来,在地表以上的区域内 PNT 应用规模继续快速增加,同时各种用户需求也在向地下/水下^[31, 36]和太空、深空扩展^[37-38],为提供更广范围的服务,PNT 基础设施的部署需要更多兼顾不同的环境,如地下、水下、高空、太空、深空(月球轨道、火星轨道)等。为此,需要将以地面、航空、近地空间为主要覆盖区域的 PNT 服务拓展到地下、水下、高空、深空等,同时需要具备在各种恶劣环境下(如信号阻碍环境、强电磁干扰环境等)提供 PNT 服务的能力。对于可能出现的大范围、多场景应用,需要支持在不同应用场景当中的无缝切换,保证 PNT 服务的连续性和稳定性。为此,在现有 PNT 基础设施的能力基础上,需要进一步扩展各自的服务范围,同时开发新型 PNT 基础设施以覆盖现有服务能力较弱或不能到达的区域,例如地下、水下、深空等。

5.2 更高的精度

对更高的定位精度、更小的授时误差的需求是 PNT 技术进步的最大驱动力。历史表明,人类对于 PNT 服务性能的要求不会停滞不前,随着目前可预期的和无法预期的应用的出现,用户可能提出优于毫米级的位置精度需求和优于纳秒级的授时精度需求,且在许多应用领域内,PNT 服务所能提供的精度水平已经显现出与当前用户需求的差距,为弥补这样的差距,紧跟甚至引领用户在精度方面的需求,PNT 基础设施有必要将其性能提升到更高的精度水平。以北斗系统为例,探索具有更高测距精度的信号体制是一种提高精度的可行手段。

5.3 更强的安全性

为应对故意和非故意干扰、欺骗以及各种环境

因素导致的 PNT 信息错误或降级, PNT 基础设施当中需要配置提高安全性的技术手段, 如无线电监测设备、信息比对与校验设备等; 由于用户对于 PNT 信息的安全性要求进一步提升, 因此需要在系统层面和/或用户设备层面配置故障监测和隔离设施。一种可能的技术是采用多种 PNT 信息源进行相互校验, 利用系统各自的特性和来自不同信源的先验知识提高抗干扰和反欺骗能力。

5.4 更好的协调性

随着应用领域的拓展和用户数量的快速增长, 当前各 PNT 基础设施独立发展的态势不能满足用户对快速部署、灵活配置、简便可靠、成本低廉等方面的需求。为此, 需要各 PNT 基础设施加强互联互通, 综合利用丰富的信息为用户提供可靠的服务。具体而言, 各 PNT 基础设施间可以设计具有一致性和通用性的信息接口和协议, 以便各个基础设施之间的数据交换, 提高系统间信息传输效率。

5.5 更低的代价

随着 PNT 服务范围的扩展, 对 PNT 基础设施的运营维护提出更高要求, 需要考虑到系统和设备的可维护性, 例如采取模块化生产等手段降低维护代价。在提升服务质量的同时需要减轻用户负担, 降低用户设备的功耗、体积、成本。信息技术的快速发展也推动着 PNT 基础设施各组件和设备的小型化和低成本化, 随着 PNT 服务的普及, 大规模批量生产可以进一步降低系统实现、部署和维护代价。

6 结论

本文对国内外 PNT 基础设施的发展现状进行了回顾, 分析了现有基础设施的几方面能力差距和发展趋势, 在此基础上, 对未来我国 PNT 的能力与发展做了初步展望。

参考文献

[1] 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号(2.0版)[R]. 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.

[2] 郎为民, 王大鹏, 吴帆. 无线通信系统定位技术应用研究[J]. 电信快报, 2016(6):3-8.

[3] 饶启龙. 航天测控技术及其发展方向[J]. 信息通信技术, 2011,5(3):77-83.

[4] Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces (IS-GPS-200G) [R]. USA, Global Positioning

Systems Directorate, 2013.

- [5] GLONASS Interface Control Document [R]. Russia, 2008.
- [6] Union E. European GNSS (Galileo) open service : signal in space : interface control document [M]. Publications Office of the European Union, 2010.
- [7] Quasi-Zenith satellite system navigation service interface specification for QZSS (IS-QZSS), V1.5 [S]. Japan Aerospace Exploration Agency, 2013.
- [8] (Mar, 27). <http://isro.gov.in>.
- [9] Misra P, Enge P. Global position system, signals, measurements, and performance(2nd ed.) [M]. Massachusetts: Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [10] Garfield W L. TACAN: a navigation system for aircraft [J]. Proceedings of the IEE-Part B: Radio and Electronic Engineering, 1958, 105(9S): 298-306.
- [11] Winick A B, Brandewie D M. VOR/DME system improvements [J]. Proceedings of the IEEE, 1970, 58(3): 430-437.
- [12] Brandel D L, Watson W A, Weinberg A. NASA's advanced tracking and data relay satellite system for the years 2000 and beyond [J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(7): 1141-1151.
- [13] National positioning, navigation, and timing architecture study - final report [R]. National Security Space Office, USA, 2008.
- [14] Zagami J M, Parl S A, Bussgang J J, et al. Providing universal location services using a wireless E911 location network [J]. IEEE Communications Magazine, 1998, 36(4): 66-71.
- [15] (Apr 4) . <http://www.gps.gov/systems/augmentations/>.
- [16] 李博, 唐斌, 周田, 等. 不同星历产品对 GPS 定位精度影响的分析[C]//中国卫星导航学术年会电子. 广州, 2012.
- [17] 北斗卫星导航系统发展报告(2.2版)[R]. 中国卫星导航系统管理办公室, 2013.
- [18] 冉承其. 北斗卫星导航系统的发展[J]. 卫星应用, 2013(4):4-7.
- [19] 冉承其. 北斗导航系统的建设与应用[J]. 地理信息世界, 2013(1):21-23.
- [20] 张庆君, 余孝昌, 左莉华, 等. 神舟载人飞船测控与通信分系统的研制[J]. 航天器工程, 2004, 13(1): 97-103.
- [21] 晓哲. 李济生谈航天测控与精密定轨[J]. 卫星与网络, 2013(7): 14-16.
- [22] 王家胜. 中国数据中继卫星系统及其应用拓展[J]. 航天器工程, 2013, 22(1):1-6.

- [23] 冯贵年,于志坚.跟踪与数据中继卫星系统的现状和发展[J].中国航天,2004(1):16-19.
- [24] 王彦荣,魏小莹,陈建荣.基于中继卫星的飞船定轨精度分析[J].载人航天,2011,17(3):22-26.
- [25] 王智,严建华,张洪源.长河二号导航系统及其技术更新[J].数字通信世界,2011(6):86-87.
- [26] 陈浩.移动通信定位技术比较研究[J].科技创新与应用,2012(24):67-67.
- [27] 刘基余.对中国沿海RBN-DGPS系统升级意见的商榷[J].海洋测绘,2008,28(5):9-12.
- [28] 韦友源.信标差分RBN DGPS技术在海洋测绘中的应用[J].沿海企业与科技,2009(9):44-46.
- [29] 刘经南,刘晖.建立我国卫星定位连续运行站网的若干思考[J].武汉大学学报(信息科学版),2003,28(s1):27-31.
- [30] 陈俊勇,党亚民.全球导航卫星系统的进展及建设CORS的思考[J].地理空间信息,2009,7(3):1-4.
- [31] 周保军,刘硕.水下导航技术研究[J].现代导航,2012,3(1):19-23.
- [32] 孙树民,李悦.浅谈水下定位技术的发展[J].广东造船,2006(4):19-24.
- [33] 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.
- [34] 邓中亮,尹露.基于TC-OFDM体制的室内定位系统[J].电信网技术,2015(3):32-35.
- [35] 邓中亮.导航与位置服务现状与发展[J].卫星应用,2016(2):41-45.
- [36] 李俊,徐德民,宋保维.自主式水下潜器导航技术发展现状与展望[J].中国造船,2004,45(3):70-77.
- [37] 刘磊,胡松杰,唐歌实,等.月球中继通信与导航的研究进展与建议[C]//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第十届学术年会.太原,2013.
- [38] 宁晓琳,吴伟仁,房建成.深空探测器自主天文导航技术综述[J].深空探测研究,2010(2):28-39.