

引文格式:姜卫平.卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战[J].测绘学报,2017,46(10):1379-1388. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170424.

JIANG Weiping.Challenges and Opportunities of GNSS Reference Station Network[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2017,46(10):1379-1388. DOI:10.11947/j.AGCS.2017.20170424.

## 卫星导航定位基准站网的发展现状、机遇与挑战

姜卫平

武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉 430079

## Challenges and Opportunities of GNSS Reference Station Network

JIANG Weiping

GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract:** GNSS (Global Navigation Satellite System) reference station network is not only an important infrastructure to provide national, regional and global high-precision time and space datum, but also is an important support for navigation and location services, precise satellite orbit determination, geological disaster monitoring and other scientific and technological applications. At present, with the increase of reference station network of continuously operating reference system (CORS) and the rapid establishment of BeiDou, the development of the networks is facing many opportunities and challenges. Firstly, this paper gives the definition and classification of the GNSS reference station network, and describes its function and significance. And then the history and present situation of development of the network are analyzed. Finally, we discuss the challenges and opportunities of the network based on its establishment, data processing theory and method, application.

**Key words:** GNSS; Continuous operation reference stations; GNSS data processing; BeiDou satellite navigation system

**Foundation support:** The National Science Foundation for Distinguished Young Scholars of China (No. 41525014); The National Natural Science Foundation of China (No. 41374033); The Program for Changjiang Scholars of the Ministry of Education of China

**摘 要:**卫星导航定位基准站网不仅是提供国家、区域、全球高精度时空基准的重要基础设施,也是导航与位置服务、精密卫星定轨、地质灾害监测等工程和科学研究的重要支撑。当前,随着基准站网规模的不断增加、观测数据的不断积累以及我国北斗系统的逐步建成,无论在卫星导航定位数据处理理论还是应用方面,基准站网的发展面临着不少机遇与挑战。本文首先给出了基准站网的定义和类别,并描述了功能与意义;然后分析了其发展的历史与现状;最后从基准站网的建立、数据处理理论与方法、应用三方面讨论了所面临的机遇与挑战,并给出了一些建议和想法。

**关键词:**GNSS;基准站网;GNSS数据处理;北斗卫星导航系统

中图分类号:P227

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2017)10-1379-10

基金项目:国家杰出青年科学基金(41525014);国家自然科学基金(41374033);教育部长江学者奖励计划

20 世纪 70 年代初,为了满足军事和民用对连续实时三维导航的迫切需求,美国开始研制基于卫星的全球定位系统 GPS(Global Positioning System),开启了全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的新时代。由于 GNSS 在国家安全、经济建设与社会发展中

具有重要作用,因此,继美国 GPS 之后,俄罗斯、中国、欧盟等都在竞相发展各自独立的卫星导航系统(GLONASS、BDS 和 Galileo)。经过近 40 年的发展,GNSS 经历了从不成熟到成熟、从单个系统到多个系统、从单用途到多用途、从军用到民用的巨大变化。GNSS 不仅具有全球、全天候、高精

度连续导航和定位功能,还可用来进行授时、地球物理与大气物理参数测定等。因此,在航空、航天、军事、交通、运输、资源勘探、通信、气象等很多领域中具有广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

然而,由于 GNSS 自身提供的定位精度最高到米级,甚至 GPS 最初的民用定位精度低于 100 m,远远不能满足精确导航和定位的要求。因此,为了将 GNSS 定位和导航精度提高到分米、厘米,甚至毫米级,20 世纪 90 年代初,很多国家开始建立永久性 GNSS 跟踪站,用于定轨、精密定位和地球动力学监测等目的,而后逐步形成基准站网,如国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)建设的跟踪站网。1994 年,美国国家大地测量局(National Geodetic Service, NGS)学者 William E Strange 提出了连续运行参考站的概念。1995 年,他和同事明确给出了连续运行参考站系统(continuously operating reference system, CORS)的定义及其初步方案<sup>[5]</sup>。与此同时,美国其他机构也陆续开始构建连续运行的 GPS 基准站网。如到 1995 年,NGS 已经拥有 50 个左右高质量的连续运行的 GPS 测站。IGS 和 NGS 很大程度地推动了 GNSS 基准站网的发展。

连续运行基准站网及其系统集成成了 GNSS、通信、气象数据采集等技术,它是 GNSS 实现高精度导航与位置服务的支撑平台,也是建立坐标框架、监测地壳运动等科学和工程应用的重要基础设施<sup>[4,6]</sup>,几乎可以用于与位置和时间有关的所有领域。因此,为了满足不同用户需求,许多国家、地区、行业和组织纷纷建立了不同尺度的 GNSS 基准站网,包括大尺度的 IGS 全球基准站网,中尺度的国家、区域或省级连续运行基准站网(如中国地壳运动观测网络)、小尺度的大桥及大坝等工程基准网。随着 GPS 和 GLONASS 的现代化,以及北斗和 Galileo 的快速发展,再加上不同规模、不同用途基准站网的建成,给基准站网的发展和应用带来了众多的机遇和挑战,如大规模基准站网整体快速解算、高精度地球坐标参考框架的建立、地质灾害监测与预警,GNSS 大气环境监测及高精度导航和位置服务等技术及其应用。

## 1 GNSS 基准站网的定义与功能

### 1.1 基准站网的定义与类别

卫星导航定位基准站网可定义为由一定范围内(甚至全球)的若干个(大于 3 个)GNSS 测站

(包括连续运行和不连续运行的基准站)组成。GNSS 基准站网系统可定义为将基准站网通过网络互联,构成以提供位置和时间信息为核心的网络化综合服务系统。

综合基准站之间的距离、分布范围及实现功能来讲,基准站网大致可以分为全球网、国家网、区域网、工程网 4 类网。

全球网是指在全球布站,面向全球服务。如 IGS 跟踪站网。

国家网是指在一个国家全国范围内布站,面向一个国家服务。如美国的连续运行参考站网系统、加拿大的主动控制网系统(CAS)、德国卫星定位与导航服务系统(SAPOS)<sup>[7]</sup>。

区域网指在一定范围的区域内布站,面向区域或行业服务。其可分为 3 类:一是国家与国家之间的网,如欧洲永久 GNSS 观测网(European permanent network, EPN);二是省市级网,如广东省连续运行参考站网系统(GDCORS);三是行业网,是指一定的区域内为某个行业服务,如中国沿海无线电指向标-差分全球定位系统(RBN-DGPS)。

工程网是指在工程所在的范围内布站,面向工程建设或运行服务。如修建大坝或桥梁建立的连续运行 GNSS 基准站网。

当然,也可按照功能来划分,基准站网可分为坐标参考框架网、地壳运动监测网、水汽监测网、电离层监测网、大坝(桥梁)施工或变形监测网,等等。

### 1.2 基准站网的功能

如前所言,基准站网能将 GNSS 定位精度提高到分米、厘米甚至毫米级,是提供国家、区域、全球高精度时空基准的重要基础设施。美国称 GPS 及其基准站网为国家关键基础设施。基准站网还是导航与位置服务、精密卫星定轨、地质灾害监测等工程和科学应用的重要支撑。

从产品来讲,基准站网及其系统可以实现数据的网内共享,具有全天候、全自动、实时导航定位功能。目前所涉及的产品主要包括:基准站地心坐标及速度、地球自转参数、跟踪站观测数据、精密星历、卫星钟差、气象参数、电离层模型、基准站坐标时间序列等。

从应用来讲,基准站网不仅可满足覆盖区域内地面、空中和水上交通工具的导航、调度、自动识别和安全监控等功能,还可以服务于高精度中

短期天气状况的数值预报、变形监测等领域。同时,其也是建立并维护坐标参考框架的基础设施,能够满足测绘、基准建设等需求。此外,基准站网还可实现纳秒级的授时,可广泛应用于通信系统和电力系统的时间同步<sup>[8]</sup>。

从服务方式和范围来讲,基准站网及其系统的服务方式从以前的快速、事后发展到实时、快速,精度从厘米级、分米级发展到毫米级,服务范围从大地测量和地球物理拓展到气象、地震、规划建设、交通导航等领域。

## 2 GNSS 基准站网的发展现状及最新进展

### 2.1 全球 GNSS 基准站网

目前,IGS 连续运行基准站网是全球分布最广泛、空间规模最大的 GNSS 基准站网。20 世纪 90 年代初,国际大地测量协会(IAG)成立 IGS,并且开始在全球建立 GNSS 连续运行基准站网。其最初的目标是为大地测量和地球物理研究提供产品,主要任务包括:建立精确的全球参考框架、确定精密地球自转参数与 GNSS 轨道、为区域地球动力学研究提供支持等。起初在全球建立了 60~70 个核心站,于 1994 年 1 月正式运行。在过去的 20 余年里,IGS 的研究与应用取得了很大进展。截至 2017 年 1 月,全球跟踪站的数量已超过 500 个,站点分布如图 1 中的红色圆圈和蓝色五角星所示(数据来源为网站 [http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2014/))。其服务内容也更为广泛,可发布精密轨道、电离层、对流层、精密钟差等产品。

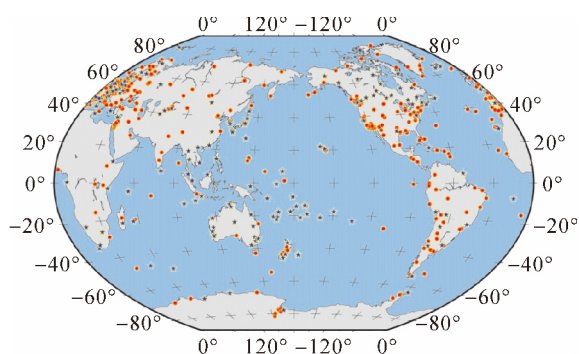


图 1 IGS 全球基准站网分布

Fig.1 The distribution of IGS global fiducial stations

目前,IGS 开始着手建立能够跟踪和接收所有可用 GNSS 卫星信号(包括 GPS、GLONASS、Galileo、北斗、QZSS、IRNSS 等卫星导航系统)的基

准站网,用以分析多系统特性,促进多系统精密融合数据处理技术的发展。经过 4 年的建设,已形成了一个由近 200 个基准站构成的覆盖全球的多系统 GNSS 连续运行基准站网 MGEX<sup>[9]</sup> (Multi-GNSS Experiment),基准站的分布图见网站([http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF\\_solutions/2014/](http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2014/))。

此外,全球性的星基增强系统也需在全球布设基准站,如美国的 StarFire 系统及 Trimble CenterPoint RTX 系统,也分别布设了 100 个左右的基准站。

### 2.2 国家 GNSS 基准站网

#### 2.2.1 美国、德国、日本等国家 GNSS 基准站网

美国是最早建立连续运行基准站网的国家。其国家基准站网由 NGS 负责管理。NGS 向全美和全球用户提供国家 CORS 基准站坐标和 GNSS 卫星观测站数据。其中,30 d 内为原始采样间隔的数据,30 d 后为 30 s 采样间隔的数据。NGS 还提供网上数据处理服务,所有数据均向合作组织开放。基于基准站网,美国有很多网络实时动态定位 RTK(real time kinematic)服务系统,如美国加利福尼亚州南部的奥伦奇市实时网络 RTK 和圣地亚哥实时网络 RTK,可为用户高精度定位提供服务。在美国国家空间参考系统下,基准站网后处理坐标的精度可达厘米级。美国基准站网的测站分布参考 <https://www.ngs.noaa.gov/CORS/>。

德国卫星定位与导航服务系统(the satellite positioning service of the German national survey, SAPOS)是一个连续运行的、覆盖全国的多功能差分 GNSS 定位导航服务体系,是德国国家空间数据基础设施,由德国国家测量管理部门联合测绘、运输、建筑、房屋和国防等部门的差分 GNSS 组合而成。SAPOS 由 200 多个永久性 GNSS 基准站组成,平均站间距约为 40 km。SAPOS 为用户提供多种误差改正数据,实现厘米级水平的导航和定位坐标。SAPOS 采用区域改正参数的方法来削弱差分 GNSS 的误差,每颗卫星的区域改正参数以 10 s 的间隔播发。按精度、时间响应和目的来分,SAPOS 提供的服务包括:实时定位服务、高精度实时定位服务、高精度大地定位服务<sup>[10]</sup>。

日本国家地理院(Geospatial Information Authority of Japan,GSI)从 20 世纪 90 年代初开始布设地壳应变监测网,逐步发展成日本连续应

变监测系统。该系统不断发展,最终形成了由 GNSS 连续观测站组成的基准站网,称为 GEONET (GNSS earth observation network system)。该网平均密度为 20 km,最密的部分如关东、东京等地区是 10~15 km 一个站。2005 年底,已经建成 1200 个遍布全日本的 GNSS 永久跟踪基准站。观测站数据通过 ISDN (integrated services digital network) 网进入 GSI 数据处理中心,并进入互联网,在全球共享。该系统构成了一个格网式的 GNSS 永久站阵列,是日本的重要基础设施。其主要任务有:建成超高精度的地壳运动监测系统;建成国家范围内的现代“电子大地控制网”;提供 GNSS 高精度测量定位服务,并要求具有实时动态定位能力,目的是取代传统的包括 GNSS 静态网的控制测量和建立模式。GEONET 的主要应用是:地震监测和预报、控制测量、工程控制和监测、测图和地理信息系统更新、气象监测和天气预报<sup>[10]</sup>。

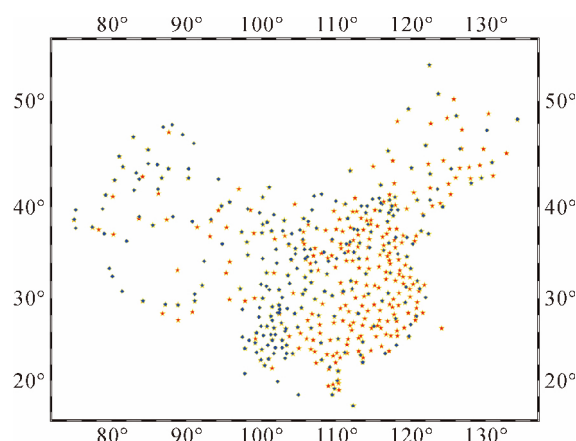
### 2.2.2 中国国家 GNSS 基准站网

1992 年,国家测绘地理信息局在武汉建立了中国第一个 GNSS 连续运行基准站,即现在的 IGS 武汉站(WUHN),用于全球大地参考框架定义及 GNSS 卫星轨道确定。此后,又分别在北京、拉萨、乌鲁木齐、咸阳、西宁、海口和哈尔滨等地建设了 8 个 GNSS 连续运行基准站,主要目的是建立国家大地基准控制网,为我国坐标参考框架建设提供参考数据,并服务于国际 GNSS 地球动力学研究。此外,经过数 10 年的观测,武汉、拉萨、乌鲁木齐和上海等站作为国际核心站参与了 ITRF 的建设;上海、乌鲁木齐、长春等站还配备了 VLBI、SLR 等多种空间大地测量手段,用于地球科学研究,已成为国际上具有多种观测手段的科学台站。

测绘行业的 GNSS 基准站在国内占据了重要地位,如早期建立的国家 GPS A、B 级网,省、市建立的基准站网等。2012 年,国家测绘地理信息局启动了国家现代测绘基准体系基础设施建设一期工程项目,在原有基准站网的基础上,通过建立新的基准站,集成各省市部分基准站,于 2017 年建成了由 360 余个连续运行站组成的且全国均匀分布的 GNSS 基准站网<sup>[5,6]</sup>,如图 2 中红色五角星所示。

2006 年,我国实施了中国大陆构造环境监测网络(简称陆态网络)工程。该工程于 2012 年 3 月建成了由 260 余个连续运行基准站(基准站

分布如图 2 中蓝色菱形点)和 2000 个不定期观测站点构成的,覆盖中国大陆的高精度、高时空分辨率的基准站观测网络。陆态网主要用于监测中国大陆地壳运动、重力场形态及变化、大气圈对流层水汽含量变化及电离层离子浓度的变化,为研究地壳运动的时空变化规律、构造变形的三维精细特征、地震短临阶段的地壳形变时空变化特征、现代大地测量基准系统的建立和维持、汛期暴雨的大尺度水汽输送模型、电离层动态变化图像及空间天气等科学问题提供基础资料和产品。



(本图为专题内容示意,不涉及国家版图信息)

图 2 中国国家基准站网分布示意(红色五角星为国家基准站,蓝色菱形为中国地壳运动观测网络基准站)

Fig.2 The distribution of national fiducial stations of China(The red stars denote the national fiducial stations, the blue diamond are stations of crustal movement observation network of China)

虽然我国已初步建成国家级连续运行基准站网,但严格意义上的国家级 CORS 还未完全形成,目前正在整合和发展中,还有很多工作要做。

### 2.3 区域 GNSS 基准站网

2000 年以后,为了满足城市经济建设的需要,我国先后在深圳、北京、上海、香港、武汉等城市建成具有网络 RTK 功能的 CORS 网<sup>[11]</sup>。目前,随着技术的日趋成熟、成本的不断降低、用户需求的增大,很多中小城市也纷纷建成了城市级 CORS。

深圳 CORS(SZCORS)是我国第一个实用化的实时动态 CORS,于 2001 年 9 月建成并投入试验和试运行。该系统由基准站(5 个)、系统控制中心、数据中心、用户应用中心、数据通信等子系统组成。SZCORS 通过 GSM 通信方式,采用虚

拟参考站技术提供网络 RTK 实时定位差分数据服务, 还可通过 Internet 的 HTTP、FTP 等访问方式提供事后精密定位服务, 其实时定位精度在水平、垂直方向上分别达到 0.03、0.05 m<sup>[12]</sup>。

2005 年以来,随着 CORS 技术逐渐成熟和经

济建设对地理空间信息的需求不断扩大,广东、江苏率先开展了省级 CORS 建设。截至 2017 年,先后已有广东、江苏、江西等 20 个省份建成了覆盖全省范围的基准站网,黑龙江、云南等省正在积极筹建。相关发展过程如图 3 所示。

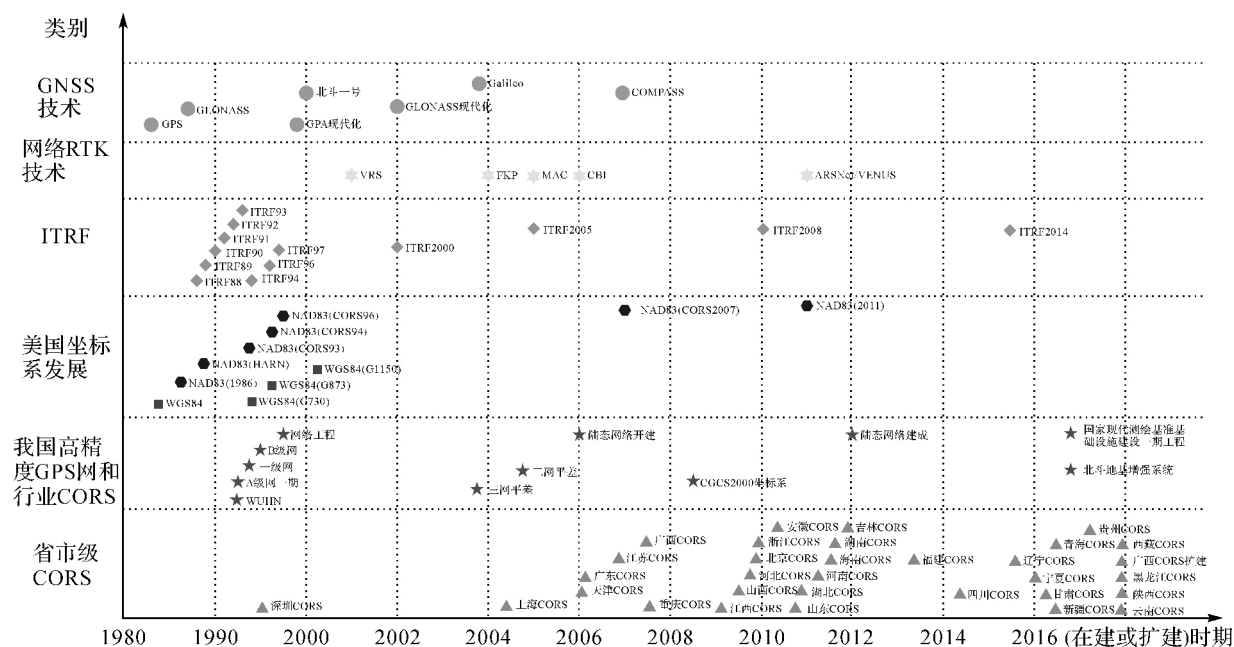


图 3 中国省市级基准站网发展历程

Fig.3 The development history of fiducial stations with provincial/city level in China

由于城市级 CORS 的建设成本和技术难度较低,且建设时间较早。因而不少省份在省级 CORS 建设之初就面临着完全独立建网或融合已有城市 CORS 的选择。独立建网方式简单、统一,涉及单位少,无需共享机制,但建设和维护成本高。为了节约成本、充分利用已有资源和统一区域基准,大多数省份都选择了通过纳入不同地方、行业的已有站点来建立省级 CORS。以广东省为例,CORS 建设前,已有 1 个行业级和 3 个城市级 CORS,共 36 个站。为了避免浪费和充分利用现有资源,广东省 CORS 采用“省中心-省级分中心-市级分中心”的混合模式将以上 4 个系统纳入其中,并新建基准站 42 个(2008 年二期工程完成后),最终组成了覆盖全省的 CORS。广东 CORS 采用省市共建共享模式,组成了统一的空间数据参考框架,具有广泛的参考价值<sup>[13]</sup>。其共享和维护情况如下:

(1) 跨行业合作:省国土厅与省气象局合作,各自建设和管理控制中心及基准站。同时,互不涉足对方业务应用领域;在其他领域应用上互相

协商。

(2) 跨级别合作:省国土厅与市国土局合作,省国土厅选择利用各市国土局的约 13 个基准站,市国土局可共享邻近的省级 CORS 站实现市域全覆盖。各市建有市级分中心,负责基准站和省级基准站的日常管理,省厅负责全网管理、维护和应用。

由此可见,在省级 CORS 建设过程中,我国已经积累了不少跨行业、跨级别合作经验及相关技术,这些经验和技術可以为省级 CORS 组网互联互通提供参考。

## 2.4 工程 GNSS 基准站网

由于 GNSS 可进行全天候观测,定位时测站间也无需保持通视等特点,因而与常规方法相比具有很好的优越性。GNSS 基准站网服务于工程建设主要有两方面:①建设服务。建设阶段,基准站网可以为工程建设提供高精度的三维位置,保证工程建设的顺利进行。②监测服务。运营阶段,基准站网可为工程建筑的变形提供实时高精度监测数据,并及时预警,为工程建筑的正常运营



提供支持。以港珠澳大桥 GNSS 基准站网系统和山西西龙池上水库 GPS 变形监测系统为例,分别介绍工程基准站网的建设服务和监测服务。

工程基准站网具有站间距小、覆盖范围小、定位精度高、系统稳定性要求高等特点。港珠澳大桥 GNSS 基准站网,为港珠澳大桥建设提供厘米级的实时定位服务。系统信号覆盖主体工程建设项目,在非完全隐蔽区内实时定位精度平面优于  $\pm 2\text{ cm}$ 、高程优于  $\pm 3\text{ cm}$ ,可满足工程建设阶段的需要<sup>[14]</sup>。

西龙池上水库 GPS 变形监测系统构建了一套合理、高度集成化的 GPS 监测软件平台,使用 TCP/IP 协议实现监测点接收机与主机的互联互通、远程控制等,具有拓扑结构简单、易于维护、性能稳定等特点。系统无需人工值守,其数据采集、处理、分析等在监控室主机的自动控制下完成。系统具有较高的稳定性,在观测数据无缺失的情况下,提供有效解的概率高于 98%,2 h 时段解在 N、E、U 方向的重复性分别为 1.2、0.9、2.2 mm,4 h 时段解算 N、E、U 方向的重复性为 0.8、0.7、1.5 mm。该系统可提供高效率的实时、自动化、高精度大坝变形监测服务,以保证大坝安全可靠健康的正常运行<sup>[15]</sup>。

目前,GNSS 技术在工程领域的应用越来越广泛。可以预见,将来随着多系统星座的逐步完善及硬件技术的进一步发展,GNSS 技术将会在工程建设和监测领域发挥更重要的作用。

### 3 GNSS 基准站网发展的机遇与挑战

#### 3.1 基准站网的建立

随着 GPS、GLONASS、北斗和 Galileo 的发展,未来的 GNSS 卫星会发射更多频率的信号<sup>[16]</sup>,可用的观测值类型也会越来越多,基准站网同时可观测到的卫星数目也会成倍增加。这使基准站网能够提供更好的可靠性和可用性,进而提高其服务能力。同时,随着社会经济和科技的发展,尤其是通信技术的飞速发展,使得 GNSS 接收机硬件的价格不断降低,这将进一步推进基准站网的建设。

2012 年底,北斗卫星导航系统已经具备覆盖亚太地区的无源定位、导航和授时及短报文通信服务能力,并且预计在 2020 年实现全球覆盖。伴随着北斗的快速发展,国产芯片技术的进步,我国的很多行业 and 部门也纷纷建立基于北斗系统的基

准站网。例如,不少省市国土、测绘部门正在已建立的 CORS 基础上进行改造升级,建立地北斗增强系统;电力、交通等部门拟建立用于高精度时钟同步的 GNSS 基准站网;阿里巴巴公司也正在建立“千寻”基准站网等。届时,我国基准站的数量会越来越多,应用领域也会越来越广泛。据不完全统计,截至 2017 年 1 月,中国建立的连续运行基准站已超过 6000 个。

虽然,现在我国各地连续运行基准站网建设方兴未艾,并且在新建、改造 CORS 的过程中已经解决了很多技术难题,积累了不少经验,但也存在不少问题:我国连续运行基准站网建设缺乏统筹规划、分布不均,在经济发达地区存在重复建站、重复投资、资源与信息不能共享的现象,而在边远省份则站点稀少;尚未成立国家级 CORS 组织机构,未能从组织管理层面进行统一管理规划协调<sup>[5,17]</sup>。如何合理统筹协调不同部门、组织合理建立基准站网需要优化的顶层设计。

#### 3.2 基准站网的数据处理理论与方法

当前基准站网面临的局面是:不仅基准站数量越来越多,规模越来越大,观测时间越来越长;而且,存在着四大卫星导航系统并存的局面,新卫星星座均提供至少 3 个频率的服务。这种局面下,必然会推进基准站网的数据处理理论与方法的发展。

##### 3.2.1 多系统多频率数据处理方法

大量研究表明,综合利用多个 GNSS 的信号,并在观测值层面统一处理不同系统的观测数据,能有效提高 GNSS 定位的可靠性和稳定性<sup>[18]</sup>。因此,研究多 GNSS 融合精密定位算法就成了 GNSS 技术发展的新机遇。相较于单一的 GPS,多系统融合不仅能够扩展 GNSS 应用的地域范围,增加可见卫星数量和观测值类型,而且可以优化卫星几何构型,缓解高山、城市峡谷等对 PNT (positioning, navigation and timing) 用户的影响,进一步提升服务的可用性、精度和可靠性<sup>[19-21]</sup>。此外,多系统也为采用射线追踪技术研究对流层和电离层增加了可用信号的数量与类型。

然而,多 GNSS 融合也面临诸多挑战:①构建基于原始观测值的多系统多频率 GNSS 统一数据处理模型,提供全面、自洽的 GNSS 产品,实现多系统的紧融合<sup>[22-23]</sup>;②建立 PPP-RTK 统一动态定位服务模式,满足用户的多样化需求;③完善数据处理中各类误差模型,包括:太阳辐射压模

型、地球辐射压模型、新卫星相位中心模型、短周期的地球定向参数潮汐(EOP Tides)等,进一步提高模型精度;④发展高轨卫星、星间链路、低轨卫星、重力场等统一整体解算方法,实现各类相关产品的“一步”整体估计,等等。

### 3.2.2 大规模基准站网整体快速解算

目前,大多数 GNSS 数据处理软件只能同时处理少于 100 个测站的数据(如 GAMIT)<sup>[24]</sup>,如果同时处理 200 个及以上测站(如 Bernese、GIPSY 等)则需消耗大量的计算机硬件资源和时间,严重影响数据解算效率,并导致解算结果的滞后<sup>[25]</sup>。为了解决这个现实性难题,IGS 分析中心(如 Scripps Institution of Oceanography, SIO)采用的策略是:将一个大规模 GNSS 基准站网分成若干子网。以 SIO 为例,将基准站按不同来源、用途等分成了 46 个子网,子网测站数 30~40 不等,且不同网间包含一定的公共站。首先,各子网独立解算,然后将各子网解联合处理,从而得到最终解算结果<sup>[26]</sup>。划分子网不仅在数学模型的严密性上受到了影响,而且也增加了潜在的技术难点:子网划分和公共站选择问题。当划分或选取较不合理时,解算精度可能会有一定程度的降低。文献<sup>[21,27]</sup>提出了基于高精度距离观测值进行大规模 GPS 网整体快速处理的方法。该方法有效避免了上述不足,实现了大规模 GPS 网双频数据整体高精度、高效率处理。然而,该方法仅适用 GPS 单系统,不适用多系统,而且也只针对双频,不能直接用于三频数据。多系统、多频率、大规模基准站网整体快速精密数据处理理论与方法是一个迫切需要解决的难题。

同时,高效地处理拥有数百、甚至上千个基准站的多系统、大规模基准站网数据,又面临诸多挑战:①大规模基准站网多系统多频率 GNSS 观测值整体快速解算;②大幅度减少法方程求逆时大量的模糊度,减少对流层、电离层等未知参数,以减小解算时占用的内存资源,提高解算效率;③完善模糊度固定可靠性技术,解决多系统多频率下高维模糊度固定的问题,实现高维模糊度快速、准确的固定。

## 3.3 基准站网应用

### 3.3.1 高精度地球坐标参考框架的建立

目前,利用 GNSS 基准站网建立与维持高精度全球或区域地心动态坐标框架,相比传统方法来讲,既经济又简单。ITRF 是当前理论背景最

完善、构建方法最全面、实现精度最高的全球参考框架,其基于基准站坐标与速度场的传统模式为全球和区域参考框架提供基准。从 ITRF88 开始,到最新的 ITRF2014<sup>[28]</sup>,IERS 已经发布了 13 个版本的全球坐标参考框架。高精度地球参考框架的建立不仅是一个理论问题,而且也是一个实际观测与数据处理问题,它既受到高阶电离层、环境负载、热膨胀等地球物理效应的影响<sup>[29-32]</sup>,还与 GNSS 基准站网中站点的数量、质量、选取、分布、均匀性及密度、观测与数据处理方法等有关<sup>[8]</sup>。

构建顾及基准站非线性变化的毫米级地球参考框架是大地测量领域 21 世纪的一个重要任务,也是一个迫切需要解决的问题,其面临着诸多挑战:①进一步完善现有的空间观测技术(VLBI、SLR、DORIS、GNSS)数据处理理论与方法,去除坐标时间序列中虚假的非线性变化,获取“干净”的基准站坐标时间序列<sup>[33]</sup>;②建立高精度地球物理效应(环境负载及热膨胀)模型,明确坐标时间序列中各部分非线性变化的来源,研究建立顾及非线性变化的速度模型(ITRF2014 已经决定给出周期项,其他非线性变化仍需研究);③量化并去除与 GNSS 技术相关的误差影响(轨道模型精化、大气影响的改正、地球定向参数等);④研究地心运动的理论模型或观测模型,进一步修正地球参考框架;⑤发展与完善区域参考框架建立和维护的方法(如 CGCS2000 的更新与维护)。最终实现顾及基准站非线性变化的毫米级地球参考框架的建立<sup>[34]</sup>。

### 3.3.2 地质灾害监测

近年来,随着多系统的发展和 GNSS 基准站网的建设与不断改善,GNSS 测站的精度和覆盖率得以大幅度提高,数据和产品更加丰富,使得 GNSS 应用领域的深度和广度也相应大幅提高。国际上已逐渐兴起了利用 GNSS 研究地震预测、大陆构造变形和地球动力学等领域的高潮<sup>[35-36]</sup>,并逐渐成为世界主要国家和地区用来监测火山地震、构造地震、全球板块运动,尤其是板块边界地区的重要手段。开展此项研究的观测网主要有:美国南加州 GPS 观测网(SCIGN)、日本 GNSS 观测台阵、中国 GNSS 监测网等。大规模长期稳定的基准站网数据也为研究全球板块间的相对运动,监测板块边缘及内部的构造变形,确定不同尺度构造块体运动方式规模和运动速率,确定区域

位移场、速率场和应变场,提供实时的连续监测资料。

然而,多系统多频率 GNSS 应用于全球地质灾害的监测同样面临严峻的挑战:①发展基于大规模、高采样率 GNSS 实时精密数据处理技术的地震、海啸等灾害综合预警理论与方法,提高预警的准确性和时效性;②完善 GNSS 与 GRACE 技术相结合分析地表形变与水储量变化关系的方法,并用于旱涝灾害、地面沉降等灾害与环境变化研究;③联合 GNSS 技术与水声学等多种手段进行海底大地测量方法,并用于监测大洋地震带等区域的活动情况,并应用于地震预警;④完善 GNSS 无源 SAR 影像理论,发展地物目标参数信息提取方法;⑤研究地震、海啸等灾害引发的地表形变和电离层异常与其他异常的分离方法。

### 3.3.3 大气环境监测

监测大气环境也是 GNSS 的一个重要应用领域。例如利用 GNSS 研究全球性长期天气特征、区域性天气预报,以及通过探测电离层电子含量的分布及变化规律进行地震预测等<sup>[37,38]</sup>。尽管利用地基 GNSS 观测网监测大气环境的理论和方法目前比较成熟,但在实际应用中,也存在诸多挑战问题有待于进一步解决,包括:①将地基 GNSS 基准站网实时获取的高精度、高分辨率 PWV 序列或 SWV 序列同化到业务运行系统时,低高度角观测值包含丰富的水汽含量信息,对水汽探测有重要贡献,但由于多路径效应及大气各向异性的影响,导致低高度角观测值的可用性和精确性成为难题;②在地基 GNSS 资料同化中,观测误差的估计、模式初始场的调整、背景误差的确定及同化技术的选择都是有待进一步深入研究;③发展基于大规模、高采样率 GNSS 网反演的电离层总电子含量服务于地震预警的理论与方法,提高预警的可行性也同样面临许多关键难点;④随着天基 GNSS 无线掩星的发展,如何有效地联合地基 GNSS 及空间 GNSS 无线掩星共同监测地球大气环境也是有待解决的关键问题。

### 3.3.4 高精度定位、导航与位置服务

随着“智慧城市”“智能交通”的建设,对 GNSS 的定位和导航的精度也提出了新的要求。地基(星基)GNSS 增强系统是实现导航与位置服务的基础,而基准站网是实现增强系统的前提。基于增强系统,采用基于载波相位观测值的精密单点定位能实现广域(或全球)动态定位,可实现

单频机定位优于 1 m 量级、双频机定位分米级的实时定位结果,以满足精细农业、智能交通、智慧城市等的需要。

同时,高精度定位、导航与位置服务也面临不少挑战:①研究多传感器的组合导航技术,完善 GNSS/INS 矢量跟踪深组合技术,提高接收机的抗干扰性和在高动态环境下的工作稳定性;②发展全源协同导航技术,实现在任何环境下的高精度导航定位,满足不同行业位置服务的需要;③积极研究位置服务新业务,实现与 GNSS 技术与互联网技术更紧密的结合,广泛拓展位置服务新领域,如目前盛行的滴滴打车、共享单车等。

### 3.3.5 其他

GNSS 和 CORS 技术不仅被用于航空航天、测绘、地质灾害监测与预警、大气环境监测、智能交通等领域,还可以被用于机械控制、物流、气象预报、基础设施巡查、应急救援等其他行业和领域,已具有了跨行业特性。基准站网可以并已经涉及多种学科领域,必将在与通信、网络、网格、计算机、气象、地震、网络、社交、交通等学科的融合中得到发展,进而促进经济和社会的发展。这不但会提升卫星导航定位相关技术的应用水平,还会衍生一系列具有增值潜力的服务技术的涌现<sup>[39]</sup>。

## 4 结束语

为了提高 GNSS 导航定位的精度和服务,全球很多国家、组织、部门和行业建立了或正在建不同用途和功能的基准站网,基准站网得到了快速发展。目前,基准站的数量和积累的数据越来越多,可观测到的卫星数和观测值类型越来越多,基准站网服务的内容也越来越广泛,与其他学科和技术的交叉也越来越多。这也为 GNSS 数据处理理论、方法和应用带了诸多机遇与挑战。此外,GNSS 基准站网是实现高精度位置服务的重要基础设施。而当今位置已经不再是一个由地理坐标和时间构成的四维概念,“社会性”将成为其重要的属性。那么,随着卫星导航定位技术应用和发展,并与其他技术(如惯性、无线电、天文、量子等)协同定位,将为综合 PNT 服务的发展带来机遇<sup>[40]</sup>,并不断服务人类多样化个性化需求。如此看来,未来 GNSS 技术应用真的只局限于人类想象力的限制。



## 参考文献:

- [1] 杨元喜. 北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J]. 测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.  
YANG Yuanxi. Progress, Contribution and Challenges of Compass/BeiDou Satellite Navigation System [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6.
- [2] 杨元喜, 陆明泉, 韩春好. GNSS 互操作若干问题[J]. 测绘学报, 2016, 45(3): 253-259. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150653.  
YANG Yuanxi, LU Mingquan, HAN Chunhao. Some Notes on Interoperability of GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016: 253-259. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150653.
- [3] 谭述森. 北斗卫星导航系统的发展与思考[J]. 宇航学报, 2008, 29(2): 391-396.  
TAN Shusen. Development and Thought of Compass Navigation Satellite System[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(2): 391-396.
- [4] STRANGE W, WESTON N. The Establishment of a GPS Continuously Operating Reference Station System as a Framework for the National Spatial Reference System[C] //Proceedings of National Technical Meeting of the Institute of Navigation. Anaheim, CA: ION, 1995.
- [5] 姜卫平. GNSS 基准站网数据处理方法与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017.  
JIANG Weiping. Data Processing Methods and Applications of the GNSS Reference Station Network [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2017.
- [6] 过静珺, 王丽, 张鹏. 国内外连续运行基准站网新进展和应用展望[J]. 全球定位系统, 2008, 33(1): 1-10.  
GUO Jingjun, WANG Li, ZHANG Peng. The Application and Expectation of CORS in International and China[J]. GNSS World of China, 2008, 33(1): 1-10.
- [7] 施建平, 楼楠. 美国连续运行参考站和在线定位服务综述[J]. 全球定位系统, 2010, 35(1): 61-65.  
SHI Jianping, LOU Nan. The United States Continuous Operation Reference Station Network and Online Positioning Service[J]. GNSS World of China, 2010, 35(1): 61-65.
- [8] 刘经南, 刘晖, 邹蓉, 等. 建立全国 CORS 更新国家地心动态参考框架的几点思考[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(11): 1261-1265.  
LIU Jingnan, LIU Hui, ZOU Rong, et al. Some Thoughts on the Establishment of Nationwide Continuously Operating Reference Stations[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009, 34(11): 1261-1265.
- [9] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, KHACHIKYAN R, et al. IGS-MGEX: Preparing the Ground for Multi-Constellation GNSS Science[J]. Inside GNSS, 2014, 9(1): 42-49.
- [10] SNAY R A, SOLER T. Continuously Operating Reference Station (CORS): History, Applications, and Future Enhancements [J]. Journal of Surveying Engineering, 2008, 134(4): 95-104.
- [11] 刘经南, 刘晖. 连续运行卫星定位服务系统——城市空间数据的基础设施[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(3): 259-264.  
LIU Jingnan, LIU Hui. Continuous Operational Reference System: Infrastructure of Urban Spatial Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(3): 259-264.
- [12] 刘晖, 时晓燕, 杨沾吉, 等. 深圳市连续运行卫星定位服务系统的建立与试验[J]. 测绘通报, 2003(9): 33-36. DOI: 10.3969/j.issn.0494-0911.2003.09.011.  
LIU Hui, SHI Xiaoyan, YANG Zhanjie, et al. The Establishment and Experiments of Shenzhen Continuous Operational Reference System[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2003(9): 33-36. DOI: 10.3969/j.issn.0494-0911.2003.09.011.
- [13] 王玉成. 广东省建成国内第一个覆盖全省的 CORS[J]. 广东科技, 2007(4): 35.  
WANG Yucheng. The First CORS Covering the Whole Guangdong Province in China[J]. Guangdong Science & Technology, 2007(4): 35.
- [14] 熊金海, 熊伟, 吴迪军. 港珠澳大桥 GNSS 连续运行参考站系统的建设及应用[J]. 工程勘察, 2013, 41(2): 75-78.  
XIONG Jinhai, XIONG Wei, WU Dijun. Construction and Application of CORS for Hong Kong-Zhuhai-Macau Bridge [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2013, 41(2): 75-78.
- [15] 姜卫平, 刘鸿飞, 刘万科, 等. 西龙池上水库 GPS 变形监测系统研究及实现[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8): 949-952.  
JIANG Weiping, LIU Hongfei, LIU Wanke, et al. CORS Development for Xilongchi Dam Deformation Monitoring [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(8): 949-952.
- [16] QUAN Yiming, LAU L, ROBERTS G W, et al. Measurement Signal Quality Assessment on All Available and New Signals of Multi-GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BDS, and QZSS) with Real Data[J]. Journal of Navigation, 2016, 69(2): 313-334.
- [17] 姜卫平, 袁鹏, 田挚, 等. 区域 CORS 组网中的坐标基准统一方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(5): 566-570.  
JIANG Weiping, YUAN Peng, TIAN Zhi, et al. Coordinate Datum Unification for Regional CORS Network Combination [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2014, 39(5): 566-570.
- [18] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A, STEIGENBERGER P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps[J]. Navigation, 2014, 61(3): 191-201.
- [19] MONTENBRUCK O, D'AMICO S. GPS Based Relative Navigation [M] // D'ERRICO M. Distributed Space Missions for Earth System Monitoring. New York: Springer, 2013: 185-223.
- [20] 辜声峰. 多频 GNSS 非差非组合精密数据处理理论及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.  
GU Shengfeng. Research on the Zero-Difference Un-Combined Data Processing Model for Multi-frequency GNSS and Its

- Applications[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [21] CHEN Hua, JIANG Weiping, GE Maorong, et al. Efficient High-rate Satellite Clock Estimation for PPP Ambiguity Resolution Using Carrier-ranges[J]. *Sensors*, 2014, 14(12): 22300-22312.
- [22] GENG Jianghui, ZHAO Qile, SHI Chuang, et al. A Review on the Inter-frequency Biases of GLONASS Carrier-phase Data[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3): 329-340.
- [23] ODIJK D, TEUNISSEN P J G. Characterization of Between-Receiver GPS-Galileo Inter-system Biases and Their Effect on Mixed Ambiguity Resolution[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 521-533.
- [24] HERRING T A, KING R W, MCCLUSKY S C. GAMIT Reference Manual. GPS Analysis at MIT. Release 10.4 [M]. Cambridge: Massachusetts Institute Technology, 2010.
- [25] GE M, GENDT G, DICK G, et al. A New Data Processing Strategy for Huge GNSS Global Networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(4): 199-203.
- [26] 姜卫平, 赵倩, 刘鸿飞, 等. 子网划分在大规模 GNSS 基准站网数据处理中的应用[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011, 36(4): 389-391.
- JIANG Weiping, ZHAO Qian, LIU Hongfei, et al. Application of the Sub-network Division in Large Scale GNSS Reference Station Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(4): 389-391.
- [27] CHEN Hua, JIANG Weiping, GE Maorong, et al. An Enhanced Strategy for GNSS Data Processing of Massive Networks[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(9): 857-867.
- [28] ALTAMIMI Z, REBISCHUNG P, MÉTIVIER L, et al. ITRF2014: A New Release of the International Terrestrial Reference Frame Modeling Nonlinear Station Motions[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2016, 121(8): 6109-6131.
- [29] JIANG Weiping, DENG Liansheng, LI Zhao, et al. Effects on Noise Properties of GPS Time Series Caused By Higher-Order Ionospheric Corrections[J]. *Advances in Space Research*, 2014, 53(7): 1035-1046.
- [30] JIANG Weiping, LI Zhao, VAN DAM T, et al. Comparative Analysis of Different Environmental Loading Methods and Their Impacts on the GPS Height Time Series[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(7): 687-703.
- [31] 姜卫平, 王锴华, 邓连生, 等. 热膨胀效应对 GNSS 基准站垂向位移非线性变化的影响[J]. *测绘学报*, 2015, 44(5): 473-480. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140296.
- JIANG Weiping, WANG Kaihua, DENG Liansheng, et al. Impact on Nonlinear Vertical Variation of GNSS Reference Stations Caused by Thermal Expansion[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(5): 473-480. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140296.
- [32] DONG Danan, QU Weiping, FANG Peng, et al. Non-Linearity of Geocentre Motion and Its Impact on the Origin of the Terrestrial Reference Frame[J]. *Geophysical Journal International*, 2014, 198(2): 1071-1080.
- [33] JIANG Weiping, LI Zhao, LIU Hongfei, et al. Cause Analysis of the Non-Linear Variations of the IGS Reference Station Coordinate Time Series in China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(4): 340-351.
- [34] 姜卫平, 马一方, 邓连生, 等. 毫米级地球参考框架的建立方法与展望[J]. *测绘地理信息*, 2016, 41(4): 1-6, 12.
- JIANG Weiping, MA Yifang, DENG Liansheng, et al. Establishment of mm-level Terrestrial Reference Frame and Its Prospect[J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(4): 1-6, 12.
- [35] 姜卫平, 周晓慧, 刘经南, 等. 青藏高原地壳运动与应变的 GPS 监测研究[J]. *测绘学报*, 2008, 37(3): 285-292. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.03.005.
- JIANG Weiping, ZHOU Xiaohui, LIU Jingnan, et al. Present-day Crustal Movement and Strain Rate in the Qinghai-Tibetan Plateau from GPS Data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(3): 285-292. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.03.005.
- [36] 王琪, 张培震, 牛之俊, 等. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. *中国科学(D 辑)*, 2001, 31(7): 529-536.
- WANG Qi, ZHANG Peizhen, NIU Zhijun, et al. Present-day Crustal Movement and Tectonic Deformation in China Continent[J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(10): 865-874.
- [37] 叶世榕, 江鹏, 刘炎炎. 地基 GPS 网层析水汽三维分布数值积分方法[J]. *测绘学报*, 2013, 42(5): 654-660.
- YE Shirong, JIANG Peng, LIU Yanyan. A Water Vapor Tomographic Numerical Quadrature Approach with Ground-based GPS Network[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2013, 42(5): 654-660.
- [38] 张小红, 李征航, 蔡昌盛. 用双频 GPS 观测值建立小区域电离层延迟模型研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2001, 26(2): 140-143, 159.
- ZHANG Xiaohong, LI Zhenghang, CAI Changsheng. Study on Regional Ionospheric Model Using Dual-frequency GPS Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(2): 140-143, 159.
- [39] 陈明, 张鹏, 武军郢. 我国 CORS 发展与技术应用[J]. *中国测绘*, 2016(1): 30-34.
- CHEN Ming, ZHANG Peng, WU Junli. The Development and Technology Application of CORS in China[J]. *China Surveying and Mapping*, 2016(1): 30-34.
- [40] 杨元喜. 综合 PNT 体系及其关键技术[J]. *测绘学报*, 2016, 45(5): 505-510. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160127.
- YANG Yuanyi. Concepts of Comprehensive PNT and Related Key Technologies[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(5): 505-510. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20160127.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2017-07-21

修回日期: 2017-09-08

作者简介: 姜卫平(1972—),男,教授,博士生导师,研究方向为卫星大地测量学理论与方法及工程应用。

Author: JIANG Weiping(1972—), male, professor, PhD supervisor, majors in the theory of satellite geodesy and engineering applications.