

全球导航卫星系统发展综述

宁津生^{1,2}, 姚宜斌¹, 张小红¹

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079; 2. 武汉大学 地球空间环境与大地测量教育部重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 全球导航卫星系统及其应用领域在不断地扩大和深化。本文着重介绍了当前全球卫星导航系统及其应用技术的现状、发展趋势和应用前景。同时, 对这几种导航系统进行综合对比, 分析了全球背景下我国北斗卫星导航系统所面临的机遇和挑战, 并对未来工作提出一些建议。

关键词: GNSS; GNSS 定位技术; GNSS-R 技术; GNSS 掩星技术; 组合导航技术; 多频多系统联合定位技术

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 2095-4999(2013)01-0003-06

Review of the Development of Global Satellite Navigation System

NING Jin-sheng^{1,2}, YAO Yi-bin¹, ZHANG Xiao-hong¹

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The global satellite navigation system and its application fields are extending and deepening. Current status, development and foreground of the global satellite navigation system and its application techniques are detailedly introduced in this paper. Besides, by comprehensively comparing the several satellite systems, the opportunities and challenges of BeiDou Navigation Satellite System are analyzed in the global background, and suggestions for the future work are offered.

Key words: GNSS; GNSS positioning technique; GNSS-R technique; GNSS occultation; integrated navigation technique; multi-frequency and multi-system joint positioning technique

1 引言

全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 是能在地球表面或近地空间的任何地点为用户提供全天候的 3 维坐标和速度以及时间信息的空基无线电导航定位系统^[1]。卫星导航定位技术目前已基本取代了地基无线电导航、传统大地测量和天文测量导航定位技术, 并推动了大地测量与导航定位领域的全新发展。当今, GNSS 系统不仅是国家安全和经济的基础设施^[2], 也是体现现代化大国地位和国家综合国力的重要标志。由于其在政治、经济、军事等方面具有重要的意义, 世界主要军事大国和经济体都在竞相

发展独立自主的卫星导航系统。2007 年 4 月 14 日, 我国成功发射了第一颗北斗卫星, 标志着世界上第 4 个 GNSS 系统进入实质性的运作阶段^[3], 估计到 2020 年前美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 GALILEO 和中国北斗卫星导航系统等 4 大 GNSS 系统将建成或完成现代化改造。除了上述 4 大全球系统外, 还包括区域系统和增强系统, 其中区域系统有日本的 QZSS 和印度的 IRNSS, 增强系统有美国的 WASS、日本的 MSAS、欧盟的 EGNOS、印度的 GAGAN 以及尼日尼亚的 NIG-COMSAT-1 等。

未来几年, 卫星导航系统将进入一个全新的阶段^[4-5]。用户将面临 4 大全球系统近百颗导航卫

收稿日期: 2013-02-06

第一作者简介: 宁津生(1932), 男, 安徽桐城人教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 现主要从事地球重力场的理论、方法与技术的科研和教学工作。

星并存且相互兼容的局面。丰富的导航信息可以提高卫星导航用户的可用性、精确性、完备性以及可靠性,但与此同时也得面对频率资源竞争、卫星导航市场竞争、时间频率主导权竞争以及兼容和互操作争论等诸多问题。为此,本文在介绍GNSS系统的现状和发展的基础上,对其进行综合对比,并分析导航系统的应用和发展以及我国北斗卫星导航系统所面临的机遇和挑战。

2 卫星导航系统发展现状

2.1 GPS

GPS是在美国海军导航卫星系统的基础上发展起来的无线电导航定位系统^[1,6]。具有全能性、全球性、全天候、连续性和实时性的导航、定位和定时功能,能为用户提供精密的三维坐标、速度和时间。现今,GPS共有在轨工作卫星31颗,其中GPS-2A卫星10颗,GPS-2R卫星12颗,经现代化改进的带M码信号的GPS-2R-M和GPS-2F卫星共9颗。根据GPS现代化计划,2011年美国推进了GPS更新换代进程。GPS-2F卫星是第二代GPS向第三代GPS过渡的最后一种型号,将进一步使GPS提供更高的定位精度。

GPS现代化进程包括空间段、地面段和用户段的现代化升级改造,目标是极大地缓解当前GPS存在的脆弱性问题,为全球用户提供高抗干扰、高定位精度和高安全可靠的服务。目前第三代GPS研发工作正在顺利进行,按计划第一颗GPS-3卫星将于2014年发射,整个GPS-3星座计划将用近20年的时间完成,以此取代目前的GPS-2。第三代GPS将选择全新的优化设计方案,放弃现行的6轨道24颗卫星星座的布局 and 结构,计划用33颗GPS-3卫星构建成高椭圆轨道(HEO)和地球静止轨道(GEO)相结合的新型GPS混合星座。此外,在GPS第一导航定位信号上增设一个新的伪噪声码L1C码,将为其它民用信号(L1C、L2C和L5)以及新的M码信号的生成提供便利,从而使导航信息更具完整性,且精度和有效性得到提高。

2.2 GLONASS

GLONASS是由原苏联国防部独立研制和控制的第二代军用卫星导航系统^[1],该系统是继GPS后的第二个全球卫星导航系统。项目从1976

年开始运作,1995年整个系统建成运行。随着苏联解体,GLONASS系统也无以为继,到2002年4月,该系统只剩下8颗卫星可以运行。2001年8月起,俄罗斯在经济复苏后开始计划恢复并进行GLONASS现代化建设工作,GLONASS导航星座历经10年瘫痪之后终于在2011年底恢复全系统的运行。

俄罗斯在2012年继续发射6颗卫星,计划未来几年内将星座工作卫星数量增加到30颗,并在2015年使其定位精度达到3m,与目前GPS的定位精度相当,实现与GPS/GALILEO在L1频点上的兼容和互用。

2.3 GALILEO

伽利略卫星导航系统(GALILEO)是由欧盟研制和建立的全球卫星导航定位系统^[1],该计划于1999年2月由欧洲委员会公布,并和欧空局共同负责。系统由30颗卫星组成,其中27颗工作星,3颗备份星。卫星轨道高度为23 616 km,位于3个倾角为56°的轨道平面内。2012年10月,伽利略全球卫星导航系统第二批两颗卫星成功发射升空,太空中已有的4颗正式的伽利略卫星,可以组成网络,初步实现地面精确定位的功能。GALILEO系统是世界上第一个基于民用的全球导航卫星定位系统,投入运行后,全球的用户将使用多制式的接收机,获得更多的导航定位卫星的信号,这将无形中极大地提高导航定位的精度。

GALILEO计划的实施分为5个阶段,GSTB-V1阶段和GSTB-V2阶段已经完成。自2011年10月21日开始,该计划进入了在轨验证阶段(IOV)。这一阶段的任务是通过发射4颗在轨验证卫星,进行卫星和地面控制系统的测试,验证GALILEO的可行性。截止2012年10月12日,4颗IOV卫星已在轨运行。按照计划,至2015年,GALILEO星座将有18颗卫星,至2020年,将完成30颗卫星星座的构建。投入使用后它将与GPS在L1和L5频点上实现兼容和互用。

2.4 北斗卫星导航系统(BDS)

北斗卫星导航系统(BDS)是中国自主研发、独立运行的全球卫星导航系统。该系统分为两代,即北斗一代和北斗二代系统^[7]。

我国上世纪80年代决定建设北斗系统,2003年,北斗卫星导航验证系统建成。该系统由4颗地

球同步轨道卫星、地面控制部分和用户终端三部分组成。北斗一代形成的双星定位系统,可向中国境内和台海周边地区提供有源定位服务。为进一步提高北斗卫星导航系统的能力,目前正在进行北斗二代系统的建设。北斗二代系统由 5 颗同步地球卫星, 30 颗中轨道卫星组成, 其中中轨卫星分布在 3 个倾角为 55° 的轨道面上, 轨道半径为 21 500 km。继 2007 年 2 月和 4 月一颗北斗地球同步卫星和一颗中轨道卫星相继升空之后, 北斗二代系统进入了建设期。到目前为止, 已成功将 16 颗北斗导航卫星发射升空, 初步建成覆盖国内及亚大地区的区域性无源卫星导航系统, 并计划通过发射 35 颗北斗导航卫星来实现全球性无源卫星导航系统, 拟于 2020 年前建成这一庞大星座。北斗二代系统无论是导航方式, 还是覆盖范围都和美国 GPS 有很多相似之处, 但是保留了北斗一代的双向位置报告、短报文通信功能, 这也是北斗和其它 GNSS 系统竞争的一个优势。

3 卫星导航系统未来发展

3.1 发展趋势

全球导航卫星系统当前正经历前所未有的大转变: 从单一的 GPS 时代转变为多星并存兼容的 GNSS 新时代, 使卫星导航体系全球化和多模化; 从以卫星导航应用为主体转变为定位、导航、授时以及移动通信和因特网等信息载体融合的新阶段, 使信息融合化和一体化。当前 GNSS 应用技术的拓展主要包括:

(1) GNSS 定位技术

导航与定位技术正从两国争霸向多国竞争方向发展。未来, 卫星导航定位系统将面临多个系统共存的局面, 多系统共存将促进导航技术的发展; 各国的卫星导航系统在民用领域的相互兼容将成为国际发展大趋势; 导航与通信及地理信息系统的相互融合、相互渗透将成为未来应用的主流。卫星导航定位技术将不断改进和完善, 精度提高、覆盖区域扩大, 向长寿命、抗干扰、抗打击能力以及提高自主运行能力方向发展; 接收机向微型化、智能化方向发展。卫星导航将成为继手机、因特网之后影响人类社会的第三大信息产业。GNSS 定位技术新的发展主要体现在精密单点定位技术 (PPP) 和网络 RTK 技术 (Network

RTK) 两个方面:

在 PPP 方面, 研究重点已从过去的非差模糊度的实数解转向非差模糊度的整数固定解。2007 年, 文献 [8] 采用星间单差法, 使用全球大约 180 个 GPS 跟踪站的观测数据估计卫星端星间单差的未检校的相位延迟 (Uncalibrated Phase Delay, 简称 UPD), 用户使用这套估计出的 UPD 产品即可通过后处理实现星间单差模糊度的整数固定解。与星间单差模糊度固定方法不同, 文献 [9] 提出利用若干 GPS 站网的观测资料, 通过引入基准钟, 重新估计“整数卫星钟”, 发布给用户, 使用其改进后的卫星钟差在静态和动态模式下分别经过大约 30min 和 90min 的初始化后可得到固定非差整数模糊度的定位解。文献 [10] 提出钟差去耦模型 (Decoupled Clock Model)。在此模型中, 伪距对应的 GPS 卫星钟差由伪距确定, 而载波相位对应的 GPS 卫星钟差由载波相位确定, 载波相位模糊度不再受伪距硬件延迟的影响, 从而使非差模糊度重新具有整数特性。其试验结果表明经过大约 30min 左右的初始化后, 可以成功解算非差整数模糊度。

在网络 RTK 技术方面, 基于双差模式的网络 RTK 已经较为成熟, 国内外已经建立许多工程化应用的网络 RTK 系统。当前不少学者正在开展基于非差模式的网络 RTK 技术的研究, 并已取得阶段性成果。我国今后可建立全国覆盖的连续运行基准站网, 形成以导航数据接收管理、数据处理、各类导航数据的整合, 到导航信息的发播体系。实现航空、铁路、公路、海运、水运、城市交通、测绘等各类用户从米级到毫米级的高精度、三维、实时动态导航, 以及快速静态或精密单点定位服务。

(2) GNSS-R 技术

GNSS-R 技术是利用 GNSS 反射信号获取目标信息的一种方法。GNSS-R 技术作为一个全新的遥感手段, 受到广泛的关注。已有学者利用 GNSS-R 技术测量海面高, 土壤湿度, 积雪厚度等。美国和欧洲等主要国家都投入了大量的人力、物力和财力进行研究, 开展了地基、机载和星载的观测实验, 为将来进一步开展研究和应用奠定了基础。GNSS-R 在理论、技术和数据反演等方面将趋于完善。接收站将越来越多, 获取的数据将越来越密。

(3) GNSS 掩星技术

GNSS 无线电掩星观测技术是通过在低轨卫星上安置 GNSS 接收机,接收因掩星事件产生的大气折射信号,以此反演大气参数。该技术摆脱了传统探测手段的不足,可长期稳定地测定从地面至 800km 高空的大气参量和电离层电子密度的全球分布,具有全天候、高精度、高垂直分辨率、长期稳定、全球覆盖等特点^[11]。GNSS 掩星技术的出现是空间探测史上的一次革命性变化,利用掩星探测技术来获取大气参数将是 21 世纪最常规的探测技术之一。未来的掩星观测系统将从单颗低轨卫星转变为多颗低轨道卫星,从仅对 GPS 卫星进行掩星观测转变为对多个 GNSS 系统的卫星进行掩星观测,获取的大气掩星观测数据数量更多、分布更为均匀。掩星大气探测范围更深入地面,探测精度更高。掩星观测技术将向以星载掩星为主体、机载掩星和山基掩星为辅助的方向发展。掩星计划的实施和完成需要更广泛的国际合作。

(4) 组合导航技术

组合导航系统形式将更加多样化、集成化、智能化,INS/GPS 组合仍将是组合导航系统的首选方式;地基无线电导航技术仍作为卫星导航服务的有效备份和补充;地形辅助导航技术不断提高性能,并且开发新的地形匹配方法、拓展应用范围;而声呐导航、水下电场导航、地磁与电磁导航、重力与重力梯度导航技术也将不断提高精度。随着导航技术的不断提升,其应用也将更加广泛。

(5) 多频多系统联合定位技术

在复杂观测条件下,传统单系统双频导航定位往往面临可见卫星数不足,定位精度和可靠性差等问题。多频观测值的应用以及多系统联合定位的实施将为用户提供更多的备选组合观测值,增加可见卫星数,增强卫星几何强度,减少或消除单系统导航定位产生的系统误差,从而提高定位精度及可靠性。随着 GPS、GLONASS 现代化进程的推进及 GALILEO 和我国北斗卫星导航系统的发展,多频多系统联合定位的方式将逐渐成为主流的导航定位方式。各国卫星导航系统的发展将越来越重视系统间的兼容性与互操作性。多系统间时空基准的统一、多系统数据的融合以及多系统的完好性监测等问题成为需要研究解决的关键技术。多频多系统联合定位将为用户提供更加稳定可靠的定位结果,从而扩展卫星导航定位

技术在各个领域的应用。

3.2 应用前景

当前 GNSS 的应用已深入到经济社会的各个领域,可以说已到无孔不入的地步,现在甚至有人说,GNSS 的应用仅受人们想象力的限制,可见 GNSS 的应用前景是极其广阔的。下面仅就几个方面的应用作为示例说明。

(1) 测绘应用

GNSS 广泛应用于高精度的大地测量、控制测量、地籍测量和工程测量等领域,与传统的方法相比,自动化程度高,将节省大量的人力、物力和财力。当前 GNSS 在大地测量领域的应用已扩展到地球物理、地球动力学等方面,除了地壳运动观测,随着 GNSS 连续观测站的不断增加,观测现象将更加丰富。高精度的 GNSS 技术将成为火山地震、构造地震、全球板块运动等监测的重要手段。

(2) 交通应用

在陆运方面,利用 GNSS 技术对车辆进行跟踪、调度管理,并合理分配车辆,以最快的速度响应用户的请求,降低能源消耗、节省运输成本;在水运方面,实现船舶远洋导航;在空运方面,实现飞机导航和引导飞机安全进离机场。今后,在城市中建立数字化信息交通平台,车载设备通过 GNSS 进行精确定位,结合电子地图和实时交通状况,自动匹配最优路径,最终实现车辆的自主导航。

(3) 公共安全应用

GNSS 对火灾、自然灾害、交通事故、犯罪现场等紧急事件的响应效率,可将损失降到最低。有了 GNSS 的帮助,救援人员可在条件恶劣的环境下,对失踪人员实施有效的搜索和救援。装有 GNSS 装置的交通工具在发生险情时,可及时定位、报警,使之能更快、更及时地得到救援。

(4) GNSS-R 应用

GNSS-R 的应用主要集中在海洋遥感、土壤湿度监测^[12]、积雪厚度测定^[13]以及植被变化反演等方面。在海洋遥感方面,利用 GNSS 海面反射信号可计算海面平均高度、海面风场、浪高、海面盐度等海洋重要信息;利用 GNSS-R 遥感土壤湿度计算土壤含水量,可用于防治干旱与洪涝灾害;GNSS-R 在冰川和雪地方面的应用则可促进对积雪

内部结构的了解,进而加深对陆界尤其是南极大陆的了解;GNSS-R还可用于监视地表植被变化,在防止土地沙漠化以及反映气候变化特征等方面具有重要意义。

(5) GNSS 掩星应用

GNSS 掩星反演技术的应用体现在数值天气预报、气候分析和电离层监测等方面。利用 GNSS 掩星观测数据可对大气参数进行大范围的连续监测(可达数百公里),从而为气象部门分析预报降水、台风等强对流天气提供重要的参考数据。利用同化掩星观测资料还可对数值天气预报模型进行检验和改进。GNSS 掩星观测资料具有不受天气影响,无需定标,数据稳定等特点,因此还可用于气候的分析与研究。另外,利用掩星观测技术可获得全球性的电离层电子密度分布资料,从而应用于电离层的分析研究,如探测地震或太阳风暴发生时的电离层异常等。GNSS 无线电掩星观测技术的发展还将推动空间环境监测、数据同化、空间天气效应和气候变化研究等领域的发展^[14]。

4 北斗卫星导航系统系统面临的机遇和挑战

目前,北斗卫星导航系统已正式在中国和周边地区独立地提供卫星定位导航授时的区域服务,这标志着北斗“三步走”战略的第二步战略目标已顺利完成。北斗卫星导航系统的应用已涉足到交通、渔业、水文、气象、林业、通信、电力、救援等诸多行业,现在我国的北斗卫星导航系统正在向着“第三步”,到2020年形成全球覆盖能力的目标迈进。因此我国的北斗卫星导航系统的发展及其应用,既面临许多机遇,也将迎接若干挑战。这里根据已有的资料,作一点初浅的综合分析。

4.1 机遇

卫星导航是名副其实的高科技产业,具有高速增长、高效益特点,是小投入、大产出的典型;卫星导航产业将很快进入一个高速发展的阶段。

当前国际合作已成为 GNSS 发展的热点趋势。北斗卫星导航系统正面临一个高速发展的良好机遇。当然,同时要看到,GNSS 国际合作是一种沟通和协调,也是一种博弈和较量。在机遇中,北斗卫星导航系统最迫切需要做到的就是,在技术上要保证 GNSS 兼容互操作可交换,这不仅是国际合作

的需要,更是我国产业和市场发展的迫切需要。

4.2 挑战

(1) 市场问题

北斗卫星导航系统由于起步较晚,国际国内卫星导航市场已基本被 GPS 和 GLONASS 占领,要想占用一席之地十分困难;同时,许多与卫星相关的先进设备进口也相对困难。

(2) 政策问题

美国 GPS 和俄罗斯 GLONASS 都有较完善和透明的政策和使用规范。北斗卫星导航系统作为国家重大基础设施已出台明确的发展策略,但却没有健全的卫星导航应用政策和标准。北斗卫星导航政策还不够完善,透明度尚显不够,系统状态也不够明显,很难取得用户的信任。同时,北斗卫星导航系统建设与应用的相关管理政策也不够明确,会影响到用户的拓展。

(3) 观念问题

目前,北斗卫星导航系统的市场占有率并不高,接收机生产商和管理部门主动服务观念还较薄弱,产品的推广、维护和服务的主动性有待加强。

(4) 技术问题

北斗卫星导航系统面临强烈的技术竞争。卫星系统性能与稳定性需要提高,接收机技术、原子钟技术、信号调制与捕获技术等都有很大的发展空间,相关的坐标系统和时间系统还有改进的余地;同时,北斗地面跟踪站相对较少,几何结构不够合理;数据服务中心几乎处于空白,相应的服务产品不够丰富。

5 结论

当今,GNSS 的发展日新月异,卫星导航技术正进入一个高速发展的关键时期。建立和发展自主的北斗卫星导航系统是我国国防安全与军事现代化的需要,同时也是推动国内卫星应用技术发展以及促进经济建设的迫切需要。世界多国 GNSS 的激烈竞争必然导致其向着功能更全、覆盖更广、稳定性更可靠、完备性更好以及应用面更深入等方向发展。我国现有的技术水平离世界前沿的关键技术还有一定的差距,还需不断的努力和改进。目前,GNSS 的发展对中国而言既是机遇又是挑战。因此,必须抓住这个机遇,进一步改进和完善现有的卫星导航系统和技术,才能加快 GNSS 特别是具有中国特色的北斗卫星导航系统走向应

用的步伐。

参考文献

- [1] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and More[M]. Berlin:Springe,2008.
- [2] HEIN G W, AVILA-RODRIGUEZ J A, WALLNER, *et al.* Envisioning a Future GNSS System of Systems; Part 1[J]. Inside GNSS, 2007 (Jan/Feb): 58-67.
- [3] 杨元喜, 李金龙, 徐君毅, 等. 中国北斗卫星导航系统对全球 PNT 用户的贡献[J]. 科学通报, 2011, 56(21): 1734-1740.
- [4] 刘基余. GPS 现代化的新进展及其影响[C]//中国全球定位系统技术应用协会第十次年会论文集. 北京:中国全球定位系统技术应用协会, 2008.
- [5] 陈俊勇. GPS 技术进展及其现代化[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(3): 1-4.
- [6] FERNANDEZ-PRADES C, PRESTI L L, FALLETTI E. Satellite Radiolocalization from GPS to GNSS and beyond Novel Technologies and Applications for Civil Mass Market[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(11): 1882-1904.
- [7] 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.
- [8] GE M, GENDT G, ROTHACHER M, *et al.* Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations[J]. Journal of Geodesy, 2007, 82(7): 389-399.
- [9] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS J P, *et al.* Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to and Satellite Precise Orbit Determination[EB/OL]. [2013-01-03]. http://wizard.net/Articles/laurichesse_navigation.pdf.
- [10] COLLINS P, LAHAYE F, HROUS P, *et al.* Precise Point Positioning with Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model; ION GNSS 2008; Proceedings of the 21st International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Savannah, September 16-19, 2008 [C]. Savannah, Gorgia; Savannah International Convention Center, 2008.
- [11] 赵莹. GNSS 电离层掩星反演技术及应用研究[D]. 武汉: 武汉大学测绘学院, 2011.
- [12] LARSON K M, SMALL E E, GUTMANN E, *et al.* Using GPS Multipath to Measure Soil Moisture Fluctuations; Initial Results[J]. GPS Solutions, 2008, 12(3): 173-177.
- [13] LARSON K M, NIEVINSKI F G. GPS Snow Sensing; Results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. GPS Solutions, 2013, 17(1): 41-52.
- [14] 丁金才. GPS 气象学及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2009.