

## 北斗卫星导航系统及其在地震监测中的应用研讨

■ 孟国杰 乔学军 吴伟伟 陈涛

地震数值预测研究和传统方法评估试点项目

地震监测站网评估试点项目

人工智能地震监测分析系统完善与应用

地震危险区精细调查和地震现场综合科学考察试点项目

预报员访学试点项目

地震信息专题图试点

地震重点监视防御区公共服务试点

地震短临预报专群结合研究



## 北斗卫星导航系统及其在地震监测中的应用研讨\*

■ 孟国杰<sup>1</sup> 乔学军<sup>2</sup> 吴伟伟<sup>1</sup> 陈涛<sup>1</sup>

为推动北斗卫星导航系统(以下简称北斗系统)在高精度地壳形变监测中的应用,2021年5月7日,中国地震局地震预测研究所组织召开了“北斗系统在地震监测中的应用”研讨会。来自中国地震台网中心、中国地震局第一监测中心、中国地震局第二测中心、湖北省地震局、四川省地震局、云南省地震局和地震预测研究所的20余位专家参加了会议。研讨会分为专题报告交流和集体讨论两部分,8位专家分别从北斗系统的发展,北斗系统观测数据高精度处理策略,北斗系统在地震监测中的应用等方面做了专题报告。专题报告结束后,全体参会人员进行了深入研讨。主要内容如下:

### 一、北斗卫星导航系统的发展历程和现状

根据国家安全和经济社会发展需要,20世纪后期,我国开始自主建设全球卫星导航系统,目标是为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务。建设过程分为三步:2000年建成北斗一号系统,向中国提供服务;2012年建成北斗二号系统,向亚太地区提供服务;2020年建成北斗三号系统,向全球提供服务(图1)。2020年6月23日,我国成功发射北斗系统第五十五颗导航卫星,暨北斗三号最后一颗全球组网卫星,北斗三号全球卫星导航系统星座部署全面完成。

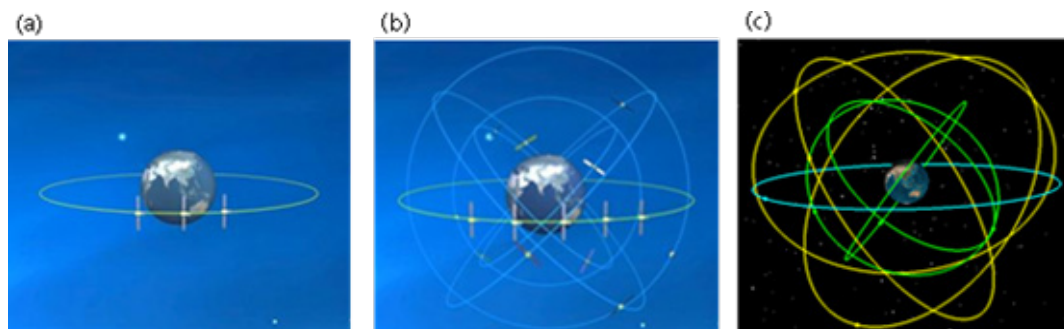


图1 北斗导航定位系统星座

(a) 北斗一号; (b) 北斗二号; (c) 北斗3号(根据 csno-tarc.cn 网站修改)。

\* 支撑新时代防震减灾事业现代化建设试点任务之一“地震监测站网评估试点项目”成果。

1 中国地震局地震预测研究所,北京,100036,mgj@ief.ac.cn。

2 湖北省地震局,武汉,430071。

北斗系统具有以下特点：①空间段采用三种轨道卫星组成的混合星座。北斗三号包括 24 颗中圆地球轨道卫星 (MEO)，高度 21528 km，3 颗地球静止轨道卫星 (GEO)，高度 35786km，3 颗倾斜地球同步轨道卫星 (IGSO)，高度 35786km，星下轨迹交汇点位于 118°E。由于北斗系统具有高轨卫星，其抗遮挡能力较强，在低纬度地区优势更明显 (图 2)。②提供多频点导航信号 (图 3)。提供 B1I、B1C、B2a、B2b 和 B3I 五个公开服务信号，能够通过多频信号组合使用等方式提高服务精度。③融合导航与通信能力。具备定位导航授时、星基增强、地基增强、精密单点定位、短报文通信和中轨搜救等服务能力 (www.beidou.gov.cn)。

北斗系统实现了卫星与卫星之间具备通信能力，

可以在没有地面站支持的情况下自主运行。北斗的时间系统同 GPS 系统时间一样，属于原子时系统，它的秒长是由地面主控站、监控站和卫星上所有的原子钟，通过比对测量得到一个实时运控的时间尺度。北斗时间系统 (BDT) 的起始时间为 2006 年 1 月 1 日协调世界时 (UTC) 00 时 00 分 00 秒，北斗时间系统是 (地方) 原子时，不做闰秒调整，与国际原子时 (TAI) 相差 33 秒。随着北斗三代卫星完成组网，北斗系统运行稳定，持续为全球用户提供优质服务，开启全球化、产业化新征程，其导航定位精度可以与 GPS 系统相媲美，各项精度指标达到国际领先水平。但是，由于地震系统近十年来在北斗系统导航和应用领域鲜有涉足，目前北斗系统的地震应用研究存在严重不足。

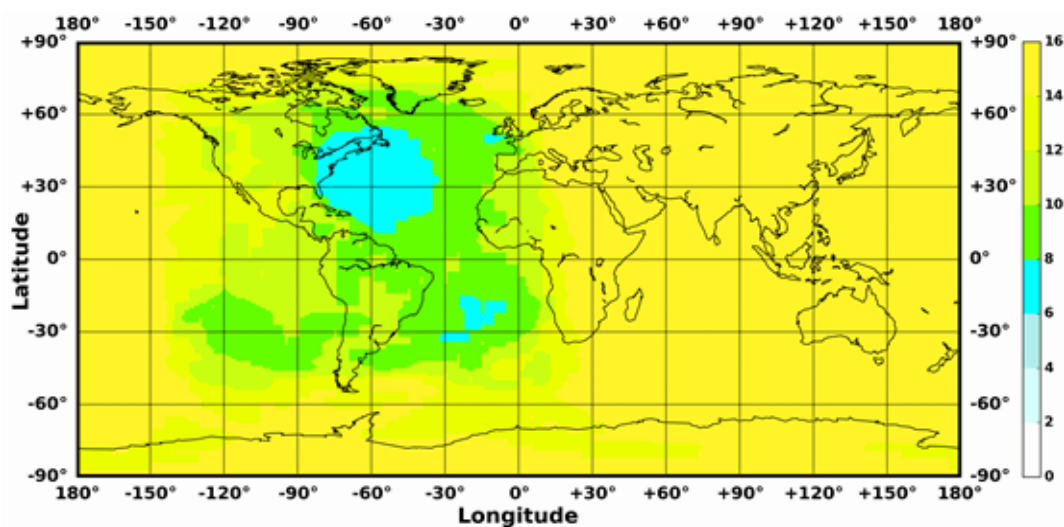


图 2 2021 年 5 月 12 日 7:00 (北斗时间) 北斗可见卫星数分布 (截止高度角  $\geq 5^\circ$ )

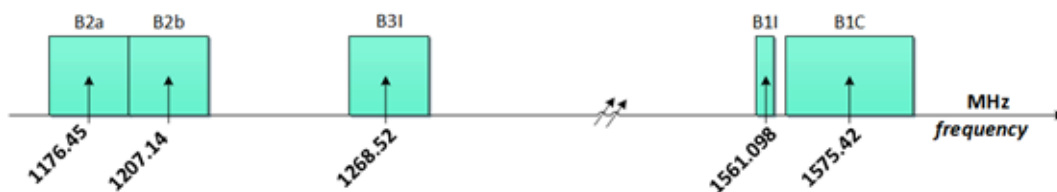


图 3 北斗 3 号五个公开服务信号

## 二、北斗系统数据处理分析研究进展

湖北省地震局乔学军研究员团队对 Bernese (ver. 5.2) GNSS 数据处理软件进行二次开发，实现了对 BD-2 数据的处理。其流程包括：把平滑过的北斗观测值转化为 Bernese 的二进制格式；转换北斗轨道为表格和二进制格式的标准轨道；解算接收机钟差；分别采用 PPP 精密单点定位和相对定位模式进行坐标解算。为对比 BD-2

数据与 GPS 数据的定位结果，图 4 给出了 CHZH 站基线模式计算的坐标时间序列结果，在水平方向上，87% 的单日解 BD-2 与 GPS 相差毫米级，在垂直方向上，76% 的单日解 BD-2 与 GPS 相差毫米级。

预测所孟国杰团队利用 GAMIT/GLOBK (ver.10.6) GNSS 高精度数据处理软件处理了“中国地壳运动观测网络”62 个连续站 2.5 年 (从 2015 年第 213 天至

2017 年第 365 天) 的北斗观测数据, 这些测站同时记录 GPS 和北斗观测数据, 采样间隔为 30 秒。数据处理采用武汉大学发布的精密卫星星历 (ftp://ics.gnsslab.cn), 利用 IGS 绝对相位中心模型改正卫星和接收机天线的相位中心偏差。在松弛约束的单日解计算中, 所有测站坐标和地球旋转参数作为未知数同时进行解算。对所有单日解, 北斗系统的模糊度固定结果为 40-90%, 平均 66.8% 的模糊度成功得到固定。为评估北斗系统定位的精度, 首先采用经典的函数模型, 利用 5 年以上的 GPS 观测时间序列解算趋势项、年周期项和半年周期项, 然后从 GPS 和北斗时间序列中去除上述非构造形变项, 获得坐标残差时间序列, 最后计算残差的平均值作为定位精度的评价指标。作为例子,

图 5 给出了山西太原 (SXTY) 站的坐标残差序列。

根据以上利用 Bernese (ver. 5.2) 和 GAMIT/GLOBK (ver.10.6) 的初步研究结果, 北斗 2 号定位误差是 GPS 定位误差的 1.2~2.0 倍。由北斗 2 号数据计算的测站水平速度精度与 GPS 相差大约 3 倍, 垂直速度精度与 GPS 相差大约 4 倍, 同时, 北斗 2 号和 GPS 数据得到的测站垂向速度存在系统性的差异, 其主要原因可能是由于北斗二号卫星星座的稀疏性、数据处理中的数学和物理模型不完善引起的。因此, 后续利用北斗三号数据进行高精度处理, 获取测站坐标定位精度和测站速度精度, 对评估北斗系统的定位结果, 发挥北斗系统在地震监测中的应用作用是十分必要的。

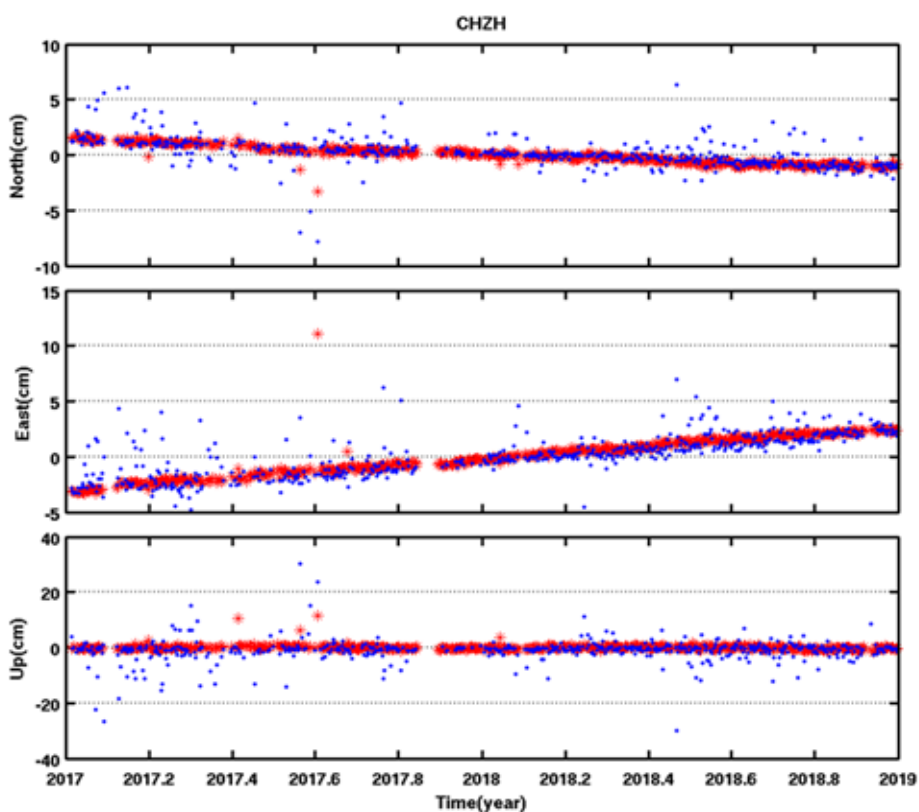


图 4 采用基线解模式解算的 CZZH 测站坐标时间序列 (蓝色为 BD-2 坐标, 红色为 GPS 坐标)

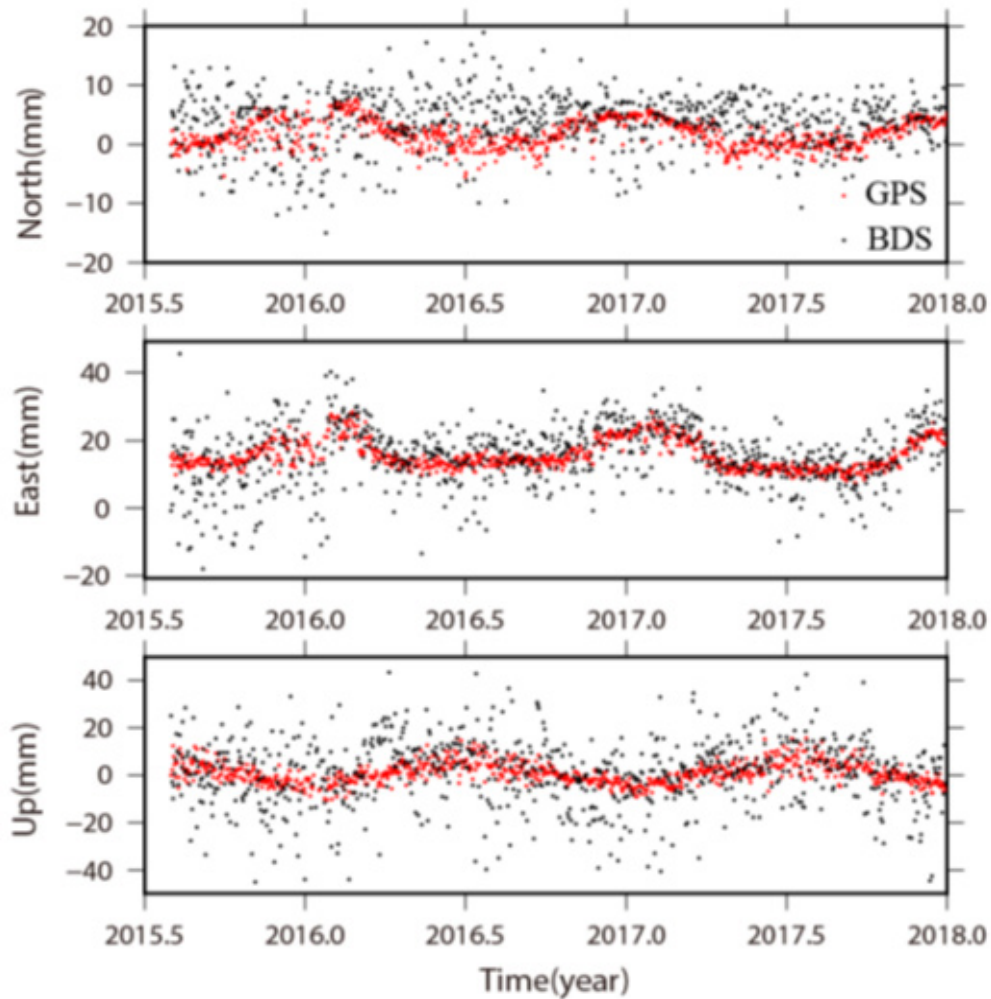


图5 太原站去除趋势量项和周期项的坐标残差序列（黑色为北斗结果，红色为GPS结果）

会议达成如下共识：

一、逐步开启“中国地壳运动观测网络”和“中国地震科学实验场”部分 GNSS 测站北斗数据接收通道 (Trimble Alloy 型号接收机完全兼容北斗三代信号)，接收并处理北斗三代数据。

二、尽快开展北斗高精度数据处理研究，推动北斗系统在地震监测中的应用。研究内容包括：北斗高精度参考框架的实现、北斗星历的精化研究、北斗卫星和接收机天线相位改正模型研究、北斗高精度数据处理软件的联合研发等。

三、利用现有的北斗观测数据，引进和优化现有的数据处理软件，搭建数据处理平台，开展北斗高精度数据处理工作。广泛收集北斗数据解算研究成果，改进和完善北斗高精度数据处理策略。研究北斗与 GPS 系统定位差异成因、多系统融合处理策略。研究北斗数据质量评估、噪声特征。

与会代表一致认为，下一步要加强合作，根据工作进展情况不定期召开研讨会交流工作进展，共同推动北斗系统在地震监测研究的应用。

加强科技创新支撑新时代防震减灾事业现代化建设  
地震监测站网评估试点项目

**试点** 工作通讯

预报员访问学者导师聘任管理办法	2021 年第 1 期 (总第 22 期)
“解剖地震”计划“十四五”实施方案	2021 年第 2 期 (总第 23 期)
AI 开创的新地震学研究	2021 年第 3 期 (总第 24 期)
CSEP 1.0 工作理念及十年工作成就	2021 年第 4 期 (总第 25 期)
CSEP 2.0 重点工作导向	2021 年第 5 期 (总第 26 期)
云南昭通防震减灾局专群结合工作调研报告	2021 年第 6 期 (总第 27 期)
《2020 年新疆于田 Ms6.4 地震研究专辑》如期完成	2021 年第 7 期 (总第 28 期)
震情会商技术方法动态评价试点工作进展	2021 年第 8 期 (总第 29 期)
预测所结合地震信息专题图试点任务积极应对云南、青海两次强震	2021 年第 9 期 (总第 30 期)
北斗卫星导航系统及其在地震监测中的应用研讨	2021 年第 10 期 (总第 31 期)

## 编委会

---

王武星 王琳琳 田勤俭 汤毅 孙汉荣 孙珂 李营 杨林章 吴忠良 张永仙 张晓东  
邵志刚 孟国杰 赵翠萍

## 编辑部:

---

中国地震局地震预测研究所科研管理部  
E-mail:sycglb@ief.ac.cn