

《测绘学报》编委会

主任：宋超智

常务副主任：杨元喜

主编：杨元喜(兼)

副主任：陈平 龚健雅 张继贤 孙群 程鹏飞

顾问：

陈俊勇

许厚泽

刘先林

魏子卿

王任享

高俊

王家耀

张祖勋

编委：(按姓氏笔画为序)

边少锋

朱庆

朱建军

刘纪平

刘经南

刘耀林

孙中苗

孙和平

李斐

李广云

李志伟

李志林

李建成

李清泉

李德仁

杨必胜

吴华意

何秀凤

何海波

汪云甲

沈云中

张力

张勤

张永生

张克非

张良培

张新长

张燕燕

陈军

陈锐志

武芳

金双根

周成虎

施闯

姜卫平

姚宜斌

袁运斌

党亚民

郭仁忠

郭华东

彭认灿

彭军还

韩春好

童小华

楼良盛

赫建忠

翟国君

秘书：宋启凡

《测绘学报》编辑部

编辑部主任：赫建忠

执行副主编：张燕燕

本期责任编辑：张燕燕

编辑：金君 张燕燕 丛树平 宋启凡 陈品馨 张艳玲

编务：金英

专辑策划

总策划：于贤成

执行策划：张世涛 刘大可 宋启凡 张燕燕 梁聪伟

学术支持

☆ 中国测绘科学研究院

☆ 测绘遥感信息工程国家重点实验室

☆ 东南大学智慧城市研究院

☆ 湖南科技大学地理空间信息技术国家地方
联合工程实验室

☆ 昆明市土地开发整理中心

同济大学测绘与地理信息学院

中国科学院测量与地球物理研究所

西安测绘研究所

海军大连舰艇学院海洋测绘系

中国矿业大学环境与测绘学院

信息工程大学地理空间信息学院
中南大学

河南理工大学矿山空间信息技术重点实验室

中国卫星导航定位协会

(注：☆ 为重点学术支持)

《测绘学报》投稿指南

《测绘学报》是由中国科学技术协会主管、中国测绘学会主办、《测绘学报》编辑部编辑、测绘出版社出版的综合性学术刊物。《测绘学报》是美国《工程索引》(Ei)核心期刊,曾荣获百种中国杰出学术期刊、中国精品科技期刊、中国国际影响力优秀学术期刊、全国优秀测绘期刊等称号,入选中国科协精品科技期刊工程项目、中国科技期刊卓越行动计划项目,并被国内外多个重要数据库收录,是我国测绘地理信息科学领域具有重要影响力的学术期刊。本刊为开放获取(open access, OA)期刊,已加入国际知名开放获取平台 Directory of Open Access Journals(DOAJ)和中国科技期刊开放获取平台(COAJ)。

征稿范围

本刊主要刊载大地测量、卫星导航、工程测量、摄影测量、遥感、地图学、海洋测绘、矿山测量、空间地理信息、测绘仪器等测绘地理信息学科及其相关相邻学科(交叉学科论文须侧重测绘地理信息领域)的学术论文。论文要求具有较高学术水平、独创意义或重大应用价值。本刊也刊登国家有关重大工程的进展及相关测绘地理信息技术应用的快报论文、博士论文摘要和博士后研究动态。

撰稿要求

来稿应论点明确,论据可靠,数据准确,文字简洁,图表清晰,不涉及国家政治、经济及技术秘密;文中文题、摘要、关键词、图名、表名使用中、英文对照;采用法定计量单位;署名符合著作权法规定,并附第一作者中英文简介;参考文献采用顺序编码制;基金资助项目附基金名称和项目编号;论文字数在 8000 字以内。

快报论文要求扼要报道创新性显著、具有首报意义的研究成果或阶段性成果,国际会议的邀请报告,国家自然科学进步奖以及测绘科技进步奖的获奖项目。全文 4000 字以内。

博士论文摘要和博士后研究动态要求 2000 字以内。

细节要求

1. 英文标题句首字母大写,其余均小写,英文摘要提供详细摘要。

2. 物理量、计量单位及其符号按 GB 3100—3102-93 的有关规定执行,本刊常用的单位符号用法如下:单位符号(正体):米 m,千米 km,厘米 cm,毫米 mm,赫兹 Hz,度、分、秒($^{\circ}$ 、 $'$ 、 $''$),秒 s,分 min,小时 h,天 d。ppm 和 Gal 都不是国际单位,应分别排为 10^{-6} 和 10^{-2} m/s²。

3. 矢量、矩阵符号用黑斜体,一般变量用斜体; π 、min、max 等一律用正体,矩阵的转置符号上角标 T 用正体。上、下角标,是数字的用正体,英文变量用斜体,英文缩写用正体。

4. 凡论及他人工作和观点时均应标注引用文献。本刊参考文献采用阿拉伯数字顺序编码制,请按正文引用顺序排序。非正式出版物文献资料在文中加括号标注,不列入文后参考文献。

投稿

作者通过本刊网站(<http://xb.sinomaps.com>)在线投稿,论文的电子文档应为 doc 或 pdf 格式。有关稿件处理状况可在网上查询。刊出文稿将提供给相关文摘及全文检索系统,不另付作者稿酬。如作者不同意提供,请在投稿时声明,否则视为同意。

作者上传稿件时,请将稿件中作者个人信息(包括姓名、单位、电话、E-mail、基金项目等)删除,以便匿名评审,最终用稿接编辑通知后再进行添加。上传稿件编辑部推荐采用 pdf 文件。

注意事项

1. 初审未通过的稿件将在 20 个工作日内通知作者。稿件由本刊编委会终审后决定是否录用。未被录用的稿件,原稿及审稿费不再退还。如 180 天没有收到修改或退稿通知,作者有权另行处理。作者切勿一稿多投,以免被列入学术不端文献被相关统计源剔除。

2. 来稿凡经本刊录用,如无特殊声明,即视为作者同意授权本刊及本刊合作媒体复制、发行及进行信息网络传播。

本刊编辑部地址:北京市西城区三里河路 50 号 邮编:100045

电话:010-68531192,68531322,68531162,68531338 传真:010-68531317

E-mail:chxb@chinajournal.net.cn 网址:<http://xb.sinomaps.com>

测 绘 学 报

2020 年 9 月 第 49 卷 第 9 期

目 次

- 北斗卫星导航试验验证系统设计与实现 郭树人,
王 威,高为广,卢 鋈,柴 强,刘 成,刘文祥,姚 雷,左 勇,曹月玲,陈 颖,宿晨庚 (1073)
- PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较 张小红,胡家欢,任晓东 (1084)
- 北斗卫星天线相位中心改正模型精化及对精密定轨和定位影响分析
..... 张 勤,燕兴元,黄观文,解世超,曹 钰 (1101)
- 基于北斗/GNSS 的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析
..... 施 闯,张卫星,曹云昌,楼益栋,梁 宏,范 磊,SATIRAPOD,TRAKOLKUL (1112)
- Galileo 三频非组合精密定轨模型及精度评估
..... 李星星,黄健德,袁勇强,李 婕,刘城伯,朱艺婷 (1120)
- 北斗卫星伪距偏差标定及对用户定位精度影响
..... 唐成盼,宿晨庚,胡小工,刘 利,高为广,卢 鋈,陈 颖,刘 成,王 威,周善石 (1131)
- 北斗三号多频相位模糊度无几何单历元固定方法 章浙涛,李博峰,何秀凤 (1139)
- 基于北斗星间链路闭环残差检测的星间钟差平差改正
..... 刘 成,高为广,潘军洋,唐成盼,胡小工,王 威,陈 颖,卢 鋈,宿晨庚 (1149)
- 高轨航天器 GNSS 技术发展 王 猛,单 涛,王 盾 (1158)
- 利用多模多频 GNSS-IR 信号反演沿海台风风暴潮 何秀凤,王 杰,王笑蕾,宋敏峰 (1168)
- 小波变换与滑动窗口相结合的 GNSS-IR 雪深估测模型
..... 边少锋,周 威,刘立龙,李厚朴,刘 备 (1179)
- BDS/Galileo 四频精密单点定位模型性能分析与比较 苏 珂,金双根 (1189)
- GNSS 信号土壤衰减模型的试验验证方法 汉牟田,杨 毅,张 波 (1202)
- 北斗三号空间信号测距误差评估与对比分析
..... 刘伟平,郝金明,吕志伟,谢建涛,刘 婧,焦 博 (1213)
- 顾及 GEO 卫星约束的长距离 BDS 三频整周模糊度解算
..... 祝会忠,雷啸挺,徐爱功,李 军,高 猛 (1222)
- 基于星载数字滤波器的分段式预失真优化方法 刘 晗,杨志梅,徐启炳,陈玲玲,张立新 (1235)

CONTENTS

Design and implementation of the ground test and verification bed for BeiDou navigation satellite system
..... GUO Shuren, WANG Wei, GAO Weiguang,
LU Jun, CHAI Qiang, LIU Cheng, LIU Wenxiang, YAO Lei, ZUO Yong, CAO Yueling, CHEN Ying, SU Chengeng (1073)

New progress of PPP/PPP-RTK and positioning performance comparison of BDS/GNSS PPP
..... ZHANG Xiaohong, HU Jiahuan, REN Xiaodong (1084)

Refinement of BeiDou satellite antenna phase center correction model and its impact on precision orbit determination
and positioning ZHANG Qin, YAN Xingyuan, HUANG Guanwen, XIE Shichao, CAO Yu (1101)

Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and
relationships with precipitation SHI Chuang, ZHANG Weixing,
CAO Yunchang, LOU Yidong, LIANG Hong, FAN Lei, CHALERMCHON Satirapod, CHOKCHAI Trakolkul (1112)

Galileo triple-frequency uncombined precise orbit determination: model and quality assessment
..... LI Xingxing, HUANG Jiande, YUAN Yongqiang, LI Jie, LIU Chengbo, ZHU Yiting (1120)

Characterization of pseudorange bias and its effect on positioning for BDS satellites TANG Chengpan,
SU Chengeng, HU Xiaogong, LIU Li, GAO Weiguang, LU Jun, CHEN Ying, LIU Cheng, WANG Wei, ZHOU Shanshi (1131)

Geometry-free single-epoch resolution of BDS-3 multi-frequency carrier ambiguities
..... ZHANG Zhetao, LI Bofeng, HE Xiufeng (1139)

Inter-satellite clock offsets adjustment based on closed-loop residual detection of BDS inter-satellite link
..... LIU Cheng,
GAO Weiguang, PAN Junyang, TANG Chengpan, HU Xiaogong, WANG Wei, CHEN Ying, LU Jun, SU Chengeng (1149)

Development of GNSS technology for high earth orbit spacecraft WANG Meng, SHAN Tao, WANG Dun (1158)

Retrieval of coastal typhoon storm surge using multi-GNSS-IR
..... HE Xiufeng, WANG Jie, Wang Xiaolei, SONG Minfeng (1168)

GNSS-IR model of snow depth estimation combining wavelet transform with sliding window
..... BIAN Shaofeng, ZHOU Wei, LIU Lilong, LI Houpu, LIU Bei (1179)

Analysis and comparisons of the BDS/Galileo quad-frequency PPP models performances
..... SU Ke, JIN Shuanggen (1189)

An experimental validation method on GNSS signal attenuation model in soil
..... HAN Mutian, YANG Yi, ZHANG Bo (1202)

Evaluation and comparative analysis of BDS-3 signal-in-space range error
..... LIU Weiping, HAO Jinming, LÜ Zhiwei, XIE Jiantao, LIU Jing, JIAO Bo (1213)

The integer ambiguity resolution of BDS triple-frequency between long range stations with GEO satellite constraints
..... ZHU Huizhong, LEI Xiaoting, XU Aigong, LI Jun, GAO Meng (1222)

A piecewise pre-distortion optimization method based on spaceborne digital filter
..... LIU Han, YANG Zhimei, XU Qibing, CHEN Lingling, ZHANG Lixin (1235)

引文格式:郭树人,王威,高为广,等.北斗卫星导航试验验证系统设计与实现[J].测绘学报,2020,49(9):1073-1083. DOI:10.11947/j. AGCS.2020.20200330.
GUO Shuren, WANG Wei, GAO Weiguang, et al. Design and implementation of the ground test and verification bed for BeiDou navigation satellite system [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49 (9): 1073-1083. DOI: 10. 11947/j. AGCS. 2020.20200330.

北斗卫星导航试验验证系统设计与实现

郭树人¹,王威¹,高为广¹,卢鋈¹,柴强²,刘成¹,刘文祥³,姚雷²,左勇³,曹月玲⁴,陈颖¹,宿晨庚¹

1. 北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094; 2. 中国卫星导航系统管理办公室测试评估研究中心,北京 100094; 3. 国防科技大学电子科学学院,湖南长沙 410073; 4. 中国科学院上海天文台,上海 200030

Design and implementation of the ground test and verification bed for BeiDou navigation satellite system

GUO Shuren¹, WANG Wei¹, GAO Weiguang¹, LU Jun¹, CHAI Qiang², LIU Cheng¹, LIU Wenxiang³, YAO Lei², ZUO Yong³, CAO Yueling⁴, CHEN Ying¹, SU Chengeng¹

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China; 2. Test and Assessment Research Center, Beijing 100094, China; 3. College of Electronic Science, NUDT, Changsha 410073, China; 4. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: The BeiDou Navigation Satellite System (BDS) is a constantly-updated huge system with tightly-coupled space and ground segments and long construction period. Faced with the multiple challenges of highly complicated key technical scheme, high-intensity satellite deployment and launching tasks, and high difficulty in system stable operation, BDS has very high demands for the system's test and verification. This paper analyzes the test and verification tasks of BDS including system design and verification, space and ground segment integration, and simulation operation, and proposes the system architecture of the ground test and verification bed which equivalent to the full-system, full-scale and full-elements BDS. The bed is featured with synchronized work of the software and hardware platforms, equivalent operation of the simulation and real systems, and remote connection between the test bed and system segments, and solves the problems of multi-system simulation modeling, high-dynamic simulation as well as software and hardware synchronized simulation; realizes the whole process verification of the BDS design, deployment and operation, and also realizes the test and verification of the BDS new technical schemes such as inter-satellite links, BDS satellite autonomous integrity monitoring, and precise orbit determination. The bed for BDS is the only test and verification system in the field of satellite navigation that can realize all-states system simulation, and synchronized iterative evolution and operation with the real system, and can serve as important reference for the verification work of other space missions.

Key words: BDS; test and verification; system architecture; simulation modeling

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41974041)

摘要:北斗卫星导航系统是一个构成庞大、星地一体紧密耦合、建设周期长、技术状态不断演进的巨系统。面临着关键技术体制复杂、组网发射密度高、系统稳定运行难度大等多方面挑战,对系统的试验验证工作提出了极高的要求。本文分析了北斗系统在设计试验、星地对接及等效运行等方面试验验证任务,提出了一个与北斗系统全系统、全规模、全要素等效的地面试验验证系统体系架构。该系统具备软硬件平台协同工作、仿真系统与真实系统的等效运行以及试验平台与卫星地面等系统远程互联等突出

特点,解决了多系统仿真建模、系统高动态特性模拟及软硬件协同仿真等难题,实现了对北斗系统设计、建设及运行阶段的全过程验证,及对北斗系统星间链路、卫星自主完好性及精密定轨等技术体制的试验验证。本文提出的系统是目前卫星导航领域唯一一个实现系统全状态仿真、能与真实系统同步迭代演进并协同运行的试验验证系统,可为其他航天任务的试验验证工作提供参考。

关键词:北斗系统;试验验证;体系架构;仿真建模

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1073-11

基金项目:国家自然科学基金(41974041)

航天工程是复杂巨系统工程,卫星导航系统更是航天工程复杂巨系统的典型代表。卫星导航系统需要几十颗卫星发射入轨,并与数十个地面站组网运行,实现星地一体化运行管理,才能提供高精度、高可靠的定位、导航、授时(PNT)服务。为有效支撑系统的技术方案、关键体制及接口协议等论证和设计,世界各主要卫星导航系统都开展了仿真系统的研制及试验验证工作。

GPS从概念提出到系统完全建成期间做了大量的建模、仿真与试验。20世纪80年代中期,美国Rockwell公司建立了一套星地信号回路仿真系统,以支持GPS BLOCK II和BLOCK II A卫星系列的研发^[1],仅实现了系统的对接试验;20世纪90年代后期,美国军方采用SST分布式交互的GPS仿真系统,完成了一些关键技术的单点验证^[2-3];为了支持GPS现代化,AGI和OST等公司联合开发了卫星导航软件工具箱(NavTK),用于GPS卫星导航用户任务的建模、仿真、军事行动和分析^[4-5],但主要服务于用户层软件仿真;由美国空军空间和导航系统中心研制的GIANT软件包括GPS空间段和用户段模型以及控制段模型,可以评估GPS的效能^[6-9],但它仅提供GPS星座与应用性能分析。以上试验验证系统尚无法实现对整个全系统全规模的试验,也无法对GPS星地系统运行流程进行设计与优化。

欧盟的Galileo系统,从建设之初就十分重视利用仿真软件进行总体设计和系统验证,开发了多个软硬件平台。欧空局(ESA)为Galileo系统设计了系统仿真软件(GSSF)^[10-11],用于仿真导航系统功能和性能,但不能验证整个Galileo系统信息信号的完整流程;在Galileo系统工程研制阶段,欧盟建设了Galileo系统试验平台(GSTB)^[12-13],对导航关键技术进行验证,但只是对关键技术的逐个验证;软件仿真验证环境(GRANADA平台、Polaris计划)^[14-15]是为了支持Galileo关键技术验证而建立的,是一个通过软

件仿真的导航接收机验证环境,但该平台无法测试验证整个系统的各项功能指标。以上试验验证系统仅通过硬件或软件分别开展试验,并仅能在系统设计研制阶段开展试验。

我国在北斗系统建设过程中同样非常重视系统仿真平台的建设与试验。国内学者在系统数学仿真、平台设计方法及系统对接试验等方面开展了研究。文献[16—17]分析了卫星综合仿真平台的设计思想与整体架构,分析了仿真平台的主要功能,并给出了综合仿真平台的具体实现方法。文献[18]总结了卫星导航系统仿真技术,并开发了“卫星导航数学仿真系统”软件平台,研究了卫星导航系统仿真结果分析与评价技术,但只是基于纯数学仿真的数据进行的评估。文献[19]应用平行系统理论,提出了基于Agent的导航系统实体建模及平台设计方法,给出了GNSS纯仿真数据平台的设计建设过程。文献[20—22]开展了针对系统信号层数据层、接口对接性验证及工程联调测试等方面的系统研制与试验,主要的系统包括星地对接系统、卫星地检系统、仿真验证与测试评估系统等。以上试验验证系统仅通过模拟数据对卫星导航系统进行仿真建模,并仅实现了两系统的对接试验。

从国内外卫星导航系统构建的仿真试验系统情况分析可以看出,目前卫星导航仿真系统重点针对系统单个关键技术、单个分系统、单个发展阶段进行的软件或硬件仿真试验,尚未实现能够对复杂星座系统进行全系统、全规模、全状态的软件和硬件结合的仿真试验验证。北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的全球卫星导航系统,他的建设需要构建一个有效的仿真试验验证系统,即地面试验验证系统,支撑系统的设计验证、工程对接及模拟演练等试验,持续服务北斗系统的研发、建设、运行和发展的全过程。

1 北斗系统试验验证任务分析

北斗卫星导航系统(下简称北斗系统)是我国

航天领域第一个真正意义上的全球系统,通过星地星间链路构建了由 30 余颗卫星与地面 50 余个地面站构成的庞大星地协同运行网络。北斗系统具有功能高度聚合技术难度大、星地一体化紧密耦合网络化程度高、分阶段组网建设实施状态迭代演进迅速等特点,北斗系统的试验验证任务主要为针对高复杂技术体制、高网络化星地架构及不断演进的阶段状态开展的设计试验、综合对接及等效运行等试验验证工作,具体任务主要为以下几个方面:

(1) 北斗系统方案体制的设计试验验证任务。北斗系统功能高度聚合、技术难度大,技术状态逐步升级,需要持续开展北斗系统方案、核心体制、关键技术以及工程建设过程中技术状态优化的试验验证,为系统技术状态确定和优化升级提供依据,降低系统组网部署风险。

(2) 北斗系统星地网络综合对接试验验证任务。北斗系统具有星座规模庞大、高密度组网发射要求高、系统间接口关系复杂等特点,需持续开展工程建设过程中卫星、运控、测控、星间链路运管和应用验证等系统级综合对接,为系统间技术状态确认、卫星出厂以及工程转阶段提供依据。

(3) 北斗系统等效运行试验验证任务。北斗系统在不同的发展阶段具有不同的试验需求,因此需要在系统设计、建设、服务及升级的不同发展过程中在地面构建一个“等效的”仿真试验平台,与系统并行开展模拟演练等工作,为系统星地测试、状态联调、运行控

制、资源调度、关键软件跑核以及在轨故障排查定位等提供支撑,保障系统稳定运行与迭代演进。

因此,在北斗系统研制建设过程中,需要建立卫星导航系统级的试验验证系统,即地面试验验证系统,构建代表北斗系统近真实状态的多层次灵活可控的仿真试验平台,对技术方案、关键体制、系统间接口、运行控制流程等进行全系统、全规模、全要素、全过程的试验验证,才能有效降低系统研制建设风险。

2 试验验证系统架构设计

根据以上北斗地面试验验证系统的任务分析,为完成北斗系统设计试验、工程对接及等效运行等方面的验证工作,并突破系统真实灵活建模、复杂动态环境等效、星地一体控管及与真实系统协同运行等关键技术,实现北斗全系统、全规模及全要素的仿真建模,本文开展了北斗地面试验验证系统的架构设计。主要工作包括总体架构规划、总体思路设计以及总体架构的实现,为北斗地面试验验证系统的建设提供顶层指导。

2.1 系统总体架构设计

系统总体架构主要由北斗系统的等效映射和抽象集成实现,主要分为工程属性部分和仿真属性部分(图 1)。工程属性部分主要对北斗各大系统及空间环境进行真实建模;仿真属性部分主要对试验平台及对外接口进行综合控制与管理,驱动仿真系统运行。

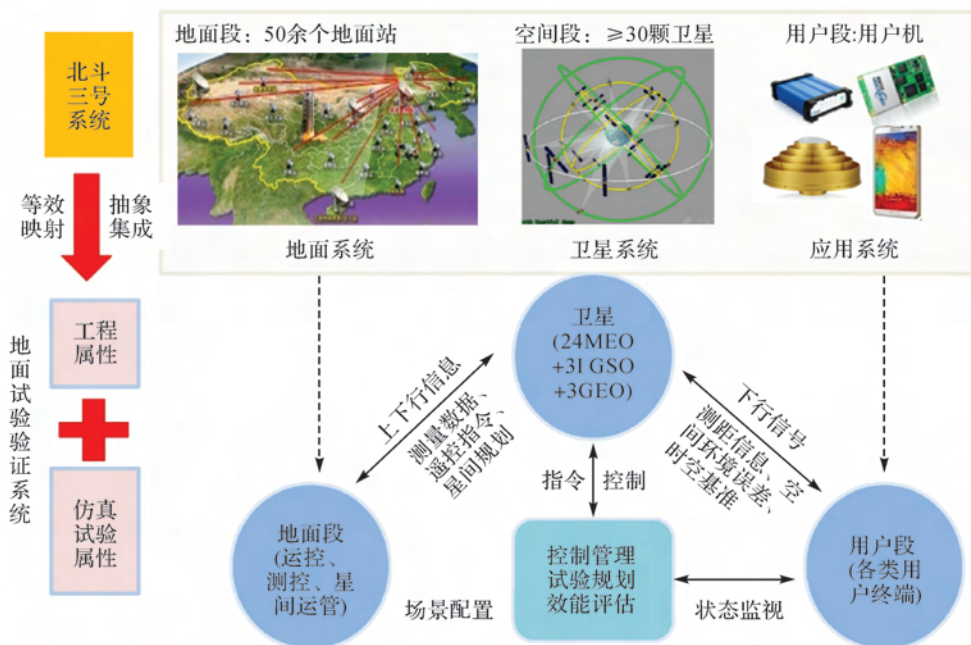


图 1 地面试验验证系统总体架构
Fig.1 Architecture of the ground test and verification bed

系统工程属性模块主要用于对北斗系统空间段、地面段、用户段以及相互空间传输特性进行等效映射和抽象集成。主要包括系统各类软硬模拟器,具备卫星导航系统功能性能,模拟卫星星座和地面的空间环境传播特性,正确映射各系统间接口关系,构建系统间动态运行环境,实现硬件层面真实可信、软件层面灵活扩展。主要分为工程模型和环境模拟模块。

仿真试验属性模块主要完成系统整体运行与试验、信号与信息的交互、综合调度及性能评估等功能,实现全系统的调度管理、运行控制与效能评估,并实现与真实系统的互联互通、在轨监测及状态评估等功能。主要分为控制管理、对外接口及试验规划模块。

2.2 系统总体设计思想

根据北斗系统试验验证任务,提出了五方面的核心设计思想,实现了地面试验验证系统的特点设计,解决了系统建设难点。设计思想主要为:

- (1) 真实灵活的工程建模体系。重点对工程系统总体架构的准确等效映射,突破多专业多要素模拟等创新,解决真实灵活建模等难点。
- (2) 准确的动态特性仿真与传输。重点对星地、星星、地地等空间环境模拟与传输,突破多种试验模拟动态模拟等创新,解决系统动态特性模拟等难点。
- (3) 全系统全流程的仿真能力。重点对系统间真实接口关系与运行流程全状态等效与指挥调度,突破星地一体化网络验证等创新,解决系统星地一体管控等难点。
- (4) 分布式的对外互联接口。重点对在轨真

实系统及地面系统的协同运行及监测评估,突破多功能聚合验证等创新,解决模拟系统与真实系统远程互联等难点。

- (5) 状态逐步演化的系统架构。重点实现系统架构和功能性能与北斗系统同步迭代演进,突破状态演化灵活扩展等创新点,解决有效控制系统规模与成本等难点。

系统核心设计思想与系统特点及难点的对应关系见图2。

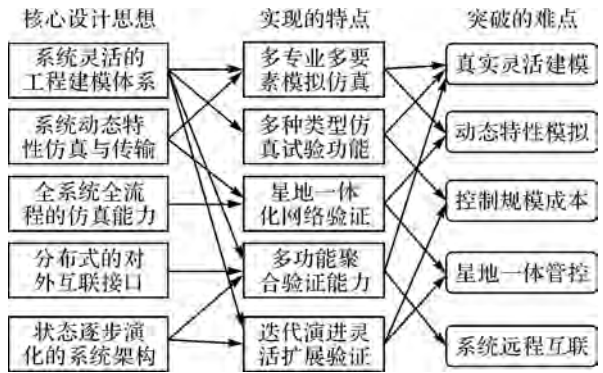


图2 系统核心设计思想与特点及难点对应关系
Fig.2 The corresponding relationship between the core design idea, characteristics and difficulties of the proposed system

2.3 总体架构实现

2.3.1 构建系统性的仿真建模体系,实现系统的真实性

卫星导航系统的仿真建模体系主要包括系统级的仿真建模及分系统的仿真建模(图3)。

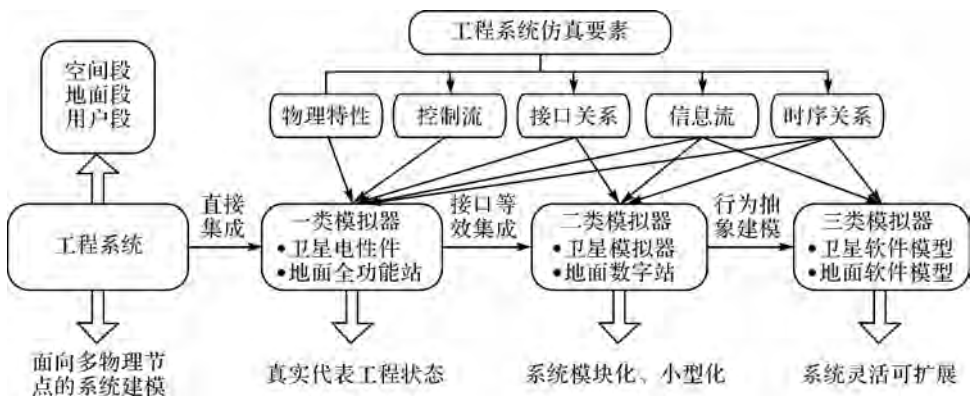


图3 工程模型的建立与技术传递
Fig.3 Establishment of process model and technology transfer

- (1) 系统级的仿真建模。重点构建系统全规模的仿真试验场景,通过面向多物理节点的建模

实现了对卫星导航系统的整体建模,关注系统间输入输出接口关系,不对单一系统内部指标进行

验证,关注全系统网络层信息流,不对单条链路及单机设备性能进行验证。

(2) 分系统级的仿真建模。重点构建分系统级的工程仿真模型,在分系统能够与真实系统保持技术状态一致的前提下,通过构建 3 类分系统模拟器来实现技术状态的传递和灵活性的扩展。3 种模拟器真实性逐步递减、灵活性不断增加,通过灵活配置构建代表系统状态的近真实的仿真试验环境,实现了真实性和灵活性的有效统一。

一类模拟器,直接采用工程真实系统,确保技术状态与真实系统完全一致,主要包括工程卫星电性件设备、地面段运行系统等;二类模拟器,将卫星、地面段等系统进行模块化、小型化优化设计,在对外接口特性以及内部信息流、时序关系与工程保持一致的前提下,实现功能高度集成和等效,包括卫星模拟器、数字地面站等;三类模拟器,对真实硬件系统的行为进行抽象和软件建模,并确保对外表现和内部信息流、时序关系与工程基线基本等效,包括卫星软件模型及地面段各分系统软件模型等。

2.3.2 构建动态环境仿真与传输平台,实现系统时空特性的动态模拟

空间环境的模拟仿真是卫星导航系统建模的重要组成部分,也是能够真实构建系统运行状态的重要环节(图 4)。试验验证系统在实现工程系统仿真建模的基础上,进一步采用多频段射频信号采样与生成、万兆光信号多入多出交互及高精度动态信道特性实时模拟等技术,构建系统间的动态运行环境,实现不同信道条件下多链路、多频段大范围与高精度并重的功率、时延、相位、频率变化模拟;实现多系统间信号层真实环境的仿真模拟,使系统具备下行导航、上行注入、星间链路和锚固链路全频点,多星多站全规模链路全覆盖,使得卫星、运控和用户设备在地面静止条件下可以等效为参与了系统的真实动态运行状态,完成系统内静态信号到空间动态信号的转换;实现工程模型与软件仿真平台的星间、星地等信息交互与运行流程的真实模拟。

2.3.3 构建全系统的仿真架构,保证系统全规模体系

在完成系统模型建立和环境模拟的基础上,还需构建全系统的仿真架构,实现全系统全规模的整体运行,即系统对信息流、时间流和控制流的全面仿真试验(图 5)。主要工程实际运行过程通

过统一的场景生成与配置、统一的时间空间基准和统一的综合控制管理来实现。实现对卫星导航仿真场景数据的生成和计算,完成仿真场景的规划及初始试验任务数据的配置,为系统内其他模块提供时频基准,将工程模型模块中建立的模型节点进行集成与管理,对试验运行过程进行监控调度与试验数据采集,并完成试验结果数据的效能评估,实现不同仿真试验需求下的试验设计、运行与评估。

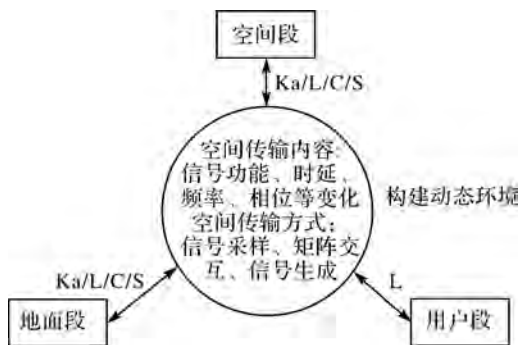


图 4 动态环境模拟与传输平台

Fig.4 Dynamic environment simulation and transmission platform

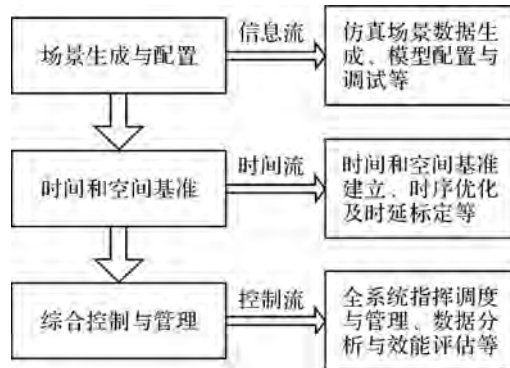


图 5 综合控制与管理架构

Fig.5 Integrated control and management architecture

尤其是在系统软硬结合的多层次多状态协同仿真的实现过程中,重点通过统一的软硬环境时间基准,以软件系统和硬件系统分别作为信息和信号生成中枢,实现各类信息信号的仿真与处理。利用万兆交换网络实现信道模拟,实现硬件信号与软件信息的实时传输与转换,实现了软硬件协同配合场景下的全规模整网仿真能力。主要流程如图 6 所示。

2.3.4 构建分布式的对外接口平台,实现与真实系统的互联互通

为实现地面试验验证系统的对接功能,提升

系统的灵活扩展性,重点采用分布式互联的方式实现地面试验验证系统与真实工程系统之间的交互。首先通过远程光纤系统实现地面试验验证系统与真实卫星、运控等系统的远程互联互通,实现数据及信息的交互;其次,可以对在轨系统运行情

况进行监测,观测和评估在轨系统运行情况;最后,可针对系统真实数据及软件进行状态跑核,开展系统问题定位与排查,支撑系统技术状态优化。试验验证系统与真实系统互联关系见图 7。

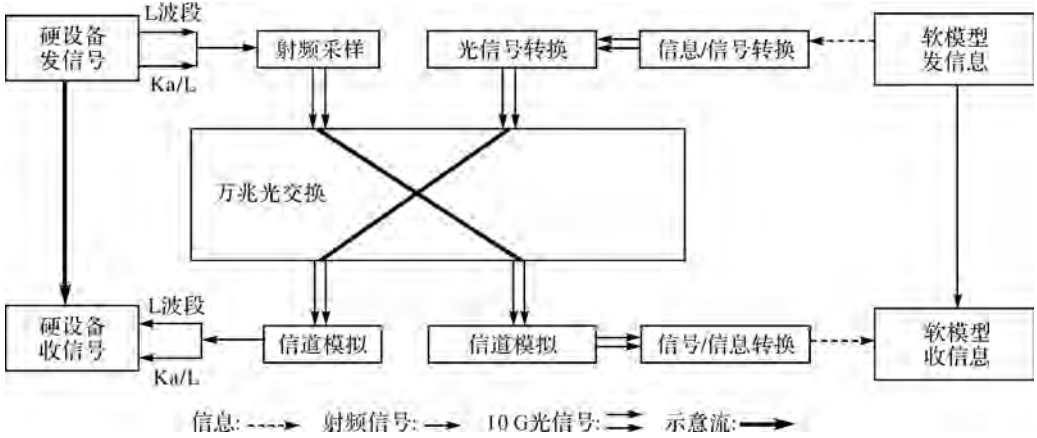


图 6 软件层及硬件层协同运行技术框图

Fig.6 Technical block diagram of collaborative operation of software layer and hardware layer

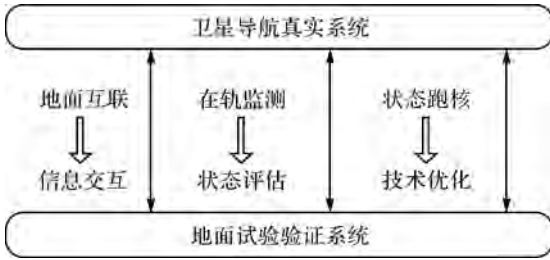


图 7 试验验证系统对外互联关系

Fig.7 Interconnection of the test verification system

实现高精度时间同步,实现了信号远程低信噪比损失的采样与恢复,保证了射频信号的远距离连续稳定传输^[23-24]。将信号采样与恢复设备分别放置于地面试验验证系统机房和远端厂房,数字信号通过光纤远距离交互传输,两地在同步时频下进行射频信号的采样与恢复。通过这种远程对接模式,实现了工程实际系统与地面试验验证系统的虚实结合仿真试验,可大幅提高试验效率、减少人力物力等资源消耗。系统连接关系如图 8 所示。

基于光纤链路的射频信号远程传输技术是实现远程互联的核心,主要通过卫星导航双频授时

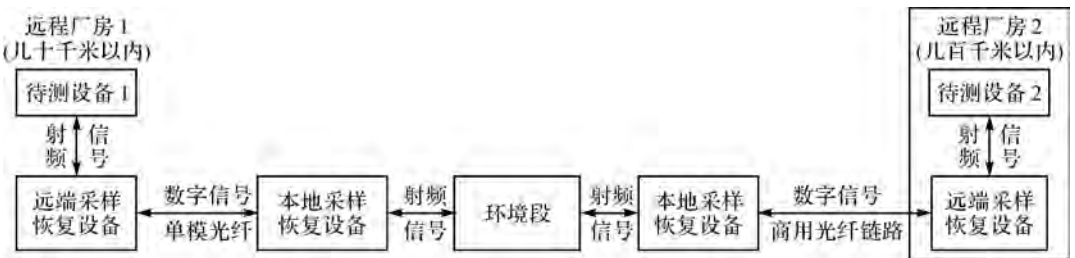


图 8 程光纤链路的射频信号远程传输技术框图

Fig.8 Block diagram of rf signal remote transmission technology of optical fiber link

2.3.5 构建状态逐步演化的仿真架构,实现多种类型试验功能

状态逐步演化的系统仿真架构将有效控制系统规模,并重点确保试验验证系统的灵活性仿真,

主要通过不同层次类型的软硬件仿真模型之间协同配置构建不同的试验场景来实现。多场景的仿真架构,确保系统具备可配置、可加速和可扩展升级能力,缩短试验时间,提高试验效率。从试验架

构看,一类、二类模拟器等构建了硬件试验架构,以及各类软件三类模拟器构建的软件试验架构,两种架构既可以独立运行,又可以协同工作,实现软硬协调试验架构。同时,仿真环境接入厂房卫星等真实工程系统,可实现虚实结合的试验架构。因此,地面试验验证系统可提供纯软试验、纯硬试验、虚实结合、软硬协同试验 4 种试验功能。4 种试验架构逐步升级演进。系统最终将演化为以软

件驱动的软硬协同试验结构模式,同时不同的试验架构可以支撑设计试验、工程对接及等效运行不同类型试验验证工作。纯硬件及软件试验架构重点开展设计试验工作,虚实结合试验架构重点开展工程对接试验工作,软硬协同试验架构重点开展系统等效运行试验工作。随着系统仿真架构的逐步演化,系统灵活性逐步提升,系统试验功能逐步扩展。系统架构演化与试验功能对应关系见图 9。

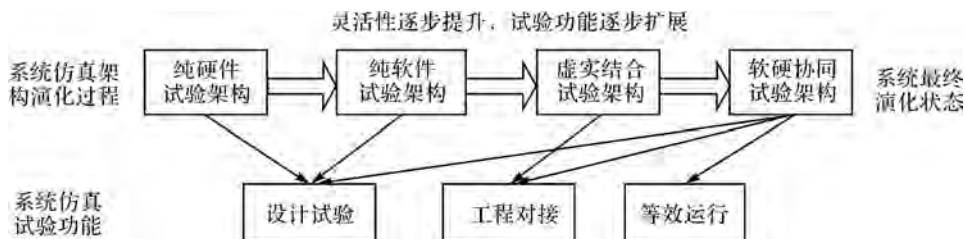


图 9 系统仿真架构与试验功能演化

Fig.9 Evolution of system simulation architecture and test function

3 试验系统的实现与应用

基于上述设计架构,完成了地面试验验证系统的建设。按照系统工程属性、仿真试验属性两个维度进行了系统组成规划,基于系统 4 种试验功能进行了系统仿真能力设计,并在设计验证、工程对接及等效运行方面取得了良好应用。

3.1 系统基本组成

地面试验验证系统系统组成涵盖代表空间

段、地面段、用户段等各大系统,覆盖北斗运行系统完整的接口及业务关系,共包含 11 个分系统。代表工程属性的分系统主要包括空间段、运控、测控、星间链路运行管理、应用终端及全球系统仿真软件分系统。代表试验验证属性的分系统主要包括环境段模拟分系统、控制与综合保障分系统、性能评估软件、信息管理系统软件和复杂电磁环境分系统(图 10)。

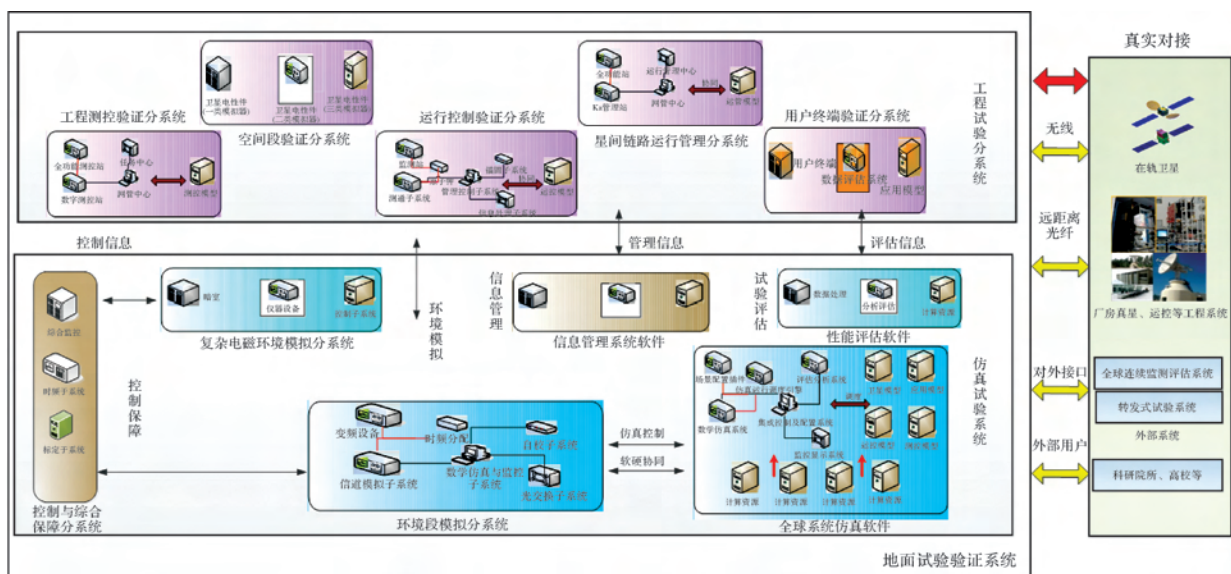


图 10 地面试验验证系统组成

Fig.10 Components of the ground test and verification bed

3.2 系统仿真试验能力

(1) 北斗系统服务试验验证能力。对系统不同服务类型(定位导航授时服务、星基增强服务及全球短报文服务)、不同运行模式(正常模式、异常模式)能力进行试验验证。

(2) 北斗系统核心关键技术体制试验验证能力。具备对系统核心的星间链路、精密定轨与时间同步、系统差分与完好性、星地一体化信息传输与处理等体制进行试验验证能力。

(3) 北斗系统全业务流程仿真能力。对系统业务流程(信息流、控制流、时间流)、星地星间测量业务(星地钟差、伪距及载波相位、星间钟差及伪距)数传业务(数据传输层、协议层、网络层、应用层)、星地一体化拓扑结构、链路规划及路由策略仿真。

(4) 北斗系统工程对接能力。能够与工程组网卫星及工程地面系统开展星地综合对接试验工作,支撑卫星出厂。

(5) 北斗系统模拟演练能力。具备对北斗系统(卫星、运控、星间链路、测控、应用),不涉及与组网发射相关的运载火箭、发射场系统状态等效验证与评估能力。

(6) 北斗系统在轨故障排查能力。能够针对北斗系统发现的问题进行故障复现,支撑系统问题定位与排查。

(7) 北斗系统演进升级能力。软硬件可灵活配置,功能性能可扩展升级,可与北斗系统同步演进升级。

3.3 地面试验验证系统应用

地面试验验证系统主要开展了三方面的仿真试验工作:一是开展系统核心技术体制的仿真研究和设计验证,持续开展新技术验证,推动创新发展;二是开展系统运行控制、系统间接口的综合试验验证,对系统技术状态进行确认,支持工程建设;三是开展系统的等效运行试验,支撑北斗系统异常排查,保障稳定运行。

3.3.1 北斗系统星间链路体制的设计试验验证

星间链路技术体制试验采用纯硬件及纯软件试验模式,构建了局部硬件规模和软件全规模的仿真场景,验证了星间链路星地一体化流程的正确性,信息层接口设计的正确性和匹配性。首次验证了整网条件下星间信息传输的有效性,不同信息速率下业务传输网络传输时延、丢包率、网络容量及吞吐率的能力。选取了几种典型的星间

链路网络设计方案进行评估,D1—D5分别为传统、优化和自适应的星地建链参数优化方法,比较了北斗系统中不同上行数据产生速率下各星间链路网络设计方案的性能。验证结果如图11所示。

试验表明,D5取得了最低的丢包率和平均时延;D1的丢包率和平均时延则明显高于其他方案。因此,北斗系统星间链路性能与全网卫星队列状态信息和信道情况紧密相关,在一定数据速率支持下,优化的星地网络建链方案可有效提升系统整网运行性能,为北斗全球系统接口关系及星间链路关键体制的确定提供了技术依据。

3.3.2 北斗系统卫星自主完好性功能的工程对接试验验证

地面试验验证系统采用虚实结合的工作模式,构建了系统硬件环境和真实卫星互联互通的仿真场景,开展了与北斗系统卫星的对接试验工作。重点针对卫星自主完好性处理功能及流程的正确性等进行了试验。验证了卫星伪距、载波相位、信号功率、调相调频等完好性监测数据的连续性,并对告警时间等指标进行了验证,实现了基本完好性告警全流程的试验。卫星自主完好性体制试验验证结果如图12所示。

试验表明,信号功率测量数据、伪距测量数据、载波相位测量数据、卫星钟频率跳变监测数据、卫星钟相位跳变监测数据等卫星自主完好性信息能够按照1s采样间隔正常更新。伪距测量噪声优于7cm,相位测量噪声优于5mm,功率测量稳定度优于0.1dB;卫星钟频率跳变测量精度优于0.04Hz,相位跳变测量精度优于0.004ns。当发生异常时,卫星自主完好性可监测到异常变化量,并能够在3s内发出告警,有效验证了卫星自主完好性的功能性能。

3.3.3 北斗系统精密定轨能力的模拟演练试验验证

地面试验验证系统采用软硬协同工作模式,构建了软件及硬件协同工作全规模的仿真场景,对系统精密定轨接口关系和软件合理性及系统运行流程进行了模拟演练。通过对精密定轨上注电文、下行电文和星间互传信息的分析结算,验证了星地星间互传信息的正确性、下行导航电文的有效性。重点验证了系统在部分星地链路和全网星间链路支持下,进行长期精密定轨功能性能的验证,在地面有效的模拟试验了系统在轨全规模的能力。结果如图13所示。

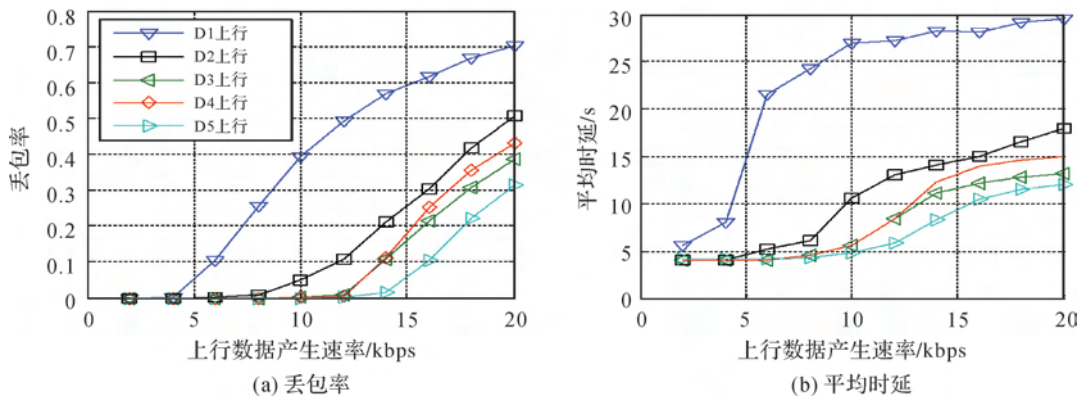


图 11 不同上行速率下各方案星地传输性能比较

Fig.11 Comparison of satellite to ground transmission performance under different uplink rates

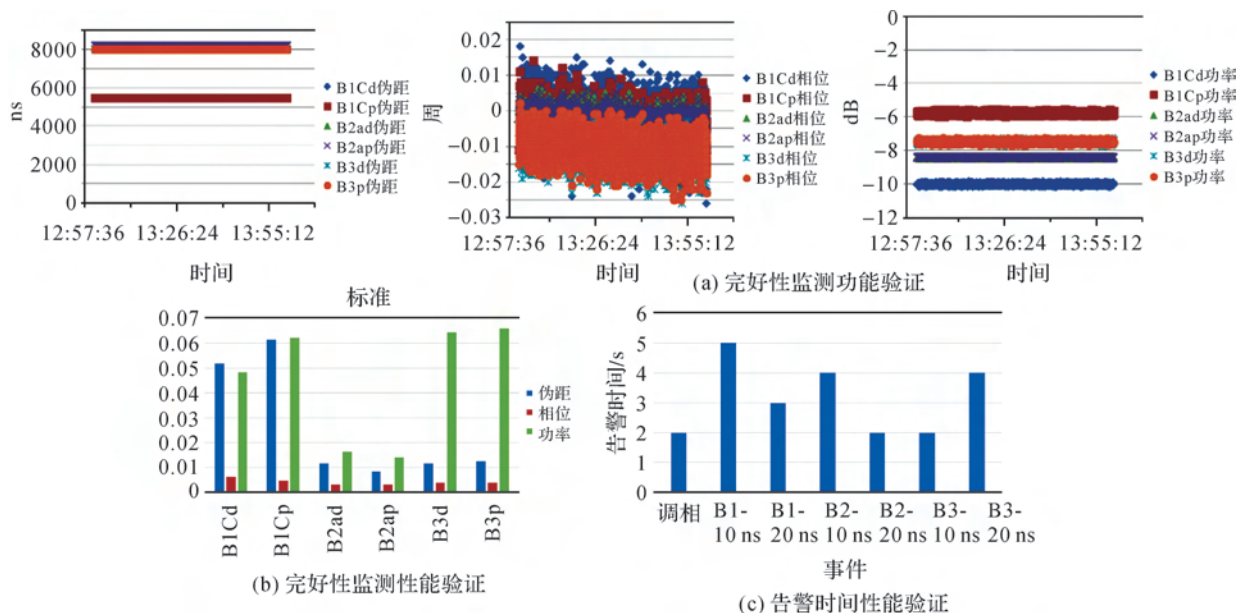


图 12 卫星自主完好性体制试验验证结果

Fig.12 Verification results of satellite autonomous integrity system test

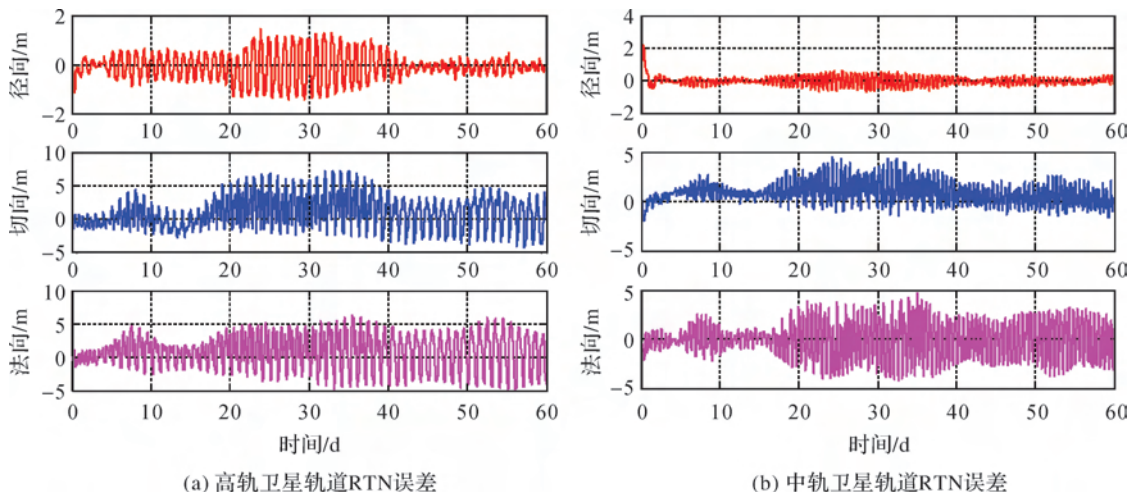


图 13 系统精密定轨体制试验验证结果

Fig.13 Experimental verification results of precise orbit determination

试验表明,在长期运行周期内,高轨卫星的轨道径向、切向和法向的误差可以控制在 2、10 和 10 m 以内,中轨卫星的轨道径向、切向和法向的误差可以控制 2、5 和 5 m 以内,中轨卫星的轨道精度较优。验证了系统星地星间联合定轨的有效性,以及基于部分星地链路及星间链路支持系统长期精密定轨的可行性。

4 结 论

本文结合北斗系统试验验证任务,完成了北斗地面试验验证系统总体思路及结构框架的设计,提出了软硬协同、虚实结合及光纤互联等技术路线,推动地面试验验证系统对北斗系统进行了全系统、全状态、全规模的试验验证,具备与工程建设同步实施、技术状态同步演进、与运行系统协同工作的能力。在北斗系统方案设计、综合对接、等效运行等方面开展了全面的验证,有力支撑了北斗系统的建设,为系统的长远发展奠定了基础,促进了航天科研能力的提升。后续将进一步推动北斗系统的升级换代,逐步丰富和完善地面试验验证系统能力,开展下一代北斗系统关键技术试验验证,逐步成为卫星导航领域共享开放的试验平台。

参考文献:

- [1] 范国清. 高精度实时卫星导航仿真系统关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2011.
FAN Guoqing. Study on key technologys of high precision and real-time simulation of satellite navigation system[D]. Changsha; National University of Defense Technology, 2011.
- [2] 杨腾飞. GPS 卫星导航信号仿真研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2016.
YANG Tengfei. GPS satellite navigation signal simulation research [D]. Hangzhou; Zhejiang Sci-Tech University, 2016.
- [3] LAVRAKAS JW, DRIVERT, CONLEYR, et al. Assessing SATNAV performance using the navigation tool kit[C]// Proceeding of the 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Long Beach: ION, 2004; 2104-2112.
- [4] GREEN G L, HULBERTB. An overview of the global positioning system interference and navigation tool (GIANT) [C] // Proceeding of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2000). Salt Lake City: ION, 2000; 499-511.
- [5] GREEN G L, GERTENG. Recent developments for the

- global positioning system interference and navigation tool (GIANT)[C]// Proceeding of 2000 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2000; 547-554.
- [6] SECRETAN H, SUARD N, DE MATE J C, et al. EGNOS system testbed status and achievements[C]// Proceeding of ION on GNSS2001. Portland: ION, 2001; 895-901.
- [7] GSSF. GSSF operations manual volume1: GSSF2, OM. 001[EB/OL]. (2005-05-22)[2020-06-12]. <http://www.gssf.info>.
- [8] 李杰奇, 孔福, 李争学, 等. 航天飞行器总体性能仿真验证系统设计与实现[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(1): 165-168,174.
LI Jieqi, KONG Fu, LI Zhengxue, et al. Design and implementation of simulation system for overall performance of spacecraft[J]. Fire Control & Command Control, 2018, 43(1): 165-168,174.
- [9] 杨久龙, 丁志刚, 过静璐. EGNOS 系统及其测试平台 ESTB[C]// 中国全球定位系统技术应用协会第八次年会论文集. 北京: 中国全球定位系统技术应用协会, 2009.
YANG Jiulong, DING Zhigang, GUO Jingjun. EGNOS system and its test platform ESTBIC[C]// Proceedings of China Global Positioning System Technology Application Association Eighth Annual Meeting. Beijing: China Global Positioning System Technology Application Association, 2005.
- [10] GRANADA Software Suite. Simulation of GPS and Galileo [EB/OL]. [2020-06-20]. www.elecnor-deimos.com/protfolio/granada.
- [11] GAVINÁ J, SCARDAS, SHERIDANK, et al. Polaris: a software tool to support GNSS-based application design [C]// Proceedings of European Navigation Conference on GNSS 2004. Rotterdam: [s.n.], 2004; 985-993.
- [12] 田尊华, 赵龙. 卫星导航仿真系统的研究与实现[C]// 第四届全国虚拟现实与可视化学术会议论文集. 大连: 中国图像图形学会, 中国计算机, 2005; 489-494.
TIAN Zunhua, ZHAO Long. Research and implementation of satellite navigation simulation system[C]// Proceedings of the 4th National Conference on Virtual Reality and Visualization 2004. Dalian: Chinese Society of Image Graphics, China Computer, 2005; 489-494.
- [13] 田尊华, 赵龙, 贾焰. 卫星导航综合仿真平台的研究与实现[J]. 计算机工程与科学, 2007, 29(11): 145-148.
TIAN Zunhua, ZHAO Long, JIA Yan. Research and implementation of a satellite navigation synthetic simulation platform[J]. Computer Engineering and Science, 2007, 29(11): 145-148.
- [14] 文援兰. 卫星导航系统分析与仿真技术[M]. 北京: 中国航空出版社, 2009.
WEN Yuanlan. Analysis and simulation technology of satellite navigation system [M]. Beijing: China Aerospace Press, 2009.
- [15] 杨俊, 范丽, 明德祥, 等. 卫星导航地面试验验证的平行系统方法[J]. 宇航学报, 2015, 36(2): 165-172.

- YANG Jun, FAN Li, MING Dexiang, et al. An ACP approach of ground experimental verification for global navigation satellite system[J]. Journal of Astronautics, 2015, 36(2): 165-172.
- [16] 彭海军. GNSS 星间链路组网通信的地面试验验证方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- PENG Haijun. Research on the ground test and verification method of the GNSS ISLs networking [D]. Changsha: Hunan University, 2016.
- [17] TADIC S, MOURA G, TRICHAUDT. Design of GNSS performance analysis and simulation tools as a web portal [J]. Telfor Journal, 2004, 6(2): 97-102.
- [18] 蔚保国, 甘兴利, 李隽. 国际卫星导航系统测试试验场发展综述[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院高技术研究与发 展局, 中国卫星导航定位应用管理中心, 2014.
- YU Baoguo, GAN Xingli, LI Jun. Overview of development of international satellite navigation system test and test site [C]//Proceedings of the First China Satellite Navigation Academic Annual Conference. Beijing: Bureau of High Technology Research and Development, Chinese Academy of Sciences, China Satellite Navigation and Positioning Application Management Center, 2014.
- [19] 陈培, 韩潮. SST-I 分布式航天器实时仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(18): 4154-4159.
- CHEN Pei, HAN Chao. SST-I spacecraft distributed real-time simulation system[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(18): 4154-4159.
- [20] 许承东, 李怀建, 张鹏飞, 等. GNSS 数学仿真原理及系统实现[M]. 北京: 中国航空出版社, 2014.
- XU Chengdong, LI Huaijian, ZHANG Pengfei, et al. GNSS mathematical simulation principle and system implementation[M]. Beijing: China Aerospace Press, 2014.
- [21] 杨俊, 陈建云, 钟小鹏, 等. 高精度延迟信号产生理论与技术及其在卫星导航系统试验验证中的应用[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院高技术研究与发 展局, 中国卫星导航定位应用管理中心, 2014.
- YANG Jun, CHEN Jianyun, ZHONG Xiaopeng, et al. The theory and technology of high-precision delayed signal generation and its application in the experimental verification of satellite navigation system[C]//Proceedings of the First China Annual Conference on Satellite Navigation. Beijing: Bureau of High Technology Research and Development, Chinese Academy of Sciences, China Satellite Navigation and Positioning Application Management Center, 2014.
- [22] 卢麟, 吴传信, 朱勇, 等. 125 km 高精度光纤时间传递实验[C]//第一届中国卫星导航学术年会论文集. 北京: 中国科学院高技术研究与发 展局, 中国卫星导航定位应用管理中心, 2010.
- LU Lin, WU Chuanxin, ZHU Yong, et al. 125 km high-precision optical fiber time transmission experiment[C]//Proceedings of the First China Satellite Navigation Academic Annual Conference. Beijing: China Satellite Navigation and Positioning Application Management Center, High Tech Research and Development Bureau, Chinese Academy of Sciences, 2010.
- [23] 于海杰. 多功能时频传输系统的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2015.
- YU Haijie. Design and implementation of the multi-function time-frequency transmission system[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [24] 施宏, 郝英川. 线性光纤传输宽带射频信号技术及实现[J]. 无线电工程, 2007, 37(4): 42-44, 64.
- SHI Hong, HAO Yingchuan. Technology and realization of broadband RF signal transmission over linear optical fiber[J]. Radio Engineering of China, 2007, 37(4): 42-44, 64.

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2019-07-20

修回日期: 2019-08-15

第一作者简介: 郭树人(1972—), 男, 研究员, 研究方向为卫星导航系统工程及总体设计等。

First author: GUO Shuren (1972—), male, research fellow, majors in engineering construction and overall design of GNSS.

E-mail: gsr888@tom.com

通信作者: 王威

Corresponding author: WANG Wei

E-mail: 15810266558@163.com

引文格式:张小红,胡家欢,任晓东.PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J].测绘学报,2020,49(9):1084-1100. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200328.
ZHANG Xiaohong, HU Jiahuan, REN Xiaodong. New progress of PPP/PPP-RTK and positioning performance comparison of BDS/GNSS PPP[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1084-1100. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200328.

PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较

张小红^{1,2}, 胡家欢^{1,2}, 任晓东^{1,2}

1. 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 地球空间环境与大地测量重点实验室, 湖北 武汉 430079

New progress of PPP/PPP-RTK and positioning performance comparison of BDS/GNSS PPP

ZHANG Xiaohong^{1,2}, HU Jiahuan^{1,2}, REN Xiaodong^{1,2}

1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430049, China; 2. Key Laboratory of Geospace Environment and Geodesy, Ministry of Education, Wuhan 430079, China

Abstract: This paper begins with a brief review of the current state of development of precise point positioning (PPP) in recent years, with a focus on summarizing the latest research progress of several hotspots such as real-time rapid estimation of high-rate satellite clocks, multi-GNSS PPP ambiguity resolution, multi-frequency GNSS PPP models and ambiguity resolution, rapid initialization of PPP and PPP-RTK. Then, the evaluation of positioning performance of single/multi- GNSS PPP with latest observation of GPS, GLONASS, Galileo and BDS, especially the positioning accuracy, convergence time and time to first fix of BDS-2+3, is given. The results show that: PPP performance of BeiDou Navigation Satellite System is comparable with other GNSS. The convergence time and time to first fix of BDS-2 and BDS-3 combined PPP are about 20~30 minutes, positioning accuracy of static PPP in east, north and up directions is at millimeter to centimeter level, while that of kinematic PPP reach 5 cm in horizontal and 7 cm in elevation direction. Multi-GNSS combination can improve positioning accuracy and shorten the convergence time and time to first fix significantly, the positioning accuracy of ambiguity-fixed solutions can be improved by 14.8, 12.0 and 12.8% in the east, north and up directions compared to float solutions, respectively. The convergence time and time to first fix of multi-GNSS PPP can be reduced by 36.5 and 40.4% compared to that of GPS PPP.

Key words: precise point positioning; PPP-RTK; multi-frequency and Multi-GNSS; BDS-3; convergence time; time to first fix

Foundation support: The National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 41825009); The Foundation for Innovative Research Groups of the National Natural Science Foundation (No. 41721003); Cheung Kong Scholars Programme (2019)

摘 要: 首先简要回顾了精密单点定位(PPP)技术在最近几年的发展现状,重点总结了高采样率钟差实时快速估计、多系统组合 PPP 模糊度固定、多频 GNSS PPP 模型及其模糊度固定、PPP 快速初始化、PPP-RTK 等若干热点方向的最新研究进展。在此基础上,利用目前四大卫星导航系统(GPS、GLONASS、Galileo、北斗)最新的实际观测数据,全面比较分析了各系统及多系统组合 PPP 定位性能,重点给出了北斗二号+北斗三号 PPP 浮点解和固定解的定位精度、收敛时间和首次固定时间。结果表明:我国北斗导航卫星系统已经可以实现与其他导航卫星系统基本相当的 PPP 定位性能。北斗二号+北斗三号组合 PPP 的收敛时间/首次固定时间约 20~30 min;静态解的东、北、天方向定位精度在毫米到厘米级;动态解水平方向约 5 cm,高程方向约 7 cm;多系统组合可显著提高 PPP 定位精度、收敛时间和首次固定时间;固定解定位精度比浮点解在东、北、天方向分别提升了 14.8%、12.0%和 12.8%;相比

单 GPS,多系统组合 PPP 浮点解的收敛时间和固定解首次固定时间分别缩短了 36.5%和 40.4%。

关键词:精密单点定位(PPP);精密单点实时动态定位(PPP-RTK);多频多系统 GNSS;北斗三号;收敛时间;首次固定时间(TTFF)

中图分类号:P227

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1084-17

基金项目:国家杰出青年科学基金(41825009);创新研究群体科学基金(41721003);长江学者奖励计划(2019)

全球卫星导航系统(global navigation satellite system,GNSS)可向全球用户提供高质量的定位、导航和授时(positioning, navigation and timing,PNT)服务,已成为重要的空间信息基础设施,在国民经济建设与军事国防领域发挥着十分重要的作用,其应用仅受限于人们的想象力。卫星导航的定位精度、可靠性和时效性,直接决定了它的科学和工程应用价值。由于受到多种误差的影响,卫星导航系统自身提供的定位精度通常只有 5~10 m,无法满足高精度用户的需求。为了实现厘米级甚至毫米级的定位,大地测量学家先后提出了两种精密定位方法,一种是差分定位,另一种是精密单点定位(precise point positioning,PPP)^[1-2]。与差分定位相比,PPP 因采用非差观测模型,能同时精确估计测站绝对坐标、接收机钟差以及绝对天顶对流层延迟及其水平梯度、倾斜路径电离层延迟等参数,具有显著的优越性。因此,PPP 在 GNSS 精密定位与定轨、精密授时、大气科学、地球动力学等诸多领域具有独特的应用价值。PPP 从提出到现在的 20 余年里,先后历经了从静态到动态、从后处理到实时、从双频到单频再到多频、从 GPS 单系统到 GNSS 多系统融合、从浮点解到固定解、从 PPP 到 PPP-RTK 等发展过程(图 1),其中,最具标志性的成果就是 PPP 固定解技术的突破。PPP 为建立全球统一无缝的 GNSS 高精度定位服务模式提供了可能,已成为卫星导航定位领域的前沿热点方向。随着 PPP 技术的不断发展,国内已有不少商业机构推出了 PPP/PPP-RTK 服务,譬如:美国 NavCom 公司的 StarFire,海克斯康的 VeriPos,诺瓦泰的 TerraSTAR,荷兰辉固集团的 OminiSTAR,美国天宝的 RTX-Fast,合众思壮的中国精度,中海达的全球精度 Hi-RTP 等,国内还有数家导航企业也正在发展类似的商用系统。

笔者曾于 2017 年撰写《GNSS 精密单点定位技术及应用进展》一文^[3],梳理论述了 PPP 技术及其应用的发展现状和动态。在过去的 3 年,GPS、Galileo 和北斗卫星导航系统都有新的发展

和变化:①美国正在实行 GPS 现代化计划,已有 12 颗 GPS Block II F 卫星可以播发 L5 信号。首颗 GPS Block III 卫星已于 2018 年 12 月 23 日发射成功,新一代的 GPS 卫星可播发 4 种民用信号,包括 L2C、L5、L1C 及传统的民用信号(<https://navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>);②Galileo 系统将于 2020 年底或 2021 年初建成,截至 2020 年 6 月,Galileo 星座一共有 26 颗卫星,其中 21 颗卫星正常运行,已经基本具备独立提供全球 PNT 服务能力(<https://www.gsc-europa.eu/system-service-status/constellation-information>);③截至 2020 年 6 月,我国已发射 55 颗北斗卫星,北斗三号系统最后一颗组网卫星于 2020 年 6 月发射成功,标志我国北斗卫星导航系统即将具有全球 PNT 服务能力。北斗三号整个星座由 30 颗卫星组成,其中包括 3 颗地球静止轨道卫星(GEO),3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)和 24 颗中地球轨道卫星(MEO)组成^[4-6]。全球卫星导航系统的建设完成以及区域增强系统的发展,将给导航用户提供更加丰富的观测值、更多频率选择和更优的卫星几何构型,PPP 的定位精度、初始化时间、可用性和可靠性将持续改善。此外,低轨星座计划进入蓬勃发展时期,不久的将来,导航用户将能同时接收到 GEO、IGSO、MEO、LEO 卫星播发的导航信号,低轨卫星几何构型变化更快,有望进一步缩短 PPP 的初始化时间^[7-10]。

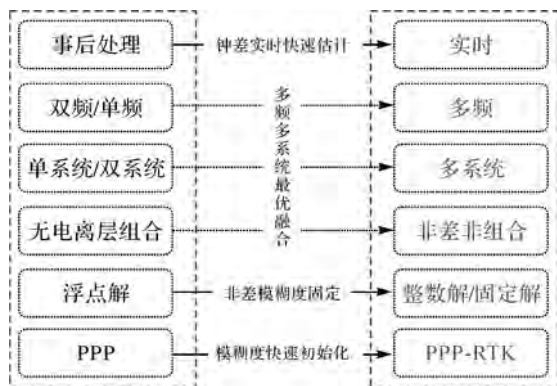


图 1 PPP 主要发展历程

Fig.1 Development of precise point positioning

鉴于 PPP/PPP-RTK 广阔的应用前景和当前卫星导航学界对其的高关注度,笔者认为有必要适时梳理总结 PPP/PPP-RTK 技术在近几年的发展动态,并结合最新的多系统多频观测资料及其精密轨道和钟差产品,对比分析多系统组合 PPP 特别是北斗二号+北斗三号 PPP 浮点解和固定解的定位精度、收敛时间、首次固定时间,为 PPP/PPP-RTK 的进一步发展提供参考。

本文将从两个方面开展论述,首先,笔者将梳理归纳国内外学者最近几年在 PPP/PPP-RTK 方向所做的代表性工作和取得的主要进展;然后将对比分析当前星座条件下单系统/多系统/北斗二号+北斗三号的 PPP 浮点解、PPP 固定解的定位精度和初始化时间等典型性能指标。需要说明的是:北斗三号系统星座刚建设完成,就目前来说,全球 IGS 跟踪站现有硬件配置条件能实际观测到的北斗三号卫星较少,IGS 各分析中心对北斗三号卫星精密轨道与钟差改正数的支持较晚,且很多 MGEX 测站能观测到的北斗三号系统信号是 B1 和 B2 频点,而现在的精密星历是采用 B1 和 B3 频点,因此还无法独立采用北斗三号进行 PPP 处理。下面,若无特别区分,北斗 PPP 定位结果为北斗二号 PPP 定位结果。

1 PPP 若干热点方向的发展动态

纵观近几年 PPP 技术的发展,关注点主要在高采样率钟差实时快速估计、多频 PPP、多系统 PPP、PPP 增强、PPP-RTK、缩短 PPP 初始化时间等方面,下面分别展开论述。

1.1 高采样率钟差实时快速估计

为了满足实时 PPP 用户对高采样率精密卫星钟差产品的需求,文献[11]提出了一种高效稳健的快速估钟算法,通过构建非差和历元差分混合钟差解算双线程算子,减少了待估参数的数量,突破了高采样率钟差计算效率的限制,实现了 GPS 精密卫星钟差的 1 s 采样率快速更新。文献[12]提出采用全参数模型(FP)和高采样率模型(HR)估计多系统卫星钟差改正数,HR 模型中使用 FP 模型估计得到的最新模糊度及其方差协方差矩阵来降低待估参数的维度,达到钟差快速估计的目的。结果表明,提出的方法能提供 1 Hz 甚至更高采样率的实时钟差改正数。文献[13]将双频非差模糊度固定方法引入到实时钟差估计中,结果表明,与 IGS 30 s 最终精密钟差产品相比,模

糊度固定的钟差估值在精度上提高了 50%~87%,在动态浮点解 PPP 验证中,使用模糊度固定的钟差产品能提升 N 方向定位精度至少 5%,在 E 和 U 方向至少提升 10%。文献[14]使用扩展卡尔曼滤波方法同时获取卫星钟差估值以及定位结果,实现实时非差 PPP,结果表明在 3 个 IGS 测站辅助下,能达到水平 2 cm、高程 5 cm 的定位精度,加入 GLONASS 观测信息能缩短收敛时间 56.9%,提高定位精度 31.8%。文献[15]提出了一种在钟差轨道改正数信息短时中断时保持实时 PPP 在 1 dm 定位精度的方法。基于 IGS RTS 产品预测轨道和钟差改正信息,对于几分钟的中断时间,采用二阶多项式和正弦项预测 IGS RTS 改正数信息;对于更长的中断,使用最近的 IGS 超快轨道。对于模型需要的参数采用滑动时间窗口进行连续估计,结果表明,在动态和静态测试中,轨道钟差信息中断 2 h 内仍能保持厘米级定位精度。文献[16]在现有的实时钟差预报模型中,提出使用 IGU 观测部分钟差的历元差分来估计线性和正弦参数的系数,常系数使用最新的 RTS 钟差改正数计算,该方法能解决实时解算初期改正数信息中断的问题,减少处理器的内存负担。

笔者认为,以当前星载原子钟的稳定度来讲,1 Hz 更新率的精密卫星钟差足够满足 PPP/PPP-RTK 的厘米级定位需要,现有的计算资源和钟差估计方法已完全能够满足 1 Hz 实时钟差估计。考虑到计算耗时和钟差播发对通信带宽的负荷等因素,实际应用中采样率未必越高越好。

1.2 PPP 模糊度固定方法和 UPD 产品

恢复非差模糊度的整数特性并将其固定成整数是实现 PPP 固定解的前提。国内外学者先后提出了 UPD 分离、相位整数钟和钟差去耦等 3 种实现 PPP 固定解的方法^[17-19]。值得注意的是,由于 UPD 方法可与各 IGS 分析中心的精密产品兼容,使用最为广泛。钟差去耦法需要估计两套钟且无公开产品可使用,使用此方法的机构较少。武汉大学测绘学院于 2015 年起向全球用户免费发布与 IGS 精密轨道和钟差兼容的 GPS 卫星端 UPD 产品,2019 年扩展至 GPS + Galileo + BDS + QZSS 四大系统并备份至 Github,用户可以通过 Github 获取对应于各分析中心的 UPD 产品^[20-21];法国 CNES 基于整数钟方法于 2015 年公开发布 GPS 宽巷 UPD 和整数钟产品,并于 2018 年年底扩展至 GPS + Galileo,用户采用

CNES发布的卫星轨道和钟差产品使用整数钟方法可实现PPP模糊度固定^[22];2019年武汉大学GNSS中心发布了相位钟差/偏差产品,用户可采用该产品与CODE分析中心的精密轨道产品搭配PRIDE-PPPAR软件使用实现GPS PPP-AR^[23]。UPD产品的发布,可以使全球精密定位用户实现PPP固定解。除使用公开发布的UPD产品外,学者们也尝试通过不同方法估计GLONASS/Galileo/BDS卫星端UPD并实现了模糊度固定^[24-30]。由于GLONASS采用频分多址的信号体制,不同卫星的观测值之间存在频间偏差的影响,文献[24]利用Trimble NetR8接收机估计了GLONASS卫星的UPD并应用于GLONASS PPP模糊度固定,结果表明相对于GLONASS浮点解的结果,2 h后,GLONASS PPP在E/N/U方向的定位精度由0.66、1.42、1.55 cm提高到0.39、0.38、1.39 cm。

PPP模糊度固定理论已经发展较为成熟,3种方法在理论本质以及定位结果上无明显差异。为了保持与IGS当前发布的轨道和钟差产品兼容,笔者认为相位整数钟法和UPD方法将是今后PPP/PPP-RTK模糊度固定的主流方法,实际上各机构发布的UPD产品也已被成功应用于科学研究和工程应用中。

1.3 多系统组合PPP模糊度固定

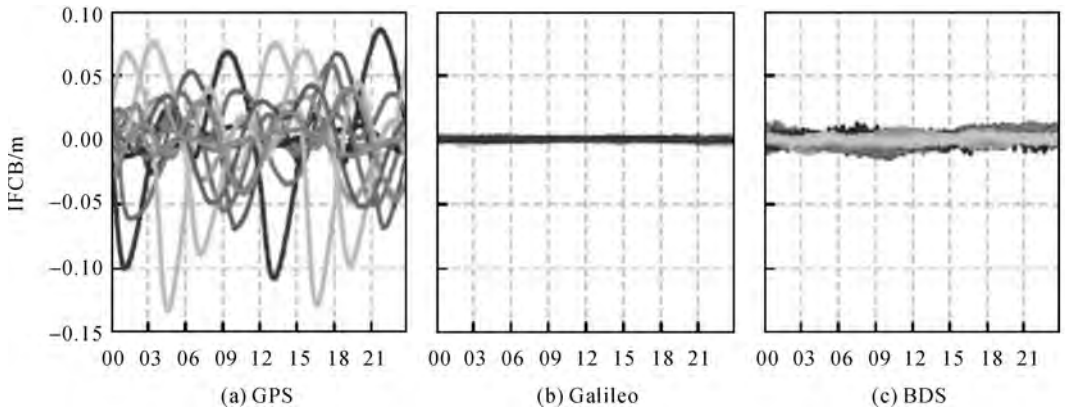
近些年来,随着北斗二号系统的建成、北斗三号完成全球组网以及Galileo系统即将建成,多系统组合PPP方兴未艾。文献[31]建立了GPS和BDS的UPD估计模型并对GPS+BDS双系统PPP固定解的结果进行了初步分析,结果表明:BDS PPP固定解的首次固定时间超过6 h,且固定成功率小于35%,GPS+BDS双系统PPP固定解的首次固定时间在静态模式下缩短到16.9 min,在动态模式下缩短到24.6 min,显著优于GPS单系统PPP固定解的初始化时间。文献[32]使用小网观测数据,将GEO卫星的轨道误差吸收进UPD估值中实现了GPS+BDS模糊度固定,结果表明加上GEO观测数据的模糊度固定率能提升18.2%。文献[27]比较了Galileo卫星与GPS、BDS卫星的UPD估值并实现了GPS+Galileo模糊度固定,结果表明,Galileo的UPD估值稳定性优于GPS和BDS,组合系统的模糊度固定解比浮点解各方向的定位精度均有所提升。文献[33]实现了GPS+GLONASS+BDS三系

统模糊度固定,结果表明,10 min观测弧段的动态PPP中,单GPS仅有16.2%的观测数据能实现固定,加上GLONASS之后提升到75.9%,三系统同时参与固定时能提升至90.0%。文献[34]使用非组合模型实现了GPS、GLONASS、BDS和Galileo四系统PPP模糊度固定,将ISB和GLONASS频间码偏差作为待估参数参与估计。结果表明,ISB在天内保持稳定,当卫星钟基准出现变化时,ISB变化较大,四系统静态定位结果能达到毫米级,动态结果达到厘米级。文献[35]通过逐历元估计GPS、BDS、GLONASS和Galileo的UPD,实现了四系统的非差模糊度固定,结果表明,四系统PPP模糊度首次固定时间约为9.21 min,相比于单系统和双系统有明显提升,对于观测时长为10 min的弧段,四系统PPP固定解定位精度比GPS单系统在E、N、U方向分别提升了18.2%、13.9%和84.2%。

笔者看来,多系统组合PPP模糊度固定方面的研究更多侧重于加入更多星座的观测数据对PPP模糊度固定性能带来的增益,就其方法来讲与单系统PPP并无本质差异。当然利用多系统进行PPP模糊度固定时,需要处理好系统间的各种偏差。

1.4 多频GNSS PPP模型及其模糊度固定

多频PPP首先要解决频间钟偏差(inter-frequency clock bias,IFCB)的问题。文献[36]指出,GPS卫星的IFCB大于1 dm,因此目前IGS分析中心基于L1/L2生成的精密钟差产品不能被用于L1/L5 PPP中。文献[37]提出了一种能够同时兼容各种三频PPP模型的IFCB估计方法,推导了L1/L5 IF PIFCB、L1/L2/L5 IF PIFCB和L5 UC PIFCB间的数学转换公式,因此用户可根据一组IGS双频无电离层组合卫星钟差、一组PIFCB估值和DCB产品就可实现所有GPS三频PPP模型。为了更系统地认识PIFCB的特性,文献[38]对一整年的GPS单日PIFCB估值时间序列进行谐波分析,建立了由1个线性函数和1个六阶谐波函数组成的GPS PIFCB模型,将该模型应用到GPS实时三频PPP解算中,定位精度改善9%~24%。文献[39]通过研究发现,GPS IFCB的振幅达到1~2 dm,BDS卫星的IFCB振幅约为2~3 cm,Galileo卫星的IFCB最小,小于1 cm。图2代表性的给出了GPS、Galileo和BDS各卫星的IFCB估值。

图2 GPS、Galileo 和 BDS 各卫星的 IFCB 估值^[39]Fig.2 IFCB estimates of GPS/Galileo/BDS satellites^[39]

在多频 PPP 模型研究方面,文献[40]从函数和随机模型两方面对比了三频 PPP 定位中两类常用的无电离层组合和一组原始观测值 PPP 模型,其结果表明在动态观测条件较弱的情况下,加入第三频观测值可有效改善定位性能。文献[41]研究了 9 种不同的三频 GPS 线性组合 PPP 模型,结果表明,三频 PPP 相对于双频 PPP 在收敛时间和定位精度方面的改善约 10%。文献[42]评估了不同的多频多系统 PPP 定位模型,结果表明,三频 PPP 的定位收敛时间略短于双频 PPP,当引入外部电离层约束时,GPS + BDS + GLONASS + Galileo + QZSS 五系统非组合 PPP 的收敛时间相比双频组合能缩短 19.0%。

在多频 PPP 模糊度固定方法研究方面,文献[43]基于非差非组合模型估计了 BDS 三频数据原始频率的 UPD 并实现多频 PPP 模糊度固定,结果表明三频固定解相比于双频固定解不仅能改善定位精度,也能在一定程度上缩短收敛时间。文献[44]估计了 BDS 和 Galileo 三频 UPD,发现超宽巷和宽巷 UPD 在一月内保持稳定,窄巷 UPD 在天内保持稳定。BDS + Galileo 三频模糊度固定结果表明,动态和静态定位中,固定解比浮点解的定位精度提升了 30%~70%,并且三频固定解相对于双频固定解能有效缩短模糊度首次固定时间约 14.7%。文献[45]估计了系统间相位偏差和卫星 FCB,构建了 GPS/BDS/Galileo/QZSS 三频观测值的紧组合模型,仅用单历元观测值实现了超宽巷和宽巷模糊度的固定,实现了单历元分米级定位。文献[46]研究了顾及到天线相位中心改正的 3 种不同频率组合的 Galileo 三频 PPP 的性能,结果表明在使用 Galileo 天线相位中心改

正数后,E1/E5a/E5b、E1/E5a/E6 和 E1/E5a/E6 3 种组合形式的三频 PPP 模糊度固定比双频收敛时间分别缩短 16.2%、30.3%和 17.7%。文献[47]研究了 Galileo 三频/四频/五频的不同组合模糊度固定,发现 E5a/E5b、E5a/E5 和 E5/E5b 超宽巷 UPD 估值接近 0,使用估计得到的 UPD 产品实现模糊度固定,结果表明,5 种类型的三频组合中,E1/E5/E6 三频 PPP AR 的性能最好,平均收敛时间为 16.9 min,四频和五频 PPP AR 的平均收敛时间分别为 15.3 min 和 15.0 min。多频观测值对窄巷模糊度的首次固定时间的缩短不明显,但超宽巷和宽巷模糊度能瞬间固定,首个历元即能达分米级定位精度。文献[39]顾及到 GPS、Galileo 和 BDS 的 IFCB 特性,估计了三频原始频率 UPD,实现了 GPS + Galileo + BDS 三频非差非组合模糊度固定,结果表明三频 GNSS PPP 模糊度固定解相对于双频模糊度固定解能有效提升定位精度,并使收敛时间缩短 15.6%。图 3 代表性给出了 GPS、Galileo 和 BDS 各卫星的超宽巷、宽巷和窄巷 UPD 估值时间序列图,图 4 代表性给出了 GPS 双频/三频和 GPS、Galileo 和 BDS 双频/三频动态 PPP 固定解定位误差序列图。

综上所述,多频 PPP 的研究主要围绕不同频率观测值的组合形式、多频 PPP 模型的性能评估、频率间偏差分析以及多频 PPP 模糊度固定等问题展开。从目前的研究结果来看,多频观测值的引入对超宽巷和宽巷模糊度的快速固定有显著贡献,使用少数几个历元甚至单历元观测就可以实现分米级精度的 PPP 定位,但如何缩短窄巷模糊度的固定时间仍没有很好解决。

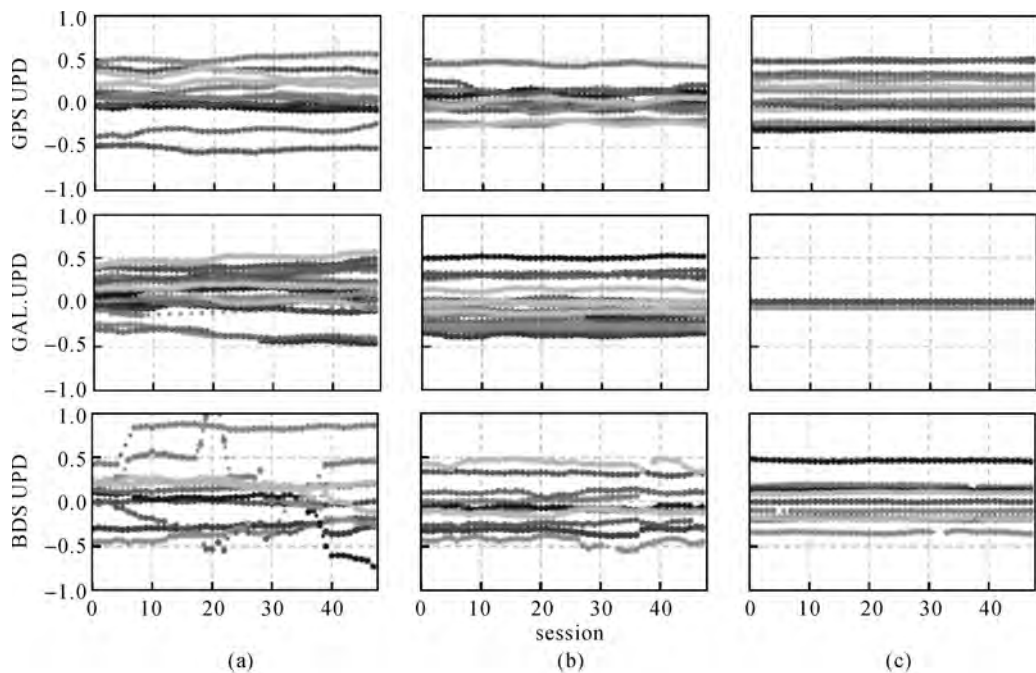


图 3 GPS、Galileo 和 BDS 各卫星的窄巷、宽巷和超宽巷 UPD 估值时间序列^[39]
 Fig.3 Time series of UPDs of GPS, Galileo and BDS satellites^[39]

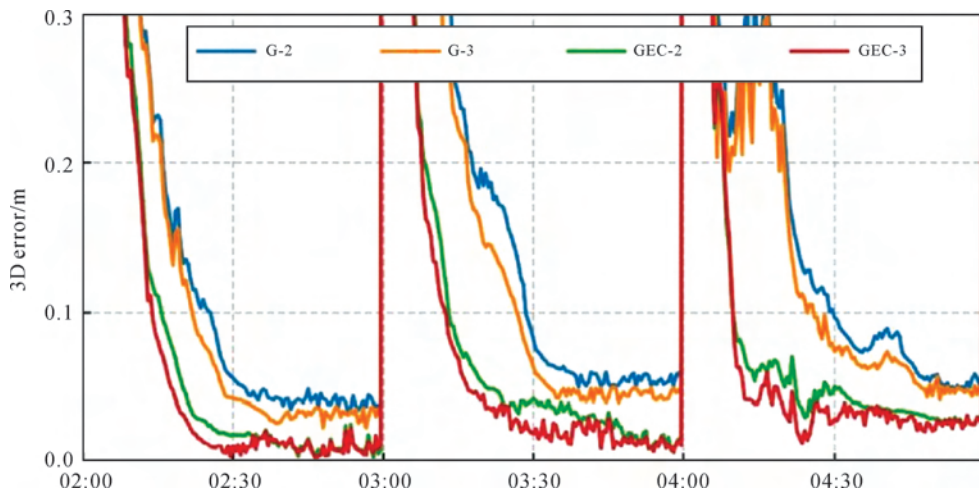


图 4 GPS 双频/三频和 GEC 双频/三频动态 PPP 固定解定位误差序列^[39]
 Fig.4 Positioning errors of G/GEC dual-/triple-frequency kinematic PPP ambiguity resolution^[39]

1.5 缩短 PPP 初始化时间

初始化时间较长一直是制约 PPP 应用的一个瓶颈。从前文的分析可以看出,多 GNSS 系统组合、多频观测值的加入都能在一定程度上改善初始化时间^[48-49]。从已有的研究结果来看,即使采用四系统,模糊度的首次固定时间仍然需要 10~15 min 左右^[34-35,50-51]。除了使用 GNSS 观测值本身之外,已有诸多学者采用先验大气约束加快 PPP 初始化时间,结果表明,在外部信息辅助下,可显著缩短 PPP 初始化时间^[52-53]。文献[54]利用高分辨率的数值天气预报模型 WRF 和近实

时 GNSS 观测数据获得高精度对流层延迟,同时将其约束到实时 PPP 数据处理中,并与其他两种常用的对流层经验模型 UNB 3 m 和 VMF1-FC 约束的实时 PPP 定位结果进行相比,其定位精度和收敛速度均得到改善。文献[55]在非组合 PPP 中使用电离层约束和对接收机端 DCB 的建模分析了缩短收敛时间的效果,结果表明当使用 GIM 和区域电离层模型约束时,首个历元的定位精度分别能达到 0.4 m 和 0.2 m,在 68% 的置信水平下,水平方向收敛到 1 dm 所用的时间能缩短至 7.5 min。文献[56]提出在估计卫星钟差、电离层

斜延迟和卫星端 FCB 之后改正到用户端,使用部分模糊度固定技术同时对 GLONASS 和 GPS 的模糊度进行固定,结果表明,仅使用 GPS 观测值时初始化阶段需要 25 min,当双系统模糊度同时固定时,初始化时间缩短到 6 min 左右。文献[57]提出了估计系统间相位偏差(ISPB)并实现 GPS/BDS 系统间模糊度固定的方法,相比于传统的系统内固定,多了一个模糊度参数可用于部分模糊度固定的搜索。小时弧段解的动态 PPP 结果表明,使用系统间模糊度固定时,平均初始化时间能缩短约 10%。

近年来,随着低轨导航增强概念的提出,不少学者通过模拟仿真验证了加入低轨导航卫星后,可以显著改善 PPP 的收敛时间。文献[8]初步评估了低轨卫星增强 PPP,仿真结果表明加入低轨卫星观测之后,PPP 收敛时间能缩短到 5 min 以内;文献[9]基于精细仿真的观测值,评估不同低轨星座增强 GNSS PPP 双频浮点解性能,结果表明,PPP 收敛时间可由单系统的 30 min 显著缩短至数分钟甚至 1 min 以内,且收敛速度增强效果主要取决于可见低轨卫星数,通过加入包含 60、96、192 和 288 颗星的低轨星座增强 Multi-GNSS PPP,中纬度 NNOR 站上分别可见 2.4、3.1、6.3 和 9.5 颗低轨卫星,收敛时间由 9.6 min 缩短至 7.0、3.2、2.1 和 1.3 min,如图 5 所示。但目前对低轨卫星增强 PPP 的研究仅处于仿真阶段,尚缺乏对于真实数据的定位结果。

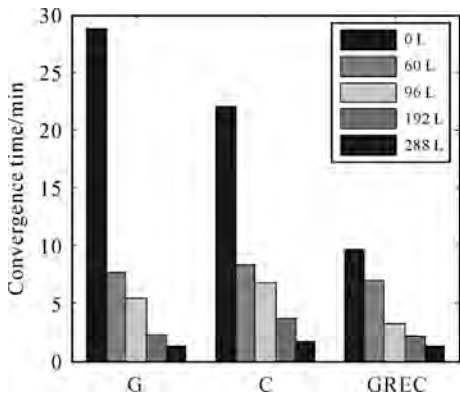


图 5 不同低轨卫星数量对 PPP 收敛时间的影响^[9]

Fig. 5 The convergence time of PPP with different amount of LEO satellites^[9]

综上所述,多频多系统观测值可在一定程度上缩短 PPP 初始化时间,但仍无法满足实际应用中对于快速初始化的要求;先验大气约束对初始化时间的缩短效果主要取决于大气建模的精度,

精度越高越有利于实现快速初始化;低轨卫星观测值加速 PPP 收敛目前仅处于仿真阶段,在实际应用中,低轨卫星的观测值数量和质量可能无法达到与仿真观测值一样的效果,今后仍需采用实测数据进行验证。

1.6 PPP 快速重新初始化

由于卫星信号易受遮挡影响,观测数据不可避免会出现中断现象,中断之后各参数重新初始化,通常需要和首次开机初始化一样的时间,严重制约了 PPP 在实际工程中的应用。因此,有学者针对信号中断后的快速重新初始化技术进行了研究。文献[58]提出利用无几何距离组合观测值实时修复非差周跳,使失锁前后的模糊度参数连接起来,达到快速重新初始化目的。文献[59—60]利用信号中断前后大气延迟信息连接中断观测值,在短时中断时能够实现快速重新初始化。文献[61]提出了一种基于卡尔曼滤波的非差周跳估计方法,在非差非组合模型中同时估计周跳和其余待估参数,引入 LAMBDA 方法和部分模糊度固定概念搜索最佳整数值周跳,结果表明,该方法平均需要 1.5~2.5 历元实现周跳修复,从而达到快速重新初始化,如图 6 所示。除了利用 GNSS 本身的观测信息之外,文献[62]提出了惯性辅助 PPP 模糊度固定的方法,利用 SINS 在短时间内递推的高精度位置信息,改善浮点模糊度的解算精度,加快 PPP 模糊度固定,该方法将复杂环境下的 PPP 模糊度固定率,从 22.4% 提升到 80.3%,卫星信号中断 10 s 内能够实现快速重新初始化和模糊度快速重新固定。

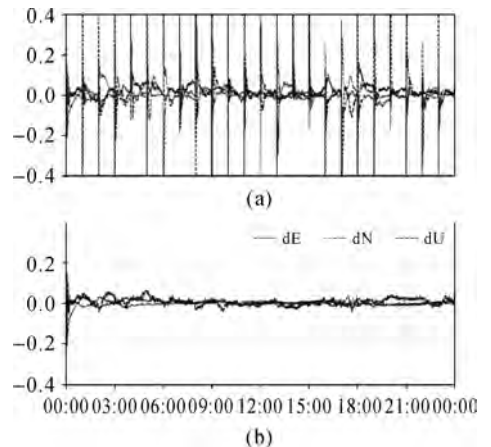


图 6 周跳修复前(a)和后(b)的 PPP 定位误差^[62]

Fig. 6 Positioning errors of PPP with (a) and without (b) cycle slip repair^[62]

PPP快速重新初始化主要是解决信号短期中断引起的模糊度参数重置造成的定位重新收敛问题。目前的方法主要是转化成周跳的在线实时探测与修复,使模糊度参数能正确传递,但这些方法主要取决于信号中断的时间和大气时变状态,通常要求信号中断前后历元的电离层变化不能太大,当信号长期中断时,这些方法的可靠性和可行性将大大降低。

1.7 精密单点实时动态定位(PPP-RTK)

文献[52]首次提出了PPP-RTK的概念。但关于PPP-RTK的概念其实学术界还存在些争议,笔者认为PPP-RTK应该具有3个基本特征:采用PPP定位模型、实时定位,能快速固定模糊度。鉴于此,本文把PPP-RTK单列一节进行讨论。

从前面的分析可以看出,如何实现PPP模糊度的快速(或瞬时)固定是PPP-RTK的核心。文献[63]借鉴网络RTK误差处理的思想,提出充分利用已经建立起来的密集基准站网设施,逐站进行精密单点定位整数解,逐站提取精密大气延迟信息,并进行空域和时域建模,将这些增强的改正信息播发给用户使用,解决了非差模糊度的快速固定难题,实现了PPP-RTK定位原型系统。其实现方案如图7所示。已有或正在发展的一些商业PPP-RTK系统大都采用该方案。

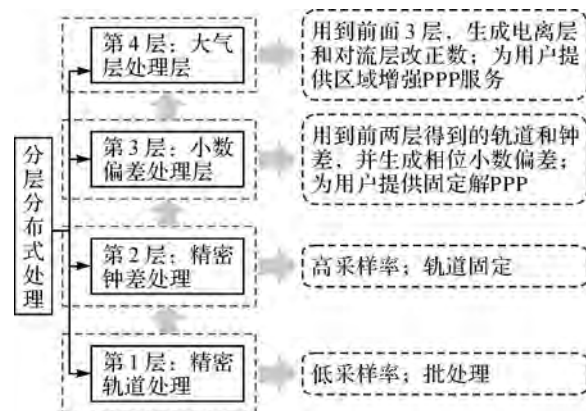


图7 PPP-RTK实现方案

Fig.7 Implementation scheme of PPP-RTK

文献[64]分别采用法国密集参考网和稀疏参考网数据构建对流层延迟模型,为PPP的对流层参数提供先验约束,试验结果表明,两种模型的实时PPP定位收敛后精度没有显著改善,但是收敛速度得到提高。文献[65]研究了现有3种非差非组合PPP-RTK网络模型,并利用中国陆态网实测数据给出了最适合实时播发卫星相位小数偏差

的线性组合,同时评估了PPP-RTK定位性能。文献[66]为了提高区域参考网实时改正数的计算效率,提出了基于多核并行计算技术的相位小数偏差、天顶对流层延迟等各项误差改正数的计算方法,利用香港CORS和美国西南部CORS网数据研究表明,双核、四核、八核、十六核平台并行实现相位小数偏差估计和对流层建模的处理速度可比单核串行处理速提高1.79倍、3.15倍、5.59倍和9.69倍。文献[67]利用CORS网观测数据评估了BDS-2+3/GPS的PPP-RTK定位性能,结果表明,利用区域参数获得的高精度大气模型,可以在1.5和1.6个历元实现单GPS和单BDS-2+3 PPP-RTK定位,其定位精度可收敛至水平毫米级到厘米级、高程厘米级,如图8所示。

文献[68]研究了多系统PPP-RTK定位性能,利用Curtin大学的PPP-RTK数据处理平台及多系统GNSS观测数据,数据集包含了高质量的大地型接收机和低成本单频接收机,其基准站网包含大网(覆盖澳大利亚)和小网(站间距小于30 km)两种,试验结果表明:利用大网多系统GNSS基准站数据可在15 min实现多系统GNSS PPP-RTK收敛,相比浮点解PPP收敛速度缩短了30 min;基于小网将用户站与基站数据同时解算时,可实现2 min内收敛。文献[69]提出了一种基于B-splines函数的4D电离层层析模型,并用于PPP-RTK用户的电离层延迟改正,可使其初始化时间缩短至20个历元(采样率为30 s)以内。鉴于近年来5G技术的快速发展以及其超低延迟和超大数据传输容量等特点,文献[70]设计了一种新的5G辅助GNSS PPP-RTK系统,该系统可以满足PPP-RTK精密定位中大量高精度大气误差改正数以及其他改正数的快速传输需求,相比已有网络RTK系统,该系统可将卫星钟差、轨道、码偏差、相位偏差以及对流层电离层改正数等播发间隔由5~30 s提高至1 s,其定位精度也可由数厘米提高至1 cm,收敛时间从1 min缩短至2.8 s。

目前,全球PPP-RTK技术仍处于开发和早期应用阶段,在理论方法方面,学术界已提出的多种不同新概念新方法,其理论和结果表现基本等价,但是在工程应用中其差异尚需更多比较分析。PPP-RTK性能优劣与服务端提供的数据量和数据采样率密切相关,如何平衡数据传输量、采样率与带宽的关系是目前仍需要关注的问题。其次,

已有全球/区域电离层模型对 PPP-RTK 性能提升的幅度较为有限,笔者团队初步研究结果表明基于参考网的电离层斜延迟产品能显著提高 PPP-RTK 性能,但是其播发数据量较大。因此,如何构建高精度的大气模型并确定其播发方式是目前 PPP-RTK 应用实践需要解决的重要问题之

一。最后,在 PPP-RTK 定位中,大气误差的初始方差确定是影响 PPP-RTK 快速收敛的关键,现有大气模型/产品提供的精度指标较多是计算过程的内符合精度,而且存在虚高现象,如何准确确定该参数在观测方程中的方差值有待深入研究。

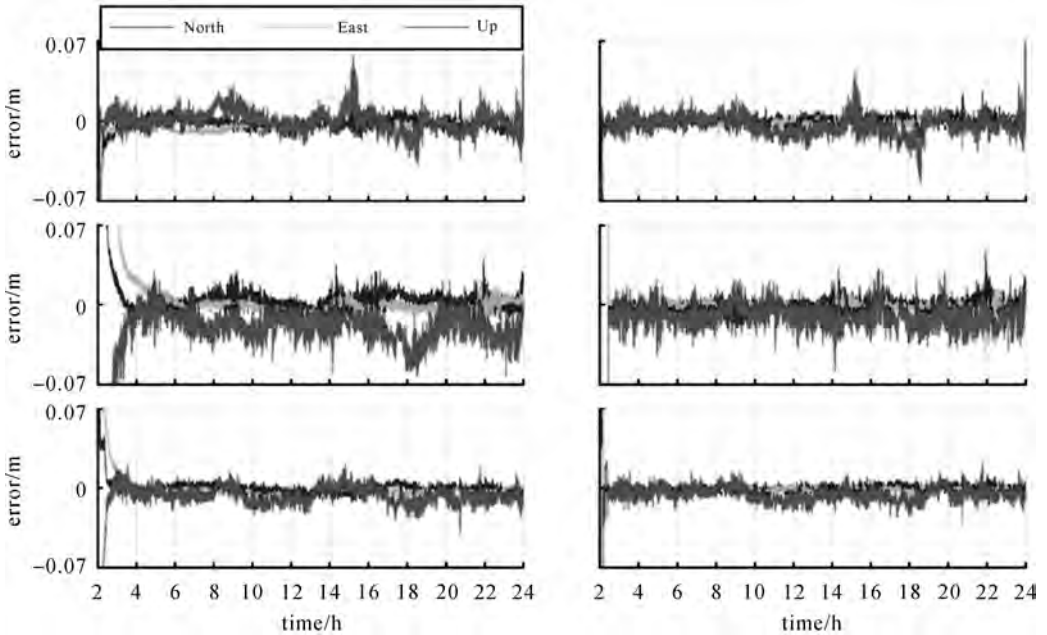


图8 单 GPS(上)、单 BDS-2+3(中)和 GPS+BDS-2+3(下)的 PPP 浮点解(左)和 PPP-RTK 固定解(右)定位精度^[67]
Fig.8 Positioning error of GPS (top) /BDS23 (middle) /GPS+BDS23 (bottom) PPP float solutions (left) and PPP-RTK ambiguity resolution (right)^[67]

2 北斗/GNSS PPP 浮点解及固定解结果与分析

本文选取了 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 1 月 7 日全球分布(图 9)的 53 个测站的观测数据进行了单系统和多系统,静态和动态,浮点解和固定解的双频 PPP 定位,评估当前 GNSS 单系统和多系统 PPP 的静态和动态定位性能(静态模拟动态)。由于目前各分析中心生成精密卫星轨道和钟差产品时,对于北斗三号系统使用的频率为 B1 和 B3,而目前仅有极少数 MGEX 测站支持北斗三号系统的观测,且观测频率多为 B1 和 B2,因此本文选取的测站中包含 21 个 iGMAS 测站以更好评估北斗系统的精密单点定位性能。

本文在 PPP 固定解解算时,采用的相位小数偏差产品为武汉大学测绘学院发布的 FCB 产品,固定模式为“fix and hold”,ratio 值设为 3.0,截止高度角为 7°。通过本文的数据解算发现,对于北

斗三号系统,虽然已经完成了全球组网,但 IGS 分析中心提供的精密星历最多只支持到 C37,因此较多用于定位实验的测站个别时段只有 4 颗甚至更少的北斗三号可用卫星且可用卫星几何分布不理想,导致某些历元没有定位结果输出,出现重新初始化现象。因此在本文中未给出单北斗三号系统的定位误差图及固定解结果。此外,在本文的数据统计中,对定位性能指标作如下定义:静态解的定位精度为当天收敛到最后一个历元的定位精度,动态解的定位精度为收敛后的各历元定位精度的平均值,参考已知坐标来自 SNX 周解文件,若周解文件中无参考坐标,则取对应测站 7 天 PPP 解算的四系统静态定位结果的平均值;收敛时间为三维方向定位误差小于 1 dm 并保持至少十个历元所需要的时间;首次固定时间为模糊度首次正确固定且固定解精度优于浮点解精度所需要的时间。

2.1 静态定位

在静态 PPP 浮点解和固定解试验中,本节给出了单个测站的单天解结果,并从定位精度,收敛时间和首次固定时间等方面评估了静态 PPP 浮点解和固定解性能。图 10 代表性的给出了测站 MRO1 在 2020 年 1 月 7 日 GPS、Galileo、GLONASS、BDS-2、BDS-2+3 以及以上系统组合的静态 PPP 浮点解和固定解结果和各系统在可解时段的可见卫星数量的单天时间序列图。需要说明的是,因 GLONASS 采用频分多址技术,笔者当前还没有发布 GLONASS 的相位小数偏差,因此文中只给出了 GLONASS PPP 浮点解结果,且在多系统组合模糊度固定时,GLONASS 仅作为辅助观测信息,但 GLONASS 的模糊度没有进行固定。当然,

如前文所述,已有学者开展过 GLONASS PPP 模糊度固定的研究。

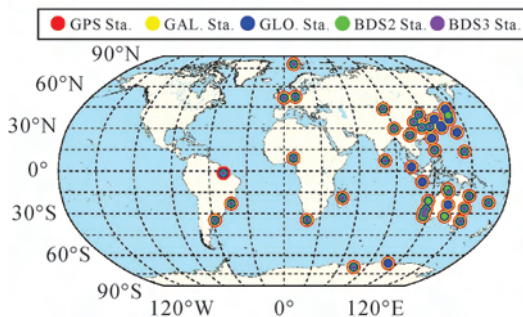


图 9 本文用于 PPP 解算的测站分布
Fig.9 Distribution of MGEX and iGMAS stations used for PPP solutions

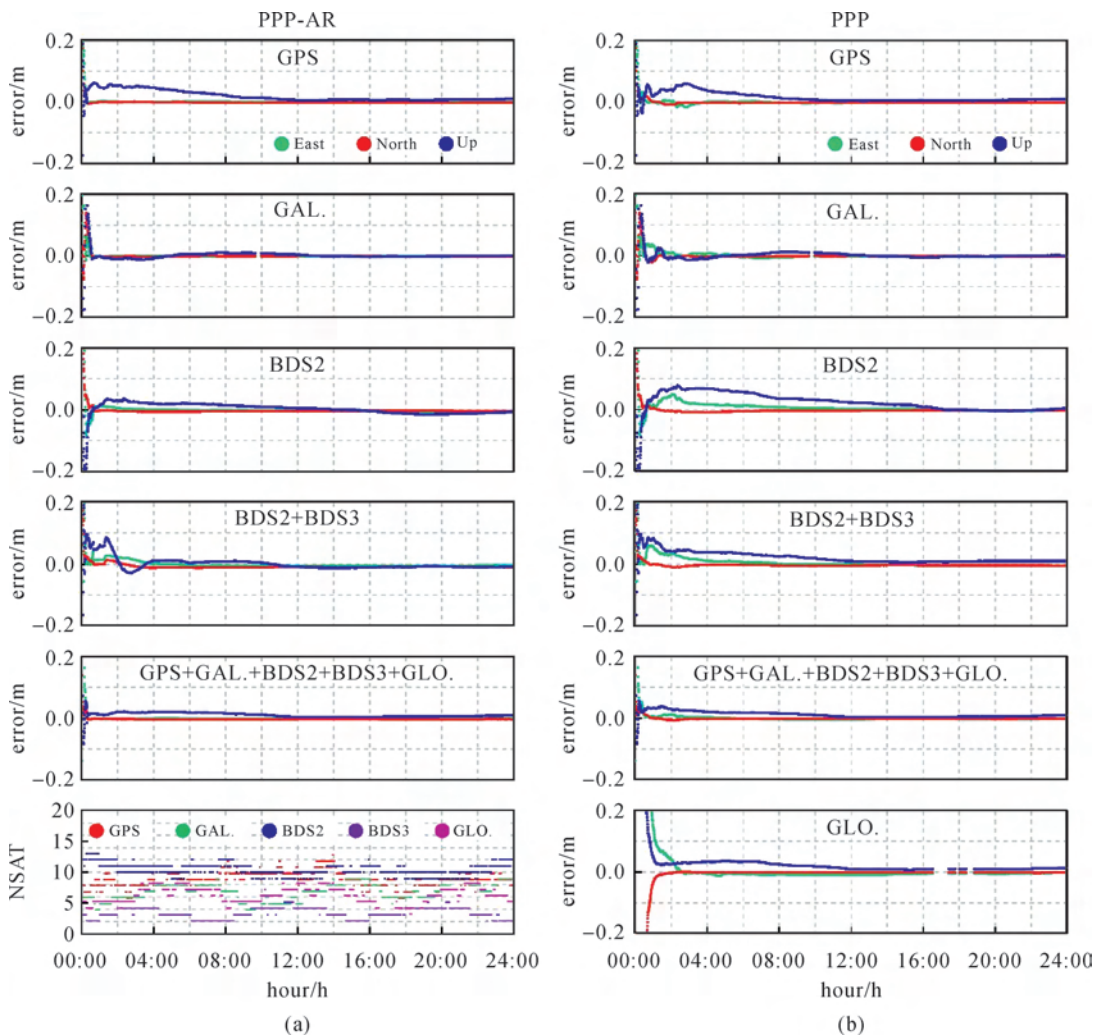


图 10 2020 年 1 月 7 日 MRO1 测站静态 PPP 固定解结果(a)及浮点解结果(b)

Fig.10 Static PPP ambiguity resolution (a) and float solution (b) at station MRO1 on DOY 007, 2020

从图 10 中可看出,对于当天的 MRO1 测站,能观测到的 GPS、Galileo、BDS2、BDS3 和

GLONASS 的平均卫星数分别为 9.0、7.0、10.5、3.2、6.2 颗。由于该测站在当天 10:00 左右仅能

观测到 3~4 颗 Galileo 卫星,在 17:00—18:30 UTC 之间观测的 GLONASS 卫星数也不足以进行 PPP 解算,因此上述弧段某些历元缺失定位结果。需要说明的是:静态 PPP 中信号中断之后的历元沿用中断前的位置参数,因此当卫星数足以重新进行 PPP 解算时,位置的先验精度已经很高,所以静态 PPP 中没有典型的参数重新初始化导致的重新收敛现象。从定位性能来看,各系统固定解结果相对于浮点解在首次固定后各方向定位精度均有明显的提升,GLONASS 和 BDS 的收敛时间略长于 GPS 和 Galileo,多系统组合 PPP 的收敛速度最快。这是由于虽然 BDS 可观测卫星数多,但是有 5 颗为 GEO 卫星,对收敛的贡献较小,GLONASS 卫星在初始历元观测值较少,仅有 4~5 颗,所以收敛较慢。

由于单独选取的测站不能同时使所有卫星系统的观测卫星数和观测条件达到最优,所以该测站的结果不能代表各卫星系统所能达到的平均水平。因此,图 11 和表 1 给出了使用 53 个测站进行 PPP 的统计结果,为了表述方便,下文中分别用字母 G、R、E、C 代替 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS。由于 MGEX 测站的北斗三号系统卫星观测条件不佳,所以在分析北斗系统的定位性能

时,主要采用 iGMAS 测站的结果。由统计结果可看出,多系统组合 PPP 浮点解的收敛时间和固定解的首次固定时间相比单系统明显缩短,多系统组合 PPP 浮点解收敛时间和固定解首次固定时间分别为:13.6 min 和 14.9 min。G/R/E/C 单系统 PPP 静态解,收敛后的定位精度基本处于相当水平,GPS 和 Galileo 略优于 GLONASS 和北斗,多系统组合 PPP 的定位精度优于单系统 PPP 定位精度。

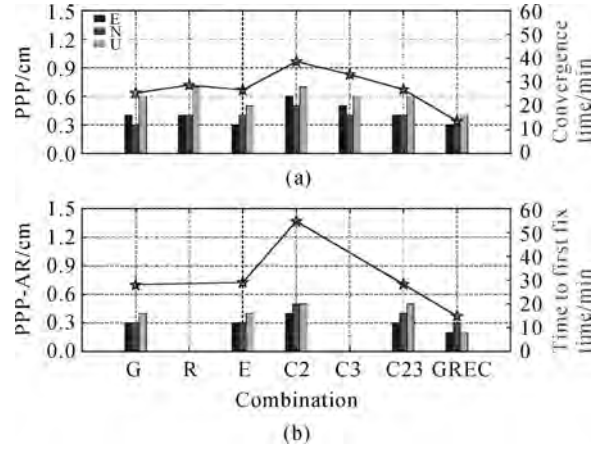


图 11 静态 PPP 的浮点解(a)与固定解(b)统计精度
Fig.11 Results of static PPP ambiguity resolution and float solution

表 1 2020 年 1 月 1 日—2020 年 1 月 7 日 53 个测站静态 PPP 统计结果

Tab.1 Statistical results of static PPP for 53 stations from DOY 001 to 007, 2020

	浮点解定位误差/cm			固定解定位误差/cm			收敛时间 /min	首次固定时间 /min
	东	北	高	东	北	高		
G	0.4	0.3	0.6	0.3	0.3	0.4	25.4	27.9
R	0.4	0.4	0.7	—	—	—	28.8	—
E	0.3	0.4	0.5	0.3	0.3	0.4	26.7	29.0
C2	0.6	0.5	0.7	0.4	0.5	0.5	38.6	54.7
C3	0.5	0.4	0.6	—	—	—	33.2	—
C23	0.4	0.4	0.6	0.3	0.4	0.5	26.9	28.3
GREC	0.3	0.3	0.4	0.2	0.3	0.2	13.6	14.9

2.2 模拟动态定位

本文使用 MGEX 和 iGMAS 测站静态数据模拟动态定位,接收机坐标变化谱密度设置为 $10^4 \text{ m}^2/\text{s}$ 。需要注意的是,在真实动态环境中,每一个测站的多路径变化以及观测环境都不同,用户需要根据不同观测环境和观测质量调整模糊度固定中不同参数的阈值。图 12 代表性给出了测站 MRO1 在 2020 年 1 月 7 日 GPS、Galileo、GLONASS、BDS-2、BDS-2+3 以及多系统组合的动态 PPP 浮点解和固定解结果和各系统在可解

弧段的可见卫星数量。从图 12 中可看出,动态 PPP 固定解的定位结果比浮点解更稳定,在 2.1 节指出的卫星数不足的时刻, Galileo 和 GLONASS 在定位解算时各参数重新初始化。四系统组合 PPP 定位性能仍然明显优于单系统,定位偏差波动减小,定位精度显著提高,当模糊度被正确固定和传递时,PPP 的定位精度能得到有效提高。当天 GLONASS 动态 PPP 浮点解定位性能较差,图 13 给出了 GLONASS 单天 DOP 值时间序列图以及 3 个典型弧段的测站上空卫星弧

段天空图,从图 13 中可看出,在初始历元及 17:00—19:00 之间,DOP 值较大,说明卫星分布不佳,几何构型不好导致定位结果出现较大偏差。由天空图可看出,在定位偏差较大的弧段,卫星基

本分布在测站的单侧或近似处于一条直线,导致解算时可靠度不高,同时也使初始历元的收敛时间偏长。

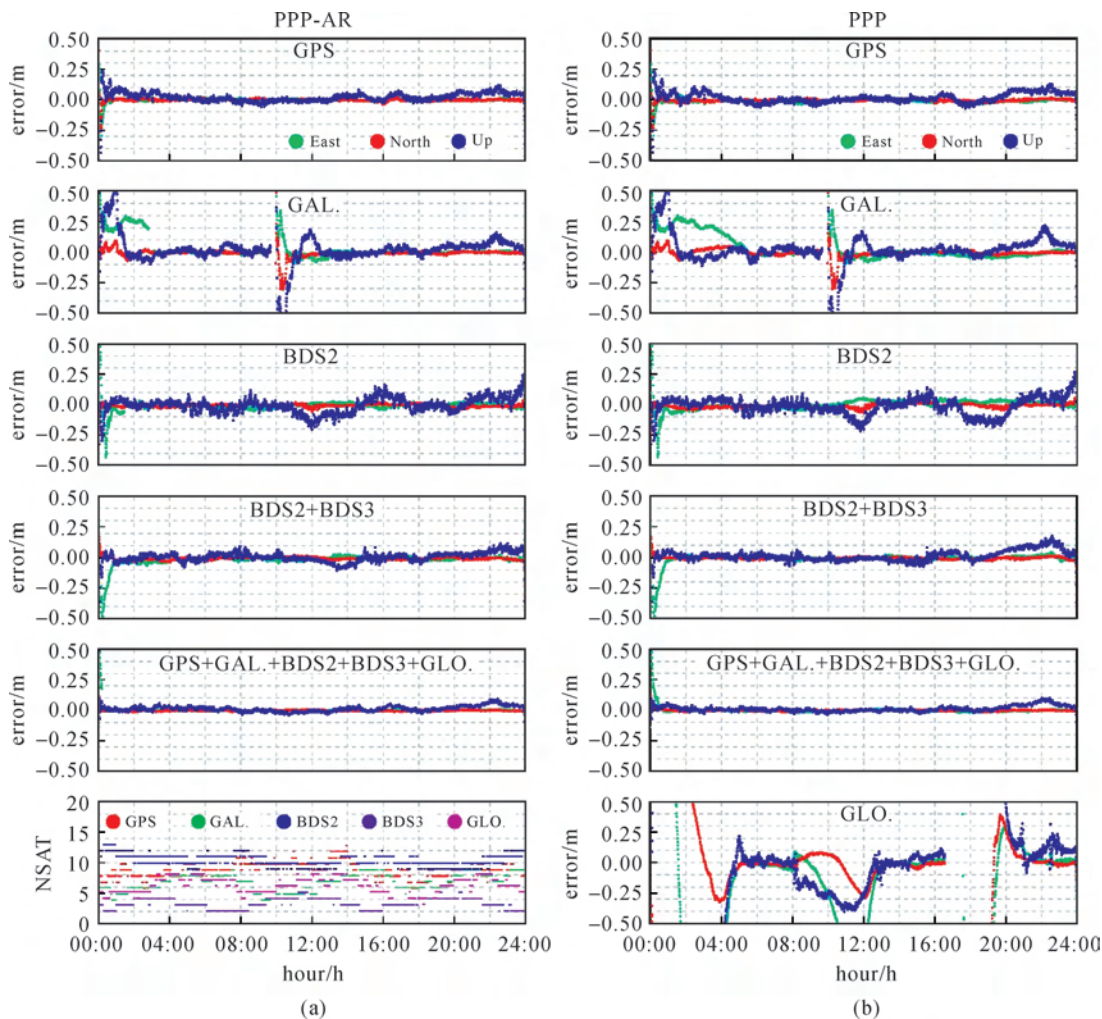


图 12 2020 年 1 月 7 日 MRO1 测站动态 PPP 固定解结果(a)及浮点解结果(b)

Fig.12 Kinematic PPP ambiguity resolution (a) and float solution (b) at station MRO1 on DOY 007, 2020

表 2 和图 14 给出了 53 个测站一周动态 PPP 的统计结果。从表 2 中可看出,动态 PPP 的收敛时间和模糊度首次固定时间均要长于相同条件下的静态 PPP 结果。多系统组合浮点解的定位精度比单 GPS 浮点解定位精度在水平和高程方向分别提高了 18.7%和 30.4%。当模糊度被正确固定后,固定解的定位精度明显优于浮点解,多系统组合固定解定位精度比浮点解在东、北、天方向分别提升了 14.8%、12.0%和 12.8%。多系统组合浮点解的收敛时间和固定解的模糊度首次固定时间均要优于单系统,相比于 GPS 分别缩短了 36.5%和 40.4%,具有较

明显的提升。对于各单系统而言,GPS 的动态 PPP 定位性能相对最优。

3 结论与展望

本文首先回顾了 PPP 的主要发展历程和 PPP 若干热点研究点的最新进展,然后,利用最新多系统 GNSS 实测数据分析和讨论了 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 的 PPP 定位性能,并重点对我国北斗系统(BDS-2/-3)PPP 定位浮点解、固定解的定位精度、收敛时间和首次固定时间进行了分析。

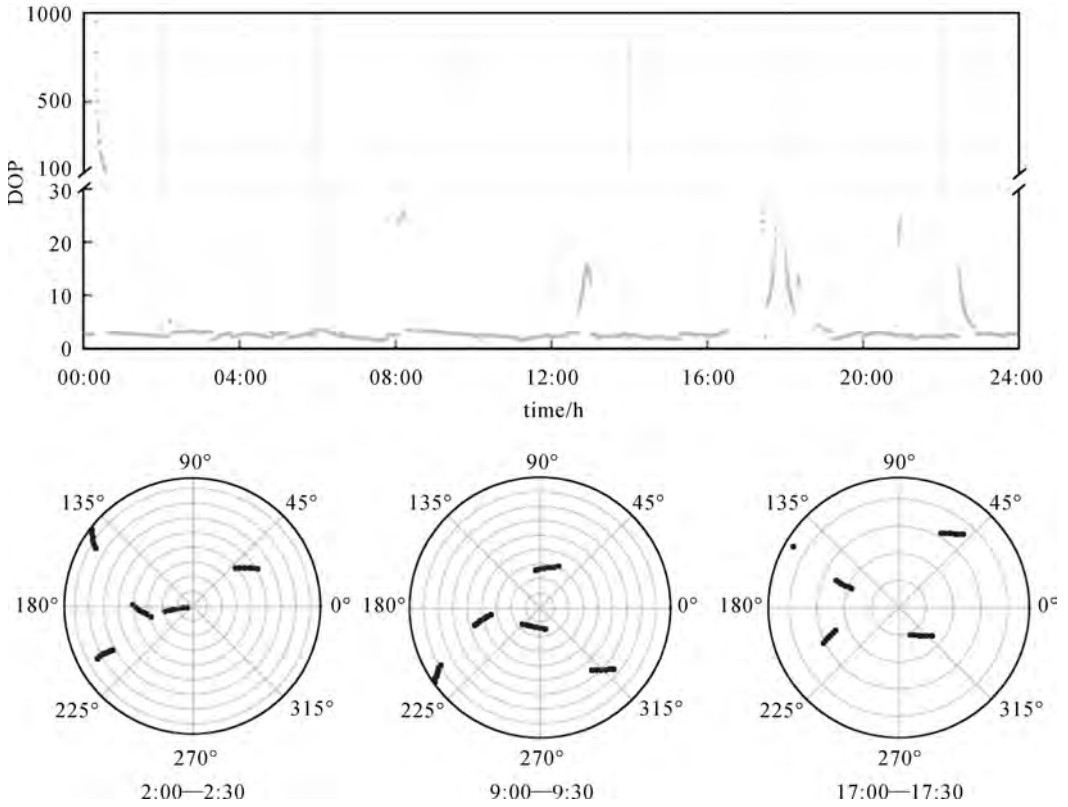


图 13 2020 年 1 月 7 日 MRO1 测站观测到 GLONASS 卫星 DOP 值及卫星弧段天空
Fig.13 DOP series and skyplot of GLONASS satellites at station MRO1 on DOY 007,2020

表 2 2020 年 1 月 1 日—2020 年 1 月 7 日 53 个测站动态 PPP 统计结果

Tab.2 Statistical results of kinematic PPP for 53 stations from DOY 001 to 007,2020

	浮点解定位误差/cm			固定解定位误差/cm			收敛时间 /min	首次固定时间 /min
	东	北	高	东	北	高		
G	3.3	3.1	5.6	3.0	3.1	5.3	30.7	36.4
R	4.8	3.7	8.2	—	—	—	39.8	—
E	3.9	3.7	6.8	3.2	3.5	6.4	34.9	39.6
C2	6.9	5.7	10.3	5.9	5.2	9.5	51.2	60.9
C23	4.2	4.0	7.7	3.4	3.6	6.5	33.5	39.0
GREC	2.7	2.5	3.9	2.3	2.2	3.4	19.5	21.7

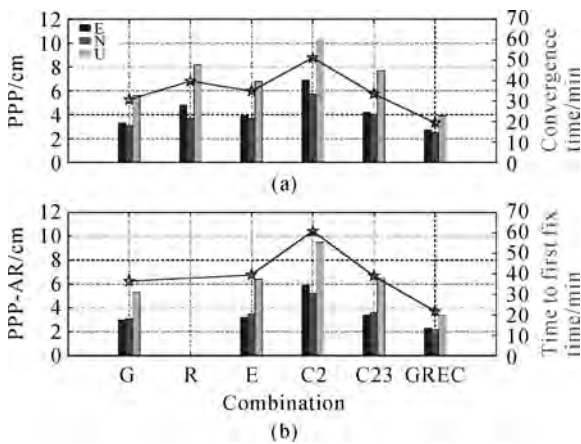


图 14 动态 PPP 的浮点解(a)与固定解(b)统计精度
Fig.14 Results of kinematic PPP with ambiguity-fixing solution and float solution

在定位精度方面,四大导航系统的静态 PPP 无论浮点解还是固定解在收敛后定位精度基本相当,其精度均可达 1 cm 甚至毫米级,当多系统 GNSS 融合后,定位精度可得到一定程度提高,但是提高并不明显;而对于动态 PPP,多系统融合可以显著提高定位精度,多系统融合动态 PPP 相比单 GPS 动态 PPP 浮点解精度水平和高程方向可分别提高 18.7%和 30.4%,这是由于动态定位中各时段不同卫星系统的可视卫星数量变化较大,在个别时段会产生较大定位误差,而多系统融合可以有效提高可视卫星的几何分布。相对于多系统组合的 PPP 浮点解,PPP 固定解定位精度可在东、北、天方向提升 14.8%、12.0%和 12.8%。

在收敛/初始化时间方面, GLONASS 和 BDS 的收敛时间略长于 GPS 和 Galileo, 多系统 GNSS 组合的 PPP 收敛速度最快。其中, 北斗二号卫星的静态/动态 PPP 浮点解收敛时间约为 38 min 和 51 min, 固定解的首次固定时间约 54 min 和 60 min, 在联合北斗二和三号卫星后, 其 PPP 静态/动态解的收敛时间/首次固定时间可提高至约 20~40 min。相比单 GPS, 多系统组合浮点解的收敛时间和固定解的首次固定时间分别缩短了 36.5% 和 40.4%。

值得注意的是, 单北斗二号 PPP 结果由于在不少试验测站上(不在亚太核心服务区)的可用卫星数较少, 同时可视卫星中大多数为 GEO 卫星, 其轨道精度较差, 使其 PPP 定位精度相对较差, 收敛时间相对较长; 单北斗三号卫星虽然总卫星数已接近全星座, 可视卫星数也较多, 但 IGS 分析中心提供的精密星历最多只支持到 C37, 因此较多用于定位实验的测站个别弧段只有四颗甚至更少的北斗三号可用卫星, 且可用卫星分布较差, 导致某些历元没有定位结果输出, 出现重新初始化现象, 使得定位结果并不理想。但是, 联合北斗二号和北斗三号, 对于全球范围内的测站无论是静态还是动态 PPP 的浮点解/固定解均能达到较高定位精度和较短收敛时间, 说明我国北斗卫星导航系统在观测条件相当的情况可以实现与其他导航卫星系统基本相当的 PPP 定位性能。

纵观已有的文献和最新的试验结果来看, PPP/PPP-RTK 的模糊度固定的理论方法已经较为成熟; 实时高采样率卫星钟差、UPD 产品估计已经较好的解决; 多频多系统观测值可在一定程度上缩短 PPP 初始化时间, 但仍无法满足实际应用中对于快速初始化的要求; 先验大气约束对缩短初始化时间的主要取决于大气建模的精度, 精度越高越有利于实现快速初始化; 低轨卫星观测值加速 PPP 收敛目前仅处于仿真阶段, 今后仍需采用实测数据进行验证。

PPP-RTK 技术仍处于开发和早期应用阶段, 如何平衡数据传输量、采样率与带宽的关系是目前仍需要关注的问题。已有全球/区域电离层模型对 PPP-RTK 性能提升的幅度较为有限, 如何构建高精度的大气模型并确定其播发方式是目前 PPP-RTK 应用实践需要解决的重要问题之一。大气误差的初始方差确定是影响 PPP-RTK 快速收敛的关键, 现有大气模型/产品提供的精度

指标较多是计算过程的内符合精度, 而且存在虚高现象, 如何准确确定该参数在观测方程中的方差值有待深入研究。PPP 的快速初始化仍然是制约 PPP 技术应用的一大难题, 如何在只采用稀疏基站网的条件下, 进一步缩短 PPP 的初始化时间, 仍然是 PPP 发展和推广应用需要持续解决的关键瓶颈。随着低轨导航星座的发展, 低轨导航增强 PPP-RTK 将是今后的重要发展方向, 还有不少工作要做。

参考文献:

- [1] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [2] KOUBA J, HÉROUX P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28. DOI: 10.1007/PL00012883.
- [3] 张小红, 李星星, 李盼. GNSS 精密单点定位技术及应用进展[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1399-1407. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170327.
ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, LI Pan. Review of GNSS PPP and its application[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1399-1407. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170327.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18. DOI: 10.1002/navi.291.
- [7] KE Mingxing, LV Jing, CHANG Jiang, et al. Integrating GPS and LEO to accelerate convergence time of precise point positioning[C]// *Proceedings of 2015 International Conference on Wireless Communications & Signal*. Nanjing, China: IEEE, 2015: 1-5.
- [8] GE Haibo, LI Bofeng, GE Maorong, et al. Initial assessment of precise point positioning with LEO enhanced global navigation satellite systems (LeGNSS)[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(7): 984.
- [9] LI Xingxing, MA Fujian, LI Xin, et al. LEO constellation-augmented multi-GNSS for rapid PPP convergence [J].

- Journal of Geodesy, 2019, 93(5): 749-764. DOI: 10.1007/s00190-018-1195-2.
- [10] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190176.
ZHANG Xiaohong, MA Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190176.
- [11] ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, GUO Fei. Satellite clock estimation at 1 Hz for realtime kinematic PPP applications[J]. GPS Solutions, 2010, 15(4): 315-324.
- [12] LIU Teng, ZHANG Baocheng, YUAN Yunbin, et al. An efficient undifferenced method for estimating multi-GNSS high-rate clock corrections with data streams in real time[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1435-1456.
- [13] DAI Zhiqiang, DAI Xiaolei, ZHAO Qile, et al. Improving real-time clock estimation with undifferenced ambiguity fixing[J]. GPS Solutions, 2019, 23(2): 44.
- [14] LIU Zhiqiang, YUE Dongjie, HUANG Zhangyu, et al. Performance of real-time undifferenced precise positioning assisted by remote IGS multi-GNSS stations[J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 58.
- [15] EL-MOWAFY A, DEO M, KUBO N. Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections[J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 937-947.
- [16] NIE Zhixi, GAO Yang, WANG Zhenjie, et al. An approach to GPS clock prediction for real-time PPP during outages of RTS stream[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 14. DOI: 10.1007/s10291-017-0681-y.
- [17] COLLINS P, BISNATH S, LAHAYE F, et al. Undifferenced GPS ambiguity resolution using the decoupled clock model and ambiguity datum fixing[J]. Navigation, 2010, 57(2): 123-135.
- [18] LAURICHESSE D, MERCIER F, BERTHIAS JP, et al. Integer ambiguity resolution on undifferenced GPS phase measurements and its application to PPP and satellite precise orbit determination[J]. Navigation, 2009, 56(2): 135-149.
- [19] 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, 2008, 82(7): 389-399.
- [20] LI Pan, ZHANG Xiaohong, REN Xiaodong, et al. Generating GPS satellite fractional cycle bias for ambiguity-fixed precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 771-782.
- [21] HU Jiahuan, ZHANG Xiaohong, LI Pan, et al. Multi-GNSS fractional cycle bias products generation for GNSS ambiguity-fixed PPP at Wuhan University[J]. GPS Solutions, 2020, 24(1): 15. DOI: 10.1007/s10291-019-0929-9.
- [22] LOYER S, PEROSANZ F, MERCIER F, et al. Zero-difference GPS ambiguity resolution at CNES-CLS IGS analysis center[J]. Journal of Geodesy, 2012, 86(11): 991-1003.
- [23] GENG Jianghui, CHEN Xingyu, PAN Yuanxin, et al. PRIDE PPP-AR: an open-source software for GPS PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 91. DOI: 10.1007/s10291-019-0888-1.
- [24] LIU Yanyan, SONG Weiwei, LOU Yidong, et al. GLO-NASS phase bias estimation and its PPP ambiguity resolution using homogeneous receivers[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 427-437. DOI: 10.1007/s10291-016-0529-x.
- [25] YI Wenting, SONG Weiwei, LOU Yidong, et al. Improved method to estimate undifferenced satellite fractional cycle biases using network observations to support PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 1369-1378. DOI: 10.1007/s10291-017-0616-7.
- [26] KAMALI O, COCARD M, SANTERRE R. A sequential network approach for estimating GPS satellite phase biases at the PPP-AR producer-side[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 59.
- [27] XIAO Guorui, LI Pan, SUI Lifen, et al. Estimating and assessing Galileo satellite fractional cycle bias for PPP ambiguity resolution[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 3.
- [28] XIAO Guorui, SUI Lifen, HECK B, et al. Estimating satellite phase fractional cycle biases based on Kalman filter[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 82.
- [29] YAO Yibin, PENG Wenjie, XU Chaoqian, et al. The realization and evaluation of mixed GPS/BDS PPP ambiguity resolution[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1283-1295.
- [30] WANG Jin, HUANG Guanwen, YANG Yuanxi, et al. FCB estimation with three different PPP models: equivalence analysis and experiment tests[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 93.
- [31] LI Pan, ZHANG Xiaohong, GUO Fei. Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(1): 25-40. DOI: 10.1007/s00190-016-0935-4.
- [32] LIU Yanyan, YE Shirong, SONG Weiwei, et al. Integrating GPS and BDS to shorten the initialization time for ambiguity-fixed PPP[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 333-343.
- [33] LIU Yanyan, LOU Yidong, YE Shirong, et al. Assessment of PPP integer ambiguity resolution using GPS, GLONASS and BeiDou (IGSO, MEO) constellations[J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1647-1659.
- [34] LIU Teng, YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng, et al. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(3): 253-268.

- DOI: 10.1007/s00190-016-0960-3.
- [35] LI Xingxing, LI Xin, YUAN Yongqiang, et al. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(6): 579-608. DOI: 10.1007/s00190-017-1081-3.
- [36] MONTENBRUCK O, HUGENTOBLER U, DACH R, et al. Apparent clock variations of the Block II F-1 (SVN62) GPS satellite[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 303-313. DOI: 10.1007/s10291-011-0232-x.
- [37] PAN Lin, ZHANG Xiaohong, GUO Fei, et al. GPS inter-frequency clock bias estimation for both uncombined and ionospheric-free combined triple-frequency precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(4): 473-487.
- [38] PAN Lin, ZHANG Xiaohong, LI Xingxing, et al. GPS inter-frequency clock bias modeling and prediction for real-time precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 76.
- [39] LI Pan, JIANG Xinyuan, ZHANG Xiaohong, et al. GPS+Galileo+BeiDou precise point positioning with triple-frequency ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(3): 78.
- [40] GUO Fei, ZHANG Xiaohong, WANG Jinling, et al. Modeling and assessment of triple-frequency BDS precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(11): 1223-1235.
- [41] ELSOBEIEY M. Precise point positioning using triple-Frequency GPS measurements[J]. *The Journal of Navigation*, 2015, 68(3): 480-492.
- [42] SU Ke, JIN Shuanggen, JIAO Guoqiang. Assessment of multi-frequency global navigation satellite system precise point positioning models using GPS, BeiDou, GLONASS, Galileo and QZSS[J]. *Measurement Science and Technology*, 2020, 31(6): 064008.
- [43] LI Pan, ZHANG Xiaohong, GE Maorong, et al. Three-frequency BDS precise point positioning ambiguity resolution based on raw observables[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(12): 1357-1369.
- [44] LI Xingxing, LI Xin, LIU Gege, et al. Triple-frequency PPP ambiguity resolution with multi-constellation GNSS: BDS and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(8): 1105-1122.
- [45] GENG Jianghui, GUO Jiang, MENG Xiaolin, et al. Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(1): 6.
- [46] XIN Shaoming, GENG Jianghui, GUO Jiang, et al. On the choice of the third-frequency galileo signals in accelerating PPP ambiguity resolution in case of receiver antenna phase center errors[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(8): 1315.
- [47] LI Xingxing, LIU Gege, LI Xin, et al. Galileo PPP rapid ambiguity resolution with five-frequency observations[J]. *GPS Solutions*, 2019, 24(1): 24.
- [48] CAI Changsheng, GAO Yang. Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 223-236. DOI: 10.1007/s10291-012-0273-9.
- [49] LI Pan, ZHANG Xiaohong. Integrating GPS and GLONASS to accelerate convergence and initialization times of precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 461-471.
- [50] LI Xingxing, GE Maorong, DAI Xiaolei, et al. Accuracy and reliability of multi-GNSS real-time precise positioning: GPS, GLONASS, BeiDou, and Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(6): 607-635.
- [51] LI Xingxing, ZHANG Xiaohong, REN Xiaodong, et al. Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5(1): 8328.
- [52] WÜBBENA G, SCHMITZ M, BAGGE A. PPP-RTK: Precise point positioning Using State-space representation in RTK Networks[C]// *Proceedings of the 18th International Technical Meeting (ION GNSS 2005)*. Long Beach, CA: Long Beach Convention Center, 2005: 13-16.
- [53] 李星星. GNSS精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [54] LI Xingxing. Rapid ambiguity resolution in GNSS precise point positioning[D]. Wuhan: Wuhan University, 2013.
- [55] WILGAN K, HADAS T, HORDYNYEC P, et al. Real-time precise point positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(3): 1341-1353.
- [56] XIANG Yan, GAO Yang, LI Yihe. Reducing convergence time of precise point positioning with ionospheric constraints and receiver differential code bias modeling[J]. *Journal of Geodesy*, 2020, 94(1): 8.
- [57] GENG Jianghui, SHI Chuang. Rapid initialization of real-time PPP by resolving undifferenced GPS and GLONASS ambiguities simultaneously[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(4): 361-374. DOI: 10.1007/s00190-016-0969-7.
- [58] GENG Jianghui, LI Xiaotao, ZHAO Qile, et al. Inter-system PPP ambiguity resolution between GPS and BeiDou for rapid initialization[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(3): 383-398.
- [59] BANVILLE S, LANGLEY R B. Improving real-time kinematic PPP with instantaneous cycle-slip correction[C]// *Proceedings of the 22nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2009)*. Savannah, GA: Savannah International Convention Center, 2009: 2470-2478.
- [60] GENG Jianghui, MENG Xiaolin, DODSON AH, et al.

- Rapid re-convergences to ambiguity-fixed solutions in precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(12): 705-714. DOI: 10.1007/s00190-010-0404-4.
- [60] ZHANG Xiaohong, LI Xingxing. Instantaneous re-initialization in real-time kinematic PPP with cycle slips fixing[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 315-327. DOI: 10.1007/s10291-011-0233-9.
- [61] LI Pan, JIANG Xinyuan, ZHANG Xiaohong, et al. Kalman-filter-based undifferenced cycle slip estimation in real-time precise point positioning[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 99. DOI: 10.1007/s10291-019-0894-3.
- [62] ZHANG Xiaohong, ZHU Feng, ZHANG Yuxi, et al. The improvement in integer ambiguity resolution with INS aiding for kinematic precise point positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 993-1010. DOI: 10.1007/s00190-018-1222-3.
- [63] LI Xingxing, ZHANG Xiaohong, GE Maorong. Regional reference network augmented precise point positioning for instantaneous ambiguity resolution [J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158. DOI: 10.1007/s00190-010-0424-0.
- [64] DE OLIVEIRA PS JR, MOREL L, FUND F, et al. Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse network configurations for PPP-RTK [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 237-250.
- [65] ZHANG Baocheng, CHEN Yongchang, YUAN Yunbin. PPP-RTK based on undifferenced and uncombined observations: theoretical and practical aspects[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 93(7): 1011-1024.
- [66] LI Linyang, LU Zhiping, CHEN Zhengsheng, et al. Parallel computation of regional CORS network corrections based on ionospheric-free PPP[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 70. DOI: 10.1007/s10291-019-0864-9.
- [67] LI Zhao, CHEN Wu, RUAN Rengui, et al. Evaluation of PPP-RTK based on BDS-3/BDS-2/GPS observations: a case study in Europe[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24(2): 38. DOI: 10.1007/s10291-019-0948-6.
- [68] NADARAJAH N, KHODABANDEH A, WANG Kan, et al. Multi-GNSS PPP-RTK: from large- to small-scale networks[J]. *Sensors*, 2018, 18(4): 1078.
- [69] OLIVARES-PULIDO G, TERKILDSEN M, ARSOV K, et al. A 4D tomographic ionospheric model to support PPP-RTK [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1673-1683.
- [70] ASARI K, KUBO Y, SUGIMOTO S. Design of GNSS PPP-RTK assistance system and its algorithms for 5G mobile networks[J]. *Transactions of the Institute of Systems, Control and Information Engineers*, 2020, 33(1): 31-37. DOI: 10.5687/iscie.33.31.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2020-07-20

修回日期: 2020-08-17

第一作者简介: 张小红(1975—),男,教授,研究方向为GNSS精密定位及其应用。

First author: ZHANG Xiaohong(1975—), male, professor, majors in GNSS precise positioning and its applications.

E-mail: xhzhang@sgg.whu.edu.cn

引文格式:张勤,燕兴元,黄观文,等.北斗卫星天线相位中心改正模型精化及对精密定轨和定位影响分析[J].测绘学报,2020,49(9):1101-1111. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200289.
ZHANG Qin, YAN Xingyuan, HUANG Guanwen, et al. Refinement of BeiDou satellite antenna phase center correction model and its impact on precision orbit determination and positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1101-1111. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200289.

北斗卫星天线相位中心改正模型精化及对精密定轨和定位影响分析

张 勤¹, 燕兴元^{1,2}, 黄观文¹, 解世超¹, 曹 钰¹

1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中山大学测绘科学与技术学院, 广东 广州 510275

Refinement of BeiDou satellite antenna phase center correction model and its impact on precision orbit determination and positioning

ZHANG Qin¹, YAN Xingyuan^{1,2}, HUANG Guanwen¹, XIE Shichao¹, CAO Yu¹

1. College of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xian 710054, China; 2. School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: Aiming at the lack of high accurate antenna phase correction (PCC) model for the BDS-2 IGSO and MEO satellites, in the BDS-2 and BDS-3 satellites joint precision orbit determination (POD) and precise point positioning (PPP), in this paper, an improved method for estimating PCV and z -offset parameters is used to refine the B1I/B3I ionosphere-free linear combination PCC model for the BDS-2 IGSO and MEO satellites. Compared with the results obtained using the ground-calibrated PCO model published by BeiDou official, the STD of SLR residuals obtained by the POD using the refined PCC model is reduced by 0.6~2.4 cm, and the improvement percentage is about 8.6%~33.3%. The floating PPP solution results, based on the refined BDS-2 satellite PCC model in this paper and the existing BDS-3 PCC model, have been significantly improved by 9.5 mm (37.2%) in the elevation direction.

Key words: BDS-2; BDS-3; satellite antenna phase center correction model; joint precise orbit determination; precise point position

Foundation support: The National Key R&D Program of China (No. 2018YFC1505102); The Programs of the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41774025; 41731066); The Special Fund for Technological Innovation Guidance of Shaanxi Province (No. 2018XNCGG05); The Grand Projects of the BDS-2 System (No. GFZX0301040308)

摘 要: 针对 BDS-2 和 BDS-3 卫星联合精密定轨和精密定位中高精度 BDS-2 IGSO/MEO 卫星天线相位中心改正在轨估计模型的缺失问题, 本文采用了改进的 PCV 和 z -offset 参数估计方法, 精化了 BDS-2 IGSO/MEO 卫星 B1I/B3I 无电离层组合 PCC 模型。数值验证结果表明: 相比北斗官方发布的 PCO 地面标定值, 本文精化的 PCC 模型使得精密轨道 SLR 残差的 STD 减小了 0.6~2.4 cm, 改善百分比约为 8.6%~33.3%; 基于本文精化的 BDS-2 和已有 BDS-3 卫星精化的 PCC 模型使得精密定位浮点解在高程方向显著提升了 9.5 mm(37.2%)。

关键词: 北斗二号; 北斗三号; 卫星天线相位中心改正模型; 联合精密定轨; 精密定位

中图分类号: P228.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1595(2020)09-1101-11

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505102); 国家自然科学基金面上项目(41774025; 41731066); 陕西省技术创新指导专项基金(2018XNCGG05); 北斗二代重大专项(GFZX0301040308)

随着 2020 年 6 月 23 日收官之战的北斗卫星成功发射, 北斗三号卫星导航系统(BDS-3)全球

星座提前半年全面建成。目前北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)与美

国全球定位系统(Global Position System,GPS),格洛纳斯全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GLONASS)和伽利略(Galileo)一起提供全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)定位、导航、授时服务^[1-2]。同一参考框架下的精密轨道和钟差是多系统GNSS应用的先决条件。在多系统GNSS数据处理中,除了使用相同的国际地球自转和参考系统服务(International Earth Rotation Service,IERS)^[3]协议外,参考框架的统一主要反映在天线相位中心改正(phase center correction,PCC)和框架中核心测站与解算无关的文件交换格式(solution independent exchange format,SINEX)文件中坐标的一致性。

国际GNSS服务组织(International Global Navigation Satellite System Service,IGS)在igs14.atx文件中发布了GPS,GLONASS和Galileo卫星的天线相位中心偏差(phase center offsets,PCO)和天线相位中心变化(phase center variation,PCV),其与IGS14^[4]保持一致。GPS和GLONASS卫星的 z -offset和PCV是根据GNSS跟踪数据在轨估计得出^[5]。早期Galileo卫星的PCO模型也是采用地面数据在轨估计得到^[6]。之后Galileo卫星精确的PCO和PCV已在发射之前采用微波暗室校准,并于2017年由欧洲全球导航卫星系统局(European GNSS Agency,GSA)发布(<https://www.gsc-europa.eu/support-to-developers/galileo-satellite-metadata>)。早期,欧洲空间业务中心(European Space Operations Centre,ESOC)和武汉大学学者利用地面跟踪站数据进行在轨估计了北斗二号卫星导航系统(BDS-2)倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous satellite orbit,IGSO)和中圆地球轨道(medium earth orbit,MEO)卫星B1I/B2I频点无电离层(Ionosphere-free,IF)组合PCC模型^[7-8]。文献[9]也估计了一套B1I/B2I组合PCO模型,但该模型没有提供PCV改正。目前北斗系统正处于BDS-2和BDS-3平稳过渡阶段,包含BDS-2/3卫星的精密产品由北斗过渡信号组合(B1I/B3I)提供。因此需要建立高精度的BDS-2/3卫星B1I/B3I无电离层组合PCC(PCO+PCV)模型。

2019年12月30日,北斗官方发布了卫星制造商地面标定的BDS-2^[10]和BDS-3卫星PCO参数,但没有标定PCV参数(http://www.beidou.gov.cn/gffgg/201912/t20191209_19313.html?from=singlemessage)。高精度的PCC模型对卫星精密定轨至为重要^[11]。卫星PCO参数中的 z -offset与框架尺度参数相关, z -offset参数的误差会对北斗卫星精密定轨的框架尺度产生影响,进而影响到高程方向定位精度^[12]。为了保证北斗卫星精密定轨的参考框架尺度尽可能与IGS14保持一致,就必须基于地面站实测数据进行在轨估计。尽管卫星PCV参数本身量级较小,但由于PCV和 z -offset参数强相关,PCV会对 z -offset参数估计产生较大的影响,因此在估计高精度PCC时不能忽略PCV参数。由此可以看出,北斗官方发布的卫星厂商地面标定的PCO精度有限,且没有考虑PCV对PCO的影响。另一方面,为了保证北斗与GPS联合数据处理的兼容性问题,得到与GPS系统相一致的PCC模型,在估计PCC时需要采用BDS/GPS联合定轨,同时将GPS系统PCC模型进行固定。文献[13]建立了BDS3-MEO卫星的先验模型提高了定轨精度,文献[14]基于该先验光压模型精化了BDS-3 MEO卫星B1I-B3I无电离层组合PCC模型。因此,本文研究建立BDS-2 IGSO/MEO卫星高精度PCC模型,由此给出改进的 z -offset和PCV参数估计方法,利用地面实测数据对IGSO/MEO卫星过渡信号B1I/B3I频点组合PCC模型进行精化。

gov.cn/gffgg/201912/t20191209_19313.html?from=singlemessage.)。高精度的PCC模型对卫星精密定轨至为重要^[11]。卫星PCO参数中的 z -offset与框架尺度参数相关, z -offset参数的误差会对北斗卫星精密定轨的框架尺度产生影响,进而影响到高程方向定位精度^[12]。为了保证北斗卫星精密定轨的参考框架尺度尽可能与IGS14保持一致,就必须基于地面站实测数据进行在轨估计。尽管卫星PCV参数本身量级较小,但由于PCV和 z -offset参数强相关,PCV会对 z -offset参数估计产生较大的影响,因此在估计高精度PCC时不能忽略PCV参数。由此可以看出,北斗官方发布的卫星厂商地面标定的PCO精度有限,且没有考虑PCV对PCO的影响。另一方面,为了保证北斗与GPS联合数据处理的兼容性问题,得到与GPS系统相一致的PCC模型,在估计PCC时需要采用BDS/GPS联合定轨,同时将GPS系统PCC模型进行固定。文献[13]建立了BDS3-MEO卫星的先验模型提高了定轨精度,文献[14]基于该先验光压模型精化了BDS-3 MEO卫星B1I-B3I无电离层组合PCC模型。因此,本文研究建立BDS-2 IGSO/MEO卫星高精度PCC模型,由此给出改进的 z -offset和PCV参数估计方法,利用地面实测数据对IGSO/MEO卫星过渡信号B1I/B3I频点组合PCC模型进行精化。

1 北斗卫星天线相位中心模型精化方法

1.1 函数模型

PCO参数是从卫星质心转移到天线相位中心的三维向量 $[\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]$ 。考虑到最终的几何观测量为星地距离,其可以表示成一维距离改正的形式。基于卫星到测站向量在星固系^[15]的单位向量 $e_r = [-\sin \alpha \sin \eta \ -\cos \alpha \sin \eta \ -\cos \eta]^T$,具体为

$$\Delta \rho(\alpha, \eta) = -\Delta x \cdot \sin \alpha \sin \eta - \Delta y \cdot \cos \alpha \sin \eta - \Delta z \cdot \cos \eta \quad (1)$$

式中, α 表示方位角; η 表示从卫星测站方向与星固系 Z 轴夹角(天底角); α 是从地面测站方向观测,按照顺时针方向由星固系 Y 轴到 X 轴的角度。式(1)为估计卫星PCO参数的函数模型。在没有卫星PCV情况下,估计PCO时先假定卫星PCV为0,利用式(1)估计卫星水平PCO($\Delta x, \Delta y$)和初始 z -offset(Δz)。由于PCO的 z -offset参数与卫星PCV参数相关,因此还需要估计卫星PCV,进而扣除PCV对 z -offset的影响,得到最终的

PCV 和 PCO 模型。

由于卫星天线 PCV 和 z -offset 的强相关性,无法直接估计纯 PCV 参数,而是估计得到了包含 z -offset 参数影响的原始 PCV 估值(简称为 PCV_{raw}), $PCV_{raw}(\eta)$ 具体的表达式如(2)^[12]

$$PCV_{raw}(\eta) = PCV(\eta) + dz \cdot (1 - \cos \eta) \quad (2)$$

式中, dz 为 z -offset 的改正数参数。同时,考虑到 $PCV_{raw}(\eta)$ 与卫星钟差间的相关性,为了防止法方程奇异添加了式(3)所示的约束方程

$$\sum_{i=0}^n PCV_{raw}(\eta_i) = 0 \quad (3)$$

式中, $PCV_{raw}(\eta_i)$ 作为分段线性常量模型进行逐卫星估计; η_i 为第 i 个 PCV 模型节点处的天底角; n 为 PCV 模型中最大天底角节点。

当获得 $PCV_{raw}(\eta_i)$ 参数后,建立单独的最小二乘平差分离出最终的 $PCV(\eta_i)$ 和 z -offset 参数相对于先验值的改正数。最小二乘平差的准则如式(4)所示

$$\sum_{i=0}^n [PCV_{raw}(\eta_i) - a - dz(1 - \cos \eta_i)]^2 = \min \quad (4)$$

式中, a 为常数, PCV 为最小二乘平差的残差,故其基准可表示为 $\sum_{i=0}^n PCV(\eta_i) = 0$ 。以此可以判定当 $PCV_{raw}(\eta_i)$ 参数之和为零时, z -offset 改正数参数也为零。

考虑到 z -offset 与 PCV 之间的强相关性, z -offset 参数包含了未模型化的 PCV,同时 PCV 也会受到未模型化的 z -offset 的影响。因此需要通过施加“最小 PCV”准则(式(4))分离 PCV 和 z -offset 参数,最终得到精化后的 PCC 参数。IGS 对 GPS^[14] 和 GLONASS 卫星^[16] PCV 和 z -offset 求解的流程如图 1 所示。



图 1 卫星 PCC 模型精化流程

Fig.1 Flow chart of the satellite PCC model refinement

1.2 PCV 对卫星 z -offset 参数影响函数模型分析

GPS 与 BDS 卫星在 PCV 估计时的主要区别为①地面可观测天底角范围不同:GPS 卫星地面可观测最大天底角可以达到 14.3° ,而对于 BDS IGSO 卫星则不超过 9° ,MEO 不超过 13.2° ;可观测最大天底角越小 PCV 参数与其他参数相关性

越强,解算精度越差。②测站数量不同:可接收 GPS 信号的测站全球分布均匀且数量众多,可接收 BDS 信号的测站相对较少。上述因素将制约北斗卫星高精度天线相位中心改正标定,特别是 IGSO 卫星。为了定量分析不同 GNSS 系统地面可观测卫星天底角范围对 z -offset 改正数参数分离的影响,利用式(4)构建如式(5)的函数模型

$$\begin{bmatrix} PCV(\eta_0) \\ PCV(\eta_1) \\ \vdots \\ PCV(\eta_{max}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -(1 - \cos(\eta_0)) \\ -(1 - \cos(\eta_1)) \\ \vdots \\ -(1 - \cos(\eta_{max})) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dz \\ a \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} PCV_{raw}(\eta_0) \\ PCV_{raw}(\eta_1) \\ \vdots \\ PCV_{raw}(\eta_{max}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\text{令 } \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -(1 - \cos(\eta_0)) & 1 \\ -(1 - \cos(\eta_1)) & 1 \\ \vdots & 1 \\ -(1 - \cos(\eta_{max})) & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{X} = \begin{bmatrix} dz \\ a \end{bmatrix}, PCV =$$

$$\begin{bmatrix} PCV(\eta_0) \\ PCV(\eta_1) \\ \vdots \\ PCV(\eta_{max}) \end{bmatrix}, \mathbf{L} = \begin{bmatrix} PCV_{raw}(\eta_0) \\ PCV_{raw}(\eta_1) \\ \vdots \\ PCV_{raw}(\eta_{max}) \end{bmatrix}$$

式中, dz 表示卫星 PCV 对 z -offset 参数的影响,也为 z -offset 基于式(1)估值的改正数; a 为式(4)中的常数项参数。基于 $PCV(\eta_i)$ 平方和最小的准则,且视观测值为等权($P=I$)则可得到 \mathbf{X} 的最优解为 $\mathbf{X} = [dz \ a]^T = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{L}) = [(\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T] \mathbf{L}$ (6)

取 $\mathbf{M} = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T$,于是有

$$\mathbf{X} = \mathbf{M} \mathbf{L} \quad (7)$$

式中, \mathbf{M} 矩阵的某一行元素代表该行对应未知参数的模型系数,根据式(7)可得 \mathbf{M} 矩阵中 dz 参数对应的 \mathbf{M} 矩阵第一行元素 $\mathbf{M}(1, \eta_i)$, $\eta_i = \eta_0, \dots, \eta_{max}$,其中系数 $\mathbf{M}(1, \eta_i)$ 表示 η_i 天底角处 $PCV_{raw}(\eta_i)$ 对卫星 dz 参数的贡献系数或误差传播系数,其可以反映模型的稳健性,系数的绝对量级和系数间差异越小则模型越稳健。由式(5)和式(6)可得 \mathbf{M} 矩阵元素大小仅与天底角有关;由上文可知 GPS 最大天底角可达 14.3° ,BDS IGSO 卫星不超过 9° ,BDS MEO 不超过 13.2° ;结合式(7)分别对 BDS 和 GPS 卫星 PCV_{raw} 导出 PCV 和 dz 参数的模型系数 \mathbf{M} 做定量分析,具体结果

见图 2,其中纵坐标代表某类型卫星对应的 M 矩阵第一行系数 $M(1, \eta_i)$, $\eta_i = \eta_0, \dots, \eta_{\max}$, 纵轴系数单位为 1, 横坐标表示估计的各 PCV_{raw} 参数的整度天底角 $\eta_i = \eta_0, \dots, \eta_{\max}$ 。图 2 中曲线的差异主要由不同类型卫星对应的地面可观测天底角的范围 η_{\max} 所决定。

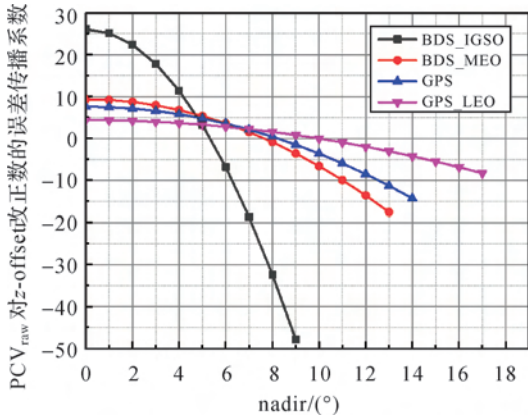


图 2 不同 GNSS 系统各 PCV_{raw} 对 z -offset 改正数的影响系数

Fig.2 Influence coefficients of PCV_{raw} on z -offset correction in different GNSS systems

从图 2 可以看出 GPS 卫星各 PCV_{raw} 对 z -offset 改正数的模型系数较小(蓝色); BDS MEO 卫星模型系数相比 GPS 稍差(红色),但整体上仍可得到较高精度的 z -offset 改正数;但 IGSO 卫星各 PCV_{raw} 对应的模型系数较大且变化显著(黑色),特别是在 0° 和 9° 对应的 PCV_{raw} 系数。也就是说,若 9° 对应的 PCV_{raw} 存在 1 mm 的误差将会对 z -offset 改正数产生约 47 mm 的误差。因此,IGSO 卫星的模型稳健性差,导致从 PCV_{raw} 导出 z -offset 改正数的精度也相对较差。对此,在 BDS 卫星 PCV 和 z -offset 改正数估计方法需要进行改进。

1.3 改进的 PCV 和 z -offset 估计方法

由于 z -offset 还需要考虑 PCV 模型的影响。因此在解算时,首先固定 z -offset 解算 PCV_{raw} , 然后扣掉未模型化的 z -offset 余弦项影响得到 PCV , 考虑到 IGSO 卫星在利用 PCV_{raw} 导出 z -offset 的改正数时模型不稳定, PCV_{raw} 的微小误差会导致 z -offset 改正数产生约 $+30 \sim -50$ mm 的影响(见图 2)。本节采用特殊处理: ①只保留导出的 PCV 参数固定后重新估计 z -offset 参数; ②再固定新的 z -offset 参数,重新解算 PCV_{raw} , 导出 PCV 改正数; ③重复①—②直到 PCV 改正数之和为 0 为止。具体流程见图 3。

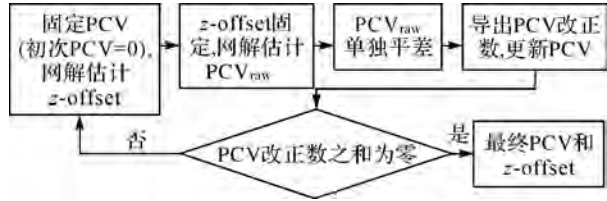


图 3 BDS-2 卫星 B1I/B3I 组合 PCC 模型精化流程
Fig.3 Flow chart of the B1I/B3I IF-combination PCC model refinement for BDS-2 satellites

2 BDS-2 IGSO/MEO 卫星天线相位中心改正模型精化

本文采用了 56 个多模 GNSS 试验网络(multi-GNSS experiment, MGEX)/IGS 测站和 17 个国际 GNSS 监测评估系统(international GNSS Monitoring & Assessment System, iGMAS)测站(见图 4)提供的观测数据来对 BDS-2 IGSO 和 MEO 卫星 PCC 参数进行估计。展示了 BDS-2 卫星采用网解方式估计 PCC 的测站分布。表 1 列出了估计 BDS-2 卫星 PCO、PCV 参数估计策略, 主要包括观测模型、误差模型、参数估计模型。表 1 中缩写代表含义为系统间偏差(inter-system bias, ISB), 天顶总延迟(zenith total delay, ZTD), 萨斯塔莫宁模型(Saastamoinen, SAAS), 全球投影函数(global map function, GMF)。

表 1 BDS-2 卫星 PCC 模型精化数据处理策略
Tab.1 Strategies of the BDS-2 satellite PCC model refinement

类型	模型描述
测站	大约 17 个 iGMAS 测站和 56 个 IGS/MGEX 测站
时段	2019 年 092-340 天
观测值类型	非差相位和码观测值 高度角定权; 截止高度角为 15°
弧长	72 h 轨道弧长
姿态模型	动偏模型 ^[15]
太阳辐射压力	ECOM1 ^[17]
系统间偏差 (ISBs)	每个测站每个弧段为一常量, 并为所有 ISB 参数添加零均值约束
电离层延迟	无电离层线性组合 GPS: L1/L2 BDS-3; B1I/B3I
对流层延迟	2 h 为间隔估计 ZTD ^[18] 参数 SAAS ^[19] + GMF ^[20] 以 24 h 为间隔估计水平梯度参数
测站坐标	固定到 IGSYYPWWWWW.snxx.YY 表示年的最后两位, WWWWW 表示相应的 GPS 周
接收机天线	固定到 igs14_WWWW.atx
卫星天线	GPS 和 BDS 卫星来自 igs14_2062.atx
模糊度	固定双差模糊度 ^[21]
地影期	去除相应结果 ^[22]

北斗官方发布的 PCO 标定值包含了卫星不同频点的模型值,在 B1I/B3I 组合数据处理时可分别对两个频点的观测数据进行 PCO 改正,之后进行无电离层组合。考虑到估计的 PCO 参数为

双频组合模型值,为了方便对比,将北斗官方发布的单一频点 PCO(<http://www.beidou.gov.cn>)进行 B1I/B3I 组合,具体数值如表 2 所示。

表 2 基于北斗官方发布 PCO 地面标定值导出 B1I/B3I 无电离层组合 PCO 模型

Tab.2 B1I/B3I IF-combination model derived from ground calibrated PCO values published by the BeiDou official mm

PRN	<i>x</i> -offset	<i>y</i> -offset	<i>z</i> -offset	PRN	<i>x</i> -offset	<i>y</i> -offset	<i>z</i> -offset
C01	607.20	0.80	84.60	C22	-203.40	-10.20	2 026.10
C02	656.80	-1.10	911.90	C23	-209.60	-2.50	2 011.20
C03	663.80	-6.00	691.40	C24	-208.70	-4.20	2 047.10
C04	663.80	-6.00	691.40	C25	73.40	-3.50	1 107.70
C05	617.80	9.40	786.50	C26	72.90	-4.90	1 117.30
C06	762.90	2.00	259.80	C27	27.00	-4.90	1 117.10
C07	729.80	12.90	581.20	C28	25.40	-4.40	1 113.80
C08	749.60	0.70	631.70	C29	27.60	-9.30	1 130.00
C09	590.10	-16.60	670.10	C30	28.40	-8.00	1 095.10
C10	596.20	-9.90	607.80	C32	-183.40	-9.30	2 051.10
C11	576.80	-0.10	856.30	C33	-189.40	-10.50	2 036.20
C12	590.30	22.00	844.10	C34	89.70	-9.30	1 112.30
C13	599.10	4.10	1 552.60	C35	89.20	-11.30	1 101.60
C14	583.20	13.40	886.40	C36	-197.20	-15.40	1 882.40
C16	614.20	0.50	1 547.30	C37	-200.00	-16.00	1 866.60
C19	-205.60	-9.90	2 020.50	C38	-72.50	-309.80	2 651.70
C20	-218.90	-5.00	2 103.50	C39	-67.50	-301.80	2 723.70
C21	-200.40	-6.70	2 062.00				

在估计 BDS-2 IGSO 和 MEO 卫星 PCO 和 PCV 时,由于目前没有接收机端 BDS B1I 和 B3I 频点的 PCC 模型。因此采用接收机 GPS 频点 L1 和 L2 的 PCC 模型近似代替。文献[23]针对这种近似处理对精密定位的影响作了分析,结果表明这种近似具有较好的精度。文献[24]采用地面机器人标定了两个天宝接收机天线 B1I 和 B2I

的 PCC 模型,结果表明 B1I 和 B2I 的 PCO 与 GPS L1 和 L2 模型值较为接近,但对于部分天线 PCV 存在不同程度差异。

首先,固定 PCV=0,基于式(1)采用网解方法估计 *x*-offset、*y*-offset 和 *z*-offset 参数,对每颗卫星的单天估值序列求均值和 STD,具体的结果见表 3。

表 3 BDS-2 IGSO/MEO 卫星的 B1I/B3I 组合 PCO 估值,*z*-offset 为固定 PCV=0 的初步结果

Tab.3 PCO estimations of the B1I/B3I if-combination for BDS-2 IGSO/MEO satellites, *z*-offset is the preliminary estimation by fixing PCV to 0 m

PRN	<i>x</i> -offset		<i>y</i> -offset		<i>z</i> -offset	
	average	STD	average	STD	average	STD
C06	0.619	0.044	-0.003	0.094	3.212	0.334
C07	0.621	0.039	-0.043	0.079	3.222	0.354
C08	0.595	0.037	-0.029	0.076	3.766	0.352
C09	0.623	0.031	-0.030	0.056	3.833	0.353
C10	0.589	0.036	-0.036	0.078	3.652	0.375
C11	0.596	0.019	0.001	0.019	1.981	0.099
C12	0.602	0.017	0.002	0.020	2.213	0.091
C13	0.598	0.038	-0.021	0.065	3.127	0.330
C14	0.630	0.034	0.013	0.073	2.038	0.117
C16	0.623	0.070	-0.015	0.079	3.127	0.506
IGSO 均值	0.607	0.038	-0.027	0.075	3.468	0.350
MEO 均值	0.609	0.023	0.006	0.037	2.077	0.102

可以看出所有卫星 x -offset 之间的最大差异约为 4 cm, IGSO 和 MEO 卫星的均值分别为 0.607 m 和 0.609 m, 极为接近, 因此选定所有卫星的均值 0.610 m 为最终 x -offset 的估值, 同理 y -offset 选取为 -0.016 m, 最终水平方向 PCO 估值如表 4 所示。

考虑到 PCV_{raw} 参数的可靠性, 用来导出 PCV 的 PCV_{raw} 为每颗卫星 2019 年 294—340 天的均

值, 且只考虑与卫星类型 (IGSO 和 MEO) 相关的 PCV_{raw} 参数。最终得到的 z -offset 和 PCV 参数如图 5, 具体模型的数值见表 5 和表 6。

表 4 BDS-2 IGSO/MEO 卫星的水平 PCO 参数估值
Tab.4 Estimation of BDS-2 IGSO/MEO satellite horizontal PCO parameters

类型	x -offset	y -offset
IGSO/MEO	0.610	-0.016

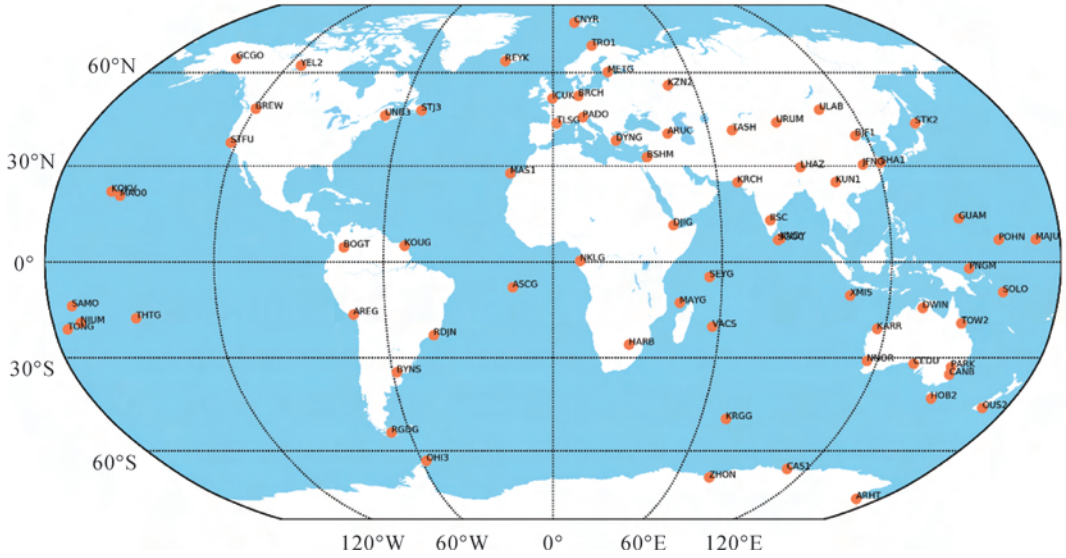


图 4 BDS-2 IGSO 和 MEO 卫星 PCC 模型精化的测站分布图

Fig.4 Distribution of the stations of the PCC model refinement for BDS-2 IGSO and MEO satellites

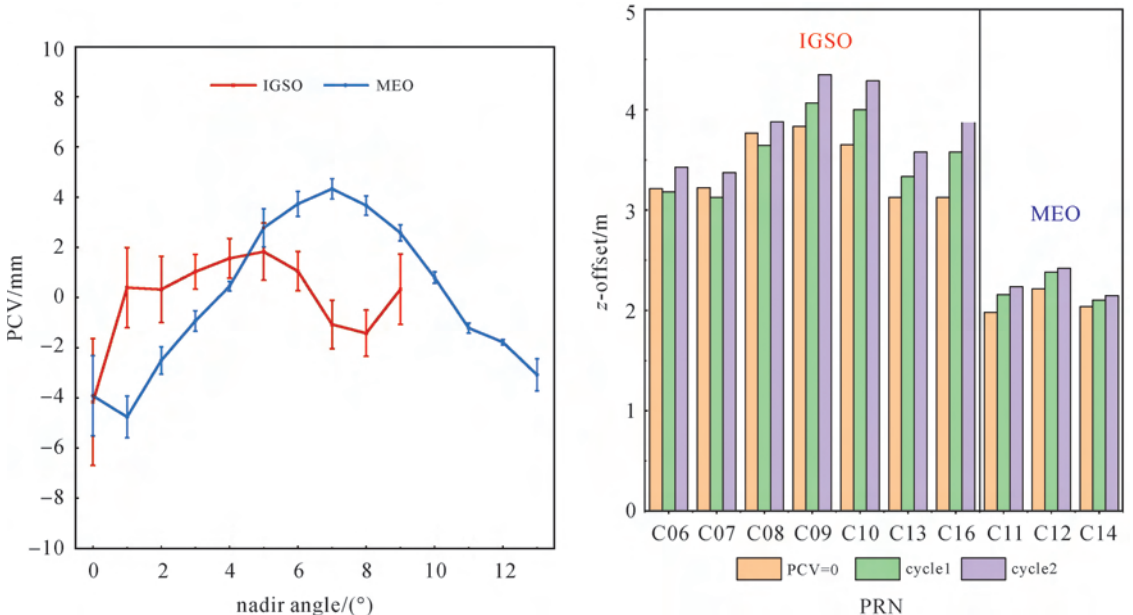


图 5 BDS-2 IGSO/MEO 卫星 B1I/B3I 组合最终的 z -offset 和 PCV 参数

Fig.5 Final z -offset and PCV parameters of the B1I/B3I IF-Combination for BDS-2 IGSO/MEO satellites

表 5 BDS-2 IGSO/MEO 卫星 B11/B31 组合最终 PCV 估值

Tab.5 Final PCV estimations of the B11/B31 if-combination for BDS-2 IGSO/MEO satellites

nadir/(°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IGSO	-4.17	0.39	0.32	1.03	1.56	1.83	1.05	-1.07	-1.42	0.33				
STD	2.52	1.60	1.32	0.69	0.79	1.14	0.78	0.97	0.92	1.40				
MEO	-3.92	-4.76	-2.51	-0.93	0.45	2.78	3.73	4.33	3.66	2.57	0.80	-1.22	-1.78	-3.08
STD	1.60	0.83	0.55	0.41	0.19	0.76	0.50	0.40	0.38	0.32	0.23	0.20	0.11	0.64

表 6 BDS-2 IGSO/MEO 卫星 B11/B31 组合最终 z-offset 估值

Tab.6 Final z-offset estimations of the B11/B31 if-combination for BDS-2 IGSO/MEO satellites

PRN	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C13	C14	C16
z-offset	3.425	3.371	3.880	4.348	4.287	2.235	2.420	3.579	2.149	3.870
STD	0.334	0.354	0.352	0.353	0.375	0.099	0.091	0.33	0.117	0.506

3 精化的 PCC 模型对精密定轨和定位影响分析

3.1 BDS-2/3 卫星联合精密定轨

为了验证精化的 PCC 和北斗官方 PCO 模型的性能,在 BDS-2/3 卫星联合定轨中,BDS-2 卫星采用本文精化的 PCC 模型,BDS-3 MEO 卫星采用了文献[14]的 B11/B31 组合 PCC 模型,模型具体数值如表 7 所示。考虑到 BDS-3 MEO 卫星先验光压模型能提高精密定轨精度,本文在 BDS-2/3 卫星精密定轨时,BDS-2 卫星采用纯经验

ECOM1 模型,BDS-3 MEO 卫星采用 ECOM1+先验光压模型^[13]。

表 7 BDS-3 MEO 卫星水平 PCO 模型^[14]

Tab.7 Horizontal PCO model of the BDS-3 MEO satellites^[14]

厂商	x-offset	y-offset	z-offset
CAST	-224.48	-9.34	2 274.22
SECM	24.00	-7.81	1 520.94
C24	-224.48	-9.34	2341.41
C29	24.00	-7.81	1 695.62

表 8 BDS-3 MEO 卫星 PCV 模型^[14]

Tab.8 PCV model of the BDS-3 MEO satellites^[14]

nadir/(°)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
PCV	3.20	1.57	1.68	0.73	-0.75	-1.16	-1.66	-1.74	-1.73	-1.80	-1.90	-1.08	1.27	3.36

为了验证精化的 PCC 和北斗官方发布的 PCO 模型对精密定轨的影响,本文分别利用两套 PCC 模型进行精密定轨,采用卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 检核轨道精度。SLR 是一种在光学频率范围内工作的高精度激光测距技术,其与 GNSS 技术独立,只需要进行相对论效应、对流层延迟、卫星质心相对的激光反射器阵列 (laser retroreflector array, LRA) 的偏移量改正。考虑到 SLR 测距精度可达 1 cm,高于 GNSS 卫星定轨精度,因此被广泛用于评估 GNSS 轨道的精度。SLR 残差是 SLR 观测距离与 GNSS 解算的轨道计算距离之间的差异,BDS 卫星的 LRA 偏移量由中国卫星导航系统管理办公室发布(表 9),SLR 观测数据均由 ILRS (International Laser Ranging Service) 公开提供。

表 9 BDS 卫星激光棱镜 LRA 偏移量

Tab.9 The LRA offsets of the BDS satellites

PRN	X	Y	Z
C08	-0.420 300	-0.573 500	1.100 000
C10	-0.426 700	-0.573 200	1.099 500
C11	-0.426 400	-0.537 900	1.100 000
C13	-0.421 500	-0.572 600	1.100 000
C20	0.594 700	-0.084 560	1.264 440
C21	0.598 600	-0.086 560	1.265 040
C29	0.609 500	0.426 000	0.614 200
C30	0.609 700	0.427 300	0.615 300

SLR 检核结果的均值、STD、RMS 见表 10。对于 MEO 卫星,不同的 PCC 模型会对 SLR 残差^[25-26]的均值产生影响,影响范围为 1~3 cm,对于 IGSO 卫星 SLR 残差均值影响小于 0.7 cm。由于 BDS 卫星精密定轨均未加入对 SLR 均值产

生一定影响的地球反照辐射压模型,很难通过 SLR 均值来客观判断 PCC 模型的精度。因此,忽略 SLR 均值的变化,仅以 STD 为 PCC 模型的评价标准。

表 10 采用精化的 PCC 模型与北斗官方发布的地面标定 PCO 的 SLR 检核结果对比

Tab.10 Comparison of SLR results between refined PCC and ground-calibrated PCO model published by the BeiDou official

PRN	北斗官方发布 PCO 模型			精化的 PCC 模型		
	均值	STD	RMS	均值	STD	RMS
C08	-0.029	0.072	0.077	-0.024	0.048	0.054
C10	-0.003	0.066	0.066	0.010	0.044	0.045
C11	-0.001	0.045	0.045	-0.032	0.034	0.047
C13	0.007	0.070	0.070	0.002	0.064	0.064
C20	0.036	0.040	0.053	0.026	0.036	0.044
C21	0.038	0.040	0.055	0.026	0.032	0.041
C29	-0.008	0.038	0.039	-0.022	0.033	0.040
C30	-0.010	0.043	0.044	-0.020	0.039	0.044

整体而言,基于精化的 PCC 模型的精密轨道 SLR 残差 STD 小于采用北斗官方发布 PCO 标定值。对于 BDS-2 卫星,采用精化的 PCC 模型使得 C13 卫星 STD 改善了 0.6 cm(8.6%),其余卫星 STD 改善了 1.1~2.4 cm(24.4%~33.3%)。对于 BDS-3 CAST 卫星,精化的 PCC 模型的 STD 相比北斗官方 PCO 标定值改善了 0.4~0.8 cm(10.0%~20.0%)。对于 BDS-3 SECM 卫星,精化的 PCC 模型的 STD 改善了 0.4~0.5 cm(9.3%~10.2%)。对于 C10、C11、C29、C30 卫星精化的 PCC 模型的 SLR 均值有变大,考虑到均值存在正负相抵现象,因此 RMS 参数相比均值更能反映误差的统计特性。从 RMS 结果看出 C10 卫星有较大提升,C11、C29、C30 卫星采用精化的 PCC 和北斗官方发布的 PCO 模型结果量级相当。另一方面,考虑到在定轨中并未考虑地球反照辐射压、天线功率辐射等对 SLR 检核的均值可产生常量影响的摄动力模型,特别是对于 C10、C11 等卫星,其采用官方发布的 PCO 模型的均值几乎为零,待加入这些摄动模型后 SLR 检核均值的“0”势必会有增大的趋势,因此目前很难用均值的变化客观判定 PCC 模型精度。综合 SLR 检核的 STD 和 RMS 结果可得,整体而言,利用在轨估计 PCC 模型定轨相比利用 PCO 地面标定值定轨具有更高的精度。

3.2 BDS-2/3 卫星联合精密定位

PCO 的 z -offset 参数与测站高程、对流层延迟参数高度相关。因此,本节基于两套 PCC 模型的精密轨道和卫星精密钟差进行精密单点定位(precise point positioning, PPP)处理^[27],采用 BDS 单系统 PPP 结果相对于 GPS 系统 PPP 结果在 U 方向的偏差来评价 PCC 模型的精度。为了排除解算软件自治性对结果的影响,采用第三方独立软件 GAMP(GNSS analysis software for multi-constellation and multi-frequency Precise positioning)^[28]进行 BDS 系统精密单点定位,具体的数据处理策略和误差模型设置等如表 11 所示。

表 11 BDS-2/3 精密单点定位处理策略

类型	模型描述
测站	47 个能够接收到 BeiDou 观测数据的 IGS/MGEX 测站
时段	2019 年年积日 260~290 天
采样间隔/s	30
解算模式	PPP 静态解
观测值类型	非差相位和码观测值 高度角定权;截止高度角为 7°
弧长	每天 01:15-22:45
电离层延迟	BDS-2/3;B1I/B3I 无电离层组合 2 h 为间隔估计 ZTD 参数
对流层延迟	SAAS+GMF 以 2 h 为间隔估计 ZTD 参数
接收机天线	BDS B1I/B3I 分别采用 igs14_2062.atx 模型 GPS 频点 L1/L2 的 PCC 模型代替
BeiDou 卫星天线	精化的 PCC 模型(表 6、表 5) 北斗官方发布的 PCO 标定值(表 2)
模糊度参数	浮点解
BDS-2 伪距系统性偏差	模型改正 ^[29]

随机选取 2019 年 270 天 POTS 测站的定位序列进行展示(图 6),考虑到精密轨道插值的端点效应,将 24 h 弧长去掉了开始和结束的 75 min。卫星钟差为 300 s 采样间隔,进行 PPP 时作插值为 30 s 的处理。图 6(a)为基于北斗官方 PCO 标定值的精密轨道、精密钟差的 PPP 定位结果相比于对应 IGS SINEX 周解在 ENU 方向的偏差序列;图 6(b)为基于精化的 PCC 模型的精密轨道和精密钟差的 PPP 定位结果在 ENU 方向的偏差序列;图 6(c)中红色线为可观测的 BDS-2/3 卫星数目,绿色线为定位的位置精度因子(position dilution of precision, PDOP)值。

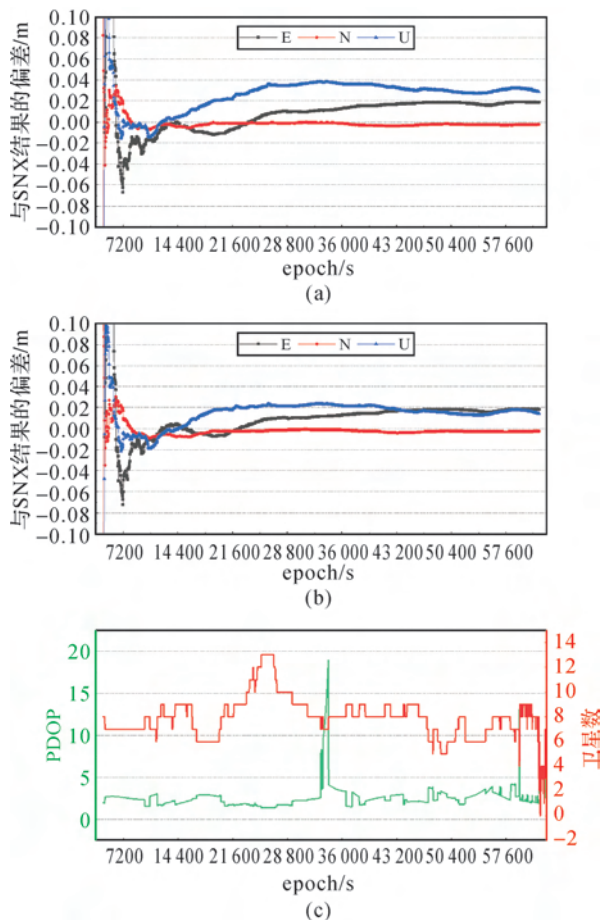


图 6 POTS 测站采用官方发布 PCO 和精化的 PCC 对 BDS 定位的影响

Fig.6 Influence of using officially released PCO and refined PCC model on BDS PPP for POTS station

POTS 站采用北斗官方发布的 PCO 标定值和精化的 PCC 模型定位结果在 ENU 方向的偏差分别为： $(0.019\ 4, -0.002\ 1, 0.030\ 3)$ m 和 $(0.018\ 9, -0.002\ 4, 0.016\ 3)$ m。在 E 和 N 方向的差异较小为 0.5 mm 和 0.3 mm；精化的 PCC 模型相比北斗官方 PCO 标定值在 U 方向有显著的提升 14 mm(46.2%)。

不失一般性,本节对 47 个站单天 RMS 求平均得到各测站的月平均 RMS,各站采用两种 PCC 模型的定位结果在 U 方向的偏差如图 7 所示,各个站采用两种 PCC 的 BDS 单系统 PPP 在 ENU 方向的平均偏差见表 12。整体而言,采用精化的 PCC 所得的 BDS 单系统 PPP 结果相比 SINEX 周解在 U 方向偏差相比采用北斗官方发布的 PCO 标定值有显著的提升。

从各站在 ENU 方向的平均 RMS 可以看出,精化的 PCC 模型相比北斗官方发布的地面标定 PCO 模型在 E 方向精度提升了 0.14 mm (8.8%);在 N 方向精度降低了 0.15 mm (17.5%);在 U 方向精度显著提升了 9.5 mm (37.2%)。从 PCC 模型定位结果可以看出,不准确的影响主要在 U 方向,精化的 PCC 使得定位在 U 方向精度提升,得益于在轨估计的 ε -offset 和 PCV 参数。

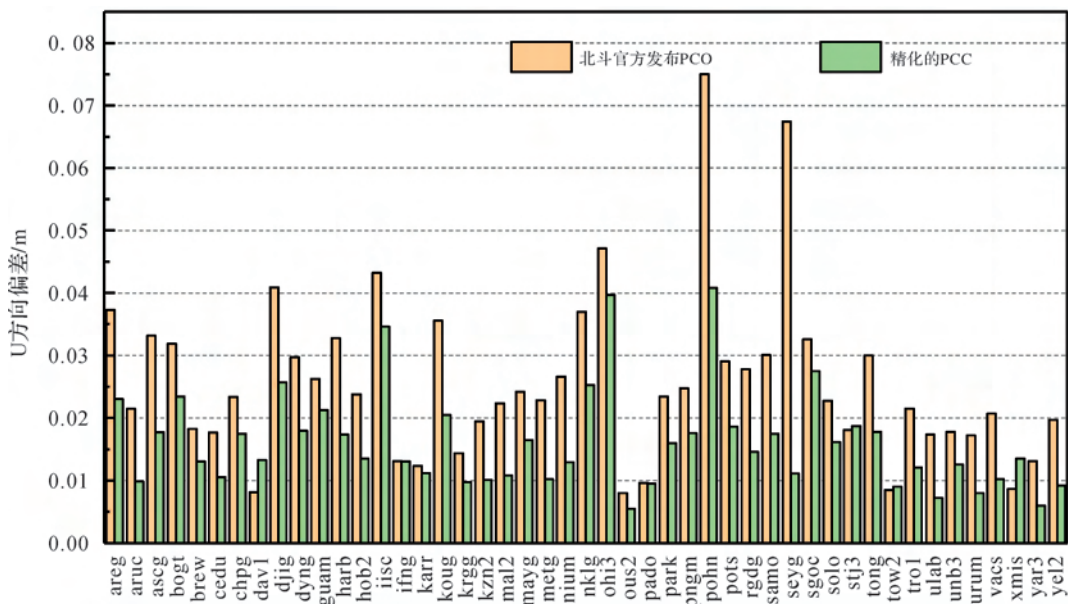


图 7 基于 BDS 卫星不同 PCC 模型的精密定位结果

Fig.7 Bias of PPP results based on different BeiDou satellite PCC model in the U direction

表 12 BDS 单系统 PPP 结果在 E、N、U 方向的偏差统计

Tab.12 Bias of BeiDou PPP results in the E、N、U

Direction m

PCC 模型	E	N	U
北斗官方发布 PCO	0.015 4	0.008 8	0.025 7
精化的 PCC	0.014 1	0.010 3	0.016 1

4 结 论

(1) 针对 BDS-2/3 卫星联合定轨问题, 研究给出改进的 PCV 和 z -offset 参数估计方法精化了 BDS-2 IGSO 和 MEO 卫星 B1I/B3I 组合 PCC 模型。

(2) 采用精密定轨对比分析了精化的 PCC 模型和北斗官方发布的地面标定 PCO 模型对精密定轨的影响, 结果表明: 本文精化的 BDS-2 卫星 PCC 模型使得精密轨道的 SLR 残差 STD 改善了 0.6~2.4 cm, 改善百分比约为 8.6%~33.3%; 在一定程度上, 利用在轨估计 PCC 模型定轨相比利用 PCO 地面标定值定轨具有更高的精度。

(3) 采用精化的 BDS-2/3 卫星精密和精密钟差的定位结果表明: 精化的 PCC 模型相比北斗官方发布的地面标定 PCO 模型平面精度相当, 但在 U 方向精度显著提升了 9.5 mm(37.2%)。

参考文献:

- [1] YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 614-624.
- [2] ZHAO Qile, WANG Chen, GUO Jing, et al. Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 4.
- [3] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions (2010)[R]. Technical Report. Germany: IERS, 2010.
- [4] REBISCHUNG P, SCHMID R. IGS14/igs14.atx: a new Framework for the IGS Products[C]// American Geophysical Union, Fall Meeting. San Francisco, CA: AGU, 2016.
- [5] SCHMID R, DACH R, COLLILIEUX X, et al. Absolute IGS antenna phase center model igs08.atx: status and potential improvements[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(4): 343-364.
- [6] STEIGENBERGER P, FRITSCH M, DACH R, et al. Estimation of satellite antenna phase center offsets for Galileo[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(8): 773-785.
- [7] 郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
- GUO Jing. The impacts of attitude, solar radiation and function model on precise orbit determination for GNSS satellites[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [8] DILSSNER F, SPRINGER T, SCHÖNEMANN E, et al. Estimation of satellite antenna phase center corrections for BeiDou [C]// *Proceedings of IGS Workshop 2014*. Pasadena, USA, 2014.
- [9] HUANG Guanwen, YAN Xingyuan, ZHANG Qin, et al. Estimation of antenna phase center offset for BDS IGSO and MEO satellites[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(2): 49.
- [10] 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.
- [11] 黄观文, 张睿, 张勤, 等. BDS 卫星天线相位中心改正模型比较[J]. *大地测量与地球动力学*, 2015, 35(4): 658-661.
- HUANG Guanwen, ZHANG Rui, ZHANG Qin, et al. Comparison and analysis of different models of antenna phase center correction of BDS satellites[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2015, 35(4): 658-661.
- [12] SCHMID R, ROTHACHER M. Estimation of elevation-dependent satellite antenna phase center variations of GPS satellites[J]. *Journal of Geodesy*, 2003, 77(7): 440-446.
- [13] YAN Xingyuan, LIU Chenchen, HUANG Guanwen, et al. A priori solar radiation pressure model for BeiDou-3 MEO satellites[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(13): 1605.
- [14] YAN Xingyuan, HUANG Guanwen, ZHANG Qin, et al. Estimation of the antenna phase center correction model for the BeiDou-3 MEO satellites[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(23): 2850.
- [15] MONTENBRUCK O, SCHMID R, MERCIER F, et al. GNSS satellite geometry and attitude models [J]. *Advances in Space Research*, 2015, 56(6): 1015-1029.
- [16] DILSSNER F, SPRINGER T, FLOHRER C, et al. Estimation of phase center corrections for GLONASS-M satellite antennas[J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(8): 467-480.
- [17] BEUTLER G, BROCKMANN E, GURTNER W, et al. Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results[J]. *Manuscript Geodaetica*, 1994, 19: 367-386.
- [18] BOEHM J, HEINKELMANN R, SCHUH H. Short note: a global model of pressure and temperature for geodetic applications[J]. *Journal of Geodesy*, 2007, 81(10): 679-683.
- [19] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of at-

- mospheric refraction. Part II. Refraction corrections in satellite geodesy[J]. Bulletin Géodésique, 1973, 107(1): 13-34.
- [20] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): a new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L07304.
- [21] GE M, GENDT G, DICK G, et al. Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(1-3): 103-110.
- [22] 彭汉兵, 杨元喜, 王刚, 等. 星蚀期北斗卫星轨道性能分析——SLR 检核结果[J]. 测绘学报, 2016, 45(6): 639-645. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150637.
- PENG Hanbing, YANG Yuanxi, WANG Gang, et al. Performance analysis of BDS satellite orbits during eclipse periods: results of satellite laser ranging validation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(6): 639-645. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150637.
- [23] 胡新乔, 刘万科, 刘晓磊, 等. 北斗天线相位中心改正策略及其对定位精度的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(11): 1137-1142.
- HU Xinqiao, LIU Wanke, LIU Xiaolei, et al. Approach to BDS antenna phase center correction and its influences on positioning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(11): 1137-1142.
- [24] 苏牡丹, 赵齐乐, 郭靖, 等. 接收机端天线相位中心标定及其对北斗导航卫星精密定轨的影响[J]. 测绘学报, 2018, 47(S1): 78-85. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180324.
- SU Mudan, ZHAO Qile, GUO Jing, et al. Phase center calibration for receiver antenna and its impact on precise orbit determination of BDS satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(S1): 78-85. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20180324.
- [25] URSCHL C, BEUTLER G, GURTNER W, et al. Orbit determination for GIOVE-A using SLR tracking data[C]// Proceedings of the 15th International Workshop on Laser Ranging. Canberra, Australia: AIUB, 2006.
- [26] PEARLMAN M R, DEGNAN J J, BOSWORTH J M. The international laser ranging service[J]. Advances in Space Research, 2002, 30(2): 135-143.
- [27] ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- [28] ZHOU Feng, DONG Danan, LI Weiwei, et al. GAMP: an open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 33.
- [29] WANNINGER L, BEER S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy[J]. GPS Solutions, 2015, 19(4): 639-648.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-06-30

修回日期: 2020-08-21

第一作者简介: 张勤(1958—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事 GNSS 和 InSAR 的理论和应用研究。

First author: ZHANG Qin (1958—), female, PhD, professor, PhD supervisor, majors in the theoretical and application research of GNSS and InSAR.

E-mail: zhangqinle@263.net.cn

引文格式:施闯,张卫星,曹云昌,等.基于北斗/GNSS的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析[J].测绘学报,2020,49(9):1112-1119. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200339.
SHI Chuang, ZHANG Weixing, CAO Yunchang, et al. Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and relationships with precipitation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1112-1119. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200339.

基于北斗/GNSS的中国-中南半岛地区大气水汽气候特征及同降水的相关分析

施 闯¹,张卫星²,曹云昌³,楼益栋²,梁 宏³,范 磊¹,SATIRAPOD⁴,TRAKOLKUL⁴

1. 北京航空航天大学卫星导航与移动通信融合技术工业与信息化部重点实验室,北京 100191; 2. 武汉大学卫星导航定位技术研究中心,湖北 武汉 430079; 3. 中国气象局气象探测中心,北京 100081; 4. 泰国朱拉隆功大学测量工程学院,泰国 曼谷 10330

Atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region based on BeiDou/GNSS and relationships with precipitation

SHI Chuang¹, ZHANG Weixing², CAO Yunchang³, LOU Yidong², LIANG Hong³, FAN Lei¹, CHALERMCHON Satirapod⁴, CHOKCHAI Trakolkul⁴

1. Laboratory of Navigation and Communication Fusion Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Beihang University, Beijing 100191, China; 2. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China; 4. Department of Survey Engineering, Chulalongkon University, Bangkok 10330, Thailand

Abstract: The historical BeiDou/GNSS observations from 2006 to 2016 at stations over Indo-China region were reprocessed with consistent models and strategies. Precipitable water vapor (PWV) products were then retrieved, and were used to study the atmospheric water vapor climatological characteristics over Indo-China region, including the average PWV, PWV annual amplitudes and PWV semi-annual amplitudes. The climatological characteristics of the PWV are found to be mainly affected by the station latitude, station altitude and the monsoon system in this region. Relationship between PWV and precipitation were explored in the study region. A clear correlation is found and the correlation coefficient (R) generally decreases with the station latitude where R can reach 0.8 in Yunnan Province while decrease to about 0.2 in the southern Thailand region close to the equator. In addition, PWV and precipitation monthly anomaly also show weak positive correlation in this region with R of about 0.2~0.4.

Key words: Indo-China region; BeiDou/GNSS; precipitable water vapor; precipitation; climate change

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41961144015; 41804023; 41774036)

摘 要: 本文采用统一的处理模型和处理策略对中国-中南半岛地区地基北斗/GNSS测站 2006—2016 年历史观测数据进行高精度重处理和水汽反演,获得近 10 年的大气可降水含量(PWV)产品。基于北斗/GNSS PWV 产品,研究了该地区大气水汽平均含量、年周期振幅和半年周期振幅等气候特征,发现这些特征主要受到了测站纬度、高程以及季风的影响。通过分析 PWV 同并址气象站降水观测的关联特性,揭示了该地区大气水汽含量同降水相关性随测站纬度减小而降低的特点(在云南相关系数可达 0.8,在靠近赤道的泰国南部相关系数约为 0.2)。此外,PWV 和降水的距平值相关分析表明相比于历史同期,大气水汽含量较高的月份在一定程度上对应着降水异常偏高,两者相关系数为 0.2~0.4。

关键词: 中国-中南半岛地区; 北斗/GNSS; 大气可降水含量; 降水; 气候变化

基金项目:国家自然科学基金(41961144015;41804023;41774036)

中国-中南半岛经济走廊地区(简称中国-中南半岛地区)属于典型的季风气候,干湿季节显著,中国-中南半岛是孟加拉湾水汽输送中国的通道,对于中国气候具有极其重要的影响^[1-2]。泰国、缅甸和越南等国位列近20年(1997—2016)受极端降水天气引发的洪涝和滑坡灾害威胁最严重的国家^[3-4]。在全球变暖背景下,全球各地极端天气的频数和强度有进一步增大的趋势^[5]。中国-中南半岛地区是全球重要的粮食产区,频发的极端降水天气给该地区的经济和社会发展以及全球的粮食安全带来了严重的破坏,也对中国-中南半岛经济走廊基础设施建设的安全和效益形成了巨大的威胁。开展中国-中南半岛地区极端降水天气形成和变化机制研究及预警预报工作,对于深入理解全球变暖背景下区域天气系统的响应机制、保障地区经济建设和社会发展具有十分重要的科学价值和现实意义。

中国-中南半岛地区极端强降水量或暴雨强降水量在总降水量中的比重总体上有所增加,降水强度也有一定的增强,但是不同区域的变化呈现出空间上的不一致性^[6-9]。极端天气气候事件的变化规律是全球气候变化背景下气象和气候科学研究的重点和热点^[10-11]。

目前对极端降水天气的预警预报和未来规律预测仍然是世界性难题。导致极端降水的因子非常复杂,包括大气环流、大气稳定性、潜热释放、水汽辐合、抬升运动、云的范围和中尺度组织的强度、气溶胶作用和复杂地形作用等^[12-13]。虽然降水预报水平从20世纪60年代至今取得很大进展,但目前国际上对大于1吋(1吋=25.4 mm)/24 h降水预报技术评分(threat score)不足0.4(1.0表示完美预报)^[14],对水汽输送机理认识不足是制约极端降水天气预报精度的重要原因^[12]。

大气水汽在极端降水天气的形成和发展过程中扮演着十分关键的角色。一方面,大气水汽是极端降水天气形成的主要物质基础;另一方面,水汽在大气中通过相态转化和输送等过程能显著改变大气能量分布,深刻影响大气能量系统平衡,为极端降水天气的形成提供了重要的动力条件。观测和研究大气水汽在不同时间尺度上的变化特性,对于深入理解极端降水天气的形成机制和预警预报及未来变化规律预测十分关键。

大气水汽观测有多种技术手段,目前常用的主要有高空无线电探空仪、地基微波辐射计、星基辐射计、星基无线电掩星和地基GNSS反演等手段。相比于其他手段,地基GNSS具备全天候、高精度、低费用、高时间分辨率和均一性好等优势^[15-16],近些年已成为大气水汽观测的一种重要手段^[17]。地基GNSS也被全球气候观测系统(GCOS)高空参考观测网络(GRUAN)列为水汽I类观测手段^[18]。

本文采用统一的处理模型和处理策略对中国-中南半岛地区数十年的地基北斗/GNSS历史观测资料进行高精度重处理并反演获得该地区上空大气可降水含量(PWV)产品。基于PWV产品,开展中国-中南半岛地区大气水汽含量气候学特征分析。结合并址气象观测站的降水数据,通过时序分析,研究大气水汽含量同降水的变化关系。

1 数据及处理方法

本文所使用到的各类数据,包括地基北斗/GNSS观测数据、大气气象再分析资料以及地面气象站降水数据。

1.1 北斗/GNSS数据及处理策略

本文的研究区域为5°N—26°N、95°E—116°E(图1),主要覆盖了中南半岛和我国广东、广西、云南、海南以及南海的部分地区。研究区域内使用的北斗/GNSS测站包括中国大陆构造环境监测网络(CMONOC)(简称陆态网)中的42个测站和泰国公共工程和城乡规划部(DPT)网络中的11个测站^[19],共计53个测站。研究时段为2006-01-01—2016-12-31。需要说明的是陆态网中的二期测站从2011年起才提供观测。图1中标注了研究时段内北斗/GNSS观测时段超过10年的测站名称(共16个)。黑框标注的是陆态网中包含我国北斗卫星导航系统观测的测站(共7个,从2014年起提供北斗观测数据)。文献[20—21]通过评估指出采用北斗数据反演的可降水产品与GPS结果精度相当,且北斗+GPS联合处理结果精度优于单北斗或单GPS。因此,对于图1中标注的7个含北斗数据的陆态网测站采用北斗+GPS数据联合处理方式,对于其他测站在处理中采用GPS观测数据。

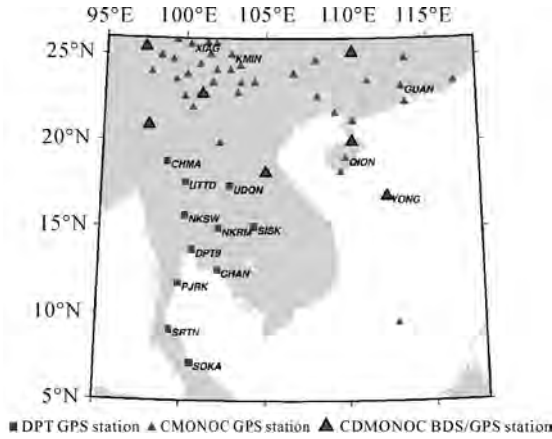


图1 北斗/GNSS 测站地理分布示意图

Fig.1 Geographical distribution of BeiDou/GNSS stations

为了保证北斗/GNSS 处理结果在时域上的均一性,本文采用统一的处理模型和处理策略对研究范围内的北斗/GNSS 历史观测资料进行了高精度重处理。处理策略如表 1 所示,其中,卫星轨道和钟差产品采用了 IGS 第 2 次重处理 (repro2) 中 ESA 的重处理产品 (ES2),避免了 IGS 日常事后精密产品由于参考框架和处理策略的更新可能给北斗/GNSS 数据处理结果带来的非均一性问题。由于 ES2 产品只提供到 2014 年 4 月 19 日,对于 2014 年 4 月 19 日之后使用 ESA 事后精密产品 (不含北斗观测的测站处理) 或 WUM 事后精密产品 (含北斗观测的测站处理),从 ES2 切换到 ESA 产品或 WUM 产品对 GNSS 数据处理结果的影响可忽略不计^[22]。此外,在本文的北斗/GNSS 数据处理中,采用了最新的投影函数 VMF3(1°×1°分辨率格网产品)^[23]。VMF3 是基于气象再分析资料 ERA-Interim 构建的,相较于基于业务化气象资料构建的 VMF1,在长时间尺度上具有更好的一致性,能够更好地保证处理结果的长期均一性。

1.2 气象再分析资料 ERA-Interim

ERA-Interim 是由欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 发布的一款气象再分析资料^[24]。本文 ERA-Interim 主要有两个用处:提供北斗/GNSS 水汽反演所需的测站处气压和加权平均温度 (T_m); 计算基于 ERA-Interim 的北斗/GNSS 测站处 PWV,用于同北斗/GNSS PWV 比较以剔除北斗/GNSS PWV 序列中的异常值。

本文采用的 ERA-Interim 资料为 6 h 分辨率的气压层产品 (共 37 层),空间分辨率为 $0.75^\circ \times$

0.75° 。每个气压层上使用的参数场包括温度 (T)、气压 (P)、位势高 (GH) 和比湿 (q)。根据北斗/GNSS 测站的位置,水平方向采用双线性内插方法,高程方向温度和气压分别采用线性和指数补偿气压层和测站高程差异,并通过积分和时间内插获得北斗/GNSS 测站处逐小时分辨率气压和 T_m 。具体的计算方法和流程可参考文献 [25—26]。

表 1 北斗/GNSS 数据处理策略

Tab.1 Data processing strategy

		北斗+GPS 或 GPS 双频无电离层组合 (具体各个测站卫星系统数据使用见图 1)
观测值	观测值类型	北斗+GPS 或 GPS 双频无电离层组合 (具体各个测站卫星系统数据使用见图 1)
	观测时段	2006-01-01—2016-12-31
	采样间隔	300 s
	加权策略	$p = 1, e > 30^\circ; p = \sin^2 e, e \leq 30^\circ$
	相位缠绕	改正
改正模型	潮汐负荷	地球潮汐、极潮、海潮改正
	相对论效应	改正
	ZTD 先验模型	VMF3+Saastamoinen
	投影函数	VMF3(1°×1°)
	卫星轨道	2006—2014; ES2 产品
参数估计策略	钟差产品	2014—2016; ESA 产品/WUM 产品
	ZTD 随机模型	分段常数 (1 h) + 段间随机游走 (20 mm/h ⁻¹²)
	水平梯度	分段常数 (6 h) + 段间随机游走 (5 mm/h ⁻¹²)
	随机模型	分段常数 (6 h) + 段间随机游走 (5 mm/h ⁻¹²)
	测站坐标	天常数
	接收机钟差	白噪声
	模糊度参数	浮点解

获得测站处的气压后,采用 Saastamoinen 模型估算测站处的天顶干延迟 (ZHD)^[27]。从北斗/GNSS 数据处理估算获得的 ZTD 中扣除 ZHD,得到天顶湿延迟 (ZWD),并采用式 (1) 反演获得测站处的大气可降水总含量 (PWV)

$$PWV = \frac{10^6}{\rho_w R_w \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right)} ZWD \quad (1)$$

式中, k'_2 (17 ± 10 K/hPa) 和 k_3 ($3.776 \pm 0.004 \times 10^5$ K²/hPa) 为大气折射率常数; R_w 为水汽气体常数 (461.51 J/(K×kg)); ρ_w 为液态水密度 (1000 kg/m³); T_m 为加权平均温度 (单位为 K)。

而基于 ERA-Interim 气压层产品积分计算 PWV 的公式为

$$PWV = \frac{1}{\rho_w} \int \frac{q}{g} dP \quad (2)$$

式中, g 为地球重力加速度,需要考虑纬度和高度的变化。

对各个测站处的北斗/GNSS 和 ERA-Interim 逐小时 PWV 产品做差,剔除超出 4 倍差值中误差的北斗/GNSS PWV 异常点,最终获得研究区域内各个北斗/GNSS 的 PWV 时间序列。

1.3 地面降水数据

北斗/GNSS 测站和地面气象测站通常不共址。本文采用平面距离在 30 km 以内且高程差异在 100 m 以内的原则对北斗/GNSS 测站和地面气象测站进行匹配。若北斗/GNSS 测站同时匹配到多个气象站,则选择距离最近的一个测站作为匹配测站。按此原则,最终有 38 个北斗/GNSS 测站匹配到地面气象测站,包括 27 个 CMONOC 测站和 11 个 DPT 测站。中国地区使用的降水资料为逐小时累积降雨量观测,资料的时段为 2006—2014 年,泰国地区使用的降水资料为逐日累积降雨量观测,资料的时段为 2007—2016 年。

2 结果分析

2.1 PWV 周期信号提取

研究区域整体为季风气候区域,因此本文主要顾及 PWV 时间序列中的周年和半年周期信

号。采用以下模型对 PWV 时间序列进行拟合^[28]

$$y(t) = A_0 + A_1 t + A_2 \sin(2\pi t + P_1) + A_3 \sin(4\pi t + P_2) + B_1 \cdot QBO_1(t) + B_2 \cdot QBO_2(t) + B_3 \cdot SF(t) \quad (3)$$

式中, $y(t)$ 即为 t 时刻(以年为单位表示)的 PWV 值; A_0 、 A_1 、 A_2 和 A_3 分别为常数项、趋势项、周年项和半年项的系数; P_1 与 P_2 分别为周年和半年相位; QBO_1 和 QBO_2 分别为 30 hPa 和 50 hPa 高度处的标准化准两年振荡(quasi-biennial oscillation)参数(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices>),主要用于考虑 QBO 现象对水汽变化的周期影响; B_1 与 B_2 为 QBO 相应的尺度系数; SF 为太阳光照通量参数(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/solar.data>),用于考虑太阳光照变化对水汽的影响; B_3 为 SF 对应的尺度系数。在采用式(3)拟合时,为了保证拟合结果的可靠性,要求北斗/GNSS 的 PWV 产品覆盖天数不少于 2 年,对不符合要求的测站不予拟合。图 2 给出了 8 个北斗/GNSS 代表测站 PWV 时间序列以及采用式(3)模型拟合的结果,其中 PWV 时间序列中缺失的部分是由于北斗/GNSS 数据缺失或异常值剔除造成的。

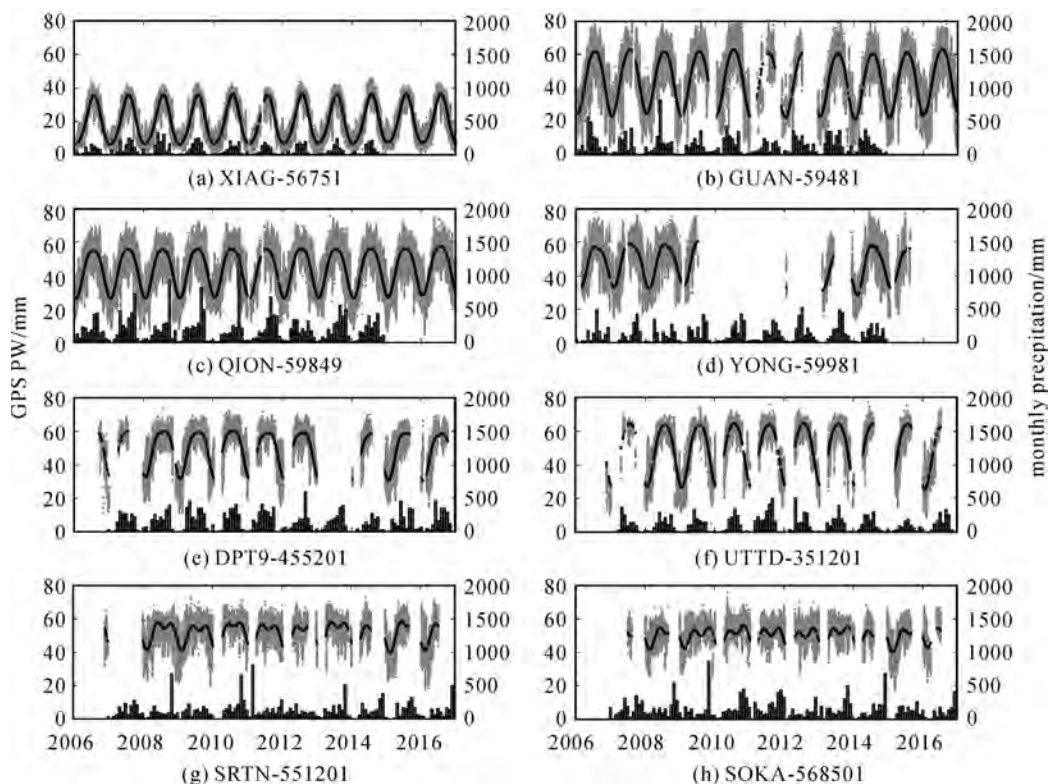


图 2 8 个北斗/GNSS 测站处 PWV 时间序列(灰点)、PWV 模型拟合值(黑点)和并址气象站月累积降水量(黑柱)
Fig.2 PWV time series (gray dots), PWV model values (black dots) and collocated monthly precipitation (black bars) at eight BeiDou/GNSS stations

2.2 大气水汽含量气候分布特征分析

基于拟合模型计算研究时段(即 2006—2016 年)的 PWV 模型值,求取研究时段 PWV 模型值的平均值作为各北斗/GNSS 测站处的 PWV 年均值。年均值的地理分布如图 3(a)所示,在泰国的南部年均值可达 50 mm 左右,而在我国的云南地区年均值为 20~30 mm。PWV 年均值整体上呈现出较为典型的空间地理分布特征,即 PWV 年均值主要同测站的高程和纬度相关。图 4 给出了各个北斗/GNSS 测站 PWV 年均值同测站高程和测站纬度的变化关系。容易看出,随着测站高度的增大,PWV 年均值呈现出近似于线性的下降趋势,两者变化的皮尔逊相关系数达 -0.974 。在纬度变化方面,PWV 年均值同纬度变化的皮尔逊相关系数为 -0.783 ,即 PWV 年均值在低纬度地区总体上要高于高纬度地区。这主要是由于低纬度地区的气温一般要高于高纬度地区,气温的升高可使大气蓄水能力增强,在水汽来源较为充足的情况下,大气水汽的含量更高。

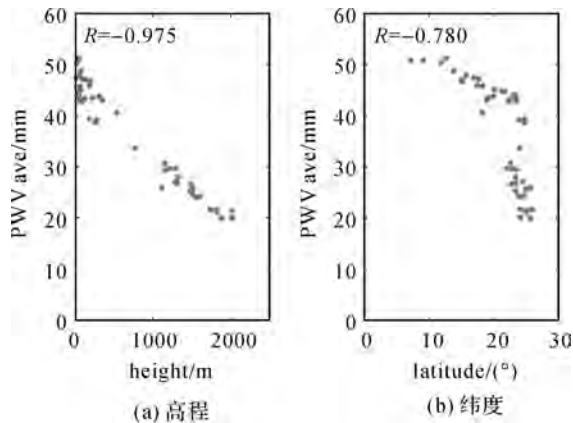


图 4 PWV 年均值随北斗/GNSS 测站高程与纬度的变化
Fig.4 Variations of annual average PWV with station altitude and latitude

中国-中南半岛地区总体上属于季风气候类型,受到了印度季风、东亚季风、西太平洋季风等季风子系统的综合作用。图 3(b)给出了各个北斗/GNSS 测站处 PWV 年振幅的地理分布。结合图 2 中的 8 个典型北斗/GNSS 测站的 PWV 时间序列,不难看出在季风的影响下大部分测站大气水汽含量的周年变化信号较为显著,在夏季大气水汽含量明显高于冬季,在广西和广东部分地区 PWV 年振幅可超过 20 mm。年振幅的地理分布整体上呈现出高纬度到低纬度下降的特征,在泰国的南部,例如图 2(g)和图 2(h)所示的

SOKA 和 SRTN 站,PWV 常年保持在较高水平,年振幅在 10 mm 以内。这主要是因为泰国南部地区气温常年较为稳定,且地理位置临海,水汽来源充足,因此水汽含量年变化幅度并不明显。

类似于年振幅结果,图 5(a)给出了各个北斗/GNSS 测站处的半年振幅地理分布情况。半年振幅的地理分布总体上表现出同半年振幅地理分布相反的特征,即随着测站纬度的下降,半年振幅大体上呈增大的趋势。在云南南部 PWV 半年振幅不足 2 mm,而在泰国南部可达 4~5 mm。这种分布同泰国的气候特征息息相关,泰国大部分地区大气水汽含量较高的夏季(3—5 月)和雨季(6—10 月)的时长要明显长于水汽含量较低的凉季(11—次年 2 月)。对比图 2(a)的云南 XIAG 站和图 2(g)的泰国 SRTN 站可以看出,云南 XIAG 站 PWV 在一年中变化非常平顺,而 SRTN 站 PWV 高值持续的时间要明显长于低值持续时间。这种非对称特性是导致低纬度测站半年周期信号更为显著的主要原因。

2.3 大气水汽含量同降水变化关联分析

大气水汽含量及变化同降水过程息息相关。大气水汽是降水形成的主要物质基础之一,大气水汽的变化带来的大气潜热能的储存和释放为降水过程提供重要的动力因子。图 5(b)给出了北斗/GNSS 测站 PWV 月均值同并址气象站月累积降水量的相关系数地理分布情况。结合图 2 中的 8 个典型北斗/GNSS 测站并址气象站的月累积降水量的时间序列,可以看出 PWV 同降水的相关系数分布与图 3(b)中的 PWV 年振幅地理分布较为相似。随着测站纬度的下降总体呈减小的趋势,在云南地区相关系数在 0.6 以上,而在泰国南部相关系数小于 0.2。这主要是因为,在纬度相对较高的云南等地区,大气水汽同降水的季节变化具有较好的一致性。在夏季由于副热带高压的持续影响,暖冷锋在此区域交会,并保持较长时间停留,导致降水增多。同时夏季气温升高,大气蓄水能力增强,且季风系统将海洋的湿润空气源源不断地输送到该区域,大气水汽含量达到峰值。而在纬度较低的泰国南部,大气水汽常年保持较高含量,季节变化特征明显更弱,在该地区影响降水的主要因素为大气动力因子,而不再是大气水汽含量,因此在低纬度地区两者相关性明显下降。

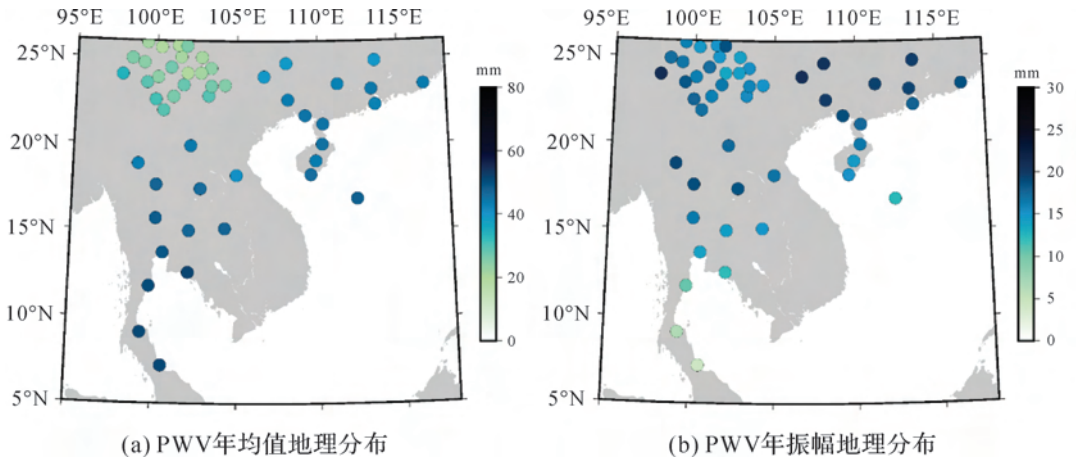


图 3 PWV 年均值与年振幅的地理分布

Fig.3 Distribution of annual average PWV and PWV annual amplitude

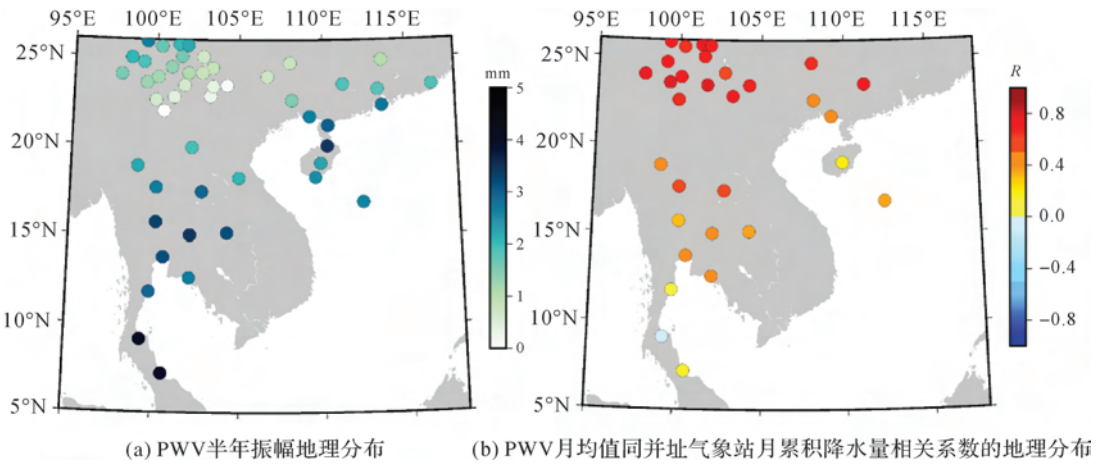


图 5 PWV 半年振幅以及月均值同降水量相关系数地理分布

Fig.5 Distribution of PWV semi-annual amplitudes and PWV-monthly precipitation correlation coefficients

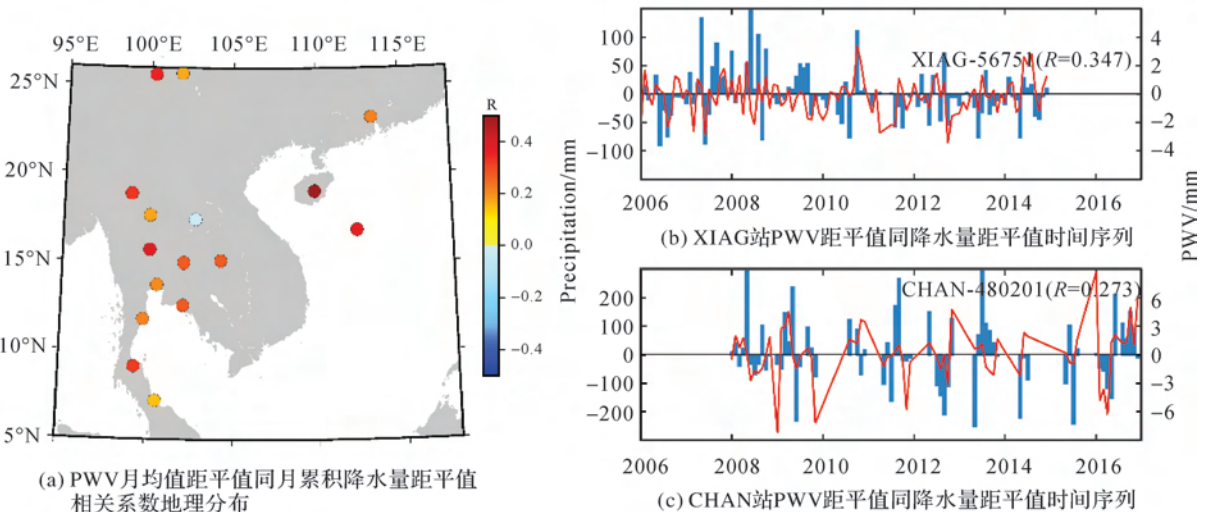


图 6 PWV 月均值与月累积降水量距平值的相关特征

Fig.6 Correlation between PWV and monthly precipitation anomaly

水汽是大气中含量最为丰富的温室气体,加之大气气温和水汽含量的正相关性(理论上满足 Clausius-Clapeyron 方程),大气水汽含量的变化对大气暖化具有很强的正反馈作用。已有的一些研究指出,在全球暖化背景下,水汽含量的变化同极端降水天气频率和强度的变化具有较强的关联性^[5],因此分析大气水汽含量异常同降水异常的关联对于气候分析和极端降水天气的长期规律研究具有重要意义。图 6(a)给出了北斗/GNSS 观测跨度超过 10 年的 16 个北斗/GNSS 测站处 PWV 月均值距平值同月累积降水量距平值的相关系数地理分布,图 6(b)和图 6(c)选取了两个代表测站(云南 XIAG 站和泰国 CHAN 站)的 PWV 和降水量距平值时间序列。研究区域内大部分测站的 PWV 和降水量距平值的相关系数为 0.2~0.4,呈现出一定的相关性,即大气水汽含量偏高的月份在一定程度上对应着降水异常偏高。反之,水汽含量偏低的月份在一定程度上对应着降水异常偏低。从图 6(b)和(c)中的两个典型测站处的时间序列也可以观察到这种关联特性。

3 结 论

中国-中南半岛地区是世界重要的产粮区,也是“一带一路”倡议建设的重点地区,但在全球变暖背景下,近些该地区极端降水天气频发,严重威胁了该地区的经济建设和社会发展。本文围绕着大气水汽分布和变化的气候特征及同降水的长尺度关联研究,采用统一一致的数据处理模型和策略对中国-中南半岛地区的地基北斗/GNSS 测站数据进行高精度重处理和水汽反演,获得了该地区数十年的大气水汽含量(PWV)产品。基于该产品,系统地分析了中国-中南半岛地区的 PWV 年均值、年振幅和半年振幅的空间分布特征。结合北斗/GNSS 测站并址气象站的降水数据,讨论了 PWV 同降水的相关特性。主要结论如下:

(1) 该地区大气水汽含量主要同测站高程和纬度相关,相关系数分别为 -0.974 和 -0.783。在泰国的南部年均值达到 50 mm 左右,而在我国的云南地区年均值为 20~30 mm。

(2) 受季风影响,该地区大部分测站上空大气水汽表现出明显的年周期变化,年振幅呈现出高纬度到低纬度下降的特征。在广西和广东部分地区 PWV 年振幅可超过 20 mm,而在泰国南部 SOKA 和 SRTN 站,年振幅在 10 mm 以内。

(3) PWV 半年振幅的地理分布总体上表现出随着测站纬度的下降的特征。在云南南部 PWV 半年振幅不足 2 mm,而在泰国南部可达 4~5 mm,这与泰国南部大气水汽含量在一年中的非对称分布特征有关。

(4) 大气水汽含量同降水具有较为明显的相关性,且随着测站纬度的下降相关性减弱。在云南地区相关系数在 0.6 以上,而在泰国南部相关系数在 0.2 左右;PWV 同降水量的距平值同样具有一定的相关性(相关系数 0.2~0.4),表明相比于历史同期,水汽含量偏多的月份在一定程度上对应着降水异常偏高。

参考文献:

- [1] 徐祥德, 赵天良, LU Chungu, 等. 青藏高原大气水循环特征[J]. 气象学报, 2014, 72(6): 1079-1095.
XU Xiangde, ZHAO Tianliang, LU Chungu, et al. Characteristics of the water cycle in the atmosphere over the Tibetan Plateau[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6): 1079-1095.
- [2] 苗长明, 丁一汇, 郭品文, 等. 水汽输送与江南南部初夏雨季及降水变化的联系[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 72-83.
MIAO Changming, DING Yihui, GUO Pinwen, et al. Linkage of the water vapor transport distribution with the rainy season and its precipitation in the southern regions south of the Yangtze River during the early summer[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2015, 73(1): 72-83.
- [3] LOO Y Y, BILLA L, SINGH A. Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia[J]. Geoscience Frontiers, 2015, 6(6): 817-823.
- [4] ECKSTEIN D, KÜNZEL V, SCHÄFER L. Global climate risk index 2018: who suffers most from extreme weather events? Weather-related loss events in 2016 and 1997 to 2016[R]. Berlin, Germany: German Watch, 2017.
- [5] IPCC. Summary for policymakers[M]//STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2013: 1-29.
- [6] 黄荣辉, 陈际龙, 周连童, 等. 关于中国重大气候灾害与东亚气候系统之间关系的研究[J]. 大气科学, 2003, 27(4): 770-787.
HUANG Ronghui, CHEN Jilong, ZHOU Liantong, et al. Studies on the relationship between the severe climatic disasters in China and the East Asia climate system[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 770-787.
- [7] 张婷, 魏凤英. 华南地区汛期极端降水的概率分布特征[J]. 气象学报, 2009, 67(3): 442-451.

- ZHANG Ting, WEI Fengying. Probability distribution of precipitation extremes during raining seasons in South China[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(3): 442-451.
- [8] 秦大河. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理与适应国家评估报告[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
QIN Dahe. China national assessment report on risk management and adaptation of climate extremes and disasters [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [9] MASUD M B, SONI P, SHRESTHA S, et al. Changes in climate extremes over north Thailand, 1960—2099 [J]. *Journal of Climatology*, 2016, 2016: 4289454.
- [10] 翟盘茂. 全球变暖背景下的气候服务[J]. *气象*, 2011, 37(3): 257-262.
ZHAI Panmao. Climate service under climate warming background[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(3): 257-262.
- [11] 史培军, 孔锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. *地理科学*, 2014, 34(11): 1281-1290.
SHI Peijun, KONG Feng, FANG Jiayi. Spatio-temporal patterns of china decadal storm rainfall[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1281-1290.
- [12] CEC. CalWater 2: precipitation, aerosols, and pacific atmospheric rivers experiment [M]. [S. l.]: California Energy Commission, 2012: 22.
- [13] GUERREIRO S B, FOWLER H J, BARBERO R, et al. Detection of continental-scale intensification of hourly rainfall extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2018, 8(9): 803-807.
- [14] Benjamin S G, BROWN J M, BRUNET G, et al. 100 years of progress in forecasting and NWP applications[J]. *Meteorological Monographs*, 2018, 59: 13.1-13.67. doi: 10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0020.1
- [15] BEVIS M, BUSINGER S, CHISWELL S, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1994, 33(3): 379-386.
- [16] 赵庆志. 地基 GNSS 水汽反演关键技术研究及其应用[J]. *测绘学报*, 2018, 47(3): 424. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2018.20170427.
ZHAO Qingzhi. Studies on the key technologies in water vapor inversion using ground-based GNSS and Its applications[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(3): 424. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20170427.
- [17] YAO Yibin, SUN Zhangyu, XU Chaoqian. Applicability of Bevis formula at different height levels and global weighted mean temperature model based on near-earth atmospheric temperature [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(1): 1-11.
- [18] SEIDEL D J, BERGER F H, DIAMOND H J, et al. Reference upper-air observations for climate: rationale, progress, and plans[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2009, 90(3): 361-369.
- [19] TRAKOLKUL C, SATIRAPOD C. Variations of precipitable water vapor using GNSS CORS in Thailand[J]. *Survey Review*, 2020. DOI: 10.1080/00396265.2020.1713611.
- [20] LI Min, LI Wenwen, SHI Chuang, et al. Assessment of precipitable water vapor derived from ground-based BeiDou observations with Precise Point Positioning approach[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1): 150-162.
- [21] LU Cuixian, LI Xingxing, NILSSON T, et al. Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(9): 843-856.
- [22] GRIFFITHS J. Combined orbits and clocks from IGS second reprocessing[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(2): 177-195.
- [23] LANDSKRON D, BÖHM J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 92(4): 349-360.
- [24] DEE D P, UPPALA S M, SIMMONS A J, et al. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [25] 张卫星. 中国区域融合地基 GNSS 等多种资料水汽反演、变化分析及应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
ZHANG Weixing. Water vapor retrieval, variation analysis and applications over China using ground-based GNSS and multiple data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [26] ZHANG Weixing, LOU Yidong, HAASE J S, et al. The use of ground-based GPS Precipitable water measurements over china to assess radiosonde and ERA-interim moisture trends and errors from 1999 to 2015 [J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(19): 7643-7667.
- [27] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction[J]. *Bulletin Géodésique*, 1972, 105(1): 279-298.
- [28] ZHANG Weixing, LOU Yidong, HUANG Jinfang, et al. Multiscale variations of precipitable water over China based on 1999—2015 ground-based GPS observations and evaluations of reanalysis products[J]. *Journal of Climate*, 2018, 31(3): 945-962.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-07-22

修回日期: 2020-08-09

第一作者简介: 施闯(1968—),男,教授,研究方向为高精度卫星导航定位。

First author: SHI Chuang (1968—), male, professor, majors in high-precision GNSS navigation and positioning.

E-mail: shichuang@buaa.edu.cn

通信作者: 张卫星

Corresponding author: ZHANG Weixing

E-mail: zhangweixing89@whu.edu.cn

引文格式: 李星星, 黄健德, 袁勇强, 等. Galileo 三频非组合精密定轨模型及精度评估[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1120-1130. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20200320.
LI Xingxing, HUANG Jiande, YUAN Yongqiang, et al. Galileo triple-frequency uncombined precise orbit determination: model and quality assessment [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1120-1130. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20200320.

Galileo 三频非组合精密定轨模型及精度评估

李星星, 黄健德, 袁勇强, 李 婕, 刘城伯, 朱艺婷

武汉大学测绘学院, 湖北 武汉 430079

Galileo triple-frequency uncombined precise orbit determination: model and quality assessment

LI Xingxing, HUANG Jiande, YUAN Yongqiang, LI Jie, LIU Chengbo, ZHU Yiting

School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Multi-frequency signals have brought new opportunities and challenges to global navigation satellite system (GNSS) precise data processing. In this contribution, the uncombined (UC) observation model suitable for multi-frequency precise orbit determination (POD) was derived, and the double-differenced constraining strategy for multi-frequency UC ambiguity was given. Afterwards, Galileo POD was carried out by using the observation data of 150 multi-GNSS experiment (MGEX) stations. Different solutions using E1/E5a double-frequency, E1/E5b double-frequency and E1/E1a/E5b triple-frequency observations based on UC model and the traditional ionosphere free (IF) model respectively are applied to generate Galileo orbits. The comparison with external precise orbit products, orbit boundary discontinuities comparison and satellite laser ranging (SLR) validation were used to evaluate the orbit accuracy of different solutions. The results showed that the UC model and IF model having comparable orbit accuracy for double-frequency solutions. The differences of orbit accuracy between UC and IF model are within 1 mm, and the differences of the estimated satellite clock and SLR residuals are within 0.01 ns and 2 mm, respectively. When triple-frequency observations (E1/E5a/E5b) were used, the accuracy of float UC and float IF solutions can be improved by 1~2 mm compared to that using E1/E5b observations.

Key words: Galileo; uncombined model; ionospheric-free combination; precise orbit determination

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41774030; 41974027); The Hubei Province Natural Science Foundation of China (No. 2018CFA081); The Frontier Project of Basic Application from Wuhan Science and Technology Bureau (No. 2019010701011395); The Sino-German Mobility Programme (No. M-0054)

摘 要: 不断丰富的多频信号为 GNSS 精密数据处理带来了新的机遇与挑战。本文首先推导了适用于多频非组合(UC)观测值的 GNSS 卫星精密定轨模型,并给出了多频 UC 模糊度的双差约束策略。在此基础上,本文基于全球分布的 150 个 MGEX 测站的观测数据,对 UC 模型和无电离层组合(IF)模型分别使用 E1/E5a、E1/E5b 和 E1/E5a/E5b 观测值进行了 Galileo 卫星精密定轨。采用与外部精密产品对比、轨道边界不连续性比较和卫星激光测距(SLR)检核等方法评估了不同策略的定轨精度。结果表明:双频情况下,本文提出的 UC 模型与目前常用的 IF 模型定轨精度基本一致,两者定轨结果的 1DRMS 差异在 1 mm 以内,钟差 STD 差异在 0.01 ns 以内,SLR 残差差异在 2 mm 以内。使用 E1/E5a/E5b 观测值后,UC 模型和 IF 模型的浮点解精度相较于使用 E1/E5b 观测值的结果有 1~2 mm 的改善。

关键词: Galileo; 非组合模型; 无电离层组合; 精密定轨

基金项目:国家自然科学基金(41774030;41974027);湖北省自然科学基金(2018CFA081);武汉市科技局应用基础前沿专项(2019010701011395);中德科学中心-中德国际合作项目(M-0054)

Galileo 是由欧盟主持和建设的全球卫星导航系统,旨在提供高精度的导航、定位和授时服务^[1]。Galileo 于 2002 年 3 月开始建设,在 2016 年 12 月宣布具备初始服务能力,并计划于 2020 年全面建成^[1]。目前 Galileo 共有包括 4 颗在轨试验(in-orbit validation, IOV)卫星和 22 颗全工作能力(full operational capability, FOC)卫星在内的 26 颗卫星^[2]。稳定可靠的精密轨道产品是 Galileo 高精度应用的前提。现今,包括欧洲定轨中心(Centre for Orbit Determination in Europe, CODE)、欧空局(European Space Agency, ESA)、德国地学中心(German Research Centre for Geosciences, GFZ)和武汉大学(Wuhan University, WHU)在内的多家 MGEX 分析中心为 Galileo 提供精密轨道和钟差产品。上述机构均采用 E1/E5a 双频无电离层(ionosphere free, IF)组合观测值进行卫星精密定轨^[4-6]。

除 E1 和 E5a 信号外, Galileo 还提供了 E5b、E5ab 和 E6 等信号^[7]。丰富的卫星频率信号为精密数据处理提供了新的机遇和挑战。非组合(uncombined, UC)模型具有表达形式简单统一且易扩展,观测信息利用充分等优势^[8],逐渐成为多频 GNSS 精密数据处理领域新的研究热门^[9]。在精密定位领域,文献[10]提出过一种非组合 GPS 精密定位方法,文献[11—12]等对非组合精密定位过程中的函数和参数模型进行了深入研究,文献[13]总结了多频 GNSS 非差非组合精密单点定位模型,文献[14]提出了北斗系统三频非组合和无电离层观测值组合的钟差基准约束准则。文献[15]通过非差非组合模型发展了电离层模型参数化方法。在精密定轨领域,UC 模型的相关研究相较于精密定位领域更少。文献[16]基于非组合观测值进行了低轨卫星精密定轨。文献[17—18]曾对非组合精密定轨策略进行了初步的研究。文献[19]在他的研究中论证了双频 UC 模型和 IF 模型在 GPS 卫星精密定轨中的等价性。然而,很少有研究学者使用双频甚至三频信号通过 UC 模型来进行 Galileo 卫星精密定轨。本文建立了 Galileo 三频非组合精密定轨模型,并评估了使用双频和三频的 UC 和 IF 模型的 Galileo 卫星精密定轨结果。

1 Galileo 多频定轨模型及策略

1.1 多频非组合定轨模型

测站 r 和卫星 s 在某一个历元接收到的卫星频率 i 的伪距观测量和载波相位观测量可以用如下观测方程表示

$$\left. \begin{aligned} P_{i,r}^s &= \rho_r^s + M_r^s \cdot T_r + \gamma_i^s \cdot I_{1,r}^s + c(dt_{i,r} - dt_i^s) + \\ &\quad c(d_{i,r} - d_i^s) + \epsilon_{i,r}^s \\ L_{i,r}^s &= \rho_r^s + M_r^s \cdot T_r - \gamma_i^s \cdot I_{1,r}^s + c(dt_{i,r} - dt_i^s) + \\ &\quad c(b_{i,r} - b_i^s) + \lambda_i^s \cdot N_{i,r}^s + \xi_{i,r}^s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $P_{i,r}^s$ 和 $L_{i,r}^s$ 分别表示以 m 为单位的伪距观测量和载波观测量; ρ_r^s 表示站星几何距离; M_r^s 表示对流层投影系数; T_r 表示天顶对流层湿延迟; $I_{1,r}^s$ 表示 f_1 的电离层延迟一阶项; γ_i^s 表示第 i 频率与 f_i 相关的电离层延迟放大因子,可以表示为 f_i^2/f_1^2 ; c 为光速; $dt_{i,r}$ 和 dt_i^s 分别表示接收机和卫星钟差; $d_{i,r}$ 和 d_i^s 分别表示接收机和卫星端的伪距硬件延迟; $b_{i,r}$ 和 b_i^s 分别表示接收机和卫星端的相位硬件延迟; λ_i^s 为第 i 频率的波长; $N_{i,r}^s$ 表示以周为单位的整周模糊度; $\epsilon_{i,r}^s$ 和 $\xi_{i,r}^s$ 则是伪距观测量和载波观测量的信号噪声。

诸如天线相位中心偏差(phase center offset, PCO)和天线相位中心变化(phase center variation, PCV)、测站天顶对流层干延迟、相对论效应、潮汐改正(包括固体潮、海潮和极潮)和天线相位缠绕效应等需要的误差可通过对应模型正确改正^[20-23]。精密定轨中,对式(1)线性化处理后可表示为

$$\left. \begin{aligned} P_{i,r}^s &= \alpha_r^s (\boldsymbol{\phi}(t_0, t) \cdot \mathbf{X}_0^s - \mathbf{X}_r) + M_r^s \cdot T_r + \\ &\quad \gamma_i^s \cdot I_{1,r}^s + c(dt_{i,r} - dt_i^s) + c(d_{i,r} - d_i^s) + \\ &\quad \epsilon_{i,r}^s \\ L_{i,r}^s &= \alpha_r^s (\boldsymbol{\phi}(t_0, t) \cdot \mathbf{X}_0^s - \mathbf{X}_r) + M_r^s \cdot T_r + \\ &\quad \gamma_i^s \cdot I_{1,r}^s + c(dt_{i,r} - dt_i^s) + c(b_{i,r} - b_i^s) + \\ &\quad \lambda_i^s \cdot N_{i,r}^s + \xi_{i,r}^s \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $\alpha_r^s = (\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$ 为站星几何距离的一阶偏导数; t_0 为初始历元; t 为当前历元; $\boldsymbol{\phi}(t_0, t)$ 为初始历元到当前历元的状态转移矩阵; \mathbf{X}_0^s 为初始历元坐标; \mathbf{X}_r 为接收机的位置坐标。由于 MGEX 分析中心产品通常采用 IF 模型进行估计,在多频数据处理

过程中,为了与 MGEX 分析中心产品保持一致,需要采用 IF 基准消除方程秩亏。假定以频率 i 和 j 的 IF 组合为基准,此时观测方程式可以表示为^[24]

$$\left. \begin{aligned} P_{i,r}^s &= dX_r^s + \gamma_i^s \cdot \bar{I}_{1,r}^s + c(\bar{d}t_r - \bar{d}t^s) + \\ &\quad c(d_{i,r} - d_i^s) - B_{r,i,j}^s + \epsilon_{i,r}^s \\ L_{i,r}^s &= dX_r^s - \gamma_j^s \cdot \bar{I}_{1,r}^s + c(\bar{d}t_r - \bar{d}t^s) + \\ &\quad c(b_{i,r} - b_j^s) + \lambda_i^s \cdot N_{r,i,j}^s - B_{r,i,j}^s + \xi_{i,r}^s \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $dX_r^s = \alpha_r^s(\phi(t_0, t) \cdot X_0^s - X_r^s) + M_r^s \cdot T_r$ 为非频率相关参数; $\alpha_{i,j} = f_i^2 / (f_i^2 - f_j^2)$ 和 $\beta_{i,j} = -f_j^2 / (f_i^2 - f_j^2)$ 为 IF 组合系数; $B_{r,i,j}^s = c(\alpha_{i,j}d_{i,r} + \beta_{i,j}d_{j,r}) + c(\alpha_{i,j}d_i^s + \beta_{i,j}d_j^s)$ 为引入的硬件延迟改正数; $\bar{d}t_r$ 、 $\bar{d}t^s$ 分别为 IF 组合接收机钟差和卫星钟差。由于钟差基准中所引入的偏差项和卫星及接收机相关,并且伪距和相位观测值中都存在该参数,因此在最小二乘平差准则中,其值能被电离层参数吸收,此时电离层参数可表示为 $\bar{I}_{1,r}^s = I_{1,r}^s + \beta_{i,j}(d_{i,r} - d_{j,r} - d_i^s + d_j^s)$ 。对于频率 k ,将以频率 i 和 j 的无电离层组合基准代入频率 k 的观测方程可以得到下式

$$\left. \begin{aligned} P_{k,r}^s &= dX_r^s + \gamma_k^s \cdot \bar{I}_{1,r}^s + c(\bar{d}t_r - \bar{d}t^s) + \\ &\quad H_{k,r} - H_k^s + \epsilon_{k,r}^s \\ L_{k,r}^s &= dX_r^s - \gamma_k^s \cdot \bar{I}_{1,r}^s + c(\bar{d}t_r - \bar{d}t^s) + \\ &\quad \bar{N}_{k,r}^s + \xi_{k,r}^s \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中

$$\left. \begin{aligned} \bar{I}_{1,r}^s &= I_{1,r}^s + \beta_{i,j}(d_{i,r} - d_{j,r} - d_i^s + d_j^s) \\ H_{k,r} &= H_k^s = 0, \quad k = i, j \\ H_{k,r} &= \beta_{i,j}(1 - \gamma_i)(d_{i,r} - d_{j,r}) - (d_{i,r} - d_{k,r}) \\ &\quad k \neq i, j \\ H_k^s &= \beta_{i,j}(1 - \gamma_i)(d_i^s - d_j^s) - (d_i^s - d_k^s), \quad k \neq i, j \\ \bar{N}_{k,r}^s &= \lambda_k^s \cdot N_{k,r}^s + c(b_{k,r} - b_k^s) - \\ &\quad [\alpha_{i,j}d_{i,r} + \beta_{i,j}d_{j,r} - \gamma_i\beta_{i,j}(d_{i,r} - d_{j,r})] + \\ &\quad [\alpha_{i,j}d_i^s + \beta_{i,j}d_j^s - \gamma_i\beta_{i,j}(d_i^s - d_j^s)] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

从式(5)中可以看到,当以频率 i 和频率 j 的双频 IF 组合为基准时,频率 i 和频率 j 的硬件延迟偏差不需要额外估计,其值可以被卫星钟差、接收机钟差及电离层延迟参数吸收。

1.2 双差模糊度固定

在精密定轨过程中,非差 UC 模糊度和 IF 模糊度因为吸收了卫星硬件延迟和接收机硬件延迟而不具备整周特性。通过恢复模糊度的整周特性可以得到模糊度固定解并显著提高卫星精密定轨

精度。考虑到卫星精密定轨需要在一个地面网络下进行,因此可借助双差策略实现模糊度的固定^[25]。对于两个卫星和两个测站,通过线性组合可以将 4 个 UC 模糊度组成双差模糊度,此时模糊度中包含的卫星端和接收机端偏差项均被消除。对于 IF 模糊度,常用如下公式固定

$$\left. \begin{aligned} N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_2}{c} \cdot N_{(r_1, r_2), IF1,2}^{(s_1, s_2)} - \\ &\quad \frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot N_{(r_1, r_2), WL1,2}^{(s_1, s_2)} \\ \sigma_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_2}{c} \sigma_{(r_1, r_2), IF1,2}^{(s_1, s_2)} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, N_{NL} 为双差窄巷(Narrow Lane, NL)模糊度; N_{IF} 和 N_{WL} 表示双差 IF 和宽巷(wide line, WL)整数模糊度; σ_{NL} 和 σ_{IF} 为双差 NL 和双差 IF 模糊度误差。双差 WL 模糊度可以借助双差的 MW (melbourne-wübbena) 组合观测量表示^[26-28]。在进行三频 IF 模糊度固定时,可以先对 f_1 和 f_2 频率的 IF 模糊度进行双差约束,再对 f_1 和 f_3 频率的 IF 模糊度进行双差约束,从而固定所有模糊度。此时模糊度的双差约束表达式为

$$\left. \begin{aligned} N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_2}{c} \cdot N_{(r_1, r_2), IF1,2}^{(s_1, s_2)} - \\ &\quad \frac{f_1}{f_1 - f_2} \cdot N_{(r_1, r_2), WL1,2}^{(s_1, s_2)} \\ N_{(r_1, r_2), NL1,3}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_3}{c} \cdot N_{(r_1, r_2), IF1,3}^{(s_1, s_2)} - \\ &\quad \frac{f_1}{f_1 - f_3} \cdot N_{(r_1, r_2), WL1,3}^{(s_1, s_2)} \\ \sigma_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_2}{c} \sigma_{(r_1, r_2), IF1,2}^{(s_1, s_2)} \\ \sigma_{(r_1, r_2), NL1,3}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_3}{c} \sigma_{(r_1, r_2), IF1,3}^{(s_1, s_2)} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

UC 模糊度与 IF 模糊度固定策略基本一致,首先借助 UC 模糊度得到双差 WL 整数模糊度,然后基于双差 WL 和双差 UC 模糊度得到双差 NL 整数模糊度。双差 UC 模糊度约束方程如下所示

$$\left. \begin{aligned} N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_2}{c} [\alpha_{12} \quad \beta_{12}] N_{(r_1, r_2), (L1, L2)}^{(s_1, s_2)} - \\ &\quad \frac{f_1}{f_1 - f_2} N_{(r_1, r_2), WL1,2}^{(s_1, s_2)} \\ \sigma_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \text{sqrt} \left(\left[\begin{array}{cc} \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & -\frac{f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \\ \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & -\frac{f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \end{array} \right]^T \right) \\ &\quad \Omega_{(L1, L2)} \left[\begin{array}{cc} \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & -\frac{f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \end{array} \right] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $N_{(r_1, r_2), (L_1, L_2)}^{(s_1, s_2)}$ 为 f_1 和 f_2 频率的双差 UC 模糊度; $\Omega_{(L_1, L_2)}$ 为 f_1 和 f_2 频率的双差 UC 模糊度的协方差阵; α_{12}, β_{12} 为 f_1 和 f_2 频率的 IF 组合系数。最后, 对于 f_1 和 f_2 频率, 其 UC 模糊度可以表示为

$$\left. \begin{aligned} N_{(r_1, r_2), L_1}^{(s_1, s_2)} &= (N_{(r_1, r_2), WL1,2}^{(s_1, s_2)} + N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)}) \times \frac{c}{f_1} \\ N_{(r_1, r_2), L_2}^{(s_1, s_2)} &= N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} \times \frac{c}{f_2} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

在进行三频 UC 模糊度固定时, 可以先对 f_1 和 f_2 频率的 UC 模糊度进行双差约束, 再对 f_1 和 f_3 频率的 UC 模糊度进行双差约束, 从而固定所有模糊度。此时模糊度的双差约束表达式为

$$\left. \begin{aligned} N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_2}{c} [\alpha_{12} \quad \beta_{12}] N_{(r_1, r_2), (L_1, L_2)}^{(s_1, s_2)} - \frac{f_1}{f_1 - f_2} N_{(r_1, r_2), WL1,2}^{(s_1, s_2)} \\ N_{(r_1, r_2), NL1,3}^{(s_1, s_2)} &= \frac{f_1 + f_3}{c} [\alpha_{13} \quad \beta_{13}] N_{(r_1, r_2), (L_1, L_3)}^{(s_1, s_2)} - \frac{f_1}{f_1 - f_3} N_{(r_1, r_2), WL1,3}^{(s_1, s_2)} \\ \sigma_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} &= \text{sqrt} \left(\begin{bmatrix} \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & \frac{-f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \\ \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & \frac{-f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \end{bmatrix}^T \right) \\ \Omega_{(L_1, L_2)} &= \begin{bmatrix} \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & \frac{-f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \\ \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_2)} & \frac{-f_2^2}{c(f_1 - f_2)} \end{bmatrix} \\ \sigma_{(r_1, r_2), NL1,3}^{(s_1, s_2)} &= \text{sqrt} \left(\begin{bmatrix} \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_3)} & \frac{-f_3^2}{c(f_1 - f_3)} \\ \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_3)} & \frac{-f_3^2}{c(f_1 - f_3)} \end{bmatrix}^T \right) \\ \Omega_{(L_1, L_3)} &= \begin{bmatrix} \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_3)} & \frac{-f_3^2}{c(f_1 - f_3)} \\ \frac{f_1^2}{c(f_1 - f_3)} & \frac{-f_3^2}{c(f_1 - f_3)} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

三个频率的模糊度可以表示为

$$\left. \begin{aligned} n_{(r_1, r_2), L_1}^{(s_1, s_2)} &= (N_{(r_1, r_2), WL1,2}^{(s_1, s_2)} + N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)}) \times \frac{c}{f_1} \\ n_{(r_1, r_2), L_2}^{(s_1, s_2)} &= N_{(r_1, r_2), NL1,2}^{(s_1, s_2)} \times \frac{c}{f_2} \\ n_{(r_1, r_2), L_3}^{(s_1, s_2)} &= N_{(r_1, r_2), NL1,3}^{(s_1, s_2)} \times \frac{c}{f_3} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

1.3 数据处理策略

本文利用全球分布的 150 个 MGEX 测站在 2019 年年积日 080-120 共 41 天的 Galileo 观测数据来验证 Galileo 多频 UC 模型的定轨效果。在选取的这段时间内, Galileo 共有 24 颗可用卫星, 所有测站均可接收到 Galileo 的 E1、E5a 和 E5b 的观测数据。具体测站的全球分布情况如图 1 所示。

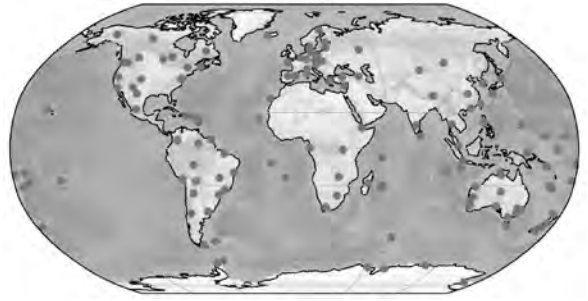


图 1 MGEX 测站分布

Fig.1 Distribution of MGEX stations

在数据处理中, 共使用 6 种不同的策略进行 Galileo 卫星的精密定轨和钟差估计。具体策略可见表 1。除了使用 E1/E5b 双频观测值进行的定轨策略, 其他策略均选取 E1/E5a 的双频 IF 钟差作为钟差基准。定轨过程中, 观测值的采样率为 300 s, 定轨弧长为 24 h, 观测值采用高度角加权, 截止高度角为 7° 。电离层采用斜延迟电离层模型, 且仅估计 E1 频率的电离层延迟。接收机端的 E1 和 E5a 观测值的天线相位中心改正由 GPS 的 L1 和 L2 观测值对应的模型改正代替, E5b 观测值的天线相位中心改正保持和 E5a 观测值一致。卫星姿态模型选取名义模型, 光压模型为 ECOM2 模型^[29]。观测模型、动力学模型和参数估计等的详细策略见表 2。

表 1 Galileo 精密定轨的数据选择策略

Tab.1 Data selection strategy for Galileo precise orbit determination

频率	组合方式	钟差基准	策略标识
E1/E5a	IF	IF E1/E5a	F-1
E1/E5a	UC	IF E1/E5a	UC-1
E1/E5b	IF	IF E1/E5b	IF-2
E1/E5b	UC	IF E1/E5b	UC-2
E1/E5a/E5b	IF	IF E1/E5a	IF-3
E1/E5a/E5b	UC	IF E1/E5a	UC-3

2 实验结果与分析

2.1 精密产品比较结果

为了评估轨道和钟差的外符合精度, 可以将不同策略的定轨和估钟结果与精密产品进行对比。本文选取 CODE 提供的精密轨道和钟差产品作为外部评估标准。研究表明, CODE 提供的 Galileo 精密轨道产品与 ESA、GFZ 和 WHU 提供的精密轨道产品之间比较结果的 1DRMS 约为 16.2 mm~28.3 mm, 精密钟差产品之间比较结果

的 STD 约为 0.09 ns~0.24 ns,另外, CODE 机构 Galileo 精密轨道产品的卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 检核残差的 STD 约为 30.0 mm~32.0 mm^[33]。

表 2 Galileo 精密定轨的处理策略

Tab.2 Processing strategy for Galileo precise orbit determination

模型	处理策略	
观测值	E1/E5a/E5b	
定轨采样率	300 s	
定轨弧长	24 h	
截止高度角	7°	
观测模型	观测值权比	高度角加权。高度角 E 大于 30° 时为 1, 否则为 2 · sin (E)
	天线相位改正	卫星端:按照 IGS14 天线文件改正接收机端; E1, E5a/E5b 分别由 GPS L1 和 L2 的改正数代替
动力学模型	相位缠绕	采用模型改正
	对流层延迟	对流层干延迟使用 Saastamoinen 模型计算, 通过 GMF 投影函数将天顶延迟转换到观测值路径方向; 对流层湿延迟采用分段常数估计, 间隔为 2 h
参数估计	地球重力场	EGM2008 模型, 12×12 阶 ^[30]
	N 体引力	根据 JPL DE405 星历计算
	地球潮汐形变	海潮潮汐: FES2004 模型 ^[31] 固体潮、极潮: IERS conventions 2010 ^[32]
	相对论效应	采用 IERS conventions 2010 的模型改正
	太阳压	ECOM2 模型
	初始轨道状态	卫星位置、速度和 ECOM2 力模型参数
	测站坐标	IGS 周解的测站坐标
	接收机钟差	作为白噪声逐历元估计, 频间码偏差作为常数每天估计一组
	卫星钟差	作为白噪声逐历元估计
	相位模糊度	每个弧段估计一个常数模糊度参数
	ERP 参数	作为常数估计

轨道方面, 将每个定轨弧段解算的轨道与 CODE 精密轨道产品进行比较得到切向 (along-track, A)、法向 (cross-track, C)、径向 (radial, R) 及 1D 方向的差值序列, 并计算得到差值的 RMS 值。钟差方面, 对解算的钟差结果与 CODE 精密钟差产品进行比较, 使用“二次差”的方法, 扣除基准偏差, 并计算得到每个定轨弧段的 STD 值^[34]。

图 2 给出了 Galileo 卫星使用双频观测值时, 不同策略下定轨结果与 CODE 精密轨道产品比较结果的 1DRMS 平均值。其中 UC-1、IF-1、UC-2 和 IF-2 策略浮点解 RMS 平均值分别为 44.6 mm、44.7 mm、48.2 mm 和 48.1 mm, UC-1 与 IF-1 策略间轨道差异和 UC-2 与 IF-2 策略间轨道差异都小于 1 mm; 固定解 RMS 平均值分别为 21.1 mm、21.6 mm、21.4 mm 和 22.0 mm, 四者差异同样小于 1 mm。上述结果表明, 在使用相同观测值时, UC 策略和 IF 策略的平均 RMS 差异在 1 mm 以内, 两者精度相当。

图 3 给出了双频情况下 UC-1、UC-2、IF-1 和 IF-2 这 4 种策略 WL 和 NL 模糊度的固定率。表 3 进一步给出了上述 4 种策略下, WL 和 NL 模糊度的平均固定率。从上述结果可以发现, UC-1 和 UC-2 策略的 WL 和 NL 模糊度固定率均分别略低于 IF-1 和 IF-2 策略。其中, UC-1 和 UC-2 策略的 WL 模糊度固定率分别为 91.65% 和 92.54%, 比 IF-1 和 IF-2 策略分别低 0.17% 和 0.65%; UC-1 和 UC-2 策略的 NL 模糊度固定率分别为 82.23% 和 83.09%, 也略低于 IF-1 和 IF-2 策略的 82.93% 和 83.58%。

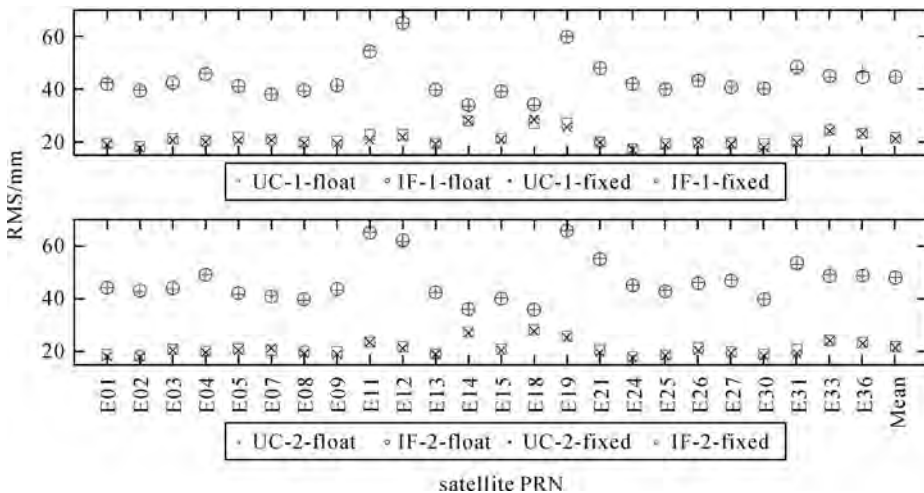


图 2 双频 UC 和 IF 策略定轨结果

Fig.2 Orbit results of dual-frequency UC and IF model

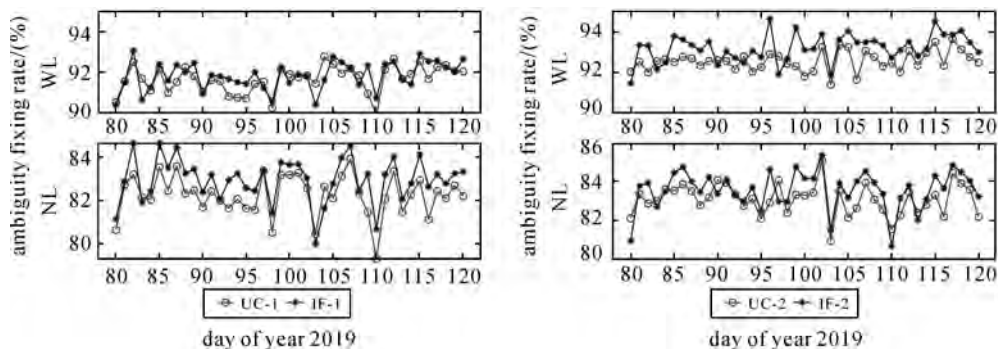


图 3 双频 UC 和 IF 策略精密定轨模糊度固定率

Fig.3 Ambiguity fixed rate of dual-frequency UC and IF model

表 3 双频 UC 和 IF 策略精密定轨模糊度固定率平均值
Tab.3 Average value of ambiguity fixed rate for dual-frequency UC and IF model (%)

	WL 模糊度固定率		NL 模糊度固定率	
	观测值	IF	IF	UC
E1/E5a	91.82	91.65	82.93	82.23
E1/E5b	93.19	92.54	83.58	83.09

果与 CODE 精密产品的互差结果。从图中可以发现,对于 UC-1、UC-2 和 UC-3 这 3 种策略,UC-2 策略的浮点解精度最差,UC-1 策略和 UC-3 策略的浮点解精度相当,3 种策略的固定解精度相当。对于 IF-1、IF-2 和 IF-3 这 3 种策略,IF-2 策略的浮点解精度最差,IF-1 和 IF-2 策略的浮点解精度一致,3 种策略的固定解精度相当。

图 4 给出了双频和三频 UC/IF 策略定轨结

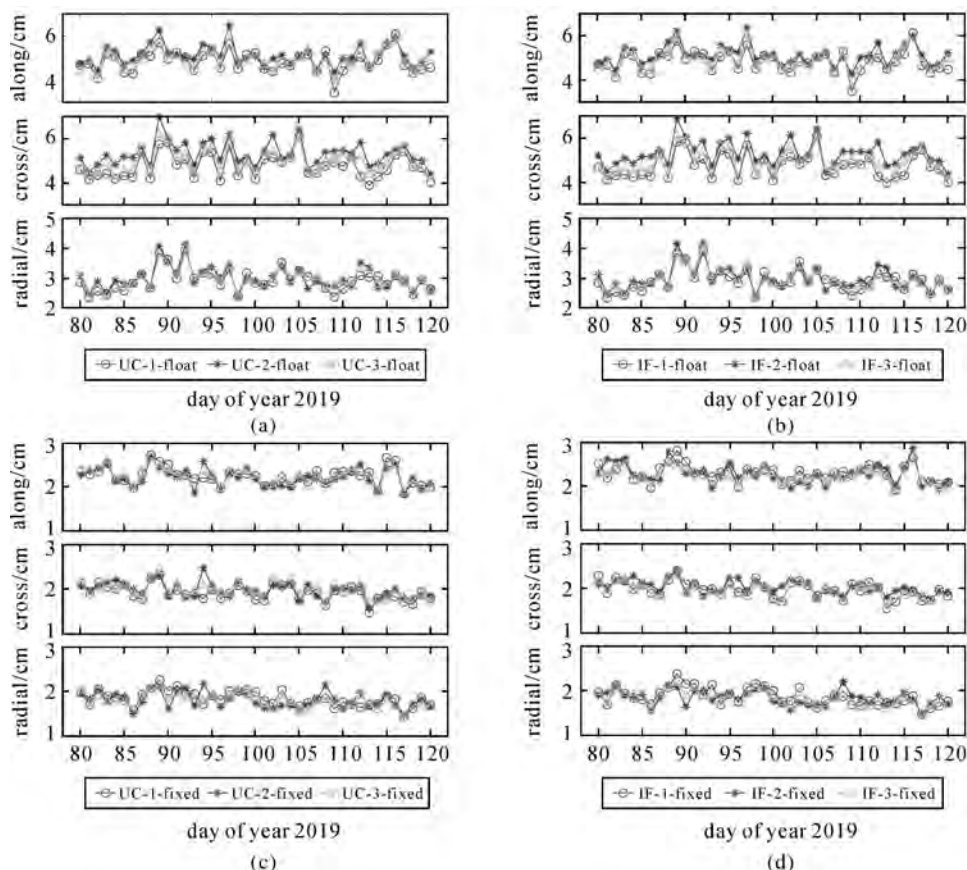


图 4 双频和三频 UC/IF 策略定轨结果与 CODE 精密产品的互差结果

Fig.4 RMS values of orbit differences for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model compared with CODE precision products

表 4 总结了使用双频和三频观测值的 UC 和 IF 策略定轨结果与 CODE 精密产品的互差结果的平均值。可以发现,使用相同观测值时,UC 和 IF 策略定轨结果的精度差异很小,两者在切向、法向与径向差异均在 1 mm 以内。使用不同观测值时,UC-2 策略浮点解的 1DRMS 平均值为 45.2 mm,比 UC-1 和 UC-2 策略分别大了 3.1 mm 和 2.0 mm;IF-2 策略浮点解的 1DRMS 平均值同样为 45.2 mm,比

IF-1 和 IF-2 策略分别大了 3.2 mm 和 2.1 mm。此外,UC-1、UC-2、UC-3、IF-1、IF-2 和 IF-3 这六种策略固定解的 1DRMS 平均值分别为 20.3 mm、20.3 mm、20.4 mm、20.6 mm、20.6 mm 和 20.4 mm,相互之间差异小于 1 mm,可以认为精度相当。

图 5 给出了双频和三频 UC/IF 策略下, Galileo 卫星固定解定轨和估钟结果与 CODE 精密产品的互差结果。对于定轨结果,在使用相同

表 4 双频和三频 UC/IF 策略精密定轨结果与 CODE 精密产品的互差结果

Tab.4 RMS values of orbit differences for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model compared with CODE precision products mm

观测值	UC 策略				IF 策略				
	切向	沿向	径向	1D	切向	沿向	径向	1D	
浮点解	E1/E5a	48.0	46.5	29.1	42.1	47.9	46.5	29.1	42.0
	E1/E5b	50.6	51.8	29.9	45.2	50.6	51.8	29.9	45.2
	E1/E5a/E5b	48.7	48.6	29.6	43.2	48.4	48.6	29.6	43.1
固定解	E1/E5a	22.6	19.4	18.8	20.3	23.3	19.4	18.8	20.6
	E1/E5b	22.3	19.9	18.5	20.3	23.0	19.9	18.5	20.6
	E1/E5a/E5b	22.6	19.9	18.4	20.4	22.6	19.9	18.4	20.4

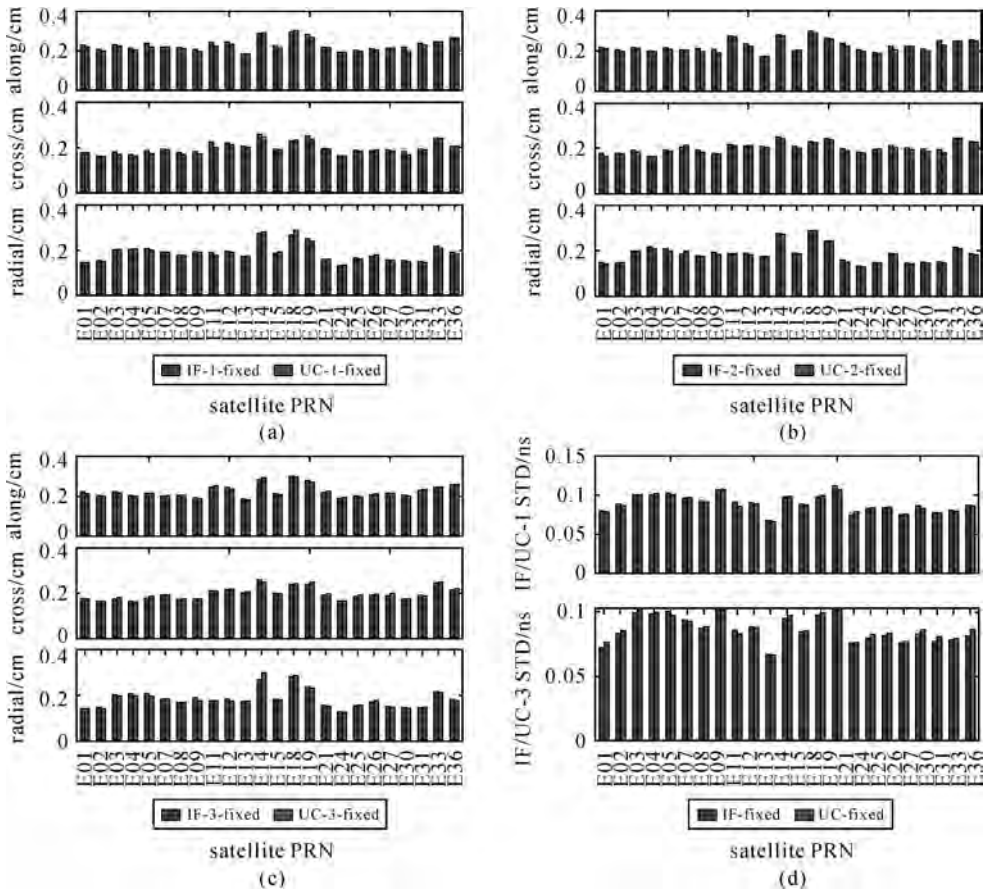


图 5 双频和三频 UC/IF 策略精密定轨和估钟结果与 CODE 精密产品的互差结果

Fig.5 RMS values of clock differences for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model compared with CODE precision products

观测值时,每颗卫星 UC 策略和 IF 策略的定轨精度大致相当。当使用不同观测值时,每颗卫星 UC 策略和 IF 策略定轨固定解结果精度基本一致。对于估钟结果,其中 IF-1、IF-3、UC-1 和 UC-3 这四种策略所有卫星的钟差 STD 平均值为 0.090 ns、0.089 ns、0.087 ns 和 0.088 ns,相互间 STD 值差异小于 0.01 ns,可以认为钟差精度基本一致。

2.2 轨道边界不连续性

除了和 MGEX 分析中心提供的精密产品比较外,轨道边界不连续性 (orbit boundary discontinuities,OBD) 同样可用于评估轨道精度。将 24 小时定轨结果外推 1500 s(采样间隔为 300 s 时为 5 个历元),比较外推结果与次日定轨结果的重叠轨道弧段可以得到切向、法向、径向及 1D 方向的差值序列,并计算得到差值的 RMS 值。

图 6 给出了双频和三频 UC/IF 策略定轨的 OBD 结果。从比较结果来看,使用相同观测值时,UC 策略和 IF 策略 OBD 结果的量级基本一致。使用 E1/E5b 观测值时,UC 策略和 IF 策略定轨浮点解的 OBD 结果都略差于使用 E1/E5a 和 E1/E5a/E5b 观测值时的结果。表 5 进一步给出了双频和三频 UC/IF 策略定轨的 OBD 结果的结果的 RMS 平均值。可以从表中发现,在观测值类型相同时,UC 策略和 IF 策略的定轨结果在切向、法向和径向上的 OBD 结果差异均在 2.5 mm 以内。UC 策略的浮点解中,UC-2 策略的精度最差,UC-3 策略次之;UC 策略的固定解中,UC-2 策略的精度最好,UC-3 策略次之。对于 IF 策略,上述结论和 UC 策略类似。浮点解中,IF-2 策略的精度最差,IF-3 策略次之;固定解中,IF-2 策略的精度最好,IF-3 次之。

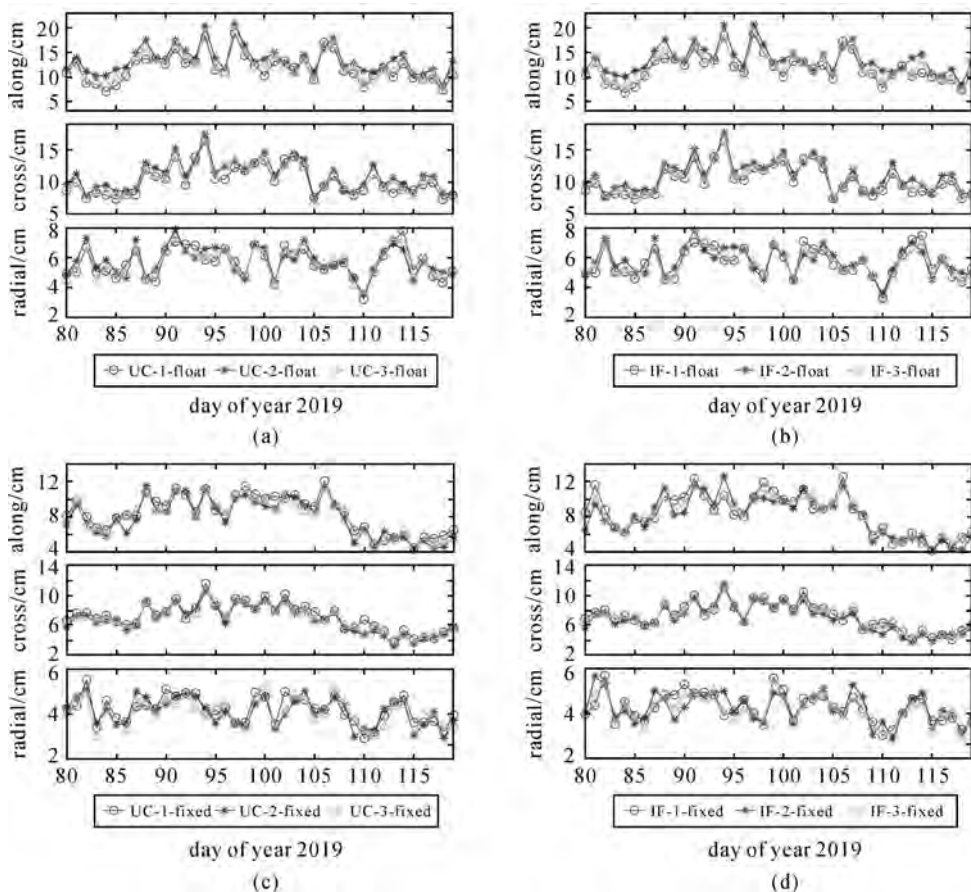


图 6 双频和三频 UC/IF 策略精密定轨 OBD 结果

Fig.6 RMS values of OBD for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model compared with CODE precision products

2.3 SLR 检核结果

SLR 是一种高精度的绝对距离观测值,因其不包含载波相位模糊度,并具有系统误差小、不受

钟差和天线相位中心误差影响的优点,可用于对精密卫星轨道进行检核评估。所有 Galileo 卫星都配备了用于 SLR 检核的激光反射器阵列,并由

国际激光测距服务 (international laser ranging service, ILRS) 组织的地面观测网络跟踪^[35], 因此本文还对不同策略定轨结果进行了 SLR 检核。

表 5 双频和三频 UC/IF 策略精密定轨 OBD 结果 RMS 平均值

Tab.5 RMS values of OBD for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model compared with CODE precision products

	策略	切向/cm	法向/cm	径向/cm	1D/cm
浮点解	UC-1	11.73	10.20	5.63	9.55
	UC-2	13.29	10.98	5.74	10.49
	UC-3	12.05	10.35	5.61	9.73
	IF-1	11.69	10.16	5.65	9.52
	IF-2	13.36	10.98	5.77	10.52
	IF-3	12.11	10.45	5.63	9.79
固定解	UC-1	8.37	7.18	4.19	6.81
	UC-2	7.89	6.78	4.11	6.46
	UC-3	8.01	6.88	4.06	6.53
	IF-1	8.32	7.17	4.25	6.80
	IF-2	8.08	6.84	4.25	6.59
	IF-3	8.14	7.11	4.14	6.68

图 7 给出了 E01、E09、E13、E26 卫星在 UC-2、IF-2、UC-3 和 IF-3 这 4 种策略下固定解定轨

结果的 SLR 残差时序图。表 6 进一步给出了不同策略下这 4 颗卫星固定解定轨结果 SLR 检核结果。需要注意的是, 在统计过程中剔除了残差值大于 1 m 或超过 3 倍中误差的 SLR 检核激光点。通过比较可以发现, 当观测值类型一致时, UC 策略和 IF 策略定轨结果的 SLR 残差和 STD 值都基本相当。总体而言, 所有策略的 SLR 残差平均值的绝对值都小于 2 cm, 不同策略的 SLR 残差平均值之间的差异在 0.3 cm 以内。使用三频观测值时, 如果观测值组合策略和双频一致, 其 SLR 残差平均值并没有显著小于双频观测值。以 E09 为例, 其 UC-1、UC-2 和 UC-3 策略的 SLR 残差平均值分别为 -2.6 cm、-2.5 cm 和 -2.6 cm, 与 IF-1、IF-2 和 IF-3 策略的 -2.7 cm、-2.5 cm 和 -2.5 cm 相比, 相互间差异都不大于 0.2 cm。同样可以比较这几种策略 SLR 残差 STD 值, 其中 UC-1、UC-2 和 UC-3 策略的 SLR 残差 STD 值分别为 3.0 cm、3.2 cm 和 2.9 cm, 与 IF-1、IF-2 和 IF-3 策略的 3.0 cm、2.9 cm 和 3.0 cm 相比, 相互间差异同样都不大于 0.3 cm。

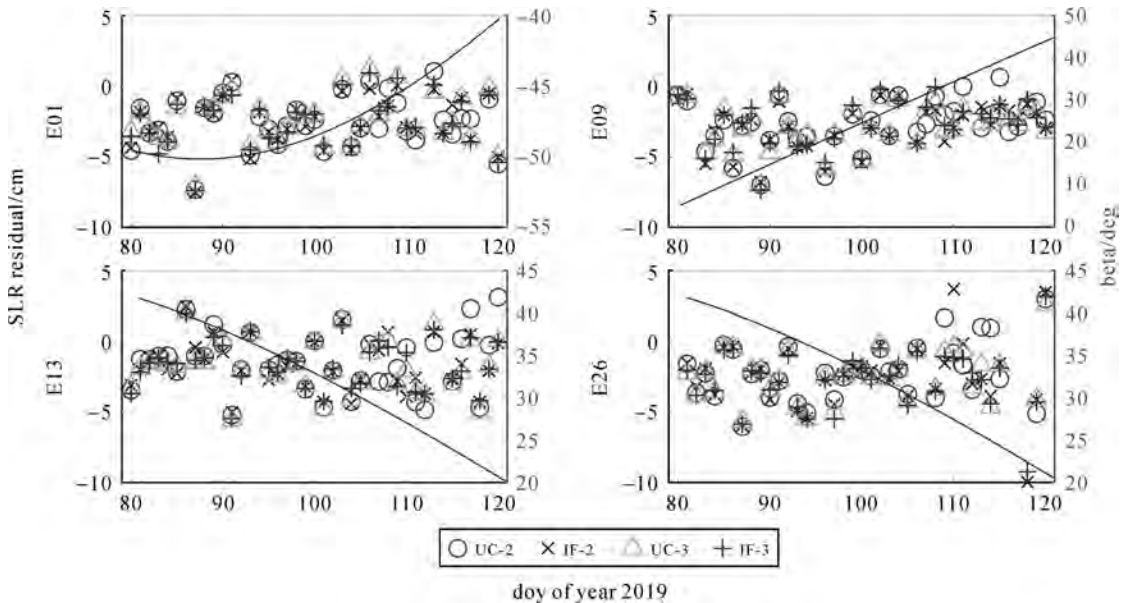


图 7 双频和三频 UC/IF 策略定轨固定解 SLR 残差

Fig.7 SLR residuals of fixed solutions for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model

3 总结

本文推导了多频 UC 和 IF 定轨模型, 给出了多频 UC 定轨模型的双差固定策略。在此基础

上, 利用全球分布的 150 个 MGEX 测站进行了不同策略的 Galileo 卫星精密定轨。使用与 CODE 产品比较、OBD 和 SLR 检核这 3 种方法来评估 Galileo 定轨产品的精度。通过分析比较结果, 得

出如下结论:

(1) 在使用 E1/E5a 与 E1/E5b 双频观测值的情况下,观测值类型一致时,本文提出的 UC 策略和传统的 IF 策略的定轨精度基本相当,两者浮点解轨道精度差异和固定解轨道精度差异都不超过 1 mm,浮点解钟差差异和固定解钟差差异都不超过 0.01 ns。此外,在双频固定解中,UC-1 和 UC-2 策略的宽巷和窄巷模糊度固定率都分别略低于 IF-1 和 IF-2 策略对应的模糊度固定率。

表 6 双频和三频 UC/IF 策略定轨 SLR 检核结果

Tab.6 SLR results of fixed solutions for dual-frequency and triple-frequency UC/IF model

	Solution	# NP	Offset/cm	STD/cm
E01	UC-1	381	-2.3	2.1
	UC-2	381	-2.2	2.1
	UC-3	381	-2.2	2.0
	IF-1	381	-2.3	2.1
	IF-3	381	-2.3	2.1
	IF-3	381	-2.3	2.1
E09	UC-1	495	-2.6	3.0
	UC-2	495	-2.5	3.2
	UC-3	495	-2.6	2.9
	IF-1	495	-2.7	3.0
	IF-2	495	-2.7	2.9
	IF-3	495	-2.5	3.0
E13	UC-1	488	-1.8	3.4
	UC-2	488	-1.5	3.7
	UC-3	488	-1.8	3.4
	IF-1	488	-1.8	3.4
	IF-2	488	-1.7	3.4
	IF-3	488	-1.7	3.3
E26	UC-1	300	-2.5	2.6
	UC-2	300	-2.2	3.0
	UC-3	300	-2.4	2.6
	IF-1	300	-2.5	2.5
	IF-2	300	-2.2	2.8
	IF-3	300	-2.5	2.5

(2) 使用 E1/E5a/E5b 三频观测值时,浮点解定轨结果相较于双频观测值浮点解定轨结果略有提升。无论是 UC 策略还是 IF 策略,其固定解定轨结果的 1D RMS 和使用 E1/E5a 和 E1/E5b 观测值时定轨结果的 RMS 差异在 1 mm 以内。双频和三频条件下,UC 策略和 IF 策略固定解的钟差差异在 0.01 ns 以内。

(3) 在观测值类型一致时,本文提出的 UC 策略和传统的 IF 策略的浮点解及固定解 OBD 结果在切向、法向和径向上的差异小于 2.5 mm,不同策略间 OBD 的 1D RMS 差异不超过 2 mm。

(4) 在观测值类型一致时,UC 策略和 IF 策略的固定解定轨结果的 SLR 残差和 STD 值都基本相当。总体而言,所有策略的 SLR 检核残差小于 20 mm,不同策略的 SLR 检核残差之间的差异不超过 3 mm。

(5) Galileo 多频非组合精密定轨精度目前仍需进一步改善,包括 E5b 信号误差模型精化、UC 模糊度双差固定等问题仍需要深入研究和分析。与 Galileo 类似,北斗三代卫星导航系统(BDS-3)共有 B1、B3、B1C、B2a 和 B2b 5 种信号,适用于 BDS-3 的多频非组合精密定轨模型同样需要进一步研究和评估。

参考文献:

- [1] 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 Yuanxi. 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.
- [2] HAYES D, HAHN J. Galileo programme update[C]// 14th Meeting of the International Committee on GNSS. Bangalore, India, 2019.
- [3] BURY G, SO ŠNICA K, ZAJDEL R, et al. Toward the 1-cm Galileo orbits: challenges in modeling of perturbing forces[J]. Journal of Geodesy, 2020, 94(2): 16.
- [4] DACH R, BROCKMANN E, SCHAER S, et al. GNSS processing at CODE: status report [J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(3-4): 353-365.
- [5] GUO Jing, XU Xiaolong, ZHAO Qile, et al. Precise orbit determination for quad-constellation satellites at Wuhan University: strategy, result validation, and comparison [J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(2): 143-159.
- [6] PRANGE L, ORLIAC E, DACH R, et al. CODE's five-system orbit and clock solution—the challenges of multi-GNSS data analysis[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(4): 345-360.
- [7] ZHANG Rui, TU Rui, LIU Jinhai, et al. Performance of Galileo: global coverage, precise orbit determination, and precise positioning [J]. Advances in Space Research, 2019, 64(2): 299-313.
- [8] LIU Teng, YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng, et al. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(3): 253-268.
- [9] ZHOU Feng, DONG Danan, GE Maorong, et al. Simultaneous estimation of GLONASS pseudorange inter-frequency biases in precise point positioning using undifferenced and uncombined observations[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 19.
- [10] KESHIN M O, LE A Q, VAN DER MAREL H. Single and dual-frequency precise point positioning: approaches and performance[C]// Proceedings of the 3rd ESA Workshop

- on Satellite Navigation User Equipment Technologies. Noordwijk, The Netherlands; NAVITEC, 2006: 11-13.
- [11] 张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 利用非组合精密单点定位技术确定斜向电离层总电子含量和站星差分码偏差[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 447-453.
ZHANG Baocheng, OU Jikun, YUAN Yunbin, et al. Calibration of slant total electron content and satellite-receiver's differential code biases with uncombined precise point positioning technique[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2011, 40(4): 447-453.
- [12] 张宝成, 欧吉坤, 李子申, 等. 利用精密单点定位求解电离层延迟[J]. 地球物理学报, 2011, 54(4): 950-957.
ZHANG Baocheng, OU Jikun, LI Zishen, et al. Determination of ionospheric observables with precise point positioning[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54(4): 950-957.
- [13] 周锋. 多系统 GNSS 非差非组合精密单点定位相关理论和研究方法研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
ZHOU Feng. Theory and methodology of multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [14] GUO Fei, ZHANG Xiaohong, WANG Jinling, et al. Modeling and assessment of triple-frequency BDS precise point positioning [J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(11): 1223-1235.
- [15] 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.
- [16] ZEHENTNER N, MAYER-GÜRR T. New approach to estimate time variable gravity fields from high-low satellite tracking data[M]// MARTI U. Gravity, Geoid and Height Systems. Cham: Springer, 2014: 111-116.
- [17] 郭靖. 姿态、光压和函数模型对导航卫星精密定轨影响的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2014.
GUO Jing. The impacts of attitude, solar radiation and function model on precise orbit determination for GNSS satellites[D]. Wuhan: Wuhan University, 2014.
- [18] 陈华. 基于原始观测值的 GNSS 统一快速精密数据处理方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2015.
CHEN Hua. An efficient and unified GNSS raw data processing strategy[D]. Wuhan: Wuhan University, 2015.
- [19] ZENG Tian, SUI Lifan, RUAN Rengui, et al. Uncombined precise orbit and clock determination of GPS and BDS-3[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 19.
- [20] BOEHM J, NIELL A, TREGONING P, et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L07304.
- [21] BOEHM J, HEINKELMANN R, SCHUH H. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(10): 679-683.
- [22] SAASTAMOINEN J. Contributions to the theory of atmospheric refraction [J]. Bulletin Géodésique (1946—1975), 1972, 105(1): 279-298.
- [23] WU J, WU S, HAJJ G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. Manuscripta Geodaetica, 1993, 18(2): 91-98.
- [24] 张宝成. GNSS 非差非组合精密单点定位的理论方法与应用研究[J]. 测绘学报, 2014, 43(10): 1099. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0155.
ZHANG Baocheng. Study on the theoretical methodology and applications of precise point positioning using undifferenced and uncombined GNSS Data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(10): 1099. DOI: 10.13485/j.cnki.11-2089.2014.0155.
- [25] 张小红, 李星星. 非差模糊度整数固定解 PPP 新方法及实验[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2010, 35(6): 657-660.
ZHANG Xiaohong, LI Xingxing. A new method for zero-differenced interger ambiguity resolution and its application to PPP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010, 35(6): 657-660.
- [26] BLEWITT G. An automatic editing algorithm for GPS data [J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202.
- [27] HATCH R, JUNG J, ENGE P, et al. Civilian GPS: the benefits of three frequencies[J]. GPS Solutions, 2000, 3(4): 1-9.
- [28] GE Maorong, GENDT G, DICK G, et al. Improving carrier-phase ambiguity resolution in global GPS network solutions[J]. Journal of Geodesy, 2005, 79(1-3): 103-110.
- [29] ARNOLD D, MEINDL M, BEUTLER G, et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(8): 775-791.
- [30] PAVLIS N K, HOLMES S A, KENYON S C, et al. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2012, 117(B4): B04406.
- [31] LYARD F, LEFEVRE F, LETELLIER T, et al. Modeling the global ocean tides: modern insights from FES2004 [J]. Ocean Dynamics, 2006, 56(5-6): 394-415.
- [32] PETIT G, LUZUM B. IERS conventions 2010[R]. No.36 in IERS Technical Note. Frankfurt am Main, Germany: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010.
- [33] LI Xingxing, ZHU Yiting, ZHENG Kai, et al. Precise orbit and clock products of galileo, BDS and QZSS from MGEX since 2018: comparison and PPP validation[J]. Remote Sensing, 2020, 12(9): 1415.
- [34] GE Maorong, CHEN Junping, DOUŠA J, et al. A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in realtime[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 9-17.
- [35] PEARLMAN M R, NOLL C E, PAVLIS E C, et al. The ILRS: approaching 20 years and planning for the future [J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(11): 2161-2180.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-07-17

修回日期: 2020-08-24

第一作者简介: 李星星(1985—),男,教授,研究方向为GNSS精密数据处理。

First author: LI Xingxing (1985—), male, professor, majors in GNSS precision data processing.

E-mail: xxli@sgg.whu.edu.cn

引文格式:唐成盼,宿晨庚,胡小工,等.北斗卫星伪距偏差标定及对用户定位精度影响[J].测绘学报,2020,49(9):1131-1138. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200329.
TANG Chengpan, SU Chengeng, HU Xiaogong, et al. Characterization of pseudorange bias and its effect on positioning for BDS satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1131-1138. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200329.

北斗卫星伪距偏差标定及对用户定位精度影响

唐成盼^{1,3}, 宿晨庚^{2,3}, 胡小工¹, 刘利⁴, 高为广², 卢 璠², 陈 颖², 刘 成², 王 威²,
周善石¹

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094; 3. 国防科技大学电子科学学院, 湖南 长沙 410073; 4. 北京卫星导航中心, 北京 100094

Characterization of pseudorange bias and its effect on positioning for BDS satellites

TANG Chengpan^{1,3}, SU Chengeng^{2,3}, HU Xiaogong¹, LIU Li⁴, GAO Weiguang², LU Jun², CHEN Ying², LIU Cheng², WANG Wei², ZHOU Shanshi¹

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China; 3. School of Electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China; 4. Beijing Satellite Navigation Center, Beijing 100094, China

Abstract: Distortions of GNSS signals result in pseudorange biases. The biases are different for different receivers depending on frontend bandwidth and employed filters of receivers. Pseudorange biases are treated as a new error sources in this paper. Firstly, two pseudorange bias calibration calculation methods namely collocated receivers-based method and differential code bias (DCB) based method are proposed, to separate pseudorange biases and other error sources. Then pseudorange biases are calculated estimated and separated from other error sources using collocated receivers-based method. The STD of BDS estimated pseudorange biases series is approximately 0.1 m. The BDS estimated pseudorange biases keep constant with time. Pseudorange biases are also irrelevant with geophysical geographical locations of receivers. At 1.5 G band, B1I pseudorange bias is the largest. The pseudorange biases of BDS new signal B1C improved a lot compared with pseudorange biases of BDS B1I and are also much better than the GPS L1C/A. At other bands, pseudorange biases of GPS L2C are slightly larger than BDS B3I, followed by GPS L5C, pseudorange biases of BDS B2a are the smallest. The influence of pseudorange biases is also analyzed with measurements. Pseudorange biases are highly-correlated with total group delay (TGD). If the user receivers are quite different with those used for TGD calculation, the positioning accuracy will get worse.

Key words: pseudorange biases; BeiDou navigation satellite system; positioning; total group delay

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41804030; 41874039)

摘 要: 伪距偏差是指卫星导航信号非理想特征导致的不同技术状态接收机产生的伪距测量常数偏差。本文将伪距偏差作为一种新的用户段误差, 提出基于并置接收机的伪距偏差计算方法和基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法, 以实现伪距偏差与其他误差的分离。然后利用实测数据测量了北斗卫星伪距偏差, 结果表明伪距偏差标定序列波动 STD 约为 0.1 m, 不随时间明显变化, 不同地点接收机测量的伪距偏差具有较好的一致性。在 1.5 G 频段, 北斗卫星 B1I 频点伪距偏差最大。北斗卫星新体制信号 B1C 伪距偏差最小, 较北斗卫星 B1I 频点伪距偏差明显改善, 也明显好于 GPS 卫星 L1C/A 频点伪距偏差。在其他频段, GPS 卫星 L2C 伪距偏差略大于北斗卫星 B3I 伪距偏差, L5C 频点伪距偏差次之, B2a 频点

伪距偏差最小。最后,利用实测数据分析了伪距偏差对定位精度的影响。结果表明伪距偏差与卫星群延迟参数高度相关。若用户接收机与群延迟参数计算采用的接收机技术状态差异较大,用户接收机定位精度将明显恶化。

关键词:伪距偏差;北斗卫星导航系统;定位;群延迟参数

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1131-08

基金项目:国家自然科学基金(41804030;418740390)

随着卫星导航系统空间信号精度逐步改善^[1-4],用户段误差对卫星导航系统服务性能提升的瓶颈效应越来越显著^[5]。用户段误差是指由用户接收机或者用户环境导致的伪距测量误差。一般认为,用户段误差包括伪距多路径误差和测量随机噪声。本文关注被广泛忽略的伪距偏差,将其作为一种新的误差。需要说明的是,国内外文献均报道了GPS卫星和北斗卫星的伪距波动误差,将其称为伪距偏差^[6-8]。上述文献报道的伪距偏差实际上是类似多路径效应的伪距波动。而本文关注的伪距偏差是由卫星导航信号非理想特征导致的伪距测量常数偏差。伪距偏差最早发现于1993年,GPS Block II卫星SVN19下行信号出现异常,不同类型接收机伪距测量出现不同偏差,造成用户差分定位精度显著下降^[9]。伪距偏差并非仅存在于异常的导航卫星,文献[10-13]的研究表明,即使GPS星座内健康卫星下行信号的伪距测量也存在伪距偏差,是影响星基增强系统服务性能的重要误差。文献[14-15]将不同类型接收机布设成零基线,研究不同系统卫星伪距偏差现象,结果表明GPS、GLONASS、Galileo和北斗卫星不同信号均存在伪距偏差。

Stanford大学星基增强团队对导航信号失真引起的GPS伪距偏差作了深入的分析。文献[14]提出了两种分析不同相关间距的方法,一种利用抛物面天线进行数据采集和后处理操作,另一种利用可以配置不同相关间距的硬件接收机实时跟踪信号处理;综合比较了定向天线和全向天线采集信号计算的伪距偏差特性,得出由于定向天线的增益较大,利用大天线采集的信号计算的伪距偏差离散程度较小,而利用全向天线计算的伪距偏差的离散程度较大。通过对同一时刻同一卫星的两种方法的比较,表明两种观测方法得出的伪距偏差具有相似的范围和趋势,不一致性主要反映在观测噪声和多路径影响量级上。分析表明伪距偏差与接收机的相关间隔有关,以0.1码片为参考,相关间距相差越大,信号失真引起的伪

距偏差越大,接收机相关间距0.1~1.0码片间平均偏差为0.3 m,0.1~0.2码片的相关间距会导致平均偏差为0.15 m。

信号失真导致的伪距偏差,将进一步影响定位误差。文献[12]比较了伪距偏差对WASS用户双频无电离层组合和单频定位的最差定位误差的影响。对于单频SBAS用户,电离层误差是主要误差,伪距偏差影响相对较小。对于双频或多频的,观测量组合用于消除电离层误差,电离层组合比例因子对伪距偏差具有放大作用,使得伪距偏差成为双频组合观测量的重要误差分量。在单频情况下,最差用户误差为0.35 m~0.7 m,而双频最差用户误差为1.89 m~3.86 m。

接收机的前端滤波带宽同样是影响伪距偏差大小的重要因素。为了更有效地避免伪距偏差引起的最大误差的影响,文献[12]提出限制用户接收机相关间距可以避免双频用户定位遭受伪距偏差导致的显著性能降低。单频伪距偏差对最差用户误差的影响从21%~91%降低至4%~8%,双频伪距偏差对误差的影响从44%~264%降低至7%~22%^[9]。

GPS系统用户接口控制文件虽未指出伪距偏差现象的存在,但明确了对用户接收机的滤波带宽参数和相关参数的建议。不采用GPS系统用户接口控制文件约定的技术状态的用户接收机(滤波带宽为20.46 MHz,相关器间距为97.75 ns)伪距测量将包含由导航信号非理想导致的测量误差,从而引起用户定位授时误差。

德国DLR团队也对GPS、GLONASS和Galileo导航卫星伪距偏差作了较为详细的分析。文献[14]首先分析了伪距偏差的产生机理。指出导航信号的非理想特性导致不同技术状态的接收机对该信号的伪距测量产生大小和方向不同的伪距偏差。对多种接收机和多系统导航卫星伪距偏差的分析表明,伪距偏差的大小与接收机的相关器间隔和抗多径算法有关。对比发现,GPS L1 C/A伪距偏差大于P1码和P2码,Galileo卫星

所有信号伪距偏差均明显小于 GPS 信号^[15]。

北斗系统是我国独立自主建设的全球卫星导航系统,其建设过程分为 3 步走。2020 年 7 月底,北斗三号完成系统建设,服务区域扩展为全球范围,向全球用户提供导航、定位与授时服务^[16-17]。相比于北斗二号卫星,北斗三号卫星空间信号质量、卫星轨道及空间信号精度均有较大提升^[18-19]。由于信号体制不同,北斗三号卫星具有与北斗二号卫星显著不同的伪距偏差特征^[20]。目前国内外研究集中于对 GPS、GLONASS 和 Galileo 卫星伪距偏差测量与标定,但缺乏对北斗卫星下行导航信号伪距偏差的认识。本文根据伪距偏差的特征,提出北斗二号卫星和北斗三号卫星伪距偏差的标定方法,利用基于并置接收机的伪距偏差计算算法完成伪距偏差的精确标定和时空特征提取,并利用实测数据评估了伪距偏差对用户定位精度的影响,将其作为新的误差源。

1 伪距偏差标定方法

伪距偏差的计算算法包括并置接收机双差法和基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法。基于这两种方法计算的伪距偏差不受其他误差影响,可如实反映伪距测量的常数偏差。并置接收机双差法可解算出所有频点伪距的偏差,但需将并置接收机部署为短基线或者零基线。基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法可计算得到两个频点伪距偏差互差,不需两台接收机并置设置。需要说明的是,这两种算法计算得到的是两台接收机和两颗卫星的伪距偏差互差,而非绝对的伪距偏差。但是伪距偏差互差对于导航定位精度才有意义。若伪距偏差互差为 0,伪距偏差可以被现有导航参数吸收,不会对导航业务处理和导航定位精度产生不利影响。

1.1 并置接收机的伪距偏差计算方法

利用并置的两台不同型号接收机计算伪距偏差。并置的两台接收机 r1 和 r2,外接同一时频信号,相距不超过 20 m。以 B1I 频点为例,两台接收机对卫星 i 的伪距观测方程为

$$P_{r1}^j(B1I) = \rho_{r1}^i + c \cdot (\delta t_{r1} - \delta t^i) + c \cdot (DCB_{r1}^{B1I} + DCB_i^{B1I}) + \frac{TEC_{r1}^i}{f_1^2} + T_{r1}^i + rel_{r1}^i + orbe_{r1}^i + \alpha_{r1}^i(B1I) + \epsilon_{r1}^i \quad (1)$$

$$P_{r2}^j(B1I) = \rho_{r2}^i + c \cdot (\delta t_{r2} - \delta t^i) + c \cdot (DCB_{r2}^{B1I} +$$

$$DCB_i^{B1I}) + \frac{TEC_{r2}^i}{f_1^2} + T_{r2}^i + rel_{r2}^i + orbe_{r2}^i + \alpha_{r2}^i(B1I) + \epsilon_{r2}^i \quad (2)$$

式中,以接收机 r1 与卫星 i 为例; P_{r1}^i 为伪距观测值; ρ_{r1}^i 为利用预报星历计算的星地距离; $orbe_{r1}^i$ 为预报星历误差在星地方向上的投影; δt_{r1} 为接收机钟差; δt^i 为卫星钟差; c 为光速; DCB_{r1}^{B1I} 为 B1I 频点接收机码偏差参数; DCB_i^{B1I} 为 B1I 频点卫星码偏差参数; TEC_{r1}^i 为斜路径电子总含量; f_1 为 B1I 频点频率; TEC_{r1}^i 为斜路径总电子含量; T_{r1}^i 为对流层延迟; rel_{r1}^i 为相对论周期项; α_{r1}^i 为接收机 r1 对卫星 i 的伪距测量偏差; ϵ_{r1}^i 为伪距多路径误差和噪声。由于 r1 和 r2 相距不超过 20 m,外接同一时频信号,卫星星历误差、卫星钟差、电离层延迟、对流层延迟和接收机钟差对并置接收机伪距测量的影响是相同的。将 r1 和 r2 对卫星 i 的伪距观测作接收机间差分,得到单差 O-C,其数学期望应仅包含 r1 和 r2 对卫星 i 的伪距偏差之差和码偏差参数之差(码偏差在几天弧段内为常数)

$$E[\nabla OC_{r1r2}^i(B1I)] = c \cdot dDCB_{r1r2}^{B1I} + d\alpha_{r1r2}^i(B1I)$$

$$dDCB_{r1r2}^{B1I} = DCB_{r1}^{B1I} - DCB_{r2}^{B1I}$$

$$d\alpha_{r1r2}^i(B1I) = \alpha_{r1}^i(B1I) - \alpha_{r2}^i(B1I) \quad (3)$$

由于接收机码偏差参数对所有卫星均相同,选卫星 i 为基准星,将其他卫星单差 O-C 均值与卫星 i 单差 O-C 均值作差,可得其他卫星相对于卫星 i 的伪距偏差。

通过上述方法,可完成所有频点伪距偏差的计算。

1.2 基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法

对于未布设成并置接收机的监测网络,可通过比较不同接收机解算的 DCB 参数计算两个频点伪距偏差互差。假设接收机 r1 对卫星 i 的 B1I 频点和 B2I 频点伪距观测方程为

$$P_{r1}^j(B1I) = \rho_{r1}^i + c \cdot (\delta t_{r1} - \delta t^i) + c \cdot (DCB_{r1}^{B1I} + DCB_i^{B1I}) + \frac{TEC_{r1}^i}{f_1^2} + T_{r1}^i + rel_{r1}^i + orbe_{r1}^i + \alpha_{r1}^i(B1I) + \epsilon_{r1}^i \quad (4)$$

$$P_{r1}^j(B2I) = \rho_{r1}^i + c \cdot (\delta t_{r1} - \delta t^i) + c \cdot (DCB_{r1}^{B2I} + DCB_i^{B2I}) + \frac{TEC_{r1}^i}{f_2^2} + T_{r1}^i + rel_{r1}^i + orbe_{r1}^i + \alpha_{r1}^i(B2I) + \epsilon_{r1}^i \quad (5)$$

式中, f_2 为 B2I 频点频率,其余各符号含义与

式(1)相同。

将 B1I 频点伪距与 B2 频点伪距作差。

$$P_{r1}^j(B1I) - P_{r1}^j(B2I) = c \cdot (dDCB_{r1}^{B1B2I} + dDCB_i^{B1B2I}) +$$

$$\alpha_{r1}^i(B1I) - \alpha_{r1}^i(B2I) + TEC_{r1}^i \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$$

$$dDCB_{r1}^{B1B2I} = DCB_{r1}^{B1I} - DCB_{r1}^{B2I}$$

$$dDCB_i^{B1B2I} = DCB_i^{B1I} - DCB_i^{B2I}$$

(6)

被广泛采用的 DCB 参数和电离层模型参数解算模型将上式作为唯一输入观测量^[21-22], 码偏差参数 $dDCB_{r1}^{B1B2I}$ 、 $dDCB_i^{B1B2I}$ (两个频点的码偏差参数作差也是一种码偏差参数) 和电离层模型系数是待估参数。由式(6)可得, 待估码偏差参数与伪距偏差参数是完全相关的, 伪距偏差将被完全吸收到卫星和接收机 DCB 参数的解算结果。

IGS、MGEX、iGMAS 为 GNSS 数据处理科学研究提供了充足的公开数据源^[23-25]。可将 IGS、MGEX 和 iGMAS 所有接收机按照接收机型号划分为若干子集。利用每个子集的所有接收机观测数据分别解算卫星 DCB 参数。通过比对每个子集解算的卫星 DCB 参数, 便可得到不同接收机间伪距偏差互差。

并置接收机的伪距偏差计算方法需将两种或者多种不同型号监测接收机布设称为短基线或者零基线, 对试验场景要求较苛刻。而基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法不受地理位置限制。并置接收机的伪距偏差计算方法可完成所有频点伪距偏差标定, 而基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法仅能计算得到不同频点伪距偏差的差异。

2 北斗卫星伪距偏差标定及特征分析

2.1 伪距偏差标定结果稳定度

将两类不同型号的接收机布设成短基线。利用并置接收机伪距相位数据根据短基线双差并置比对法每天弧段计算 B1I 和 B3I 频点伪距偏差。数据选择为 2020 年年积日 DOY147—277。计算选择始终对中国区域可视的 C01 为基准星, 完成其他卫星 B1I、B3I 伪距偏差。

上述弧段观测数据计算的部分卫星 B1I 伪距偏差序列如图 1 所示。所有卫星 B1I、B3I 伪距偏差标定结果的均值与波动 STD 情况分别见图 2 和图 3。从图 1 可以看出, 120 多天的伪距偏差计算序列比较平稳, 虽然波动较大, 但未见明显的变化趋势。从图 3 可以看出, 不同卫星 B1I 和 B3I

频点伪距偏差序列波动 STD 量级大致相当, 均约为 0.1 m。伪距偏差序列波动 STD 未呈现与卫星和信号频率明显的关联性。

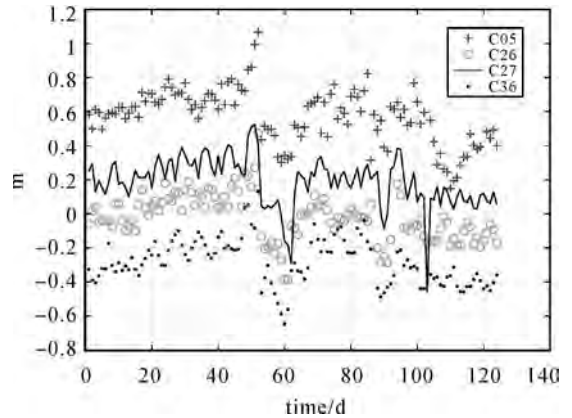


图 1 部分卫星 B1I 频点伪距偏差序列

Fig.1 Partial pseudorange deviation sequence of satellite B1I frequency points

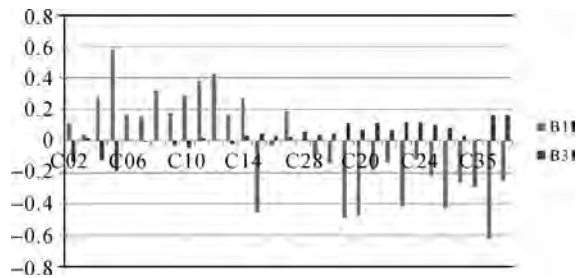


图 2 所有卫星 B1I、B3I 伪距偏差计算序列均值

Fig.2 Mean values of pseudorange deviations of all satellites B1I and B3I

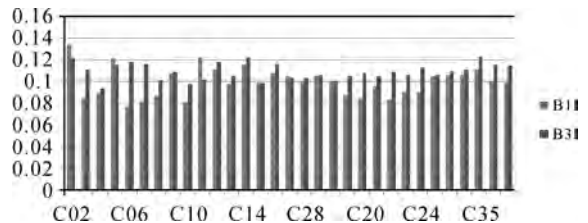


图 3 所有卫星 B1I、B3I 伪距偏差计算序列波动 STD

Fig.3 STD of pseudorange deviation Calculation sequence fluctuation of all satellites B1I and B3I

但是从图 2 可以看出, B1I、B3I 伪距偏差具有明显的量级差距, 且呈现出与卫星和频点的强关联性。不同卫星伪距偏差量级显著不同。以 C01 为参考星, 不同卫星 B1I 频点伪距偏差量级差别明显, C05 卫星的 B1I 频点伪距偏差可达正向 0.5 m, C36 卫星的 B1I 频点伪距偏差可达负向最大值 -0.6 m, 而部分卫星如 C26 和 C28 卫星

的 B1I 频点伪距偏差接近于 0。相比之下,卫星 B3 频点伪距偏差量级差别较小。参考于 C01 卫星, C05、C36 和 C37 卫星 B3I 伪距偏差最大,但绝对值小于 0.2 m。

虽然北斗卫星 B1I 伪距偏差计算序列波动 STD 与 B3I 伪距偏差计算序列波动 STD 相当,但 B1I 频点伪距偏差量级最大为 0.6 m,大于 B3I 频点伪距偏差量级,最大仅为 0.2 m。

2.2 伪距偏差标定多站一致性

分别利用分布于国内东北、西南、西北和华北 4 个不同站点布设的两种型号接收机,采用短基线双差并置比对法计算北斗卫星 B1I 和 B3I 频点伪距偏差,计算结果见图 4 和图 5。从图 4 可以看出,除西南站对 C04 卫星伪距偏差计算结果与其他卫星显著不同外,不同位置的短基线双差并置比对法计算的其他卫星 B1I 频点伪距偏差随卫星号的函数变化趋势相当,最大差异不超过 20 cm。从图 5 可以看出,西南站对所有卫星 B3I 频点伪距偏差计算结果与其他各站显著不同,其他各站 B3I 频点伪距偏差趋势几乎完全相同,最大误差不超过 5 cm。结果表明,不同测站标定的伪距偏差具备较高的一致性。

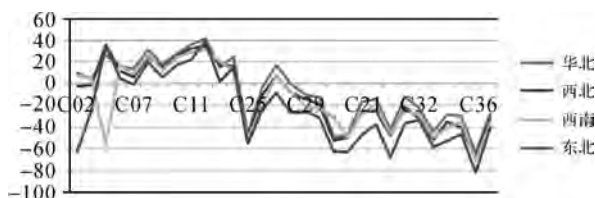


图 4 不同站对所有卫星 B1I 伪距偏差计算结果

Fig.4 Calculation results of pseudorange deviation of all satellites B1I by different stations

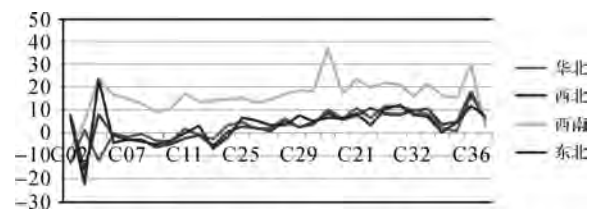


图 5 不同站对所有卫星 B3I 伪距偏差计算结果

Fig.5 Calculation results of pseudorange deviation of all satellites B3I by different stations

2.3 伪距偏差结果分析

利用短基线双差并置比对法处理相同时段并置接收机观测数据,可得到新体制信号 B1C 和 B2a 伪距偏差测量结果。其中新体制信号 B1C

和 B2a 伪距偏差测量以 C19 卫星为参考,B1I 和 B3I 信号伪距偏差测量以 C01 卫星为参考。将 B1C、B2a、B1I 和 B3I 信号伪距偏差随卫星的关系如图 6。从图中可以看出,新体制信号 B1C 伪距偏差小于 0.2 m,明显好于 B1 频点另一信号分量 B1I 的伪距偏差。另外,B2a 频点伪距偏差最小,约为 10 cm,较 B3I 频点和 B1C 频点伪距偏差小。

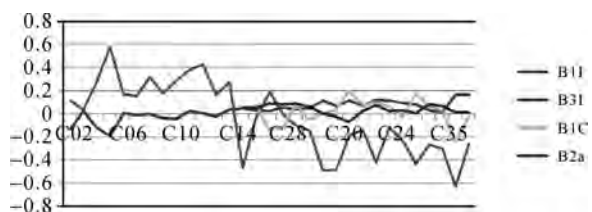


图 6 北斗卫星不同频点伪距偏差比较

Fig.6 Comparison of Pseudorange Deviation between Different frequency points of BeiDou Satellite

利用相同算法处理接收机对 GPS 卫星的伪距相位数据,得到 GPS 卫星 L1C/A、L2C 和 L5C 信号分量的伪距偏差。将某个信号的伪距偏差最大值与伪距偏差最小值作差,以衡量信号伪距偏差大小。图 7 为 GPS 卫星信号分量与北斗卫星信号分量伪距偏差最大值与最小值的差。可以看到,北斗卫星 B1 频点、GPS 卫星 L1C/A 伪距偏差明显均明显大于其他频点。在 1.5G 频段,北斗卫星 B1I 频点伪距偏差最大,约为 1.2 m,大于 GPS 卫星 L1C/A 频点。北斗卫星新体制信号 B1C 伪距偏差最小,约为 0.4 m,较北斗卫星 B1I 频点伪距偏差明显改善,也明显好于 GPS 卫星 L1C/A 频点伪距偏差。

在其他频段,GPS 卫星 L2C 伪距偏差略大于北斗卫星 B3I 伪距偏差,L5C 频点伪距偏差次之,B2a 频点伪距偏差最小。这表明,随着北斗系统发展,新体制信号质量得到改善,伪距偏差量级减小。

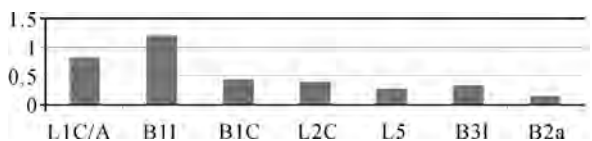


图 7 北斗卫星与 GPS 卫星不同频点伪距偏差比较

Fig.7 Comparison of Pseudorange deviation between BeiDou Satellite and GPS Satellite at different frequency points

3 伪距偏差对用户定位精度影响

如前所述,伪距偏差是新发现的伪距测量常数偏差。由于卫星发射通道故障或非理想特性均会导致导航信号失真,从而导致接收机测量的伪距产生常数的测量偏差伪距偏差,不同技术状态的接收机对同一导航信号测量产生符号不同、大小不同的常数偏差。若所有卫星导航信号的非理想特性不同,同一接收机对所有卫星的伪距偏差的大小和数值完全相同,该偏差可以完全被接收机钟差或者接收机码偏差参数吸收,从而不对用户导航定位授时精度产生不利影响。若所有用户接收机和监测接收机技术状态完全一致,所有接收机观测到某一卫星的伪距偏差相同,则该偏差可以被卫星钟差或者卫星码偏差参数吸收,从而不对用户导航定位授时精度产生不利影响。但是,不同卫星导航信号的非理想状态并不相同,不同厂家监测接收机和用户接收机技术状态也不一致,伪距偏差无法被卫星钟差或卫星码偏差参数、接收机钟差或者接收机码偏差参数吸收,从而引起导航参数的计算误差,影响导航参数的解算精度,进而引起用户定位精度的恶化。

图 8 描述为伪距偏差与群延迟参数互差比对比情况。对比发现,伪距偏差与群延迟参数互差具备很强的相关性。若用户接收机与基准接收机技术状态存在差别而造成比较大的伪距偏差,用户使用导航电文播发的 TGD 参数进行定位解算,必将承受比较大的误差。

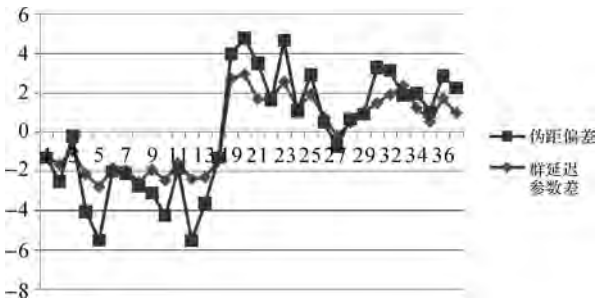


图 8 群延迟参数互差与伪距偏差对比

Fig.8 Group delay parameter mutual difference and pseudorange deviation ratio

分别使用 IGS 提供的群延迟参数和导航电文播发的群延迟参数对 IGS 站进行定位解算,定位精度如表 1 所示。分别使用 IGS 提供的群延迟参数和导航电文播发的群延迟参数对国内站进

行定位解算,定位精度如表 2 所示。相比于导航电文的 TGD 参数,使用 IGS 计算的 DCB 参数可以提升 IGS 测站的定位精度,但是大幅降低国内接收机的定位精度。同样地,相比于 IGS 计算的 DCB 参数,使用导航电文的 TGD 参数可以提升国内接收机的定位精度,但是大幅降低 IGS 测站的定位精度的定位精度。由于伪距偏差存在,并不能找到适用于所有接收机的群延迟参数。

表 1 IGS 站双频定位误差统计

Tab.1 DUAL-frequency positioning error statistics of IGS

Station	m	
	水平	高程
群延迟参数来源		
IGS	1.672	2.544
导航电文	2.020	2.923

表 2 国内接收机双频定位误差统计

Tab. 2 Dual-frequency positioning error statistics of domestic receivers

Station	m	
	水平	高程
群延迟参数来源		
IGS	1.694	2.413
导航电文	0.823	1.059

4 结论

本文提出 GNSS 精密数据处理和用户导航定位授时解算需顾及的新的误差源-伪距测量常数偏差。伪距偏差是由卫星下行导航信号非理想特征引起的不同技术状态接收机对下行信号测量导致的多路径误差和噪声不同,也无法被现有的与卫星有关或者与接收机有关的导航参数表达,是一种新的误差源。

根据伪距偏差的误差特征,本文提出两种伪距偏差标定方法,即并置接收机双差法和基于 DCB 参数的伪距偏差计算方法。基于这两种方法计算的伪距偏差不受其他误差影响,可如实反映伪距测量的常数偏差。通过并置接收机双差对比法完成了北斗卫星伪距偏差的计算。结果表明,并置接收机双差对比法得到的伪距偏差离散度约为 10 cm。伪距偏差具有不随时间明显变化的特征,不同地理环境布设的伪距偏差具有较好的一致性。对比发现,北斗卫星新体制信号 B1C 伪距偏差最小,约为 0.4 m,较北斗卫星 B1I 频点伪距偏差明显改善,也明显好于 GPS 卫星 L1C/A 频点伪距偏差。北斗卫星 B3I 伪距偏差略小于

GPS 卫星 L2C 伪距偏差, B2a 频点伪距偏差也小于 L5C 频点伪距偏差。

对不同接收机的数据处理表明, 伪距偏差与群延迟参数解算高度相关。IGS 计算的 DCB 参数可以提升 IGS 测站的定位精度, 使用导航电文的 TGD 参数可以提升国内接收机的定位精度。不同技术状态接收机存在的伪距偏差已成为影响用户定位精度的主要误差。大系统需结合用户典型接收方式和不同厂家接收机的参数设置, 设计合理的群延迟参数计算数据源, 使得导航电文播发的群延迟参数与用户接收机更为自洽。

参考文献:

- [1] TEUNISSEN P J G, MONTENBRUCK O. Springer handbook of global navigation satellite systems [M]. Cham: Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-319-42928-1.
- [2] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective[J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- [3] CHEN Jinping, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2020, 63(6): 269511.
- [4] LI Ran, CAO Yueling, HU Xiaogong, et al. Analysis of the wide area differential correction for BeiDou global satellite navigation system[J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2018, 18(11): 133.
- [5] STEIGENBERGER P, MONTENBRUCK O. Galileo status: orbits, clocks, and positioning[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 319-331.
- [6] WANNINGER L, BEER S. BeiDou satellite-induced code pseudorange variations: diagnosis and therapy[J]. GPS Solutions, 2015, 19(4): 639-648.
- [7] BEER S, WANNINGER L. Temporal stability of GPS transmitter group delay variations[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1744.
- [8] 倪少杰, 王耀鼎, 封欣, 等. 北斗卫星伪距信号质量评估及偏差校正[J]. 国防科技大学学报, 2017, 39(4): 87-91. NI Shaojie, WANG Yaoding, FENG Xin, et al. Quality assessment and error correction of BeiDou satellite pseudorange signal [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2017, 39(4): 87-91.
- [9] PHELTS R E, AKOS D M, ENGE P. Robust signal quality monitoring and detection of evil waveforms[C]//Proceedings of the 13th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Anaheim: Institute of Navigation, 2000: 1180-1190.
- [10] GABRIEL W, PHELTS R E, WALTER T, et al. Characterization of signal deformations for GPS and WAAS satellites[C]//Proceedings of the 23rd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Portland: Institute of Navigation, 2010: 3143-3151.
- [11] WONG G, CHEN Y H, PHELTS R E, et al. Measuring code-phase differences due to inter-satellite hardware differences[C] // Proceedings of the 25th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Nashville: Institute of Navigation, 2012: 2150-2158.
- [12] WONG G, CHEN Y H, PHELTS R E, et al. Mitigation of nominal signal deformations on dual-frequency WAAS position errors[C]//Proceedings of the 27th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Tampa: Institute of Navigation, 2014: 3129-3147.
- [13] WONG G, PHELTS R E, WALTER T, et al. Bounding errors caused by nominal GNSS signal deformations[C]//Proceedings of the 24th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation. Portland: Institute of Navigation, 2011: 2657-2664.
- [14] HAUSCHILD A É, MONTENBRUCK O. The effect of Correlator and front-end design on GNSS Pseudorange biases for geodetic receivers[J]. Navigation, 2016, 63(4): 443-453.
- [15] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O. A study on the dependency of GNSS pseudorange biases on correlator spacing[J]. GPS Solutions, 2016, 20(2): 159-171.
- [16] CHEN Jinping, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system[J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2020, 63(6): 269511.
- [17] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [J]. Navigation, 2019, 66(1): 7-18.
- [18] ZENG Tian, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. Results and Analyses of BDS Precise Orbit Determination with the Enhancement of Fengyun-3C[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(3): 68-78. DOI: 10.11947/j.JGGS.2019.0307.
- [19] CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellites [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2020, 3(2): 45-52. DOI: 10.11947/j.JGGS.2020.0205.

- [20] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
- [21] 王宁波, 袁运斌, 张宝成, 等. GPS 民用广播星历中 ISC 参数精度分析及其对导航定位的影响[J]. 测绘学报, 2016, 45(8): 919-928. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150554.
WANG Ningbo, YUAN Yunbin, ZHANG Baocheng, et al. Accuracy evaluation of GPS broadcast Inter-Signal Correction (ISC) Parameters and their impacts on GPS standard positioning[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(8): 919-928. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20150554.
- [22] 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.
- [23] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, PRANGE L, et al. The Multi-GNSS Experiment (MGEX) of the International GNSS Service (IGS)-Achievements, prospects and challenges[J]. Advances in Space Research, 2017, 59(7): 1671-1697.
- [24] 焦文海, 丁群, 李建文, 等. GNSS 开放服务的监测评估[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(5): 521-527.
JIAO Wenhai, DING Qun, LI Jianwen et al. Monitoring and assessment of GNSS open services[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2011, 41(5): 521-527.
- [25] DOW J M, NEILAN R E, RIZOS C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(7): 689-689.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2020-07-21

修回日期: 2020-08-25

第一作者简介: 唐成盼(1989—),男,博士,助理研究员,研究方向为卫星导航原理及应用。

First author: TANG Chengpan (1989—), male, PhD, assistant researcher, majors in theory and application of satellite navigation.

E-mail: cptang@shao.ac.cn

通信作者: 宿晨庚

Corresponding author: SU Chengeng

E-mail: 156687438@qq.com

引文格式:章浙涛,李博峰,何秀凤.北斗三号多频相位模糊度无几何单历元固定方法[J].测绘学报,2020,49(9):1139-1148. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200325.
ZHANG Zhetao, LI Bofeng, HE Xiufeng. Geometry-free single-epoch resolution of BDS-3 multi-frequency carrier ambiguities [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1139-1148. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200325.

北斗三号多频相位模糊度无几何单历元固定方法

章浙涛^{1,2}, 李博峰³, 何秀凤¹

1. 河海大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 71004; 3. 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

Geometry-free single-epoch resolution of BDS-3 multi-frequency carrier ambiguities

ZHANG Zhetao^{1,2}, LI Bofeng³, HE Xiufeng¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization(FSDI), Xi'an 710043, China; 3. College of Surveying and GeoInformatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract: The BDS-3 navigation satellite system currently provides five-frequency observations, so theoretically it can perform multi-frequency carrier ambiguity resolution (MCAR). This paper systematically studies the basic theory and method of the MCAR, including three-frequency (TCAR), four-frequency (FCAR) and five-frequency (FiCAR) carrier ambiguity resolution. Firstly, from the perspective of linear combination, basic mathematical models including TCAR, FCAR and FiCAR methods are given. Secondly, the high-quality signals and the optimal linear combinations under different conditions of baseline lengths are discussed. In addition, single-epoch ambiguity resolution using geometry-free model is analyzed. Finally, experiments were conducted using the real BDS-3 five-frequency data. The results showed that the MCAR can effectively fix the ambiguities in single epoch, and the increase of the frequency number can significantly improve the success rates of the ambiguity resolution.

Key words: BDS-3; ambiguity resolution; multi-frequency observations; geometry-free model; single epoch

Foundation support: The State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI) Grant (No. SKLK20-07); China Postdoctoral Science Foundation (No. 2020M671324); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2019B03714); The Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (No. 2020Z412); The State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics Grant (No. SKLGED2020-3-8-E); The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41830110; 41874030)

摘 要: 北斗三号全球卫星导航系统目前已提供 5 个频率的观测数据, 因此理论上可进行多频相位模糊度解算(MCAR)。本文系统研究了 MCAR 的基本理论和方法, 包括三频(TCAR)、四频(FCAR)和五频(FiCAR)相位模糊度固定。首先, 从线性组合角度出发, 给出了 TCAR、FCAR 和 FiCAR 方法在内的基本数学模型。其次, 探讨了高质量信号及在不同基线长度条件下的最优线性组合。此外, 分析了利用无几何模型单历元模糊度固定的常用方法。最后, 利用实测北斗三号五频观测数据进行了试验。结果表明, MCAR 可有效进行单历元模糊度固定, 同时频率数增加可显著提高模糊度固定成功率。

关键词: 北斗三号; 模糊度固定; 多频观测值; 无几何模型; 单历元

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2020)09-1139-10

基金项目: 轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院)开放课题(SKLK20-07); 中国博士后科学基金(2020M671324); 中央高校基本科研业务费专项资金(2019B03714); 江苏省博士后科研资助计划项目(2020Z412); 大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金(SKLGED2020-3-8-E); 国家自然科学基金基

金(41830110;41874030)

整周模糊度解算是高精度 GNSS 定位的重要前提,尤其是在实时精密定位中更需要对模糊度进行快速可靠地固定。然而,由于非模型化误差等的存在^[1-2],如对流层和电离层延迟、多路径效应,这些误差都使模糊度有偏,并使浮点解精度降低,从而影响模糊度的解算,尤其是在大尺度定位或是面向复杂环境定位中^[3-5]。如何解决模糊度的快速解算,甚至是单历元固定问题,是 GNSS 精密定位的一个关键所在。

通常,采用三频观测值进行模糊度快速固定是一个常用方法,即 TCAR (three-frequency carrier ambiguity resolution)。TCAR 的概念最早由文献^[6-7]等提出。随后,文献^[8-9]提出了类似的 CIR(cascaded integer resolution)的概念,其本质上与 TCAR 相同。传统 TCAR 指的是根据波长从最长到最短的顺序通过四舍五入的方法固定所选线性组合的整周模糊度。事实上,TCAR 方法不仅可以用四舍五入的方法,也可通过 Bootstrapping 或者整数最小二乘(ILS)的方法进行确定。通常,根据波长的不同,线性组合可分为超宽巷(EWL, $\lambda \geq 2.93$ m),宽巷(WL, $0.75 \text{ m} \leq \lambda < 2.93$ m),中巷(ML, $0.19 \text{ m} \leq \lambda < 0.75$ m)和窄巷(NL, $0.10 \text{ m} \leq \lambda < 0.19$ m)^[3]。本质上,传统 TCAR 方法是基于 GF(Geometry-Free)模型的 Bootstrapping 算法。然而,Bootstrapping 考虑了待固定模糊度之间的相关性,而 ILS 方法则更具优势,其通过找浮点模糊度的最小范数解来考虑所有待固定模糊度间的相关性^[10]。之后,TCAR 又被拓展为通过 GB(Geometry-Based)模型进行求解^[11-12]。为了进一步提高 TCAR 的性能,文献^[13-14]系统研究了三频 GPS 的最优线性组合。文献^[15]提出了一种与基线长度无关的 GIF(Geo-Iono-Free)模型解算模糊度。文献^[16-17]则分别将电离层延迟和多路径效应充分考虑到 TCAR 中。

目前,北斗三号(BDS-3)全球卫星导航系统已正式开通,并提供全系统服务^[18-19]。针对北斗系统,已有相应的模糊度固定方面的研究,如文献^[20]详细研究了 BDS-2 三频相位观测值的线性组合及其特性,文献^[21-22]分析了北斗三频的短基线单历元模糊度固定方法,此外文献^[23-24]则探讨了 BDS-2 在网络 RTK 中的应用。然

而,北斗三号已公开提供 5 个频率的数据^[25-26],理论上来说三频相位模糊度固定 TCAR(three-frequency carrier ambiguity resolution)、四频相位模糊度固定 FCAR(four-frequency carrier ambiguity resolution)以及五频相位模糊度固定 FiCAR(five-frequency carrier ambiguity resolution)等多频相位模糊度固定 MCAR(multi-frequency carrier ambiguity resolution)可以进一步增强实时精密定位性能^[27]。虽然已有部分研究表明 FCAR 甚至 FiCAR 在策略和性能上与 TCAR 存在一定差异^[28-29],然而目前并没有 MCAR 方面,尤其是北斗三号 MCAR 方面的深入研究,更没有对 TCAR、FCAR 和 FiCAR 方面的系统比较。

由于北斗三号系统为研究 MCAR 提供了良好的机遇,因此有必要深入研究 MCAR 的基本原理及方法。本文以北斗三号为例,首次深入研究了 TCAR、FCAR 和 FiCAR 在内的 MCAR 线性组合,以及在单历元模糊度固定中的基本模型和方法。此外,通过实测五频北斗三号数据,比较和分析了 TCAR、FCAR 和 FiCAR 在内的性能。

1 北斗三号多频观测值线性组合

北斗三号全球卫星导航系统的设计星座由 3 颗地球静止轨道(GEO)卫星,3 颗倾斜地球同步轨道(IGSO)卫星和 24 颗中圆地球轨道(MEO)卫星构成,且具备独特的星间链路功能。目前,北斗三号在 B1、B2 和 B3 3 个频段提供 B1I、B1C、B2a 和 B3I 4 个公开授权服务信号,此外还拥有精密单点定位服务功能的 B2b 信号^[26]。北斗三号 5 个频率信号的具体信息见表 1。

表 1 北斗三号全球卫星导航系统信号信息

Tab.1 Signal information of the BDS-3 global navigation satellite system

类型	频率/MHz	波长/cm
B1C	1 575.420	19.03
B1I	1 561.098	19.20
B3I	1 268.520	23.63
B2b	1 207.140	24.83
B2a	1 176.450	25.48

设有 3 个或 3 个以上的频率可供使用,即满足多频观测条件,此时多频观测值线性组合的频

率、波长和双差整周模糊度分别为

$$f_{(k)} = i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k \quad (1)$$

$$\lambda_{(k)} = \frac{c}{i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k} \quad (2)$$

$$\nabla\Delta N_{(k)} = i_1 \cdot \nabla\Delta N_1 + i_2 \cdot \nabla\Delta N_2 + \dots + i_k \cdot \nabla\Delta N_k \quad (3)$$

式中,频率数 $k \geq 3$, c 表示真空中的光速; i_1, i_2 至 i_k 表示任意整数系数; f_1, f_2 至 f_k 表示频率,且本文满足 $f_1 > f_2 > \dots > f_k$; $\nabla\Delta N_1, \nabla\Delta N_2$ 至 $\nabla\Delta N_k$ 表示相应的双差整周模糊度,因此保留整数特性。相应的多频双差伪距和相位线性组合观测值可表示为

$$\nabla\Delta P_{(k)} = \nabla\Delta P_{[i_1, i_2, \dots, i_k]} = \frac{i_1 \cdot f_1 \cdot \nabla\Delta P_1 + i_2 \cdot f_2 \cdot \nabla\Delta P_2 + \dots + i_k \cdot f_k \cdot \nabla\Delta P_k}{i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k} \quad (4)$$

$$\nabla\Delta\Phi_{(k)} = \nabla\Delta\Phi_{[i_1, i_2, \dots, i_k]} = \frac{i_1 \cdot f_1 \cdot \nabla\Delta\Phi_1 + i_2 \cdot f_2 \cdot \nabla\Delta\Phi_2 + \dots + i_k \cdot f_k \cdot \nabla\Delta\Phi_k}{i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k} \quad (5)$$

式中, $\nabla\Delta P_1, \nabla\Delta P_2$ 至 $\nabla\Delta P_k$ 表示频率 f_1, f_2 至 f_k 对应的双差伪距观测值; $\nabla\Delta\Phi_1, \nabla\Delta\Phi_2$ 至 $\nabla\Delta\Phi_k$ 表示频率 f_1, f_2 至 f_k 对应的双差相位观测值。显然,上述多频双差伪距和相位线性组合观测值即为虚拟信号,可展开为

$$\nabla\Delta P_{(k)} = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta O + \nabla\Delta T + \beta_{(k)} \nabla\Delta I_{fir} + \theta_{(k)} \nabla\Delta I_{sec} + \epsilon_{\nabla\Delta P_{(k)}} \quad (6)$$

$$\nabla\Delta\Phi_{(k)} = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta O + \nabla\Delta T - \beta_{(k)} \nabla\Delta I_{fir} - \theta_{(k)} \nabla\Delta I_{sec} - \lambda_{(k)} \nabla\Delta N_{(k)} + \epsilon_{\nabla\Delta\Phi_{(k)}} \quad (7)$$

式中, $\nabla\Delta\rho$ 表示双差卫地距; $\nabla\Delta O$ 表示双差轨道误差; $\nabla\Delta T$ 表示双差对流层延迟; $\nabla\Delta I_{fir}$ 表示频率 f_1 对应的双差相位一阶电离层延迟; $\nabla\Delta I_{sec}$ 表示频率 f_1 对应的双差相位二阶电离层延迟; $\epsilon_{\nabla\Delta P_{(k)}}$ 和 $\epsilon_{\nabla\Delta\Phi_{(k)}}$ 分别表示 $\nabla\Delta P_{(k)}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{(k)}$ 的观测值噪声。此外, $\beta_{(k)}$ 和 $\theta_{(k)}$ 分别表示一阶和二阶电离层延迟对应的尺度因子

$$\beta_{(k)} = \frac{f_1^2 (i_1/f_1 + i_2/f_2 + \dots + i_k/f_k)}{i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k} \quad (8)$$

$$\theta_{(k)} = \frac{f_1^3 (i_1/f_1^2 + i_2/f_2^2 + \dots + i_k/f_k^2)}{i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k} \quad (9)$$

不失一般性,设各频率的观测值噪声视为相等且独立,即满足 $\epsilon_{\nabla\Delta P_1} = \epsilon_{\nabla\Delta P_2} = \dots = \epsilon_{\nabla\Delta P_k} = \epsilon_{\nabla\Delta P}$, $\epsilon_{\nabla\Delta\Phi_1} = \epsilon_{\nabla\Delta\Phi_2} = \dots = \epsilon_{\nabla\Delta\Phi_k} = \epsilon_{\nabla\Delta\Phi}$, 其中 $\epsilon_{\nabla\Delta P}$ 和 $\epsilon_{\nabla\Delta\Phi}$ 分别表示等价双差伪距和相位观测值噪声。

相应的多频双差伪距和相位线性组合观测值噪声精度满足

$$\sigma_{\epsilon_{\nabla\Delta P_{(k)}}}^2 = \eta_{(k)}^2 \sigma_{\epsilon_{\nabla\Delta P}}^2 \quad (10)$$

$$\sigma_{\epsilon_{\nabla\Delta\Phi_{(k)}}}^2 = \eta_{(k)}^2 \sigma_{\epsilon_{\nabla\Delta\Phi}}^2 \quad (11)$$

式中, $\sigma_{\epsilon_{\nabla\Delta P}}$ 和 $\sigma_{\epsilon_{\nabla\Delta\Phi}}$ 分别表示等价双差伪距和相位观测值噪声精度, $\eta_{(k)}$ 表示比例系数并有

$$\eta_{(k)}^2 = \frac{(i_1 \cdot f_1)^2 + (i_2 \cdot f_2)^2 + \dots + (i_k \cdot f_k)^2}{(i_1 \cdot f_1 + i_2 \cdot f_2 + \dots + i_k \cdot f_k)^2}。$$

2 多频相位模糊度单历元固定模型

为实现单历元模糊度固定,需要构建足够多的波长较长的虚拟信号。在 TCAR、FCAR 以及 FiCAR 中,分别需要选择 3 个、4 个和 5 个独立信号。其中信号独立是指这些虚拟信号之间无法直接线性表示,即组成这些信号的系数矩阵为满秩矩阵。显然,通过不同形式的组合,每种类型的 MCAR 中有无穷多个选择。因此,需要根据一定准则选取其中的最优组合作为多频相位模糊度单历元固定模型,例如依据信号波长,电离层延迟尺度因子或观测值噪声比例系数等。显然,一个高质量的线性组合通常满足信号波长较长,电离层延迟尺度因子较小以及观测值噪声比例系数较小等条件。

为探索北斗三号 TCAR、FCAR 以及 FiCAR 理论上的最优组合,需要详细研究各种不同系数组合的虚拟信号性质。根据官方最新发布文件,北斗三号系统三频数据通常是指 B1C、B3I 和 B2a 这 3 类信号,北斗三号四频数据通常是指 B1C、B1I、B3I 和 B2a 这 4 类信号,北斗三号五频数据通常是指 B1C、B1I、B3I、B2b 和 B2a 这 5 类信号^[25-26]。由于需要实现模糊度单历元固定,首先考虑信号波长较长,电离层尺度因子较小和观测值噪声比例系数较小的最优超宽巷组合,本文将同时满足系数范围在常用的 $[-10, 10]$, 以及 $\lambda \geq 2.93 \text{ m}$, $|\beta_{(k)}| < 1.8$ 和 $|\eta_{(k)}| < 250$ 的信号作为高质量信号。北斗三号三频、四频和五频场景下满足上述条件的高质量信号总数分别为 3、32 和 604,具体数量对比如图 1 所示。可以发现,频率数越多高质量信号越多,尤其是当有 5 个频率时,高质量信号分别为四频和三频的约 20 倍和 200 倍,呈现指数式增长。因此,当频率数增加时,MCAR 中可供选择的高质量信号越多。

表 2 至表 4 是北斗三号三频、四频和五频场景下的高质量信号具体信息,由于四频和五频场

景下满足条件的高质量信号较多,在表 3 和表 4 中仅列出具有最长信号波长,最小一阶、二阶电离层延迟尺度因子,以及最小观测值噪声比例系数的超宽巷组合。由表 2 至表 4 可以看出,高质量信号具有较长波长的同时,电离层延迟尺度因子和噪声比例系数都控制在一定水平,因此可用于单历元模糊度固定,加粗部分为所对应列中的最小值。此外,比较三频、四频和五频场景,高质量信号的质量更好,即具有更长的信号波长,更小的电离层尺度因子和更小的观测值噪声比例系数。具体来说,针对三频情形,共有 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-4,3]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[-1.5,-4]}$ 以及 $\nabla\Delta\Phi_{[0.1,-1]}$ 3 个高质量虚拟信号;针对四频情形,其满足条件信号中 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1,0,0]}$ 拥有更长的波长 20.932 3 m, $\nabla\Delta\Phi_{[-4.5,-3,2]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[-1,2,-3,3]}$ 分别拥有更小的一阶和二阶电离层延迟尺度因子绝对值;针对五频情形,可以进一步得到更高质量的虚拟信号,例如拥有几乎可以达到与无电离层组合相当的信号,即仅有 $\beta_{(5)} = -0.002 3$ 的 $\nabla\Delta\Phi_{[-1,2,-4,2,1]}$ 以及 $\theta_{(5)} = -0.002 3$ 的 $\nabla\Delta\Phi_{[-4,5,-1,-5,5]}$ 。综上,证明了频率数越多,MCAR 模糊度固定效率理论上应该更高。

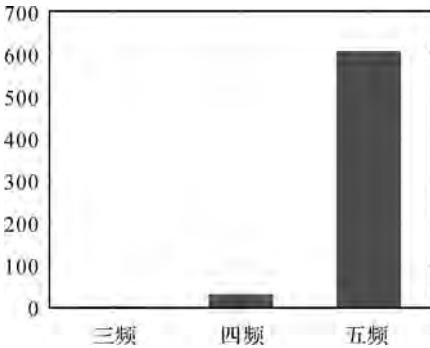


图 1 北斗三号三频、四频和五频场景下的高质量信号总数

Fig.1 Total numbers of high-quality signals under the circumstances of BDS-3 three frequencies, four frequencies and five frequencies

表 2 北斗三号三频场景下高质量信号及其相关信息

Tab. 2 High-quality signals and the corresponding information under the circumstances of BDS-3 three frequencies

i_1	i_2	i_3	$\lambda_{(3)}$	$\beta_{(3)}$	$\theta_{(3)}$	$\eta_{(3)}$
1	-4	3	9.768 4	2.548 7	10.790 1	207.834 6
-1	5	-4	4.884 2	-3.769 0	-11.833 9	131.203 4
0	1	-1	3.256 1	-1.663 1	-4.292 6	18.790 9

表 3 北斗三号四频场景下高质量信号及其相关信息

Tab. 3 High-quality signals and the corresponding information under the circumstances of BDS-3 four frequencies

i_1	i_2	i_3	i_4	$\lambda_{(4)}$	$\beta_{(4)}$	$\theta_{(4)}$	$\eta_{(4)}$
1	-1	0	0	20.932 3	-1.009 2	-2.027 6	154.858 0
-4	5	-3	2	5.861 0	-0.051 6	1.586 0	214.747 2
0	0	1	-1	3.256 1	-1.663 1	-4.292 6	18.790 9
-1	2	-3	2	3.185 4	-0.488 7	-0.063 7	60.338 0

表 4 北斗三号五频场景下高质量信号及其相关信息

Tab. 4 High-quality signals and the corresponding information under the circumstances of BDS-3 five frequencies

i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	$\lambda_{(5)}$	$\beta_{(5)}$	$\theta_{(5)}$	$\eta_{(5)}$
1	-1	0	0	0	20.932 3	-1.009 2	-2.027 6	154.858 0
-1	2	-4	2	1	4.726 6	-0.002 3	1.664 5	105.986 3
-4	5	-1	-5	5	3.663 2	-0.497 3	-0.002 3	160.843 8
0	0	1	0	-1	3.256 1	-1.663 1	-4.292 6	18.790 9

然而,在实际应用中,上述拥有长信号波长,或最小电离层延迟尺度因子,或最小观测值噪声比例系数的高质量信号并不一定能够获得最佳的模糊度固定效果,其主要原因是他们的误差相对于自身波长并非最小。因此,需要引入总噪声水平(TNL)这个概念。具体的,假设已知观测方程中各误差项的精度已知,则根据观测方程式(6)和式(7)可得伪距和相位的 TNL,其单位分别为 m 和 cycle,如下

$$\sigma_{TP} = \sqrt{\sigma_{\nabla\Delta O}^2 + \sigma_{\nabla\Delta T}^2 + \beta_{(k)}^2 \sigma_{\nabla\Delta I_1}^2 + \theta_{(k)}^2 \sigma_{\nabla\Delta I_2}^2 + \sigma_{\epsilon\nabla\Delta P(k)}^2} \tag{12}$$

$$\sigma_{T\Phi} = \frac{1}{\lambda_{(k)}} \sqrt{\sigma_{\nabla\Delta O}^2 + \sigma_{\nabla\Delta T}^2 + \beta_{(k)}^2 \sigma_{\nabla\Delta I_1}^2 + \theta_{(k)}^2 \sigma_{\nabla\Delta I_2}^2 + \sigma_{\epsilon\nabla\Delta P(k)}^2} \tag{13}$$

式中, σ_{TP} 和 $\sigma_{T\Phi}$ 分别表示伪距和相位的 TNL; $\sigma_{\nabla\Delta O}$ 表示轨道误差精度; $\sigma_{\nabla\Delta T}$ 表示对流层延迟精度; $\sigma_{\nabla\Delta I_1}$ 和 $\sigma_{\nabla\Delta I_2}$ 分别表示一阶和二阶电离层延迟精度。显然,此时最优线性组合满足 $\sigma_{TP} = \min$ 或 $\sigma_{T\Phi} = \min$ 。为确定最优线性组合,表 5 给出了不同基线长度类型下的各项误差项的大致精度,包括中短基线($l \leq 100$ km), 中长基线($100 \text{ km} < l < 200$ km) 以及长基线 ($l \geq 200$ km) 3 种情形^[15]。

表 6、表 7 至表 8 分别是北斗三号三频、四频和五频场景下中短基线、中长基线和长基线中的最优相位线性组合。需要指出的是,这些线性组

合的系数和为 0 且互相独立,因此后续只需再确定一组独立线性组合(如系数和为 1)即可进行所有频率的模糊度固定。由表 6、表 7 至表 8,可以发现在三频、四频和五频观测条件下,由于 $\sigma_{T\Phi}$ 都小于 0.5 周,理论上这些最优线性组合都可以进行单历元模糊度固定。此外,随着频率数的增加,理论上模糊度固定效率将更高,原因是在同等基线长度条件下,频率数越多,可组成的最优线性组合的 $\sigma_{T\Phi}$ 越小。具体来说,以长基线为例,三频、四频和五频条件下的最后一个宽巷或超宽巷的 $\sigma_{T\Phi}$ 分别小于等于 0.338 2、0.321 和 0.195 5 周。综上,再次证明了 MCAR 的优势,且频率数越多时模糊度固定效率越高,相应的可实现超快速精密定位。

表 5 中短基线、中长基线和长基线几种条件下双差伪距和相位观测值的各项误差精度

Tab.5 The specific error precisions of double-differenced code and phase observations under the conditions of medium-to-short, medium-to-long and long baselines

cm			
误差项	中短基线	中长基线	长基线
等价伪距观测值噪声	$\sigma_{\epsilon\Delta P} = 100$	$\sigma_{\epsilon\Delta P} = 100$	$\sigma_{\epsilon\Delta P} = 100$
等价相位观测值噪声	$\sigma_{\epsilon\Delta\phi} = 1$	$\sigma_{\epsilon\Delta\phi} = 1$	$\sigma_{\epsilon\Delta\phi} = 1$
一阶电离层延迟	$\sigma_{\nabla\Delta I_1} = 10$	$\sigma_{\nabla\Delta I_1} = 40$	$\sigma_{\nabla\Delta I_1} = 100$
二阶电离层延迟	$\sigma_{\nabla\Delta I_2} = 0.5$	$\sigma_{\nabla\Delta I_2} = 1$	$\sigma_{\nabla\Delta I_2} = 2$
对流层延迟	$\sigma_{\nabla\Delta T} = 1$	$\sigma_{\nabla\Delta T} = 2.5$	$\sigma_{\nabla\Delta T} = 20$
轨道误差	$\sigma_{\nabla\Delta O} = 0.5$	$\sigma_{\nabla\Delta O} = 1$	$\sigma_{\nabla\Delta O} = 10$

表 6 三频场景下中短基线、中长基线和长基线中的最优相位线性组合

Tab.6 The optimal phase linear combinations of medium-to-short, medium-to-long and long baselines under the circumstances of three frequencies

基线	i_1	i_2	i_3	$\lambda_{(3)}/m$	$\sigma_{T\Phi}/cycle$
中短基线	0	1	-1	3.256 1	0.077 4
	1	-2	1	1.395 5	0.131 8
中长基线	1	-3	2	2.442 1	0.187 5
	0	1	-1	3.256 1	0.212 9
长基线	1	-3	2	2.442 1	0.309 6
	1	-4	3	9.768 4	0.338 2

依据式(12)和表 5,用类似的方法可确定最优伪距线性组合,最优伪距线性组合主要用来生成精度更高的虚拟信号从而辅助模糊度固定等。以中短基线为例,北斗三号系统三频、四频和五频场景下的最优伪距线性组合分别为 $\nabla\Delta P_{[1,1,0]}$ 、 $\nabla\Delta P_{[0,1,1,0]}$ 以及 $\nabla\Delta P_{[0,1,1,0,0]}$,精度皆高于原始伪

距信号。需要注意的是,当不同频率之间的伪距观测值精度差距很大且不可忽略时,最优伪距线性组合会产生变化,因此在实际使用时需要考虑该问题。

表 7 四频场景下中短基线、中长基线和长基线中的最优相位线性组合

Tab.7 The optimal phase linear combinations of medium-to-short, medium-to-long and long baselines under the circumstances of four frequencies

基线	i_1	i_2	i_3	i_4	$\lambda_{(4)}/m$	$\sigma_{T\Phi}/cycle$
中短基线	1	-1	0	0	20.932 3	0.074 1
	0	0	1	-1	3.256 1	0.077 4
	0	1	-2	1	1.495 2	0.128 8
中长基线	1	-1	0	0	20.932 3	0.076 5
	0	1	-3	2	2.764 6	0.177 7
	-1	1	1	-1	3.856 0	0.207 9
长基线	1	-1	0	0	20.932 3	0.089 0
	-1	2	-3	2	3.185 4	0.253 7
	2	-1	-4	3	6.660 3	0.321 0

表 8 五频场景下中短基线、中长基线和长基线中的最优相位线性组合

Tab.8 The optimal phase linear combinations of medium-to-short, medium-to-long and long baselines under the circumstances of five frequencies

基线	i_1	i_2	i_3	i_4	i_5	$\lambda_{(5)}/m$	$\sigma_{T\Phi}/cycle$
	0	0	0	1	-1	9.768 4	0.059 1
中短基线	0	0	1	-1	0	4.884 2	0.067 4
	1	-1	0	0	0	20.932 3	0.074 1
	0	1	-2	0	1	1.495 2	0.128 8
中长基线	1	-1	0	0	0	20.932 3	0.076 5
	0	0	0	1	-1	9.768 4	0.091 2
	0	0	1	-2	1	9.768 4	0.116 5
长基线	0	1	-3	0	2	2.764 6	0.177 7
	1	-1	0	0	0	20.932 3	0.089 0
	-1	1	0	1	-1	18.315 8	0.161 0
	-1	1	1	-2	1	18.315 8	0.162 6
	0	1	-3	-1	3	3.856 0	0.195 5

3 多频相位模糊度单历元固定方法

目前,MCAR 的模糊度单历元固定方法主要可分为 GF-MCAR 和 GB-MCAR 两类。GB-MCAR 方法是将基线三维坐标分量进行了参数化从而确定模糊度,因此其具有更好的几何强度,且可提供更多的多余观测数,因此在模糊度较难固定时,可采用 GB-MCAR 的方法;而在模糊度相对较易固定时,由于 GF 更为简单,因此建议使

用 GF-MCAR 的方法。为了更直观地研究模糊度单历元固定效果,采用四舍五入的 GF-MCAR

方式进行固定。

GF-MCAR 的模型如下所示

$$\nabla\Delta P_{(k_1)} - \nabla\Delta\Phi_{(k_2)} = \lambda_{(k_2)} \nabla\Delta N_{(k_2)} + [\beta_{(k_1)} + \beta_{(k_2)}] \nabla\Delta I_1 + [\theta_{(k_1)} + \theta_{(k_2)}] \nabla\Delta I_2 + \varepsilon_{\nabla\Delta P_{(k_1)}} - \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi_{(k_2)}} \quad (14)$$

$$\nabla\Delta\Phi_{(k_1)} - \nabla\Delta\Phi_{(k_2)} = \lambda_{(k_2)} \nabla\Delta N_{(k_2)} - \lambda_{(k_1)} \nabla\Delta N_{(k_1)} + [\beta_{(k_2)} - \beta_{(k_1)}] \nabla\Delta I_1 + [\theta_{(k_2)} - \theta_{(k_1)}] \nabla\Delta I_2 + \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi_{(k_1)}} - \varepsilon_{\nabla\Delta\Phi_{(k_2)}} \quad (15)$$

在 GF 模型中,根据需要固定的模糊度数,选择相同数量的独立的模糊度依次进行固定,可按照 TNL 从小到大的顺序依次进行固定,即通常由超宽巷或宽巷开始,固定形式主要分为如下两种

$$\nabla\Delta\check{N}_{LC1} = \left[\frac{\nabla\Delta P_{(k)} - \nabla\Delta\Phi_{LC1}}{\lambda_{LC1}} \right]_{\text{round}} \quad (16)$$

$$\nabla\Delta\check{N}_{LC2} = \left[\frac{\nabla\Delta\Phi_{LC1} + \lambda_{LC1} \cdot \nabla\Delta\check{N}_{LC1} - \nabla\Delta\Phi_{LC2}}{\lambda_{LC2}} \right]_{\text{round}} \quad (17)$$

式中, $\nabla\Delta\Phi_{LC1}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{LC2}$ 分别表示第一个和第二个相位线性组合,其波长分别为 λ_{LC1} 和 λ_{LC2} ; $\nabla\Delta\check{N}_{LC1}$ 和 $\nabla\Delta\check{N}_{LC2}$ 分别表示 $\nabla\Delta\Phi_{LC1}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{LC2}$ 所对应的固定后的双差整周模糊度; $[\cdot]_{\text{round}}$ 表示四舍五入算子。通常,如果模糊度固定后的 $\nabla\Delta\Phi_{LC1}$ 的精度高于 $\nabla\Delta P_{(k)}$,则用式(17)代替式(16),即此时由模糊度固定后的超宽巷或者宽巷信号作为精密伪距观测值。一旦满足足够数量的 k 个线性组合的模糊度固定完成,即可固定相应的 k 个原始频率观测值的模糊度,即

$$\begin{bmatrix} \nabla\Delta\check{N}_1 \\ \nabla\Delta\check{N}_2 \\ \vdots \\ \nabla\Delta\check{N}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & \cdots & i_{1k} \\ i_{21} & i_{22} & \cdots & i_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{k1} & i_{k2} & \cdots & i_{kk} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \nabla\Delta\check{N}_{LC1} \\ \nabla\Delta\check{N}_{LC2} \\ \vdots \\ \nabla\Delta\check{N}_{LCk} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中, $\begin{bmatrix} i_{11} & i_{12} & \cdots & i_{1k} \\ i_{21} & i_{22} & \cdots & i_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{k1} & i_{k2} & \cdots & i_{kk} \end{bmatrix}$ 表示满秩设计矩阵。

此外,在大尺度条件或是复杂环境下,MCAR 中的模糊度,尤其是最后一个窄巷模糊度有时难以固定,可根据已固定的相位线性组合转换成精度更高的中巷或窄巷信号作为精密伪距观测值,从而提高模糊度固定效率和可靠性。具体操作如下,设有 k 个频率的模糊度需要固定,则可利用前 $(k-1)$ 个已固定的独立超宽巷或宽巷

信号的模糊度转换成精度更高的中巷或窄巷信号的模糊度,即有

$$\nabla\Delta\check{N}_{LC1'} = \alpha_1 \nabla\Delta\check{N}_{LC1} + \alpha_2 \nabla\Delta\check{N}_{LC2} + \cdots + \alpha_{k-1} \nabla\Delta\check{N}_{LC(k-1)} \quad (19)$$

式中, $\nabla\Delta\check{N}_{LC1'}$ 表示第 1 个中巷或窄巷信号固定后的双差模糊度; $\nabla\Delta\check{N}_{LC1}$ 、 $\nabla\Delta\check{N}_{LC2}$ 和 $\nabla\Delta\check{N}_{LC(k-1)}$ 分别表示第 1 个、第 2 个和第 $(k-1)$ 个超宽巷或宽巷信号固定后的双差模糊度; α_1 、 α_2 和 α_{k-1} 分别表示整数系数。

4 试验与分析

为验证和比较 MCAR 的有效性和优越性,本文选取了上海地区的实测数据进行了单历元模糊度固定试验,接收机类型为 Trimble Alloy 接收机。基线包括两条,第 1 条长度为 27.6 km,第 2 条长度为 82.5 km,因此可较好地分析 MCAR 的性能。数据采样率为 1 s,截止高度角设为 15° ,时长为 3 h,数据包含北斗三号 MEO 卫星的 5 个频率的数据,因此可进行 TCAR、FCAR 和 FiCAR。在 TCAR 中,采用 $\nabla\Delta\Phi_{[0.1,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-2.1]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,1]}$ 依次进行固定,其中最优伪距线性组合采用的是 $\nabla\Delta P_{[1,1,0]}$;在 FCAR 中,采用 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1,0,0]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,1,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0,1,-2,1]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,1]}$ 依次进行固定,其中最优伪距线性组合采用的是 $\nabla\Delta P_{[0,1,1,0]}$;在 FiCAR 中,采用了 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,1,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,1,-1,0]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1,0,0,0]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0,1,-2,0,1]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,0,1]}$ 依次进行固定,其中最优伪距线性组合采用的是 $\nabla\Delta P_{[0,1,1,0,0]}$ 。在 GF-MCAR 中,为提高最后一个原始频率相位信号的模糊度固定效率,根据已固定的相位线性组合转换成精度更高的中巷窄巷信号用来做为精密伪距观测值。具体来说,分别在 TCAR、FCAR 和 FiCAR 中采用 $\nabla\Delta\Phi_{[3,-2,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[5.4,-7,-2]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[5.4,-6,-3,0]}$ 线性组合。

在单历元模糊度固定中,为评价固定性能,采用模糊度固定成功率 P 作为评价指标,即有

$$P = \frac{N_{suc}}{N_{all}} \times 100\% \quad (20)$$

式中, N_{suc} 和 N_{all} 分别表示模糊度固定成功的历元数和总历元数。为确保试验结果的正确性,事先验证了将作为真值的模糊度代入基线解算中的正确性。表 9 和表 10 展示了 TCAR、FCAR 和 FiCAR 中所使用信号的模糊度固定效果。可以发现,在多频相位模糊度固定中,两条基线所有信号的模糊度固定成功率平均在 94.73%,因此证明了 MCAR 的有效性。具体来说,第 1 条长度为 27.6 km 的基线中,FiCAR、FCAR 以及 TCAR 最后一个信号的模糊度固定成功率达到了 94.96%、94.82% 以及 82.69%;而第 2 条长度为 82.5 km 的基线中,相应的模糊度固定成功率仍能保持在 75.88%、74.04% 以及 67.57%,因此表明 MCAR 在基线长度较长时仍能取得较好的效果。横向比较 TCAR、FCAR 以及 FiCAR 的模糊度固定效果,两条基线所有信号的模糊度固定平均成功率分别为 90.35%、95.58% 以及 96.67%,再次证明了频率数越多,模糊度固定成功率越高。事实上,这是由于频率数越多,高质量虚拟信号数量就越多,且质量也更好,因而在模糊度固定时存在差异。因此,MCAR 在大尺度条件或是复杂环境的精密定位中,采用 MCAR 具有较好的应用前景。

表 9 27.6 km 基线的 TCAR、FCAR 和 FiCAR 的单历元模糊度固定成功率

Tab.9 The success rates of single-epoch ambiguity resolution for TCAR, FCAR and FiCAR with the baseline of 27.6 km

方法	1	2	3	4	5
TCAR	100%	96.43%	82.69%	—	—
FCAR	100%	100%	99.99%	94.82%	—
FiCAR	100%	100%	100%	100%	94.96%

表 10 82.5 km 基线的 TCAR、FCAR 和 FiCAR 的单历元模糊度固定成功率

Tab.10 The success rates of single-epoch ambiguity resolution for TCAR, FCAR and FiCAR with the baseline of 82.5 km

方法	1	2	3	4	5
TCAR	99.93%	95.45%	67.57%	—	—
FCAR	99.95%	99.93%	95.94%	74.04%	—
FiCAR	99.99%	99.95%	99.95%	95.97%	75.88%

为了更直观地进行比较,计算了第 1 条基线 TCAR、FCAR 和 FiCAR 中单历元模糊度浮点解

与模糊度真值之间的残差。图 2、图 3 及图 4 分别表示的是 TCAR、FCAR 和 FiCAR 中每个待固定信号的所有卫星对的残差,其中每种颜色代表一个卫星对。可以很明显地发现,所有图中的残差部分绝大多数能落在 -0.5 至 0.5 的区间内,尤其是超宽巷和宽巷信号,这样保证了单历元模糊度固定的有效性。进一步比较图 2 至图 4,可以发现频率数越多对应的信号,其残差越来越平稳,这再一次证明了 MCAR 的优越性。事实上,这是由于频率数越多,其线性组合抵御非模型化误差的能力也越强^[30],因而其精度也越高。

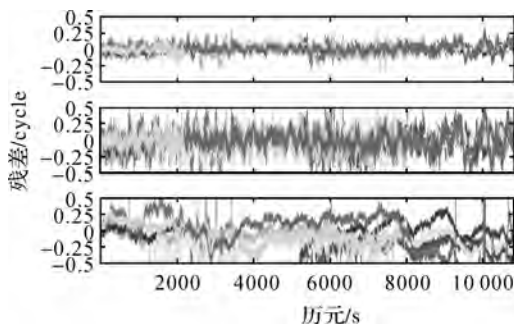


图 2 北斗三号 TCAR 的模糊度浮点解与真值之间的残差,从上到下依次为 $\nabla\Delta\Phi_{[0.1,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-2.1]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,1]}$ 的结果

Fig.2 The residuals between the float and true solutions of BDS-3 TCAR. The panels from the top to bottom denote the results of $\nabla\Delta\Phi_{[0.1,-1]}$, $\nabla\Delta\Phi_{[1,-2.1]}$ and $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,1]}$, respectively

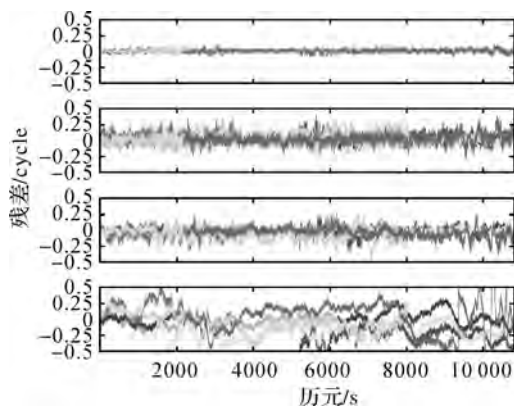


图 3 北斗三号 FCAR 的模糊度浮点解与真值之间的残差,从上到下依次为 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1.0,0]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,1,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0.1,-2.1]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,0,1]}$ 的结果

Fig.3 The residuals between the float and true solutions of BDS-3 FCAR. The panels from the top to bottom denote the results of $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1.0,0]}$, $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,1,-1]}$, $\nabla\Delta\Phi_{[0.1,-2.1]}$ and $\nabla\Delta\Phi_{[0.0,0,1]}$, respectively

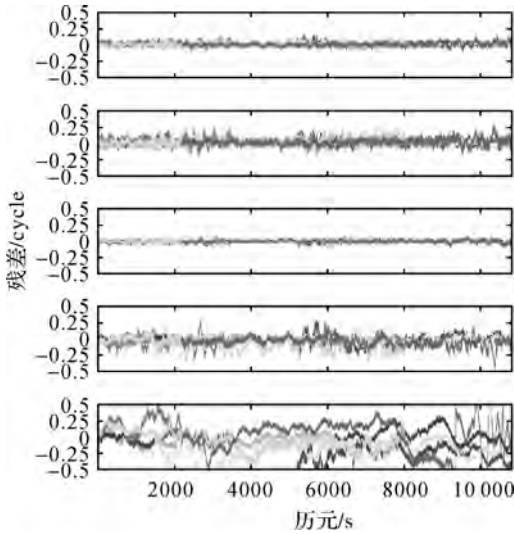


图 4 北斗三号 FiCAR 的模糊度浮点解与真值之间的残差,从上到下依次为 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,1,-1]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,1,-1,0]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1,0,0,0]}$ 、 $\nabla\Delta\Phi_{[0,1,-2,0,1]}$ 和 $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,0,1]}$ 的结果

Fig.4 The residuals between the float and true solutions of BDS-3 FiCAR. The panels from the top to bottom denote the results of $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,1,-1]}$, $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,1,-1,0]}$, $\nabla\Delta\Phi_{[1,-1,0,0,0]}$, $\nabla\Delta\Phi_{[0,1,-2,0,1]}$ and $\nabla\Delta\Phi_{[0,0,0,0,1]}$, respectively

表 11 则是第 1 条基线 TCAR、FCAR 和 FiCAR 中每个信号模糊度浮点解与真值之间的残差的均值和标准差。可以发现,所有的均值和标准差都在 ± 0.2 周和 0.4 周以内,可以较好地满足单历元模糊度固定需求。如忽略最后一个较难

表 11 TCAR、FCAR 和 FiCAR 中模糊度浮点解与真值之间的残差的均值和标准差

Tab.11 The mean values and standard deviations of residuals between the float and true solutions for TCAR, FCAR and FiCAR

方法	均值					标准差				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
TCAR	0.000 2	-0.030 2	-0.119 9	—	—	0.065 0	0.157 0	0.394 5	—	—
FCAR	0.003 1	0.018 6	-0.030 8	-0.066 5	—	0.021 7	0.072 4	0.073 3	0.190 8	—
FiCAR	0.007 3	0.011 3	0.000 5	-0.027 2	-0.065 1	0.029 3	0.049 8	0.020 4	0.076 9	0.189 5

参考文献:

[1] LI Bofeng, ZHANG Zhetao. Several kinematic data processing methods for time-correlated observations [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2 (4): 1-9. DOI: 10.11947/j.JGGS.2019.0401.

[2] ZHANG Zhetao, LI Bofeng, SHEN Yunzhong. Comparison and analysis of unmodelled errors in GPS and BeiDou sig-

固定的原始信号的模糊度,所有的均值和标准差都可控制在 ± 0.03 周和 0.2 周以内,可以基本满足单历元模糊度固定需求。此外,TCAR、FCAR 和 FiCAR 之间也存在较显著的差别,即频率数越多,同等条件下,均值越接近 0 周,标准差越小,因此再次证明了 MCAR 在大尺度精密定位或是面向复杂环境的精密定位中具有更高的可靠性。

5 结 论

本文围绕解决多频相位观测值中的模糊度解算问题,深入系统地研究了 MCAR 的模糊度单历元固定方法,包括基于 GF 和 GB 模型的 TCAR、FCAR 和 FiCAR。以北斗三号为例,分析了几种 MCAR 的最优线性组合,以及模糊度固定基本模型和方法,此外还分析和比较了这几种方法的性能,得出以下几点结论:

- (1) 在 MCAR 中,随着频率数量的增加,高质量的信号越多,且信号质量越好,即拥有更长的波长,更小的电离层延迟尺度因子和观测值噪声比例系数。
- (2) MCAR 可以高效可靠地进行模糊度快速固定,尤其是当频率数量增加时,模糊度固定成功率将得到提高。
- (3) 未来可考虑将 MCAR 应用于快速精密定位中,尤其是大尺度条件和复杂环境下,具有较好的应用前景。

nals[J]. Geodesy and Geodynamics, 2017, 8(1): 41-48.

[3] 李博峰. 混合整数 GNSS 模型参数估计理论与方法[M]. 北京: 测绘出版社, 2014.

LI Bofeng. Theory and method of parameter estimation in mixed integer GNSS model[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2014.

[4] 李博峰, 沈云中, 张兴福. 纳伪概率可控的四舍五入法及其在 RTK 模糊度固定中的应用[J]. 测绘学报, 2012, 41

- (4): 483-489, 495.
- LI Bofeng, SHEN Yunzhong, ZHANG Xingfu. Error probability controllable integer rounding method and its application to RTK ambiguity resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(4): 483-489, 495.
- [5] 耿江辉, 常华, 郭将, 等. 面向城市复杂环境的3种多频多系统GNSS单点高精度定位方法及性能分析[J]. *测绘学报*, 2020, 49(1): 1-13. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20190106.
- GENG Jianghui, CHANG Hua, GUO Jiang, et al. Three multi-frequency and multi-system GNSS high-precision point positioning methods and their performance in complex urban environment[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(1): 1-13. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20190106.
- [6] FORSELL B, MARTIN-NEIRA M, HARRIS R A. Carrier phase ambiguity resolution in GNSS-2[C]// *Proceedings of ION GPS-1997*. Kansas City, Missouri: Institute of Navigation, 1997: 1727-1736.
- [7] VOLLATH U, BIRNBACH S, LANDAU L, et al. Analysis of three-carrier ambiguity resolution technique for precise relative positioning in GNSS-2[J]. *Navigation*, 1999, 46(1): 13-23.
- [8] DE JONGE P J, TEUNISSEN P J G, JONKMAN N F, et al. The distributional dependence of the range on triple frequency GPS ambiguity resolution[C]// *Proceedings of 2000 National Technical Meeting of the Institute of Navigation*. Anaheim: Pacific Hotel Disneyland, 2000: 605-612.
- [9] HATCH R, JUNG J, ENGE P, et al. Civilian GPS: the benefits of three frequencies[J]. *GPS Solutions*, 2000, 3(4): 1-9.
- [10] TEUNISSEN P, JOOSTEN P, TIBERIUS C. A comparison of TCAR, CIR and LAMBDA GNSS ambiguity resolution [C] // *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*. Portland: [s.n.], 2002: 2799-2808.
- [11] FENG Y, RIZOS C. Three carrier approaches for future global, regional and local GNSS positioning services: concepts and performance perspectives[C]// *Proceedings of ION GNSS 2005*. Long Beach: Institute of Navigation, 2005: 2277-2278.
- [12] FENG Y, LI B. A benefit of multiple carrier GNSS signals; regional scale network-based RTK with doubled inter-station distances[J]. *Journal of Spatial Science*, 2008, 53(2): 135-147.
- [13] COCARD M, BOURGON S, KAMALI O, et al. A systematic investigation of optimal carrier-phase combinations for modernized triple-frequency GPS[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(9): 555-564.
- [14] FENG Yanming. GNSS three carrier ambiguity resolution using ionosphere-reduced virtual signals[J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(12): 847-862.
- [15] LI Bofeng, FENG Yanming, SHEN Yunzhong. Three carrier ambiguity resolution: distance-independent performance demonstrated using semi-generated triple frequency GPS signals[J]. *GPS Solutions*, 2010, 14(2): 177-184.
- [16] ZHAO Qile, DAI Zhiqiang, HU Zhigang, et al. Three-carrier ambiguity resolution using the modified TCAR method[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(4): 589-599.
- [17] CHEN Dezhong, YE Shirong, XIA Jingchao, et al. A geometry-free and ionosphere-free multipath mitigation method for BDS three-frequency ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(8): 703-714.
- [18] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.
- [19] YANG Yuanxi, MAO Yue, SUN Bijiao. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1.
- [20] 张小红, 何锡扬. 北斗三频相位观测值线性组合模型及特性研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(5): 601-610.
- ZHANG Xiaohong, HE Xiyang. BDS triple-frequency carrier-phase linear combination models and their characteristics[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2015, 45(5): 601-610.
- [21] 何俊, 刘万科, 张小红. 北斗短基线三频实测数据单历元模糊度固定[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(3): 361-365.
- HE Jun, LIU Wanke, ZHANG Xiaohong. Single epoch ambiguity resolution of BDS triple frequency measured data under short baseline[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2015, 40(3): 361-365.
- [22] 刘炎炎, 叶世榕, 江鹏, 等. 基于北斗三频的短基线单历元模糊度固定[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2015, 40(2): 209-213.
- LIU Yanyan, YE Shirong, JIANG Peng, et al. Instantaneous ambiguity resolution of short baselines using BeiDou triple frequency observations[J]. *Geomatics and Informa-*

- tion Science of Wuhan University, 2015, 40(2): 209-213.
- [23] 祝会忠, 徐爱功, 高猛, 等. BDS 网络 RTK 中距离参考站整周模糊度单历元解算方法[J]. 测绘学报, 2016, 45(1): 50-57. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20140525.
ZHU Huizhong, XU Aigong, GAO Meng, et al. The algorithm of single-epoch integer ambiguity resolution between middle-range BDS network RTK reference stations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(1): 50-57. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20140525.
- [24] 高猛, 徐爱功, 祝会忠, 等. BDS 网络 RTK 参考站三频整周模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(4): 442-452. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160179.
GAO Meng, XU Aigong, ZHU Huizhong, et al. The algorithm of triple-frequency ambiguity resolution between BDS Network RTK reference stations[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(4): 442-452. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160179.
- [25] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(3.0 版)[R]. 2018.
China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou navigation satellite system (version 3.0)[R]. 2018.
- [26] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统发展报告(4.0 版)[R]. 2019.
China Satellite Navigation Office. Development of the BeiDou navigation satellite system (version 4.0)[R]. 2019.
- [27] ZHANG Zhetao, LI Bofeng, HE Xiufeng, et al. Models, methods and assessment of four-frequency carrier ambiguity resolution for BeiDou-3 observations[J]. GPS Solutions, 2020, 24(4): 96.
- [28] JI Shengyue, CHEN Wu, ZHAO Chunmei, et al. Single epoch ambiguity resolution for Galileo with the CAR and LAMBDA methods[J]. GPS Solutions, 2007, 11(4): 259-268.
- [29] WANG Kan, KHODABANDEH A, TEUNISSEN P J G. Five-frequency Galileo long-baseline ambiguity resolution with multipath mitigation[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 75.
- [30] ZHANG Zhetao, LI Bofeng, GAO Yang, et al. Real-time carrier phase multipath detection based on dual-frequency C/N0 data[J]. GPS Solutions, 2019, 23(1): 7.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2020-07-21

修回日期: 2020-08-25

第一作者简介: 章浙涛(1988—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为 GNSS 数据处理理论及应用新技术。

First author: ZHANG Zhetao (1988—), male, PhD, lecturer, majors in GNSS data processing theory and new application technologies.

E-mail: ztzhang@hhu.edu.cn

引文格式:刘成,高为广,潘军洋,等.基于北斗星间链路闭环残差检测的星间钟差平差改正[J].测绘学报,2020,49(9):1149-1157. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200319.
LIU Cheng,GAO Weiguang,PAN Junyang,et al.Inter-satellite clock offsets adjustment based on closed-loop residual detection of BDS inter-satellite link[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49 (9) : 1149-1157. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20200319.

基于北斗星间链路闭环残差检测的星间钟差平差改正

刘 成¹,高为广¹,潘军洋²,唐成盼²,胡小工²,王 威¹,陈 颖¹,卢 鋈¹,宿晨庚¹

1. 北京跟踪与通信技术研究所,北京 100094; 2. 中国科学院上海天文台,上海 200030

Inter-satellite clock offsets adjustment based on closed-loop residual detection of BDS inter-satellite link

LIU Cheng¹,GAO Weiguang¹,PAN Junyang²,TANG Chengpan²,HU Xiaogong²,WANG Wei¹,CHEN Ying¹,LU Jun¹,SU Chengeng¹

1. Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

Abstract: It is a common and effective method in engineering science to use the “closed-loop detection” idea to detect and correct the cumulative error of system measurement. This paper indicates the favorable closed-loop conditions in the global inter-satellite link (ISL) of BeiDou-3 navigation satellite system (BDS-3), and proposes to detect and analyze the closed residuals. On this basis, a network adjustment model of the closed residuals is constructed by which the correction of inter-satellite clock offsets is realized. Calculations based on the on-orbit measured data indicate that the obvious constant or periodic non-zero closed residuals really exist in the global ISL of BDS-3. Attributed to the correction of the closed-loop residuals of the ISL, the non-closed inter-satellite clock corrections are basically eliminated, the random noise of the inter-satellite clock corrections is reduced by 30% to 50% and the accuracy of the inter-satellite clock corrections are effectively improved. It is helpful for the service capability of BeiDou.

Key words: BeiDou navigation satellite system (BDS); inter-satellite link (ISL); inter-satellite clock offset; closed residual; network adjustment

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 61601009; 41974041); The Young Talent Supporting Program of the China Association for Science and Technology (No. 2019QNRC001)

摘 要:利用“闭环检测”思想检测和修正系统测量累积误差,是工程科学中的常用和有效手段。本文指出了北斗三号系统全球星间链路中所存在的有利闭环条件,并提出一种利用其进行闭合残差检测与分析的方法。在此基础上,构建了闭合残差整网平差模型,实现了对北斗三号卫星星间相对钟差的误差修正。基于在轨实测数据的计算表明,北斗三号系统全球星间链路中确实存在着明显的常数性或周期性非零闭合残差。通过对星间链路闭环残差的平差修正,基本消除了卫星星间钟差不闭合的现象,减少星间钟差随机噪声 30%~50%,有效提高了星间相对钟差测定的精度,有利于提升北斗系统服务能力。

关键词:北斗;星间链路;星间钟差;闭合残差;网络平差

中图分类号:P227 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-1595(2020)09-1149-09

基金项目:国家自然科学基金(61601009;41974041);中国科协青年人才托举工程(2019QNRC001)

研究和计算表明,中国境内区域监测网对北斗三号卫星导航系统(BeiDou-3 navigation satellite system, BDS-3)中地球轨道(medium

earth orbits, MEO)卫星的有效跟踪弧段不足全弧段长度的 40%,严重影响卫星轨道和钟差测定精度以及系统服务性能^[1]。因此,星间链路

(inter-satellite link, ISL)成为 BDS-3 的必然技术选择,是弥补 BDS-3 海外监测站布设不足,实现境外卫星精确定轨与时间同步,提供全球化服务以及星基增强 (satellite based augmentation system, SBAS)、精密单点定位 (precise point positioning, PPP)^[2]等增强服务的重要基础和保障。基于北斗 ISL 实测数据,国内学者开展了很多相关研究。成果表明,目前北斗三号 ISL 测距精度已达到优于 10 cm 的水平^[3-5]。其中,文献[6]基于 4 颗北斗三号试验卫星进行星地星间联合定轨,相较于仅依赖于星地定轨,联合定轨精度提升明显,轨道径向重叠误差优于 0.1 m,三维位置优于 0.5 m。文献[7]研究了仅使用 ISL 数据的试验卫星定轨试验,并通过一个锚固站约束减弱星座整体旋转,IGSO 卫星径向重叠弧段精度优于 15 cm, MEO 卫星优于 10 cm。基于我国国际 GNSS 监测评估系统 (international GNSS monitoring & assessment system, iGMAS) 全球站星地伪距相位数据和北斗三号 ISL 数据,文献[8-9]比较了星地定轨和星地星间联合定轨,结果表明联合定轨的轨道三维位置精度优于 0.3 m。利用 ISL 数据和星地双向时频传递数据进行星地星间钟差联合测定,实现了钟差监测的全弧段覆盖^[10]。目前,星间链路已成功应用于北斗三号地面运控精密定轨和钟差测定。对北斗三号基本系统评估结果表明,在星间链路支持下,北斗三号广播星历用户距离误差 (user range error, URE) 优于 0.1 m,广播钟差参数预报精度优于 1.5 ns,空间信号 (signal in space, SIS) 精度整体优于 0.6 m^[11]。

“闭环检测”是工程科学中一种常用的误差检测与修正方法。例如,在大地导线测量中,要求从已知控制点出发、最终仍回到起点或另一已知点,形成闭合或附合导线,从而构成严密的几何条件、起到检核作用^[12-13];在视觉即时定位与建图 (visual simultaneous localization and mapping, V-SLAM) 中,通过重复识别同一路标 (landmark) 完成地图回环检测 (loop-closure detection),修正机器人两次到达该地点之间的历史轨迹及传感器误差^[14-15];在惯导或组合惯导中,则利用载体的静止运动状态开展零速修正 (zero velocity update, ZUPT),从而计算和标定惯性器件的系统误差^[16-17]。以上种种,其本质都是找到或创造了一个能够准确识别系统累积误差

的参考约束条件,并据此开展误差修正。

“闭环检测”的思想也同样适用于北斗 ISL 系统。基于 Ka 双向时分测量体制的北斗 ISL 从境内卫星出发,并最终回到境内,因此北斗 ISL 测量链路理论上能够形成全球范围内的“大闭环”。然而,由于各类误差因素的影响,北斗 ISL 测量链路实际上并未严格闭环;相反,在轨数据分析表明,目前链路中仍存在着较大误差残余。本文指出了北斗 ISL 中的闭环参考约束条件,并对其开展闭环残差检测和分析;在此基础上,对 ISL 闭环残差进行整网平差处理,实现了对星间相对钟差的误差修正。利用北斗三号卫星在轨实测数据进行了计算与验证。结果表明:本文方法消除了当前链路中所存在的闭环残差现象,减少星间钟差随机噪声 30%~50%,有效提高了北斗 ISL 系统测量以及星间相对钟差测定精度。

1 基于星间链路测量的时间同步

北斗星间链路采用 Ka 星间体制,按照预定路由规划表,每颗卫星采用时分方式与可建链卫星或地面站构建星间、星地测量链路^[18]。每次建链,每对卫星分时产生双向星间测距观测量。因此,Ka 星间双向测量并非严格意义上的双向同步观测,需根据卫星预报星历和钟差信息,将不同时刻观测量归算至同一时刻^[19-20]

$$\rho_{AB}(t_0) = |\mathbf{R}_B(t_0) - \mathbf{R}_A(t_0)| + c\Delta t_A(t_0) - c\Delta t_B(t_0) + c\tau_A^R + c\tau_B^T + \delta\rho_{AB}^{\text{cor}} + \epsilon_{AB} \quad (1)$$

$$\rho_{BA}(t_0) = |\mathbf{R}_A(t_0) - \mathbf{R}_B(t_0)| + c\Delta t_B(t_0) - c\Delta t_A(t_0) + c\tau_B^R + c\tau_A^T + \delta\rho_{BA}^{\text{cor}} + \epsilon_{BA} \quad (2)$$

式中, $\rho_{AB}(t_0)$ 、 $\rho_{BA}(t_0)$ 分别为 t_0 时刻卫星 A 至卫星 B、卫星 B 至卫星 A 的星间伪距测量值; $\mathbf{R}_A(t_0)$ 、 $\mathbf{R}_B(t_0)$ 分别为 t_0 时刻卫星 A 和卫星 B 的轨道位置; $\Delta t_A(t_0)$ 、 $\Delta t_B(t_0)$ 分别为 t_0 时刻卫星 A 和卫星 B 的绝对钟差; τ_A^T 、 τ_A^R 为卫星 A 的发射 (transit) 时延和接收 (receive) 时延; τ_B^S 、 τ_B^R 为卫星 B 的发射时延和接收时延; $\delta\rho_{AB}^{\text{cor}}$ 、 $\delta\rho_{BA}^{\text{cor}}$ 为单向测距值中可以精确建模的误差改正量,包括卫星天线相位中心偏差、相对论效应等; ϵ_{AB} 、 ϵ_{BA} 为测量噪声; c 为光速。

采用双向测距的主要原因是利用双向测量可以解耦得到星间测距观测量和星间时间同步观测量。将式(1)与式(2)分别相加及相减,可分别得到定轨观测方程与时间同步观测方程

$$\rho_{AB}^+ = \frac{\rho_{AB}(t_0) + \rho_{BA}(t_0)}{2} = |\mathbf{R}_A(t_0) - \mathbf{R}_B(t_0)| + c \frac{\tau_A^R + \tau_A^T}{2} + c \frac{\tau_B^R + \tau_B^T}{2} \quad (3)$$

$$\rho_{AB}^- = \frac{\rho_{AB}(t_0) - \rho_{BA}(t_0)}{2} = c(\Delta t_A(t_0) - \Delta t_B(t_0)) + c \frac{\tau_A^R - \tau_A^T}{2} - c \frac{\tau_B^R - \tau_B^T}{2} = c \Delta t_{AB}(t_0) + c \frac{\tau_A^R - \tau_A^T}{2} - c \frac{\tau_B^R - \tau_B^T}{2} \quad (4)$$

利用时间同步观测方程(4),可解算得到卫星 A、B 之间的星间相对钟差 Δt_{AB} ;进一步地,在卫星 A、B 同时有对地 L 波段双向测量时,可准确测定卫星 A、B 的绝对钟差 Δt_A 和 Δt_B ,并进而标定 ISL 设备收发时延^[1]。

目前,对于境内弧段卫星,使用星地双向钟差测量值确定其相对于地面北斗时(BeiDou navigation satellite system time, BDT)的绝对钟差,ISL 数据不参与境内卫星的钟差测定;对于境外弧段卫星,星地双向时频传递无法完成钟差测定时,通过 ISL 测定的星间相对钟差与境内卫星的星地双向钟差联立,得到境外卫星相对于 BDT 的绝对钟差。

2 星间钟差闭环残差检测

2.1 星间链路闭环条件

当某条北斗星间测量链路从境内弧段某颗卫星出发,经过与境外弧段卫星之间的测量传递并最终回到境内弧段卫星,此时即构成了全球范围内的 ISL 大闭环,如图 1 所示。

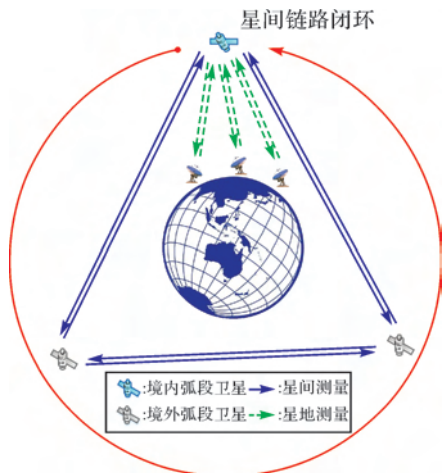
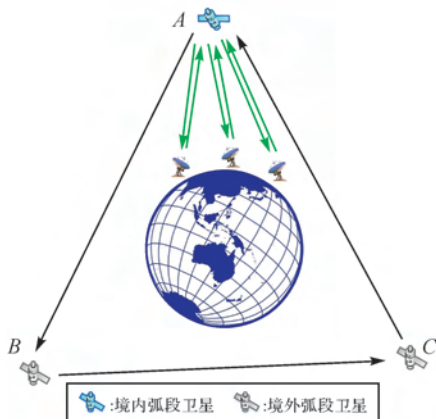


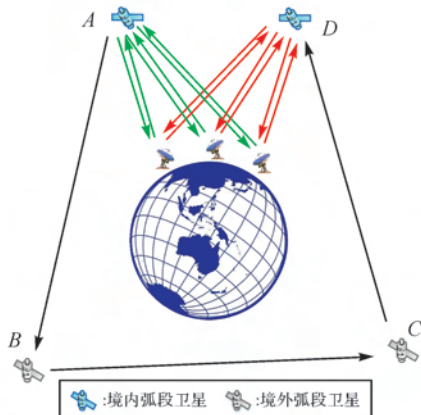
图 1 北斗星间链路全球闭环

Fig.1 Global closed-loop of BDS ISL

北斗 ISL 测量一般经过两颗境外卫星的两次“跳转”后即可回到境内。实际上,北斗全球 ISL 闭环还具体包括两类不同的情况:一是从境内卫星 A 出发,并最终回到 A,如图 2(a)所示;二是从境内卫星 A 出发,但最终回到另外一个境内卫星 D,如图 2(b)所示。



(a) 回到同一境内卫星



(b) 回到不同境内卫星

图 2 两类全球 ISL 闭环条件

Fig.2 Two different global closed-loop conditions of BDS ISL

第 1 种情况类似于大地测量“闭合导线”条件,境内卫星 A 经星间 Ka 波段相对钟差测量和传递回来后所重新得到的钟差 $\Delta t'_A$,理论上应该严格等于卫星 A 通过 L 波段星地双向时间比对(two-way satellite-ground time comparison, TSTC)体制所测定得到的绝对钟差 Δt_A ,从而满足闭合检核条件。第 2 种情况则类似于大地测量“附和导线”条件,境内卫星 A 经星间 Ka 波段相对钟差测量和传递后得到另一境内卫星 D 的钟差 $\Delta t'_D$ 。理论上, $\Delta t'_D$ 应该严格等于卫星 D 通过星地 L 波段 TWSTFT 体制所测定得到的绝对钟

差 Δt_D , 从而满足附和检核条件。

两类情况不同均可用户闭环残差检测、作为约束基准, 但其中作为附和条件的第 2 种情况中不仅包含了星间设备时延标定误差引起的闭合差, 还包含了地面天线的时延标定误差(有时甚至能达到 1 ns 以上), 因此其约束作用要弱于闭合条件, 在使用时应当引起注意。

2.2 星间钟差闭环残差计算

如上所述, 北斗 ISL 采用双向时分测量体制, 同一历元一颗卫星仅与另一颗卫星有归算后的星间相对钟差。因此, 为计算星间钟差闭环残差, 需要通过插值方法(如三次样条法等)对不同历元所得到的星间钟差数据进行内插计算, 以进行时间对齐。

在此基础上, 对于某一闭合链路“境内卫星 A → 境外卫星 B → 境外卫星 C → 境内卫星 A”, 假设两两卫星之间的相对钟差分别为 Δt_{AB} 、 Δt_{BC} 和 Δt_{CA} , 那么它们理论上应该满足

$$\Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CA} = 0 \quad (5)$$

但由于实际系统及测量误差的存在, 上述闭合链路并未严格闭环。因此, 其相对钟差闭合残差 $\delta\Delta t_{ABCA}$ 为

$$\delta\Delta t_{ABCA} = \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CA} \quad (6)$$

对于某一附和链路“境内卫星 A → 境外卫星 B → 境外卫星 C → 境内卫星 D”, 假设两两卫星之间的相对钟差分别为 Δt_{AB} 、 Δt_{BC} 和 Δt_{CD} , 卫星 A、D 的绝对钟差分别为 Δt_A 和 Δt_D , 那么它们理论上应该满足

$$\Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CD} + (\Delta t_A - \Delta t_D) = 0 \quad (7)$$

但由于实际系统及测量误差的存在, 上述附和链路也并未严格闭环。因此, 其星间相对钟差闭合残差 $\delta\Delta t_{ABCD}$ 为

$$\delta\Delta t_{ABCD} = \Delta t_{AB} + \Delta t_{BC} + \Delta t_{CD} + (\Delta t_A - \Delta t_D) \quad (8)$$

2.3 残差限差确定

以上给出了北斗 ISL 的两种闭环条件及其残差计算方法。与此同时, 类似大地导线和高程水准测量内业, 在进行残差改正之前, 也可以根据北斗 ISL 实际测量误差水平推导给出上述闭环残差的容许范围(限差)。

目前, 北斗 Ka 波段 ISL 双向测距误差 σ_{ISL} 约为 0.3 ns 左右(RMS)^[1,19]。卫星星间钟差实际上是经过历元归化处理后的星间双向观测值之差, 归化精度取决于卫星预报速度和预报钟速的精度。由于观测历元与目标归化历元的时间差小

于 3 s, 卫星预报速度误差约为 0.1 mm/s, 预报钟速误差约为 1×10^{-13} s/s, 因此归一化处理的误差小于 1.0 cm, 在当前残差限差的计算中可忽略不计。以三星闭合链路(A → B → C → A)的星间钟差闭合残差中误差 $\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}}$ 满足

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}} = \sqrt{\sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2} = \sqrt{3}\sigma_{ISL} \approx 0.52 \text{ ns} \quad (9)$$

参考大地导线测量, 取 2 倍中误差作为闭合残差限差 $\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}}^{\text{限}}$, 则有

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}}^{\text{限}} = 2\sigma_{\delta\Delta t_{ABCA}} \approx 1.04 \text{ ns} \quad (10)$$

对于全球附和链路(A → B → C → D), 由于 ISL 测量值最终回到另外一颗境内卫星 D, 因此在计算 ISL 闭合残差时需要考虑卫星 A 和 D 的地面绝对钟差 Δt_A 、 Δt_D 的误差 $\sigma_{\Delta t_A}$ 、 $\sigma_{\Delta t_D}$ 。目前, 北斗星地双向绝对钟差测定精度约 0.2 ns(RMS)^[21], 可认为 $\sigma_{\Delta t_A} = \sigma_{\Delta t_D} = 0.2 \text{ ns}$ 。因此, 全球附和链路的星间钟差闭合残差中误差 $\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}}$ 满足

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}} = \sqrt{\sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2 + \sigma_{ISL}^2 + \sigma_{\Delta t_A}^2 + \sigma_{\Delta t_D}^2} \approx 0.59 \text{ ns} \quad (11)$$

同样取两倍中误差作为闭合残差限差, 则有

$$\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}}^{\text{限}} = 2\sigma_{\delta\Delta t_{ABCD}} \approx 1.18 \text{ ns} \quad (12)$$

当某条 ISL 链路闭合残差在限差范围以内时, 符合平差处理条件; 否则, 应予以重点检测和分析。

3 闭环残差整网平差改正

在计算得到各条 ISL 链路星间钟差闭合残差的基础上, 可对其开展整网间接平差处理。假设某一对齐时刻, n 颗卫星之间共存在 m 条不同组合的闭环星间链路。那么, 以各条星间闭环链路的闭合残差为观测量, 以其中 $n-1$ 颗卫星相对于剩余卫星的星间相对钟差作为待估参数, 可建立间接平差误差方程^[13]

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{V} &= \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \\ \mathbf{l} &= \mathbf{L} - \mathbf{A}\mathbf{X}^0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, \mathbf{L} 为各条星间闭环链路的闭合残差所组成的观测量向量; \mathbf{V} 为误差观测量向量; \mathbf{l} 为误差方程自由项, 维数均为 $m \times 1$; \mathbf{X}^0 为待估参数向量 \mathbf{X} 的近似值向量; $\hat{\mathbf{x}}$ 为待估参数的改正值向量, 维数均为 $(n-1) \times 1$; \mathbf{A} 为系数矩阵, 维数为 $m \times (n-1)$ 。

若对各闭合残差观测量取等权, 则待估参数改正值向量 $\hat{\mathbf{x}}$ 有

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{N}_A^{-1} \mathbf{U} \\ \mathbf{N}_A &= \mathbf{A}^T \mathbf{A} \\ \mathbf{U} &= \mathbf{A}^T \mathbf{I} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

将式(14)代入误差方程(13)可求得误差观测量向量 \mathbf{V} , 并分别修正得到星间闭环链路闭合残差观测量向量 \mathbf{L} 的平差值 $\hat{\mathbf{L}}$, 以及待估参数向量 \mathbf{X} 的 $\hat{\mathbf{X}}$

$$\left. \begin{aligned} \hat{\mathbf{L}} &= \mathbf{L} + \mathbf{V} \\ \hat{\mathbf{X}} &= \mathbf{X}^0 + \hat{\mathbf{x}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

计算过程中, 待估参数向量 \mathbf{X} 的近似值 \mathbf{X}^0 的初值可取零, 并迭代计算得到 $\hat{\mathbf{L}}$ 和 $\hat{\mathbf{X}}$ 。

4 计算与验证

4.1 星间钟差闭合差计算

根据式(4), 通过将双向伪距测量值进行历元归算后得到同一时刻的星间测距值, 可进而获得星间相对钟差, 一般将该“同一时刻”选为双向测距值所在整 3 s 的起始时刻。此外, 与精密定轨不同, 由于星间钟差同步是一种相对时间基准传递, 且卫星轨道与钟差之间相互独立, 因此无法使用精密星历作为参考来分析星间钟差的精度。在研究和实际工程当中, 目前通常采用残差拟合与分析的方法来评估星间钟差测定精度。

采用北斗三号在轨卫星 2020 年 1 月某日的星间钟差数据进行计算和分析。首先, 在完成各卫星星间相对钟差解算后, 从全天星间观测数据中挑选出所有星间闭环链路(附和链路暂未参与计算)。然后, 采用三次样条法将不同历元星间钟差数据内插至整分钟时刻, 以完成时间对齐。

参与计算的北斗卫星见表 1 所示。

在当天所有闭环链路中, 共获得 1208 组三星闭合链路, 其中闭合残差最大达 1.143 ns(RMS)、平均为 0.275 ns(RMS), 说明北斗全球 ISL 链路中确实存在着明显的非零闭合残差。此外, 很多链路的闭合残差还呈现明显的常数偏差或周期性波动变化, 反映出系统性有色误差的存在。其中, 部分代表性闭环链路的闭合残差结果见图 3 所示。

4.2 星间钟差闭合差修正

按照上文整网平差修正方法, 对时间对齐后(对齐至整分钟时刻)的星间链路数据逐历元进行闭合残差的平差修正, 并重新统计各历元各条星间闭环链路的闭合残差。可知, 修正后的 ISL 闭合残差 RMS 均在 $4 \times 10^{-5} \sim 5 \times 10^{-5}$ ns 量级、平均为 4.99×10^{-5} ns, 已达到北斗系统 ISL 星间链路数据

的计算截断误差水平, 说明该方法已彻底消除了星间钟差不闭合的现象。其中, 部分代表性 ISL 闭合残差的平差修正结果见图 4 所示(部分非严格为零的闭合差结果为计算截断误差)。

表 1 卫星信息列表

Tab.1 Satellite info

卫星 PRN 号	轨道类型	卫星 PRN 号	轨道类型
38	IGSO	22	MEO
39	IGSO	23	MEO
40	IGSO	24	MEO
25	MEO	32	MEO
26	MEO	33	MEO
27	MEO	34	MEO
28	MEO	35	MEO
29	MEO	36	MEO
30	MEO	37	MEO
19	MEO	45	MEO
20	MEO	46	MEO
21	MEO	59	GEO

短时间内(一般约 24 h 内)的卫星星间相对钟差变化曲线很好地符合多项式模型, 利用多项式进行拟合处理, 拟合残差可认为是 ISL 双向测距的噪声水平, 是评价 ISL 测量噪声和星间钟差误差的常用手段。对平差前后的星间相对钟差分别进行二次多项式拟合和统计, 部分代表性星间钟差拟合残差结果见图 5 所示。

由上述计算结果可知, 平差后的各组星间钟差拟合残差下降了 30%~50%, 显著减少了现有星间测量噪声与星间钟差误差。

5 总结

ISL 是 BDS-3 弥补海外监测站布设不足, 实现境外卫星精密定轨与时间同步的重要技术手段, 完善和提高 ISL 性能对于 BDS-3 而言具有重要意义。本文基于工程科学中的“闭环检测”思想, 指出了北斗系统 ISL 全球链路中所存在的有利闭环约束条件。对北斗 ISL 全球链路闭合差进行了检测和分析, 结果表明当前系统链路中确实存在着显著的常数性或周期性非零闭合残差, 反映了系统中有色误差的存在。在此基础上, 构建了针对 ISL 闭合残差的整网平差模型, 实现了对北斗卫星星间相对钟差的修正。基于 BDS-3 的在轨实测数据计算表明: 本文方法基本消除了 BDS-3 星间钟差不闭合的现象, 经整网平差修正处理后的星间钟差随机噪声减少了 30%~50%, 有效提高了北斗 ISL 测量及星间相对钟差测定的精度, 对提升北斗 ISL 性能与系统服务能力具有重要意义。

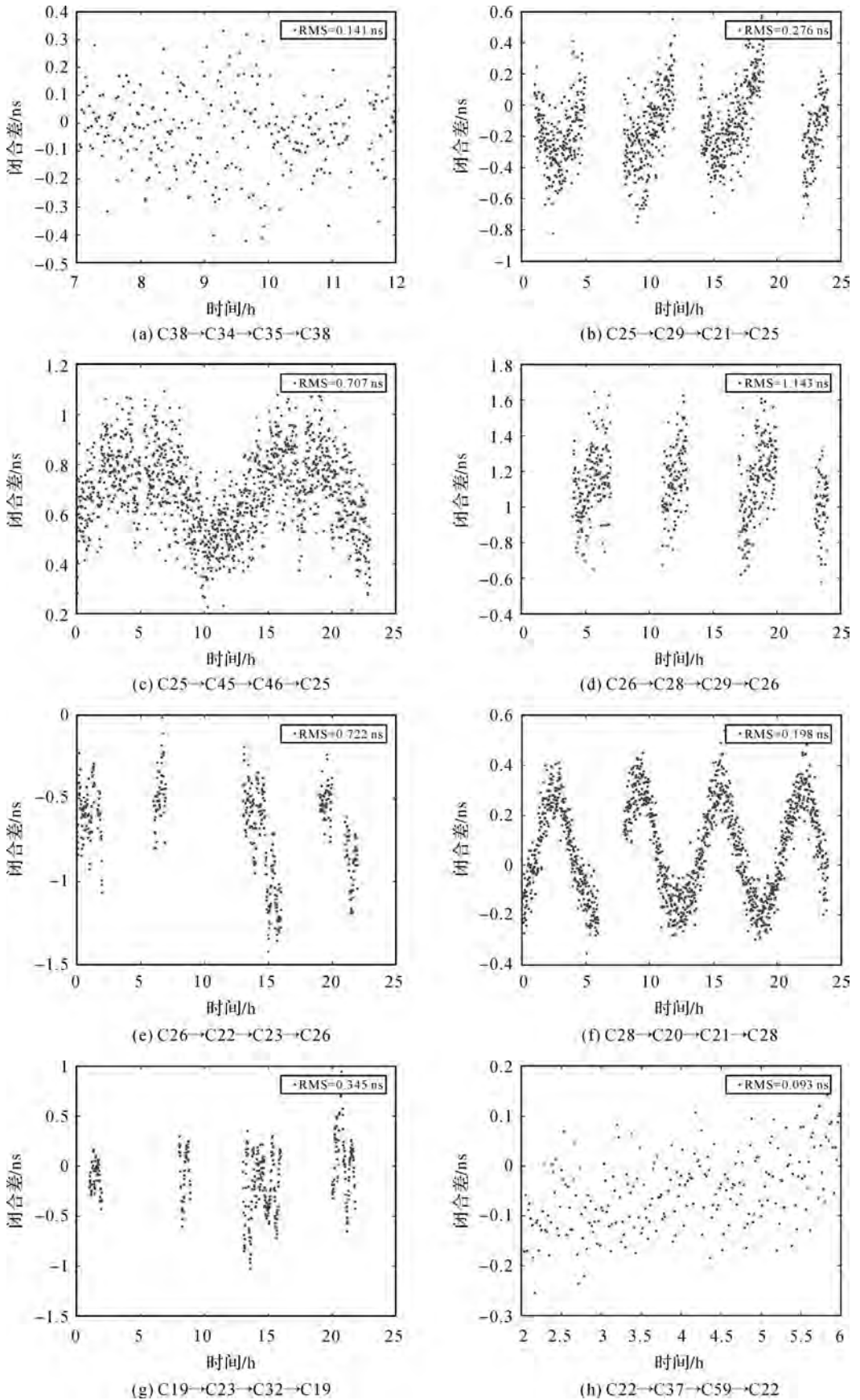


图 3 平差修正后的闭环链路残差

Fig.3 Closed-loop link residuals after adjustment

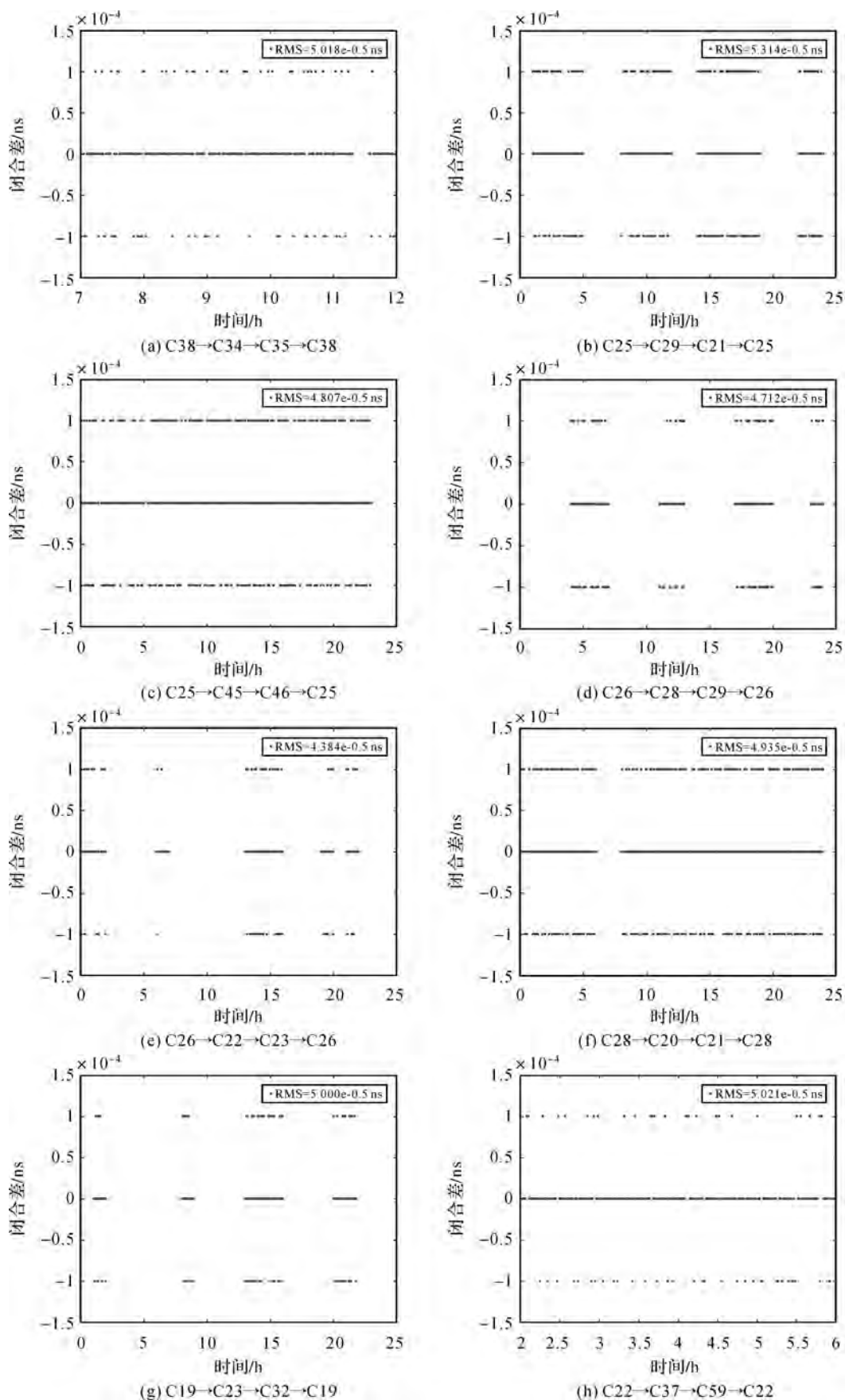


图 4 全球闭环链路星间钟差闭合残差

Fig.4 Inter-satellite clock offset closed residual of global closed-loop link

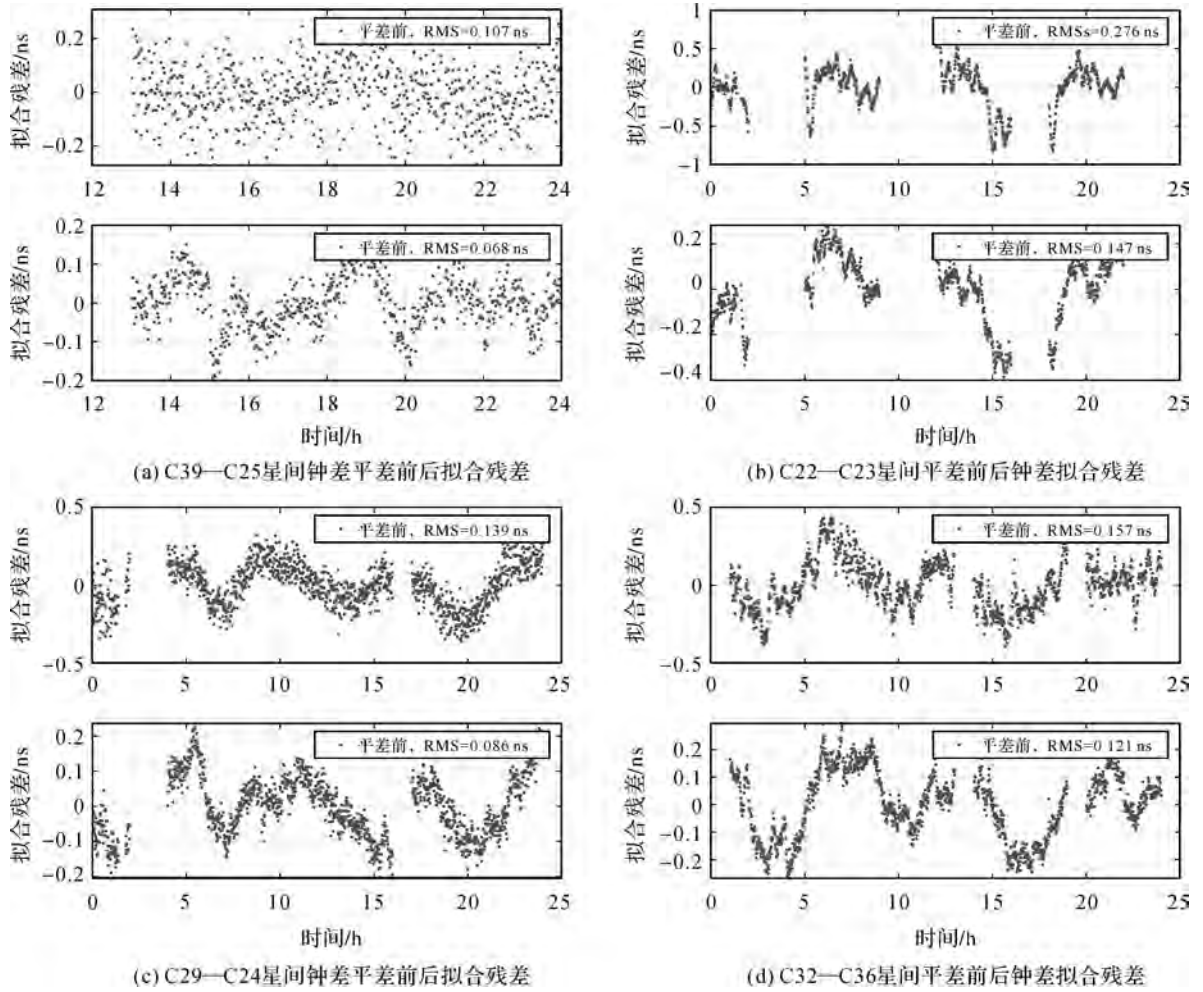


图5 平差前后的星间钟差拟合残差结果对比

Fig.5 Comparison of inter-satellite clock offset fitting residuals before and after adjustment

参考文献:

- [1] 潘军洋, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代卫星时分体制星间链路测量的系统误差标定[J]. 科学通报, 2017, 62(23): 2671-2679.
PAN Junyang, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. System error calibration for time division multiple access inter-satellite payload of new-generation Beidou satellites [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(23): 2671-2679.
- [2] LIU C, GAO W G, LIU T X, et al. Design and Implementation of a BDS Precise Point Positioning Service[J]. Navigation, acceptance.
- [3] CHANG Jiachao, SHANG Lin, LI Guotong. The research on system error of inter-satellite-link (ISL) measurements for autonomous navigation of BeiDou system[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(1): 65-81.
- [4] WANG Haihong, XIE Jun, ZHUANG Jianlou, et al. Performance analysis and progress of inter-satellite-link of Beidou system[C]// Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon: [s.n.], 2017: 1178-1185.
- [5] 杨宇飞, 杨元喜, 胡小工, 等. 北斗三号卫星两种定轨模式精度比较分析[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 831-839. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180560.
YANG Yufei, YANG Yuanxi, HU Xiaogong, et al. Comparison and analysis of two orbit determination methods for BDS-3 satellites[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 831-839. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180560.
- [6] 陈金平, 胡小工, 唐成盼, 等. 北斗新一代试验卫星星钟及轨道精度初步分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(11): 119502.
CHEN Jinping, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. Orbit determination and time synchronization for new-generation BeiDou satellites: Preliminary results[J]. Scientia Sinica-Physica, Mechanica & Astronomica, 2016, 46(11): 119502.
- [7] TANG Chengpan, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. Initial results of centralized autonomous orbit determination of the new-generation BDS satellites with inter-satellite link

- measurements[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(10): 1155-1169.
- [8] XIE Xin, GENG Tao, ZHAO Qile, et al. Precise orbit determination for BDS-3 satellites using satellite-ground and inter-satellite link observations[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 40.
- [9] YANG Yufei, YANG Yuanxi, HU Xiaogong, et al. Inter-satellite link enhanced orbit determination for Beidou-3[J]. *Journal of Navigation*, 2020, 73(1): 115-130.
- [10] PAN Junyang, HU Xiaogong, ZHOU Shanshi, et al. Time synchronization of new-generation BDS satellites using inter-satellite link measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2018, 61(1): 145-153.
- [11] CHEN Jinping, HU Xiaogong, TANG Chengpan, et al. SIS accuracy and service performance of the BDS-3 basic system[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2020, 63: 269511.
- [12] BOSSLER J D, GOAD C C, BENDER P L. Using the global positioning system (GPS) for geodetic positioning[J]. *Bulletin Geodesique*, 1980, 54(4): 553-563.
- [13] 武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 3版. 武汉: 武汉大学出版社, 2014.
Department of Surveying and Adjustment, School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University. *Error theory and foundation of surveying adjustment*[M]. 3rd ed. Wuhan: Wuhan University Press, 2014.
- [14] ANGELI A, DONCIEUX S, MEYER J A, et al. Real-time visual loop-closure detection[C]//2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Pasadena, CA: IEEE, 2008: 1842-1847.
- [15] 高翔, 张涛, 刘毅, 等. 视觉 SLAM 十四讲: 从理论到实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017.
GAO Xiang, ZHANG Tao, LIU Yi, et al. *14 lectures of visual SLAM: From theory to practice*[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [16] 高钟毓, 王进, 董景新, 等. 惯性测量系统零速修正的几种估计方法[J]. *中国惯性技术学报*, 1995, 3(2): 24-29, 39.
GAO Zhongyu, WANG Jin, DONG Jingxin, et al. A comparison of ZUPT estimation methods for inertial survey systems[J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 1995, 3(2): 24-29, 39.
- [17] 常乐, 章红平, 高周正, 等. 零速修正在 GNSS/INS 紧组合导航中的应用研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2016, 36(10): 879-883.
CHANG Le, ZHANG Hongping, GAO Zhouzheng, et al. The application of zero velocity update in GNSS/INS tightly coupled integration[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2016, 36(10): 879-883.
- [18] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18.
- [19] 毛悦, 宋小勇, 贾小林, 等. 星间链路观测数据归化方法研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2013, 38(10): 1201-1206.
MAO Yue, SONG Xiaoyong, JIA Xiaolin, et al. Naturalisation method research on inter-satellite link observation data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(10): 1201-1206.
- [20] 宋小勇, 毛悦, 冯来平, 等. BD 卫星星间链路定轨结果及分析[J]. *测绘学报*, 2017, 46(5): 547-553. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160203.
SONG Xiaoyong, MAO Yue, FENG Laiping, et al. The preliminary result and analysis for BD orbit determination with inter-satellite link data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(5): 547-553. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20160203.
- [21] ZHOU Shanshi, HU Xiaogong, LIU Li, et al. Applications of two-way satellite time and frequency transfer in the BeiDou navigation satellite system[J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2016, 59: 109511.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-07-17

修回日期: 2020-08-11

第一作者简介: 刘成(1987—),男,博士,研究方向为卫星导航增强、多源融合导航。

First author: LIU Cheng (1987—), male, PhD, majors in satellite navigation augmentation and multi-sensor fusion navigation technology.

E-mail: liucheng@beidou.gov.cn

引文格式:王猛,单涛,王盾.高轨航天器 GNSS 技术发展[J].测绘学报,2020,49(9):1158-1167. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200170.
WANG Meng, SHAN Tao, WANG Dun. Development of GNSS technology for high earth orbit spacecraft[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1158-1167. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200170.

高轨航天器 GNSS 技术发展

王 猛^{1,2}, 单 涛¹, 王 盾²

1. 北京理工大学信息与电子学院, 北京 100081; 2. 航天恒星科技有限公司, 北京 100086

Development of GNSS technology for high earth orbit spacecraft

WANG Meng^{1,2}, SHAN Tao², WANG Dun²

1. School of Information and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 10081, China; 2. Space Star Technology Co., Ltd., Beijing 10086, China

Abstract: With the increasing number of high orbit spacecraft, the use of high orbit GNSS technology to a certain extent avoids the limitations of traditional ground-based measurement and orbit determination, reduces the operation burden and maintenance cost of ground-based measurement and communication, and improves the autonomous navigation ability and orbit measurement accuracy of the satellite platform. Therefore, GNSS technology has significant research significance and application value for high earth orbit spacecraft. In this paper, the technology development of GNSS used in high orbit spacecraft is reviewed. Compared with low orbit spacecraft, the characteristics of GNSS in high orbit space are analyzed. From the three aspects of high orbit GNSS availability, on orbit technology verification and high sensitive receiver technology, the characteristics and development of high orbit GNSS autonomous navigation technology are summarized. The new tasks of high orbit post precise orbit determination and formation satellite relative navigation are analyzed. From the perspective of the future development of high orbit spacecraft, the future research prospect of high orbit GNSS technology is given.

Key words: GNSS; navigation; orbit determination; high earth orbit; spacecraft; BDS

摘 要: 随着高轨航天器任务和数量逐步增多,使用高轨 GNSS 技术在一定程度上避免了传统地面测控的局限性,降低了测控站网运行负担和维护成本,且提高了卫星平台自主导航能力和测定轨精度,具有显著的研究意义和应用价值。本文对 GNSS 用于高轨航天器的技术发展进行分析研究,对比低轨航天器分析了 GNSS 在高轨空间环境中应用特点;从高轨 GNSS 可用性、在轨技术验证和高灵敏接收机技术三个方面,总结高轨 GNSS 自主导航技术特点和发展历程;分析了高轨事后精密定轨和编队卫星相对导航新任务中 GNSS 技术特点;从高轨航天器未来发展出发,给出后续高轨 GNSS 技术研究展望。

关键词: GNSS; 导航; 定轨; 高轨; 航天器; 北斗系统

中图分类号: P228.4; V448.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2020)09-1158-10

高轨航天器,如地球静止轨道(GEO)卫星、倾斜地球同步轨道(IGSO)、高偏心轨道(HEO)卫星以及月球深空探测器等,在卫星通信、预警监视、气象探测、未知天体及环境探测等领域有着重要用途。当前,高轨卫星主要依赖地面测控实现轨道确定。随着高轨航天器种类和数量日益增多,高轨对地观测载荷对高精度定轨需求逐步提高,传统地面测控系统资源日趋紧张。全球导航卫星系统(GNSS)具有全天时、全天候、全球覆盖

特点,已广泛应用于低轨道航天器,若能在高轨空间使用 GNSS 导航方式,对缓解地面测控压力、实现自主管理和提高定轨精度有着极大的帮助。

20 世纪 80 年代,在 GEO 卫星上使用 GPS 的概念已被提出^[1]。2000 年,美国公布了 GPS 可操作需求文件(ORD),提出了空间服务空域(space service volume, SSV)的概念。2006 年, Bauer 正式描述了 SSV 概念,并明确卫星导航除了满足最初的 TSV(3000 km 以下)区域服务外,

在 SSV(3000 km~36 000 km)高轨空间也需要提供导航服务,并给出 GPS 高轨接收功率分析、覆盖性分析及可用性评估^[2]。后续许多学者对 SSV 开展了大量研究工作,美国、欧洲和中国等国家先后研制出用于高轨空间卫星导航接收机,并开展了在轨验证试验。在全球导航卫星系统国际委员会(ICG)、美国的导航协会(ION)组织的卫星导航会议上,多次提出和倡导美国、俄罗斯、中国、日本及印度的卫星导航系统在 SSV 构架下相互兼容,并提出一系列的协议和文件来支持卫星导航在高轨空间服务应用,奠定了 GNSS 高轨应用的政策基础^[3-7]。

本文首先从 GNSS 应用于高轨航天器上的技术特点出发,总结了高轨 GNSS 技术发展历程和应用,分析了国内外相关研究进展及技术验证情况,归纳出在自主导航、精密定轨、相对导航等技术方面的高轨 GNSS 研究情况,并给出了其后发展启示与建议。

1 高轨 GNSS 技术特点

根据 GNSS 导航系统设计初衷,导航卫星天线主瓣波束主要覆盖 3000 km 以下区域。相对于地面和低轨空间来说,高轨 GNSS 应用场景与技术特点有着很大的不同。以 GEO 轨道为例,分析得出高轨 GNSS 技术特点如下:

(1) 导航卫星几何分布差,需接收导航卫星旁瓣信号。由于 GNSS 接收机处在高于导航卫星星座的轨道上,只能收到来自地球另一侧的导航卫星所发射的导航信号,导航星几何分布差。而且,导航星发射天线主瓣波束范围约为 23.5° (针对 GPS L1 信号),如图 1 所示,大部分信号被地球完全遮挡,仅仅依赖主瓣信号,无法完成导航定位任务。因此,通过接收处理导航卫星旁瓣信号,来增加可用导航卫星数量和改善几何分布。根据图 2 中 GPS 导航信号接收功率表明,旁瓣信号功率会比主瓣信号功率低近 15 dB 以上^[8]。

(2) 接收的 GNSS 信号功率微弱。与低轨道和地面用户相比,高轨 GNSS 与导航卫星间的距离更加遥远,是普通地面环境的 2 至 4 倍左右,自由空间路径损耗 10 dB 左右。这使得接收机接收到的旁瓣信号功率更加微弱,普通接收机难以实现捕获跟踪。即便使用高灵敏度接收处理技术,但观测噪声过大,影响定位解算精度。

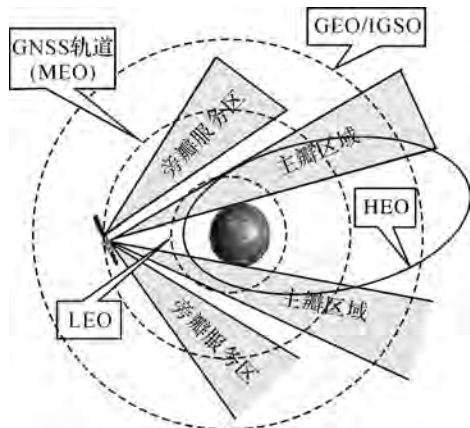


图1 GNSS星座和高轨航天器空间可见性
Fig.1 GNSS visibility at high earth orbit

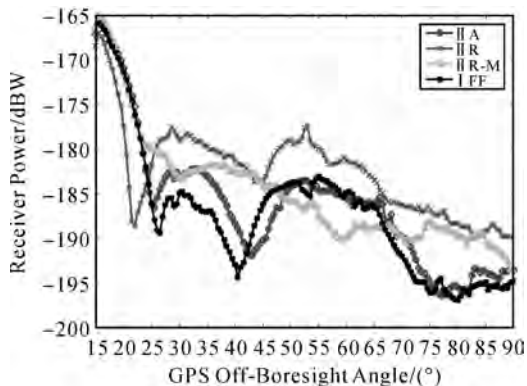


图2 GEO轨道上GPS导航信号平均接收功率^[8]
Fig.2 GPS averaged received signal power at GEO

(3) GNSS 信号两次穿越大气层。在接收机接收地球另一侧的导航信号,其中靠近地球边缘的导航信号两次穿越地球电离层和对流层到达接收机。电离层带来的相位延迟会带来几十米甚至百米以上的距离误差,对导航定位精度产生影响^[9]。但这种高轨 GNSS“掩星”信号探测,为在高轨空间的电离层和对流层探测提供了有利条件。

(4) GNSS 接收机空间环境适应性。地面或低轨卫星的导航接收天线指向天顶方向,高轨 GNSS 接收天线通常指向地球方向,波束宽度通常小于低轨卫星波束,但天线波束内增益要求高。高轨航天器受火箭推进资源限制,在体积、重量方面可分配给在 GNSS 接收机的资源有限,且还要求接收机具备高灵敏度接收和高轨空间辐照环境适应能力。

另外,对于 HEO 或者地球同步转移轨道(GTO)轨道航天器来说,GNSS 接收机在高轨和

低轨之间往返飞行,多次穿过导航卫星轨道面。此时接收机既要在高轨上接收来自地球对面的卫星导航信号,还能在低轨道上接收天顶方向导航信号,在高低轨道转移飞行过程中还要兼顾对天和地对两个方向的信号接收,此时接收信号功率大范围变化和强弱信号混叠现象的出现,对GNSS接收机系统设计带来复杂性。

2 高轨 GNSS 自主导航技术发展

随着航天技术的发展和高轨卫星的数目不断增加,无论是从降低运维费用还是从提高性能角度出发,都要求卫星具有一定的自主运行能力。尤其是高轨位置保持和机动过程中,需要卫星具有自主导航和自主管理能力^[10]。因此,GNSS为高轨航天器提供实时、自主、高精度的导航服务十分必要。

2.1 高轨 GNSS 可用性分析

目前,对高轨 GNSS 导航可用性研究主要方法有两种:数学仿真分析和地面物理仿真验证。在可用性分析与建模过程中,考虑的参数包括:导航星座参数、飞行轨道姿态、信号发射功率,发射天线和接收天线方向图,传播损耗以及接收功率门限^[10-11]。分析中考虑两个约束条件:首先要保证 GNSS 卫星和接收机之间的几何视线方向上不能被其他物体遮挡;其次还要满足接收信号强度高于捕获跟踪门限。可用性分析对象包括:可见星数、多普勒、几何分布因子、接收信号功率分布等统计特性。现有分析结果表明:在使用导航星旁瓣情况下,GNSS用于 GEO 和 HEO 导航是可行的,导航星数满足导航解算要求,位置精度在几十米甚至更高^[10-11]。近年来,导航卫星逐步向多系统兼容发展,现已涵盖了美国 GPS、俄罗斯 GLONASS、欧盟 Galileo、中国 BDS、日本 QZSS、印度 NAVIC 等导航系统,仅考虑导航星主瓣信号且接收机载噪比门限为 20 dB-Hz 时,多系统兼容高轨 GNSS 可用星数 4 颗及以上的概率也能保持在 90% 以上^[4,6]。

为进一步评估高轨 GNSS 性能和轨道适应能力,通常会在地面开展物理链路模拟验证,即利用 GNSS 信号模拟器模拟卫星飞行轨迹和姿态,并根据传输信道实时生成导航信号,模拟接收机在轨环境,以此来评估接收机任务完成能力,例如在 MMS 卫星、GEOS-R 卫星、SmallGEO 任务等在研制中都进行此类地面物理测试^[12-17]。

值得注意的是,导航星旁瓣信号有效全向辐射功率(EIRP)影响高轨 GNSS 整个系统性能关键因素,导航星天线受加工、安装条件影响,方向增益存在一定差异。因此,NASA 设置了专门的工组 GPS ACE 负责整理真实 GPS 旁瓣导航信号发射功率。该小组通过 GEO 卫星采集 GPS 系统导航信号,在地面通过后处理的方式评估并发布 GPS 系统的导航星天线方向图和接收功率情况,图 3 为其发布的 Block II R 导航星天线方向图^[18-19],由图可知导航星旁瓣增益在不同方向存在较大差异。

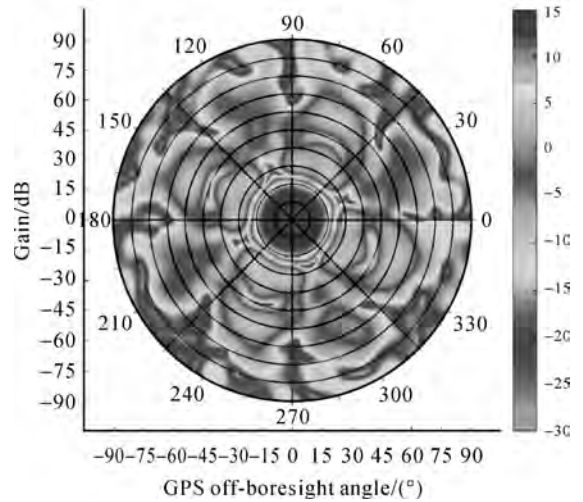


图3 地基测量的 GPS Block II R 导航星天线方向^[19]
Fig.3 GPS Block II R ground measured antenna pattern

2.2 高轨 GNSS 自主导航技术验证

自 20 世纪末以来,对高轨 GNSS 自主导航技术的在轨验证一直进行中,根据文献^[20-33]中国内外技术验证内容,汇总了高轨 GNSS 在轨试验情况如表 1,整个历程大体分为两个阶段:

第 1 个阶段,对成熟的商业或者低轨导航接收机进行适应性改造,提高其信号接收灵敏度和高轨环境适应能力,如 TEAMSAT/YES、Equator-S、AO-40、GIOVE-A 等任务中 GPS 接收机。尽管这些任务验证了高轨 GNSS 技术可行性,但距离产品应用仍存在一定差距。

第 2 个阶段,各国均针对高轨航天器技术特点,先后开展了高灵敏度信号处理和导航解算技术研究,并研制针对高轨航天器的 GNSS 接收机,并已取得在轨实际应用。目前国外已取得验证的高轨导航接收机仅支持 GPS 导航系统,而我国则兼容 GPS、GLONASS 以及北斗方式^[32]。

在美国磁层多尺度任务卫星(MMS)在新一阶段任务轨道中,GSFC Navigator GPS接收机在17万 km轨道上仍可收到GPS信号,进一步证明了GPS覆盖范围可以更高,位置精度小于60 m,速度精度小于0.25 cm/s^[34]。在静止轨道环境观测卫星GOES-R任务中,如图4所示卫星上配置的可伸出GPS接收天线,以保证GPS接收机视场内无遮挡。根据文献[33]提供的GOES-R GPS接收机在轨测试结果,平均可跟踪导航星数量11颗,平均几何分布值为7.9,在径向、法向和切向定轨均方根误差精度分别为7.25 m、4.39 m和2.47 m。在2014年,我国CE-5T1飞行试验器搭载了GNSS接收机并完成在轨试验,实现了12万 km轨道上GPS信号接收,完成50 000 km至5000 km月地和地月转移轨道自主导航,导航精度优于100米^[29-30]。在2017年我国GEO轨道通信技术试验二号星(TJS-2)任务中,完成了我国北斗导航信号兼容接收,在轨实现了27 m、

0.03 m/s的位置和速度精度^[31-32]。

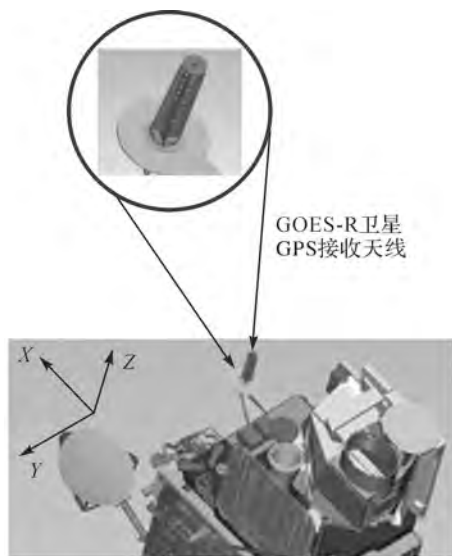


图4 GOES-R星上GPS接收天线

Fig.4 GPS antenna on GOES-R satellite

表1 高轨GNSS接收机在轨试验情况

Tab.1 On-orbit verification of GNSS receiver at high earth orbit

任务名称	国别	时间	GNSS接收机	高轨GNSS验证情况
TEAMSAT/YES	欧洲	1997-10	Trimble TANS-II	GTO轨道,在远至26 000 km高度上成功跟踪GPS信号
Falcon Gold	美国	1997-11	NAVSYS TID-GIT	GTO轨道,在轨收集GPS数据后地面处理,验证了高度1500~33 000 km GPS信号接收
Equator-S	美国	1997-12	Motorola Viceroy	GTO轨道,34 000 km高度以上成功跟踪GPS旁瓣信号
AO-40	美国	2000-11	Trimble TANS Vectors	HEO轨道,获取了大量GPS在轨观测数据,最远可达58 000 km轨道,并尝试在轨导航解算
GIOVE-A	欧洲	2005-12	SGR-GEO	轨道约23 000 km,收到多颗GPS信号并完成导航解算
SBIRS GEO 1	美国	2011-03	双频GPS接收机	GEO轨道,完成星上实时导航及定轨,并利用GPS L1和L2双频数据对电离层延迟进行分析
MMS	美国	2015-03	GSFC Navigator	HEO轨道,在17 km左右仍能接收GPS和定轨解算
CE-5T1	中国	2014-10	GNSS兼容机	月-地转移轨道(约50 000~5000 km),实现GPS和GLONASS兼容接收和导航定轨解算
TJS-2	中国	2017-01	GNSS兼容机	GEO轨道,实现GPS、GLONASS和BDS兼容接收和定轨解算
GOES-R	美国	2016-11	General Dynamics Viceroy-4	GEO轨道,平均跟踪导航星数11颗,DOP值5~15之间,位置精度优于30 m
SmallGEO	欧洲	2017-01	Astrium Mosaic	GEO轨道,Small GEO平台首发星Hispasat 36W-1,验证了GEO轨道GPS信号接收和导航定轨

2.3 高轨高灵敏度GNSS接收机技术

早期高轨高灵敏GNSS导航接收机,通常改造商用导航接收机或模块,来适应旁瓣微弱导航信号的接收处理,如SGR-GEO任务中GPS接收机是在商业GPS相关器芯片GP2021和GP4020基础上进行开发^[26-27]。AO-40卫星采用的是商用Trimble的GPS接收机^[24-25]。美国NASA的

戈达德航天中心(GSFC)最开始研制的高轨GPS接收机PiVoT也是使用商业GP2021芯片,后来逐步自主研发了Navigator GPS接收机^[16,36]。法国CNES早期也开发了Topstar 3000 GPS接收机最初用于STENTOR卫星,后来进一步升级为Topstar 3000 G2^[37]。近年来,各航天大国相继开发出适用于高轨卫星的GNSS导航接收机产品,

从单 GPS 系统逐步向多导航系统兼容发展,如 Viceroy、Mosaic、LION Navigator 等,部分接收机位置精度指标甚至达到 15 米以内^[38-41],图 5 所示为一些 GNSS 接收机的实物图。随着卫星导航技术发展和芯片处理能力的提高,目前研究的星载 GNSS 接收机通过简单配置,可适用于 LEO、GTO、GEO 等不同场景,具有较强的轨道适应能力^[39-41]。

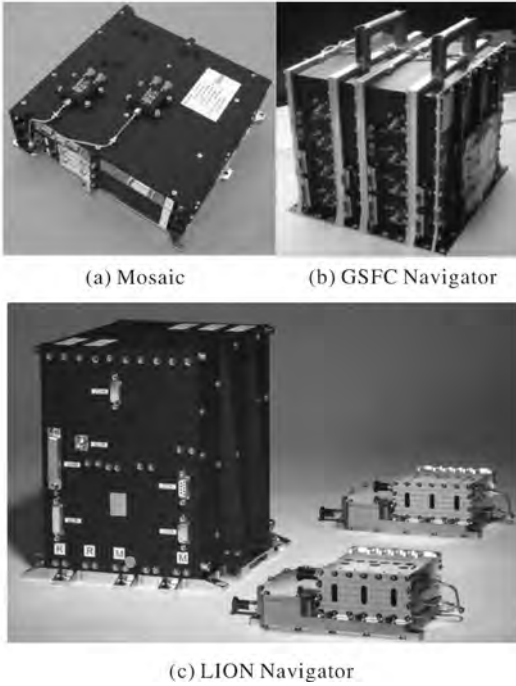


图 5 星载高轨 GNSS 导航接收机

Fig.5 GNSS receiver for high earth orbit satellite

在高灵敏度信号捕获技术方面,通常采用长时间的相干和非相干累积来提高信号处理增益。文献[16]给出了 GSFC Navigator GPS 接收机的基于 FFT 循环相关的弱信号捕获方法,算法实现流程如图 6 所示。仿真分析结果表明,该捕获算法可完成载波比 25 dB-Hz 微弱导航信号的快速捕获,实际在轨应用也达到了预期效果。为提高捕获处理效率和降低处理器资源,提出了一种基于梳状滤波器(comb filters)架构的高灵敏度信号捕获方法,在伪码搜索前通过 comb 滤波器完成相干积分^[42],在 CE-5T1 和 TJS-2 任务中的高轨 GNSS 接收机使用此方法^[30]。近年来,有学者根据导航信号自相关峰值在时域上的稀疏特性,提出了利用稀疏傅里叶(SFT)实现 GPS 信号捕获方法,可有效提高捕获性能和运算效率^[43]。

在高灵敏度信号跟踪技术方面,现有的主要

技术手段主要借助于传统锁相环(PLL)和锁频环(FLL)跟踪弱信号跟踪能力。文献[44]介绍了使用卡尔曼滤波器(KF)高灵敏环路处理,建立载波多普勒相位、频移和频率变化率的状态和测量方程模型,来实现微弱信号载波跟踪。不同于传统标量处理方式,采用矢量跟踪环路技术,用于联合跟踪多个频率上所有卫星的载波相位,可进一步提高跟踪灵敏度^[45]。近年来,文献[46]在利用动力学模型和 GNSS 观测量实现高轨定轨滤波基础上,使用轨道滤波结果辅助跟踪环路,来提升灵敏度,仿真结果表明,跟踪灵敏度可以达到 11 dB-Hz。后续可针对轨道动力学信息的矢量跟踪环路开展研究工作,进一步提高跟踪灵敏度。

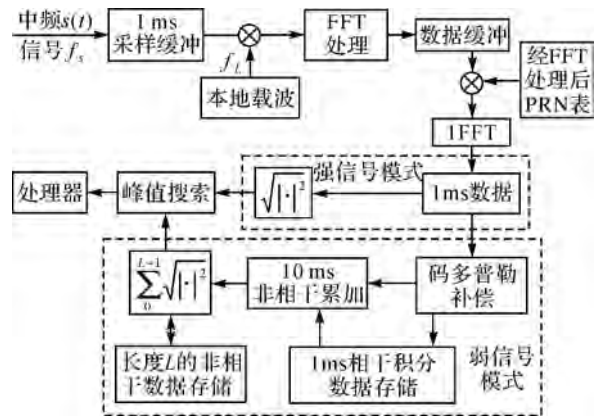


图 6 基于 FFT 的强弱信号快速捕获模块

Fig.6 FFT-based correlation and strong or weak signal component of the quick acquisition

在导航定位定轨技术方面,高轨 GNSS 接收机除了采用传统最小二乘法的几何定位外,还使用 GNSS 观测量与轨道动力学融合滤波的定轨解算方法,进一步提高位置和速度测量精度。在高轨 GNSS 定轨方法中,通常采用扩展卡尔曼滤波器(EKF)方法,完成轨道动力学模型的线性化处理,实时获得卫星运动状态的最优估计。其中,将接收机位置、速度、钟差、钟速以及其他模型参数作为待估计状态量,将导航星伪距信息作为观测量,使用几何定位结果完成滤波器初始化,定轨滤波算法实现如图 7 所示^[47]。

3 高轨 GNSS 事后精密定轨技术

利用星载 GNSS 确定卫星精密轨道已在我国低轨卫星上成功应用,可达到厘米级甚至亚厘米级定轨精度^[48-49]。在高轨 GNSS 精密定轨技术研究中,利用通信技术试验二号星(TJS-2)高

轨导航接收机的 GPS 观测数据,武汉大学研究人员进行了精密定轨数据处理和精度评估。观测量使用策略采用伪距与载波加权处理的方式,定轨结果见表 2,3 天弧长定轨重叠弧段精度可达到米级以内^[31]。

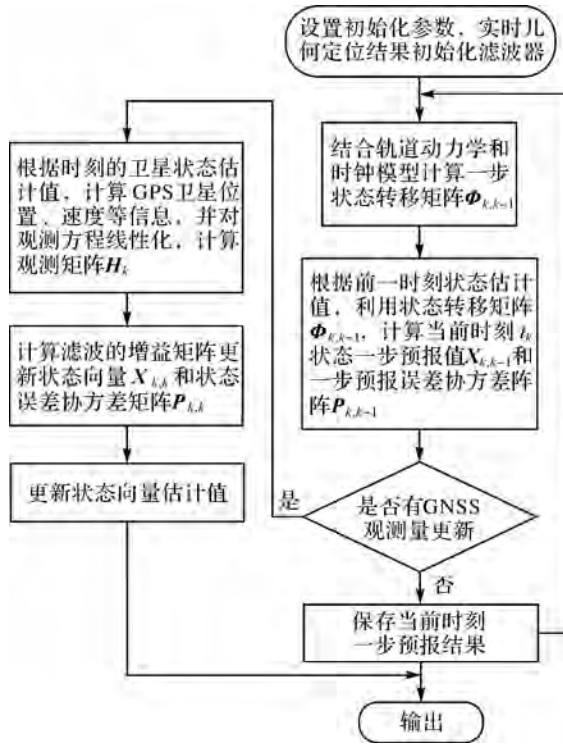


图 7 高轨航天器 GNSS 定轨算法流程

Fig.7 GNSS-based orbit determination method for high earth orbit spacecraft

表 2 重叠弧段在切向 (A)、法向 (C)、径向 (R) 和三维 (3D)RMS 统计值

Tab.2 RMS statistics of Along (A), Cross (C), and Radial (R) for overlap arc

时长	权重比	A/m	C/m	R/m	3D/m
30 h	3 : 0.02	1.91	0.78	0.95	2.27
	3 : 0.3	1.15	0.77	0.69	1.55
	3 : 3	1.25	1.10	2.18	2.75
	3 : 0.02	1.47	0.36	0.52	1.60
3 d	3 : 0.3	0.70	0.28	0.27	0.80
	3 : 3	0.50	0.33	0.24	0.64

影响高轨 GNSS 精密定轨精度的误差源主要有两类:首先,导航星几何分布不好,信号功率弱带来的观测量误差大,影响了事后精密定轨精度^[33,50];其次,对于高轨卫星来说,不受大气阻力摄动影响,地球非球形引力摄动也不敏感,对量级较高的地球非球形摄动和日月摄动都有相对成熟

且精度较高的模型进行模制改正,太阳光压摄动成为继地球引力、日月引力之后量级最大摄动。以导航卫星为例,太阳光压摄动力影响在非保守摄动力影响中占比最大,达 90% 以上^[51-52]。因此,后续可研究如何减少太阳光压摄动模型误差影响、提高 GNSS 观测量质量以及探索如何使用载波数据来改善定轨精度。一些研究人员尝试使用静电悬浮加速度计实现光压微弱力测量,以改善光压长周期项对定轨精度影响。

4 高轨 GNSS 相对导航技术

高轨航天器编队飞行和协同工作,彼此之间的高精度相对时空信息统一与协同非常重要。相对时空信息通常指的是相对位置、相对速度、相对姿态和相对时间。采用 GNSS 差分处理方法,通过共视导航星测量信息构建差分组合,消除或降低导航测量值中的公共误差部分来提高精度。此法已广泛的应用低轨卫星编队中,甚至使用 GNSS 来引导两飞行器交会对接^[53]。在高轨航天器实现 GNSS 相对导航技术,需要关注如下几个问题:

(1) 无论是载波相位差分还是伪距差分,前提条件是存在共视星,通常高轨编队卫星星间基线长度大于低轨星间基线,甚至达到数千公里量级,在共视星数量、共视时间、观测量相关性等方面需开展针对性研究。

(2) 由于高轨接收导航信号功率微弱,载波跟踪稳定性差,载波周跳频繁,需针对传统载波模糊度固定方法的可用性和收敛时间开展研究工作。在载波差分方法不可用时,可采用伪距差分结合轨道动力学信息辅助滤波的方法实现高精度相对导航^[54-56]。

(3) 低轨编队卫星星间时差测量通常接收机收到共视星后,将某颗共视星观测数据求取单差(单差法),以获得准确的星间时差信息。另外,文献^[54]进行相对基线求解时,也将星间时差、时差变化量作为状态信息量,结合动力学模型完成定轨滤波更新。

5 高轨 GNSS 技术展望

GNSS 高轨航天器中自主导航、精密定轨和相对导航等方面已取得了一定的技术研究成果。随着北斗全球化进程逐步完善,开展高轨北斗在高轨中应用研究非常重要。北斗在 B1C 和 B2a

两种新信号体制上采用了“数据支路+导频支路”体制,有助于提高接收灵敏度和跟踪精度,多体制 LDPC 编码也提高了弱信号解调性能^[57],更易于实现高轨高灵敏度处理。并且,北斗系统采用 MEO、GEO 和 IGSO 混合星座方式,当接收机处于中国区域上空的 GEO/IGSO 轨道时,既可接收来自地球对面导航卫星发射天线旁瓣信号,又可使用北斗 GEO/IGSO 同轨道面导航信号。而且,这两类信号在接收视线上差异较大,利用水平面方向的同轨导航信号参与定位,除了明显改善星座几何分布外,可直接避免了来自地球方向的干扰和影响。

近年来,月球探测又重新成为了研究热点,一些学者对月球空间 GNSS 技术可行性开展研究工作^[58-60],并把月球任务作为 SSV 的一个典型的应用场景^[6],地月空间导航将成为现有导航服务范围的有效延伸。在此应用中,由于极差的导航星几何分布,将促进了 GNSS 与天文导航、惯性、月球空间动力学模型等多信息手段融合。而且极其微弱的信号接收功率,要求处理信号载噪比甚至达到 10 dB-Hz,使得在高灵敏度处理、快速信号捕获和电文解调方面有着极大的难度。近年来发展的低轨卫星导航增强系统,可为地面导航终端提供信号增强,以及时间和星历等信息增强,辅助提高接收灵敏度和缩短首次定位时间^[61]。若在后续低轨卫星或地面站导航增强任务中,甚至在后续规划空间站、月球站及月球深空中继卫星任务,或者利用北斗星间链路,为月球 GNSS 任务提供增强服务,可有助于提高月球空间 GNSS 性能。

高轨 GNSS 会直接收到穿越地球边缘的“掩星”信号,这类信号均来自导航星主瓣信号,为电离层和大气层数据反演提供了可行性。与低轨 GNSS“掩星”探测不同,高轨探测的切点高度可达数千公里,每次持续时间几十分钟,南北极附近位置处数据居多^[62]。另外,高轨卫星尤其是两万公里轨道卫星,接收机至“掩星”探测切点与导航卫星至切点的几何路径近似对称,更易于减少“掩星”数据反演中模型误差。但是,若在高轨卫星上实现高精度“掩星”探测,还需要进一步提高接收天线增益、接收灵敏度和多频观测数据精度。

6 结束语

随着航天技术不断发展,人类空间探测范围

逐步增大,抢占高轨空间战略资源制高点已经引起各国的格外关注。高轨 GNSS 将传统导航卫星服务区域由 3000 km 以下的低轨空间,扩展到数万公里以上的高轨空间,极大地拓展了卫星导航服务的应用范围,这也是国内外对高轨 GNSS 技术开展研究主要原因。尽管高轨 GNSS 技术并已经取得了一些的技术研究成果和应用,并在一些高轨航天器任务中发挥了重要作用,但仍有一些新技术、新需求和新应用需要进一步深入开展研究工作。另外,随着我国北斗全球导航系统建设逐步完善,积极开展北斗导航系统在高轨中应用的技术研究工作,对于提高我国高轨航天器服务能力具有非常重要的意义。

参考文献:

- [1] JORGENSEN P. Autonomous navigation of geosynchronous satellites using the NAVSTAR global positioning system [C]// Proceedings of National Telesystems Conference. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1982.
- [2] BAUER F H, MOREAU M C, DAHLE-MELSAETHER M E, et al. The GPS space service volume [C]// Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006). Fort Worth: [s.n.], 2006.
- [3] BAUER F H, PARKER J J K, WELCH B, et al. Developing a robust, interoperable GNSS Space Service Volume (SSV) for the global space user community [C]// Proceedings of the 2017 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, Monterey. Monterey: [s.n.], 2017: 132-149.
- [4] PARKER J J K, BAUER F H, ASHMAN B W, et al. Development of an interoperable GNSS space service volume [C]// Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Miami: [s.n.], 2018.
- [5] MILLER J J, BAUER F H, ORIA A J, et al. Achieving GNSS compatibility and interoperability to support space users [C]// Proceedings of the 29th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation, Portland: [s.n.], 2016.
- [6] ENDERLE W, GINI F, BOOMKAMP H, et al. Space user visibility benefits of the multi-GNSS space service volume: an internationally-coordinated, global and mission-specific analysis [C]// Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018). Miami: [s.n.], 2018.
- [7] JING Shuai, ZHAN Xingqun, LU Jun, et al. Characterisation of GNSS space service volume [J]. Journal of Navigation

- gation, 2015, 68(1): 107-125.
- [8] PARKER J J K, VALDEZ J E, BAUER F H, et al. Use and protection of GPS sidelobe signals for enhanced navigation performance in high Earth orbit[C]//Proceedings of the 39th Annual American-Astronautical-Society Rocky Mountain Section Guidance, Navigation and Control Conference. Breckenridge: [s.n.], 2016: 329-341.
- [9] BARKER L, FREY C. GPS at GEO: a first look at GPS from SBIRS GEO1[C]//Proceedings of AAS GNC Conference. Breckenridge: [s.n.], 2012: 199-212.
- [10] LORGA J F M, SILVA P F, DOVIS F, et al. Autonomous orbit determination for future GEO and HEO missions[C]//Proceedings of the 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC). Noordwijk: IEEE, 2010: 1-14.
- [11] MARMET F X, MAUREAU J, CALAPRICE M. GPS/Galileo navigation in GTO/GEO orbit[J]. Acta Astronautica, 2015, 117: 263-276.
- [12] CHAPEL J, STANCLIFFE D, BEVACQUA T, et al. Guidance, navigation, and control performance for the GOES-R spacecraft[J]. CEAS Space Journal, 2015, 7(2): 87-104.
- [13] LARSON K, GAYLOR D, WINKLER S. Worst-case GPS constellation for testing navigation at geosynchronous orbit for GOES-R[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2013, 149: 403-416.
- [14] LONG A, FARAHMAND M, CARPENTER R. Navigation operations for the magnetospheric multiscale mission[C]//Proceedings of the 25th International Symposium on Space Flight Dynamics. Munich: NASA Goddard Space Flight Center, 2015.
- [15] ZENTGRAF P, BERGE S, CHASSET C, et al. Preparing the GPS experiment for the Small Geo mission[C]//Proceedings of the 33rd Annual AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, CO: [s.n.], 2010.
- [16] WINTERNITZ L M B, BAMFORD W A, HECKLER G W. A GPS receiver for high-altitude satellite navigation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2009, 3(4): 541-556.
- [17] BAMFORD W, NAASZ B, MOREAU M C. Navigation performance in high earth orbits using Navigator GPS receiver[C]//Proceedings of the 29th Annual AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, CO: AAS, 2006.
- [18] MARTZEN P D, HIGHSMITH D E, VALDEZ J E, et al. GPS antenna characterization experiment (ACE): receiver design and initial results[C]//Proceedings of the Institute of Navigation Joint Navigation Conference. 2015.
- [19] DONALDSON J E, PARKER J J K, MOREAU M C, et al. Characterization of on-orbit GPS transmit antenna patterns for space users[C]//Proceedings of the 31st International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Miami, Florida: [s.n.], 2018.
- [20] BALBACH O, EISSFELLER B, HEIN G W, et al. Tracking GPS above GPS satellite altitude: first results of the GPS experiment on the HEO mission Equator-S[C]//Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. Palm Springs, CA: IEEE, 1998: 243-249.
- [21] POWELL T D, MARTZEN P D, SEDLACEK S B, et al. GPS signals in a geosynchronous transfer orbit: "Falcon Gold" data processing[C]//Proceedings of Institute of Navigation National Technical Meeting. California: [s.n.], 1999: 575-585.
- [22] MOREAU M C, DAVIS E P, CARPENTER J R. Results from the GPS flight experiment on the high earth orbit AMSAT OSCAR-40 spacecraft[C]//Proceedings of the Institute of Navigation GPS 2002 Conference. Portland, Oregon: [s.n.], 2002: 122-123.
- [23] DAVIS G, MOREAU M, CARPENTER R, et al. GPS-based navigation and orbit determination for AMSAT AO-40 Satel-lite[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Monterey, CA: AIAA, 2002.
- [24] EBINUMA T, UNWIN M. GPS receiver demonstration on a Galileo test bed satellite[J]. Navigation, 2007, 60(3): 349-362.
- [25] UNWIN M, VAN STEENWIJK R D V, BLUNT P, et al. Navigating above the GPS constellation-preliminary results from the SGR-GEO on GIOVE-A [C] //Proceedings of the 26th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS + 2013). Nashville, TN: [s.n.], 2013.
- [26] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, PRICE S R, et al. Global positioning system navigation above 76, 000 km for NASA's magnetospheric multiscale mission[J]. Navigation, 2017, 64(2): 289-300.
- [27] FARAHMAND M, LONG A, HOLLISTER J, et al. Magnetospheric MultiScale mission navigation performance during apogee-raising and beyond[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2018, 162: 2738-2739.
- [28] FAN Min, HU Xiaogong, DONG Guangliang, et al. Orbit improvement for Chang'E-5T lunar returning probe with GNSS technique[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(11): 2473-2482.
- [29] WANG Dun, DONG Qijia, WANG Meng, et al. Results from the GNSS flight experiment on the circumlunar free return trajectory of China CE-5T1 spacecraft[C]//Proceedings of the 66th International Astronautical Congress. Jerusalem: [s.n.], 2015.
- [30] WANG Meng, SHAN Tao, MA Lin, et al. Performance of GPS and GPS/SINS navigation in the CE-5T1 skip re-entry mission[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 56.
- [31] JIANG Kecai, LI Min, WANG Meng, et al. TJS-2 geo-

- stationary satellite orbit determination using onboard GPS measurements[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 87.
- [32] 李冰, 刘蕾, 王猛. GEO 卫星 GNSS 导航在轨长期性能验证与分析[J]. *上海航天*, 2017, 34(4): 133-143.
LI Bing, LIU Lei, WANG Meng. Performance demonstration and analysis of GNSS navigation in GEO satellites [J]. *Aerospace Shanghai*, 2017, 34(4): 133-143.
- [33] WINKLER S, RAMSEY G, FREY C, et al. GPS receiver on-orbit performance for the GOES-R spacecraft [C] // *Proceedings of the 10th International ESA Conference on GNC Systems*. Salzburg: [s.n.], 2017.
- [34] WINTERNITZ L B, BAMFORD W A, PRICE S R. New high-altitude GPS navigation results from the magnetospheric mul-tiscale spacecraft and simulations at lunar distances [C] // *Proceedings of the 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation*, (ION GNSS+ 2017). Portland: [s.n.], 2017.
- [35] NEUMANN N, DE BRUIJN F, LÜBKE-OSSENBECK B, et al. In-Flight Results from the GPS Receiver on Small-GEO[C] // *Proceedings of the 68th International Astronautical Congress*. Adelaide: [s.n.], 2017.
- [36] WENNERSTEN M D, BANES V, BOEGNER G, et al. PiVoT GPS receiver [C] // *Proceedings of the ION GPS Conference 2001*. Salt Lake City, UT: [s.n.], 2001: 855-861.
- [37] MEHLEN C, LAURICHESSE D. Real-time GEO orbit determination using TOPSTAR 3000 GPS receiver[J]. *Navigation*, 2001, 48(3): 169-179.
- [38] HARTRAMPF M, FILIPPI H, KRAUSS P A, et al. LION navigator for transfer to GEO using electric propulsion[C] // *Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS + 2015)*. Tampa, FL: [s.n.], 2015: 3910-3927.
- [39] KRAUSS P A, HARTRAMPF M, BARRIOS-MONTALVO A, et al. LION NEO-a versatile space GNSS receiver[C] // *Proceedings of Guidance Navigation and Control 2016*. Breckenridge: [s.n.], 2016: 355-366.
- [40] KING T. Extending the use of GPS to geostationary altitudes[C] // *AIAA SPACE 2011 Conference & Exposition*. Long Beach: AIAA, 2011: 1-9.
- [41] WINKLER S, VOBORIL C, HART R, et al. GOES-R use of GPS at GEO (Viceroy-4)[C] // *Proceedings of the 2013 AAS Guidance and Control Conference*. Breckenridge: [s.n.], 2013: 391-401.
- [42] DEMPSTER A G. Use of comb filters in GPS L1 receivers [J]. *GPS Solutions*, 2018, 12(3): 179-185.
- [43] HASSANIEH H, ADIB F, KATABI D, et al. Faster GPS via the sparse Fourier transform[C] // *Proceedings of the 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY: ACM, 2012: 353-364.
- [44] HARSHA P B S, RATNAM D V. Implementation of advanced carrier tracking algorithm using adaptive-extended Kalman filter for GNSS receivers[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2016, 13(9): 1280-1284.
- [45] HENKEL P, GIGER K, GUNTHER C. Multifrequency, multisatellite vector phase-locked loop for robust carrier tracking[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2009, 3(4): 674-681.
- [46] CAPUANO V, BLUNT P, BOTTERON C, et al. Orbital filter aiding of a high sensitivity GPS receiver for lunar missions [C] // *Proceedings of the 2016 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. Monterey, CA: [s.n.], 2016.
- [47] 张万威, 徐其超. 基于 GNSS 的地球静止轨道卫星自主定轨仿真研究[C] // *第五届中国卫星导航学术年会论文集*. 南京: 中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心, 2014: 1001-1006.
ZHANG Wanwei, XU Qichao. Simulation study on autonomous orbit determination for Geostationary satellite based on GNSS [C] // *Proceedings of the 5th China Satellite Navigation Conference*. Nanjing: Academic Exchange Center of China Satellite Navigation System Management Office, 2014: 1001-1006.
- [48] 袁俊军, 赵春梅, 吴琼宝. 资源三号 01 星及 02 星星载 GPS 天线 PCO、PCV 在轨估计及对精密定轨的影响[J]. *测绘学报*, 2018, 47(5): 672-682. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20170703.
YUAN Junjun, ZHAO Chunmei, WU Qiongbao. Phase center offset and phase center variation estimation in-flight for ZY-3 01 and ZY-3 02 Spaceborne GPS antennas and the influence on precision orbit determination [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(5): 672-682. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20170703.
- [49] ZENG Tian, SUI Lifen, JIA Xiaolin, et al. Results and analyses of BDS precise orbit determination with the enhancement of Fengyun-3C[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(3): 68-78.
- [50] SU Xing, GENG Tao, LI Wenwen, et al. Chang'E-5T orbit determination using onboard GPS observations[J]. *Sensors*, 2017, 17(6): 1260.
- [51] 李铁映, 杨慧, 王海红. 导航卫星光压建模及表面光学特性参数影响分析[J]. *宇航学报*, 2015, 36(6): 731-738.
LI Tiejing, YANG Hui, WANG Haihong. Navigation satellite solar radiation of the effect of surface pressure modeling and analysis optical parameters [J]. *Journal of Astronautics*, 2015, 36(6): 731-738.
- [52] 陈秋丽, 杨慧, 陈忠贵, 等. 北斗卫星太阳光压解析模型建立及应用[J]. *测绘学报*, 2019, 48(2): 169-175. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20180097.
CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellite [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,

- 2019, 48(2): 169-175. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019.20180097.
- [53] 范利涛, 吴杰, 汤国建. GPS差分相对定位应用于航天器自主交会对接的研究[J]. 飞行器测控学报, 2008, 27(3): 78-81.
- FAN Litao, WU Jie, TANG Guojian. Researches on DGPS for spacecraft autonomous rendezvous and docking [J]. Journal of Spacecraft TT&C Technology, 2008, 27(3): 78-81.
- [54] LANE C, AXELRAD P. Analysis of relative navigation in high earth orbits[J]. The Journal of the Astronautical Sciences, 2007, 55(1): 23-52.
- [55] LANE C, AXELRAD P. Relative semimajor axis uncertainty in high earth orbits[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2007, 30(6): 1835-1839.
- [56] MOHIUDDIN S, PSIAKI M. Filtered dual-frequency carrier-phase differential GPS for relative navigation of high-altitude spacecraft [C] // Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. Keystone, CO: AIAA, 2006.
- [57] 郭树人, 蔡洪亮, 孟轶男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190091.
- GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190091.
- [58] MUSUMECI L, DOVIS F, SILVA J S, et al. Design of a high sensitivity GNSS receiver for lunar missions[J]. Advances in Space Research, 2016, 57(11): 2285-2313.
- [59] ASHMAN B W, PARKER J J, BAUER F H, et al. Exploring the limits of high altitude GPS for future lunar missions[C]//Proceedings of the 41st Annual AAS Guidance and Control Conference. Breckenridge, CO: AAS, 2018.
- [60] CAPUANO V, BOTTERON C, LECL? RE J, et al. Feasibility study of GNSS as navigation system to reach the Moon[J]. Acta Astronautica, 2015, 116: 186-201.
- [61] 张小红, 马福建. 低轨导航增强 GNSS 发展综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(9): 1073-1087. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019.20190176.
- ZHANG Xiaohong, MA Fujian. Review of the development of LEO navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(9): 1073-1087. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190176.
- [62] LI Wenwen, LI Min, ZHAO Qile, et al. Extraction of electron density profiles with geostationary satellite-based GPS side lobe occultation signals [J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 110.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-05-06

修回日期: 2020-06-27

第一作者简介: 王猛(1982—),男,博士生,研究员,研究方向为卫星导航技术。

First author: WANG Meng (1982—), male, PhD candidate, researcher, majors in satellite navigation technology.

E-mail: wangmeng104@163.com

引文格式:何秀凤,王杰,王笑蕾,等.利用多模多频 GNSS-IR 信号反演沿海台风风暴潮[J].测绘学报,2020,49(9):1168-1178. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200228.

HE Xiufeng, WANG Jie, Wang Xiaolei, et al. Retrieval of coastal typhoon storm surge using multi-GNSS-IR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1168-1178. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200228.

利用多模多频 GNSS-IR 信号反演沿海台风风暴潮

何秀凤,王 杰,王笑蕾,宋敏峰

河海大学地球科学与工程学院,江苏 南京 211100

Retrieval of coastal typhoon storm surge using multi-GNSS-IR

HE Xiufeng, WANG Jie, Wang Xiaolei, SONG Minfeng

School of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Abstract: Typhoon storm surges cause great losses to coastal cities every year. In recent years, a ground-based remote sensing technology using GNSS reflected signal has been proved to be able to monitor tidal level, called Global Navigation Satellite System Interferometric Reflectometry (GNSS-IR), which can supplement the data of tide gauge. However, storm surges have strong destructiveness and occur quickly, the time resolution of GPS cannot meet the requirement to monitor this marine disaster. In this paper, three coastal storm surge events were monitored using the multi-mode and multi-frequency GNSS data of HKQT site in Hong Kong, China and BHMA site in Bahamas Islands. Firstly, we analyzed the quality of multiple system data. Then, multi-mode and multi-frequency GNSS-IR was used for monitoring three storm surges caused by Hurricane “Dorian” in 2019, Typhoon “Mangkhut” in 2018 and Typhoon “Hato” in 2017. The sliding window least squares method was used to correct the results and compared with tide gauge observations. The experimental results showed that the accuracy of “Dorian” is better than 14 cm, and the accuracy of “Hato” and “Mangkhut” are both better than 9 cm. Compared with GPS, it could improve the time resolution of the results, which is helpful to record the whole process of tide rising, peak and falling in storm surge. And it can play an important role in the study of marine disasters.

Key words: GNSS-IR; storm surge; retrieval; multiple system; sea surface

Foundation support: National Natural Science Foundation of China(No. 41830110); National Key Research Development Program of China(No. 2018YFC1503603)

摘 要:台风风暴潮每年给沿海城市造成了极大的损失,近年来利用 GNSS 反射信号的地基遥感方法可以用于潮位监测,称为 GNSS-IR(global navigation satellite system-interferometric reflectometry),这方法可对风暴潮期间验潮站资料进行补充。由于风暴潮发生时间短且破坏性强,单系统 GPS 的时间分辨率难以满足海洋灾害的监测需求。本文基于中国香港 HKQT 站和巴哈马群岛 BHMA 站的多模多频 GNSS 卫星观测数据反演了 3 次沿海风暴潮事件,先对多模多频数据的质量进行分析,随后分别对 2019 年飓风“多里安”、2018 年台风“山竹”和 2017 年台风“天鸽”引起的 3 次风暴潮,利用基于滑动窗口的最小二乘法对多模多频 GNSS-IR 反演结果进行改正并与验潮站实测值对比分析。试验结果表明,利用多模多频 GNSS-IR 反演“多里安”风暴潮的精度优于 14 cm,反演“天鸽”和“山竹”风暴潮的精度优于 9 cm。相比 GPS 单系统,多模多频 GNSS-IR 能够提高监测的精度和时间分辨率,有效提取风暴潮中异常潮位的涨潮、峰值和落潮的全过程,对海洋灾害的研究监测发挥重要作用。

关键词:GNSS-IR; 风暴潮; 反演; 多模多频; 海平面

中图分类号:P228.4

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1168-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目(41830110);国家重点研究发展计划(2018YFC1503603)

风暴潮是指在热带气旋和温带气旋等大气扰动作用下,由推动水面的强风引起的海平面异常升高的现象。伴随着天文涨潮的风暴潮通常会引发极端的海面变化,进而给沿海地区带来洪涝灾害^[1]。全球平均每年形成的台风有 80—100 个,其中有 1/10 在中国东南沿海登陆。在我国台风风暴潮是破坏性最大的海洋灾害之一,每年造成巨大的生命财产损失^[2]。《2017 年广东省海洋灾害公报》中的统计数据 displays,2017 年广东省因各类海洋灾害造成的直接经济损失约 54.10 亿元,由风暴潮灾害造成的直接经济损失为 53.61 亿元,占全部直接经济损失的 99.09%,其中仅“天鸽”台风引起的风暴潮灾害造成的直接经济损失就达到了 51.54 亿元。因此,监测风暴潮灾害对降低沿海地区灾害风险具有重要意义。

风暴潮中警戒潮位值的选取需要以沿海验潮站的实测数据为依据,安装于海岸的验潮站,其测量结果易受潮位变化和地面沉降的影响^[3]。此外,台风期间风暴潮可能使验潮站无法正常工作,如飓风“卡特里娜”作用沿线的验潮站普遍失灵,只能采集高水位标志研究风暴潮^[4]。台风“天鸽”期间,澳门受水浸地区的两个潮位监测站因故障和断电未能测得风暴潮的最高水位值^[5];台风“山竹”期间位于深圳的验潮站因停电而中断运行,也未能记录潮位的异常增水情况^[6]。因此,在狂风和暴雨等极端天气中监测潮位时,对验潮站的抗风暴能力提出了更高的要求^[6]。

随着 GPS 技术的不断发展,文献[7]首次提出 GPS 反射信号可用于反演海潮变化的理论并得到研究证实^[8-9]。随后基于信噪比(SNR)的地基单天线 GPS-IR 测潮技术在国内外兴起^[10-11]。由于潮位具有时变特性,对反演结果的时间分辨率有较高要求,特别是在风暴潮期间对反演结果的采样率要求更高^[12]。单模 GPS-IR 的采样率受 GPS 卫星轨迹数量、SNR 数据质量以及场地几何形状的限制^[13],有时难以满足潮位监测要求,很多学者就有限数据研究提高时间分辨率的方法。文献[14]利用滑动窗口法增加反演值,但该方法会降低反演精度。文献[15]利用小波分析法提取 SNR 瞬时频率从而提高时间分辨率,但瞬时频率的提取对噪声过于敏感,会引入异常值和误差导致反演精度降低^[16]。文献[17]用天文潮预测法提高反演值精度和时间分辨率,但天文潮无法预测突变的潮位,不适用于风暴潮。多模多

频 GNSS 能够提供更多的卫星轨迹数量、质量更好的卫星信号和海面更大范围的信号感知区域从而提高反演值精度和时间分辨率^[13]。文献[10]分别利用 GPS 和 GLONASS 的 L1 和 L2 信号反演潮位,反演精度均为厘米级。文献[18]将 BDS 应用于海面高度反演,对 BDS 3 频 SNR 数据的反演能力进行了研究。文献[19]使用 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 联合反演潮位,验证了多模多频 GNSS-IR 能够提高反演值的时间分辨率和精度。基于前人的研究,本文通过分析多模多频 GNSS 的观测数据,利用多模多频 GNSS-IR 技术反演 3 次风暴潮并与验潮站实测值验证和分析,探索多模多频 GNSS-IR 监测风暴潮灾害的可行性。

1 GNSS-IR 潮位反演原理

1.1 GNSS-IR 经典海平面反演原理

GNSS-IR 反演潮位是将连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)安置于海边,接收机会接收到卫星直射信号与经过海面的反射信号相干的合成信号,这一现象可由卫星观测文件的 SNR 直接体现^[20]。反射信号与直射信号的路程差 D 可表示为^[21]

$$D = 2h \sin(e) \quad (1)$$

式中, e 是天线处的卫星高度角; h 是反射面到天线相位中心的垂直距离,文中统称为垂直反射距离。

由路程差 D 即可推算直射信号与反射信号的相位差 ϕ 为^[14]

$$\phi = \frac{2\pi D}{\lambda} = \frac{4\pi h \sin(e)}{\lambda} \quad (2)$$

式中, λ 是卫星信号波长。

根据式(2),于是有^[14]

$$2\pi f = \frac{d\phi}{d\sin(e)} = 4\pi \frac{h}{\lambda} \quad (3)$$

式中, f 是 SNR 中受多路径影响部分的信号频率。简化后便可得到垂直反射距离 h 与卫星信号波长 λ 的关系

$$h = \frac{\lambda f}{2} \quad (4)$$

对于 f 的提取,经典方法是用二阶多项式拟合 SNR 后去除趋势项,再对残差序列 δ_{SNR} 用 L-S 谱(lomb-scargle periodogram, LSP)分析方法求得^[10]。在 LSP 分析过程中,一般认为峰值噪声比(peak-to-noise ratios)大于 3 的反演值有

效^[19]。满足要求的信号频率 f 便可根据式(4)计算出反射面到天线相位中心的垂直距离 h , 从而进一步计算出潮位值。

GNSS 四系统各波段信号均可按照 GNSS-IR 经典海平面反演理论测量海面高度。

1.2 GNSS-IR 潮位监测误差改正

由于信噪比模型是在海面静态条件下提出的, 考虑实际中海面动态变化的特性, 文献[22]首次提出了海面动态高度误差。设静态情况下得到的垂直反射距离为 \bar{h} , 实际垂直反射距离为 h , 于是二者之间的关系可表示为^[22]

$$\bar{h} = \frac{\tan e}{e} \dot{h} + h \quad (5)$$

式中, e 和 \dot{h} 分别为卫星高度角和海面高度关于时间的变化率。

文献[6]利用潮汐调和分析法改正风暴潮期间海面的动态高度误差, 改正后整体精度仅提高了 3 cm。考虑因为风暴潮期间实际潮位变化与潮汐调和不完全一致, 在变化趋势相同部分, 改正方法能够提高反演精度, 而在变化趋势相反部分, 改正后反而会使精度降低。本文利用基于滑动窗口的最小二乘法改正此误差^[14], 设系统种类 $s \in \{G, R, E, C\}$, 窗口长度为 $T = 3$ h, 窗口滑动步长为 0.5 h, 第 i 个窗口的时间为 $t_i \in \left\{0, \frac{1}{2}h, 1h, \frac{3}{2}h, 2h, \dots\right\}$, 建立矩阵方程式

$$\bar{\mathbf{H}}_i = \mathbf{M}_i \dot{\mathbf{h}}_i + \mathbf{h}_i = \mathbf{A}_i \mathbf{X}_i \quad (6)$$

式中, $\bar{\mathbf{H}}_i = (\bar{h}_{i,s,j,l}(t_{i,s,j,l}))$; j 表示信号类型; l 表示窗口内反演值的序号, 其中 $|t_i - t_{i,s,j,l}| < T/2$;

$$\mathbf{M}_i = \left(\left[\frac{\tan(e_{i,s,j,l})}{e_{i,s,j,l}} + (t_{i,s,j,l} - t_i) \right] \right), \mathbf{A}_i = (\mathbf{M}_i \mathbf{1}),$$

$$\mathbf{X}_i = \begin{pmatrix} \dot{h}_i \\ h_i \end{pmatrix}.$$

根据最小二乘原理

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \bar{\mathbf{H}}) \quad (7)$$

由于不同信号具有不同的反演精度^[18,23], 因此对应的权重也不相同, 这里使用稳健回归分析法进行自动赋权^[19]。

GNSS 卫星信号传播至接收机过程中, 经过中性大气层时会产生时延和弯曲, 由此导致的接收机测距误差称为对流层延迟误差^[24]。卫星信号经过对流层区域时会发生信号折射效应, 文献[25]研究认为对流层延迟会使求得的垂直反射距

离产生高度误差, 并用 GPT2w (Global Temperature and Pressure) 模型进行误差改正。对流层延迟 τ_T 的计算如式(8)所示

$$\tau_T = 2\Delta\tau_h^e \times m_h(e) + 2\Delta\tau_w^e \times m_w(e) \quad (8)$$

式中, $\Delta\tau_h^e = \tau_h^e(-h) - \tau_h^e(0)$ 为天顶延迟; m_h 为干延迟映射函数; m_w 湿延迟映射函数; e 为卫星高度角。于是对流层延迟对 GNSS-IR 反演的高度误差 Δh_T 可表示为^[25]

$$\Delta h_T = \frac{1}{2} \frac{d\tau_T}{d\sin e} \quad (9)$$

结合式(5)和式(9), 静态情况下的垂直反射距离 \bar{h} 与实际情况下的垂直反射距离 h 之间的关系有

$$\bar{h} = \frac{\tan e}{e} \dot{h} + h + \Delta h_T \quad (10)$$

经过海面高度误差改正和对流层高度误差改正后即可得到实际的垂直反射距离 h , 再用接收机天线的大地高减去实际垂直反射距离便可得到潮位值。

2 风暴潮及站点分析

2.1 飓风“多里安”风暴潮

2019 年全球风王“多里安”于 9 月 1 日登陆巴哈马群岛, 9 月 2 日给大巴哈马岛带来了灾难性的风暴潮, 造成巴哈马至少 50 人死亡, 成千上万所房屋被毁, 经济损失超过 70 亿美元。

大巴哈马岛自由港(Freeport, Bahamas)岸边的 BHMA 站提供了卫星观测数据, BHMA 站点位于经度 -78.97° 、纬度 26.69° 。站点安装了 TRIMBLE NETR9 型接收机和 LEIAT504 接收机天线, 提供 GPS 和 GLONASS 双系统卫星观测数据, 卫星数据采样间隔为 1 s。对该站点有效高度角限制 $5^\circ \sim 15^\circ$, 对应海域方位角为 $-20^\circ \sim 80^\circ$, 距离站点 1781 m 处有一验潮站可提供实测潮位数据, 图 1(a)显示了站点周围环境。

2.2 台风“天鸽”与“山竹”风暴潮

台风“天鸽”在 2017 年 8 月 23 日为香港带来 10 级大风, 造成香港经济损失 10.2 亿美元、近百人受伤。台风“山竹”在 2018 年 9 月 16 日凌晨登陆香港, 超过 200 人受伤, 给香港造成巨大的经济损失。

文献[6]利用 GPS 单系统反演了“天鸽”和“山竹”两次台风风暴潮, 直接以 L1、L2 和 L5 三频反演的平均值作为最终结果, 未充分考虑三者不同精度对融合结果的影响, 采样率的提高也有

限。同时文中采用潮汐调和分析法改正海面高度误差,然而这种方法更适合正常气象情况下的潮位改正,不适用于风暴潮,而本文基于多模多频滑动窗口的最小二乘改正法则能够解决上述不足。香港北边海岸的 HKQT 站提供了卫星观测数据, HKQT 站位于东经 114.21°、北纬 22.29°,属于香港卫星定位参考站网(Satellite Positioning Reference Station Network, SatRef), 安装了 TRIMBLE NETR5 型接收机。HKQT 站点提供

GPS、GLONASS、Galileo、BDS、QZSS 和星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)的卫星观测数据,卫星数据采样间隔为 1 s、5 s 和 30 s。对该站点来说有效海域方位角为 $-60^{\circ} \sim 105^{\circ}$,有效高度角为 $4^{\circ} \sim 9^{\circ}$ [6]。距离 HKQT 站点 2 m 处有一验潮站 Quarry Bay 可提供实测的潮位数据,图 1(b)显示了站点周围环境。



(a) 巴哈马BHMA测站

(b) 香港HKQT测站

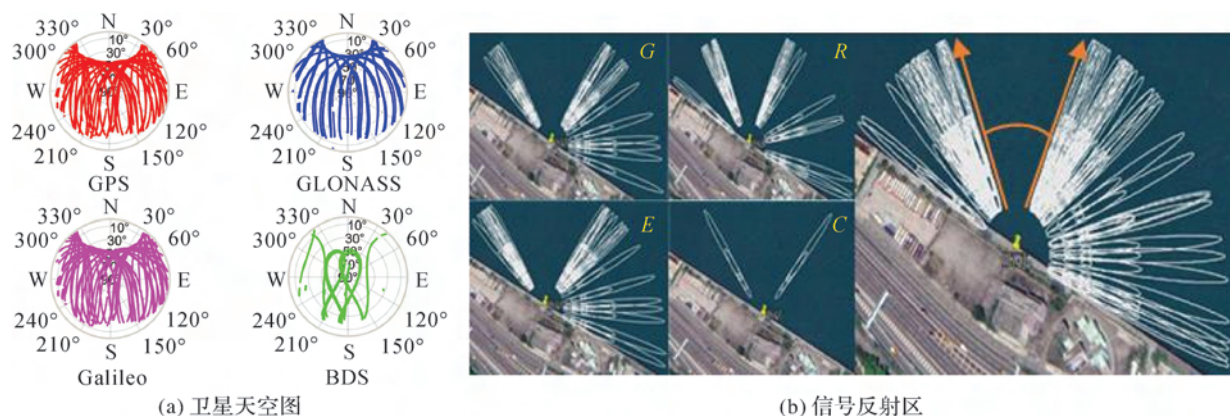
图 1 站点周围环境

Fig.1 the sites surroundings

2.3 站点卫星分布与信号反射区域

以 HKQT 站点为例,天空布满 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 星座,为 GNSS-IR 监测潮位提供大量的可用卫星弧段数据。图 2(a)为 2017 年年积日 232 天四系统的卫星轨迹分布图,可以看出 HKQT 站点上空的 GPS、

GLONASS 和 Galileo 卫星弧段分布较多, BDS 相对较少,不同卫星弧段数影响着反演值的时间分辨率。为了避免接收来自陆地的反射信号,对卫星高度角和方位角限制后,各卫星系统的海面信号反射区域如图 2(b)所示。



(a) 卫星天空图

(b) 信号反射区

图 2 卫星轨迹与信号反射区分布图

Fig.2 the satellite tracks and sensing zone

卫星信号的反射区域大小受卫星高度角、方位角和天线至海面的垂直反射距离决定,以高度角 $4^{\circ} \sim 9^{\circ}$ 、方位角 $-60^{\circ} \sim 105^{\circ}$ 、垂直反射距离 6 m 分别绘制了 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 信

号的第一菲涅尔反射区情况[6][26]如图 2(b)所示,距离站点由远及近的反射区分别对应高度角 4° 、 6° 和 9° 。受卫星弧段影响 GPS、GLONASS 和 Galileo 的信号反射区域大而密集, BDS 小而稀

疏,同时由图 2(a)可知四系统星座在方位角 $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 之间无卫星轨迹,这也导致了图 2(b)中黄色箭头区域内缺少信号反射点。四系统合并后的信号感知范围明显优于单系统,因此多模 GNSS 能够提供更多的数据源和更广阔的海面感知区域,有利于提高潮位监测的时间分辨率。

3 多模多频 GNSS-IR 数据分析

根据飓风“多里安”风暴潮、台风“天鸽”风暴潮和台风“山竹”风暴潮发生的时间与位置,这里分别选取 BHMA 站 2019 年年积日为 241~246、HKQT 站 2017 年年积日为 232~237 和 2018 年年积日为 257~261 的卫星观测数据进行分析。站 BHMA 的卫星观测文件记录有 GPS 和 GLONASS 的 S1、S2 信噪比数据,而站 HKQT 的卫星观测文件中的信噪比类型较多, GPS 有 S1C、S2W、S2X 和 S5X 四种, GLONASS 有 S1C、S1P、S2C 和 S2P 四种, Galileo 有 S1X、S5X、S7X、S8X 四种, BDS 有 S1I 和 S7I 两种, QZSS 有 S1C、S1Z、S2X、S5X 和 S6X 五种, SBAS 有 S1C 和 S5I 两种,因此需对 HKQT 站点数据作进一步分析,选择观测数据采样间隔为 5 s。由于两次台风期间卫星精密星历中未记录 SBAS 的卫星位置信息,并且 QZSS 没有可用弧段,因而这里以 GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 四个系统的观测数据进行试验研究。

为了分析各系统不同波段的反演能力,以 2017 年年积日为 232 和 233 的数据进行分析,期间天气正常。图 3 为各系统不同波段在平均方位角 $-60^{\circ}\sim 105^{\circ}$ 内的 SNR 序列,图 4 为根据有效高度角 $4^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 和平均方位角 $-60^{\circ}\sim 105^{\circ}$,对各系统符合条件的 SNR 序列 LSP 分析结果。

由图 3 可知,对比四个系统各信号的 SNR,在 $3^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 高度角情况下, GPS 不同载波信号的 SNR 差值最大,约 25 dB; Galileo 不同载波信号的最大 SNR 差值同样在 25 dB 左右,而 GLONASS 和 BDS 的不同载波信号 SNR 差值较小,表现出整体的一致性。图 4 为四个系统在低高度角情况下 SNR 序列的 LSP 结果,可以看出 GPS 的 S5X、Galileo 的 S8X、BDS 的 S7I 振幅峰值明显最高, GLONASS 的 S1C、S1P、S2C、S2P 的振幅峰值较稳定。比较图 3 与图 4, GPS 中 S1C、S2X、S5X 能量差值小,三者 LSP 的最大波

峰对应的垂直反射距离在 6.6 m 左右; GPS 中的 S2W 信号质量最低, LSP 出现了 3 个较大的波峰且最大波峰对应的垂直反射距离超过了 9 m, 结果为粗差。这是因为对于正常气象的海面, LSP 分析中的峰值噪声比大于 3, 振幅值大于 5 的反演结果认为有效^[22], 而 S2W 的 LSP 中峰值噪声比仅为 1.56 并且振幅小于 1, 结果不可靠。Galileo 的 S5X 尽管 LSP 的振幅值很小, 但其峰值噪声比大于 3 并且反演结果是有效的。因此, 为提高 GNSS-IR 反演精度及可靠性, GPS 的 S2W 将不用于后续试验, 而 Galileo 的 S5X 仍可使用, 其有效振幅阈值的设置需进一步分析。

4 多模多频 GNSS-IR 监测沿海台风风暴潮

4.1 GNSS-IR 监测飓风“多里安”风暴潮

选取 BHMA 测站年积日为 241—246 的观测数据, 以 GPS 和 GLONASS 双系统的 L1 和 L2 波段进行潮位反演, 并将反演结果与美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 提供的风速资料结合分析。文献[10]认为当风速小于 17.5 m/s 时, 风速对基于 SNR 的潮位反演没有明显影响, 当风速超过 18 m/s 后海面粗糙度会影响反射信号的功率。在风暴潮期间经过海面的反射信号的振幅值减小, 同时波形也会变得更扁平^[20], 因而这里将峰值噪声比由 3 降低为 2, 有效振幅值由 5 降低为 4^[6]。

图 5 为 BHMA 站的 GNSS-IR 反演结果, 黑色曲线表示验潮站实测值, 灰色曲线表示天文潮潮位值, 蓝色曲线表示站点区域的风速变化情况, 蓝色圆点为 GPS 和 GLONASS 未作误差改正的反演结果, 红色圆点为利用潮汐调和分析法改正后的反演结果。可知随着“多里安”的逼近当地风力在不断加强, 风暴潮也随之而来, GPS 与 GLONASS 的反演结果与验潮站数据较为一致, 在风暴潮期间也能够反映潮位的突变情况。然而从监测效果来看, 冗余反演值堆积, 部分时间无反演结果, 风暴潮中潮位突变部分与天文潮差异较大, 经过潮汐调和分析法改正后的精度也仅从 20.28 cm 提高为 19.07 cm, 精度提高了 5.97%。此时利用基于滑动窗口的最小二乘法对反演值进行改正后, 结果见图 6。

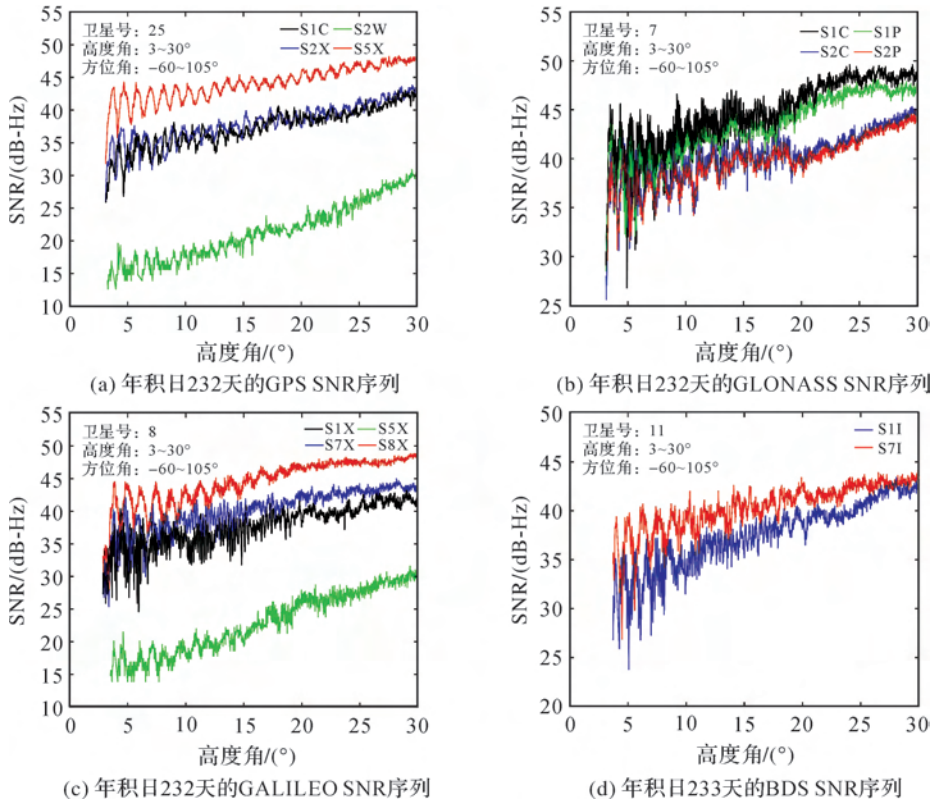


图 3 GNSS SNR 序列

Fig.3 GNSS SNR sequence

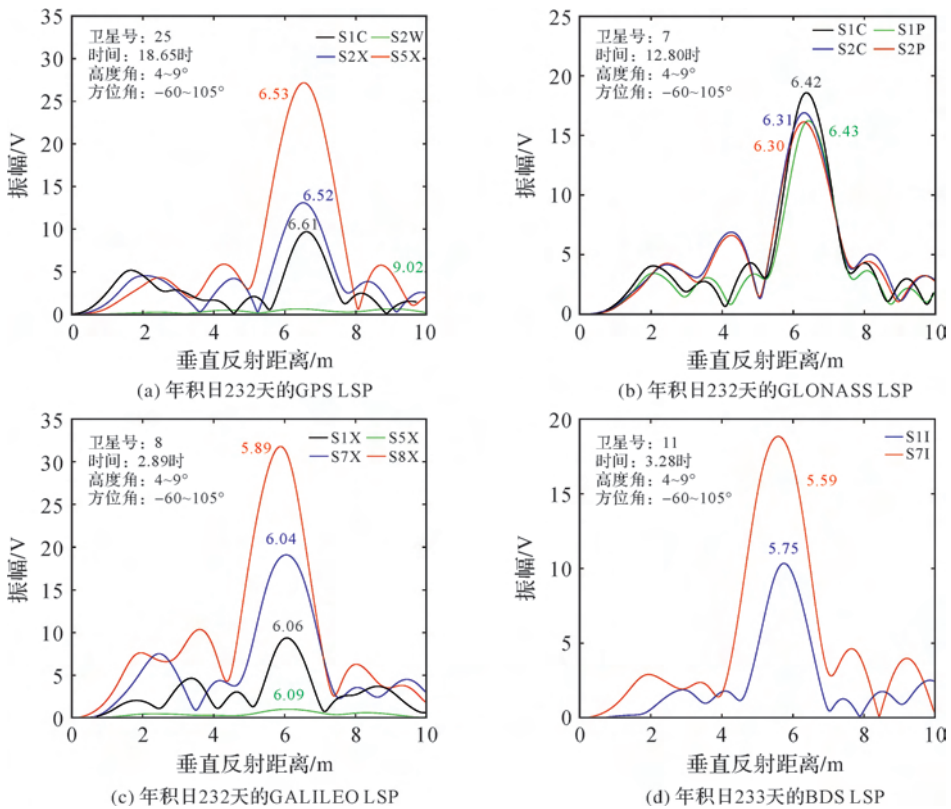


图 4 GNSS LSP 分析

Fig.4 GNSS LSP analysis

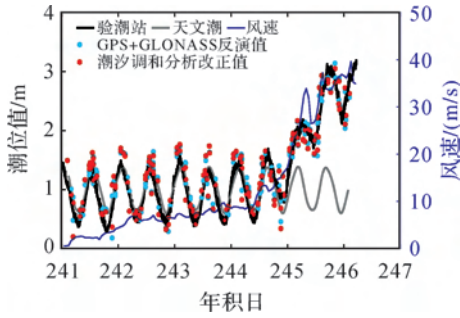


图5 多模多频 GNSS-IR 反演飓风“多里安”风暴潮
Fig.5 Multi-system multi-frequency retrievals of hurricane Dorian storm surge

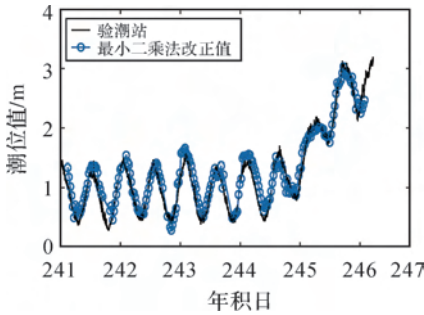


图6 最小二乘法改正结果

Fig.6 the result of least squares correction

由图6可见,基于滑动窗口的最小二乘法改正效果良好,改正后精度提高至13.98 cm,精度提高了31.06%。对流层延迟引起的高度误差改正后仅使反演精度提高不足0.5 cm,对反演结果影响可忽略。多模多频GNSS-IR除了提高反演值时间分辨率,滑动窗口滤波能有效剔除窗口中的异常结果,更多的冗余值更有利于滑动窗口的解算,同时将原来堆积的结果均匀采样,更有利于潮位监测。

4.2 GNSS-IR 监测台风“天鸽”风暴潮

考虑风速与海面粗糙度对反射信号功率的影响二者非线性关系^[10]和峰值噪声比为3适用于正常情况下四个系统的质量控制^[19],通过试验分析后认为峰值噪声比为2同样适用于四系统在风暴潮期间的质量控制,但有效振幅值为4不适用于Galileo,分析如图7所示。

图7为Galileo SNR数据LSP分析的峰值噪声比与有效振幅序列,为了更加直观,对纵坐标数值取以2为底的对数,红色圆圈表示4个波段的峰值噪声比,蓝色圆圈表示S1X、S7X与S8X的有效振幅值,绿色圆圈表示S5X的有效振幅值。由图可认为峰值噪声比设置为2可对Galileo

4个波段反演结果作质量控制,有效振幅值设置为4也可对S1X、S7X与S8X3个波段反演结果作质量控制,但不适合于信号功率较低的S5X,其振幅值基本分布在0.5以上。为得到有效反演结果,这里对S5X的有效振幅值设置为0.5。

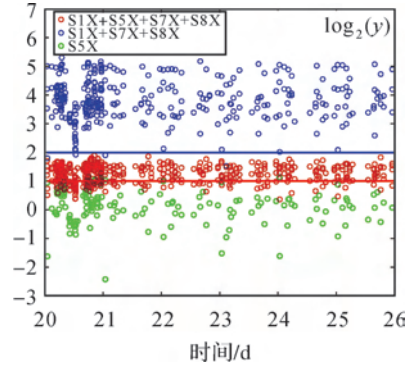


图7 Galileo LSP的峰值噪声比与有效振幅值
Fig.7 PNR and amplitude of Galileo LSPs

图8为四个系统反演潮位变化的结果,黑色曲线表示验潮站实测潮位值,灰色曲线表示天文潮位的预测值,灰白色曲线为风暴潮引起的增水值,绿色曲线为区域风速变化情况。风速一度超过28 m/s,潮位增水最大超过1 m,整个过程持续约7 h, GPS和Galileo均完整监测了风暴潮的涨落过程, GLONASS卫星信号受噪声影响更大,反演结果的粗差较多,只监测到了异常潮位的峰值, BDS在此期间天空无可用卫星弧段,无法监测这段时间潮位突变情况。

文献[6]认为GPS单系统的L1、L2和L5三频段的反演精度不同,但在研究风暴潮时,对同一时刻L1、L2和L5的反演结果取平均值作为该时刻的反演值,未考虑各自的权重。同时采用潮汐调和分析法进行海面误差改正,改正后精度仅提高了3 cm。图9(a)为基于滑动窗口的最小二乘法改正后的结果图,改正后的精度为7.89 cm,提高了47.78%,同时滑动窗口实现了均匀采样,能够观测完整的风暴潮涨落情况。图9(b)为反演潮位与实测潮位的较差序列,误差改正前的灰色曲线在0处上下波动,差值在-0.3~0.5 m之间,而最小二乘误差改正后的黑色曲线以0为中心在-0.2~0.2范围波动,整体表现更稳定。图9(c)描述了各结果的可信赖程度,不确定度值的整体变化趋势与潮位涨落近似,大多分布在0~0.6 m区间,而随着风力增强、海面粗糙度增大以及风暴潮增水的影响,不确定度值也随之增大。对流层

误差改正后精度仅提高不足 1 cm,这对潮位监测

来说影响可忽略,后续不再分析。

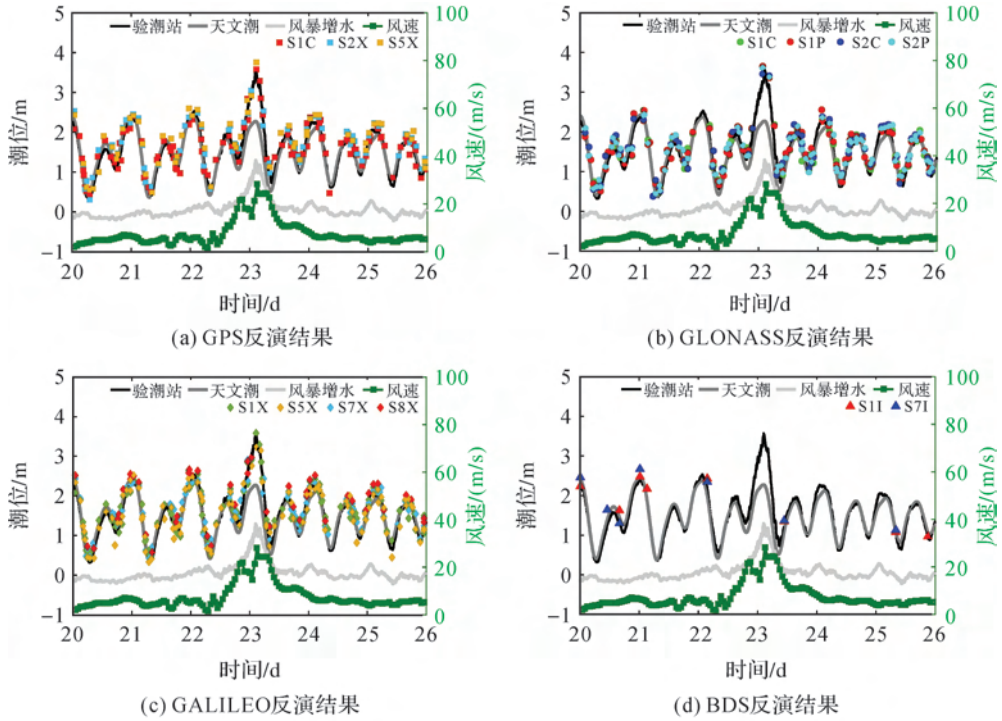


图 8 多模多频 GNSS-IR 反演台风“天鸽”风暴潮

Fig.8 Multi-system multi-frequency retrievals of typhoon Hato storm surge

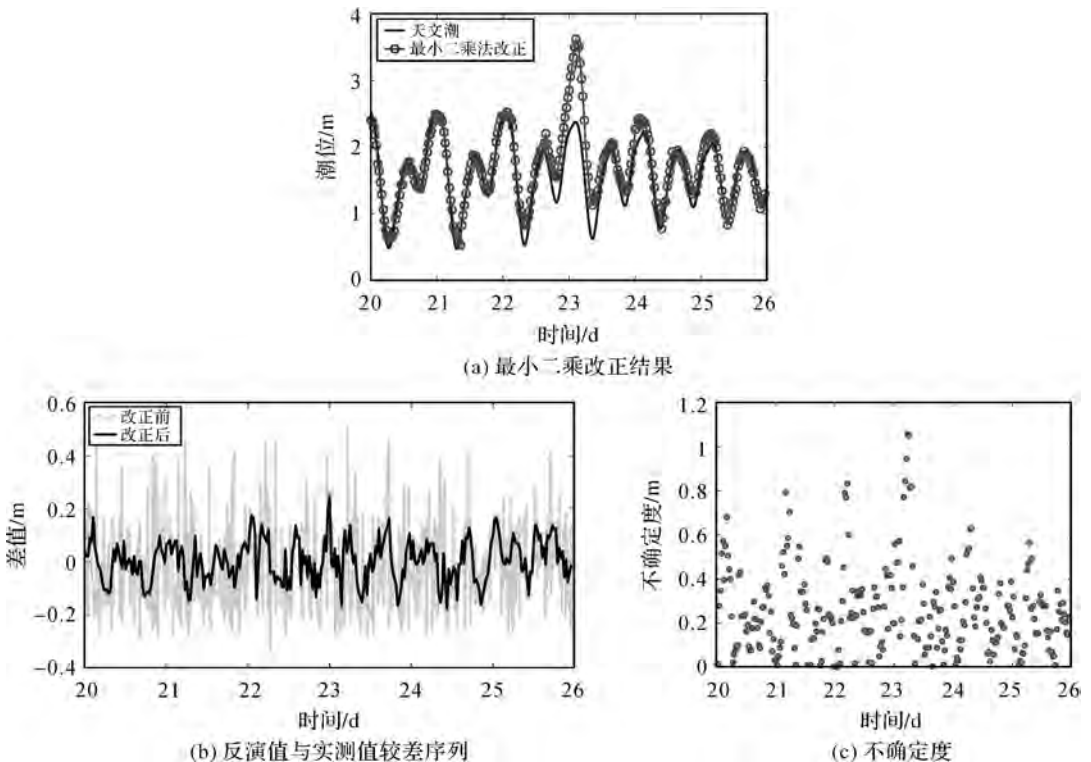


图 9 最小二乘改正与误差分析

Fig.9 least squares correction and analysis

表 1 对比了各系统反演结果,可知 GPS 中 S1C 反演精度最差, S5X 反演精度最好; GLONASS 中 S2C 与 S2P 反演精度要优于 S1C 与 S1P; Galileo S8X 反演精度最好, S5X 和 S7X 精度次之, S1X 精度最差; BDS 的 S7I 反演精度要优于 S1I。四卫星系统整体反演精度为 15.11 cm, 与实测潮位的相关系数优于 0.9, 分析可知对于同一个卫星系统, 随着信号的波长增长, 反演精度也随之提高, 如 GPS L5 的 S5X、GLONASS G2 的 S2P、Galileo E5 的 S8X 和 BDS B2 的 S7I, 同时四系统反演结果在整体上也表现为精度与信号波长呈正相关趋势, 这种现象可能与天线增益、随机表面粗糙度有关^[27]。四系统联合反演的精度明显优于其他卫星波段, 与验潮站的相关系数为 0.98, 得益于稳健回归分析的应用考虑了窗口内不同系统和频段反演精度的权重, 而多模多频为时间窗口提供了更多的冗余值, 有利于提高最小二乘解算的精度。

表 1 GNSS-IR 4 系统反演结果对比

Tab.1 Comparison of GNSS-IR four system results

载波类型	相关系数	标准差/cm
GPS L1C	0.93	17.26
GPS L2X	0.93	14.76
GPS L5X	0.98	12.36
GLONASS L1C	0.98	16.17
GLONASS L1P	0.99	14.31
GLONASS L2C	0.99	13.83
GLONASS L2P	0.99	12.54
Galileo L1X	0.93	16.76
Galileo L5X	0.99	14.46
Galileo L7X	0.92	15.61
Galileo L8X	0.96	10.59
BDS L1I	0.97	15.05
BDS L7I	0.94	12.98
四系统联合	0.98	7.89

4.3 GNSS-IR 监测台风“山竹”风暴潮

台风“山竹”期间 SNR 频谱分析的峰值噪声比和有效振幅值的设置与“天鸽”相同, 其中对 Galileo S5X 的有效振幅值设为 0.5。图 10 为多模多频 GNSS-IR 反演台风“山竹”风暴潮结果, 黑色曲线为验潮站实测值, 灰色曲线为天文潮位值, 灰白色曲线为台风期间的风暴增水情况。图 10(a) 中红色方点表示 GPS 的反演结果, 蓝色圆点表示 GLONASS 的反演结果, 黄色方点表示 Galileo 的反演结果, 绿色三角点表示 BDS 的反演结果, 图 10(b) 中蓝色圆点表示经过最小二乘法改正后的结果。风暴潮期间风速最高超过 38 m/s, 增水高度和持续时间几乎为“天鸽”的 2 倍。最小二乘法改正前, GPS、GLONASS、Galileo 和 BDS 的反演结果与验潮站较为一致, 反演精度为 16.46 cm, 相关系数 0.93。尽管相较于单模提高了时间分辨率, 但反演值表现为局部堆积, 反而不利于某时刻潮位情况的判断, 同时在风暴潮下降的过程反演值稀疏, 不利于落潮情况的记录。最小二乘法改正后的精度为 8.97 cm, 较改正前提高了 45.51%, 与验潮站相关系数为 0.96, 较单模除了提高时间分辨率, 反演精度也得到大幅提高, 等时间间隔的采样更能满足日常潮位监测和风暴潮灾害监测的要求。因此多模多频 GNSS-IR 能够提供更多的卫星弧段数和质量更好的信号类型, 基于滑动窗口的最小二乘算法在提高反演精度的同时, 有利于观测异常潮位的涨潮、峰值和落潮这一完整过程, 提高风暴潮过程监测的完善性。

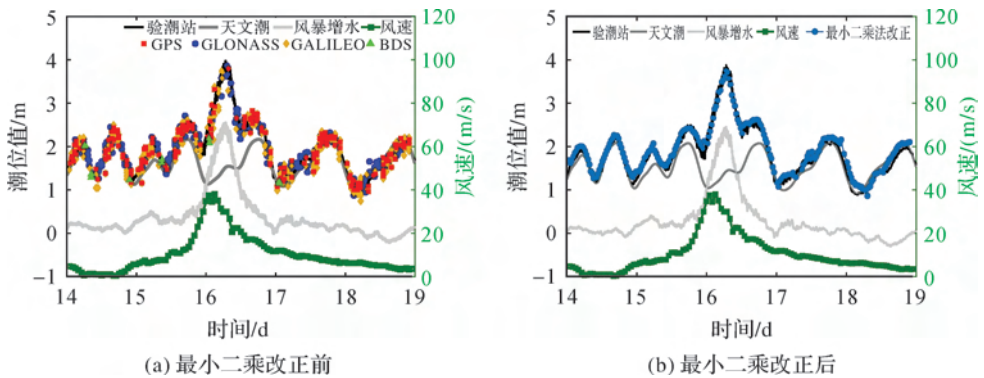


图 10 多模多频 GNSS-IR 反演“山竹”风暴潮

Fig.10 Multi-system multi-frequency retrievals of typhoon Mangkhut storm surge

5 结 论

海洋灾害会对沿海城市造成大量的经济损失,影响着人类的社会生活,而风暴潮作为海洋灾害之首,对其监测就显得尤为重要。基于卫星导航系统提供信号的长期性和连续运行参考站接收信号的稳定性特点,利用 GNSS-IR 技术反演潮位成为可能,然而其反演结果的时间分辨率受天空卫星弧段数量以及测站的几何位置等影响,此时多模多频的应用能够对此进行补充。本文首先分析了多模多频的质量控制参数,认为 Galileo 的 S5X 类型信号的功率较低,其有效振幅阈值的设置与其他信号不同。然后利用多模多频 GNSS-IR 技术反演了“多里安”、“天鸽”和“山竹”3 次台风风暴潮事件,结果认为基于滑动窗口的最小二乘法比经典的潮汐调和改正法更适合风暴潮的潮位高度误差改正,改正后反演结果与验潮站实测值相比,“多里安”风暴潮的监测精度优于 14 cm,“天鸽”和“山竹”风暴潮的监测精度优于 9 cm。精度提高的同时能够解决多模多频反演点的堆积问题,使结果采样等间隔,更符合潮位监测的要求。并且相比单模的 GPS-IR,多模多频 GNSS-IR 提高了海面监测的精度、连续性和时间分辨率,在风暴潮期间能够观测更多异常潮位的变化情况。随着全球导航系统的发展,将会提供更多类型的信号和更完善的星座结构,多模多频 GNSS-IR 将在海洋灾害的监测方面发挥更重要的作用。

参考文献:

- [1] FANG Jiayi, LIU Wei, YANG Saini, et al. Spatial-temporal changes of coastal and marine disasters risks and impacts in Mainland China[J]. *Ocean & Coastal Management*, 2017, 139: 125-140. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2017.02.003.
- [2] SHI Xianwu, HAN Ziqiang, FANG Jiayi, et al. Assessment and zonation of storm surge hazards in the coastal areas of China[J]. *Natural Hazards*, 2020, 100: 39-48. DOI: 10.1007/s11069-019-03793-z.
- [3] LÖFGREN J S, HAAS R, SCHERNECK H G. Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world[J]. *Journal of Geodynamics*, 2014, 80: 66-80. DOI: 10.1016/j.jog.2014.02.012.
- [4] FRITZ H M, BLOUNT C, SOKOLOSKI R, et al. Hurricane Katrina storm surge reconnaissance [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2008, 134(5): 644-656. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:5(644).
- [5] LI Linlin, YANG Jie, LIN Chuanyao, et al. Field survey of Typhoon Hato (2017) and a comparison with storm surge modeling in Macau[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2018, 18(12): 3167-3178. DOI: 10.5194/nhess-18-3167-2018.
- [6] PENG Dongju, HILL E M, LI Linlin, et al. Application of GNSS interferometric reflectometry for detecting storm surges[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 47. DOI: 10.1007/s10291-019-0838-y.
- [7] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS) application to ocean altimetry[J]. *ESA Journal*, 1993, 17(4): 331-355.
- [8] ANDERSON K D. Determination of water level and tides using interferometric observations of GPS signals[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2000, 17(8): 1118-1127. DOI: 10.1175/1520-0426(2000)017<1118:DOWLAT>2.0.CO;2.
- [9] MARTIN-NEIRA M, CAPARRINI M, FONT-ROSSEL-LO J, et al. The PARIS concept: an experimental demonstration of sea surface altimetry using GPS reflected signals[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001, 39(1): 142-150. DOI: 10.1109/36.898676.
- [10] LÖFGREN J S, HAAS R. Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations[J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1): 50. DOI: 10.1186/1687-6180-2014-50.
- [11] LARSON K M, RAY R D, NIEVINSKI F G, et al. The accidental tide gauge: a GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(5): 1200-1204. DOI: 10.1109/LGRS.2012.2236075.
- [12] 蒋兴伟, 林明森, 张有广. 中国海洋卫星及应用进展[J]. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1185-1198. DOI: 10.11834/jrs.20166153.
- [13] JIANG Xingwei, LIN Mingsen, ZHANG Youguang. Progress and prospect of Chinese ocean satellites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1185-1198. DOI: 10.11834/jrs.20166153.
- [14] LARSON K M, RAY R D, WILLIAMS S D P. A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(2): 292-307. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0101.1.
- [15] ROUSSEL N, RAMILLIEN G, FRAPPART F, et al. Sea level monitoring and sea state estimate using a single geodetic receiver[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 261-277. DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.011.
- [16] WANG Xiaolei, ZHANG Qin, ZHANG Shuangcheng. Sea

- level estimation from SNR data of geodetic receivers using wavelet analysis[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1): 6. DOI: 10.1007/s10291-018-0798-7.
- [16] WANG Xiaolei, HE Xiufeng, ZHANG Qin. Coherent superposition of multi-GNSS wavelet analysis periodogram for sea-level retrieval in GNSS multipath reflectometry[J]. *Advances in Space Research*, 2020, 65(7): 1781-1788. DOI: 10.1016/j.asr.2019.12.023.
- [17] SONG Minfeng, HE Xiufeng, WANG Xiaolei, et al. Study on the quality control for periodogram in the determination of water level using the GNSS-IR technique[J]. *Sensors*, 2019, 19(20): 4524. DOI: 10.3390/s19204524.
- [18] JIN Shuanggen, QIAN Xiaodong, WU X. Sea level change from BeiDou Navigation Satellite System-Reflectometry (BDS-R): first results and evaluation [J]. *Global and Planetary Change*, 2017, 149: 20-25. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.12.010.
- [19] WANG Xiaolei, HE Xiufeng, ZHANG Qin. Evaluation and combination of quad-constellation multi-GNSS multipath reflectometry applied to sea level retrieval[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2019, 231: 111229. DOI: 10.1016/j.rse.2019.111229.
- [20] 金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. *测绘学报*, 2017, 46(10): 1389-1398. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017.20170282.
- Jin Shuanggen, ZHANG Qinyun, QIAN Xiaodong. New progress and application prospects of global navigation satellite system reflectometry (GNSS+R)[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(10): 1389-1398. DOI: 10.11947/j.AGCS.2017.20170282.
- [21] BILICH A, LARSON K M. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR)[J]. *Radio Science*, 2007, 42(6): RS6003. DOI: 10.1029/2007rs003652.
- [22] LARSON K M, LÖFGREN J S, HAAS R, et al. Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver[J]. *Advances in Space Research*, 2013, 51(8): 1301-1310. DOI: 10.1016/j.asr.2012.04.017.
- [23] TABIBI S, GEREMIA-NIEVINSKI F, VAN DAM T. Statistical comparison and combination of GPS, GLO-NASS, and Multi-GNSS multipath reflectometry applied to snow depth retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3773-3785. DOI: 10.1109/TGRS.2017.2679899.
- [24] 姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层延迟改正模型[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(5): 1492-1501. DOI: 10.6038/cjg20150503.
- YAO Yibin, ZHANG Bao, YAN Feng, et al. Two new sophisticated models for tropospheric delay corrections[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(5): 1492-1501. DOI: 10.6038/cjg20150503.
- [25] WILLIAMS S D P, NIEVINSKI F G. Tropospheric delays in ground-based GNSS multipath reflectometry-Experimental evidence from coastal sites[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(3): 2310-2327. DOI: 10.1002/2016JB013612.
- [26] ROESLER C, LARSON K M. Software tools for GNSS interferometric reflectometry (GNSS-IR)[J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 80. DOI: 10.1007/s10291-018-0744-8.
- [27] NIEVINSKI F G, LARSON K M. Forward modeling of GPS multipath for near-surface reflectometry and positioning applications[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(2): 309-322. DOI: 10.1007/s10291-013-0331-y.

(责任编辑:张燕燕)

收稿日期: 2020-06-08

修回日期: 2020-08-14

第一作者简介: 何秀凤(1962—),女,教授,研究方向为卫星导航定位,海洋监测,卫星遥感技术。

First author: HE Xiufeng (1962—), female, professor, majors in satellite navigation and positioning, ocean monitoring and remote sensing technology.

E-mail: xfhe@hhu.edu.cn

通信作者: 王杰

Corresponding author: WANG Jie

E-mail:

引文格式:边少锋,周威,刘立龙,等.小波变换与滑动窗口相结合的 GNSS-IR 雪深估测模型[J].测绘学报,2020,49(9):1179-1188. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200268.
BIAN Shaofeng, ZHOU Wei, LIU Lilong, et al. GNSS-IR model of snow depth estimation combining wavelet transform with sliding window[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1179-1188 DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200268.

小波变换与滑动窗口相结合的 GNSS-IR 雪深估测模型

边少锋¹, 周威¹, 刘立龙^{2,3}, 李厚朴¹, 刘备¹

1. 海军工程大学导航工程系, 湖北 武汉 430079; 2. 桂林理工大学测绘地理信息学院, 广西 桂林 541004; 3. 广西空间信息与测绘重点实验室, 广西 桂林 541004

GNSS-IR model of snow depth estimation combining wavelet transform with sliding window

BIAN Shaofeng¹, ZHOU Wei¹, LIU Lilong^{2,3}, LI Houpu¹, LIU Bei¹

1. Department of Navigation Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430079, China; 2. College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 3. Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics, Guilin 541004, China

Abstract: Currently, GNSS interferometric reflectometry technology has become a high-precision method for monitoring land surface snow depth. Aiming at the problems of signal separation and random estimation biases, we developed a GNSS-IR refined model with multi-satellite fusion for snow depth estimation combining wavelet transform with sliding window. The common polynomial method was replaced by discrete wavelet transform to obtain the high-quality SNR sequences of the reflected signals which can calculate the reflected height of GPS antenna. Then, these reflected heights from SNR observations of multi-satellite were effectively selected and averaged using the sliding window under a constrained threshold. The refined model was established using GNSS observations for snow season from 2016 to 2017, and then the snow depth datasets of both PBO H₂O and SNOTEL were regarded as reference to verify the performance of the refined model. The results show that there is a high agreement between snow depths derived from the refined model and in situ measurements, and the RMSE is 10 cm. Compared with the results of a single satellite, the accuracy and the stability of the refined model with multi-satellite fusion are obviously better. In terms of RMSE, the accuracy of the refined model has been improved by 50% when compared with PBO H₂O dataset. In addition, taking into consideration that land surface roughness is an error factor, a relative RMSE value of snow depth estimations corrected by a new datum of the reflection height is approximately 4 cm, and the correlation coefficient between snow depth estimations and in situ measurements reaches 0.98.

Key words: global navigation satellite system interferometric reflectometry; wavelet transform; sliding window; snow depth estimation; land surface roughness

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (Nos. 41631072; 41971416); The Independent Project of Naval University of Engineering (No. 2019055); The Open Fund of Guangxi Key Laboratory of Spatial Information and Geomatics (No. 19-050-11-02); The Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars of Hubei Province of China (No. 2019CFA086); The Guangxi Natural Science Foundation of China (No. 2018GXNSFAA294045)

摘要: GNSS 干涉反射技术(GNSS interferometric reflectometry)是一种新型的地表雪深监测方式。针对当前信号分离不佳和随机估测偏差的问题,提出联合小波变换和滑动窗口构建一种多卫星融合的 GNSS-IR 雪深估测精化模型。该模型采用离散小波变换代替常用的多项式方法,获取高质量的信噪比

序列。通过利用阈值约束下的滑动窗口筛选多卫星有效反射高度,并进行等权平均。以 PBO H₂O 和 SNOTEL 的雪深数据为参考值,利用 2016—2017 年雪季的 GNSS 观测数据建立模型并验证精度。结果表明:1 GNSS-IR 精化模型估测结果与实测数据在整体趋势上保持高一致性;2 与单颗卫星结果相比,多卫星融合估测结果在精度和稳定性方面明显改善,其均方根误差(RMSE)为 10 cm,相较于 PBO H₂O 减少了近 50%。此外,考虑到地表粗糙度作为一种误差影响因素,采用新的反射高度基准修正的雪深估测相对 RMSE 误差约 4 cm,同时估测值与实际值的相关系数达到 0.98。

关键词:全球卫星导航系统干涉反射技术;小波变换;滑动窗口;雪深估测;地表粗糙度

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1179-10

基金项目:国家自然科学基金(41631072; 41971416); 海军工程大学自主立项项目(2019055); 广西空间信息与测绘重点实验室开放基金(19-050-11-02); 湖北省杰出青年科学基金(2019CFA086); 广西自然科学基金(2018GXNSFAA294045)

高精度的雪深资料不仅是水文、气候和环境研究中评估模型的关键参数,也是区域内地表辐射和能量平衡、融雪径流预报、水资源管理等方面的重要指标^[1]。常用的雪深数据集大多依赖于气象站的观测资料,其在时空分辨率方面具有较大的局限性;多光谱传感器难以有效反演积雪垂直空间变化信息,并受云雨天气影响^[2]。因此,微波遥感技术融合了上述两种测量方式的优势,更符合实际的应用需求。

对于全球导航卫星系统(GNSS)而言,除了提供位置服务^[3-4]之外,GNSS-R(GNSS reflectometry)或 GNSS-IR(GNSS interferometric reflectometry)技术在环境监测方面的扩展应用^[5-7]有效弥补了气象站的缺陷,具有全天时、全天候、成本低、高分辨率等优点。文献[8]在 1993 年首次提出 GPS 反射测量海平面高度的可能,由此开启了 GNSS 观测值监测环境参数的热潮^[9-11]。其中,GNSS-R 技术需研制特殊的 GNSS 硬件接收设备,GNSS-IR 技术可直接使用大地测量型 GNSS 接收机,有助于未来大规模推广应用。依托于 IGS(International GNSS Service)和 PBO(Plate Boundary Observatory)提供的丰富 GNSS 观测数据,国内外学者基于 GNSS-IR 理论开展了一系列的探索性研究^[12-13]。文献[14]开发了地表特性的微波遥感理论,并验证其作为一种遥感手段探测地表环境参数的有效性。文献[15]采用一种廉价的导航模块输出 GPS 观测数据,通过分析卫星信号在草地与沥青表层的电导率和相对介电常数,结果表明地表镜面反射作用对 GPS 卫星 L 波段信号产生影响。文献[16—17]明确提出了 GPS 卫星信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)观测值与多路径环境参数之间的映射,利用连续小波变换方法分离出

GPS 接收机接收的信号分量,初步证实了分离后反射信号的幅度和频率与多路径环境之间存在密切联系,并进一步建立了 SNR 观测值中非平稳振荡信号的频率和幅度与测站附近地表环境特性的数学关系。在此基础上,文献[18]构建了一种适用于普通接收机的 GPS-IR 土壤湿度探测模型,并获得了较好的反演结果。与此同时,文献[19]利用构建的 GPS-IR 土壤湿度探测模型直接验证其监测地表雪深的有效性。随后,针对不同卫星、不同频率的信号性能差异,文献[20—22]探讨了不同信号反演地表雪深差异产生的机理,由此可为多模多频 GNSS-IR 组合模型提供理论基础。此外,文献[23—24]首次提出一种三层反射面叠加(干雪层、草层、土壤层)探测模型,通过模拟相干信号解算出仿真值,并与实测值进行最优匹配获取地表积雪参数。但是,该理论模型受限于建模过程不够准确,积雪测量误差超过三分之一。

针对单个 GNSS 测站而言,卫星反射信号受积雪层、地表粗糙度、降雪和风向等多因素影响,如何建立精准的雪深估测模型是积雪研究的技术难点之一。通过分析 GNSS-IR 反射机制,高质量反射信号的获取是保证其测量精度的重要前提,常用的多项式拟合方法存在人为经验的限制,信号分离效果一般。同时,由于 GNSS 信号受不同卫星轨迹和卫星自身性能的影响,直接使用等权均值处理多卫星融合问题可能存在较大的随机偏差。因此,本文采用 PBO 计划提供的 2016—2017 年雪季的 GPS 卫星 L1C/A 观测数据,构建一种小波变换和滑动窗口相结合的 GNSS-IR 雪深估测模型,并利用 PBO H₂O 项目组和 SNOTEL 气象网络提供的雪深数据进行模型精度验证,该研究成果可为区域性的高精度雪深监

测研究提供重要参考。

1 数据来源及模型构建

本文选取 2016—2017 年雪季(2016 年 10 月至 2017 年 5 月)作为研究时段,采用以下多种数据源:板块边界观测计划 PBO 是美国“地球透镜计划”的组成部分之一,旨在监视大陆板块边界的变形程度。该计划已建设数百个永久性 GPS 观测站,可提供 15 s 时间分辨率的 GPS 观测数据(<http://www.unavco.org/>)。由于 GPS 测站与气象站需形成“并址”,此处仅采用美国 Alaska 的 AB33 观测站(纬度:67.251 2°N,经度:150.172 5°W,高程:334.8 m)作为研究对象,该测站使用钢制三脚架固定支撑,接收机型号为 TRIMBLE NETRS,天线罩为 SCIT,天线型号为 TRM29659.00,测站高度为 1.9 m,可接收 GPS 卫星 L1C/A 波段数据,文献[21]已开展过相关积雪试验,具有一定的代表性,如图 1(a)所示。为了保证 GPS-IR 技术估测雪深的精度,如果测站周边的地形起伏较大,需提前获取地面高程信息。图 1(b)展示了 AB33 测站的 Landsat 卫星影像以及第一菲涅尔区域,地形平坦开阔且覆盖稀疏杂草,有利于地表雪深监测。由文献[12]可知,合适的高度角范围为 4°~24°,最大理论探测范围是 2a(a 为椭圆长半轴)半径的扇形区域(一系列椭圆)。同时,美国地质调查局 USGS(United States Geological Survey,<https://www.usgs.gov/>)提供 IFSAR 5 m 空间分辨率的数字高程模型 DEM,图 1(c)是以 AB33 测站为中心(高程为零)的 80 m 边长的正四边形区域。可见,该区域地势为北高南低,相对高程区间分布主要为[-1 m,1 m]。

PBO H₂O 项目组(<http://cires1.colorado.edu/portal/>)和 SNOTEL(SNOWpack TElemetry network,<https://www.wcc.nrcs.usda.gov/>)中心(Coldfoot 气象站)可提供 1 d 时间分辨率的雪深数据作为参考值。其中,PBO H₂O 项目组作为最早研究 GNSS-IR 技术监测地表积雪参数的团队之一,其利用 GNSS-IR 经典算法和 PBO GNSS 观测数据解算了多个测站的地表环境参数(包括土壤湿度、积雪深度等),并已公开发布相关的数据产品。Coldfoot 气象站(纬度:67.25°N,经度:150.18°W,高程:317.0 m)与 AB33 测站的直线距离约 1 km,通过分析 2013—2016 年的雪深变化可知,该地区的降雪天气主要集中于前一年

11 月至后一年 4 月之间(约 240 d),几乎所有的积雪深度均不超过 0.8 m,积雪覆盖测站的概率可忽略不计。

1.1 GNSS-IR 经典模型

文献[12]开发了一种基于 SNR 观测量的 GNSS-IR 雪深监测的经典算法,几何结构如图 2 所示。其中, H 和 h 分别表示无积雪和积雪覆盖下天线距反射层的反射高度, h_s 表示积雪深度, θ 表示卫星高度角。

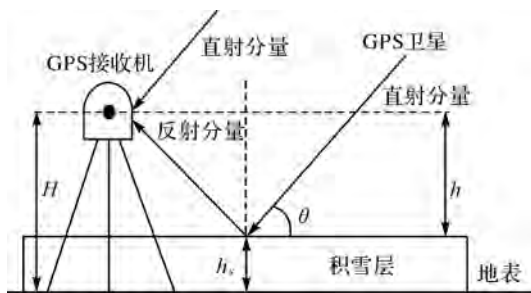


图 2 陆基 GPS-IR 几何模型

Fig.2 Geometric model of ground-based GPS-IR

由于 GNSS 信号受积雪层的多路径效应影响,接收机天线同时接收直射信号和测站附近不同地物的反射信号时产生一定的相位差,两种信号相互叠加干涉产生复合信号,此复合的 SNR 观测量可表示为^[18]

$$SNR^2 \approx A_d^2 + A_m^2 + 2A_d A_m \cos \phi \quad (1)$$

式中, A_d 和 A_m 分别表示直射信号和反射信号的幅度; ϕ 表示两种信号的相位差,单位为 rad,其表达式为

$$\phi = \frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \sin \theta \quad (2)$$

式中, λ 表示电磁波波长。式(2)表明相位差 ϕ 与高度角正弦值 $\sin \theta$ 之间存在线性关系,由此可得

$$\frac{d\phi}{d(\sin \theta)} = 2\pi \cdot \frac{2h}{\lambda} = 2\pi f \quad (3)$$

式中, f 表示信号频率。由于雪深值仅与多路径反射信号相关,直射信号是一种“噪声信号”。因此,采用多项式拟合复合 SNR 信号,两者作差可获取去趋势后的 SNR 残差序列(主要为干涉反射信号),表示为

$$d_{SNR} = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \cdot \sin \theta + \varphi\right) \quad (4)$$

式中, A 表示信号幅度, φ 表示相位偏移。文献[19]表明,SNR 信号的频率是一种可反映雪深变化的度量指标,频率 f 越大,有效反射高度 h 越

大。随后,利用 LSP(Lomb-Scargle periodogram)方法提取单个 SNR 序列的频率值 f ,从而解算出对应的垂直反射高度 h ,并由关系式 $h_s = H - h$ 计算雪深估测值。

1.2 小波变换理论

设原始 SNR 信号 $f(t)$ 表示为 $f(t) = [S_1, S_2, \dots, S_t]$, t 为历元。通过利用一系列小波函数对原始信号进行逼近,可分离出低频部分和 高频部分。根据 Mallat 算法^[25]的多分辨特性,将某一小波基函数作位移 b ,并在不同尺度 a 下与待分解信号 $f(t)$ 作内积,一维离散小波变换表示为

$$W_f(a, b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (5)$$

式中, a 和 b 分别表示尺度因子和位移量, $\psi_{a,b}(t)$ 表示小波基函数,可根据信号特征和应用效果进行选取。考虑到需对原始信号进行多尺度分析以及信号重构,本文选择紧支撑标准正交小波 db4 作为基本函数。限于篇幅,详见文献[26]。图 3 展示了 AB33 测站 2016 年 DOY 320 GPS PRN10 卫星的 SNR 信号趋势分离结果。可见,多项式方法难以准确拟合 SNR 信号趋势,尤其是低卫星高度角时出现了显著偏差;小波变换能较好识别该信号的趋势变化。

1.3 基于滑动窗口的数据优化策略

由于 GPS 运行周期约 12 h,一天内单颗卫星至多采集 4 段 SNR 序列。通过利用小波变换和 GNSS-IR 经典算法,估测出一天内所有的反射高度 h 。为方便表述,可将所有反射高度数据进行无差别排序,并重新编号 $n(n=1, 2, 3, \dots, N)$,数据集 \mathbf{T} 表示为

$$\mathbf{T} = [h_1, h_2, h_3, \dots, h_N] \quad (6)$$

GNSS-IR 模型估测精度主要依赖于数学统计模型的准确性。理论上,数据集 \mathbf{T} 的反射高度均应接近于实测值,但是实际上仍存在部分较大偏差。当前的大多数模型直接对数据集 \mathbf{T} 进行等权平均,其表达式为

$$h_{\text{ave}} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N h_n \quad (7)$$

式中, h_{ave} 表示平均值, N 表示估测值的数量。该方法充分利用了所有的估测数据,但是模型本身存在一定的随机误差。图 4 表示 AB33 测站 2016 年 DOY 275 和 2017 年 DOY 60 估测的多卫星反射高度。可见,大多数估测值 h 的数据点形成了明

显的“聚集效应”,实测值(黑色虚线)接近于中心位置,尤其是雪深较大时更为明显。然而,部分偏差较大的估测值使得平均值(红色实线)偏离了“中心点位”,最终导致雪深估测值存在明显偏差。因此,本文利用阈值约束下的滑动窗口对所有估测数据进行质量优化。

假设窗口宽度为 l ,对均值 h_{ave} 向下取一位小数点,并将该数值作为窗口的一个起始边界 $h_{\text{begin}} = \lfloor h_{\text{ave}} \rfloor$,那么初始窗口区间分为两种情况,分别为

$$[h_{\text{begin}}, h_{\text{begin}} + l] \text{ 或 } [h_{\text{begin}} - l, h_{\text{begin}}] \quad (8)$$

结合式(8)分别统计一天内两种不同初始窗口内的估测点位数量(Num_1 和 Num_2),通过对比两个数量值的大小可确定合适的初始窗口区间,具体形式为

$$\left. \begin{array}{l} [h_{\text{begin}}, h_{\text{begin}} + l] \quad \text{Num}_1 \geq \text{Num}_2 \\ [h_{\text{begin}} - l, h_{\text{begin}}] \quad \text{Num}_1 < \text{Num}_2 \end{array} \right\} \quad (9)$$

在确定初始窗口的基础上,将大小固定的窗口以 0.1 m 等间距由起始边界向点位数量较多的方向进行滑动(如:初始窗口为 $[h_{\text{begin}}, h_{\text{begin}} + l]$ 时,该窗口由数值小向数值大的方向进行滑动),并统计出每次滑动后窗口内包含的点位数量占全部点位的百分比,从而获得点位数量最多的窗口。为保证该算法的可信度,设百分比大小超过 0.6 作为阈值。如果所有窗口内的点位数量百分比均小于 0.6,则将窗口的两侧边界分别扩大 0.02 m,以此类推,直至满足阈值。最后将满足条件的窗口内的所有估测值 $d_k(k=1, 2, \dots, K)$ 进行等权平均,解算出雪深估测值 $h_{s,\text{ave}}$,其表达式为

$$h_{s,\text{ave}} = H - \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K d_k \quad (10)$$

1.4 地表粗糙度的修正方法

GNSS-IR 经典模型建立的前提条件是假设的水平面,这与实际地形不相符,因此考虑将地表粗糙度作为一种误差影响因素,需对其进行有效修正。由于测站周边地形不够平整,直接采用测站垂直高度作为反射高度基准 H 会产生系统性的地形偏差。同时,每一恒星日内的 GPS 卫星轨道是固定不变的,每个运行周期内天线接收反射信号的地面轨迹无明显变化,因此地表有无积雪覆盖的情况下地表粗糙度均应保持一致。文献[27]提出通过改变固定的反射高度基准来修正部分地形偏差。根据这种思路,本文选取了 2016 年 DOY 275—DOY 305(最大雪深值小于 3 cm)的 GPS 观测数据,分别建立基于小波变换的 GPS-

IR 模型以及基于小波变换和滑动窗口的 GPS-IR 模型,解算出地表无积雪覆盖时的多卫星反射高度并进行等权平均,结果见图 5。可见,上述两种估测模型估测的多卫星反射高度日变化量很少(最大变化量小于 5 cm),与 AB33 测站的 1.9 m 垂直高度相比,两者的估测结果分别增加了 1 cm 和 5 cm。结合图 1(c)的 DEM 图可知,测站周围的大部分监测区域的地表高程相较于接收机天线相位中心对应的地面高程略低,即地面呈凹陷状态,模型的估测值应大于测站高度,两者的结果较符合。因此,式(10)可转化为

$$h_{s_ave} = H_{new} - \frac{1}{K} \cdot \sum_{k=1}^K d_k \quad (11)$$

式中, H_{new} 表示 GPS-IR 模型估测的反射高度基准均值。

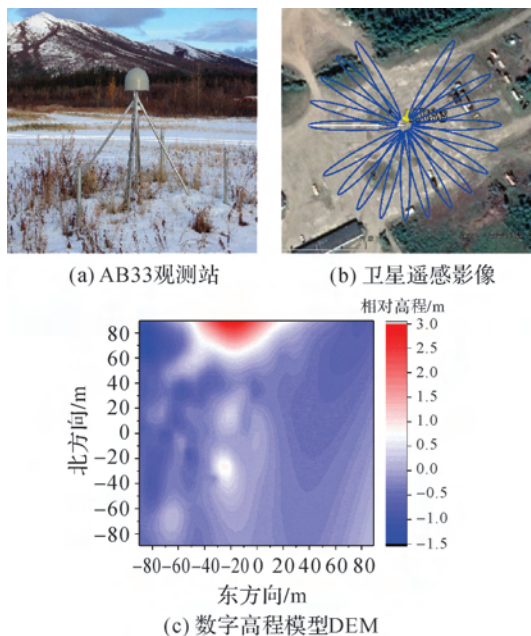


图 1 AB33 测站周围环境

Fig.1 Surrounding environment of AB33 station

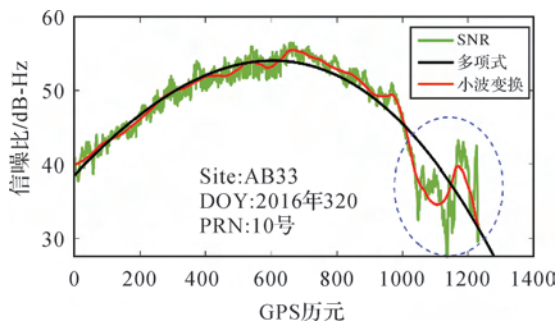


图 3 PRN 10 号卫星的 SNR 信号拟合趋势

Fig.3 SNR observations fitting trend term of PRN 10 satellite

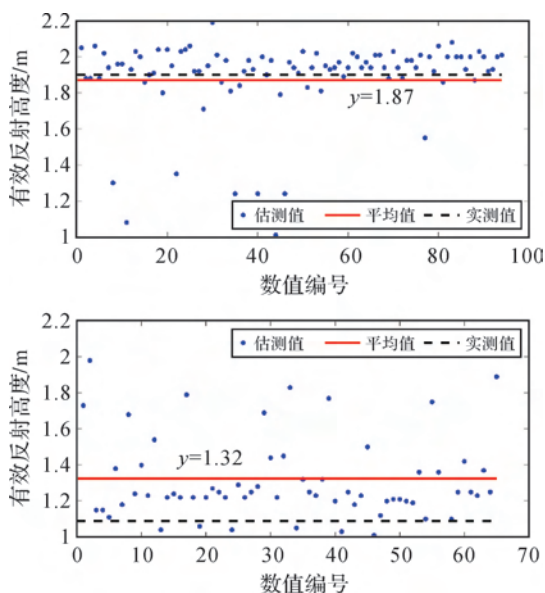


图 4 GNSS-IR 估测的反射高度

Fig.4 The reflected height derived from GNSS-IR technology

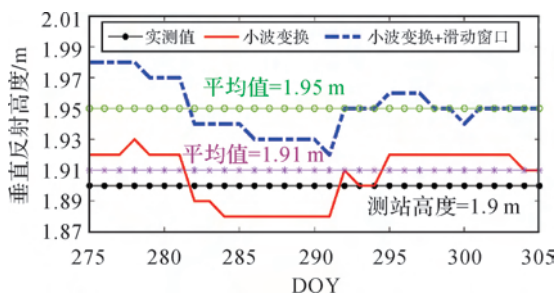


图 5 GPS-IR 估测地表无雪的反射高度

Fig.5 The reflected height derived from GPS-IR without snow

综上所述,小波变换和滑动窗口相结合的 GNSS-IR 雪深估测精化模型的基本流程如图 6 所示。

2 模型精度验证

2.1 基于小波变换分解的 GPS-IR 雪深估测精度验证

本文采用 PBO H₂O 项目组 and SNOTEL 中心提供的两种雪深数据产品作为参考值,验证构建后的 GPS-IR 模型精度。便于后期描述,将 PBO H₂O 数据定义为 Snow_H₂O。由于 Snow_H₂O 数据主要针对较厚的积雪层(不低于 0.2 m),因此缺省部分数据。SNOTEL 气象站提供的雪深资料均为实测值,具有较高的精度和可靠性。图 7 表示 2017 年 DOY 21—DOY 127 两

种雪深数据的变化趋势。

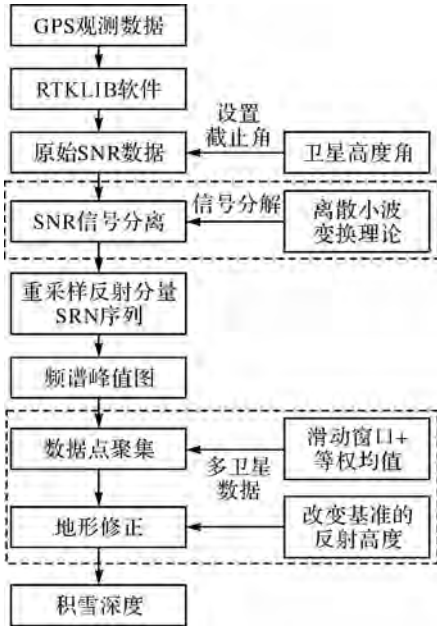


图6 GNSS-IR 估测地表雪深的基本流程

Fig.6 The basic process of snow depth estimation from GNSS-IR technique

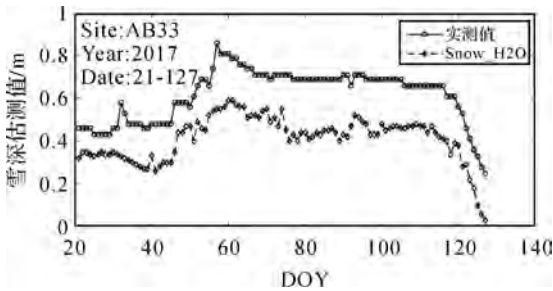


图7 PBO H₂O 和 SNOTEL 提供的雪深数据

Fig.7 Snow depths provided by PBO H₂O and SNOTEL

图7中, Snow_H₂O 和 SNOTEL 两种雪深数据的整体趋势较好,但是从定量上来看,两者存在明显偏差, Snow_H₂O 雪深数据整体小于实测数据。该现象产生的原因可能是:①地表粗糙度;②Snow_H₂O 数据的估测模型存在误差(包括系统误差和随机误差)。雪季期间,发生了5次较明显的降雪,分别为2017年DOY 28—DOY 32、DOY 45—DOY 46、DOY 50—DOY 53、DOY 55—DOY 57和DOY 92—DOY 93,单次最大降雪深度超过0.2 m。由于强降雪天气的影响,地表雪深明显上升,尤其是DOY 45—DOY 46、DOY 50—DOY 53、DOY 55—DOY 57。天线与雪层的反射高度在短时间内变化较剧烈, Snow_H₂O 雪深数据随之出现波动。同时, AB33 测站

的降雪量和降雪频率较为充足,有利于开展地表雪深监测研究。

为了验证小波变换在雪深估测中的有效性,本文选取2017年DOY 60—DOY 90的GPS观测数据,截止高度角设置为4°~24°,分别利用小波变换和低阶多项式分离出多路径反射信号,并采用LSP解算出反射高度,最后获取雪深估测值。限于篇幅,此处仅给出部分卫星(编号为13和14)的雪深估测结果(图8)。

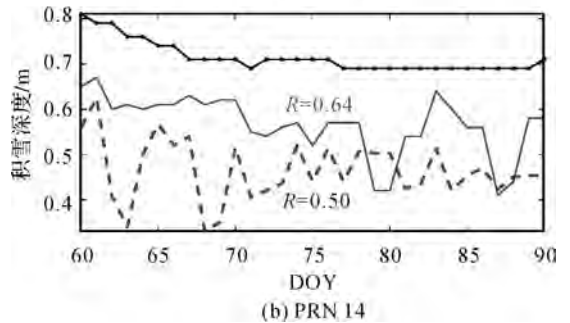
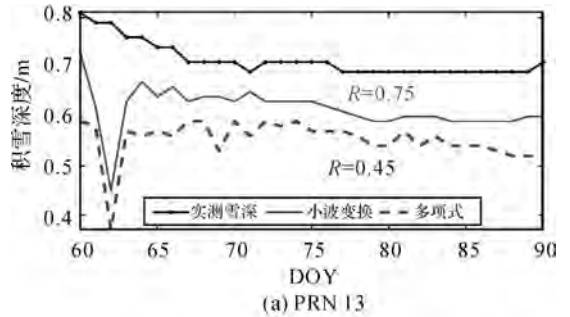


图8 单颗卫星的雪深估测值与实测值的关系

Fig.8 relationship between snow depth estimations of a single satellite and in situ measurements

图8中,整个时段内的雪深数据较平缓,未出现明显的上升或下降。两种方法估测的各卫星雪深结果与 Snow_H₂O 雪深数据的吻合度较好,可反映地表雪深的整体变化。相较于基于多项式的估测结果,基于小波变换的雪深估测结果更接近于实测值,且与实测值的相关性更强,初步表明基于小波变换的GPS-IR模型估测雪深的有效性。进一步对比发现,不同的GPS卫星监测雪深变化的响应模式存在一定的差异。对于同一颗卫星而言,不同年积日的估测结果出现了大量的异常跳变,主要原因是卫星轨道和卫星性能的差异、其他地物干扰等。由于同一卫星的估测结果波动较大,难以剔除部分较差的结果,从而导致最终估测结果的稳定性不足。已有研究^[28]表明:联合多颗卫星估测结果可形成优势互补,有效改善异常跳

变的问题,而大多数模型采用的等权均值法难以解决此类问题。结合两种雪深参考值,探讨小波变换分解算法对 GPS-IR 技术监测长时间雪深序列的可靠性,结果如图 9 所示。图 9 中, Snow_H2O 雪深数据与基于小波变换的 GPS-IR 雪深估测结果之间存在强相关。但是,与实测雪深值相比,在高雪深时期(DOY 50—DOY 120),上述两种方法估测的雪深数据均存在较大偏差(最大偏差量分别为 0.31 m 和 0.27 m),而处于低雪深时期(DOY 30—DOY 50),后者的测量精度相对于前者有所提高。两种方法的估测雪深与实测雪深的均方根误差分别为 0.21 m 和 0.18 m,结果表明:采用等权均值法的估测性能较差,而基于小波变换的 GPS-IR 模型的估测精度一定程度上有所提高。

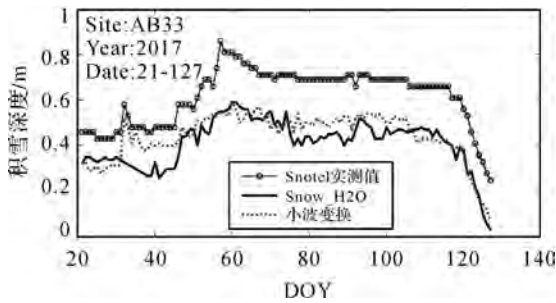


图 9 基于小波变换的 GPS-IR 的雪深估测值与雪深参考值

Fig.9 Snow depth estimations of GPS-IR based on wavelet transform and snow depth references

2.2 基于小波变换和滑动窗口的 GPS-IR 雪深估测精度验证

文献[28]验证了多卫星融合方法有助于提高 GPS-IR 模型的估测精度。在构建基于小波变换的 GPS-IR 估测模型的基础上,本文利用阈值约束下的滑动窗口对一天内多卫星的估测结果进行优化处理,设初始窗口宽度为 0.4 m,两种设计方案如下:①利用滑动窗口优化单颗卫星估测结果;②利用滑动窗口优化多卫星估测结果,并对最优

窗口内的估测数据进行等权平均。方案 1 和方案 2 分别选取了 AB33 测站 2017 年 DOY 60—DOY 90 和 DOY 21—DOY 127 的 GPS L1C/A 观测数据,两种模型的单卫星和多卫星估测结果如表 1、表 2 和图 10 所示。

由表 1、表 2 和图 10 分析可知,不管是单卫星估测雪深还是多卫星融合估测雪深,采用滑动窗口算法从整体上改善了雪深估测值与实测雪深之间的部分偏差,各项指标明显优于基于小波变换的雪深估测数据和 Snow_H2O 雪深数据,初步表明滑动窗口优化估测结果的有效性。但是,表 1 的各个单卫星估测结果之间仍存在部分异常跳变(如:PRN08 和 PRN27),估测雪深的稳定性仍有待改善,这主要是因为不同 GPS 卫星的轨道差异,使得天线接收的反射信号来自不同地表位置和环境,从而干扰有效的反射信号,导致估测结果极易发生跳变。图 9 中,通过采用滑动窗口综合多卫星的估测信息,并计算最优窗口内各卫星估测结果的等权均值,相较于单卫星估测结果进一步提高了稳定性和精度。如:图 10 中 2017 年 DOY 28—DOY 34、DOY 45—DOY 70,地表雪深的快速上升和下降,基于小波变换和滑动窗口的 GPS-IR 估测雪深出现了同样的响应,而其余两种估测雪深数据受部分单卫星结果的跳变影响,雪深变化信息不够明显。同时,在地表雪深变化较平缓的时期(DOY 70—DOY 110),前者估测结果的精度同样是最佳的。结合表 2 的结果, Snow_H2O 雪深数据和基于小波变换的 GPS-IR 估测雪深的各项精度指标无明显差异,而采用小波变换和滑动窗口的 GPS-IR 估测雪深与实测值的平均绝对偏差 MAE 和均方根误差 RMSE 分别为 9 cm 和 10 cm,相关系数 R 达到 0.95。相较于前两种方法,后者的精度提升了超过 45%。结果表明:多卫星的反射信号可反映出不同地面位置的雪深信息。针对单颗 GPS 卫星难以精准测量的地区,多卫星融合的 GPS-IR 技术可有效提升估测精度。

表 1 两种模型的单卫星估测误差

Tab.1 Estimation errors of a single satellite from two GPS-IR models

模型	误差/m	PRN07	PRN08	PRN12	RN13	PRN19	PRN21	PRN25	PRN27
小波变换	MAE	0.14	0.18	0.11	0.06	0.08	0.12	0.15	0.19
	RMSE	0.16	0.20	0.14	0.07	0.10	0.15	0.19	0.22
小波变换+滑动窗口	MAE	0.08	0.014	0.08	0.05	0.05	0.06	0.09	0.016
	RMSE	0.09	0.015	0.09	0.06	0.06	0.07	0.10	0.017

表 2 3 种雪深估测值与实测雪深的精度

Tab.2 Accuracy between three snow depth estimations and in situ measurements

精度指标	Snow_H2O	小波变换	小波变换+滑动窗口
MAE/m	0.20	0.18	0.09
RMSE/m	0.21	0.19	0.10
R	0.91	0.90	0.95

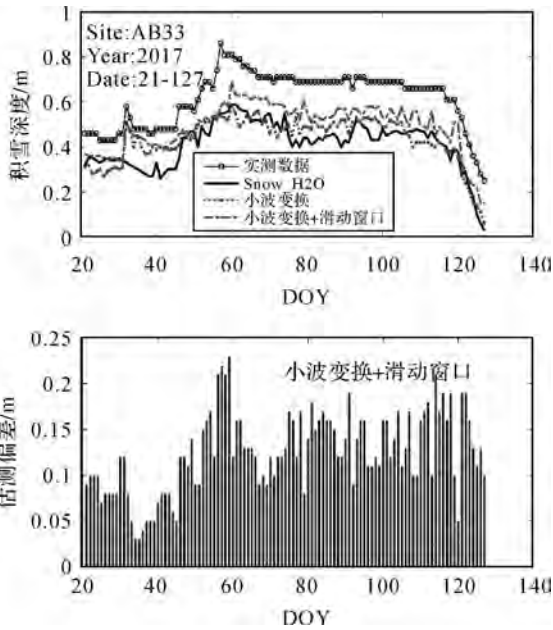


图 10 两种模型的多卫星雪深估测值与雪深参考值

Fig.10 Snow depth estimations of multi-satellite from two models and snow depth references

2.3 顾及地表粗糙度的 GPS-IR 雪深估测精度验证

结合 2.2 节的研究结果可知,小波变换和滑动窗口相结合可有效改进 GPS-IR 经典模型的精度和稳定性,但是优化后的 GPS-IR 精化模型的估测结果仍与实测雪深之间存在约 10 cm 的估测偏差。因此,本文进一步分析了地表粗糙度(主要是地形起伏)对构建的 GPS-IR 精化模型精度的影响。此处不直接采用测站高度作为固定的反射高度基准,通过利用 GPS-IR 精化模型估测地表无积雪覆盖时期的多卫星反射高度,并解算出多个反射高度的等权均值,以此作为新的反射高度基准。图 11 表示 2016—2017 年冬季的实测雪深与估测雪深的变化。

从图 11 中看出,在利用小波变换和滑动窗口进行数据优化的基础上,采用新的反射高度基准

获取长时间的雪深序列,其与实测雪深的吻合度进一步提高,两者的均方根误差 RMSE 和相关系数 R 分别为 6 cm 和 0.98。其中,2016 年 DOY 336—DOY 366、2017 年 DOY 1—DOY 55 的雪深估测性能较为良好;2016 年 DOY 310—DOY 330、2017 年 DOY 60—DOY 121 的雪深估测偏差明显超过其他时段,且这些估测值均小于实测值。由此推断,地表粗糙度导致的估测偏差仅得到部分修正,同时电磁波信号可能穿透少量的积雪层,从而使得估测值有所降低。此外,在 2017 年 DOY 128—DOY 151(地表无积雪),修正后的估测值与实测值的偏差有所增加,其原因可能是解算新的反射高度基准的数据源为 2016 年 10 月份,冬季地表裸露且较光滑,而此时段为夏季,地表植物覆盖物较多,从而干扰了估测的反射高度。由于 GPS-IR 技术估测雪深的机制十分复杂,除了上述的影响因素之外,实测雪深数据的时间分辨率较低、GNSS 测站与气象站的距离等同样是估测偏差产生的原因。

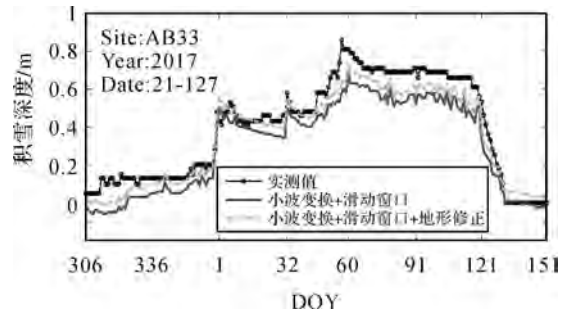


图 11 地表粗糙度修正后的雪深估测值与雪深实测值

Fig.11 Snow depth estimations after surface roughness correction and in situ measurements

3 结论

高精度、长时间、连续监测地表雪深变化对于气候学、环境科学和水资源管理等研究具有重要的实际意义。针对 GPS-IR 雪深估测研究存在的一些问题,如反射信号的提取效果不佳、统计模型中存在随机估测偏差以及地表粗糙度的影响等,本文以信号分离和多卫星融合为核心思路,提出了一种小波变换和滑动窗口相结合的 GPS-IR 雪深估测精化模型,获得以下结论:①由于原始 SNR 信号受大气层和多路径环境等影响,卫星信号的趋势项往往具有差异性。多项式拟合法依赖于人为经验,信号拟合和分离的效果一般。利用

小波变换的时频信号分析优势可有效提高多路径反射信号的分离性能。②单卫星估测结果的异常跳变使得其稳定性有待提高,多卫星融合可覆盖更大的反射区域,全面综合测站周边区域的雪深信息。采用阈值约束下的滑动窗口算法可提取出多卫星估测结果中的“数据集群”,从而削弱部分随机偏差,模型精度提升明显。③在构建的 GPS-IR 精化模型的基础上,估测值与实测值之间仍存在一定偏差。考虑到地表粗糙度对 GPS-IR 模型机制的影响,采用无积雪覆盖下估测的反射高度作为新的反射高度基准,修正了部分地形偏差。相较于未修正的结果, RMSE 降低了 4 cm, 相关系数 R 达到 0.98。

综上所述,小波变换和滑动窗口相结合的 GPS-IR 雪深估测精化模型是有效、可靠的,明显提高了估测精度和稳定性。接下来,如何建立更精准的地表粗糙度修正模型以及联合多模多频 GNSS 数据估测高时空分辨率的雪深数据值得进一步研究。

致谢: 特别感谢 UNAVCO 提供的 GPS 观测数据以及 PBO H₂O 和 SNOTEL 提供的雪深参考资料。

参考文献:

[1] 柏延臣, 冯学智, 李新, 等. 基于被动微波遥感的青藏高原雪深反演及其结果评价[J]. 遥感学报, 2001, 5(3): 161-165.
BO Yanchen, FENG Xuezhi, LI Xin, et al. The retrieval of snow depth in Qinghai_Xizang (Tibet) Plateau from passive microwave remote sensing data and its results assessment[J]. Journal of Remote Sensing, 2001, 5(3): 161-165.

[2] 张双成, 戴凯阳, 南阳, 等. GNSS-MR 技术用于雪深探测的初步研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(2): 234-240.
ZHANG Shuangcheng, DAI Kaiyang, NAN Yang, et al. Preliminary research on GNSS-MR for snow depth[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(2): 234-240.

[3] 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 Yuanxi. 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.

[4] 吴泽民, 边少锋. 后验概率与最小均方误差解结合的 GNSS 部分模糊度解算策略[J]. 测绘学报, 2018, 47

(S1): 54-60. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20180295.
WU Zemin, BIAN Shaofeng. GNSS partial ambiguity resolution based on posterior probability and minimum squares error solution [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(S1): 54-60. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20180295.

[5] 万玮, 陈秀万, 彭学峰, 等. GNSS 遥感研究与应用进展和展望[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 858-874.
WAN Wei, CHEN Xiuwan, PENG Xuefeng, et al. Overview and outlook of GNSS remote sensing technology and applications[J]. Journal of Remote Sensing, 2016, 20(5): 858-874.

[6] 金双根, 张勤耘, 钱晓东. 全球导航卫星系统反射测量(GNSS+R)最新进展与应用前景[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1389-1398. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2017.20170282.
JIN Shuanggen, ZHANG Qinyun, QIAN Xiaodong. New progress and application prospects of global navigation satellite system reflectometry (GNSS+R)[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1389-1398. DOI: 10.11947/j. AGCS.2017.20170282.

[7] 陈锐志, 王磊, 李德仁, 等. 导航与遥感技术融合综述[J]. 测绘学报, 2019, 48(12): 1507-1522. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190446.
CHEN Ruizhi, WANG Lei, LI Deren, et al. A survey on the fusion of the navigation and the remote sensing techniques[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(12): 1507-1522. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2019.20190446.

[8] MARTIN-NEIRA M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS): application to ocean altimetry[J]. ESA Journal, 1993, 17(4): 331-355.

[9] 张双成, 南阳, 李振宇, 等. GNSS-MR 技术用于潮位变化监测分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1042-1049. DOI: 10.11947/j. AGCS.2016.20150498.
ZHANG Shuangcheng, NAN Yang, LI Zhenyu, et al. Analysis of tide variation monitored by GNSS-MR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(9): 1042-1049. DOI: 10.11947/j. AGCS.2016.20150498.

[10] 王娜子, 鲍李峰, 高凡. 逐历元 GNSS-R 测高单差和双差算法[J]. 测绘学报, 2016, 45(7): 795-802. DOI: 10.11947/j. AGCS.2016.20150638.
WANG Nazi, BAO Lifeng, GAO Fan. Improved water level retrieval from epoch-by-epoch single and double difference GNSS-R algorithms[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2016, 45(7): 795-802. DOI: 10.11947/j. AGCS.2016.20150638.

[11] YU Kegen, RIZOS C, DEMPSTER A G. GNSS-based model-free sea surface height estimation in unknown sea state scenarios[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2014, 7(5): 1424-1435.

- [12] LARSON K M, NIEVINSKI F G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 41-52.
- [13] 周威, 刘立龙, 黄良珂, 等. GLONASS 卫星 SNR 信号的雪深探测[J]. *遥感学报*, 2018, 22(5): 889-899.
ZHOU Wei, LIU Lilong, HUANG Liangke, et al. Monitoring snow depth based on the SNR signal of GLONASS satellites[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(5): 889-899.
- [14] TSANG L, KONG J A, SHIN R T. Theory of microwave remote sensing[M]. New York: Wiley-Interscience, 1985.
- [15] KAVAK A, VOGEL W J, XU Guanghan. Using GPS to measure ground complex permittivity [J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(3): 254-255.
- [16] BILICH A, LARSON K M. Mapping the GPS multipath environment using the signal-to-noise ratio (SNR) [J]. *Radio Science*, 2007, 42(6): RS6003.
- [17] BILICH A, LARSON K M, AXELRAD P. Modeling GPS phase multipath with SNR: Case study from the Salar de Uyuni, Boliva[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2008, 113(B4): B04401.
- [18] 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.
- [19] LARSON K M, GUTMANN E D, ZAVOROTNY V U, et al. Can we measure snow depth with GPS receivers? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36(17): L17502.
- [20] LARSON K M, SMALL E E. Estimation of snow depth using L1 GPS signal-to-noise ratio data[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2016, 9(10): 4802-4808.
- [21] JIN Shuanggen, QIAN Xiaodong, KUTOGLU H. Snow depth variations estimated from GPS-reflectometry: a case study in alaska from L2P SNR data[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(1): 63.
- [22] 黄良珂, 周威, 刘立龙, 等. 基于 GPS 新型 L5 信号的地表雪深反演研究[J]. *测绘通报*, 2019(7): 1-5, 11. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0208.
HUANG Liangke, ZHOU Wei, LIU Lilong, et al. Research on surface snow depth retrieval of new L5 signals from GPS[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2019(7): 1-5, 11. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2019.0208.
- [23] JACOBSON M D. Dielectric-covered ground reflectors in GPS multipath reception—theory and measurement[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2008, 5(3): 396-399.
- [24] JACOBSON M D. Estimating snow water equivalent for a slightly tilted snow-covered prairie grass field by GPS interferometric reflectometry [J]. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014, 2014(1): 61.
- [25] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [26] WANG Xiaolei, ZHANG Qin, ZHANG Shuangcheng. Water levels measured with SNR using wavelet decomposition and Lomb-Scargle periodogram[J]. *GPS Solutions*, 2017, 22(1): 22.
- [27] TABIBI S, GEREMIA-NIEVINSKI F, VAN DAM T. Statistical comparison and combination of GPS, GLONASS, and multi-GNSS multipath reflectometry applied to snow depth retrieval[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2017, 55(7): 3773-3785.
- [28] 梁月吉, 任超, 黄仪邦, 等. 多星融合的土壤湿度滚动式估算模型[J]. *遥感学报*, 2019, 23(4): 648-660.
LIANG Yueji, REN Chao, HUANG Yibang, et al. Rolling estimation model of soil moisture based on multi-satellite fusion[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2019, 23(4): 648-660.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2020-06-24

修回日期: 2020-08-23

第一作者简介: 边少锋(1961—),男,博士,教授,研究方向为大地测量学。

First author: BIAN Shaofeng (1961—), male, PhD, professor, majors in geodesy.

E-mail: sfbian@sina.com

通信作者: 周威

Corresponding author: ZHOU Wei

E-mail: boy123455@126.com

引文格式: 苏珂, 金双根. BDS/Galileo 四频精密单点定位模型性能分析与比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1189-1201. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20200236.
SU Ke, JIN Shuanggen. Analysis and comparisons of the BDS/Galileo quad-frequency PPP models performances[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1189-1201. DOI: 10.11947/j. AGCS.2020.20200236.

BDS/Galileo 四频精密单点定位模型性能分析与比较

苏 珂^{1,2}, 金双根^{1,3}

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 江苏 南京 210044

Analysis and comparisons of the BDS/Galileo quad-frequency PPP models performances

SU Ke^{1,2}, JIN Shuanggen^{1,3}

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

Abstract: Chinese BeiDou Navigation Satellite System (BDS) and Galileo system can provide the services of quad-frequency observations. In this paper, we assess the BDS/Galileo quad-frequency precise point positioning (PPP) models, i.e., PPP model with two ionosphere-free combinations (QF1), PPP model with one ionosphere-free combination (QF2), undifferenced uncombined PPP model (QF3) and ionosphere-constrained undifferenced uncombined PPP model (QF4), by comparing the dual-frequency ionosphere-free PPP model (DF). The equivalence of the QF1, QF2 and QF3 models is theoretically demonstrated by the equivalence principle. The static and simulated kinematic PPP performances are evaluated and investigated with one-month period observations from the network stations and the kinematic PPP performances are verified with a kinematic experiment in the campus. The results show that the pseudorange noises of BDS-3 B1C and B2a signals are larger than the B1I and B3I signals and the pseudorange noises differences for the Galileo quad-frequency signals are not obvious. The performances of the QF1, QF2 and QF3 models are basically consistent for the static and simulated kinematic PPP. By adding the external ionospheric constraint, the quad-frequency PPP performances are affected. Compared to the QF1, QF2 and QF3 models, the mean convergence time of the static BDS (BDS-2+BDS-3) model are reduced by 4.4%, 4.4% and 5.4%, respectively. The mean convergence time of static Q4 model increases 16.8 minutes when compared to the QF3 model. Compared to the dual-frequency PPP, the quad-frequency kinematic PPP performances are obviously improved. The three-dimensional positioning accuracy of BDS and Galileo QF4 models are improved by 11.4% and 31.4%, respectively, when compared to the QF1 models. Furthermore, the BDS/Galileo kinematic PPP models perform better than the single-system solutions.

Key words: BDS; Galileo; precise point positioning; equivalence validation; quad-frequency

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (NSFC-DFG) Project (No. 41761134092)

摘 要:北斗卫星导航系统和 Galileo 卫星系统都可以提供 4 个频率信号上的服务。本文通过与双频无电离层模型(DF)比较,评估分析了 4 种 BDS/Galileo 四频 PPP 模型性能,即四频无电离层双组合模型(QF1)、四频无电离层组合模型(QF2)、四频非差非组合模型(QF3)和附加电离层约束四频非差非组合模型(QF4),同时通过等价性原则理论上证明了 QF1、QF2、QF3 模型的等价性。此外,用 1 个月参考

站的静态数据和 1 组动态数据分析了四频静态,仿动态和动态 PPP 性能。试验结果表明,BDS-3 B1C 和 B2a 新频点伪距噪声要略大于 B1I 和 B3I 信号,Galileo 卫星 4 个频率上的伪距噪声相差并不明显。对于静态和仿动态 PPP 模型,QF1、QF2 和 QF3 模型定位性能基本上一致。通过附加外部电离层约束,四频 PPP 模型性能受到影响,BDS(BDS-2+BDS-3)静态 QF4 模型相比于 QF1、QF2 和 QF3 模型平均收敛时间分别减少了 4.4%、4.4% 和 5.4%,Galileo 静态 Q4 模型平均收敛时间相比于 Q3 模型增加了 16.8 min。对于动态 PPP,四频 PPP 模型相比于双频 PPP 性能得到提升显著,相比于 QF1 模型,BDS 和 Galileo 单系统 QF4 模型三维定位精度分别提高了 11.4% 和 31.4%。BDS/Galileo 双系统 PPP 性能要优于单系统 PPP。

关键词:北斗卫星导航系统;Galileo;精密单点定位;等价性原则;四频

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1189-13

基金项目:国家自然科学基金(NSFC-DFG)合作项目(41761134092)

全球卫星导航系统(GNSS)包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的 BDS 以及欧盟的 Galileo 系统。GNSS 应用覆盖导航、授时、大地测量、地球大气环境监测等领域^[1-3]。其中,BDS 作为中国独立研制的导航系统,遵循三步走原则,即 BDS-1(演示系统),BDS-2(区域系统)和 BDS-3(全球系统)^[4]。BDS-2 包含 5 颗地球静止轨道(geostationary orbit,GEO)卫星,4 颗倾斜地球静止轨道(inclined geostationary orbit,IGSO)卫星和 4 颗中轨卫星(medium earth orbit,MEO)卫星,并提供 B1I(1 561.098 MHz),B2I(1 207.14 MHz)和 B3I(1 268.52 MHz)信号。BDS-3 系统从 2018 年 12 月 27 日开始提供全球定位、导航和授时(positioning, navigation and timing,PNT)服务并且能提供 B1C(1 575.42 MHz),B2a(1 176.45 MHz)和 B2b(1 207.14 MHz)新信号^[5-6]。对于 Galileo 系统,它能够提供高性能和可靠的民用和军事服务,其使用信号频率包括 E1(1 575.42 MHz),E5a(1 176.45 MHz),E5b(1 207.14 MHz),E5(1 191.795 MHz)和 E6(1 278.75 MHz)^[7]。

精密单点定位(precise point positioning,PPP)是从伪距标准单点定位(standard point positioning,SPP)延伸过来,此概念被提出后就引起了广泛的兴趣并且得到了飞速的发展^[8]。近年来许多学者分析了 GNSS 多频多系统 PPP 模型性能,文献[9]评估了 BDS-2 三频静态和动态 PPP 模型性能,并验证了 3 种模型性能上基本一致。文献[10]基于原始观测值分析评估了单频和双频 PPP 性能,结论表明通过多系统组合单频和双频 PPP 收敛时间能显著提高 60% 以上。在 BDS/Galileo PPP 研究方面,文献[11]利用两台 Trimble Alloy 接收机数据全面分析了 BDS PPP

和实时差分定位(real time kinematic,RTK)性能。文献[12]评估了 BDS-2、BDS-2/BDS-3 和多系统 GNSS PPP 定位性能和天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay,ZTD)精度。文献[13]系统性地比较了 BDS 单频、双频、三频和四频 PPP 性能。文献[14]利用 Galileo E1、E5a、E5b 和 E5 信号观测值分析了四频 PPP 精密时间频率传递性能。

BDS 和 Galileo 系统都可以观测到四频及更多频率的卫星信号,多频信号在许多方面都具有优势,如低噪声水平、电离层延迟消除、周跳探测,尤其对于 PPP 研究存在许多潜在优势。对于四频信号观测值,可以根据不同电离层处理策略建立不同四频 PPP 模型。已有的研究主要侧重于模型本身而缺少模型比较以及全面的性能分析。因此,本文比较和分析了 4 种 BDS/Galileo PPP 模型及其性能。首先,全文介绍了传统的双频无电离层 PPP 模型以及 4 种四频 PPP 模型,特别地,本文从理论上比较讨论了 3 种四频 PPP 模型的等价性,并分析了 BDS/Galileo 四频伪距观测值质量。最后我们通过实际数据分析比较了 BDS/Galileo 四频 PPP 静态,仿动态和动态定位性能。

1 四频 PPP 模型

单站绝对定位起始阶段利用的是伪距 SPP,但伪距观测值多路径噪声会掩盖原子钟的短期稳定性。通过联合载波相位观测值可以获得更高的稳定性,PPP 则是利用伪距和相位观测值联合精密产品获得高精度的位置信息。本节将介绍传统的双频无电离层 BDS/Galileo PPP 模型和四种四频 BDS/Galileo PPP 模型,同时从理论上分析比较了几种四频 PPP 模型。

1.1 双频无电离层模型(DF)

双频 PPP 可以使用双频无电离层组合消除一阶电离层的影响,本文统一用 DF 表示。假设

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{DF} \\ \Phi_{DF} \end{bmatrix} = [\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{B}, \mathbf{e}_2^T \otimes \mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{e}_m, \mathbf{n}_2 \otimes (\mathbf{f}_{1,2}^T \cdot \mathbf{\Lambda}_{1,2} \otimes \mathbf{I}_m)] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \bar{d}t_r \\ \text{isb} \\ \mathbf{a}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{P,DF} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\Phi,DF} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1,2}^T \cdot (\mathbf{q}' \otimes c_P) \cdot \mathbf{f}_{1,2} \\ \mathbf{f}_{1,2}^T \cdot (\mathbf{q}' \otimes c_\Phi) \cdot \mathbf{f}_{1,2} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{Q}_m$$

式中, \mathbf{P} 和 Φ 表示伪距和相位观测向量; \mathbf{x} 表示三维位置增量以及对流层天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD); \mathbf{B} 为其设计矩阵; $\bar{d}t_r$ 为估计的接收机钟差; isb 表示 BDS 和 Galileo 系统间偏差(inter system bias, ISB), 当使用单系统 BDS 或 Galileo 卫星时, 不需要考虑 ISB 参数; \mathbf{e}_m 表示 m 行 1 列向量, 其值全为 1; $\mathbf{a}'^T = [\mathbf{a}'_1 \quad \mathbf{a}'_2]$ 表示模糊度向量, 其中 \mathbf{a}'_i 为第 i 频率上的模糊度; $\mathbf{n}_2 = [0 \quad 1]^T$; $\mathbf{f}_{m,n}^T = [\alpha_{(m,n)} \quad \beta_{(m,n)}] = [f_m^2 \quad -f_n^2] / (f_m^2 - f_n^2)$, ($m, n = 1, 2, 3, 4$) 为无电离层频率因子向量, 其中 f 表示对应频率值; $\mathbf{\Lambda}_{m,n} = \text{diag}(\lambda_m, \lambda_n)$ 为波长的对角矩阵; \mathbf{I}_m 为 m 维单位阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_P$ 和 $\boldsymbol{\varepsilon}_\Phi$ 为伪距和相位观测值噪声向量, 对应地, c_P 和

有 m 颗 BDS 和 Galileo 观测卫星, DF 模型可以表示为^[15]

c_Φ 表示伪距和相位方差因子; $\mathbf{q}' = \text{diag}(q_1^2, q_2^2)$, 其中 q_i 表示观测值噪声比例; $\mathbf{Q}_m = \text{diag}(\sin^{-2}(E_1), \sin^{-2}(E_2), \dots, \sin^{-2}(E_m))$ 为余因式矩阵, 其中 E 表示卫星高度角; \otimes 为克罗内积。

1.2 四频无电离层双组合模型(QF1)

四频观测值可以组合出多种双频无电离层观测值, 为了保证 BDS 和 Galileo 模型的一致性, 笔者使用了两组双频无电离层组合(即 b_1/b_2 和 b_3/b_4 , b_i 表示第 i 频率观测值)。相比于 BDS 卫星, BDS-2 卫星缺少四频观测值, 这里只使用 b_1/b_2 无电离层组合观测值。本文统一用 QF1 表示该模型, 其线性观测方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_{QF1} \\ \Phi_{QF1} \end{bmatrix} = [\mathbf{e}_4 \otimes \mathbf{B}, \mathbf{e}_2^T \otimes \mathbf{e}_4 \otimes \mathbf{e}_m, \mathbf{n}_4 \otimes \mathbf{I}_m, \mathbf{n}_2 \otimes \mathbf{C} \otimes \mathbf{I}_m] \begin{bmatrix} \mathbf{x} \\ \bar{d}t_r \\ \text{isb} \\ \mathbf{t}_{IFB_{QF1}} \\ \mathbf{a} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_{P,QF1} \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{\Phi,QF1} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1,2}^T \cdot (\mathbf{q}' \otimes c_P) \cdot \mathbf{f}_{1,2} \\ \mathbf{f}_{3,4}^T \cdot (\mathbf{q}'' \otimes c_P) \cdot \mathbf{f}_{3,4} \\ \mathbf{f}_{1,2}^T \cdot (\mathbf{q}' \otimes c_\Phi) \cdot \mathbf{f}_{1,2} \\ \mathbf{f}_{3,4}^T \cdot (\mathbf{q}'' \otimes c_\Phi) \cdot \mathbf{f}_{3,4} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{Q}_m \quad (2)$$

式中, $\mathbf{q}'' = \text{diag}(q_3^2, q_4^2)$; $\mathbf{t}_{IFB_{QF1}}$ 表示 QF1 模型中估计的频内偏差(inter-frequency bias, IFB)向量, IFB 参数可以消除不同接收机未校准伪距延迟(uncalibrated code delay, UCD)组合的不一致性; $\mathbf{n}_4 = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]^T$; $\mathbf{a}'^T = [\mathbf{a}'_1 \quad \mathbf{a}'_2 \quad \mathbf{a}'_3 \quad \mathbf{a}'_4]$; $\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{1,2}^T \cdot \mathbf{\Lambda}_{1,2} & \\ & \mathbf{f}_{3,4}^T \cdot \mathbf{\Lambda}_{3,4} \end{bmatrix}^0$ 。

1.3 四频无电离层组合模型(QF2)

四频观测值可以根据几何距离不变, 无电离层和最小噪声构造一组四频组合模型, 本文用

QF2 表示该模型。假设四频观测值噪声为 $q_1: q_2: q_3: q_4$, 确定四频组合系数 $\mathbf{k}^T = [k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_4]$ 的准则可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{e}_4^T \cdot \mathbf{k} &= 1 \\ \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{k} &= 0 \\ F &= \mathbf{k}^T \cdot \mathbf{q} \cdot \mathbf{k} = \min \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $\mathbf{u} = [1 \quad u_2 \quad u_3 \quad u_4]^T$, 其中 $\mathbf{u}_k = (f_1/f_k)^2$, ($k = 2, 3, 4$) 表示频率相关乘数因子向量; $\mathbf{q} = \text{diag}(q_1^2, q_2^2, q_3^2, q_4^2)$ 。

因此, QF2 模型的组合系数可以表示为

$$k \begin{bmatrix} \frac{(u_2 - u_2^2) \cdot q_3^2 \cdot q_4^2 + (u_3 - u_3^2) \cdot q_2^2 \cdot q_4^2 + (u_4 - u_4^2) \cdot q_2^2 \cdot q_3^2}{-q_3^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_2 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - 1)^2 - q_1^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_2^2 \cdot (u_4 - u_3)^2} \\ \frac{(u_2 - 1) \cdot q_3^2 \cdot q_4^2 + (u_2 \cdot u_3 - u_3^2) \cdot q_1^2 \cdot q_4^2 + (u_2 \cdot u_4 - u_4^2) \cdot q_1^2 \cdot q_3^2}{-q_3^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_2 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - 1)^2 - q_1^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_2^2 \cdot (u_4 - u_3)^2} \\ \frac{(u_3 - 1) \cdot q_2^2 \cdot q_4^2 + (u_2 \cdot u_3 - u_2^2) \cdot q_1^2 \cdot q_4^2 + (u_3 \cdot u_4 - u_4^2) \cdot q_1^2 \cdot q_2^2}{-q_3^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_2 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - 1)^2 - q_1^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_2^2 \cdot (u_4 - u_3)^2} \\ \frac{(u_4 - 1) \cdot q_2^2 \cdot q_3^2 + (u_2 \cdot u_4 - u_2^2) \cdot q_1^2 \cdot q_3^2 + (u_3 \cdot u_4 - u_3^2) \cdot q_1^2 \cdot q_2^2}{-q_3^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_2 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - 1)^2 - q_2^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - 1)^2 - q_1^2 \cdot q_4^2 \cdot (u_3 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_3^2 \cdot (u_4 - u_2)^2 - q_1^2 \cdot q_2^2 \cdot (u_4 - u_3)^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

特别地,对于 BDS-2,本文使用 BDS-2 b_1/b_2 参数。不考虑这种情况时,QF2 模型可以表示为无电离层组合观测值,在此情形下,需要估计 IFB

$$\begin{bmatrix} P_{QF2} \\ \Phi_{QF2} \end{bmatrix} = [e_2 \otimes B, e_2^T \otimes e_2 \otimes e_m, n_2 \otimes (k^T \cdot \Lambda_{1,2,3,4} \otimes I_m) \cdot a] \begin{bmatrix} x \\ dt_r \\ isb \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{P,QF2} \\ \epsilon_{\Phi,QF2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} k^T \cdot (q \otimes c_p) \cdot k \\ k^T \cdot (q \otimes c_\phi) \cdot k \end{bmatrix} \otimes Q_m$$

式中, $\Lambda_{1,2,3,4} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4)$ 。

1.4 四频非差非组合模型(QF3)

四频非差非组合模型将斜电离层当作未知参

数解算,本文用 QF3 表示。QF3 模型的线性观测方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} P_{QF3} \\ \Phi_{QF3} \end{bmatrix} = [e_8 \otimes B, e_2^T \otimes e_8 \otimes e_m, n'_2 \otimes n'_4 \otimes I_m, n''_2 \otimes u \otimes I_m, n_2 \otimes \Lambda_{1,2,3,4} \otimes I] \begin{bmatrix} x \\ dt_r \\ isb \\ t_{IFBQF3} \\ \tau \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{P,QF3} \\ \epsilon_{\Phi,QF3} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} q \otimes c_p \\ q \otimes c_\phi \end{bmatrix} \otimes Q_m$$

式中, t_{IFBQF3} 表示 QF3 模型估计的 IFB 向量,分别用来消除第 3 和第 4 频点上的伪距观测值偏差影响; τ 表示估计的斜电离层向量,其值掺杂了 b_1/b_2 接收机差分码偏差值(differential code bias, DCB); $n'_4 = [0 \ 0 \ 1 \ 1]^T$; $n'_2 = [1 \ 0]^T$; $n''_2 = [1 \ -1]^T$ 。

1.5 附加电离层约束四频非差非组合模型(QF4)

基于原始观测值的灵活性,利用外部电离层产品如全球电离层格网(global ionosphere map, GIM)或电离层物理机制可以对电离层观测值附加外部约束,本文用 QF4 表示附加电离层约束四频非差非组合模型,其线性观测方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} P_{QF4} \\ \Phi_{QF4} \\ \tau_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_8 \otimes B & e_2^T \otimes e_8 \otimes e_m & n'_2 \otimes n'_4 \otimes I_m & n''_2 \otimes n''_4 \otimes I_m & n''_2 \otimes u \otimes I_m & n_2 \otimes \Lambda_{1,2,3,4} \otimes I_m \\ O & O & O & O & I_m & O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ dt_r \\ isb \\ t_{IFBQF4} \\ DCB \\ \tau \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{P,QF4} \\ \epsilon_{\Phi,QF4} \\ \epsilon_\tau \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \otimes c_p \\ q \otimes c_\phi \\ \sigma_\tau^2 \end{bmatrix} \otimes Q_m \quad (7)$$

式中, $t_{\text{IFB}_{\text{QF4}}}$ 表示 QF4 模型估计的 IFB 向量; DCB 表示接收机 b_1/b_2 DCB 值; $n''_4 = [\beta_{(1,2)} \quad -\alpha_{(1,2)} \quad u_3 \cdot \beta_{(1,2)} \quad u_4 \cdot \beta_{(1,2)}]^T$; τ_0 表示电离层先验观测值向量; ε_r 表示电离层先验观测值精度向量; σ_r 表示电离层先验方差; 在 QF4 模型中, 为了获取纯净的电离层观测值, 需要额外估计接收机 DCB 值将其有效分离。

1.6 PPP 模型理论比较

为了证明 QF1, QF2 和 QF3 模型的一致性, 首先引入等价性原则^[16-17]:

分别使用包含 $n-t$ 和 t 个参数的向量 x_1 和 x_2 , 即

$$y = A_1 \cdot x_1 + A_2 \cdot x_2 + \varepsilon, Q \quad (8)$$

通过最小二乘方法, 可以得到 \hat{x}_1 向量的估值为

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}_1 &= [A_1^T \cdot (I - Q^{-1} \cdot A_2 \cdot N_{22}^{-1} \cdot A_2^T) \cdot \\ &Q^{-1} \cdot A_1]^{-1} \cdot A_1^T \cdot (I - Q^{-1} \cdot A_2 \cdot \\ &N_{22}^{-1} \cdot A_2^T) \cdot Q^{-1} \cdot y \\ Q_{\hat{x}_1 \hat{x}_1} &= (A_1^T \cdot (I - Q^{-1} \cdot A_2 \cdot N_{22}^{-1} \cdot A_2^T) \cdot \\ &Q^{-1} \cdot A_1)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

若存在转换矩阵 T 满足以下条件

$$\left. \begin{aligned} T^T \cdot A_2 &= 0 \\ \text{rank}(T) \cdot A_2 &= n - t \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

则观测值向量也可以表示为

$$y' = T^T \cdot y = T^T \cdot A_1 \cdot x'_1 + T^T \cdot \varepsilon, T^T \cdot Q \cdot T \quad (11)$$

因此, \hat{x}'_1 也可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}'_1 &= [A_1^T \cdot T \cdot (T^T \cdot Q \cdot T)^{-1} \cdot T^T \cdot A_1]^{-1} \cdot \\ &A_1^T \cdot T \cdot (T^T \cdot Q \cdot T)^{-1} \cdot T^T \cdot y \\ Q_{\hat{x}'_1 \hat{x}'_1} &= [A_1^T \cdot T \cdot (T^T \cdot Q \cdot T)^{-1} \cdot T^T \cdot A_1]^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

由上式可以看出, 式(9)和式(12)是否等价取决于是否存在转换矩阵 T 。

文献[18]证明了差分和非差观测值在理论上是等价的。为了将观测值向量简化以及消除接收机端伪距和相位硬件延迟, 本文使用星间单差 (between-satellite single-difference, BSSD) 观测值表示 QF1, QF2 和 QF3 模型。其中, QF3 模型的 BSSD 观测值可以表示为

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= [e_8 \otimes B, e_8 \otimes e_m, n_2 \otimes A_{1,2,3,4} \otimes I_m] \\ A_2 &= [n''_4 \otimes u \otimes I_m] \\ x_1 &= [x, dt_r, a]^T \\ x_2 &= \tau \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

而对于 QF1 和 QF2 模型, 满足式(10)条件的转换矩阵分别可以表示为

$$\left. \begin{aligned} T_{\text{QF1}}^T &= \left[\begin{array}{c} f_{1,2}^T \\ f_{3,4}^T \end{array} \right] \otimes I_m \\ T_{\text{QF2}}^T &= k^T \otimes I_m \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

因此, 可以认为 QF1, QF2 和 QF3 模型理论上是等价的。也就是说, 当 3 个 PPP 模型方差协方差矩阵遵循误差传播率, 3 个模型性能在定位误差收敛后会表现一致。由于对 QF4 模型附加了电离层外部约束, QF4 模型性能会受到影响。

本文假定伪距和相位观测值先验噪声一样并且互不相关。表 1 提供了对应的 PPP 模型特性, 包括模型类型、观测值、组合系数, 相对于 BDS B1I 电离层系数和噪声放大系数。其中, QF2 模型四频无电离层组合放大噪声系数最小, 而在缺失某一频率的情况下, QF3 和 QF4 模型数据处理更加灵活。

2 数据处理策略

表 2 给出了 BDS/Galileo PPP 详细数据策略。本文着重分析了 BDS/Galileo 双频和四频 PPP 定位性能, 此外, 本文比较了 BDS-2 双频 PPP 的定位性能, 并分析了 BDS 单系统和 Galileo 单系统以及 BDS/Galileo 静态, 仿动态以及动态 PPP 的定位性能。其中, BDS-2 GEO 和 MEO/IGSO 权重比值设置为 $1 : 10$ ^[19]。为了减弱 BDS-2 和 BDS-3 之间存在的时间延迟偏差的影响 (receiver time delay bias, TDB), 本文将 BDS-2 和 BDS-3 MEO 卫星观测值权重设置为 $1 : 3$, Galileo 卫星和 BDS-3 MEO 卫星观测值权重设置为 $2 : 1$, 伪距和相位观测值权重比为 $100 : 1$ ^[20]。电离层先验观测值的定权方法参考文献[21]。

3 BDS/Galileo PPP 性能分析

3.1 BDS 伪距观测值数据质量分析

伪距噪声是由连续独立的钟跳导致的。多路径组合 (multipath combination, MPC) 可以分析不同频率观测值的多路径和伪距噪声状况, 它是通过单频伪距和双频相位观测值构建而成, 可以表示为式(15)^[29]

$$\left. \begin{aligned} \text{MPC}_i &= p_i + (\beta_{(i,j)} - \alpha_{(i,j)}) \cdot l_i - 2 \cdot \beta_{(i,j)} \cdot l_i \\ \text{MPC}_j &= p_j - 2 \cdot \alpha_{(i,j)} \cdot l_i + (\alpha_{(i,j)} - \beta_{(i,j)}) \cdot l_j \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中, p_j 和 l_j 表示原始伪距和相位观测值; MPC 延迟以及伪距噪声。包含载波相位整周模糊度、接收机端伪距和相位

表 1 BDS/Galileo 双频和四频 PPP 模型比较

Tab.1 Comparison of BDS/Galileo dual- and quad-frequency PPP models

模型	观测值	e_1	e_2	e_3	e_4	电离层系数	噪声
DF;C	B1I/B3I	2.944	-1.944	0.000	0.000	0.000	3.528
DF;E	E1/E5a	2.261	-1.261	0.000	0.000	0.000	2.588
QF1: C	B1I/B3I	2.944	-1.944	0.000	0.000	0.000	3.528
	B1C/B2a	0.000	0.000	2.261	-1.261	0.000	2.588
QF1: E	E1/E5a	2.261	-1.261	0.000	0.000	0.000	2.588
	E5b/E5	0.000	0.000	39.585	-38.585	0.000	55.279
QF2: C	B1I/B3I/B1C/B2a	1.171	-0.336	1.224	-1.058	0.000	2.025
	B1I/B3I	2.944	-1.944	0.000	0.000	0.000	3.528
QF2: E	E1/E5a/E5b/E5	2.317	-0.606	-0.274	-0.437	0.000	2.450
	B1I	1.000	0.000	0.000	0.000	1.000	1.000
QF3/QF4: C	B3I	0.000	1.000	0.000	0.000	1.514	1.000
	B1C	0.000	0.000	1.000	0.000	0.982	1.000
	B2a	0.000	0.000	0.000	1.000	1.761	1.000
	E1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.982	1.000
QF3/QF4: E	E5a	0.000	1.000	0.000	0.000	1.761	1.000
	E5b	0.000	0.000	1.000	0.000	1.672	1.000
	E5	0.000	0.000	0.000	1.000	1.716	1.000

表 2 BDS/Galileo PPP 处理策略

Tab.2 BDS/Galileo PPP processing strategies

项目	方案
模型	BDS(BDS-2 + BDS-3) 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统 DF、QF1、QF2、QF3、QF4 模型
截止高度角	7°
卫星轨道	武汉大学精密轨道产品 ^[22]
卫星钟差	武汉大学精密钟差产品 ^[22]
卫星 DCB	多系统试验网(Multi-GNSS Experiment, MGEX)提供值
地球自转	模型参考文献 ^[23]
相对论效应	模型参考文献 ^[24]
天线相位缠绕	模型参考文献 ^[25]
潮汐影响	固体潮, 极潮和海洋潮模型 ^[23]
卫星和接收机天线	MGEX 参考值
测站坐标	静态 PPP: 常数估计
	动态 PPP: 白噪声估计(100 m ²)
接收机钟差	白噪声估计(10 ⁵ m ² /s)
对流层延迟	干延迟: GPT3 和改进的 Hopfield 模型;
	湿延迟: 随机游走估计(10 ⁻⁹ m ² /s), VMF3 投影函数 ^[26-28]
接收机 DCB 和 IFB	接收机钟差吸收或常数估计
电离层延迟	无电离层组合消除电离层一阶项或白噪声估计(10 ⁴ m ² /s)
模糊度	常数估计

(international GNSS continuous Monitoring and Assessment System, iGMAS) XIA3 站观测到的 BDS 和 MGEX AREG 站观测到的 Galileo 四频观测值 MPC 标准差(standard deviation, STD)。对于 BDS 卫星, BDS-2 GEO 卫星 MPC 噪声略小于 BDS-2 IGSO 和 MEO 卫星, BDS-3 MEO 卫星伪距噪声整体上要小于 BDS-2 MEO 卫星; BDS-2 卫星 B1I 伪距噪声整体上要大于 B3I 信号, BDS-3 B1C 和 B2a 新频点伪距噪声要略大于 B1I 和 B3I 信号。而对于 Galileo 卫星来说, 不同 Galileo 卫星的伪距噪声基本上一致, Galileo 卫星 4 个频率上的伪距噪声相差并不明显。

3.2 BDS/Galileo 静态 PPP

为了保证能够观测到足够的 BDS 和 Galileo 卫星多频数据, 本文选取了 2020 年年积日(day of year, DOY)1 到 31 号 10 组 MGEX 测站进行 BDS/Galileo PPP 测试。所选的 MGEX 测站可以观测到 BDS-3 四频观测值以及可以观测到 Galileo 四频观测值。表 3 提供了所选测站的基本信息, 包括测站名、接收机类型和天线类型。对于 10 组测站, 分别分析了 BDS(BDS-2 + BDS-3) 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型性能。

图 1 给出了国际 GNSS 连续监测和评估系统

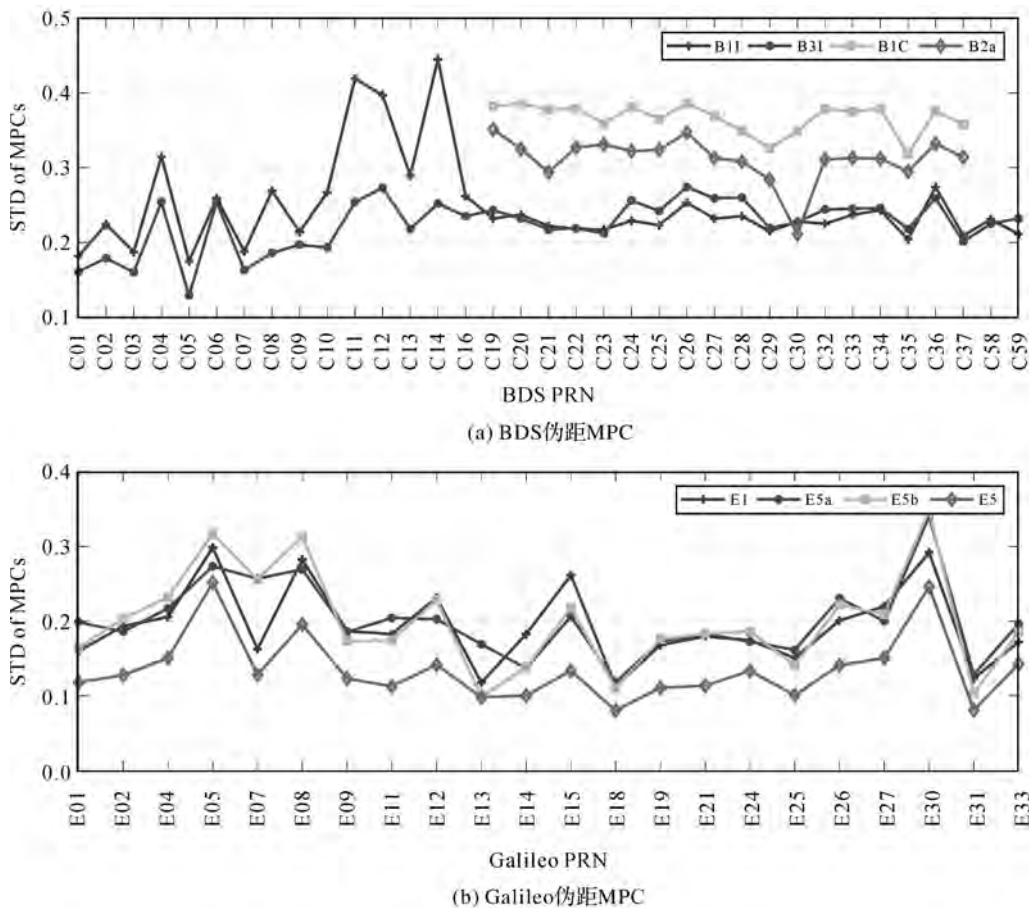


图 1 BDS 和 Galileo 伪距 MPC STD

Fig.1 STDs of the BDS and Galileo pseudorange MPCs

表 3 所选 MGEX 测站信息

Tab.3 Information of the selected MGEX stations

测站名	接收机类型	天线类型
BRST,LMMF	Trimble Alloy	TRM57971.00
CEBR,KIRU,KOUR、 NNOR,REDU	SEPT POLARX5	SEPCHOKE_ B3E6
FAA1,MAS1,MGUE	SEPT POLARX5	LEIAR25.R4

以 MGEX 站 BRST (DOY: 1, 2020) 为例, 图 2 给出了 BDS 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统 PPP 模型定位误差。对应地, 图 3 给出了该测站 BDS, Galileo 和 BDS/Galileo 观测卫星数量和位置精度因子 (position dilution of precision, PDOP) 值。其中, BDS、Galileo 和 BDS/Galileo 平均观测卫星数量为 6.7、6.9 和 13.7, 对应平均 PDOP 值分别为 2.7、2.2 和 1.4。由于使用了更多卫星观测值, 相比于单系统 PPP, 双系统多频 PPP 性能得到显著提升。对于 BDS/Galileo 静态 PPP 而言, 定位误差收敛后在北、东和天顶方向的精度可以达到厘米级。QF1、

QF2 和 QF3 模型定位性能基本一致。通过引入外部电离层模型 GIM 约束电离层参数, QF4 模型性能一定程度上会受到影响。

图 4 和图 5 阐明了 BDS 单系统、Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统静态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型收敛时间以及三维定位误差均方根误差 (root mean square, RMS) 箱型图, 收敛标准为当前历元和接下来 20 个历元定位误差小于 0.1 m。每个箱型图有 5 条直线, 从底部到顶部分别代表 0%、25%、50%、75% 和 100% 分位数。每个图也提供了统计值的中位数和平均值。由图可知, QF1、QF2 和 QF3 模型性能基本上一致, 如 BDS PPP 3 个模型平均收敛时间分别为 61.8、61.6 和 62.5 min。相比于 Galileo 单系统 PPP, BDS 单系统 PPP 收敛时间较长, 随着 BDS 系统全面建设完成以及 BDS 系统轨道和钟差产品的逐步完善, BDS PPP 性能将逐步提高。对于静态 PPP 而言, 四频 PPP 模型要优于双频 PPP 模型。通过附加外部电离层约束, BDS 四频 PPP 性能得

到提升,BDS QF4 模型相比于 QF1、QF2 和 QF3 模型平均收敛时间分别减少了 4.4%、4.4% 和 5.4%。而对于 Galileo PPP 模型,附加电离层约束会导致收敛时间变长,如 Galileo Q4 模型相比于 Q3 模型平均收敛时间增加了 16.8 min,这是由于初始阶段 GIM 模型精度较低造成的。对于 BDS/Galileo 双系统 PPP 模型,其收敛时间和定位精度要明显优于 BDS 和 Galileo 单系统 PPP。

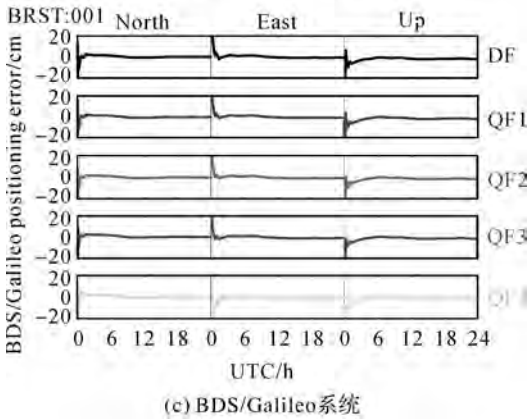
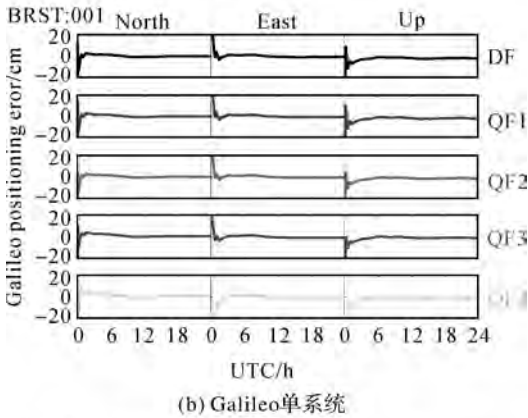
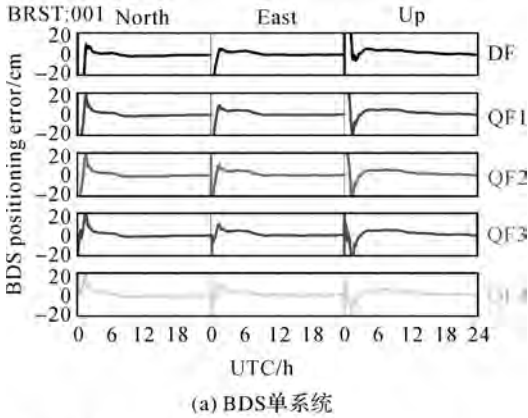


图 2 MGEX 站 BRST (DOY: 1, 2020) BDS 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 静态 PPP 定位误差
Fig.2 Positioning error of BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo static PPP models for the MGEX station BRST (DOY:1, 2020)

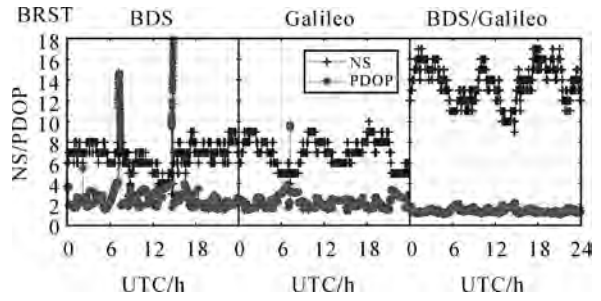


图 3 MGEX 站 BRST BDS 和 Galileo 观测卫星数以及对应 PDOP 值
Fig. 3 Number of BDS and Galileo satellites and corresponding PDOP values at station BRST

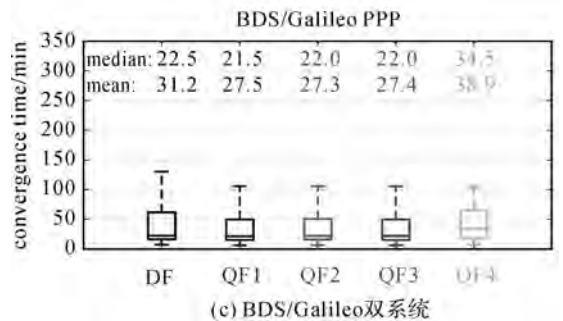
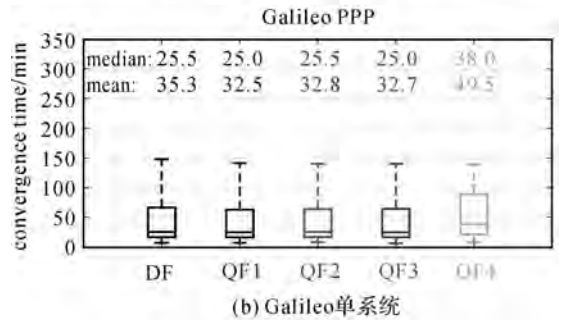
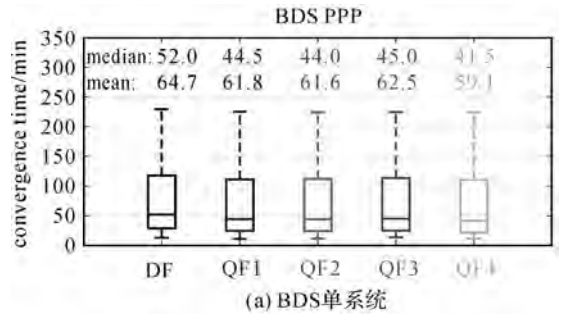


图 4 BDS 单系统、Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统静态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型收敛时间
Fig.4 Convergence time of BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo static PPP with DF, QF1, QF2, QF3 and QF4 schemes

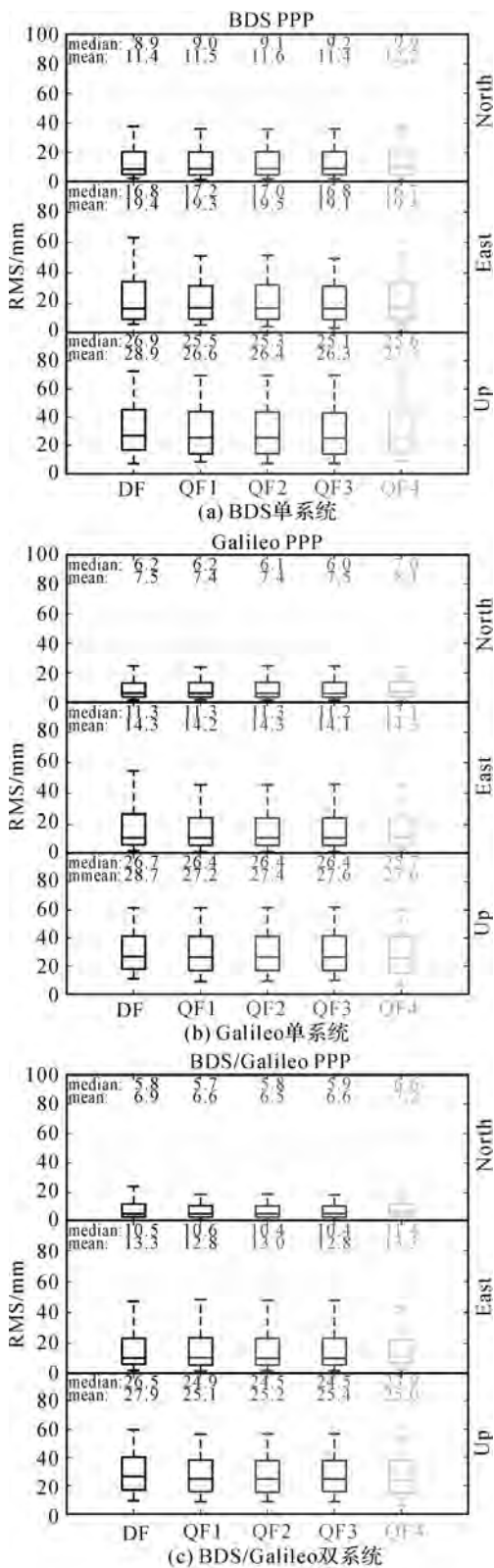


图 5 BDS 单系统、Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统静态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型三维定位精度

Fig.5 Three-dimensional positioning accuracy of BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo static PPP with DF, QF1, QF2, QF3 and QF4 schemes

3.3 BDS/Galileo 动态 PPP

本文对选取的 MGEX 测站进行了多频仿动态 PPP 测试。图 6 给出了 2020 年 DOY 3 号 LMMF 站 BDS 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统仿动态 PPP 定位误差, 从图中可以看出, PPP 模型定位精度在收敛后可以达到厘米级, 当卫星数量不足或卫星分布较差时, 定位精度会达到分米级。同样, 图 7 和图 8 给出了 BDS 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统仿动态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型收敛时间以及定位误差 RMS 箱型图。相比于静态 PPP, 仿动态 PPP 的收敛时间要明显变长, 四频观测值对仿动态 PPP 性能的提升要更加明显, 如 BDS QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型相比于 QF1 模型收敛时间分别减少了 23.5%、21.9%、19.7% 和 5.7%。水平方向上, BDS 和 Galileo PPP 模型精度能达到厘米级, 而在高程上, BDS 单系统 PPP 模型精度在厘米级到分米级, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统 PPP 精度在厘米级。

为了验证 BDS/Galileo 实测动态 PPP 的定位性能, 笔者于 2019 年 12 月 26 日在南京信息工程大学校园进行了动态试验。整个试验过程持续了 2 h 以上, 数据采样率为 1 Hz。图 9 给出了移动站轨迹和参考站位置。两台接收机都配备了 Trimble Alloy 接收机, 天线类型为 TRM57971.00。移动站接收机在静置超过 30 min 后, 试验者手持接收机开始在操场移动, 以模糊度固定双差 RTK 的结果当作动态 PPP 分析的真值, 在整个试验过程中, 基线的长度一直小于 400 m。

图 10 给出了 BDS 单系统, Galileo 单系统以及 BDS/Galileo 双系统 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型相对于 RTK 参考值的定位误差。为了便于比较, 本文也分析了 BDS-2 DF 模型的性能。表 4 给出了对应 PPP 模型的 RMS 统计值。由于初始阶段移动站处于静止状态并且定位结果并未收敛, 本文使用了最后 90 min 的结果进行统计。从图 10 和表 4 可以看出, BDS-2 双频 PPP 定位精度明显差于 BDS 双频和四频 PPP 定位结果, 尤其在高程方向上表现更明显。对于动态 PPP 而言, 四频 PPP 定位精度要明显优于双频 PPP, 在这一点上 Galileo PPP 比 BDS PPP 表现的更明显。对于四频 QF1、QF2 和 QF3 模型, 差异主要表现在初始阶段, 这主要是参数化差异和噪声水平导致而成。比如, 对于 QF3 模型而言, 它需要

更长的收敛时间来有效分离出斜电离层延迟和模糊度参数。通过附加外部电离层参数约束, BDS QF4 模型在北和东方向上的精度产生了较大变化, BDS 和 Galileo 单系统 QF4 动态模型三维精度得到轻微的提升, 如相比于 QF1 模型, BDS 和 Galileo QF4 模型三维精度分别提高 11.4% 和 31.4%。此外, 由于使用了更多的观测卫星, 双系统动态 PPP 定位性能要明显优于单系统。

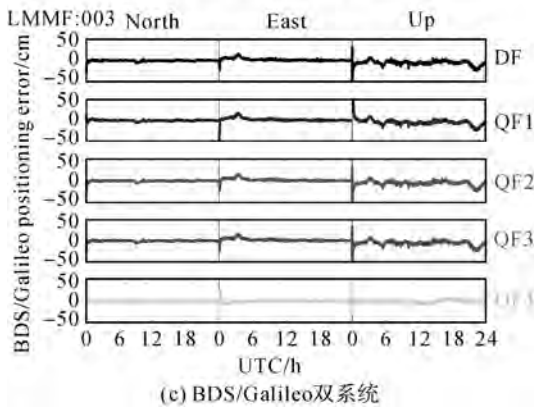
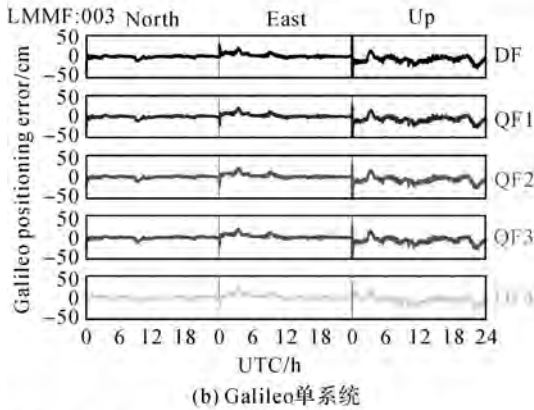
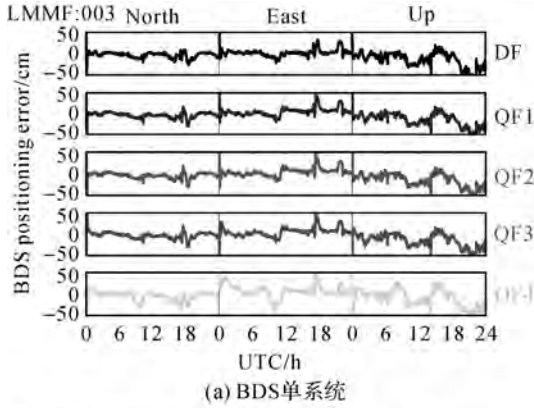
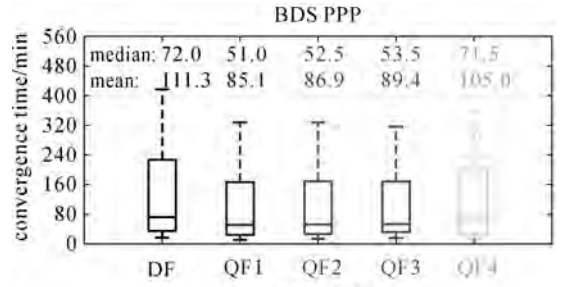
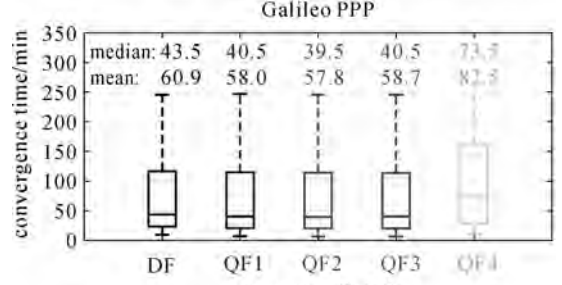


图 6 MGEX 站 LMMF (DOY: 3, 2020) BDS 单系统, Galileo 单系统和 BDS/Galileo 仿动态 PPP 定位误差

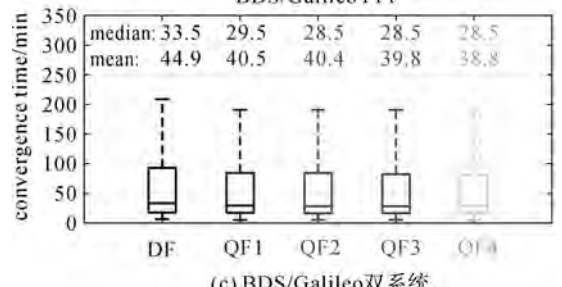
Fig.6 Positioning error of BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo simulated kinematic PPP models for the MGEX station LMMG (DOY: 3, 2020)



(a) BDS单系统



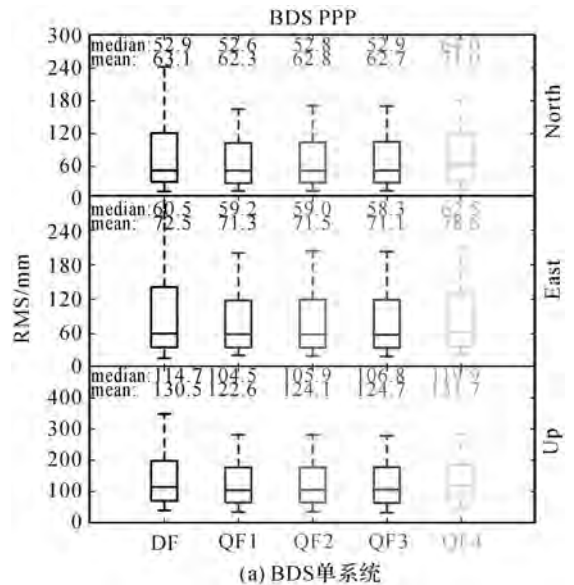
(b) Galileo单系统



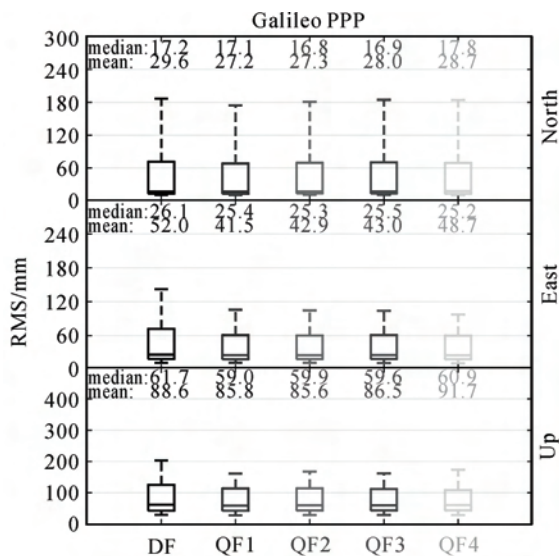
(c) BDS/Galileo双系统

图 7 BDS 单系统、Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统仿动态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型收敛时间

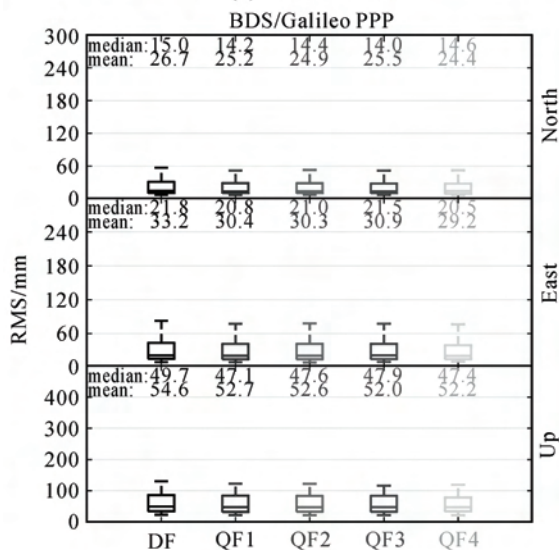
Fig.7 Convergence time of BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo simulated kinematic PPP with DF、QF1、QF2、QF3 and QF4 schemes



(a) BDS单系统



(b) Galileo单系统



(c) BDS/Galileo双系统

图 8 BDS 单系统、Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统仿动态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型三维定位精度

Fig.8 Three-dimensional positioning accuracy of BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo simulated kinematic PPP with DF, QF1, QF2, QF3 and QF4 schemes

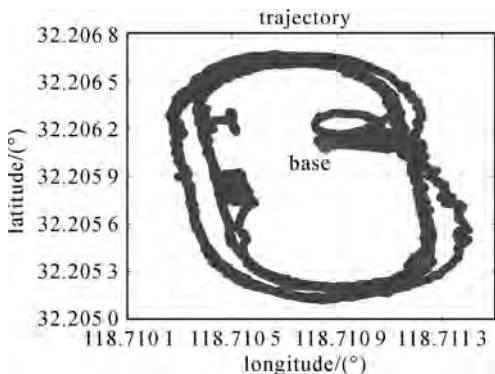
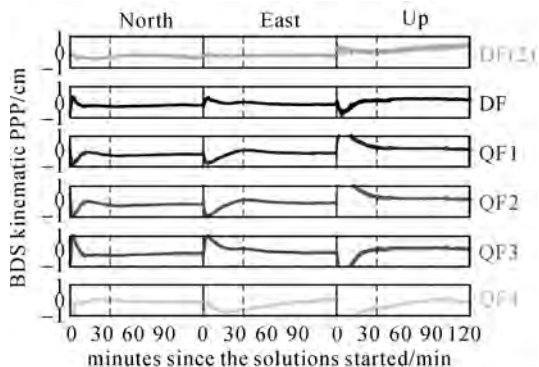
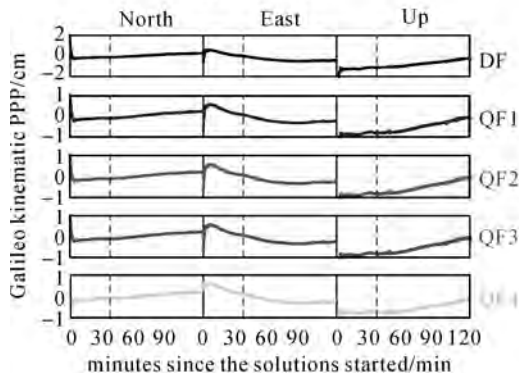


图 9 移动站轨迹和参考站位置

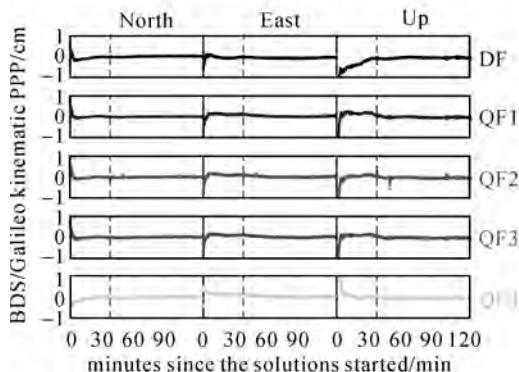
Fig.9 Trajectory of the rover station and the location of the reference station



(a) BDS单系统



(b) Galileo单系统



(c) BDS/Galileo双系统

图 10 BDS 单系统、Galileo 单系统以及 BDS/Galileo 双系统动态 DF、QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型三维定位误差

Fig.10 BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo kinematic PPP positioning errors for DF, QF1, QF2, QF3 and QF4 models in the north, east and up components

4 结 论

本文提出了 4 种 BDS/Galileo 四频 PPP 模型,即 QF1、QF2、QF3 和 QF4 模型,并用等价性原则证明了 QF1、QF2 和 QF3 模型的等价性。本文通过实例数据分析得到了以下结论:

- (1) BDS-2 GEO 卫星 MPC 噪声略小于 BDS-2 IGSO 和 MEO 卫星,BDS-3 MEO 卫星仿

距噪声整体上要小于 BDS-2 MEO 卫星。不同 Galileo 卫星的伪距噪声基本上一致, Galileo 卫星 4 个频率上的伪距噪声相差并不明显。

表 4 BDS 单系统、Galileo 单系统和 BDS/Galileo 双系统 PPP 定位误差

Tab. 4 Accuracy of positioning error for the BDS-only, Galileo-only and BDS/Galileo kinematic PPP models

RMS/cm	北	东	天顶	3D
C2 DF	24.0	20.0	28.1	42.0
C DF	21.3	13.3	19.2	31.6
C QF1	21.5	10.0	16.9	29.1
C QF2	21.7	9.7	17.0	29.2
C QF3	21.7	9.9	16.0	28.7
C QF4	9.0	21.6	15.5	28.0
E DF	14.7	43.4	72.6	85.9
E QF1	12.7	26.5	52.6	60.1
E QF2	12.7	26.5	52.5	60.1
E QF3	12.8	26.7	52.5	60.1
E QF4	12.3	23.8	52.5	58.9
CE DF	1.7	7.1	7.0	10.1
CE QF1	1.3	2.7	4.0	5.0
CE QF2	1.3	2.5	4.4	5.2
CE QF3	1.3	2.4	4.2	5.0
CE QF4	1.6	3.6	5.1	6.5

(2) 对于 BDS/Galileo 静态和仿动态 PPP, QF1、QF2 和 QF3 模型性能基本上一致, 通过附加外部电离层约束, 四频 PPP 模型性能受到不同程度上的影响, BDS 静态 QF4 模型相比于 QF1、QF2 和 QF3 模型平均收敛时间分别减少了 4.4%、4.4% 和 5.4%, Galileo 静态 Q4 模型相比于 Q3 模型平均收敛时间增加了 16.8 min。

(3) 对于 BDS/Galileo 动态 PPP, 四频 PPP 定位精度要明显优于双频 PPP。QF1、QF2 和 QF3 模型的差异主要表现在初始阶段。通过附加外部电离层参数约束, 四频 PPP 模型性能得到轻微提升, 相比于 QF1 模型, BDS 和 Galileo QF4 模型三维精度分别提高 11.4% 和 31.4%。BDS/Galileo 双系统动态 PPP 性能要优于单系统 PPP。

参考文献:

- JIN Shuanggen, SU Ke. Co-seismic displacement and waveforms of the 2018 Alaska earthquake from high-rate GPS PPP velocity estimation[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1559-1569.
- ZAVOROTNY V U, GLEASON S, CARDELLACH E, et al. Tutorial on remote sensing using GNSS bistatic radar of opportunity[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2014, 2(4): 8-45.
- PÍRIZ R, GARCÍA Á M, TOBIAS G, et al. GNSS interoperability: offset between reference time scales and timing biases[J]. Metrologia, 2008, 45(6): S87.
- LI X X, LI X, YUAN Y, et al. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo[J]. Journal of Geodesy, 2018, 92(6): 579-608.
- YANG Y, MAO Y, SUN B. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satellite system [J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 1-8.
- 陈秋丽, 杨慧, 陈忠贵, 等. 北斗卫星太阳光压解析模型建立及应用[J]. 测绘学报, 2019, 48(2): 169-175. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180097.
- CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellite [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(2): 169-175. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180097.
- DISSONGO T H, SCHÜLER T, JUNKER S. Precise position determination using a Galileo E5 single-frequency receiver[J]. GPS Solutions, 2014, 18(1): 73-83.
- ZUMBERGE J F, HEFLIN M B, JEFFERSON D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102(B3): 5005-5017.
- GUO Fei, ZHANG Xiaohong, WANG Jinling, et al. Modeling and assessment of triple-frequency BDS precise point positioning [J]. Journal of Geodesy, 2016, 90(11): 1223-1235.
- LOU Yidong, ZHENG Fu, GU Shengfeng, et al. Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models[J]. GPS Solutions, 2016, 20(4): 849-862.
- ZHANG Zhiteng, LI Bofeng, NIE Liangwei, et al. Initial assessment of BeiDou-3 global navigation satellite system: signal quality, RTK and PPP[J]. GPS Solutions, 2019, 23(4): 111.
- JIAO Guoqiang, SONG Shuli, GE Yulong, et al. Assessment of BeiDou-3 and multi-GNSS precise point positioning performance[J]. Sensors, 2019, 19(11): 2496.
- JIN Shuanggen, SU Ke. PPP models and performances from single- to quad-frequency BDS observations[J]. Satellite Navigation, 2020, 1(1): 16.
- ZHANG Pengfei, TU Rui, GAO Yuping, et al. Performance of Galileo precise time and frequency transfer models using quad-frequency carrier phase observations[J]. GPS Solutions, 2020, 24(2): 40.
- LEICK A, RAPOPORT L, TATARNIKOV D. GPS satellite surveying[M]. 4th ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

- [16] CLOSAS P, FERNÁNDEZ-PRADES C, FERNÁNDEZ-RUBIO J A. Maximum likelihood estimation of position in GNSS[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2007, 14(5): 359-362.
- [17] 李博峰, 葛海波, 沈云中. 无电离层组合、Uofc 和非组合精密单点定位观测模型比较[J]. *测绘学报*, 2015, 44(7): 734-740. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140161.
LI Bofeng, GE Haibo, SHEN Yunzhong. Comparison of ionosphere-free, UofC and uncombined PPP observation models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(7): 734-740. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140161.
- [18] XU Guochang, XU Yan. GPS: theory, algorithms and applications[M]. 3rd ed. Berlin Heidelberg: Springer, 2016.
- [19] SU Ke, JIN Shuanggen, GE Yulong. Rapid displacement determination with a stand-alone multi-GNSS receiver: GPS, BeiDou, GLONASS, and Galileo [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(2): 54.
- [20] SU Ke, JIN Shuanggen. Triple-frequency carrier phase precise time and frequency transfer models for BDS-3[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 86.
- [21] SU Ke, JIN Shuanggen, HOQUE M M. Evaluation of ionospheric delay effects on multi-GNSS positioning performance[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(2): 171.
- [22] WANG Chen, ZHAO Qile, GUO Jing, et al. The contribution of intersatellite links to BDS-3 orbit determination: Model refinement and comparisons[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 71-82.
- [23] LI Z, WANG N, WANG L, et al. Regional ionospheric TEC modeling based on a two-layer spherical harmonic approximation for real-time single-frequency PPP [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1659-1671.
- [24] LIU T, YUAN Y, ZHANG B, et al. Multi-GNSS precise point positioning (MGPPP) using raw observations[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(3): 253-268.
- [25] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase [C] // *Astrodynamics 1991, Proceedings of the AAS/AIAA Astrodynamics Conference*. San Diego, CA: Univelt, Inc., 1992: 1647-1660.
- [26] SU Ke, JIN Shuanggen. Improvement of multi-GNSS precise point positioning performances with real meteorological data [J]. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(6): 1363-1380.
- [27] LANDSKRON D, BÖHM J. VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 349-360.
- [28] FAN Haopeng, SUN Zhongmiao, ZHANG Liping, et al. A two-step estimation method of troposphere delay with consideration of mapping function errors[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(1): 76-84. DOI: 10.11947/j.JGGS.2020.0108.
- [29] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK O, SLEEWAEGEN J M, et al. Characterization of compass M-1 signals[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1): 117-126.

(责任编辑:陈品馨)

收稿日期: 2020-06-12

修回日期: 2020-08-21

第一作者简介: 苏珂(1994—),男,博士生,研究方向为GNSS 导航定位与应用。

First author: SU Ke (1994—), male, PhD candidate, majors in the GNSS satellite navigation positioning and applications.

E-mail: ksu@shao.ac.cn

通信作者: 金双根

Corresponding author: JIN Shuanggen

E-mail: sgjin@shao.ac.cn

引文格式: 汉牟田, 杨毅, 张波. GNSS 信号土壤衰减模型的试验验证方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1202-1212. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20200259.

HAN Mutian, YANG Yi, ZHANG Bo. An experimental validation method on GNSS signal attenuation model in soil[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1202-1212. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2020.20200259.

GNSS 信号土壤衰减模型的试验验证方法

汉牟田^{1,2}, 杨毅³, 张波²

1. 地理信息工程国家重点实验室, 陕西 西安 710054; 2. 北京航空航天大学电子信息工程学院, 北京 100191; 3. 中交星宇科技有限公司, 北京 100088

An experimental validation method on GNSS signal attenuation model in soil

HAN Mutian^{1,2}, YANG Yi³, ZHANG Bo²

1. State Key Laboratory of Geo-Information Engineering, Xi'an 710054, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China; 3. China Communications Xing Yu Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China

Abstract: The attenuation of GNSS signals in soil is of great significance for the related research of using GNSS signals to measure soil moisture. In this paper, for the first time, the attenuation of BDS (BeiDou Navigation Satellite System) and GPS (Global Positioning System) signals in the soil was studied through experiments. In the experimental design, the GNSS antenna was placed into the soil, then the soil thickness and moisture above the antenna were continuously changed to collect the power attenuation data of the GNSS signal. Finally, these data were used to retrieve soil moisture in order to validate the GNSS signal attenuation model. Experimental results show that soil can significantly attenuate GNSS signals. The greater the soil moisture value and thickness value is, the more severe the attenuation is. In the case of clay type soil and soil moisture of $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, the GNSS signal power has been attenuated to be undetectable by the GNSS receiver when the soil thickness reaches 21 cm. Further retrieval of soil moisture based on the GNSS signal attenuation model was carried out, the results show that the attenuation model is more accurate when the soil thickness is larger than or equal to 10 cm and when the satellite elevation angle is larger than 50° . And under this situation, the root mean square error of soil moisture retrieval using BeiDou B1 signal and GPS L1 signal is less than $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ and $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, respectively.

Key words: soil moisture measurement; BeiDou navigation satellite system (BDS); signal attenuation; carrier-to-noise ratio; effective remote sensing depth

Foundation support: The Open Fund of State Key Laboratory of Geo-Information Engineering (No. SKLGE2018-M-2-2)

摘 要: GNSS(global navigation satellite system)信号在土壤中的衰减情况对于研究 GNSS 反射信号的有效遥感深度具有重要意义。本文通过试验研究了北斗信号与 GPS(global positioning system)信号在土壤中的衰减情况。在试验设计上将 GNSS 天线置入土壤中并不断改变天线上方的土壤厚度与湿度以采集 GNSS 信号的功率衰减数据,最后利用这些数据反演土壤湿度以对 GNSS 信号土壤衰减模型进行验证。试验结果表明,土壤能够使 GNSS 信号发生明显的衰减。土壤的湿度值与厚度值越大,GNSS 信号功率衰减越严重。在黏土土质,土壤湿度为 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 的情况下,当土壤厚度达到 21 cm 时,GNSS 信号功率已衰减至无法被 GNSS 接收机测出。进一步根据 GNSS 信号衰减模型反演土壤湿度,结果显示,模型在土壤厚度大于等于 10 cm、卫星仰角高于 50° 的情况下较为精确,此时利用北斗 B1 信号与 GPS L1 信号反演土壤湿度的均方根误差分别小于 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 与 $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

关键词: 土壤湿度测量; 北斗导航系统(BDS); 信号衰减; 载噪比; 有效遥感深度

中图分类号:P237

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1202-11

基金项目:地理信息工程国家重点实验室基金资助项目(SKLGIE2018-M-2-2)

在全球范围内,除了海洋以外,土壤是第 2 大水分涵养体。土壤,尤其是表层土壤中的水分易受降水和太阳辐射的影响而快速变化,因此表层数厘米厚度的土壤在全球水循环中起着十分重要的调控作用^[1-2]。因此更好地监测土壤湿度能够帮助减少气象预测、极端天气预测中的不确定性,从而为农业生产保驾护航。

在过去的几十年中,各种主被动微波遥感技术已经成功地在不同的尺度上实现了对土壤湿度的观测^[3-9]。在微波遥感所使用的微波波段中,L 波段的微波信号穿透能力强且对土壤湿度敏感^[4,10]。2009 年由欧空局发射的 SMOS 计划卫星以及 2015 年由 NASA 发射的 SMAP 任务卫星,均工作于该波段^[11-12]。

到了 20 世纪 90 年代,随着全球卫星导航系统(GNSS)的发展,衍生出了利用 GNSS 反射信号进行土壤湿度遥感的新技术,简称 GNSS-R 技术^[13-22]。由于 GNSS 系统也工作于 L 波段,因此 GNSS-R 技术不但继承了 L 波段微波遥感的特点,并且与其他遥感技术相比,具备时空分辨率高,接收处理装置功耗低、研制成本低、搭载平台灵活等优点,所以是目前研究的热点。

GNSS 反射信号遥感得到的土壤湿度数据产品需经过地面验证。在大多数情况下,验证过程是与探针式土壤湿度传感器或者烘干称重法等实地测量手段的测量结果进行对比。在此过程中涉及如何选择传感器置入土壤的深度或者土壤的取样深度。不同深度处的土壤湿度数值及其相对变化将影响验证的有效性。取样深度的选择取决于 GNSS 反射信号的有效遥感深度,但目前对于有效遥感深度的数值尚无定论。实际上有效遥感深度与 GNSS 信号进入土壤传播过程中的衰减情况密切相关。虽然存在理论模型对 GNSS 信号的衰减情况进行描述,但由于实际土壤成分十分复杂,理论模型可能与实际情况有较大出入。在这种情况下,试验研究便成为重要的研究手段。2016 年,文献[23]尝试将 GPS 天线置入土壤中开展试验,通过测量 GPS 信号在土壤中的功率衰减来测量土壤湿度,但是将 GPS 天线置于土壤中的固定深度处,不足以研究 GNSS 信号在土壤中的衰减情况。2017 年,文献[24—25]研究 GPS

信号在水中的衰减情况,采用改变水深的方法来改变 GNSS 天线上方的水体厚度,并在后续研究中开展了类似试验以利用 GNSS 信号衰减测量雪水当量。

针对目前对 GNSS 信号在土壤中衰减情况研究的不足,本文在试验过程中改变 GNSS 天线上方的土壤厚度与湿度,以研究北斗与 GPS 信号在土壤中的衰减情况,进而验证信号衰减模型在不同土壤厚度下的准确性。这些研究对于估计 GNSS 反射信号的有效遥感深度具有重要意义。

1 GNSS 信号土壤衰减模型

GNSS 信号土壤衰减模型是描述 GNSS 信号从空气进入土壤传播过程中其功率衰减情况的模型,它的应用场景如图 1 所示。

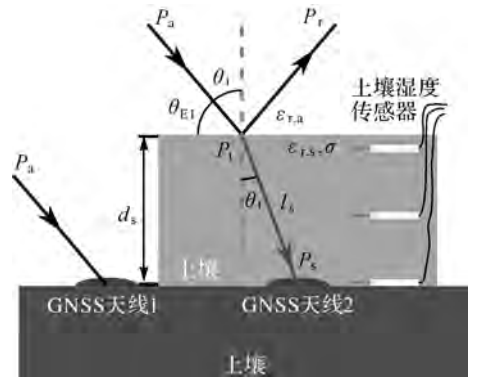


图 1 GNSS 信号土壤衰减模型的应用场景
Fig.1 Scenario of GNSS signal attenuation model for soil

图 1 中有两个 GNSS 天线。其中 GNSS 天线 1 置于土壤表面,它接收的是 GNSS 直射信号,假设 GNSS 天线 1 处的信号功率为 P_a 。设空气的相对介电常数为 $\epsilon_{r,a}$,则空气的复相对介电常数 $\hat{\epsilon}_{r,a} = \epsilon_{r,a}$,空气的复相对折射率 $\hat{n}_{r,a} = \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,a}}$ 。GNSS 天线 2 置于厚度为 d_s 的土壤底部。由于土壤中含有水分和无机盐,所以土壤是一种有耗介质,设土壤的相对介电常数为 $\epsilon_{r,s}$,电导率为 σ ,则土壤的复相对介电常数可以表示为 $\hat{\epsilon}_{r,s} = \epsilon_{r,s} - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} = \epsilon'_{r,s} - j \epsilon''_{r,s}$,其中 ϵ_0 真空介电常数, ω 为入射波的角频率, $\epsilon'_{r,s}$ 为土壤复相对介电常数的实部, $\epsilon''_{r,s}$ 为土壤复相对介电常数的虚部,则土壤的

复相对折射率 $\hat{n}_{r,s} = \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s}}$ 。GNSS 信号从空气入射到土壤中时首先会发生折射,假设 GNSS 信号的入射角为 θ_i ,则折射角 θ_t 与 θ_i 的关系可由 Snell 定律描述

$$\theta_t = \arcsin \frac{\hat{n}'_{r,a} \sin \theta_i}{\hat{n}'_{r,s}} \quad (1)$$

式中, $\hat{n}'_{r,a}$ 与 $\hat{n}'_{r,s}$ 分别为空气与土壤的复相对介电常数的实部。通常情况下,GNSS 接收机定位解算输出的是卫星仰角(也称为高度角) θ_{Ei} 而非入射角 θ_i ,如果假设土壤表面水平且忽略大气对 GNSS 信号的折射效应,则入射角为卫星仰角的余角,也即 $\theta_i = 90^\circ - \theta_{Ei}$,如图 1 所示。

GNSS 信号经过折射后便进入到土壤中传播,最终被 GNSS 天线 2 所接收,则 GNSS 信号在土壤中的传播路径长度 l_s 可表示为

$$l_s = \frac{d_s}{\cos \theta_t} \quad (2)$$

以上是对土壤衰减模型应用场景中的几何关系的描述。

GNSS 信号经过折射后不仅传播方向发生了改变,并且信号的功率也发生了衰减,因为入射波的一部分能量被土壤与空气的分界面反射回了空气中。设经过折射后 GNSS 信号的功率为 P_t , P_t 与 P_a 的关系可以用下式表示

$$P_t = P_a(1-R) \quad (3)$$

式中, R 为 GNSS 信号的反射率,则 $1-R$ 表示折射率。GNSS 信号的极化方式为右旋圆极化,可以被分解为垂直极化和平行极化两个线极化分量,因此 GNSS 信号的反射率可以用两个线极化分量的反射系数表示^[23],如式(4)所示

$$R = \frac{r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2}{2} \quad (4)$$

式中, r_{\perp} 与 r_{\parallel} 分别为垂直极化分量与平行极化分量的反射系数,可用下式表示

$$r_{\parallel} = \frac{\hat{\epsilon}_{r,s} \cos \theta_i - \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}}{\hat{\epsilon}_{r,s} \cos \theta_i + \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}} \quad (5)$$

$$r_{\perp} = \frac{\cos \theta_i - \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}}{\cos \theta_i + \sqrt{\hat{\epsilon}_{r,s} - \sin^2 \theta_i}} \quad (6)$$

经过折射后的信号在土壤中传播时,其功率衰减是以折射后的信号功率为基准。根据 Beer-Lambert 定律,在没有散射的情况下,信号功率在传播过程中呈指数衰减^[23],则 GNSS 天线 2 处的信号功率可以由式(7)描述

$$P_s = P_t \cdot e^{-\alpha l_s} \quad (7)$$

式中, α 为衰减系数,它是土壤复相对介电常数与信号频率 f 的函数,可以用式(8)表示^[23]

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu_0}{\hat{\epsilon}_{r,s} \epsilon_0}} \cdot \epsilon''_{r,s} \epsilon_0 2\pi f \quad (8)$$

联立式(3)与式(7)可以得到场景中 GNSS 天线 1 与 GNSS 天线 2 处的信号功率关系为

$$P_s = P_a(1-R)e^{-\alpha l_s} \quad (9)$$

式(9)中反射率和衰减系数都是土壤复相对介电常数的函数。土壤复相对介电常数主要受土壤湿度的影响,二者之间的关系可以由土壤介电模型进行描述,在微波波段有一些常用的模型可供使用,如 Hallikainen 模型。以黏土土质为例,土壤的复相对介电常数可用下式表示

$$\hat{\epsilon}_{r,s} = (2.8575 + 3.8526 \text{SMC} + 119.0605 \text{SMC}^2) + (0.3515 + 5.5242 \text{SMC} + 17.7091 \text{SMC}^2)j \quad (10)$$

式中, SMC 为体积土壤湿度,单位为 cm^3/cm^3 。

在 GNSS 接收机中对信号功率的度量是载噪比(C/N_0)。载噪比是 GNSS 信号载波功率与噪声功率谱密度的比值,常用对数刻度表示,单位为 dB-Hz。将式(9)用载噪比表示如下

$$(C/N_0)_s = (C/N_0)_a + 10 \lg(1-R) - 10\alpha l_s \lg(e) \quad (11)$$

图 2 是 GNSS 信号功率在不同土壤湿度与不同土壤厚度下的衰减情况,即 $(C/N_0)_s - (C/N_0)_a$ 。

从图 2 中可以看出土壤湿度越高、土壤厚度越厚,则 GNSS 信号功率衰减越严重,且在一定的土壤湿度条件下,GNSS 信号功率衰减是土壤厚度的线性函数,与式(11)相符。

以上构成了 GNSS 信号土壤衰减模型的理论基础。然而实际上由于土壤的成分十分复杂,理论模型可能与实际情况存在出入,为此需要通过试验,进行验证。

2 试验数据采集

GNSS 信号衰减试验选择在北京市通州区的一处农田进行(图 3),试验周期为 2019-03-23—2019-06-26。试验中使用两套相同硬件配置的 GNSS 接收机组成测量 GNSS 信号衰减的测量系统,包括两台相同型号的 GNSS 接收机,两支型号相同的 GNSS 碟形天线,两根型号相同长度相同的天线馈线。采用相同硬件配置的目的是尽可

能地减少测量系统本身引入的系统误差。

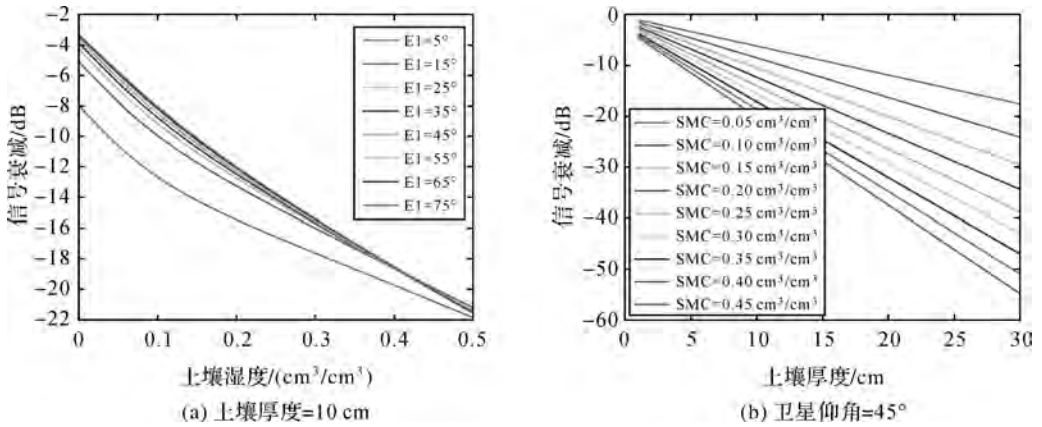
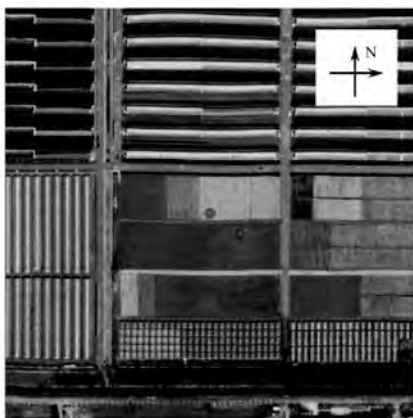


图 2 GNSS 信号功率衰减随土壤湿度与土壤厚度变化

Fig.2 The attenuation of GNSS signal power with respect to soil moisture and soil thickness

为了方便改变土壤厚度,试验中使用对 GNSS 信号影响较小的塑料编织袋盛放土壤,塑料编织袋直径约 150 cm。按照图 1 所示的场景布置 GNSS 天线,即将一只 GNSS 天线(设为 GNSS 天线 1)固定在编织袋外部的土壤表面,一只 GNSS 天线(设为 GNSS 天线 2)固定在塑料编织袋的底部中间位置。两只天线的距离应足够远以保证两只天线都落在对方的远场区域,从而减少 GNSS 天线之间的互扰。两只 GNSS 天线分别独立连接至两台 GNSS 接收机,并设置两台接收机的测量频率为 1 Hz,测量结果以 Rinex 标准文件的形式存储在接收机中。

试验过程中,以 3~4 cm 厚度为单位向塑料编织袋中增加土壤,每次改变土壤厚度都人为将土壤湿度增加到 $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 以上,然后让土壤湿度自由回落。为了测量真实土壤湿度,将 3 个土壤湿度传感器(测量精度小于 $0.03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)水平插入到塑料编织袋里土壤中,其中一个传感器放置在土壤底部,并保持不动。其他两个传感器在竖直方向上的位置根据土壤厚度增加的情况进行调整,以尽可能的使 3 个传感器在竖直方向上等间隔分布,即从下到上依次为传感器 1、传感器 2、传感器 3,如图 1 所示。



(a) 试验地点卫星地图



(b) 现场照片

图 3 试验现场

Fig.3 The conduction of the experiment

根据土壤厚度的不同,将整个试验周期分为 6 个阶段,各阶段总结如表 1 所示。

表 1 中的平均土壤湿度是 3 个土壤湿度传感

器测得土壤湿度的算术平均值,由于第一阶段与第二阶段土壤厚度较薄,所以只有传感器 1 和传感器 2 被用于测量土壤湿度。

表 1 各试验阶段详细信息

Tab.1 Detail information of all the experiment stages

试验阶段	起止时间	土壤厚度/cm	传感器 1 深度/cm	传感器 2 深度/cm	传感器 3 深度/cm	平均土壤湿度/(cm ³ /cm ³)
1	2019-03-23~2019-03-30	3	3	1	—	0.090 0~0.324 5
2	2019-04-04~2019-04-19	6.5	6.5	3.5	—	0.113 4~0.379 0
3	2019-04-19~2019-05-06	10	10	6	2	0.133 8~0.343 9
4	2019-05-06~2019-05-22	14	14	8	2	0.108 8~0.343 7
5	2019-05-22~2019-06-02	18	18	10	3	0.138 4~0.358 4
6	2019-06-02~2019-06-26	21	21	12	3	0.145 0~0.306 9

3 试验数据处理

试验数据处理步骤如下：

(1) 读取两台接收机输出的所有 Rinex 标准格式数据包括观测值数据、广播星历数据以计算每个观测历元的卫星仰角。计算时需利用 GNSS 天线的位置信息，在本试验中选择 GNSS 天线 1 的位置参与计算，并假设 GNSS 天线 2 的位置与 GNSS 天线 1 的位置相同。由于两只 GNSS 天线间的距离不超过 1.5 m，因此两只天线处观测到的同一颗卫星的仰角差别可以忽略。

(2) 将两台接收机测得的载噪比数据从对数刻度(dB)转换为线性刻度(W)，即 $W = 10^{dB/10}$ 。

(3) 设定需处理的仰角范围，该仰角范围的上下限之差以小于等于 5°为宜，以下以 55°~60°仰角范围为例。

(4) 筛选出两台接收机在上述仰角范围内测得的同一颗卫星的载噪比数据，然后分别取平均以减小测量的噪声，如此得到 GNSS 天线 1 与

GNSS 天线 2 处的实测信号功率分别为 P_a 与 P_s 。

(5) 计算得到实测功率衰减，即 $\frac{P_s}{P_a}$ 。

(6) 使用查表法反演土壤湿度，即在设定的卫星仰角与土壤厚度条件下，利用式(1)一式(10)仿真产生各土壤湿度条件下(0~1 cm³/cm³)的功率衰减形成数据表，然后在表中查找与实测功率衰减最接近的仿真功率衰减，则其所对应的土壤湿度即为反演得到的土壤湿度。在生成数据表时所使用的土壤湿度分辨率应尽可能高，在本试验中分辨率为 0.000 1 cm³/cm³，所使用的卫星仰角为上述仰角范围的中间值，即 $(55^\circ + 60^\circ)/2 = 57.5^\circ$ 。

4 试验结果与分析

4.1 试验期间观测北斗卫星数量变化

如图 4 所示为试验期间每天观测到的北斗与 GPS 卫星数量变化。

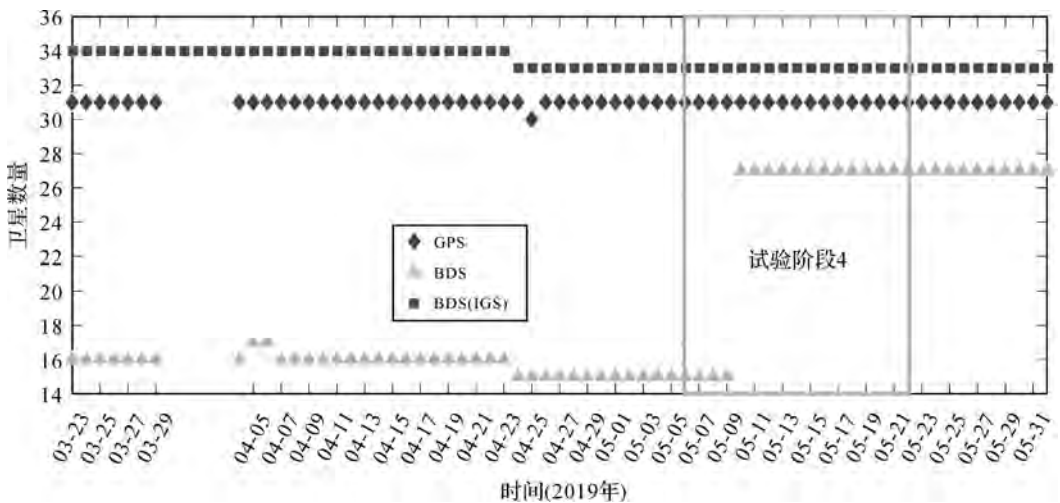


图 4 试验期间北斗与 GPS 卫星数量变化

Fig.4 The variation of the number of observed satellites in BDS and GPS during the experiment

为便于对比,图 4 中也绘制了相同时段内 IGS 观测网对北斗系统卫星数量的观测结果。从图 4 中可以看出本试验中所使用的接收机观测到的北斗卫星数量普遍较低,而在试验阶段 4 中接收机观测到的北斗卫星数量出现大幅度增加,导致这一现象的原因是本试验中所使用的接收机硬件版本较早(2015 年),因此其对近年来新发射的北斗卫星的观测能力不足,跟踪性能不稳定。

4.2 测量系统功率测量一致性测试

虽然在搭建测量系统时使用了相同的硬件配置,以尽可能地减小系统中两套接收机对信号功率测量的偏差,但仍需要对系统的一致性进行实际测试,为此试验开始前将两套 GNSS 接收机的天线同时暴露在空气中,进行了约 5 个小时数据采集,以北斗 8 号星为例,两套接收机测得的 B1 波段信号功率对比如图 5 所示。

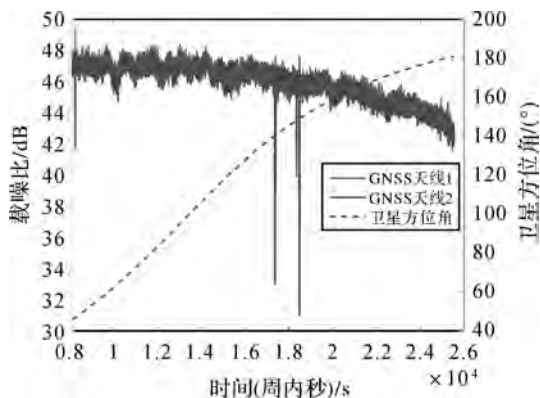


图 5 系统功率测量一致性测试

Fig.5 The test of the consistency of signal power measurement

经计算得到两套接收机测量北斗 8 号星功率平均偏差为 0.112 8 dB,根据本文的理论模型,由这一功率测量偏差所导致的土壤湿度反演误差在 $0.0018 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 21 cm 的情况下)与 $0.0079 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 3 cm 的情况下)之间。进一步统计该时段内测得的所有卫星的信号功率,得到最大的平均测量偏差为 0.673 5 dB,由此导致的土壤湿度反演误差在 $0.011 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 21 cm 的情况下)与 $0.0479 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (土壤厚度为 3 cm 的情况下)之间。

4.3 试验期间 GNSS 信号衰减情况

为了直观地显示 GNSS 信号受土壤衰减的情况,本文在前 4 个试验阶段中每个阶段各选择一天的数据用于绘制两套接收机测得的北斗

13 号星 B1 信号功率在一天中的变化情况,如图 6 所示。

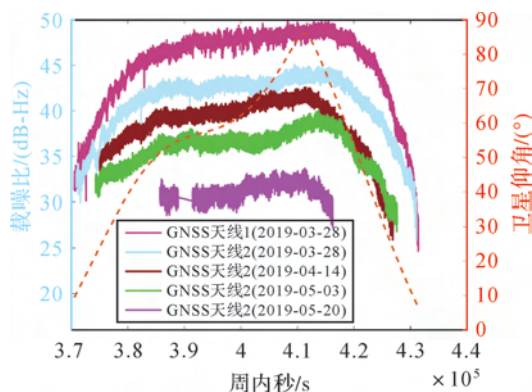


图 6 试验期间 GNSS 信号原始载噪比变化情况

Fig.6 The raw C/N₀ variation of the GNSS signal during the experiment

由于 GNSS 天线 1 在整个试验过程中均暴露于空气中,所以它在各阶段中测得的信号功率差别可以忽略,因此图 6 中仅绘制了第 1 个试验阶段中 GNSS 天线 1 测得的信号功率,其他各阶段中 GNSS 天线 2 测得的信号功率均以 GNSS 天线 1 测得的信号功率为参考,并将对应的曲线进行了时间搬移,以便于对比。从图 6 中可以看出,土壤能够使 GNSS 信号发生明显的衰减,并且随土壤厚度的增加,一天中可观测到 13 号星的时长也在减少,这是因为当卫星的仰角较低时,GNSS 信号在土壤中的传播路径较长,从而导致 GNSS 信号功率衰减严重,以至于接收机无法继续对该卫星进行观测。

图 7 进一步显示了土壤湿度与土壤厚度对 GNSS 信号功率衰减的影响。

图 7 是北斗(不包含 GEO 卫星)与 GPS 系统中所有仰角在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 范围内卫星的信号功率(B1、L1 波段,下同)的平均衰减情况。图 7 中总的土壤湿度变化范围设置为 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,这一土壤湿度变化范围是 6 个试验阶段均覆盖到的土壤湿度变化范围。可以看出北斗与 GPS 信号功率基本上随土壤厚度的增加呈现线性衰减,与式(11)相符。

4.4 GNSS 信号土壤衰减模型验证

为了验证本文理论模型的准确性,本文利用以上试验数据进行土壤湿度反演。图 8 是北斗(不包含 GEO 卫星)与 GPS 所有卫星在 $50^\circ \sim 55^\circ$ 仰角下土壤湿度反演的平均结果。由于卫星的运

行周期接近 12 h,因此单颗星相邻两次经过 50°~55°仰角的时间间隔可能达到 12 h,这一时间间隔不足以捕捉到一天当中土壤湿度的变化情况。因此需要利用分布在不同轨道上的卫星组成多星接力观测以缩短测量的时间间隔,即将所有卫星在该仰角范围下的测量结果按照时间顺序排列形成时间序列,如图 8 中的浅蓝色散点所示。由于不同的卫星位于不同的方位向,即使同一个卫星其上升段与下降段也位于不同的方位向,加之实际土壤的非匀质性,导致不同卫星的测量结果以及

同一颗卫星上升段与下降段的测量结果存在差别,从而使得原始测量结果的散点图呈现出较大噪声。为此需要对原始测量结果进行平滑,本文采用了 10 点滑动平均对原始测量结果时间序列进行平滑。若换算为时间窗的宽度,则对于北斗系统而言该时间窗宽度约为 1~2 h,而对于 GPS 系统而言相当于约 30 min 的时间窗宽度,北斗系统的时间窗较 GPS 系统时间窗宽的原因是试验期间北斗卫星数量较少。平滑后结果如图 8 中的红色散点所示。

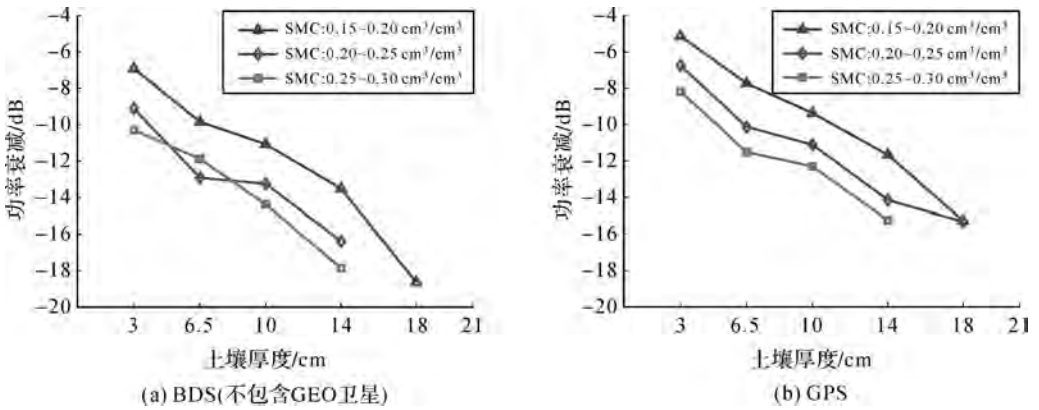


图 7 GNSS 信号功率衰减随土壤厚度与土壤湿度的变化

Fig.7 The variation of GNSS signal power with respect to soil moisture and soil thickness

从图 8 中可以看出,当土壤厚度达到 18 cm 时,GNSS 信号已经被衰减的相当严重。因此在 18 cm 厚度时,只有在土壤湿度较小也即土壤较干燥时,GNSS 信号才能够穿透土壤而被 GNSS 天线 2 接收,从而可以反演出土壤湿度,而当土壤

厚度达到 21 cm 时,接收机已无法测出信号功率。

表 2 是对图 8 所示结果的定量描述,它列出了各试验阶段所观测到的数据点数、反演得到的土壤湿度与实测土壤湿度间的相关系数以及反演的均方根误差。

表 2 北斗、GPS 系统土壤湿度反演统计结果

Tab.2 The statistical results of soil moisture retrieval from BDS and GPS

试验阶段	土壤厚度 /cm	BDS(不包含 GEO 卫星)			GPS		
		数据点数	相关系数	均方根误差 /(cm^3/cm^3)	数据点数	相关系数	均方根误差 /(cm^3/cm^3)
1	3	78	0.865 5	0.154 8	362	0.913 6	0.092 5
2	6.5	133	0.924 3	0.109 3	788	0.919 6	0.048 5
3	10	146	0.927 8	0.018 6	871	0.924 9	0.054 4
4	14	301	0.921 5	0.027 8	810	0.886 0	0.070 6
5	18	1	—	0.030 3	55	0.220 2	0.085 4
6	21	—	—	—	—	—	—

从表 2 中可以看出,在试验阶段 1 与阶段 2 中,利用北斗信号测量土壤湿度的误差大于 GPS 信号,而在实验阶段 3—阶段 5 中,北斗信号测量土壤湿度的误差小于 GPS 信号。

测量结果,图 9 给出了各个仰角范围下的土壤湿度反演的均方根误差。

在图 9 中,将起始仰角设置为 15°是为了避免 GNSS 信号从塑料编织袋侧面进入土壤中。由于试验过程中土壤厚度最大为 21 cm,塑料编织袋

以上仅是在某一特定仰角范围下的土壤湿度

的半径为 75 cm,可以计算得到最低的仰角应大于 $\arctan(21/75) \approx 15^\circ$,同时该起始仰角也可保证 GNSS 信号不受远处的树木或者建筑物遮挡。从图 9 中可以看出反演的误差随土壤厚度和仰角变化呈现出一定的收敛特性,对于北斗系统来说当

土壤厚度在 10 cm 及以上时,反演误差开始表现出收敛特性,即随着卫星仰角升高,土壤湿度反演误差逐渐减小;而对于 GPS 系统,土壤湿度反演误差是在土壤厚达到 6.5 cm 及以上时开始表现出收敛特性。

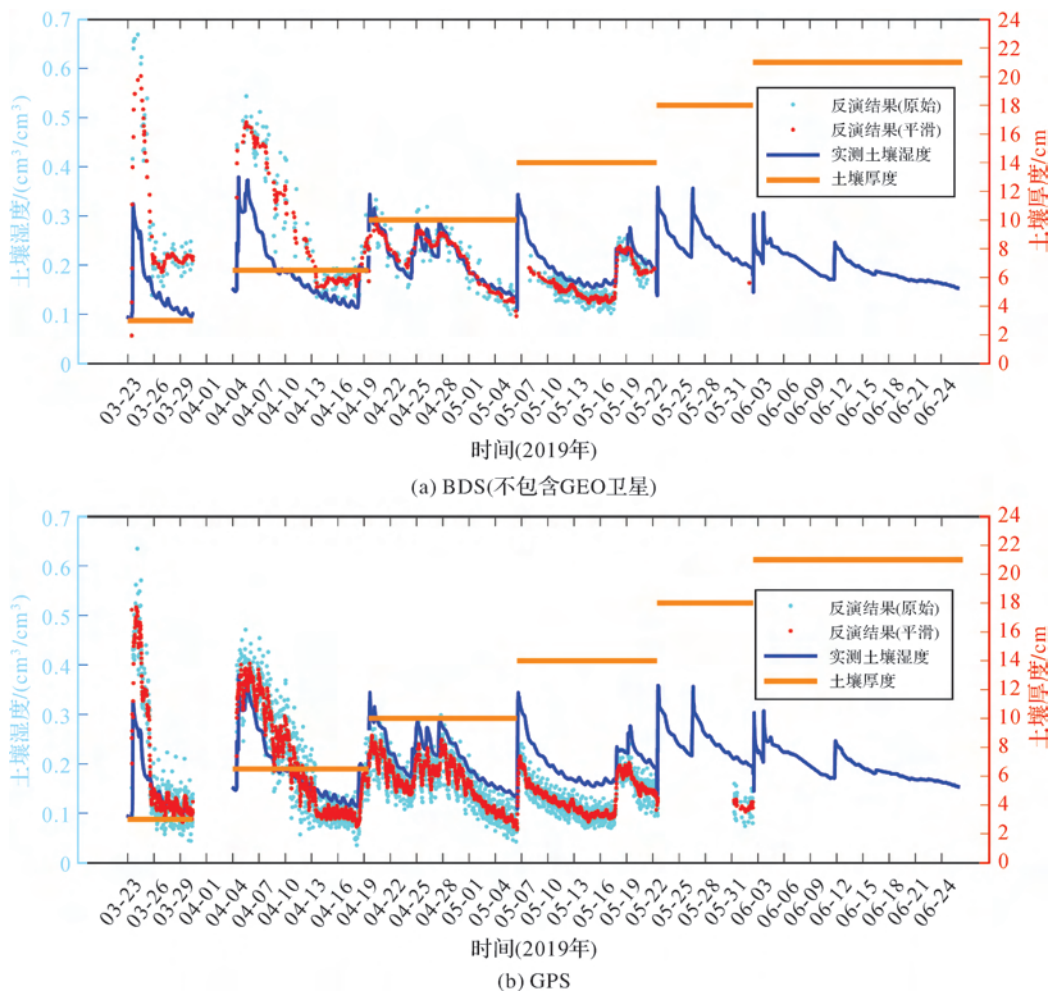


图 8 北斗、GPS 土壤湿度反演结果

Fig.8 Soil moisture retrieval form BDS and GPS

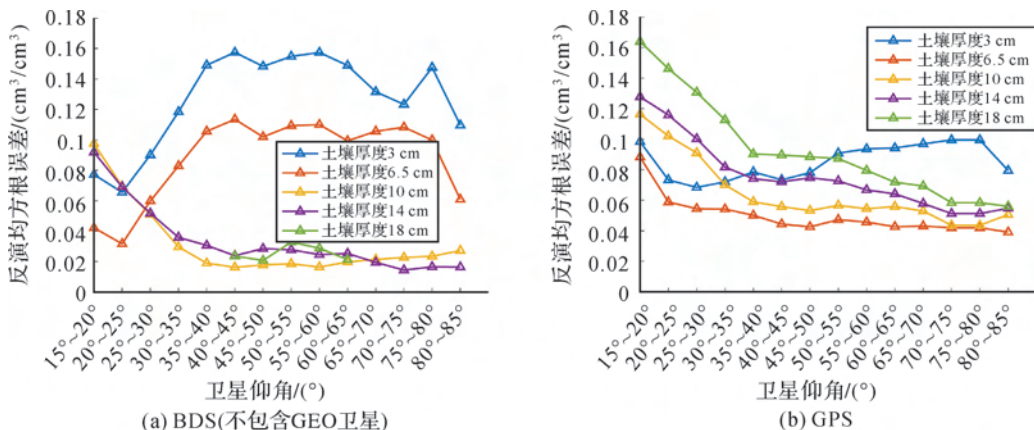


图 9 不同仰角下土壤湿度反演结果

Fig.9 Soil moisture retrieval under different satellite elevation angle

图 9 中,部分情况下土壤湿度反演存在较大误差的主要原因是本文理论模型假设土壤是半无界的理想均匀介质,而实际的试验场景在以下两个方面偏离理想情况:

一方面,在本试验中 GNSS 天线 2 被放置在塑料编织袋底部,而编织袋底部的透水性较差,这导致了 GNSS 天线 2 上方与下方的土壤湿度存在较大差别,因此编织袋底部成为第 2 反射面,此时 GNSS 信号除了被土壤与空气分界面反射之外,也会被编织袋底部反射。当土壤厚度较小、卫星仰角较高时,GNSS 信号在土壤中被衰减的程度较轻,信号在到达编织袋底部时仍具有一定强度,因而可以再次从编织袋底部反射回空气中,这相当于总反射率 R 大于理想情况下的反射率。根据式(9),在这种情况下土壤的总衰减系数将小于理想情况,从而导致土壤湿度反演结果存在较大误差,如北斗系统在土壤厚度为 3 cm、6.5 cm,卫星仰角在 35° 以上时的反演结果,以及 GPS 系统在土壤厚度为 3 cm,卫星仰角在 50° 以上时的反演结果。

另一方面,试验过程中采用的是人为向塑料编织袋中填充土壤的方式,因此当土壤较薄时,土壤重量较小,易出现不均匀的情况,此时利用上述理论模型反演土壤湿度将导致较大误差。随着土壤厚度的增加,土壤在自身重力以及水的弥合作用下变得紧实从而质地趋向于均匀,并且当卫星仰角较高时,GNSS 信号在土壤中的传播路径较短,而信号经过路径越短,则土壤的非匀质性对信号的影响越小,此时的反演结果较为准确,如北斗与 GPS 系统在土壤厚度大于等于 10 cm,卫星仰角高于 50° 以上时的反演结果。

总之,土壤越厚、卫星仰角越高,土壤就越可被视为一种均匀介质,则衰减模型就越准确。对于北斗系统来说,由于试验期间观测到的卫星数量较少,导致数据量点数较少,加之土壤较薄时其非匀质性的影响,最终导致北斗系统的测量结果在土壤厚度达到 10 cm 时才开始收敛。

4.5 北斗 GEO 卫星土壤湿度反演结果

北斗 GEO 卫星相对于地球表面静止^[26],因此信号稳定,理论上 GEO 卫星更加适用于反演土壤湿度。但由于 GEO 卫星轨道位于地球赤道上方,轨道高度高于 MEO 卫星,而试验地点位于北京,因此信号在星地之间传播距离较远,这将导

致入射到土壤表面的信号功率较低并且试验地点观测到 GEO 卫星的仰角也较低(16° 到 38° 之间),这些都导致 GEO 卫星信号很容易被土壤衰减到无法被接收机所接收。图 10 为所有 GEO 卫星的土壤湿度反演结果。

从图 10 中可以看出试验进行到第 4 阶段时置入土壤中的天线已经接收不到北斗 GEO 卫星信号。

4.6 GNSS 反射信号有效遥感深度估计

在利用 GNSS 反射信号进行土壤湿度遥感的研究中,人们通过接收处理土壤反射的 GNSS 信号来反演土壤湿度。在反射的 GNSS 信号中,不仅包含了被土壤表面反射的 GNSS 信号也包含从土壤表面下方反射的 GNSS 信号,而从土壤表面下方反射的 GNSS 信号决定了 GNSS 信号的有效遥感深度。利用试验的结果可以对 GNSS 信号的有效遥感深度做一个粗略估计。在试验中,当土壤厚度增加到 21 cm 时,即使土壤较干燥,接收机也已无法接收 GNSS 信号。这意味着到达该深度处的信号将无法再从土壤中反射回空气中,或者即使能够从土壤中返回到空气中其强度也不足以被接收机捕获。因此 21 cm 可以作为对 GNSS 信号透射深度的估计,但不可作为 GNSS 反射信号的有效遥感深度。假设 GNSS 入射信号与出射信号在土壤中的衰减相同,则能被接收机捕获的最弱的信号来自于土壤表面下方约 $21/2=10.5$ cm 处的反射面,即图 11 中的 d_2 深度处,所以 d_2 是 GNSS 反射信号的有效遥感深度。从 d_2 处反射面上方土壤中出射的所有信号构成了接收机接到的反射信号,于是接收机接收到的反射信号是一个综合信号,该综合信号(图 11 中红色箭头)相当于是从土壤表面下方 d_1 深度处的反射面反射回空气中。假设 GNSS 入射信号与出射信号的强度从土壤表面下方到 d_2 深度处是梯度衰减的,则 $d_1 \approx d_2/2 \approx 5$ cm。因此 d_1 处的反射面为 GNSS 信号的有效反射面。

2010 年,文献[27]研究利用 GNSS 直射信号与反射信号间的干涉效应来测量土壤湿度,将一个金属网放置在土壤表面,用于阻挡反射信号进入土壤中,从而测量有效反射面深度(effective reflector depth)。测量结果表明,在土壤湿度为 $0.1 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 情况下,有效反射面深度在 5 cm 左右,与本文通过信号衰减试验估计的结果相近。

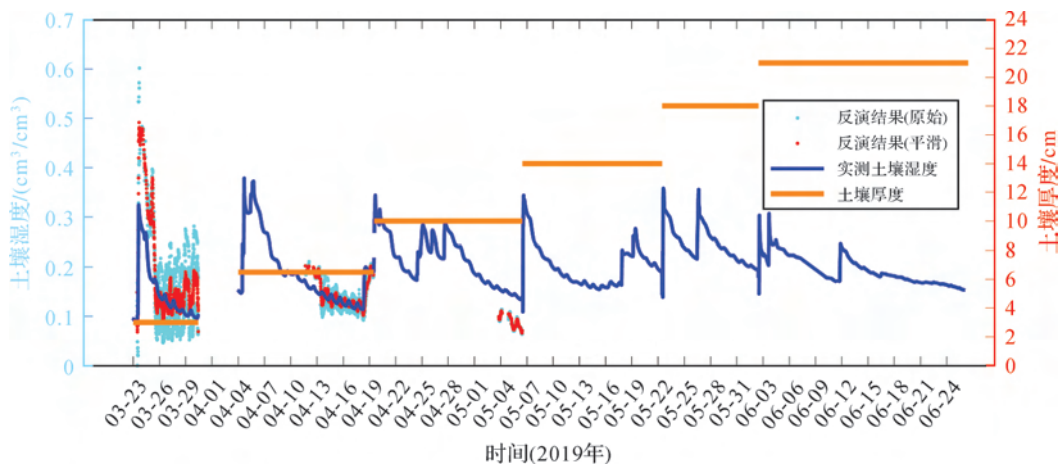


图 10 北斗 GEO 卫星土壤湿度反演结果

Fig.10 Soil moisture retrieval from GEO satellites of BDS

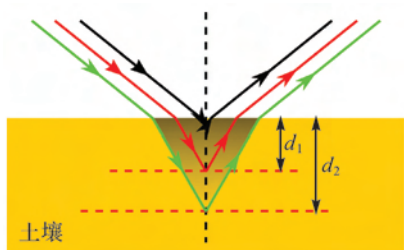


图 11 GNSS 反射信号有效遥感深度示意图

Fig. 11 Schematic diagram of effective remote sensing depth of GNSS reflected signal

5 总 结

本文研究了 GNSS 信号在土壤中的衰减模型,并设计、开展试验研究北斗与 GPS 信号在土壤中的衰减情况。试验过程中不断改变天线上方的土壤厚度与土壤湿度以收集 GNSS 信号衰减数据,最后通过利用这些数据进行土壤湿度反演以对 GNSS 信号在土壤中的衰减模型进行验证。主要结论如下:

(1) 土壤湿度值与土壤厚度值越大,GNSS 信号在土壤中的衰减越严重。以黏土土质为例,在体积土壤湿度为 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,卫星仰角在 50° 与 55° 之间的情况下,GNSS 信号功率衰减超过 16 dB。

(2) GNSS 信号衰减模型在卫星仰角越高、土壤厚度值越大的情况下越准确。在卫星仰角为 50° 以上,土壤厚度为 10 cm 及以上时,利用北斗 B1 衰减信号反演土壤湿度的均方根误差小于 $0.04 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$,利用 GPS L1 衰减信号反演土壤湿度的均方根误差小于 $0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

(3) 根据试验结果可推算出在 $0.15 \sim 0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 这一中等土壤湿度条件下,GNSS L1/B1 波段信号的透射深度约为 21 cm,其反射信号的有效遥感深度约为 10 cm。

本研究所针对的土壤类型主要是黏土,然而中国是一个幅员辽阔的国家,土壤类型十分丰富。土壤类型不同,则其密度、孔隙率等物理性质不同,进而导致其对 GNSS 信号的衰减不同。其次,在本研究中,土壤被看作均匀介质,没有考虑土壤湿度在垂直方向上的梯度变化。同时,由于试验条件限制,本文未研究土壤厚度在 21 cm 以上且土壤极为干燥(土壤湿度小于 $0.05 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)的情况下 GNSS 信号的衰减情况。这些均是未来的研究方向。

致谢:感谢北京航空航天大学杨东凯教授对本文写作的建议,以及对本文的支持与推荐;感谢北京市农林科学院蔬菜研究中心宋曙辉研究员为本研究协调试验场地。

参考文献:

- [1] DIRMEYER P A. Using a global soil wetness dataset to improve seasonal climate simulation [J]. Journal of Climate, 2000, 13(16): 2900-2922.
- [2] JUNG M, REICHSTEIN M, CIAIS P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318): 951-954.
- [3] ULABY F T, LONG D G. Microwave radar and radiometric remote sensing[M]. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 2014.
- [4] ULABY F T, DUBOIS P C, VAN ZYL J. Radar mapping of surface soil moisture[J]. Journal of Hydrology, 1996, 184(1-2): 57-84.
- [5] DOBSON M C, ULABY F T. Active microwave soil moisture

- research [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1986, GE-24(1): 23-36.
- [6] LOEW A, LUDWIG R, MAUSER W. Derivation of surface soil moisture from ENVISAT ASAR wide swath and image mode data in agricultural areas[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, 44(4): 889-899.
- [7] WAGNER W, BLOSCHL G, PAMPALONI P, et al. Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications [J]. Hydrology Research, 2007, 38(1): 1-20.
- [8] NJOKU E G, JACKSON T J, LAKSHMI V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(2): 215-229.
- [9] MAUSER W, ROMBACH M, BACH H, et al. Determination of spatial and temporal soil-moisture development using multitemporal ERS-1 data[C]//Proceedings of SPIE 2314, Multispectral and Microwave Sensing of Forestry, Hydrology, and Natural Resources. Rome, Italy: SPIE, 1995.
- [10] KERR Y H, WALDTEUFEL P, WIGNERON J P, et al. Soil moisture retrieval from space: the soil moisture and ocean salinity (SMOS) mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, 39(8): 1729-1735.
- [11] BARRE H M J P, DUESMANN B, KERR Y H. SMOS; the mission and the system[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2008, 46(3): 587-593.
- [12] ENTEKHABI D, NJOKU E G, O'NEILL P E, et al. The soil moisture active passive (SMAP) mission[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(5): 704-716.
- [13] KATZBERG S J, TORRES O, GRANT M S, et al. Utilizing calibrated GPS reflected signals to estimate soil reflectivity and dielectric constant: results from SMEX02[J]. Remote Sensing of Environment, 2006, 100(1): 17-28.
- [14] CHEW C, SMALL E E, LARSON K M. An algorithm for soil moisture estimation using GPS-interferometric reflectometry for bare and vegetated soil[J]. GPS Solutions, 2016, 20(3): 525-537.
- [15] MUNOZ-MARTIN J F, ONRUBIA R, PASCUAL D, et al. Untangling the incoherent and coherent scattering components in GNSS-R and novel applications[J]. Remote Sensing, 2020, 12(7): 1208.
- [16] EDOKOSKI K, CALABIA A, JIN Shuanggen, et al. GNSS-reflectometry and remote sensing of soil moisture: a review of measurement techniques, methods, and applications [J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 614.
- [17] LARSON K M, SMALL E E, GUTMANN E D, et al. Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(24): 405-418.
- [18] LI Weiqiang, CARDELLACH E, FABRA F, et al. Measuring greenland ice sheet melt using spaceborne GNSS reflectometry from TechDemoSat-1 [J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(2): 864-877.
- [19] ZAVOROTNY V U, LARSON K M, BRAUN J J, et al. A physical model for GPS multipath caused by land reflections: toward bare soil moisture retrievals [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(1): 100-110.
- [20] RODRIGUEZ-ALVAREZ N, BOSCH-LLUIS X, CAMPS A, et al. Review of crop growth and soil moisture monitoring from a ground-based instrument implementing the interference pattern GNSS-R technique[J]. Radio Science, 2011, 46(6): 103-112.
- [21] 梁月吉, 任超, 黄仪邦, 等. 利用 GPS-IR 监测土壤湿度的多星线性回归反演模型[J]. 测绘学报, 2020, 49(7): 833-842. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190095.
- LIANG Yueji, REN Chao, HUANG Yibang, et al. Multi-star linear regression retrieval model for monitoring soil moisture using GPS-IR [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(7): 833-842. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190095.
- [22] PRIVETTE III C V, KHALILIAN A, BRIDGES W, et al. Relationship of soil moisture and reflected GPS signal strength[J]. Advances in Remote Sensing, 2016, 5(1): 18-27.
- [23] KOCH F, SCHLENZ F, PRASCH M, et al. Soil moisture retrieval based on GPS signal strength attenuation [J]. Water, 2016, 8(7): 276.
- [24] STEINER L, MEINDL M, GEIGER A. Characteristics and limitations of GPS L1 observations from submerged antennas[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(2): 267-280.
- [25] STEINER L, MEINDL M, FIERZ C, et al. An assessment of sub-snow GPS for quantification of snow water equivalent[J]. The Cryosphere, 2018, 12(10): 3161-3175.
- [26] CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellites[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2020, 3(2): 45-52. DOI: 10.11947/jJGGS.2020.0205.
- [27] LARSON K M, BRAUN J J, SMALL E E, et al. GPS multipath and its relation to near-surface soil moisture content [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2010, 3(1): 91-99.

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2020-06-19

修回日期: 2020-07-22

第一作者简介: 汉牟田(1992—),男,博士生,研究方向为卫星导航及其应用。

First author: HAN Mutian(1992—), male, PhD candidate, majors in GNSS and its applications.

E-mail: hanmutian@buaa.edu.cn

通信作者: 汉牟田

Corresponding author: HAN Mutian

E-mail: hanmutian@buaa.edu.cn

引文格式:刘伟平,郝金明,吕志伟,等.北斗三号空间信号测距误差评估与对比分析[J].测绘学报,2020,49(9):1213-1220. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200266.
LIU Weiping, HAO Jinming, LÜ Zhiwei, et al. Evaluation and comparative analysis of BDS-3 signal-in-space range error[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1213-1220. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200266.

北斗三号空间信号测距误差评估与对比分析

刘伟平,郝金明,吕志伟,谢建涛,刘 婧,焦 博
信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州 450001

Evaluation and comparative analysis of BDS-3 signal-in-space range error

LIU Weiping, HAO Jinming, LÜ Zhiwei, XIE Jiantao, LIU Jing, JIAO Bo

School of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: BDS-3 is a global satellite navigation system independently built by China. Its performance level and performance comparison with other satellite navigation systems have an important impact on the follow-up promotion and application. In this paper, the signal in space range error (SISRE) is used as a key performance index of the system. Taking the multi-system precise orbit and clock offset provided by GFZ as the standard, the comparison and evaluation method of satellite orbit, satellite clock offset and SISRE is given. Based on the measured data of three months from January to March 2020, the accuracy improvement of BDS-3 relative to BDS-2 is verified, and the performance comparison between BDS-3, GPS, Galileo and GLONASS is analyzed emphatically. The results show that the accuracy level of BDS-3 is significantly higher than that of BDS-2 both in satellite orbit and in satellite clock offset. The orbit accuracy of BDS-3 in the R, T and N direction is 0.07 m, 0.30 m and 0.26 m respectively, which is at the optimal level among the four global systems. The satellite clock offset accuracy is 1.83 ns, which is basically the same as that of GPS, superior to GLONASS, but slightly worse than Galileo. In terms of the signal in space range error, if only orbit error is considered, BDS-3 SISRE(orb) is averagely 0.08 m. Next, Galileo SISRE(orb) is 0.26 m, GPS SISRE(orb) is 0.57 m, and GLONASS SISRE(orb) is 0.98 m. If the orbit and clock error are considered comprehensively, the average SISRE of BDS-3 is 0.50 m, which is slightly lower than 0.38 m of Galileo, better than 0.58 m of GPS, and significantly better than 2.35 m of GLONASS.

Key words: BDS-3; broadcast ephemeris; signal-in-space range error; satellite clock offset; accuracy evaluation

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (No. 41804035)

摘 要:北斗三号作为我国自主建设的全球卫星导航系统,其本身性能水平以及与其他卫星导航系统的性能对比情况,对后续推广应用具有重要影响。为此,本文以空间信号测距误差(signal-in-space range error, SISRE)作为系统关键性能指标,以 GFZ 提供的多系统精密轨道钟差作为标准,给出了卫星轨道、卫星钟差、SISRE 的比对评估方法,并以 2020 年 1 月—3 月共 3 个月的实测数据,验证了北斗三号相对北斗二号的精度改进情况,并重点分析了北斗三号与 GPS、Galileo、GLONASS 之间的性能对比关系,结果表明:无论是卫星轨道还是卫星钟差,北斗三号的精度水平相对北斗二号都有了明显提高。北斗三号卫星轨道在 R、T、N 方向精度分别达到 0.07 m、0.30 m、0.26 m,在 4 个全球系统中处于最优水平;卫星钟差精度达到 1.83 ns,基本与 GPS 系统持平,优于 GLONASS,但还略差于 Galileo;在空间信号测距误差方面,如果仅考虑轨道误差,北斗三号 SISRE(orb) 平均达到 0.08 m,紧随其后, Galileo 达到 0.26 m, GPS 达到 0.57 m, GLONASS 达到 0.98 m,如果综合考虑轨道和钟差误差,北斗三号 SISRE 平均达到 0.50 m,稍逊于 Galileo 的 0.38 m,略优于 GPS 的 0.58 m,明显好于 GLONASS 的 2.35 m。

关键词:北斗三号;广播星历;空间信号测距误差;卫星钟差;精度评估

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1213-09

基金项目:国家自然科学基金(41804035)

北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)按照“三步走”战略稳步推进^[1-2]。继北斗一号之后,2012年底,北斗二号区域系统建成,其后,北斗三号全球系统开始部署建设^[3],2018年12月27日,系统建成由18颗中圆轨道卫星(medium circle orbit, MEO)卫星构成的基本星座,开始向全球用户提供初始服务。随着2020年6月23日最后1颗卫星发射升空,北斗三号已成功完成全星座部署任务,目前在轨24颗MEO卫星,3颗倾斜同步轨道(inclined geostationary orbit, IGSO)卫星和3颗静止轨道(geostationary orbit, GEO)卫星。与此同时,其他全球卫星导航系统的建设也已进入新的发展阶段^[4]。GPS自2018年12月19日开始陆续发射新一代导航卫星Block III,系统性能不断提升;GLONASS在经过一段萧条期后,目前在轨卫星数持续维持在24颗左右,同时积极从FDMA向CDMA体制过渡;Galileo不断加快建设步伐,2016年12月15日在轨卫星达到18颗,宣布提供初始服务,其后继续向全工作能力快速进发。在此条件下,北斗三号系统本身性能如何以及与其他卫星导航系统的性能对比情况,直接影响系统后续在应用领域的竞争力,有必要进行一定的分析对比,同时,北斗三号性能情况也将为我国日后综合PNT^[5]以及弹性PNT^[6]的研究奠定基础。

卫星导航基本定位性能通常通过精度衰减因子(dilution of precision, DOP)和用户等效测距误差(user equivalent range error, UERE)来表征,前者反映定位几何构型,与星座结构和用户所处位置有关;后者可细分为用户设备误差(user equipment error, UEE)和空间信号测距误差(signal-in-space range error, SISRE)^[7]。UEE反映与用户接收相关的误差,例如观测噪声、多路径以及未修正的大气延迟误差等,SISRE则主要反映广播星历轨道和钟差的误差,集中体现了空间段和地面段的性能,因此,文献^[8-9]指出可将SISRE作为系统关键指标,用于分析对比不同系统性能。随着北斗系统建设,许多学者对北斗空间信号精度进行了分析研究。2012年,北斗二号建设之初,文献^[10]探讨了系统服务性能评估方

法;2017年,文献^[11]利用2013年3月—2016年9月的数据,以精密星历钟差为标准,详细分析了北斗二号空间信号精度的演进情况;2018年,文献^[12]验证了北斗三号试验卫星的空间信号性能水平;2019年,文献^[13]对北斗三号服务性能指标进行了分析验证;2020年,文献^[14]深入分析了北斗三号SISRE精度指标,验证了北斗三号的优良性能,并对系统后续发展提出了技术设想。以上研究主要探讨北斗系统本身性能水平,较少涉及与其他系统的对比分析,在这方面研究中比较有代表性的是:2015年和2018年,文献^[8-9]利用多系统广播星历数据,对比分析了GPS、BDS、GLONASS、Galileo等主要系统的空间信号精度差异。然而,截止目前,各系统已经有了较大的发展变化,特别是,限于建设进度,当时只分析了北斗二号性能情况,还没有涉及北斗三号的性能对比。此外,文献^[15-16]也对北斗三号空间信号性能进行了分析,但仅与GPS系统作了简单对比。

有鉴于此,本文首先给出空间信号测距误差评估分析方法,在此基础上,基于2020年1月—3月共3个月的最新数据,分析了北斗三号空间信号测距精度及相对北斗二号的改进情况,并重点对比了BDS、GPS、Galileo和GLONASS四大全球系统的SISRE性能。

1 评估分析方法

空间信号测距误差由卫星轨道误差和卫星钟差两部分构成,评估分析的大体思路是:以多系统精密轨道钟差作为标准,通过广播星历计算对应历元的卫星轨道、钟差,分析两者的差异,而后计算评估SISRE。评估中同时考察BDS、GPS、Galileo和GLONASS 4大系统,以增强对比效果。

1.1 卫星轨道

广播星历计算卫星位置的方法在各系统接口文档中都有详细描述,四大全球卫星导航系统中,BDS、GPS、Galileo采用拟合的轨道根数进行计算,GLONASS采用数值积分,其中,BDS的GEO卫星需要考虑旋转角问题^[17]。

此外,需要注意的是,广播星历计算的卫星位

置通常对应天线相位中心,而精密星历给出的卫星位置对应卫星质心,将两者进行比对前,需要首先进行天线相位中心误差修正^[18]。需要说明的是,2019年12月底,北斗三号发布了卫星天线相位中心误差修正参数^[19],由于北斗三号广播星历卫星位置对应的是B3信号,修正时需使用B3信号相应修正值。

1.2 卫星钟差

利用广播星历计算对应精密钟差历元的卫星钟差,而后通过两者作差对比,分析广播星历卫星钟差误差,比对中有以下问题需要重点解决。

(1) 群延迟修正。北斗广播星历钟差的参考信号为B3,而精密钟差产品通常是通过消电离层组合计算的,因此,需要对广播星历钟差做群延迟(time group delay, TGD)修正^[20],假定精密钟差是通过B1、B3消电离层组合计算的,则相应修正公式为

$$T_{\text{BDS,igd}}^i = T_{\text{BDS}}^i - \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_3^2} \cdot \text{TGD}_i^i \quad (1)$$

式中, T_{BDS}^i 表示第*i*颗北斗卫星的广播星历钟差,通过广播星历计算获得; f_1 、 f_3 分别为B1、B3信号的频率; TGD_i^i 表示B1、B3信号之间的群延迟参数,由广播星历提供; $T_{\text{BDS,igd}}^i$ 表示经TGD修正的第*i*颗北斗卫星广播星历钟差。

此外,对于Galileo也存在类似的群延迟修正问题,分析中本文采用E1与E5b双频信号生成的INAV广播星历,而精密钟差产品是通过E1与E5a双频信号生成的,但是,E1—E5b与E1—E5a之间的偏差较小,在分析钟差精度时相应群延迟修正通常可以忽略^[8]。

(2) 时间基准不统一修正。广播星历钟差和精密钟差的时间基准通常并不统一,这个问题对BDS、GPS、Galileo和GLONASS 4系统都需要考虑,其特点是对星座中所有卫星都有影响,并作为一种系统差随时间变化,因此,可以利用全星座所有卫星广播星历与精密星历钟差之差的均值进行该系统误差的修正,方法如下

$$\Delta T_{\text{sys}}^i(k) = \Delta T_{\text{sys}}^i(k) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \Delta T_{\text{sys}}^j(k) \quad (2)$$

式中,下标sys表示某一系统,这里可取BDS、GPS、Galileo和GLONASS; n 表示系统中健康卫星数; $\Delta T_{\text{sys}}^i(k)$ 、 $\Delta T_{\text{sys}}^j(k)$ 表示某系统*k*历元第*i*、*j*颗卫星广播星历钟差与精密钟差之差。

(3) 相对论效应修正。与精密钟差类似,

BDS、GPS和Galileo的广播星历钟差在使用中通常都需要修正相对论效应,因此,利用精密星历评估广播星历正好可以不考虑该项误差。而GLONASS在发播广播星历钟差时直接将该部分误差一并考虑^[21],从而省去了用户使用钟差时进行相对论修正的麻烦,由此带来的问题是:与其他系统不同,在使用精密钟差评定GLONASS广播星历钟差时,需要首先将GLONASS广播星历钟差中包含的相对论效应项改正过来。该改正项通常与卫星轨道偏心率有关,计算公式如下

$$\Delta t_{\text{rel}} = -\frac{2\sqrt{\text{GM}a}}{c^2} e \sin E \quad (3)$$

式中, Δt_{rel} 为相对效应改正量;GM为地球引力常数; a 为卫星轨道长半径; e 为卫星轨道偏心率; c 为光速; E 为卫星偏近点角。

考虑到GLONASS广播星历计算的特殊性,卫星位置、速度更易获取,这里采用等价修正公式^[22],如下

$$\Delta t_{\text{rel}} = -\frac{2}{c^2} \mathbf{X} \cdot \dot{\mathbf{X}} \quad (4)$$

式中, \mathbf{X} 、 $\dot{\mathbf{X}}$ 表示对应卫星位置和速度向量,其他符号含义与(3)式相同。

1.3 SISRE 计算

为便于分析,同时考虑两种空间信号测距误差:

(1) 仅考虑卫星轨道误差条件下的空间信号测距误差 SISRE(orb),计算公式如下

$$\text{SISRE(orb)} = \sqrt{w_R^2 \cdot R^2 + w_{A,C}^2 \cdot (A^2 + C^2)} \quad (5)$$

式中, w_R 和 $w_{A,C}$ 为相应的加权因子,与卫星高度有关,见表1; R 、 A 、 C 分别为径向、沿迹、法向的轨道误差。

表 1 加权因子取值

Tab.1 Value of weight factors

系统	w_R	$w_{A,C}$
GPS	0.98	1/49
GLO	0.98	1/45
GAL	0.98	1/61
BDS(MEO)	0.98	1/54
BDS(IGSO,GEO)	0.99	1/126

(2) 同时考虑卫星位置误差和钟差误差的空间信号测距误差 SISRE,计算公式如下

$$\text{SISRE} = \sqrt{(w_R \cdot R - c\delta t)^2 + w_{A,C}^2 \cdot (A^2 + C^2)} \quad (6)$$

式中, δt 表示卫星钟差误差; c 表示光速, 其他符合公式。

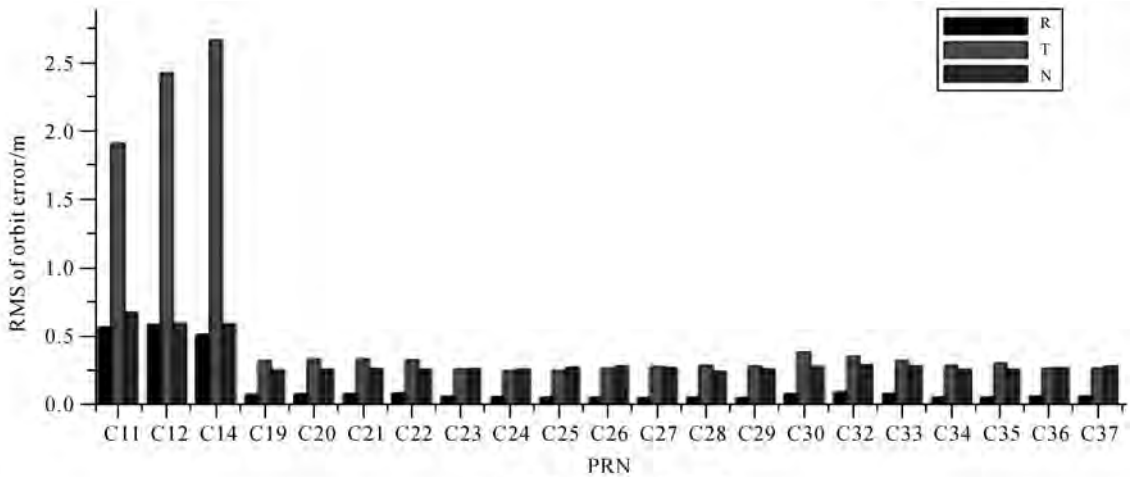
2 精度分析

采用 2020 年 1 月 1 日—2020 年 3 月 31 日的数据进行分析。其中, 广播星历采用 MGEX (multi-GNSS experiment) 提供的多系统 RINEX 格式 brdm 文件, 该数据文件是通过分布全球的观测站接收到的星历数据合并而成, 每一文件包含 BDS、GPS、GLONASS、Galileo 等主要卫星导航系统当天各测站观测到的所有卫星广播星历数据; 精密星历和精密钟差分别采用 GFZ 生成的多系统精密轨道 (SP3 文件) 和钟差产品 (CLK 文件), 文件名以 GBM 标识, 采样间隔 300 s。分析中, 只针对各系统在轨正常提供服务的工作卫星, 北斗三号主要基于基本星座 18 颗 MEO 卫星

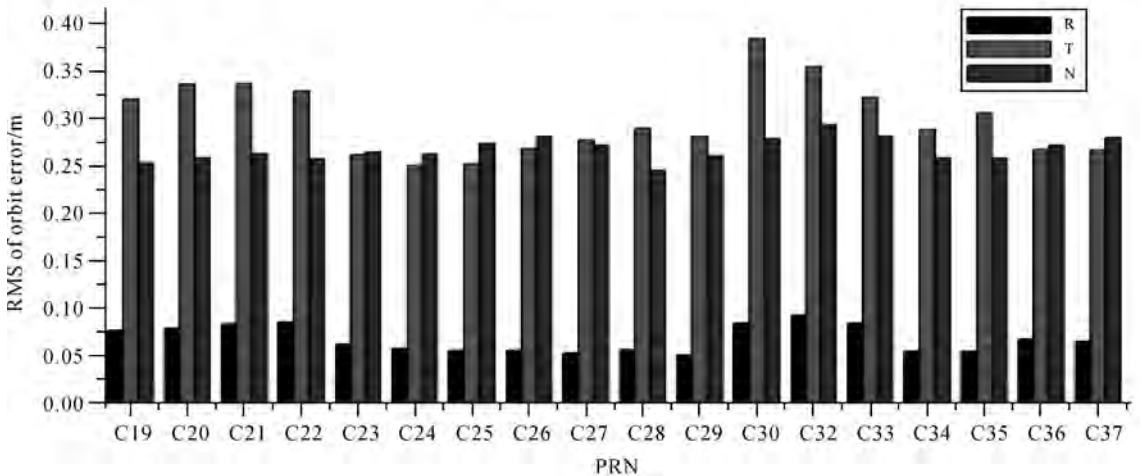
进行。

2.1 卫星轨道

利用广播星历计算 GBM 精密星历对应历元的卫星位置, 并修正天线相位中心误差, 而后将两者作差并转换到 RTN 坐标系, 每天按照 900 s 间隔取 96 个历元, 计算 2020 年 1 月 1 日—2020 年 3 月 31 日北斗三号广播星历卫星位置误差。为便于统计对比, 按照不同卫星编号, 首先统计了各卫星每天 R、T、N 方向卫星位置误差的均方根误差 (root mean square, RMS), 而后对统计时段内每颗卫星各天 R、T、N 方向轨道误差 RMS 取平均, 可获得各卫星 R、T、N 方向位置精度情况, 如图 1, 其中, 图 1(a) 同时给出了北斗二号同类型 3 颗 MEO 卫星的位置精度情况, 图 1(b) 仅给出了北斗三号的卫星位置精度情况, 图中为了区分, 北斗二号表示为 BDS-2, 北斗三号表示为 BDS-3。



(a) BDS-2(MEO)+BDS-3



(b) BDS-3

图 1 北斗广播星历卫星轨道误差统计

Fig.1 Orbit error statistic of BeiDou broadcast ephemeris

从图 1(a)可见,北斗二号 MEO 卫星 R、T、N 方向精度平均达到 0.56 m、2.34 m、0.62 m,而北斗三号卫星三方向精度普遍优于 0.5 m,相对北斗二号,北斗三号卫星位置精度明显有了较大提高。图 1(b)放大显示比例后,可以发现:北斗三号卫星 R 方向精度达到 10 cm 以内,明显优于 T、N 方向。

为了考察星座整体精度水平,同时便于不同

系统对比,这里首先以每天所有历元比对结果统计各星 R、T、N 方向的 RMS,而后取全星座所有卫星的 RMS 均值作为当天整体星座轨道精度统计值。图 2 给出了 BDS-3、GPS、Galileo、GLONASS 4 大卫星导航系统全星座轨道精度统计情况,表 2 则进一步对统计时段内各系统每天的统计结果取平均。

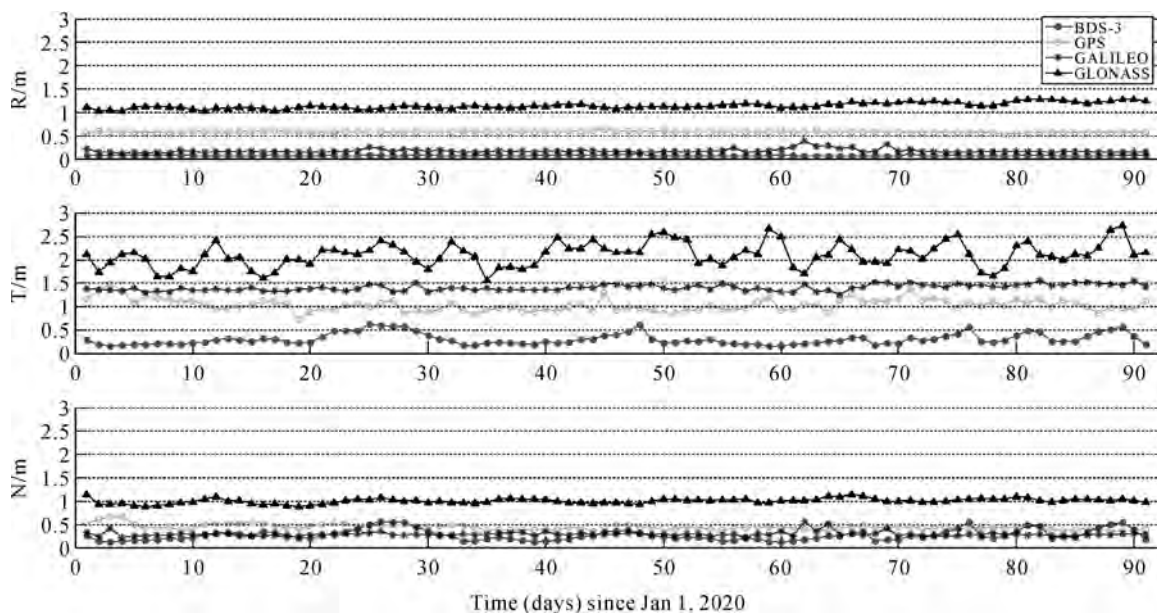


图 2 4 系统全星座轨道精度对比

Fig.2 Comparison of integrated constellation orbit accuracy between four systems

表 2 全星座轨道精度统计值

Tab.2 Orbit accuracy of integrated constellation m

系统	径向	切向	法向
BDS-3	0.07	0.30	0.26
GPS	0.57	1.03	0.44
Galileo	0.16	1.40	0.29
GLONASS	1.14	2.10	1.00

从图 2 和表 2 结果可见,统计时段内各系统全星座 R、T、N 方向精度各天较为均匀,其中均以 T 方向精度稍差。平均来讲,BDS-3 3 个方向精度分别达到 0.07 m、0.30 m、0.26 m,处于 4 系统最优水平。这主要得益于北斗三号星间链路在定轨中发挥的优良作用^[23-25]。

2.2 卫星钟差

以 GBM 精密钟差为标准,评定广播星历提供的卫星钟差精度,具体统计方法为:在统计时段内,每天以 900 s 间隔、96 个历元,利用广播星

历计算卫星钟差,经 1.2 节各项改正之后,与精密钟差进行比对,而后求取各卫星每天钟差误差的 RMS,将统计时段内各天钟差误差的 RMS 取平均作为各卫星钟差精度的最终统计值。图 3 给出了各卫星导航系统每颗在轨卫星的钟差精度统计结果,为增强对比,这里同时给出了北斗二号(BDS-2)和北斗三号(BDS-3)的统计情况,表 3 求取了各系统全星座卫星钟差统计结果的平均值。

表 3 全星座卫星钟差误差 RMS 统计值

Tab.3 RMS of satellite clock offset for integrated constellation ns

系统	钟差
BDS-2	2.63
BDS-3	1.83
GPS	1.85
Galileo	1.04
GLONASS	7.39

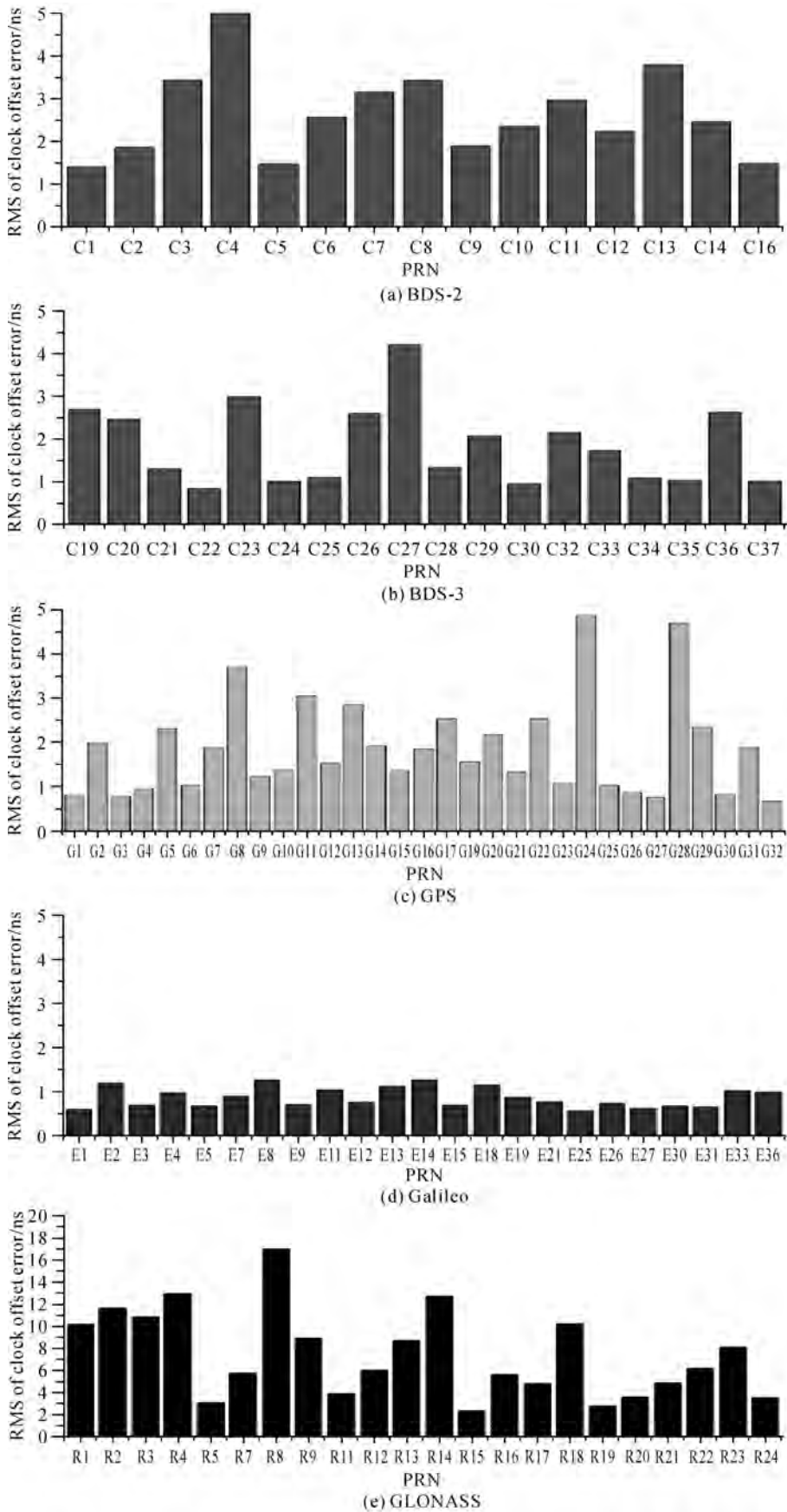


图 3 不同系统卫星钟差精度统计结果

Fig.3 Accuracy statistical of satellite clock offset for different systems

由图 3 和表 3 结果可见,各系统不同卫星的钟差精度之间存在一定差异,这主要与卫星星钟类型及在轨运行时长有关,例如, GPS 系统中 G8、G24 和 G28 卫星钟差精度明显较差,原因是 G8 和 G24 采用了 Cs 钟,相对其他大部分 GPS 卫星的 Rb 钟,短期稳定性较差,而 G28 虽然采用了 Rb 钟,但该卫星于 2000 年发射,在轨运行时间较长,星钟性能已有所衰减。此外,在所有系统中, Galileo 系统卫星钟差精度最好,且不同卫星之间相差最小,主要原因是采用了 RAFS&PHM 新型星钟,其性能较好。平均来讲,北斗三号卫星钟差精度达到 1.83 ns,明显优于北斗二号,基本与 GPS 系统持平,略差于 Galileo 系统,但优于

GLONASS。

2.3 SISRE

取历元间隔为 900 s,按照 1.3 节介绍的方法分别求取 BDS-3、GPS、Galileo、GLONASS 每颗卫星在每历元的 SISRE(orb)和 SISRE,而后,按照不同卫星导航系统,分别取全星座所有卫星每天所有历元的 SISRE(orb)和 SISRE 均值作为当天该系统轨道精度的统计值,图 4(a)和图 4(b)分别给出了 2020 年 1 月 1 日—2020 年 3 月 31 日共 91 天的 SISRE(orb)和 SISRE 统计结果,表 4 给出了统计时段内各系统 SISRE(orb)和 SISRE 均值情况。

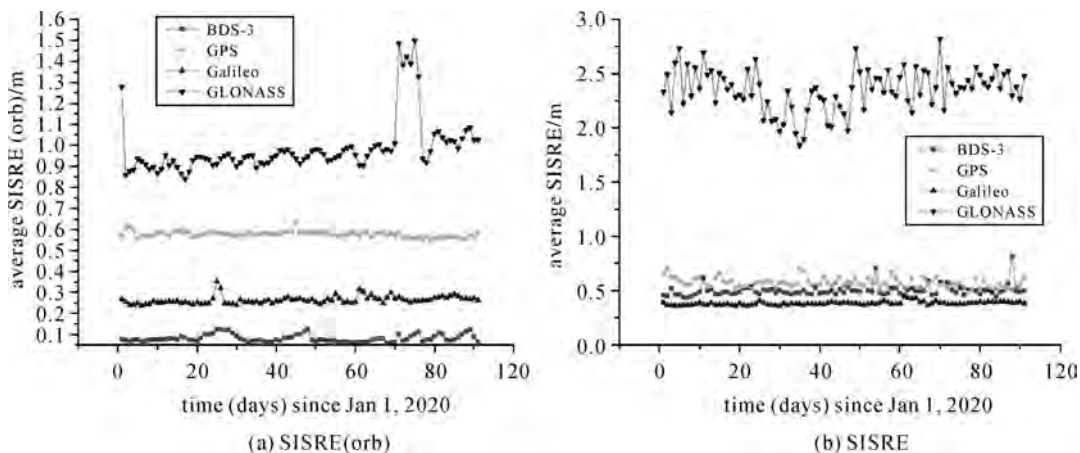


图 4 4 系统全星座空间信号测距误差对比

Fig.4 Comparison of integrated constellation signal-in-space range error between four systems

表 4 空间信号测距误差统计结果

Tab.4 Statistics of signal-in-space range error m

系统	SISRE(orb)	SISRE
BDS-3	0.08	0.50
GPS	0.57	0.58
Galileo	0.26	0.38
GLONASS	0.98	2.35

由图 4 和表 4 的结果可见:

(a) 对于 SISRE(orb),北斗三号系统平均达到 0.08 m,处于 4 系统最优水平,紧随其后, Galileo 达到 0.26 m, GPS 达到 0.57 m, GLONASS 达到 0.98 m。

(b) 对于 SISRE,北斗三号系统平均达到 0.50 m,稍逊于 Galileo 的 0.38 m,略优于 GPS 的 0.58 m,好于 GLONASS 的 2.35 m。

(c) 根据式 (5) 和式 (6), SISRE (orb) 与 SISRE 的差别主要在于是否考虑卫星钟差影响,

对比以上 SISRE(orb)和 SISRE 的统计结果,可以发现,虽然北斗三号 SISRE(orb)在 4 系统中最优,但 SISRE 统计结果却差于 Galileo。从卫星钟差的对比分析得知, BDS-3 的钟差精度水平仅与 Galileo 稍有差距,造成这种现象明显不仅是卫星钟差本身精度的影响,分析认为最主要的原因是: SISRE 评估计算中,将轨道径向误差与卫星钟差误差合并考虑(见式(6)),有助于消除两者共有误差,对于 GPS、Galileo 等系统,定轨中卫星轨道与钟差是一体解算的,而北斗系统采用独立的时间同步体制^[11,13],前者轨道与钟差相关性更强,评估中可消除更多共有误差,从而导致评估结果向好,相似问题也存在于 GLONASS 中。

3 结 论

本文以分析评估北斗三号空间信号测距误差为主要目标,首先分析了空间信号测距误差的两

个主要组成部分—卫星轨道和卫星钟差,而后又区分 SISRE(orb)和 SISRE,对北斗三号空间信号测距误差进行了综合分析。同时,在评估分析中,考察了北斗三号相对北斗二号的改进情况,以及与 GPS、Galileo、GLONASS 的最新精度对比情况,得到如下结论:

(1) 在卫星轨道方面,北斗三号在 R、T、N 方向精度分别达到 0.07 m、0.30 m、0.26 m,相对北斗二号同类型卫星,精度有明显提高,且优于其他全球卫星导航系统。

(2) 在卫星钟差方面,北斗三号卫星钟差精度达到 1.83 ns,明显优于北斗二号,基本与 GPS 系统持平,优于 GLONASS,但还略差与 Galileo 系统,有进一步改进的空间。

(3) 在空间信号测距误差方面,如果仅考虑轨道误差,北斗三号 SISRE(orb)平均达到 0.08 m,处于 4 系统最优水平,紧随其后,Galileo 达到 0.26 m, GPS 达到 0.57 m, GLONASS 达到 0.98 m;如果综合考虑轨道和钟差误差,北斗三号 SISRE 平均达到 0.50 m,稍逊于 GALIELO 的 0.38 m,略优于 GPS 的 0.58 m,好于 GLONASS 的 2.35 m。

需要说明的是,以上分析仅基于北斗三号基本星座 18 颗 MEO 卫星,随着北斗三号正式开通运行,其他类型卫星的服务性能有待进一步分析评估。

参考文献:

- [1] 杨元喜,许扬胤,李金龙,等.北斗三号系统进展及性能预测——试验验证数据分析[J].中国科学:地球科学,2018,48(5):584-594.
YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: Based on BDS-3 demonstration system [J]. Science China Earth Sciences, 2018, 48(5): 584-594.
- [2] 郝金明,刘伟平,杨力,等.北斗卫星导航系统精密定轨技术研究现状[J].测绘科学技术学报,2015,32(3):221-225,230.
HAO Jinming, LIU Weiping, YANG Li, et al. Status of precise orbit determination of BeiDou navigation satellite system[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2015, 32(3): 221-225, 230.
- [3] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. Navigation, 2019, 66(1): 7-18.
- [4] 刘伟平,郝金明.国外卫星导航系统精密定轨技术的研究现状及发展趋势[J].测绘通报,2016(3):1-6. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2016.0072.
- [5] 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 Yuanxi. 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.
- [6] YANG Yuanxi. Resilient PNT concept frame [J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(3): 1-7.
- [7] WARREN D L M, RAQUET J F. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: A historical perspective [J]. GPS Solutions, 2003, 7(3): 151-156.
- [8] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Broadcast versus precise ephemerides: A multi-GNSS perspective [J]. GPS Solutions, 2015, 19(2): 321-333.
- [9] MONTENBRUCK O, STEIGENBERGER P, HAUSCHILD A. Multi-GNSS signal-in-space range error assessment-methodology and results [J]. Advances in Space Research, 2018, 61(12): 3020-3038.
- [10] 高为广,苏牡丹,李军正,等.北斗卫星导航系统试运行服务性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(11):1352-1355.
GAO Weiguang, SU Mudan, LI Junzheng, et al. A performance evaluation of BeiDou navigation satellite system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(11): 1352-1355.
- [11] WU Yun, LIU Xiaolei, LIU Wanke, et al. Long-term behavior and statistical characterization of BeiDou signal-in-space errors [J]. GPS Solutions, 2017, 21(4): 1907-1922.
- [12] 陈金平,曹月玲,郭睿,等.北斗试验卫星空间信号精度参数 SISA 计算方法及性能验证 [J]. 测绘学报,2018,47(S1):1-8. DOI: 10.11947/j. AGCS.2018.20180316.
CHEN Jinping, CAO Yueling, GUO Rui, et al. The calculation method and performance evaluation on SISA of new generation BDS [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018, 47(S1): 1-8. DOI: 10.11947/j. AGCS. 2018.20180316.
- [13] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能 [J]. 测绘学报,2019,48(7):810-821. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190091.
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j. AGCS.2019.20190091.
- [14] YANG Yuanxi, MAO Yue, SUN Bijiao. Basic performance and future developments of BeiDou global navigation satel-

- lite system[J]. *Satellite Navigation*, 2020, 1(1): 1.
- [15] 毛悦, 贾小林, 宋小勇, 等. 北斗三号基本系统空间信号性能分析[J]. *测绘科学技术学报*, 2019, 36(2): 111-115. MAO Yue, JIA Xiaolin, SONG Xiaoyong, et al. Analysis of space signal performance of basic BDS-3 navigation satellite system[J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2019, 36(2): 111-115.
- [16] 谢慧, 宋淑丽, 焦国强, 等. 北斗卫星导航系统 SISURE 初步评估[J]. *天文学报*, 2019, 60(3): 94-104. XIE Hui, SONG Shuli, JIAO Guoqiang, et al. Preliminary evaluation of SISURE of BeiDou satellite navigation system[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2019, 60(3): 94-104.
- [17] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件公开服务信号 BII(3.0 版)[S]. 北京: [s.n.], 2019: 32-33. China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open system signal BII (Version 3.0) [S]. Beijing: [s. n.], 2019: 32-33.
- [18] 刘伟平, 郝金明, 邓科. 导航卫星天线相位中心误差标定方法研究现状及发展趋势[J]. *测绘通报*, 2018(3): 1-8. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0066. LIU Weiping, HAO Jinming, DENG Ke. Development status and tendency of navigation satellite antenna phase center correction calibration[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2018(3): 1-8. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2018.0066.
- [19] 北斗网. 关于发布北斗卫星有关参数的公告[EB/OL]. (2019-12-30). http://www.beidou.gov.cn/yw/gf/gg/201912/t20191209_19613.html. BeiDou Official Website. Announcement: Release of the BDS satellite related parameters[EB/OL]. (2019-12-30). http://www.beidou.gov.cn/yw/gf/gg/201912/t20191209_19613.html.
- [20] MONTENBRUCK O, HAUSCHILD A. Code biases in multi-GNSS point positioning[C]//*Proceedings of 2013 International Technical Meeting of the Institute of Navigation*. San Diego: [s.n.], 2013: 616-628.
- [21] RISDE. Global navigation satellite system GLONASS interface control document[S]. Moscow: Russian Institute of Space Device Engineering, 2008: 22-23.
- [22] 刘伟平. 导航卫星快速定轨和预报方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2011: 29-30. LIU Weiping. Study on fast orbit determination and prediction for navigation satellite[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2011: 29-30.
- [23] LIU Li, ZHANG Tianqiao, ZHOU Shanshi, et al. Improved design of control segment in BDS-3 [J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 37-47.
- [24] LU Mingquan, LI Wenyi, YAO Zheng, et al. Overview of BDS III new signals[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 19-35.
- [25] YANG Yufei, YANG Yuanxi, HU Xiaogong, et al. Inter-satellite link enhanced orbit determination for BeiDou-3 [J]. *The Journal of Navigation*, 2020, 73(1): 115-130.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2020-06-22**修回日期:** 2020-08-10**第一作者简介:** 刘伟平(1986—),男,博士,副教授,研究方向为卫星精密定轨定位。**First author:** LIU Weiping(1986—),male, PhD, associate professor, majors in precise satellite orbit determination and positioning.**E-mail:** lwpchxy@sina.com**通信作者:** 郝金明**Corresponding author:** HAO Jinming**E-mail:** lwpchxy@sina.com

引文格式:祝会忠,雷啸挺,徐爱功,等.顾及 GEO 卫星约束的长距离 BDS 三频整周模糊度解算[J].测绘学报,2020,49(9):1222-1234. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200263.
ZHU Huizhong, LEI Xiaoting, XU Aigong, et al. The integer ambiguity resolution of BDS triple-frequency between long range stations with GEO satellite constraints[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9):1222-1234. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200263.

顾及 GEO 卫星约束的长距离 BDS 三频整周模糊度解算

祝会忠,雷啸挺,徐爱功,李 军,高 猛

辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院,辽宁 阜新 123000

The integer ambiguity resolution of BDS triple-frequency between long range stations with GEO satellite constraints

ZHU Huizhong, LEI Xiaoting, XU Aigong, LI Jun, GAO Meng

School of Geomatics Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: The BDS triple-frequency carrier phase ambiguity resolution is greatly affected by the residual of atmospheric error between long range stations, and GEO satellites are also unfavorable for carrier phase ambiguity resolution relative to geostationary. Taking advantage of the relatively stable signal path of GEO satellites and the influence of atmospheric delay which do not change with the space position of satellites, the constraint of atmospheric delay errors more in line with actual conditions for GEO satellites are carried out. Using the linear relationship of carrier phases ambiguities of GEO satellites B2 and B3 to reduce the effect of single-difference ionospheric delay error between stations on the ambiguity candidates, the candidates of carrier phases ambiguity of B2 and B3 are selected. The linear relationship of triple-frequency phase ambiguity which does not include the influence of errors makes evaluation of the ambiguity candidates, and the ambiguity search space can be constrained. The ambiguity candidates of the GEO satellites are used to determine the residual change of the ionospheric delay between adjacent epochs, and the parameter estimation of GEO satellites is more constrained in accordance with actual situation. The method of long range BDS triple-frequency carrier phase ambiguity resolution with actual atmospheric delay variation constraints and the integer ambiguity constraints of GEO satellite is studied. And determining the ionospheric delay constraint value by using the candidates of ambiguity between epochs is proposed, adjusting the constraint value of the random walk between GEO satellite according to the actual situation. The experimental results show that the method in this paper can improve the efficiency of the triple-frequency carrier phase ambiguity resolution and the accuracy of positioning.

Key words: geostationary orbit satellite; carrier phase integer ambiguity; ionospheric delay error; tropospheric delay error; long range

Foundation support: The National Key Research and Development Program (No. 2016YFC0803102); The Liaoning Key Research and Development Program (No. 2020JH2/10100044); The National Natural Science Foundation of China (No. 41904037)

摘 要:长距离 BDS 三频载波相位整周模糊度解算受大气误差残余的影响较大, GEO 卫星相对于地球静止也非常不利于载波相位整周模糊度的解算。利用 GEO 卫星的信号传播路径相对稳定、大气延迟误差的影响不随卫星空间位置变化的特点,对 GEO 卫星进行更符合实际情况的大气延迟误差约束研究。利用 GEO 卫星 B2 和 B3 载波相位整周模糊度线性关系,降低测站差分电离层延迟误差残余对模糊度备选值的影响,进行 B2 和 B3 载波相位整周模糊度备选值的选择。通过三频载波相位整周模糊度间不包含观测误差影响的线性关系对模糊度备选值组合进行检测,并对模糊度搜索空间进行约束。利

用历元间 GEO 卫星的模糊度备选值判断历元间电离层延迟误差残余的变化,对 GEO 卫星的参数估计进行更符合实际情况的约束。研究了顾及 GEO 卫星实际大气延迟变化和整周模糊度约束的长距离 BDS 三频载波相位整周模糊度解算方法。提出了利用历元间模糊度备选值确定电离层延迟约束值的方法,对 GEO 卫星历元间随机游走的约束值进行符合实际情况的调整。试验结果表明本文的方法能够提高三频载波相位整周模糊度解算的效率和测站位置的精度。

关键词: GEO 卫星;载波相位整周模糊度;电离层延迟误差;对流层延迟误差;长距离

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2020)09-1222-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0803102);辽宁省重点研发计划(2020JH2/10100044);国家自然科学基金(41904037)

我国自主研发和具有独立自主知识产权的北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)是目前全球唯一一个全星座播发三频观测数据的卫星导航定位系统^[1]。为了增强亚太地区的卫星观测条件, BDS 采用了 GEO 卫星提高区域卫星可见性。由于 GEO 和 IGSO 的高轨道特性使其区域可见性优于 MEO, 能增加观测时段内的卫星数, 对增强区域导航性能非常有利, 增大了卫星几何强度, 提高了用户定位的效率和性能^[2]。 BDS 高精度实时定位需要使用载波相位观测值, 其中关键是载波相位整周模糊度的准确确定。但在长基线情况下, 与空间相关的观测误差影响载波相位整周模糊度的准确解算。

BDS 星座特点和全星座播发三频观测数据有别于 GPS, GPS 模糊度解算方法不能完全应用于 BDS 的数据处理, BDS 的三频观测数据有助于载波相位整周模糊度的解算^[3-4]。三频观测数据改善了观测值的冗余度, 有利于提升载波相位整周模糊度的解算性能和效率^[5-6]。 GPS 和 BDS 长基线多频载波相位整周模糊度解算方面的研究成果较多^[7-17]。文献^[7]分析了长基线 BDS 三频信号测距码偏差对模糊度解算的影响; 文献^[9]提出了一种顾及电离层延迟影响并具有良好自适应抗差特性的改进 TCAR 算法; 文献^[10]提出了 GNSS 网络 RTK 长距离基线载波相位整周模糊度解算方法; 文献^[11]介绍了长距离 GPS 参考站网载波相位整周模糊度单历元的确定, 分析了长基线整周模糊度确定的误差影响; 文献^[12-13]研究了中长距离参考站网的 BDS 多频载波相位整周模糊度解算方法, 对 BDS 多频载波相位整周模糊度解算的数学模型进行了介绍。以上研究成果对多频载波相位整周模糊度解算和长基线载波相位整周模糊度解算, 以及长距离情况下误差残

余的影响进行了详细的介绍。 GEO 卫星的轨道高度较高且具有静地几何特性的特点增加了轨道确定和预报的难度, 卫星轨道精度较低, 观测卫星的几何构型变化较慢, 对多历元的载波相位整周模糊度解算不利。 GEO 卫星提高了 BDS 在我国及周边地区的定位导航能力, 然而定位能力的提高仅限于精度较低的伪距定位。对于高精度定位来说, 观测模型中整周模糊度的存在使得模型存在病态性, 病态性的减弱是通过卫星与测站间的几何构型变化实现的。对于高轨的 GEO 和 IGSO 卫星, 角速度较慢, GEO 卫星尤为严重。因此当 GEO/IGSO/MEO 联合应用于高精度定位时, 其定位方程的病态特性是必须首先分析的问题。

长距离 BDS 三频载波相位整周模糊度和位置参数解算需要考虑大气延迟误差的影响, 首先建立附加大气延迟误差参数的 BDS 长距离多频载波相位参数估计模型, 对流层延迟误差和电离层延迟误差采用历元间随机游走的方式进行约束, 约束值的大小一般采取经验公式和先验值, 模糊度固定通常会受到短期内电离层不平稳波动的影响^[18], 使得采用经验公式和先验方差的情况无法适应电离层的这种短期变化特征, 难以捕捉实际电离层活动的空间和时间变化, 与实际值不符^[19]。如果识别出的大气约束条件过大, 超过了实际值, 会降低大气参数估计的有效性。而过于严格的大气约束会干扰模糊度固定, 导致解的不正确^[20]。因此, 采用符合实际情况的约束值是加快模糊度收敛速度的关键。 GEO 卫星的信号传播路径相对于 MEO 卫星和 IGSO 卫星较稳定, 其大气延迟误差主要的影响是时变因素, 使得 GEO 卫星短时间内大气延迟误差变化相对较小, 更容易进行大气延迟误差的紧密约束。 GEO 卫星 B2 和 B3 载波相位整周模糊度线性关系受电

离层延迟误差较小,可以选择载波相位模糊度备选值,约束模糊度的解算。同时通过相邻历元 B2 和 B3 载波相位整周模糊度备选值来确定 GEO 卫星电离层约束的大小,进行更符合实际情况的 GEO 卫星大气参数约束。

1 大气参数约束的 BDS 长距离多频载波相位整周模糊度估计模型

长距离 BDS 高精度定位采用站间差分方式得到单差观测值,电离层延迟误差和对流层延迟误差的残余影响较大,必须考虑其对整周模糊度解算和定位的影响,则 BDS 伪距和载波相位观测方程为

$$\Delta P_i = \Delta \rho + t + B_i + \Delta I_i + \Delta T + \Delta \epsilon_i \quad (1)$$

$$\lambda_i \Delta \Phi_i = \Delta \rho + t + D_i - \lambda_i \Delta N_i - \Delta I_i + \Delta T + \Delta \epsilon_{\Phi_i} \quad (2)$$

式中, Δ 表示单差操作; P 为伪距观测值; Φ 为载波相位观测值; ρ 是站星间几何距离,包含测站位置参数; t 是接收机钟差,为参考站和测站接收机钟差的合并项; B_i 和 D_i 是接收机的伪距和相位硬件延迟,为参考站和测站的接收机硬件延迟合并项; N 是以周为单位的整周模糊度,吸收了接收机的初始相位偏差; λ 为载波相位的波长; T 表示对流层延迟误差和轨道误差,以对流层延迟误差为主; I 表示电离层延迟误差; ϵ 为观测噪声;下标 i 表示不同频率, $i=1,2,3, B1, B2, B3$ 频率分别

为 $f_1=1\,561.098\text{ MHz}$ 、 $f_2=1\,207.140\text{ MHz}$ 、 $f_3=1\,268.520\text{ MHz}$ ^[3]。

在长距离载波相位定位参数解算时,大气延迟误差无法通过差分方式进行完全消除,需要附加未知的大气延迟误差参数进行估计。采用天顶对流层延迟误差和投影函数表示对流层延迟误差^[21-23],对于参考站 A 的天顶对流层延迟 ZTD_A 和测站 B 天顶对流层延迟 ZTD_B ,测站间对流层延迟误差可表示为

$$\begin{aligned} \Delta T_{AB} &= m_A \cdot ZTD_A - m_B \cdot ZTD_B \\ &= m_A \cdot (ZTD_A - ZTD_B) + (m_A - m_B) \cdot ZTD_B \end{aligned} \quad (3)$$

式中, m 为测站单颗卫星对流层延迟误差的投影函数^[24-25],测站间距在 300 km 左右或更短时,相邻测站共视卫星的投影函数 m_A, m_B 数值相差较小。所以 $(m_A - m_B) \cdot ZTD_B$ 项可以忽略,则有

$$\Delta T_{AB} \approx m_A \cdot (ZTD_A - ZTD_B) = m_A \cdot R_{ZTD} \quad (4)$$

式中, R_{ZTD} 为相对天顶对流层延迟误差。式(1)、式(2)中还存在接收机钟差合并项、接收机硬件延迟合并项及接收机的初始相位偏差,从当前历元 n 颗卫星当中选择一颗卫星 k 作为基准,则卫星 s 与卫星 k 的解算三频载波相位整周模糊度、相对天顶对流层延迟误差、电离层延迟误差残差参数估计模型为

$$\begin{bmatrix} \nu_{\phi_1}^{sk} \\ \nu_{\phi_2}^{sk} \\ \nu_{\phi_3}^{sk} \\ \nu_{P_1}^{sk} \\ \nu_{P_2}^{sk} \\ \nu_{P_3}^{sk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{sk} & m^{sk} & -\mathbf{b} & -\lambda_1 \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 \\ \mathbf{a}^{sk} & m^{sk} & -(f_1^2/f_2^2) \cdot \mathbf{b} & 0 & -\lambda_2 \cdot \mathbf{b} & 0 \\ \mathbf{a}^{sk} & m^{sk} & -(f_1^2/f_3^2) \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 & -\lambda_3 \cdot \mathbf{b} \\ \mathbf{a}^{sk} & m^{sk} & \mathbf{b} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}^{sk} & m^{sk} & (f_1^2/f_2^2) \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}^{sk} & m^{sk} & (f_1^2/f_3^2) \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ R_{ZTD} \\ I_1^s \\ I_1^k \\ \Delta N_1^s \\ \Delta N_1^k \\ \Delta N_2^s \\ \Delta N_2^k \\ \Delta N_3^s \\ \Delta N_3^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{\phi_1}^s - \mathbf{L}_{\phi_1}^k \\ \mathbf{L}_{\phi_2}^s - \mathbf{L}_{\phi_2}^k \\ \mathbf{L}_{\phi_3}^s - \mathbf{L}_{\phi_3}^k \\ \mathbf{L}_{P_1}^s - \mathbf{L}_{P_1}^k \\ \mathbf{L}_{P_2}^s - \mathbf{L}_{P_2}^k \\ \mathbf{L}_{P_3}^s - \mathbf{L}_{P_3}^k \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,上标表示卫星, $\mathbf{b} = [1 \ -1]^T$, X 是位置参数; \mathbf{a} 是位置参数的系数矩阵; m 是测站相对天顶对流层的系数; I 是 B1 的电离层延迟误差; N_1, N_2, N_3 分别为三频整周模糊度向量; $L_{\phi_1}, L_{\phi_2}, L_{\phi_3}$ 分别为载波相位观测值对应的已知向量; $L_{P_1}, L_{P_2}, L_{P_3}$ 分别为伪距观测值对应的已知向量;根据当前历元 n 颗卫星,可以得到 $n-1$ 个公式(8),消

除了接收机端的钟差。整周模糊度和误差残余参数仍是站间单差的形式,以单颗卫星为对象有利于大气延迟误差的约束,同时方便模糊度解算过程中基准卫星变换的操作。GEO/IGSO/MEO 卫星的运行角速度不一致,而且同类卫星之间的卫星信号传播路径差异较大,以单个卫星为对象便于大气误差残余的约束。站间差分载波相位观

测值的模糊度作为参数进行估计,需要确定一个模糊度基准,采用初始历元高度角较高的卫星 k 的模糊度作为基准,基准模糊度数值使用初始历元伪距观测值计算。伪距观测方程中包含有与载波相位观测方程中大小相等,符号相反的电离层延迟参数,与载波相位观测方程相同的对流层延迟参数,可加强对测站差分电离层延迟误差残余和对流层延迟误差参数的约束。因伪距观测方程噪声较大,采用和载波相位观测方程 1:100 的权重,进行法方程叠加后可以对参数进行估计。为避免法方程的奇异性和增强定位解的强度,将对流层和电离层的先验约束作为附加观测值,来表示大气误差随时间的随机游走过程变化,进行大气误差的随机游走约束^[26-27],对天顶对流层延迟误差和电离层延迟误差历元间随机游走的约束为

$$R_{ZTD}(t_{k+1}) - R_{ZTD}(t_k) = \omega(t_k) \quad (6)$$

$$\omega(t_k) \sim N(0, q_T^2)$$

$$I(t_{k+1}) - I(t_k) = \phi(t_k), \quad \phi(t_k) \sim N(0, q_I^2) \quad (7)$$

式中, $\omega(t_k)$ 、 $\phi(t_k)$ 为 t_k 到 t_{k+1} 时刻对流层延迟误差和电离层延迟误差的变化值, q_T 和 q_I 为相应对流层延迟误差和电离层延迟误差参数的功率谱密度,天顶对流层延迟误差和电离层延迟误差历元之间约束采用随机游走过程的方式^[20]。

对流层延迟误差和电离层延迟误差参数,通过历元间随机游走约束的形式将当前历元的大气延迟参数信息传递到下一个历元,以便与下个历元的大气延迟参数进行叠加。在进行两个历元的法方程叠加之后,采用消参算法消去上一个历元的大气延迟误差参数,将本历元的大气延迟误差参数和法方程传递至下一历元。

2 GEO 卫星三频载波相位整周模糊度和大气延迟误差的约束

2.1 GEO 卫星三频整周模糊度的约束

忽略载波相位观测噪声,由式(2)可得三频载波相位观测方程为

$$\lambda_1 \cdot \Delta\Phi_1 = \Delta\rho + t + D_1 - \lambda_1 \cdot \Delta N_1 - \Delta I_1 + \Delta T \quad (8)$$

$$\lambda_2 \cdot \Delta\Phi_2 = \Delta\rho + t + D_2 - \lambda_2 \cdot \Delta N_2 - \Delta I_2 + \Delta T \quad (9)$$

$$\lambda_3 \cdot \Delta\Phi_3 = \Delta\rho + t + D_3 - \lambda_3 \cdot \Delta N_3 - \Delta I_3 + \Delta T \quad (10)$$

根据 GEO 卫星三频载波相位观测方程,进一步挖掘条件约束三频载波相位观测值的参数估计。式(5)采用了卫星 k 作为基准,引入卫星 k 的基准模糊度之后,模糊度解算过程中的观测值实际上为双差观测值,因此整周模糊度解算和约束过程消除了硬件延迟的影响。将式(8)和式(9)相减,消除了对流层延迟误差、卫星轨道误差、测站位置参数。观测方程中仅剩测站间差分电离层延迟误差的残余影响,则有

$$\lambda_2 \cdot \Delta N_2 = \lambda_1 \cdot \Delta N_1 + \lambda_1 \cdot \Delta\Phi_1 - \lambda_2 \cdot \Delta\Phi_2 + \left(1 - \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2}\right) \cdot \Delta I_1 \quad (11)$$

将式(9)和式(10)相减,经过变换有

$$\lambda_3 \cdot \Delta N_3 = \lambda_2 \cdot \Delta N_2 + \lambda_2 \cdot \Delta\Phi_2 - \lambda_3 \cdot \Delta\Phi_3 + \left(1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_2^2}\right) \cdot \Delta I_2 \quad (12)$$

因为 B2 与 B3 频率接近,式(12)中电离层延迟误差残余的系数约为 0.094,能够缩小站间差分电离层延迟误差残余的影响。通过变换消除式(11)和式(12)中的电离层延迟误差残余,可得 B1、B2、B3 频率载波相位整周模糊度间的整数线性关系

$$\Delta N_1 = n \cdot \Delta N_2 - m \cdot \Delta N_3 + n \cdot \Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 - m \cdot \Delta\Phi_3 \quad (13)$$

式中, $n = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_1^2 - \lambda_3^2}{\lambda_2^2 - \lambda_3^2}$; $m = \frac{\lambda_3}{\lambda_1} \cdot \frac{\lambda_2^2 - \lambda_3^2}{\lambda_1^2 - \lambda_2^2}$ 。

利用式(12)、式(13)中模糊度具备整数特性的限制,增加对三频模糊度备选值搜索空间的约束,提高模糊度搜索效率。IGSO/MEO 卫星也可推导出类似式(11)~(13)的三频载波相位整周模糊度线性关系,并且受电离层延迟误差残余的影响。但三类卫星的大气延迟误差变化路径不同,IGSO/MEO 卫星大气延迟误差残余随空间位置变化相对较快,多历元载波相位整周模糊度解算时对三频整周模糊度的约束效率大大低于 GEO 卫星,因此,本文主要是顾及 GEO 卫星的约束进行三频整周模糊度解算。

式(11)和式(12)中的模糊度为整数,描述了 ΔN_1 和 ΔN_2 整数模糊度备选值、 ΔN_2 和 ΔN_3 整数模糊度备选值之间的线性整数关系。在长距离情况下电离层延迟误差的残余影响较大,式(11)电离层延迟误差残余项的系数约为 0.672 4,而式(12)中电离层延迟误差残余项的系数约为 0.094 倍,能够更好地对 ΔN_2 和 ΔN_3 整数模糊度

备选值进行约束。利用法方程估计三频载波相位整周模糊度参数得到的模糊度浮点解和方差确定模糊度搜索空间,通过该式在这个模糊度搜索范围内选取有效的 ΔN_2 和 ΔN_3 整周模糊度备选值,即选择满足式(12)约束的 ΔN_2 和 ΔN_3 整周模糊度备选组合。判断模糊度备选值的依据是双频模糊度整数值代入式(12)之后能够满足线性关系的约束。式(12)误差残余影响越大,则线性关系的约束能力越小,模糊度整数备选值之间的变化间隔越小,反之,模糊度整数备选值之间的变化间隔越大。通过线性关系选择 B2/B3 载波相位整周模糊度备选值的示意图如图 1 所示,各坐标轴以周为单位。

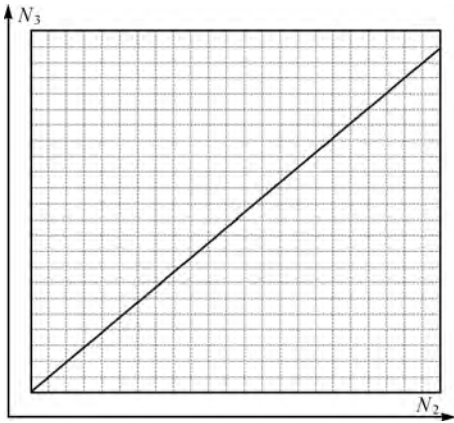


图 1 B2/B3 载波相位整周模糊度备选值的线性关系
Fig.1 The linear relationship between B2 and B3 carrier phase ambiguity candidates

长距离测站间电离层延迟误差有一定的空间相关性,一般在 0.094 倍站间差分电离层延迟误差残余影响下,也可利用式(12)选择出 B2 和 B3 整周模糊度备选组合。确定了 B2 和 B3 的整周模糊度备选值组合,就可以根据式(13)判断出是否有 B1 整周模糊度的整数备选值与之对应。由于式(13)表示的线性关系式中不包括电离层延迟误差(一阶项)和对流层延迟误差、卫星轨道误差的影响,因此正确的三个模糊度备选值组合满足该式的约束。通过式(13)的整数线性关系选择三频载波相位整周模糊度备选值的示意图如图 2 所示,各坐标轴以周为单位。

在 B2 和 B3 整周模糊度备选值的搜索空间中,式(12)选择的 B2 和 B3 整周模糊度备选值可能是多组。将 B2 和 B3 整周模糊度备选组合代入式(13),如果有与之对应的 B1 模糊度整数备

选值,则该组 B2 和 B3 整周模糊度备选组合和对应的 B1 整周模糊度备选值被确定为模糊度的搜索空间。但如果模糊度搜索范围较大,则有可能出现满足式(12)和式(13)的三频模糊度备选值不是正确的模糊度,而所有满足两个线性关系的三频模糊度备选值全部进入模糊度搜索范围中。因为这些模糊度的备选值之间有整周间隔,能够改进三频载波相位模糊度搜索空间。在法方程解算和搜索的基础上,该模糊度搜索空间的使用有利于 GEO 卫星载波相位模糊度的搜索和确定。

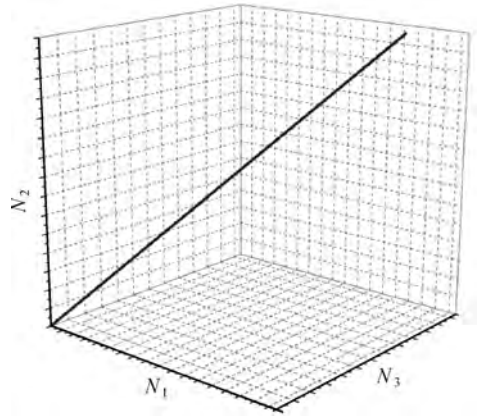


图 2 B1、B2、B3 载波相位整周模糊度备选值的线性关系
Fig.2 The linear relationship between B1、B2 and B3 carrier phase ambiguity candidates

2.2 GEO 卫星整周模糊度备选值调整后的大气参数约束

在长距离 BDS 载波相位参数解算模型中,在符合大气延迟误差实际变化的前提下,大气延迟误差的约束越紧,越有利于参数的估计。测站观测 GEO 卫星的信号传播路径和几何构型变化较小,对多历元三频载波相位整周模糊度解算非常不利。但是 GEO 卫星相对于 MEO 和 IGSO 卫星的信号传播路径较稳定,其大气延迟误差的主要影响是时变因素,而短时间内的大气延迟误差变化相对较小,有利于进行 GEO 卫星大气延迟误差的约束。

GEO 卫星信号传播路径误差特点与 IGSO 和 MEO 不同,大气延迟参数估计中进行区别考虑,对于 GEO 卫星,解算三频载波相位整周模糊度、测站间差分对流层延迟误差和电离层延迟误差残余的观测方程为

$$\begin{bmatrix} \nu_{\phi 1}^{gk} \\ \nu_{\phi 2}^{gk} \\ \nu_{\phi 3}^{gk} \\ \nu_{P1}^{gk} \\ \nu_{P2}^{gk} \\ \nu_{P3}^{gk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}^{gk} & -\mathbf{b} & -\mathbf{b} & -\lambda_1 \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 \\ \mathbf{a}^{gk} & 0 & -(f_1^2/f_2^2) \cdot \mathbf{b} & 0 & -\lambda_2 \cdot \mathbf{b} & 0 \\ \mathbf{a}^{gk} & 0 & -f_1^2/f_3^2 \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 & -\lambda_3 \cdot \mathbf{b} \\ \mathbf{a}^{gk} & -\mathbf{b} & \mathbf{b} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}^{gk} & 0 & (f_1^2/f_2^2) \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 & 0 \\ \mathbf{a}^{gk} & 0 & f_1^2/f_3^2 \cdot \mathbf{b} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \Delta T^g \\ \Delta T^k \\ I_1^g \\ I_1^k \\ \Delta N_1^g \\ \Delta N_1^k \\ \Delta N_2^g \\ \Delta N_2^k \\ \Delta N_3^g \\ \Delta N_3^k \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_{\phi 1}^g - L_{\phi 1}^k \\ L_{\phi 2}^g - L_{\phi 2}^k \\ L_{\phi 3}^g - L_{\phi 3}^k \\ L_{P1}^g - L_{P1}^k \\ L_{P2}^g - L_{P2}^k \\ L_{P3}^g - L_{P3}^k \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中, g 表示 GEO 卫星,其他符号与式(5)相同,与式(5)不同的是不使用投影函数和相对天顶对流层延迟误差表示对流层延迟误差参数,直接对传播路径上的站间差对流层延迟误差参数进行估计。并与 IGSO 和 MEO 卫星参数估计模型联合进行参数估计。因为大气延迟误差残余参数和模糊度参数是以卫星为对象的测站间单差形式,可单独以 GEO 卫星为对象进行大气延迟误差约束,因此 GEO 卫星的基准星选择可以与式(5)相同。GEO 卫星短时间内大气延迟误差变化相对较小,更容易进行大气延迟误差的紧密约束。短时间内 GEO 卫星的站间差对流层延迟误差参数可以进行强约束,改善 GEO 卫星几何构型不变带来的负面影响。在当前历元进行三频载波相位整周模糊度解算,模糊度搜索空间通过整周模糊度参数的方差和浮点解确定,并进行模糊度搜索和确定。

没有周跳发生时,相邻历元之间的式(12)对 B2 和 B3 模糊度的约束十分接近,相邻历元间或者短时间内各历元的式(12)对模糊度备选值的选择能力相似,影响各历元线性关系约束能力的是电离层延迟误差残差。一个较短的观测时段内相邻历元的模糊度备选值组合如果相同,则说明历元之间电离层延迟误差的残差十分接近,对电离层延迟误差参数附加强约束。如果不能通过式(12)和式(13)获得满足约束的三频模糊度搜索空间,而在相同的模糊度搜索空间中,相邻历元式(12)选择 B2 和 B3 模糊度备选值组合如果相同,则仍能说明相邻历元的电离层残余一致,可对电离层延迟误差参数进行强约束,加快模糊度和其他参数的求解速度。对于 IGSO 和 MEO 卫星可以采用式(12)和式(13)对模糊度备选值进行

约束和选择,如果能够选择出有效的三频模糊度备选值,即能提高模糊度搜索的效率。同时也可以利用历元之间的模糊度备选组合对电离层延迟误差参数进行判断,改进电离层延迟误差参数的约束。理论上,在符合大气延迟误差实际变化的情况下,大气延迟误差的约束越紧,越有利于待估参数的估计。历元间的观测时间间隔越小,越能反映实际的电离层变化情况,估计精度将越高,但是随着附加参数的增多,方程解算的强度降低,过多的参数还可能导致方程的病态。因此,短时间内对 GEO 卫星站间差对流层延迟误差残差和电离层延迟误差残余的强约束,有利于三频载波相位整周模糊度的解算。

3 算例与分析

3.1 试验数据

利用长距离实测 BDS 三频观测数据和广播星历进行算法试验,基线长度都超过 100 km,数据采样间隔为 1 s,试验数据的信息如表 1 所示。为了分析本文算法在模糊度收敛速度及在定位精度上的提升,与采用经验值的随机游走定位算法进行比较,从采用经验值的大气参数约束试验、GEO 卫星整周模糊度备选值的选择与大气延迟误差的关系、GEO 卫星整周模糊度备选值约束的解算试验进行分析。

表 1 试验数据
Tab.1 The data of test

试验数据	基线长度	观测时间	地点	采样间隔	时段长度
基线 1	160 km	2017-08-06	辽宁	1 s	8 h
基线 2	110 km	2017-08-06	辽宁	1 s	7 h
基线 3	170 km	2020-06-10	黑龙江	1 s	8 h
基线 4	103 km	2020-04-28	浙江	1 s	6 h

3.2 采用经验值的大气参数约束试验

将四组试验数据分成 1 h 观测时长的数据段,每个数据段从起始历元开始进行三频载波相位模糊度和未知参数的解算,以验证模糊度解算和定位的效率。按照式(5)的参数估计模型对三类卫星不做区分进行参数估计,都使用相对天顶对流层作为未知参数,并采用随机游走方式对历元间的相对天顶对流层参数和测站间差分电离层延迟误差参数进行约束。对流层和电离层参数的功率谱密度按照经验值设为 $1\text{ cm}/\sqrt{h}$ 和 $1\text{ m}/\sqrt{h}$ 进行约束^[20]。对当前历元参数估计之后,采用消参法消去上一个历元电离层延迟误差参数,将法方程中的电离层延迟参数通过历元间约束关系传递到下一个历元,再进行法方程的叠加和处理,以此类推进行多历元间法方程的叠加。利用法方程信息进行三频载波相位整周模糊度和未知参数的解算,选择长度最长的基线 1 和基线 3 给出详细的解算结果,两组试验数据的定位结果偏差时间序列如图 3、图 4 所示。

从图 3、图 4 可以看出三频载波相位整周模糊度解算的速度较慢,模糊度解算固定的收敛时间较长,最长的收敛时间接近 2000 个历元。模糊度固定之后平面定位精度能够达到厘米级,但是高程方向定位精度不稳定。虽然通过随机游走约束方式能实现三频载波相位模糊度的解算和长距离测站间的差分定位,但三频载波相位整周模糊度解算效率和定位精度较低。

3.3 GEO 卫星整周模糊度备选值的约束

利用 GEO 卫星的轨道特点进行有别于 IGSO 和 MEO 卫星的大气延迟误差约束方式,能够利用 GEO 卫星的特点,克服 GEO 卫星相对于

地球静止的缺点。通过式(12)在已有的模糊度搜索空间中选择模糊度备选值,并利用历元间的模糊度备选值判断电离层延迟误差残余的时间变化情况,以对测站间电离层延迟误差参数进行约束。通过式(13)判断 B2 和 B3 整周模糊度备选组合是否正确,以形成更有效的三频载波相位整周模糊度搜索空间。以基线 1 前两个历元为例,对 GEO 卫星的三频载波相位模糊度备选值进行约束,其中 C01 第 1 个历元 B2/B3 载波相位整周模糊度备选值的选择如图 5,横轴为 B2 整周模糊度备选值,纵轴为 B3 整周模糊度备选值,各坐标轴以周为单位。在法方程估计之后得到的三频模糊度搜索空间中,确定满足式(12)的 B2/B3 整周模糊度备选组合。将直线关系附近的 B2 模糊度备选值所对应的 B3 模糊度备选值代入式(12),能够满足整数线性关系约束的 B2/B3 模糊度备选值才是有效的模糊度备选组合。图 5 中灰色点即为满足线性整数关系约束的模糊度备选组合。当前历元 GEO 卫星整周模糊度备选值见表 2。

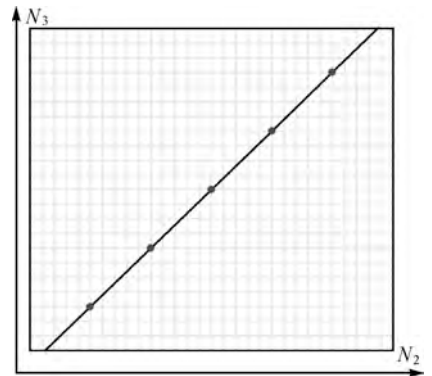


图 5 B2/B3 载波相位整周模糊度备选值的选择
Fig.5 The selecting of B2/B3 carrier phase ambiguity candidates

表 2 第 1、第 2 个历元 B2/B3 模糊度备选值
Tab.2 The ambiguity candidates of B2/B3 on first and second epoch

历元	卫星	双频整周模糊度备选组合	历元间电离层残余差值/m
第 1 历元	C01	-30/-26,-25/-22,-20/-18,-15/-14,-10/-10	-
	C02	-17/-17,-13/-14,-9/-11,-5/-8,-1/-5,3/-2	-
	C03	-11/-10,-6/-6,-1/-2,4/2,9/5,14/9	-
	C04	9/-15,14/-14,18/-9,23/-5,28/-1,33/3	-
	C05	-25/-17,-20/-13,-15/-9,-10/-4,-5/0,0/4	-
第 2 历元	C01	-30/-26,-25/-22,-20/-18,-15/-14,-10/-10	0.003
	C02	-17/-17,-13/-14,-9/-11,-5/-8,-1/-5,3/-2	0.007
	C03	-11/-10,-6/-6,-1/-2,4/2,9/5,14/9	0.002
	C04	9/-15,14/-14,18/-9,23/-5,28/-1,33/3	0.005
	C05	-25/-17,-20/-13,-15/-9,-10/-4,-5/0,0/4	0.001

从表 2 中可知前两个历元 C01 到 C05 的 B2/B3 模糊度备选值完全一致。根据整数模糊度备选值完全一致的信息,利用式(12)获得历元间测站差分之后电离层延迟误差的差值,即电离层变化信息,并作为约束条件添加到三频载波相位模糊度和未知参数解算的法方程中。根据式(12)

选取 B2/B3 载波相位整周模糊度备选值组合,并逐一代入式(13),判断模糊度备选值的依据是双频模糊度整数值能够满足式(13)的约束,即能否获得 B1 模糊度的整数备选值。各卫星的 B2/B3 整周模糊度备选值对应的 B1 整周模糊度备选值见表 3。

表 3 三频整周模糊度备选值
Tab.3 The ambiguity candidates of B1/B2/B3

历元	卫星	式(13)对应的三频模糊度备选值(B1/B2/B3)	式(13)检验的 B1 模糊度及残差
第 1 历元	C01	-29/-25/-22,-20/-15/-14	-29/0.021,-20/0.015
	C02	-18/-13/-14,-11/-5/-8,-4/-3/-2	-18/0.03,-11/0.028,-4/0.029
	C03	-8/-6/-6,1/4/2,10/14/9	-8/0.027,1/0.027,10/0.028
	C04	15/14/-14,23/23/-5,31/33/3	15/0.019,23/0.022,31/0.021
	C05	-31/-25/-17,-22/-15/-9,-13/-5/0	-31/0.02,-22/0.017,-13/0.023
第 2 历元	C01	-29/-25/-22,-20/-15/-14	-29/0.017,-20/0.022
	C02	-18/-13/-14,-11/-5/-8,-4/-3/-2	-18/0.031,-11/0.027,-4/0.030
	C03	-8/-6/-6,1/4/2,10/14/9	-8/0.026,1/0.027,10/0.026
	C04	15/14/-14,23/23/-5,31/33/3	15/0.021,23/0.033,31/0.021
	C05	-31/-25/-17,-22/-15/-9,-13/-5/0	-31/0.023,-22/0.031,-13/0.033

满足式(12)和式(13)的三频模糊度备选值有多组,所有满足两个线性关系的三频模糊度备选值全部进入模糊度搜索范围中,从表 3 中可知这些模糊度的备选值之间有一定的整周间隔,能够改进三频载波相位模糊度搜索空间。第 1、第 2 历元之间没有周跳发生,在相同的模糊度搜索空间中,这两个历元的模糊度备选值组合相同,说明式(12)对 B2 和 B3 模糊度的约束能力相同,历元之间电离层延迟误差残余十分接近,表 2 中历元间电离层延迟误差残余的差值很小,其中还有载波相位观测值噪声的影响,对电离层延迟误差参数附加强约束。对于连续多历元观测数据,通过这样的方式约束 GEO 卫星模糊度搜索空间和电离层延迟误差参数。如果不能通过式(12)和式(13)获得有使用价值的三频模糊度搜索空间。在相同的模糊度搜索空间中,如果相邻历元 B2 和 B3 模糊度备选值组合相同,则仍能够说明相邻历元的电离层残余变化很小,可对电离层延迟误差参数进行强约束。

仍以长度最长的基线 1 和基线 3 为例,两条基线 GEO 卫星测站差分对流层延迟误差残余和电离层延迟误差残余如图 6—图 9 所示。GEO 卫星的对流层延迟误差和电离层延迟误差相邻历元间的变化较小,电离层延迟误差残余可以通过相邻历元的模糊度备选值对比反映其变化。在三频载波相位整周模糊度初始固定的较短观测时间

内可以对对流层延迟误差残余附加强约束。通过对 GEO 卫星大气延迟误差残余的约束,可加快三频载波相位整周模糊度和位置参数的求解速度。对于同区域测站,虽然站间距离较长时对流层延迟误差和电离层延迟误差的站间单差误差相对较大,但一般情况同颗卫星两个站的大气延迟误差变化趋势也相似,站间单差大气延迟误差的相邻历元间变化相对平稳。图 6—图 9 给出的是 GEO 卫星的站间单差大气延迟误差,主要影响是时变因素,卫星信号传播路径的空间变化相对于 IGSO 和 MEO 较小,部分卫星站间单差对流层延迟误差的历元变化在 0.1 m 以内、单差电离层延迟误差的历元变化达到 0.1 m 以上。测站间差分大气延迟误差的绝对误差数值较大,都在 0.3 m~1.0 m 之间。

3.4 GEO 卫星整周模糊度备选值和大气参数约束的参数解算

由相邻历元的模糊度备选组合可对历元间电离层延迟误差残余进行判断,从而对电离层延迟误差进行更符合实际大气延迟误差变化的约束。GEO 卫星对地球静止特性使得大气延迟误差主要受时变因素影响,短时间内大气延迟误差变化相对较小,更加适合于通过历元间的模糊度备选值进行约束。另一方面,直接对 GEO 卫星传播路径上的站间差分对流层延迟误差参数进行估计,不采用投影函数和相对天顶对流层延迟误差的形式。

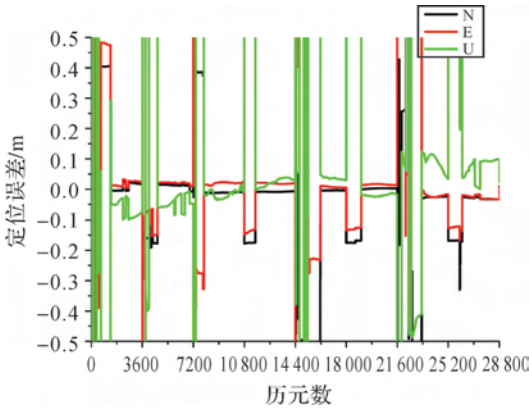


图3 基线1定位偏差

Fig.3 The bias of positioning for baseline 1

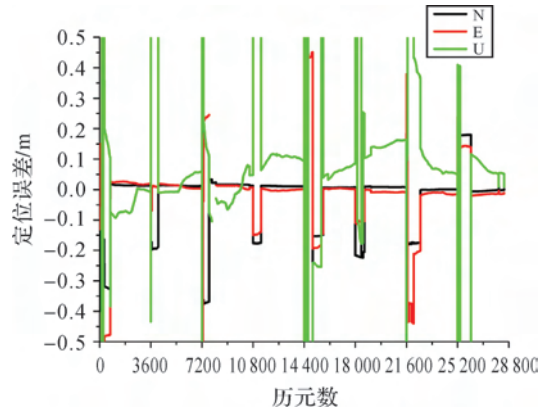


图4 基线3定位偏差

Fig.4 The bias of positioning for baseline 3

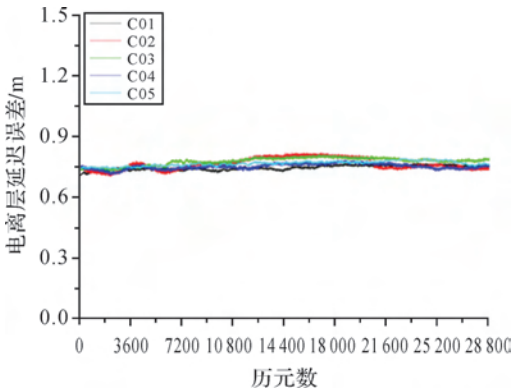


图6 基线1 GEO 电离层延迟误差

Fig.6 The ionospheric delay of GEO for baseline 1

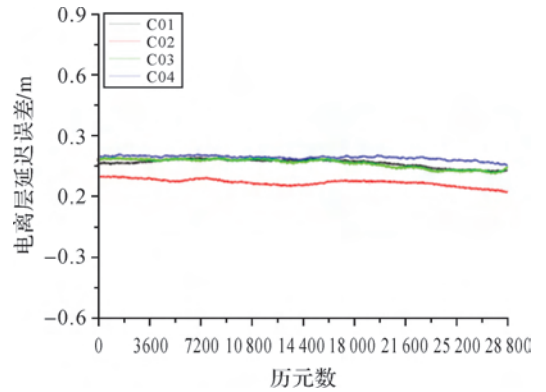


图7 基线3 GEO 电离层延迟误差

Fig.7 The ionospheric delay of GEO for baseline 3

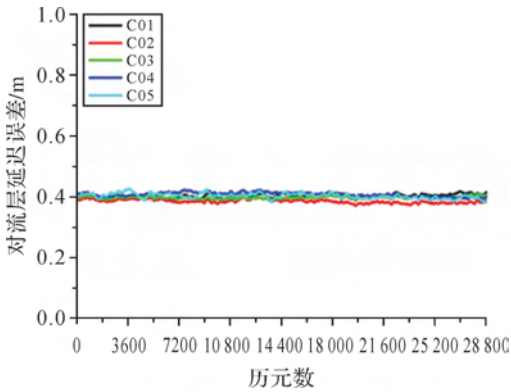


图8 基线1 GEO 对流层延迟误差

Fig.8 The tropospheric delay of GEO for baseline 1

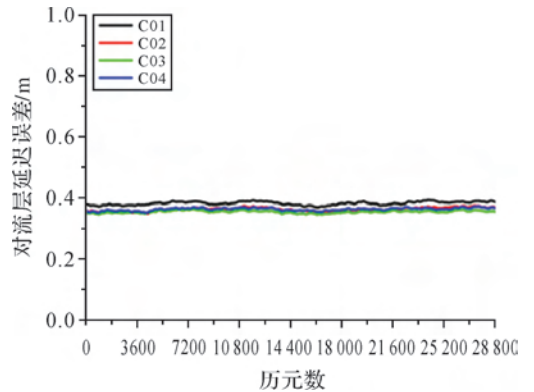


图9 基线3 GEO 对流层延迟误差

Fig.9 The tropospheric delay of GEO for baseline 3

通过对 GEO 卫星三频模糊度备选值和大气延迟误差的约束,进行 GEO/IGSO/MEO 卫星的长距离三频载波相位整周模糊度和未知参数的解算。同时对于 IGSO 和 MEO 卫星也可以采用与 GEO 卫星相似的方法进行模糊度备选值和电离层延迟误差残余的约束,如果能够选择出有效的

三频模糊度备选值,也可以提高模糊度搜索的效率。但是相对于 GEO 卫星,IGSO 和 MEO 卫星信号传播路径变化快,对流层延迟误差采用相对天顶对流层延迟误差和投影函数的方式更有利于参数估计,而电离层延迟误差的约束也不如 GEO 卫星效率高。基线 1 和基线 3 试验数据的三频模

模糊度解算和定位结果偏差时间序列如图 10、图 11 所示。

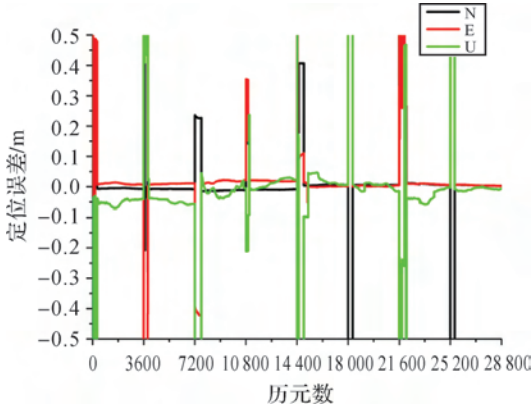


图 10 基线 1 定位偏差

Fig.10 The bias of positioning for baseline 1

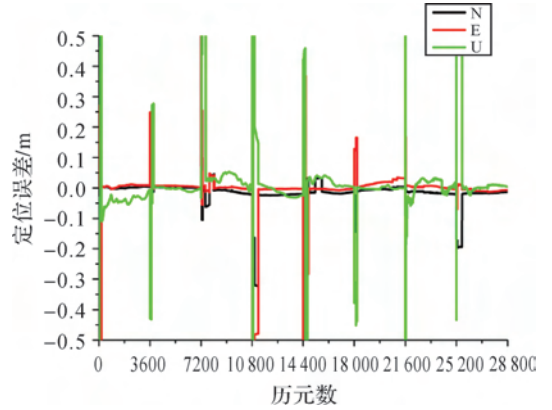


图 11 基线 3 定位偏差

Fig.11 The bias of positioning for baseline 3

从图 10、图 11 的三频模糊度解算耗时和定位结果偏差来看,通过对 GEO 卫星的约束明显优于图 3、图 4 的解算结果。三频载波相位模糊度解算耗时统计信息如图 12、图 13 所示,三频载

波相位整周模糊度固定之后定位结果与已知值偏差的 RMS 如图 14、图 15 所示,定位结果偏差 RMS 的均值如表 4 所示。

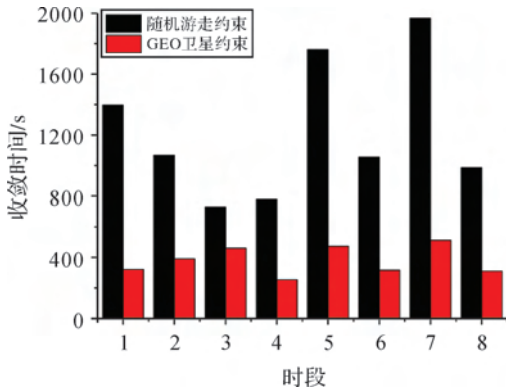


图 12 基线 1 模糊度解算耗时

Fig.12 The time of ambiguity resolution for baseline 1

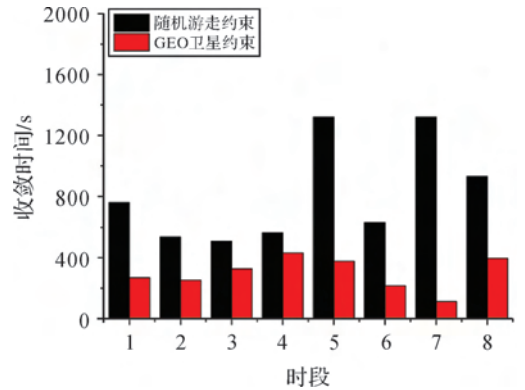


图 13 基线 3 模糊度解算耗时

Fig.13 The time of ambiguity resolution for baseline 3

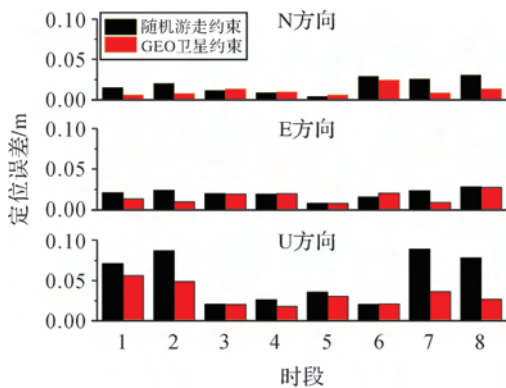


图 14 基线 1 定位误差 RMS

Fig.14 The RMS of positioning bias for baseline 1

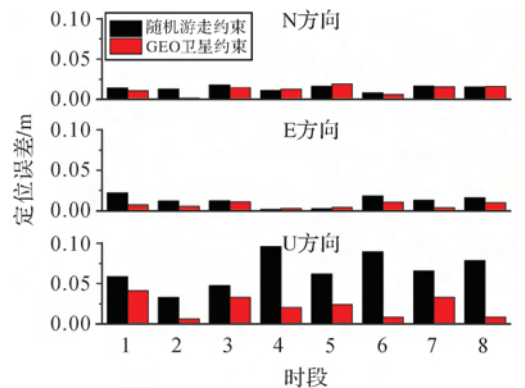


图 15 基线 3 定位误差 RMS

Fig.15 The RMS of positioning bias for baseline 3

表 4 定位结果偏差的 RMS 均值

Tab.4 The RMS mean of positioning bias

基线	模式	平均模糊度 收敛时间	N/m	E/m	U/m
基线 1	随机游走	1218	0.019	0.020	0.054
	GEO 约束	381	0.011	0.015	0.032
基线 2	随机游走	819	0.018	0.022	0.045
	GEO 约束	364	0.015	0.018	0.029
基线 3	随机游走	822	0.015	0.013	0.066
	GEO 约束	298	0.012	0.007	0.021
基线 4	随机游走	947	0.020	0.025	0.052
	GEO 约束	425	0.013	0.017	0.038

从上述试验可以看出,对 GEO 卫星约束的方法不仅可以实现长距离三频载波相位模糊度的快速解算,而且对 GEO 卫星大气延迟误差残余的参数估计更优,长距离测站的差分定位结果精度较高。基线 1 三频载波相位整周模糊度最快可以约 4 min(241 s)准确确定,最慢需要约 10 min(572 s),基线 3 三频载波相位整周模糊度准确确定快速约 2 min(131 s),最慢需要不到 7 min(409 s)。从图 14、图 15 和表 4 来看,通过 GEO 的约束三频载波相位整周模糊度确定之后的定位精度也有所提升,特别是高程方向精度提升非常明显,在使用广播星历的情况下,部分时段 1 h 的平面定位结果可以达到毫米级。本文随机游走的方差采用是经验值,经验值的使用能够在一定程度约束历元间的大气延迟误差变化,不能完全反映的历元间实际大气延迟误差的变化情况。本文利用历元间模糊度约束信息反映的电离层延迟误差残余的实际变化情况,对 GEO 卫星测站差分大气延迟误差残余进行约束,同时利用 GEO 卫星三频载波相位整周模糊度备选值对模糊度搜索空间进行约束。相比与随机游走方差采用经验值的方式,对 GEO 大气延迟误差的约束更符合实际情况,而对模糊度搜索空间的约束进一步提升了模糊度解算的性能。在模糊度解算性能提升的基础上,GEO 卫星大气延迟误差的约束和参数估计效率更高,对定位结果也有一定的提升作用。从表 4 中四组观测数据基线的模糊度解算效率和定位结果来看,GEO 卫星约束的模糊度收敛时间和定位精度都有较大的提升。试验结果证明了本文对 GEO 卫星三频载波相位整周模糊度备选值和测站差分大气延迟误差残余的约束,能够

提升三频载波相位整周模糊度和未知参数解算的效率,提高了测站定位精度。

4 结 论

本文实现了顾及 GEO 卫星实际大气延迟变化约束和整周模糊度约束的长距离 BDS 三频载波相位整周模糊度解算方法。根据 GEO/IGSO/MEO 不同的动力学特点和卫星信号的路径传播误差变化也不同的实际情况,分别建立附加测站差分大气延迟误差残余的参数估计模型。IGSO 和 MEO 卫星使用相对天顶对流层延迟误差和投影函数表示对流层延迟误差参数。GEO 卫星的信号传播路径相对较稳定,对流层延迟误差采用直接估计测站间对流层延迟误差残余的方式,短时间内 GEO 卫星站间差分对流层延迟误差参数可以进行强约束。利用 GEO 卫星 B2/B3 载波相位整周模糊度线性关系,降低测站间差分电离层延迟误差残余的影响,进行 B2 和 B3 载波相位整周模糊度备选值的选择。通过三频载波相位整周模糊度间不包含误差影响的线性关系对模糊度备选值组合进行判断。根据历元间 B2/B3 载波相位模糊度备选值判断历元间电离层延迟误差残余的变化,对 GEO 卫星的参数估计进行更加符合实际大气延迟变化的约束。试验结果表明本文的方法能够提高三频载波相位整周模糊度解算的效率和测站位置的精度。本文重点研究实现了对 GEO 卫星的约束,下一步需要研究和完善长距离 IGSO 和 MEO 卫星大气延迟误差和三频整周模糊度约束的载波相位整周模糊度解算方法。

参考文献:

- [1] 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.
YANG Yuanxi, LI Jinlong, XU Junyi, et al. Contribution of the Compass satellite navigation system to global PNT users[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2813-2819.
- [2] 郭树人, 蔡洪亮, 孟铁男, 等. 北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J]. 测绘学报, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48

- (7); 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
- [3] TANG Weiming, DENG Chenlong, SHI Chuang, et al. Triple-frequency carrier ambiguity resolution for BeiDou navigation satellite system[J]. *GPS Solutions*, 2014, 18(3): 335-344.
- [4] ZHANG Xiaohong, HE Xiyang. Performance analysis of triple-frequency ambiguity resolution with BeiDou observations[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(2): 269-281.
- [5] GENG Jianghui, GUO Jiang, CHANG Hua, et al. Toward global instantaneous decimeter-level positioning using tightly coupled multi-constellation and multi-frequency GNSS[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 977-991.
- [6] LI Bofeng, LI Zhen, ZHANG Zhiteng, et al. ERTK: extra-wide-lane RTK of triple-frequency GNSS signals[J]. *Journal of Geodesy*, 2017, 91(9): 1031-1047.
- [7] LOU Yidong, GONG Xiaopeng, GU Shengfeng, et al. Assessment of code bias variations of BDS triple-frequency signals and their impacts on ambiguity resolution for long baselines[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 177-186.
- [8] 祝会忠. 基于非差误差改正数的长距离单历元 GNSS 网络 RTK 算法研究[J]. *测绘学报*, 2015, 44(1): 116. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140358.
- ZHU Huizhong. The study of GNSS network RTK algorithm between long range at single epoch using un-difference error corrections[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(1): 116. DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20140358.
- [9] 高扬骏, 吕志伟, 周朋进, 等. 北斗中长基线三频模糊度解算的自适应抗差滤波算法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(3): 295-302. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180379.
- GAO Yangjun, LÜ Zhiwei, ZHOU Pengjin, et al. Adaptive robust filtering algorithm for BDS medium and long base line three carrier ambiguity resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 295-302. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180379.
- [10] LI Bofeng, SHEN Yunzhong, FENG Yanming, et al. GNSS ambiguity resolution with controllable failure rate for long baseline network RTK[J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(2): 99-112.
- [11] 祝会忠, 刘经南, 唐卫明, 等. 长距离网络 RTK 基准站间整周模糊度单历元确定方法[J]. *测绘学报*, 2012, 41(3): 359-365.
- ZHU Huizhong, LIU Jingnan, TANG Weiming, et al. The algorithm of single-epoch integer ambiguity resolution between long-range network RTK base stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2012, 41(3): 359-365.
- [12] 祝会忠, 徐爱功, 高猛, 等. BDS 网络 RTK 中距离参考站整周模糊度单历元解算方法[J]. *测绘学报*, 2016, 45(1): 50-57. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20140525.
- ZHU Huizhong, XU Aigong, GAO Meng, et al. The algorithm of single-epoch integer ambiguity resolution between middle-range BDS network RTK reference stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(1): 50-57. DOI: 10.11947/j.AGCS.2016.20140525.
- [13] 祝会忠, 李军, 蔚泽然, 等. 长距离 GPS/BDS 参考站网多频载波相位整周模糊度解算方法[J]. *测绘学报*, 2020, 49(3): 300-311. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190191.
- ZHU Huizhong, LI Jun, YU Zeran, et al. The algorithm of multi-frequency carrier phase integer ambiguity resolution with GPS/BDS between long range network RTK reference stations[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(3): 300-311. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20190191.
- [14] CHU Fengyu, YANG Ming, WU J. A new approach to modernized GPS phase-only ambiguity resolution over long baselines[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(3): 241-254.
- [15] 张钰玺, 张小红, 刘全海, 等. 航空测量场景下的中长基线动态定位方法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7): 871-878. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180513.
- ZHANG Yuxi, ZHANG Xiaohong, LIU Quanhai, et al. A method of dynamic positioning with the medium and long baseline for aerial measurement scenarios[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 871-878. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180513.
- [16] 李博峰, 沈云中, 周泽波. 中长基线三频 GNSS 模糊度的快速算法[J]. *测绘学报*, 2009, 38(4): 296-301. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.003.
- LI Bofeng, SHEN Yunzhong, ZHOU Zebo. A new method for medium and long range three frequency GNSS rapid ambiguity resolution[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(4): 296-301. DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2009.04.003.
- [17] ZHANG Ming, LIU Hui, BAI Zhengdong, et al. Fast ambiguity resolution for long-range reference station networks with ionospheric model constraint method[J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 617-626.
- [18] SCHAER S, BEUTLER G, ROTHACHER M, et al. The impact of the atmosphere and other systematic errors on permanent GPS networks[M] // *Geodesy Beyond 2000*. Berlin Heidelberg: Springer, 2000: 373-380.
- [19] TEUNISSEN P J G. The ionosphere-weighted GPS baseline precision in canonical form[J]. *Journal of Geodesy*, 1998, 72(2): 107-111.
- [20] TANG Weiming, LIU Wenjian, ZOU Xuan, et al. Improved ambiguity resolution for URtk with dynamic atmosphere constraints[J]. *Journal of Geodesy*, 2016, 90(12): 1359-1369.
- [21] 毛健, 崔铁军, 李晓丽, 等. 融合大气数值模式的高精度对流层天顶延迟计算方法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(7):

- 862-870. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190003.
- MAO Jian, CUI Tiejun, LI Xiaoli, et al. A high-accuracy method for tropospheric zenith delay error correction by fusing atmospheric numerical models[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(7): 862-870. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190003.
- [22] YAO Yibin, ZHAO Qingzhi, ZHANG Bin. A method to improve the utilization of GNSS observation for water vapor tomography [J]. *Annales Geophysicae*, 2016, 34(1): 143-152.
- [23] 赵庆志, 姚宜斌, 姚顽强, 等. 利用 ECMWF 改善射线利用率的三维水汽层析算法[J]. *测绘学报*, 2018, 47(9): 1179-1187. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170412.
- ZHAO Qingzhi, YAO Yibin, YAO Wanqiang, et al. A method to improve the utilization rate of satellite rays for three-dimensional water vapor tomography using the ECMWF data[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2018, 47(9): 1179-1187. DOI: 10.11947/j.AGCS.2018.20170412.
- [24] FAN Haopeng, SUN Zhongmiao, ZHANG Liping, et al. A two-step estimation method of troposphere delay with consideration of mapping function errors[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(1): 76-84. DOI: 10.11947/j.JGGS.2020.0108.
- [25] YAO Yibin, SUN Zhangyu, XU Chaoqian. Applicability of Bevis formula at different height levels and global weighted mean temperature model based on near-earth atmospheric temperature [J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2020, 3(1): 1-11. DOI: 10.11947/j.JGGS.2020.0101.
- [26] ZHANG Xiaohong, REN Xiaodong, WU Fengbo, et al. Short-term prediction of ionospheric TEC based on ARIMA Model[J]. *Journal of Geodesy and Geoinformation Science*, 2019, 2(1): 9-16. DOI: 10.11947/j.JGGS.2019.0102.
- [27] 陈正生, 张清华, 李林阳, 等. 电离层延迟变化自模型化的载波相位平滑伪距算法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(9): 1107-1118. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180404.
- CHEN Zhengsheng, ZHANG Qinghua, LI Linyang, et al. An improved carrier phase smoothing pseudorange algorithm with self-modeling of ionospheric delay variation[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(9): 1107-1118. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20180404.

(责任编辑:丛树平、宋启凡)

收稿日期: 2020-06-19

修回日期: 2020-08-20

第一作者简介: 祝会忠(1983—),男,副教授,研究方向为高精度 GNSS 定位算法与应用。

First author: ZHU Huizhong (1983—), male, associate professor, majors in the algorithm and application of GNSS high-accuracy dynamic positioning.

E-mail: zhuhuizhong@Intu.edu.cn

引文格式:刘哈,杨志梅,徐启炳,等.基于星载数字滤波器的分段式预失真优化方法[J].测绘学报,2020,49(9):1235-1242. DOI:10.11947/j.AGCS.2020.20200331.

LIU Han, YANG Zhimei, XU Qibing, et al. A piecewise pre-distortion optimization method based on spaceborne digital filter [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1235-1242. DOI: 10.11947/j.AGCS.2020.20200331.

基于星载数字滤波器的分段式预失真优化方法

刘 哈, 杨志梅, 徐启炳, 陈玲玲, 张立新

中国空间技术研究院西安分院, 陕西 西安 710100

A piecewise pre-distortion optimization method based on spaceborne digital filter

LIU Han, YANG Zhimei, XU Qibing, CHEN Lingling, ZHANG Lixin

China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an, 710100, China

Abstract: The satellite navigation system can provide high-precision navigation, positioning and timing services for all kinds of users around the world. Navigation signal quality is an important factor affecting system service performance. The transmission channel of navigation load has non-ideal characteristics, which will cause the change of navigation signal amplitude frequency characteristic and phase frequency characteristic. Therefore, the channel characteristics need to be compensated by means of pre-distortion. BDS-3 satellite is equipped with a pre-distortion filter in the digital segment. However, due to the limited resources on-board and the low accuracy of broadband pre-distortion algorithm. It is difficult for the navigation signal quality to converge to the index range in the process of pre-distortion adjustment. A piecewise high precision predistortion method based on spaceborne digital filter is designed. Based on the existing parameters of the wideband filter, the predistortion compensation is carried out dynamically and elaborately according to the weights and adjustment requirements, which makes the key indexes of attention converge with higher precision. This method has been verified by 20 satellites in orbit and is an important technical means for in-orbit navigation signal quality optimization.

Key words: nonideal characteristic; signal quality; pre-distortion; piecewise

摘 要: 卫星导航系统可以为全球各类用户提供高精度的导航、定位、授时服务,导航信号质量是影响系统服务性能的重要因素。导航载荷发射信道的非理想特性会引起导航信号的幅频特性和相频特性的变化,因此需要通过预失真手段对通道特性进行补偿。北斗三号卫星在数字段配置了预失真滤波器,但是由于受到星上资源有限以及宽带预失真算法精度不高等因素的制约,导航信号质量在预失真调整过程中很难快速收敛到指标范围内。本文设计了一种基于星载数字滤波器的分段式高精度预失真方法。在宽带滤波器已有的参数基础上,按权值和调整需求进行动态地、精细化地预失真补偿,使得关注的重点指标收敛精度更高。该方法经过了 20 颗卫星的在轨验证,是在轨导航信号质量优化的重要技术手段。

关键词: 非理想特性;信号质量;预失真;分段式

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1001-1595(2020)09-1235-08

北斗三号卫星导航系统可以为全球各类用户提供高精度的导航、定位、授时服务,与美国的 GPS(global positioning system)系统、俄罗斯的 GLONASS(global navigation satellite system)系统以及欧洲的 Galileo 系统并称四大全球卫星导航系统^[1-5]。卫星导航的高精度定位在科学研究、

经济建设、国家安全等方面都发挥着重要的作用,而导航信号的高质量播发是保障系统定位精度的关键所在^[6-9]。

导航信号在通过卫星发射信道时,由于发射信道存在非理想特性,将引起导航信号的幅频特性和相频特性的变化,直接影响下行导航信号的

质量,使系统伪距偏差恶化^[10-11],影响用户的定位精度。因此,需要对导航卫星发射信道的非理想特性进行预失真补偿,降低导航卫星发射信道对导航下行信号的影响,从而提升导航信号质量。

北斗三号卫星在导航信号生成单元中配置数字预失真滤波器,通过预失真手段实现对通道非理想特性的补偿。滤波器参数可以根据通道特性进行动态调整,并且,预失真的算法可以匹配 B1、B2、B3 频点以及信号带宽等特性。由于导航信号是扩频信号,带宽较宽,且星上资源紧张,数字预失真滤波器的阶数有限,很难实现整个信号带宽内的高精度补偿,导致信号质量部分指标在预失真补偿后依然可能存在超差现象。

本文提出了一种基于星载数字滤波器的分段式高精度预失真设计方法,在宽带预失真滤波器无法满足补偿精度的情况下,设计了相应的优化算法。在宽带预失真滤波器的基础上,对射频信道进行分段式、精细化补偿,将信号带内频段和带外频段进行合理的权值设置,使得预失真参数得到进一步优化,有效提升了数字预失真滤波器的补偿精度。以北斗全球系统 B1I 信号为例^[12-13],利用本文方法补偿信道的非理想特性后,通过评价信号质量的幅度域和相位域的关键指标来验证预失真算法的效果。

1 导航载荷通道非理想特性分析

1.1 通道非理想特性

受到射频通道的影响,导航卫星播发的下行信号会产生一定的失真,导致信号质量变差。而

信号质量变差是系统伪距偏差的初始来源,在很大程度上影响用户的定位精度。在导航卫星有效载荷中,导航信号的生成框图如图 1 所示,主要包括数字中频信号生成单元、上变频单元、输入滤波器、高功率放大器、多工器以及天线等。

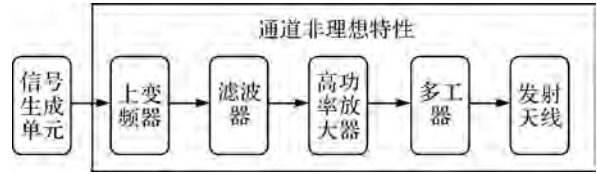


图 1 导航信号生成系统框

Fig.1 Block diagram of navigation signal generation system

这种级联通道非理想特性引起的失真最终体现在导航信号上可以归为幅度失真和相位失真两类。通过矢量网络分析仪可以提取卫星有效载荷实际发射信道的通道特性,其中相频特性可以通过群时延特性直观表征,图 2 为根据卫星实际通道特性提取的 B1 频段的幅频特性和群时延特性^[14]。从图 2 中可以得出,发射通道的幅频和群时延均是非线性的,并且具有一定的非平坦特性。

1.2 信号质量评估指标

载荷发射通道的非理想特性会给信号带来幅度失真和相位失真,影响导航信号质量。因此,在幅度域选取功率谱偏差作为验证幅度失真的关键指标,在相位域选取鉴相曲线过零点偏移(SCB)作为验证相位失真的关键指标^[15-20]。

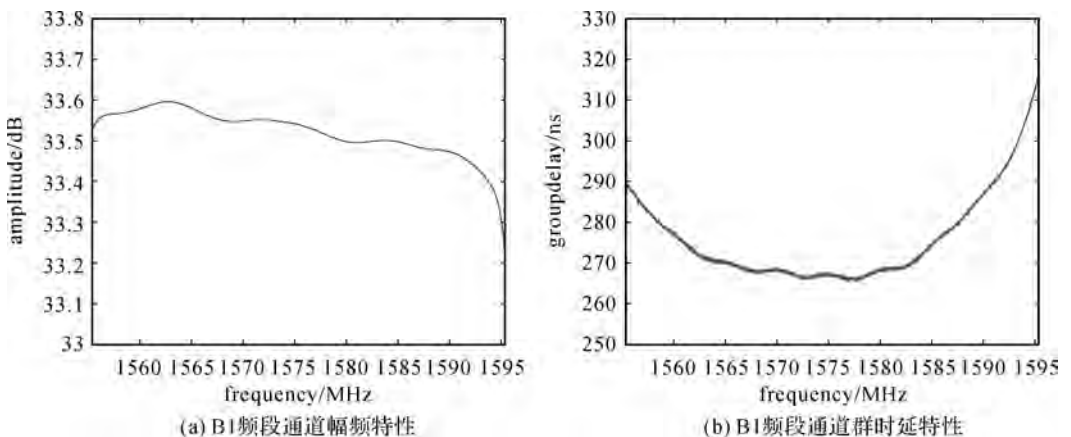


图 2 导航卫星发射通道非理想特性

Fig.2 Non-ideal characteristics of navigation satellite launch channel

功率谱密度定义为单位频带内的信号功率,表示信号功率在频域内的分布情况。功率谱偏差可

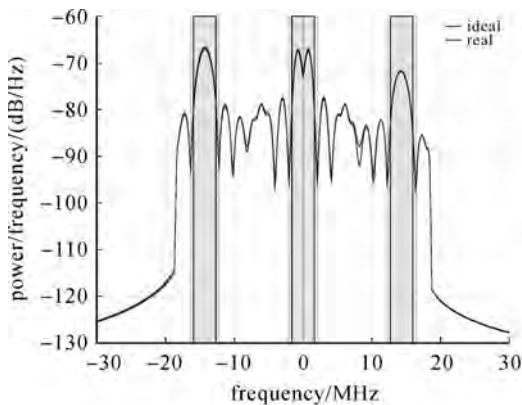
以直观地反应失真信号在幅度上与理想信号的偏差,偏差过大会影响导航信号的功率,进而导致接

收机无法准确接收信号。因此,分析主瓣带内的功率谱偏差对研究实测信号的幅度失真具有重要意义。

SCB 曲线表征鉴相曲线过零点偏移随不同相关间距变化的范围,可以反应相关峰的对称性。信号失真会引起相关函数形状的畸变。对于接收机,伪码跟踪的对象是相关函数的主峰,决定信号延时调整方向的依据为超前和滞后相关输出。当信号相位失真导致互相关函数不对称时,码环锁定点偏离相关函数峰值点,则会产生码跟踪偏差,从而带来测距误差,影响定位精度。因此,SCB 曲线是评价信号相位失真的重要指标。

对于不同的码鉴别器,鉴别曲线存在区别,以典型的超前减滞后码鉴别器为基准,设相关器的超前-滞后间距为,则鉴相曲线的表达式如式(1)所示

$$D(\epsilon, \delta) = \left| \text{CCF}\left(\epsilon + \frac{\delta}{2}\right) \right|^2 - \left| \text{CCF}\left(\epsilon - \frac{\delta}{2}\right) \right|^2 \tag{1}$$



1.3 通道非理想特性对信号质量的影响分析

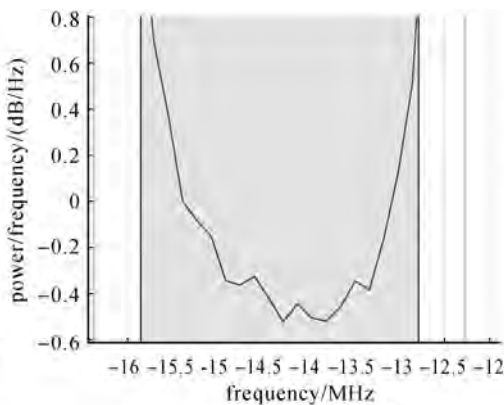
基于实际通道特性,在有线测试条件下,对通道带来的信号质量恶化进行分析,测试系统框如图 3 所示。导航卫星生成射频导航信号,通过高频电缆传输到高速数据采集设备,采集设备对数据进行 650 MB 采样以及 8 bit 量化,并将处理后的数据送到软件接收机进行分析,最终给出信号质量分析结果。



图 3 信号质量有线测试系统框

Fig.3 Block diagram of signal quality wired test system

通过以上测试流程,对 B1 频点的实际信号进行采集,分析 B1I 的功率谱偏差结果如图 4 所示,通过分析结果可以得出发射通道引起的幅度失真使得实测信号的功率谱与理想信号的功率谱产生了偏差,带内最大偏差达到 0.75 dB。



(a) welch power spectral density estimate

(b) B1 频段功率谱偏差

图 4 B1I 失真信号功率谱偏差

Fig.4 Power spectrum deviation of B1I distortion signal

对 B1I 信号的 SCB 曲线进行分析,结果如图 5 所示,通过分析结果可以得出实测信号的鉴相曲线过零点产生了偏差,最大偏差为 4.74 ns。

2 星载预失真补偿技术

2.1 星载预失真补偿方案

1.3 节分析了卫星发射通道对导航信号质量的影响,为了改善信号质量,卫星端在数字单元部分配置了参数可调的预失真滤波器,通过预失真的手段对通道非理想特性进行补偿,优化了导航信号生成系统,其系统框如图 6 所示。

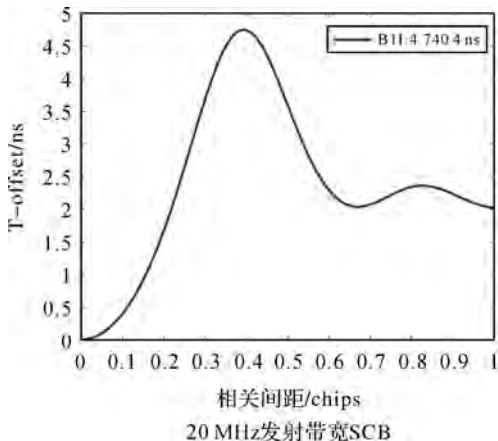


图 5 B1I 失真信号的 SCB 曲线

Fig.5 SCB curve of B1I distortion signal



图6 优化后的导航信号生成框

Fig.6 Block diagram of navigation signal generation after optimization

星上的预失真滤波器基于数字单元的现场可编程门阵列(FPGA)实现,通过合理地设置滤波器参数,使得预失真滤波器的幅频特性和群时延特性与发射通道的非理想特性反向,从而改善整个通道的非线性。由于导航系统对信号质量要求极高,各指标间的耦合性很强,因此补偿后的信号质量很难满足指标要求,必须经过多次迭代才能找到较为优质的参数,使得卫星信号质量符合要求。

预失真的优化是基于对通道特性的精确采集、预失真算法的有效补偿以及信号质量的可靠评估来实现的。系统的优化方案如图7所示。首先利用矢量网络分析仪对每颗卫星有效载荷发射通道特性进行采集,根据采集结果通过预失真算法给出预失真参数。将参数注入数字滤波器中,并用信号采集设备对补偿后的信号进行采集。由软件接收机进行信号质量评估,并给出指标符合性。若指标全部满足要求,则流程结束;若有超差项,则对预失真参数进行迭代优化,并重复以上流程^[22-26]。

2.2 宽带预失真补偿效果分析

文章[26]提出的 FIR 预失真滤波器该滤波器可以从幅度域和相位域两个层面对通道进行补偿,是对全带宽信号质量的优化。这种预失真方

式在整个带内的补偿精度比较有限,且信号质量各指标间存在强耦合的关系。因此,为使信号质量更优,必须进行多次参数迭代来获得最优的参数。

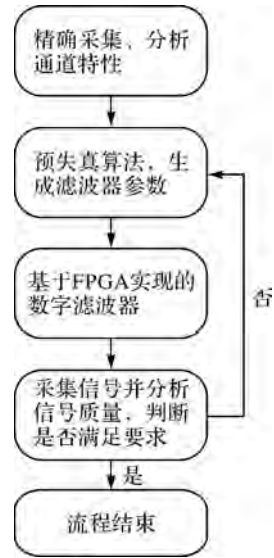


图7 预失真优化方案系统框

Fig.7 Block diagram of pre-distortion optimization scheme

将计算得到的滤波器参数注入到星上,滤波器的特性随参数变化。补偿后的信号质量分析结果如图8所示,从图中可以得出实测信号的功率谱偏差和SCB曲线有了明显的改善。但由于星上资源的限制,数字滤波器的阶数有限,导致预失真算法补偿精度不够、信号质量提升幅度不够且迭代次数过多,在实际的预失真操作中,为实现一组满足全部指标要求的参数往往需要耗费大量的时间。

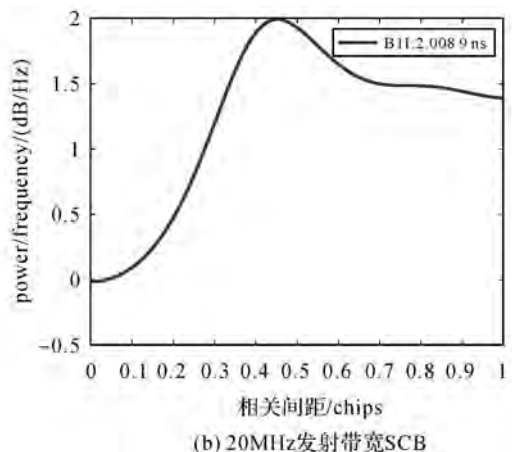
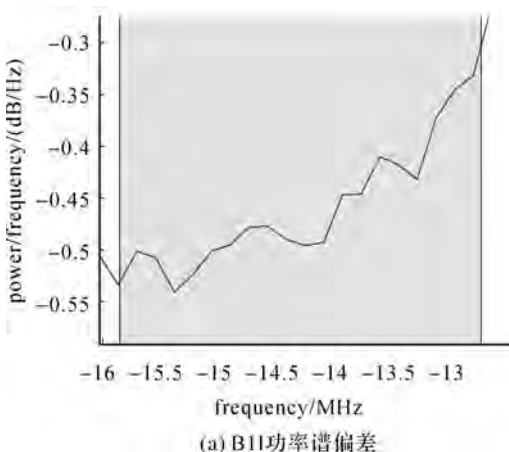


图8 B11信号补偿后的功率谱偏差和SCB曲线

Fig.8 Power spectrum deviation and SCB curve of B11 signal after compensation

3 分段式高精度预失真补偿技术

3.1 分段式预失真滤波器设计

宽带预失真是对整个带内的补偿精度比较有限,为进一步提高补偿精度,本文提出一种分段式预失真算法,是在 2.2 节已有的滤波器参数的基础上进行的性能提升。分段式滤波器在参数确定的滤波器特性上进行精细化调整,将信号根据频段的分布划分为多个区域,并给不同的区域设定不同的权值,分段式地对某一个重点关注的区域进行针对性调整,使得宽带预失真方法补偿精度不够的频段能够实现高精度补偿。

以 B1 信号为例,B1 信号是导航下行信号中信号体制最为复杂的,由 BPSK(2)、BOC(1,1)、QMBOC(6,1,4/33)、BOC(14,2) 4 路信号恒包络调制形成,其中 QMBOC(6,1,4/33) 信号是 BOC(1,1)与 BOC(6,1)以 29 : 4 的功率配比分别调制在载波的两个正交相位上而成,B1 信号组成如下表 1 所示:

表 1 北斗三号 B1 信号体制
Tab.1 B1 signal system of BDS-3

频点	信号分量	中心频率/MHz	调制方式	功率配比
	B1I	1561.098	BPSK(2)	1/3
	B1C_data	1575.42	BOC(1,1)	1/12
B1	B1C_pilot	1575.42	QMBOC(6,1,4/33)	1/4
	B1A_data	1575.42	BOC(14,2)	1/6
	B1A_pilot	1575.42	BOC(14,2)	1/6

因此对应 B1 信号的频谱,根据 B1 信号的信号支路进行频率分段,分别划分为 12 个频段, f_0

为 B1I 中频中心频率 42.966 MHz,12 个频段 $f_index(n)$ 分别是:

- $f_index(1)=[f_0-30\text{ MHz},f_0-16\text{ MHz}]$, B1I 与 B1A 下边带信号分量旁瓣;
- $f_index(2)=[f_0-16\text{ MHz},f_0-12\text{ MHz}]$, B1I 与 B1A 下边带信号分量主瓣;
- $f_index(3)=[f_0-12\text{ MHz},f_0-7\text{ MHz}]$, B1I、B1A、B1Cp 下边带信号分量旁瓣;
- $f_index(4)=[f_0-7\text{ MHz},f_0-5\text{ MHz}]$, B1Cp 下边带信号分量主瓣;
- $f_index(5)=[f_0-5\text{ MHz},f_0-2\text{ MHz}]$, B1Cp、B1Cd 下边带信号分量旁瓣;
- $f_index(6)=[f_0-2\text{ MHz},f_0]$, B1Cp、B1Cd 下边带信号分量主瓣;
- $f_index(7)=[f_0,f_0+2\text{ MHz}]$, B1Cp、B1Cd 上边带信号分量主瓣;
- $f_index(8)=[f_0+2\text{ MHz},f_0+5\text{ MHz}]$, B1Cp、B1Cd 上边带信号分量旁瓣;
- $f_index(9)=[f_0+5\text{ MHz},f_0+7\text{ MHz}]$, B1Cp 上边带信号分量主瓣;
- $f_index(10)=[f_0+7\text{ MHz},f_0+12\text{ MHz}]$, B1Cp、B1A 上边带信号分量旁瓣;
- $f_index(11)=[f_0+12\text{ MHz},f_0+16\text{ MHz}]$, B1A 上边带信号分量主瓣;
- $f_index(12)=[f_0+16\text{ MHz},f_0+30\text{ MHz}]$, B1A 上边带信号分量旁瓣。

根据 12 个频段参数所表示的信号分量,对每个参数设置相应的权值,如表 2 所示,表中将参数简化为 $f_1 \sim f_{12}$ 。

表 2 各频段分量所占权值

Tab.2 Each frequency component occupies the weight value

频段	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7	f_8	f_9	f_{10}	f_{11}	f_{12}
权值	1/60	1/6	1/30	1/12	1/30	1/6	1/6	1/30	1/12	1/30	1/6	1/60

式中,旁瓣所处的频点权值较低,主瓣所处的频点权值较高,通过对频率的细化分割,对每一频段内的滤波器幅频特性和相频特性可以进行精确调整。假设原始幅频函数为 h_ori 和原始群时延函数为 grp_ori ,根据目标幅频和群时延特性在不同的频段内设置需调整的幅频 $\Delta h_index(n)$ 和群时延 $\Delta grp_index(n)$,因此,新的幅频函数和群时延函数为

$$h_obj=h_ori+\Delta h_index(n) \quad (2)$$

$$grp_obj=grp_ori+\Delta grp_index(n) \quad (3)$$

根据群时延函数 grp_obj 积分得出相应的相频函数 φ_obj ,则传递函数为

$$H_obj=h_obj * e^{j\varphi_obj} \quad (4)$$

新的传递函数与原始的滤波器传递函数之差为

$$H_error=H_obj-H_ori \quad (5)$$

将 H_error 进行频率分段 $H_error(f_index(n))$,并根据频段是否落于主瓣带宽内设置相应的比重

因子 $Weight(n)$, 其中 $n = 1, 2, \dots, 12$, 则误差函数为

$$H_error = H_error(f_index(n)) * Weight(n)$$

$$n = 1, 2, \dots, n$$

(6)

要使得 H_error 最小, 将 H_error 离散化为实部 H_error_R 和虚部 H_error_I , 问题便转换为一个最优化的问题, 即在 2 范数下的逼近问题, 通过

对 $\min H_error_R^2 + H_error_I^2$ 的解空间的不断迭代以求得 H_obj 。并将求得的 H_obj 将幅频相应与群时延响应与门限相比较, 若超出门限则重新设置幅频 $\Delta h_index(n)$ 和群时延 $\Delta grp_index(n)$, 重复上述步骤进行迭代优化, 直至门限以内满足要求。

分段式高精度预失真滤波器的幅频、相频特性如图 9 所示。

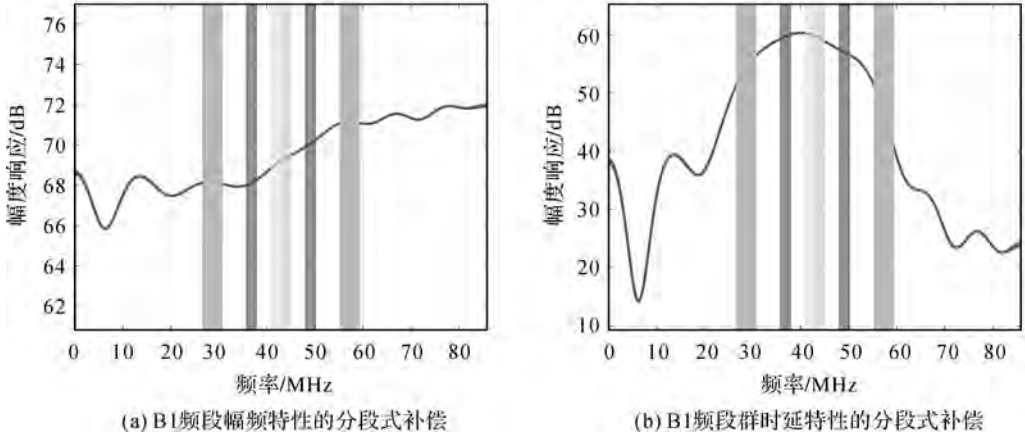


图 9 分段式预失真滤波器的幅频、相频特性

Fig.9 Amplitude and phase characteristics of the segmented pre-distortion filter

从图 9 可以看出, 分段式预失真方法对 B1 频段进行了精细的划分, 带内任意区域的幅频特性和群时延特性均可以通过参数来进行微调, 并且区域的划分也可以根据调整的需求进行设置, 可以快速将信号质量指标调整到位。通过这种设计方式, 在宽带预失真滤波器粗补偿的基础上, 解决了星载数字滤波器补偿精度不够的问题。

3.2 分段式预失真补偿效果分析

分段式预失真手段可以有效的提升导航信号质量, 通过该方法在已有预失真参数的基础上, 针对 B1I 频点的幅度和相位失真进行进一步的精细

化补偿, 补偿结果如图 10、图 11 所示。

B1I 理想信号在无预失真、宽带预失真补偿以及分段式预失真补偿 3 种情况下的信号质量比对如表 3 所示。从表 3 中可以得出, 宽带的数字预失真方法对信号的幅度失真和相位失真有所改善, 而分段式预失真方法在此基础上对关心的重点频带进行了更为精细的补偿, 使得信号质量的指标提升了 3 倍以上。不仅如此, 该方法还可以大幅度提升在轨预失真处理的优化效率, 目前已在 20 颗在轨导航卫星的测试中得到应用, 证明该方法行之有效。

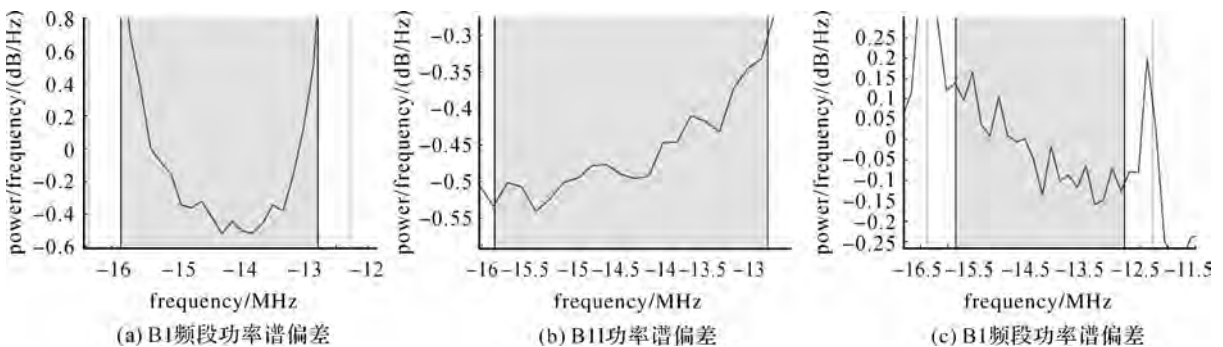


图 10 B1I 信号在不同条件下的功率谱偏差

Fig.10 Power spectrum deviation of B1I signal in different conditions

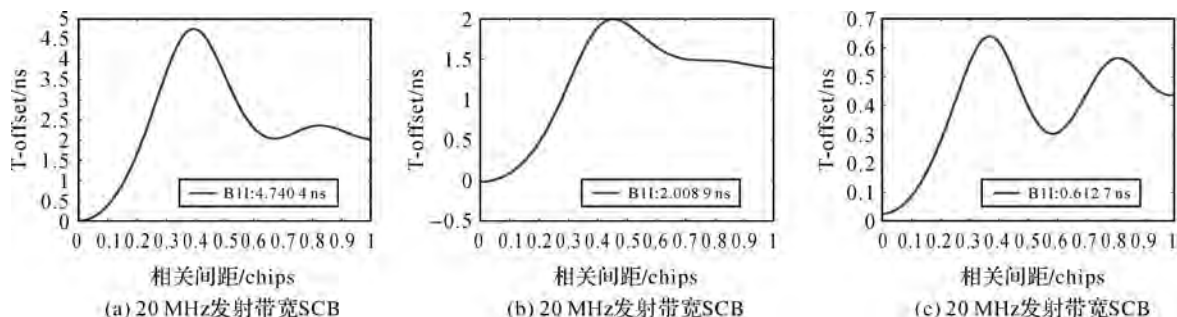


图 11 B1I 信号在不同条件下的 SCB 曲线

Fig.11 SCB curve of B1I signal in different conditions

表 3 3 种状态下的实测信号质量结果对比

Tab.3 Comparison of measured signal quality results under three conditions

	无预失真	宽带预失真	分段式预失真
功率谱偏差/dB	0.75	0.55	0.15
SCB/ns	4.74	2.01	0.61

4 结 语

通过对实测信号的采集和评估,验证了导航载荷发射信道的非理想特性对导航信号质量的影响。通过设计基于星载数字滤波器的预失真优化方案,可以实现对载荷发射信道的补偿,并且验证了传统的宽带预失真滤波器对信号质量的改善效果。最后提出了一种分段式高精度预失真优化技术,该方法对信号频段进行了精细的划分,带内任意区域的幅频特性和群时延特性均可以通过参数来进行微调,并且区域的划分也可以根据调整的需求进行设置,可以快速实现信号质量的高精度收敛。经实测数据验证,该方法优化得到的功率谱偏差指标较传统的预失真算法提升 0.4 dB, SCB 指标较传统的预失真算法提升 1.4 ns。

参考文献:

[1] 谢军,张建军,王岗.北斗卫星导航系统测量误差指标体系[J].宇航学报,2018,39(9):976-984.
XIE Jun, ZHANG Jianjun, WANG Gang. Measurement error index system of BeiDou satellite navigation system [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(9): 976-984.

[2] 郭树人,蔡洪亮,孟轶男,等.北斗三号导航定位技术体制与服务性能[J].测绘学报,2019,48(7):810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.
GUO Shuren, CAI Hongliang, MENG Yinan, et al. BDS-3 RNSS technical characteristics and service performance [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2019, 48(7): 810-821. DOI: 10.11947/j.AGCS.2019.20190091.

[3] China Satellite Navigation Office. BeiDou navigation satellite system signal in space interface control document open service signal B1I (Version 3. 0) [EB/OL]. (2019-02-27). <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/ICD/201902/P020190227702348791891.pdf>.

[4] CHEN Qiuli, YANG Hui, CHEN Zhonggui, et al. Solar radiation pressure modeling and application of BDS satellites[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2020, 3(2): 45-52.

[5] YANG Yuanxi. Resilient PNT concept frame[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2019, 2(3): 1-7.

[6] 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 Yuanxi. 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.

[7] 高为广,苏牡丹,李军正,等.北斗卫星导航系统试运行服务性能评估[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(11):1352-1355.
GAO Weiguang, SU Mudan, LI Junzheng, et al. A performance evaluation of BeiDou navigation satellite system [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(11): 1352-1355.

[8] YANG Yuanxi, XU Yangyin, LI Jinlong, et al. Progress and performance evaluation of BeiDou global navigation satellite system: data analysis based on BDS-3 demonstration system[J]. Science China: Earth Sciences, 2018, 48(5):584-594.

[9] YANG Yuanxi, GAO Weiguang, GUO Shuren, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system [J]. Navigation, 2019, 66(1): 7-18.

[10] 李柏渝,陈雷,李彩华,等.通道非理想特性对导航接收机伪码测距零值的影响分析[J].电子与信息学报,2011,33(9):2138-3143.
LI Baiyu, CHEN Lei, LI Caihua, et al. The impact of non-ideal front-end characteristic on PN zero value measurement of navigation receivers[J]. Journal of Electronics

- &. Information Technology, 2011, 33(9): 2138-3143.
- [11] FELHAUER T. On the impact of RF front-end group delay variations on GLONASS pseudorange accuracy[C]//Proceeding of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Kansas City, Missouri: [s.n.], 1997: 1527-1532.
- [12] LU Mingquan, LI Wenyi, YAO Zheng, et al. Overview of BDS III new signals[J]. Navigation, 2019, 66(1): 19-35.
- [13] YAO Zheng, ZHANG Jiayi, LU Mingquan. ACE-BOC: Dual-frequency constant envelope multiplexing for satellite navigation[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1): 466-485.
- [14] 朱祥维, 李垣陵, 雍少为, 等. 群时延的新概念、测量方法及其应用[J]. 电子学报, 2008, 36(9): 1819-1823.
ZHU Xiangwei, LI Yuanling, YONG Shaowei, et al. A new definition, measurement method of group delay and its application[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(9): 1819-1823.
- [15] ZHANG Zhongkai, DU Lan, LIU Li, et al. A 16-parameter GEO broadcast ephemeris[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2018, 1(1): 46-52.
- [16] TANG Zuping, ZHOU Hongwei, HU Xiulin, et al. Research on performance evaluation of Compass signal[J]. Scientia Sinica (Physica, Mechanica & Astronomica), 2010, 40(5): 592-602.
- [17] BORIO D, FANTINO M, PRESTI L L, et al. Robust DLL discrimination functions normalization in GNSS receivers[C]//2008 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium. Monterey, CA: IEEE, 2008: 173-180.
- [18] 周鸿伟, 魏蛟龙, 张小清, 等. 导航卫星有效载荷非理想特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(7): 118-123.
ZHOU Hongwei, WEI Jiaolong, ZHANG Xiaoqing, et al. Research on non-ideal property of payload core device on navigation satellite[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(7): 118-123.
- [19] YANG D X. Research on simulated distortion of GNSS spatial signal and its predistortion method[D]. Beijing: Beihang University, 2015: 39-40.
- [20] 蔚小龙, 寇艳红. 导航卫星双频复用信号模拟失真的仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(5): 1048-1055.
YU Xiaolong, KOU Yanhong. Simulation of analog distortion of dual-frequency multiplexing signal generated by navigation satellite[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(5): 1048-1055.
- [21] XUE Shuqiang, YANG Yuanxi. Adjustment model and colored noise compensation of continuous observation system[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2018, 1(1): 39-45.
- [22] YANG Yuanxi, GAO Weiguang. An optimal adaptive kalman filter[J]. Journal of Geodesy, 2006, 80(4): 177-183. DOI:10.1007/s00190-006-0041-0.
- [23] YANG Zhimei, XU Qibing, HAN Hong, et al. Research on pre-distortion technology for navigation transmitting channel[C]//The 6th China Satellite Navigation Conference. 2015.
- [24] MEHTA J, ZOICAS V, ELIEZER O, et al. An efficient linearization scheme for a digital polar EDGE transmitter[J]. IEEE Transactions on Circuits and System II: Express Briefs, 2010, 57(3): 193-197.
- [25] GAO Yang, LI Chunxia, FU Li, et al. Overall performance comparison of three dual-frequency constant envelop modulation schemes for GNSS[C]//Proceedings of 2016 China Satellite Navigation Conference (CSNC). Singapore: Springer, 2016: 47-56.
- [26] 田野, 张立新, 严涛, 等. 基于稀疏表示的北斗导航卫星预失真滤波器设计方法[C]//第九届中国卫星导航学术年会. 哈尔滨, 2018.
TIAN Ye, ZHANG Lixin, YAN Tao, et al. A pre-distortion filter design algorithm based on sparse representation for BeiDou navigation satellite [C] // The 9th China Satellite Navigation Conference. 2018.

(责任编辑:张艳玲)

收稿日期: 2020-07-20

修回日期: 2020-08-24

第一作者简介: 刘晗(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为卫星导航、卫星通信。

First author: LIU han (1988—), male, master, engineer, majors in satellite navigation and communication.

E-mail: 344162004@qq.com