

目次

深空探测器光学自主导航方法探讨	徐欣彤, 桑吉章, 刘 晖(1)
GPS 区域性关闭信号的可能性分析与抗干扰对策	任思衡, 姜晶莉, 尚国强, 杨 娜, 李春燕, 李 倩, 孟 瑶(5)
导航电子地图位置精度及检测方法	蔡艳辉, 章 炜, 闫庆庆, 王晓迪, 白 金, 马 旭(10)
行人低成本惯导自适应零速探测	胡 鑫, 陶贤露, 朱 锋, 张小红(15)
综合 AP 选择的蓝牙地铁车站定位	金 霄, 吴 飞, 朱 海, 鄢 松, 胡 锐, 陆雯霞(25)
BDS 广播星历 A1 型故障完好性监测方法	刘媛媛, 李 亮, 李 慧, 程 春(31)
基于 Ku 波段 CEI 的 GEO 卫星定轨特性	刘泽军, 杜 兰, 张栩晨, 黄晓霞(38)
BDS 卫星钟差短期预报的 LSTM 算法	吉长东, 朱锦帅, 黎 虎, 张 萌, 吕广涵(44)
BDS-3 在轨卫星钟性能评估与分析	杨玉锋, 彭 勇, 刘梦晗, 邱嘉平(53)
BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差的性能分析	王浩浩, 黄观文, 付文举, 谢 威, 曹 钰(61)
在线 PPP 服务系统定位和 ZTD 估计精度的比较	袁海军, 施宏凯, 何秀凤, 徐学永(68)
BDS/Galileo/GPS 三频精密单点定位模型比较与分析	卜宇航, 李博峰, 臧 楠, 苟浩洋(78)
不同星历产品反演 CMONOC/PWV 的精度评估	陈永贵, 朱玉香, 安春华(88)
GNSS 反射测量技术在水位变化探测中的应用	窦邵华, 何 骞, 龚春龙, 刁锦通, 程铭宇(94)
切比雪夫多项式在 GLONASS 广播星历中的应用	寇瑞雄, 杨树文, 化希瑞(102)
一种基于 GNSS-RTK 的大跨径桥梁模态参数识别方法	潘博闻, 李 志, 牛彦波(109)
GNSS 超长基线差分定位方法在机场工程控制测量中的应用	项 伟, 王 园, 李 锋, 梁自忠, 陈金磊, 张昌昌(116)
线面特征结合的三维激光 SLAM 算法及性能评估	王雅仪, 余 萌, 朱 锋(122)
车联网中基于交通流量感知的数据路由	孙 列, 杨梓晗(130)
卫星导航定位课程中爱国主义教育内容的融入探讨	李浩军, 李博峰, 杨 玲, 王解先, 楼立志(135)

CONTENTS

Discussion on optical autonomous navigation methods for deep spacecrafts	XU Xintong, SANG Jizhang, LIU Hui (1)
Possibility analysis and anti-jamming countermeasures on regional shutdown of GPS signals	REN Siheng, JIANG Jingli, SHANG Guoqiang, YANG Na, LI Chunyan, LI Qian, MENG Yao (5)
Position accuracy and its test method for navigation digital maps	CAI Yanhui, ZHANG Wei, YAN Qingqing, WANG Xiaodi, BAI Jin, MA Xu (10)
Adaptive threshold zero-velocity detection for pedestrian navigation with foot-mounted low-cost inertial sensors	HU Xin, TAO Xianlu, ZHU Feng, ZHANG Xiaohong (15)
Bluetooth metro station locationing selected by integrated AP	JIN Xiao, WU Fei, ZHU Hai, YAN Song, HU Rui, LU Wenxia (25)
Type A1 fault integrity monitoring for BDS broadcast ephemeris	LIU Yuanyuan, LI Liang, LI Hui, CHENG Chun (31)
Analysis on orbit determination of GEO satellite based on Ku-band CEI	LIU Zejun, DU Lan, ZHANG Xuchen, HUANG Xiaoxia (38)
LSTM algorithm for short-term prediction of BDS satellite clock bias for short-term prediction of BDS satellite clock bias	JI Changdong, ZHU Jinshuai, LI Hu, ZHANG Meng, LYU Guanghan (44)
Performance evaluation and analysis of BDS-3 on-orbit satellite clocks	YANG Yufeng, PENG Yong, LIU Menghan, QIU Jiaping (53)
Performance analysis of BDS-2/BDS-3 real-time satellite clock offset joint estimation	WANG Haohao, HUANG Guanwen, FU Wenju, XIE Wei, CAO Yu (61)
Accuracy comparison of online PPP service system positioning and ZTD estimation	YUAN Haijun, SHI Hongkai, HE Xiufeng, XU Xueyong (68)
Comparison and analysis of BDS/Galileo/GPS triple-frequency precise point positioning models	BU Yuhang, LI Bofeng, ZANG Nan, GOU Haoyang (78)
Accuracy evaluation of CMONOC/PWV inversion by different ephemeris products	CHEN Yonggui, ZHU Yuxiang, AN Chunhua (88)
Application of GNSS reflectometry in water level change detection	DOU Shaohua, HE Qian, GONG Chunlong, DIAO Jintong, CHENG Mingyu (94)
Application of Chebyshev polynomial in GLONASS broadcast ephemeris	KOU Ruixiong, YANG Shuwen, HUA Xirui (102)
A modal parameter identification method of long-span bridges based on GNSS-RTK technology	PAN Bowen, LI Zhi, NIU Yanbo (109)
Application of GNSS ultra-long baseline differential positioning in airport engineering control surveying	XIANG Wei, WANG Yuan, LI Feng, LIANG Zizhong, CHEN Jinlei, ZHANG Changchang (116)
3D LiDAR SLAM algorithm and performance evaluation based on edge and surface features	WANG Yayi, YU Meng, ZHU feng (122)
Traffic volume-aware data routing in vehicular networks	SUN Lie, YANG Zihan (130)
Discussion on the integration with patriotism education of satellite navigation and positioning discipline	LI Haojun, LI Bofeng, YANG Ling, WANG Jiexian, LOU Lizhi (135)

引文格式: 徐欣彤, 桑吉章, 刘晖. 深空探测器光学自主导航方法探讨[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 1-4. (XU Xintong, SANG Jizhang, LIU Hui. Discussion on optical autonomous navigation methods for deep spacecrafts[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 1-4.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210101.

深空探测器光学自主导航方法探讨

徐欣彤¹, 桑吉章², 刘晖¹

(1. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 武汉 430079; 2. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079)

摘要: 为了进一步研究深空探测任务中航天器成功登陆小行星的技术, 提出光学自主导航技术是实现小行星登陆的关键技术; 介绍了光学导航理论方法; 并对探测器登陆小行星过程中的航天器状态估计算法进行了讨论。

关键词: 深空探测; 小行星登陆; 光学导航; 自主导航技术; 状态估计

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4999(2021)01-0001-04

Discussion on optical autonomous navigation methods for deep spacecrafts

XU Xintong¹, SANG Jizhang², LIU Hui¹

(1. Research Center of GNSS, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2.School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to further study the technology of spacecraft successfully landing on asteroids for deep space exploration missions, the paper proposed that optical autonomous navigation should be the key technology to realize asteroid landing: the principle and methods of optical navigation were introduced; and the algorithm of spacecraft state estimation during spacecraft landing on asteroids was discussed.

Keywords: deep space exploration; asteroid landing; optical navigation; autonomous navigation technology; state estimate

0 引言

深空探测是当前的研究热点领域之一, 其探测对象是太阳系内外的宇宙空间和星体^[1]。小行星由于其数量丰富且类型多样, 已成为深空探测中重要的研究对象, 由于近地小行星易接近, 所以通常被选作探测目标。美国开展小行星探测任务的时间最早、数量最多。1996年, 美国发射了全球首个小行星探测器“尼尔”(NEAR)^[2], 获得关于爱神星(Eros)的重要科学数据, 开启了人类探测小行星的新篇章, 随后发送了卡西尼-惠更斯号(Cassini-Huygens)、新视野号(New Horizons)、黎明号(Dawn)等一系

列小行星探测器。日本于2005年率先完成了对小行星表面土壤的采样并成功返回地球^[3], 实现了小行星探测的突破。欧空局也发射了“罗塞塔”彗星探测器, 并于2014年完成了航空历史上首次彗星着陆^[4]。2012年, “嫦娥2号”探测器与图塔蒂斯小行星成功交会, 并用导航相机对其进行了光学成像, 这是我国首次进行对小行星的飞越探测, 标志着我国是继美国、欧洲航天局和日本之后, 第4个实现了小行星探测计划^[3]的国家。深空探测器正常工作时的工作原理如图1所示, 主要依靠自主光学导航系统来完成轨道修正和导航, 其系统性能的好坏直接影响到深空探测任务的成败。

收稿日期: 2020-06-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0800405); 武汉市应用基础研究计划项目(2018010401011271); 卫星导航增强联合技术实验室项目(4202-250000318)。

第一作者简介: 徐欣彤(1996—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 研究方向为卫星导航。

通信作者简介: 刘晖(1968—), 男, 湖北广水人, 博士, 教授, 研究方向为高精度卫星导航定位、网络RTK定位技术等。

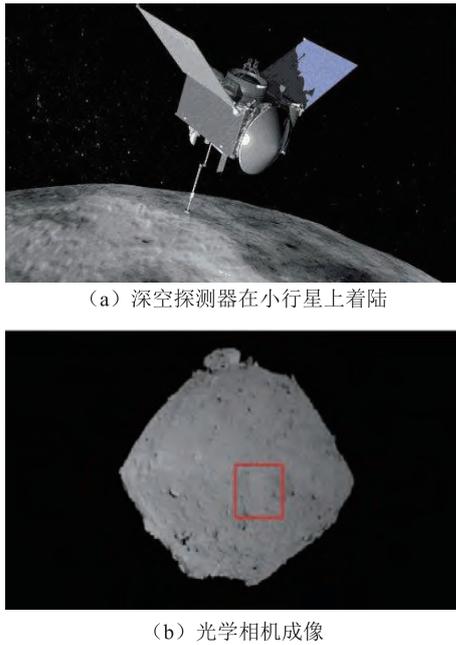


图1 深空探测器正常工作时的工作原理

自主导航技术作为深空探测的关键技术,是保障航天器安全、提高探测精度、确保探测任务成功的重要因素^[5]。从1971年第1颗火星探测器“水手9号”开始,美国就对光学自主导航原理的适用性进行了实验,经过20多年的研究,在1998年发射的“深空1号”探测器的巡航段,实现了光学导航技术的实际应用,并在5年后登陆火星时,成功地采用了光学导航系统^[6]。因此,很有必要将光学导航作为小行星登陆的关键导航技术。

1 光学导航方法相关概念

1.1 光学导航

光学导航(optical navigation, OPNAV)^[7]是1种利用机载成像技术来确定航天器轨道和目标星历的导航方法,光学导航技术提供从航天器到目标载体的直接方向测量。自20世纪70年代初以来,光学导航就在恒星背景下,通过对附近物体的视差测量来提供导航信息。

一般情况下,航天器的姿态确定系统可以提供照相机的姿态信息,光学相机拍摄的目标图片即为光学导航数据,得到的是线性相关的图像坐标,将其转换为像素坐标后,通过图像处理技术,就可以从中提取出需要的光学观测值。

1.2 目标的图像坐标

在光学导航系统的定位过程中,需要确定小行星在图片中的图像坐标,该过程分为3个步骤:①确定从照相机到小行星的惯性方向向量;②确定照

相机在惯性坐标中的轨道和姿态;③分析照相机投影,来确定目标的图像坐标^[8],具体流程如图2所示。

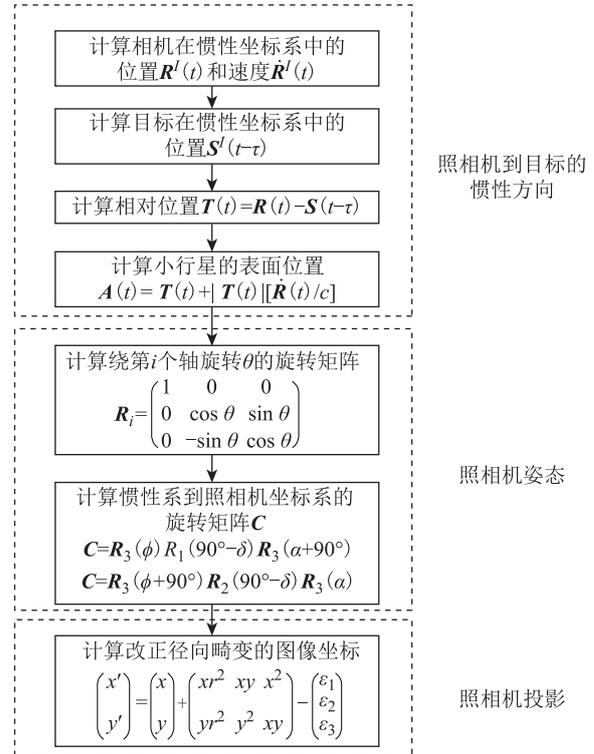


图2 获得图像坐标的具体步骤

1) 照相机到目标的惯性方向。假定惯性参考框架不旋转、无加速度,计算曝光时刻 t 时,照相机在惯性坐标系中的位置 $\mathbf{R}^I(t)$ 和速度 $\dot{\mathbf{R}}^I(t)$,以及目标在惯性坐标系中的位置 $\mathbf{S}^I(t-\tau)$,二者相对位置为 $\mathbf{T}(t)$,其中 τ 为光从目标传播到照相机的时间, c 为真空中的光速。由于恒星的光行差,使得这个方向朝照相机速度顶点方向上移动,小行星的表面位置 $\mathbf{A}(t)$ 最终由矢量加法可得。

2) 照相机姿态。定义1个笛卡尔坐标系 MNL 来确定照相机姿态, L 轴为照相机光轴,照相机指向目标的方向为正方向, M 和 N 轴垂直于光轴且相互垂直,指向任意,符合右手系即可。通过旋转矩阵 \mathbf{C} ,将惯性坐标系中的表面位置向量 \mathbf{A}^I 转到照相机坐标系 \mathbf{A}^C 。其中 α 和 δ 是光轴方向(+ L)的赤经和赤纬, ϕ 是光轴的旋转角。由于航天器结构和操作限制,使得照相机只有2个旋转自由度而不是3个,所以2个求 \mathbf{C} 公式均适用。

3) 照相机投影。投影利用光学成像原理实现,但是真正的相机不是理想的,所以在投影过程中要考虑相差畸变。假设目标的图像坐标为 (x, y) ,径向畸变以辐射的方式朝向或者远离光轴,与光轴距离的立方成正比,用畸变系数 ε_1 表示,其中

$r^2 = x^2 + y^2$, 当探测器平面不垂直于光轴时就会产生有 2 个自由度的偏差, 故还有 2 个畸变系数 ε_2 、 ε_3 , 改正径向畸变后的图像坐标为 (x', y') 。

1.3 转换成像素坐标

数字图像处理和图片分析, 通常在像素坐标系中进行, 将水平坐标和垂直坐标分别称为样本坐标 s 和线坐标 l , 通过简单的线性变化可以将图像坐标 (x', y') 转化成像素坐标, 即为

$$\begin{pmatrix} s \\ l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{K}_x & \mathbf{K}_{xy} \\ \mathbf{K}_{yx} & \mathbf{K}_y \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s_0 \\ l_0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中 \mathbf{K} 为图片的像素矩阵, \mathbf{K}_x 、 \mathbf{K}_y 、 \mathbf{K}_{xy} 、 \mathbf{K}_{yx} 与像素的形状有关。对于 1 个正方形像素的理想探测器, $\mathbf{K}_x = \mathbf{K}_y$, 且非对角线上元素是 0。如果是矩形像素, $\mathbf{K}_x \neq \mathbf{K}_y$; 如果是非矩形像素, 则 $\mathbf{K}_{xy} \neq -\mathbf{K}_{yx}$ 。式 (1) 的最后一项 (s_0, l_0) 为光轴的像素坐标。传统意义上像素坐标必须是整数, 后来认为像素坐标是连续的, 将其视作连续的坐标系统^[8]。

1.4 背景移除

光学导航图片通常包含了大部分的灰暗天空或深沉的天体表面, 背景颜色单一且偏暗, 只有 1.2 个小目标和地标, 很难从图片中提取目标的像素坐标。因此在图片像素化以后, 常用以下 3 种方法对导航图片进行背景移除^[9]:

1) 确定天空像素的平均值, 并从每个像素中减去此值。该数值可以是算术平均值或中值, 但不能包含宇宙射线、热像素 (由于探测器上的辐射等造成的损害导致某些像素变得“热”) 或真实的恒星图像。

2) 如果背景天空的色调发生变化, 可能是因为视野之外的其他物体有散射光。可以用多项式函数 (例如勒让德多项式等) 与天空像素拟合的方法将其移除。

3) 多拍几张照片, 找到每个像素的中值, 并在每张图片中减去该中值。即使相机的姿态在图片之间发生变化, 此方法依然可行, 只要每个像素都是以天空作为背景, 那么中值就会是 1 个天空像素。

2 航天器状态估计算法

通过深空探测器的导航相机拍摄天体表面图像, 将图像处理获得的光学观测值结合激光成像测距仪的相关参数进行滤波, 可以估计航天器的位置和姿态, 光学导航系统的工作流程如图 3 所示。

航天器状态估计算法可以分为 2 种: 第 1 种是确定性算法, 即将某个时间段内的光学观测值

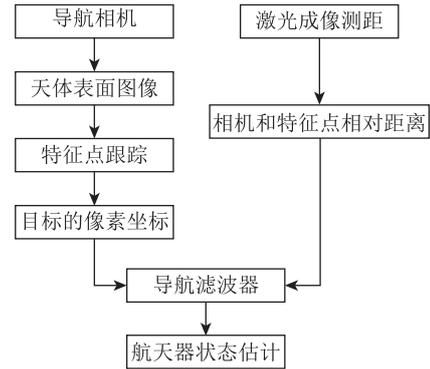


图 3 光学导航系统工作流程

进行迭代计算, 解算得到深空探测器相对于参考坐标系的位置和姿态向量; 另 1 种为状态估计法, 该方法需要建立系统模型, 用状态递推方程和光学观测值进行滤波, 获得导航状态量的最优估计值^[10]。2 种方法都有各自的优点和不足。

2.1 确定性算法

在探测器登陆小行星的过程中, 实际解算的是导航相机与参考坐标系之间相对位置和姿态, 数学模型包括观测方程和状态方程。解决上述非线性问题的思路有 2 种: 一种是用数学方法对非线性方程直接求解; 另 1 种是将非线性方程线性化后再求解。常用的直接求解非线性方程的算法有最小二乘微分修正算法 (Gaussian least-square differential correction, GLSDC)^[11]、正交迭代算法^[12]等。GLSDC 算法直接计算导航相机与参考坐标系的相对位置和姿态, 前提是要结合较准确的损失函数权矩阵, 如果迭代初值和真值相差不大, 计算则可以快速收敛。但迭代过程中, 计算雅克比矩阵的伪逆矩阵涉及到很大的计算量, 所以算法的效率与观测条件的优劣密切相关。

将航天器的位置和姿态这二类待求解参数进行分离, 可减小计算量, 即进入迭代循环时, 假设航天器的姿态不变, 只解算相对距离, 将不含姿态信息的伪距方程用一阶泰勒展开, 进行线性化操作, 在结果收敛后, 更新相对位置, 姿态解算时重复上述操作。此方法的假设条件太强, 如果实际飞行过程中, 航天器姿态在历元间变化显著, 此法的收敛时间将会很长, 甚至有可能发散。

2.2 状态估计法

状态估计方法是将物体的动力学方程作为状态方程, 将从导航相机中获取的光学观测值作为测量方程, 通过滤波器解算得到导航状态量的最优估计值^[9]。由于光学导航的系统模型是非线性的, 故不能采用经典卡尔曼滤波的方法。

常见的非线性滤波估计方法是扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 算法^[9], 此方法的计算量小, 过程简便易操作, 但逼近过程和实际的非线性系统间会产生偏差, 导致状态估计有偏甚至发散。

另 1 种是无迹卡尔曼滤波估计方法(unscented Kalman filter, UKF), 以“逼近高斯分布比逼近任意非线性函数容易”作为理论基础^[9], 比 EKF 算法更准确。虽然思路简单, 但是涉及到计算西格马 (Sigma) 样本点时, 对概率论等数学知识的要求较高, 需要一定的数学功底作基础。UKF 通过无损变换, 使非线性系统方程适用于线性条件下的经典卡尔曼滤波, 适用于不可微的非线性系统。

不同算法的优缺点如表 1 所示。由于特征点位

表 1 不同算法的优缺点比较

算法类型	算法名称	优点	缺点
确定性 算法	GLSDC	收敛快	计算量大
	参数分离	简单, 计算量小	收敛时间长
状态估 计法	EKF	计算量小	估计有偏或发散
	UKF	适用于不可微的非线性系统	理论复杂, 难度大

置和估计的航天器状态都是不精确的, 且在图像中包含了这些不确定性, 故整个系统的图像信息需要多次迭代, 才能够达到最佳拟合效果。

3 结束语

随着人类文明的发展和一系列科学技术的进步, 科学家们的探索步伐不可能局限在地球上。2020年6月23日, 我国第55颗北斗卫星导航系统的导航卫星, 也是北斗三号的最后一颗组网卫星发射成功, 北斗三号的30颗组网卫星全部到位, 北斗三号星座部署全面完成, 北斗卫星导航系统将进入服务全球、造福人类的新时代。深空探测无疑是未来航天活动的必经之路, 更是我国太空战略的重要环节。我国在2020年10月发射的“嫦娥5号”月球采样返回探测器, 在2020年7月发射的火星探测器, 均采用了光学自主导航技术。因此加快自主导航技术的研究步伐, 是成为航天强国的基础。投入更多的人力、物力研究自主导航系统的硬件设备, 增强设备的可用性、可靠性和续航能力, 开发精度高、兼容性强、容错率高的光学导航软件, 已成为深空探测的主要发展方向。

参考文献

- [1] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 深空探测的进展与我国深空探测的发展战略[J]. 中国航天(英文版), 2002(12): 28-32.
- [2] 徐伟彪, 赵海斌. 小行星深空探测的科学意义和展望[J]. 地球科学进展, 2005, 20(11): 1183-1190. DOI:10.3321/j.issn:1001-8166.2005.11.004.
- [3] 东方星. 漫谈小行星及其探测与开发[J]. 国际太空, 2017(7): 48-55. DOI:10.3969/j.issn.1009-2366.2017.07.010.
- [4] 季江徽. 开展小行星彗星深空探测的科学意义和启示[J]. 国防科技工业, 2011(4): 54-55.
- [5] 王新龙. 太空战略的“北极星”: 深空探测自主导航技术的发展趋势预测[J]. 人民论坛·学术前沿, 2017(5): 46-53, 95.
- [6] 王密, 郑兴辉, 程宇峰, 等. 火星探测巡航段与捕获段光学自主导航方案与关键技术[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(4): 434-442.
- [7] OWEN W M, DUXBURY T C, ACTON C H, et al. A brief history of optical navigation at JPL[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2008, 131: 329-348.
- [8] GILLAM S D, IONASESCU R, WILLIAMS P. The planning of optical navigation pictures for the Cassini extended mission[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2008, 130: 2003-2018.
- [9] OWEN W M. Methods of optical navigation[EB/OL]. [2019-11-14]. <https://trs.jpl.nasa.gov/bitstream/handle/2014/41942/11-0589.pdf>.
- [10] 陈阳. 小行星探测器着陆段自主光学导航方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [11] GUNNAM K, HUGHES D C, JUNKINS J L, et al. A DSP embedded optical navigation system[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of International Conference on Signal Processing. Beijing, China: IEEE, 2002: 1735-1739. DOI: 10.1109/ICOSP.2002.1180137.
- [12] LU C P, HAGER G, ERIC M. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell, 2000, 22(6): 610-622.

引文格式: 任思衡, 姜晶莉, 尚国强, 等. GPS区域性关闭信号的可能性分析与抗干扰对策[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 5-9. (REN Siheng, JIANG Jingli, SHANG Guoqiang, et al. Possibility analysis and anti-jamming countermeasures on regional shutdown of GPS signals[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 5-9.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210102.

GPS区域性关闭信号的可能性分析与抗干扰对策

任思衡, 姜晶莉, 尚国强, 杨娜, 李春燕, 李倩, 孟瑶
(航天工程大学士官学校, 北京 102249)

摘要: 为了探究“银河号”事件导航失灵的真实原因, 更好地提升全球卫星导航系统的导航对抗性能, 分析探讨全球定位系统(GPS)信号区域性关闭的可能性; 以区域性导航战为背景, 从基本原理及效益比的角度证伪GPS区域性关闭信号的可能性; 分析以电磁干扰作为导航战攻击手段的优势; 论证建立北斗卫星导航系统的重要意义; 最后给出提升卫星导航系统抗干扰性的对策。

关键词: 卫星导航; 全球定位系统; 导航战; 抗干扰; “银河号”事件

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4999(2021)01-0005-05

Possibility analysis and anti-jamming countermeasures on regional shutdown of GPS signals

REN Siheng, JIANG Jingli, SHANG Guoqiang, YANG Na, LI Chunyan, LI Qian, MENG Yao
(School of Non-Commissioned Officer, Space Engineering University, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to explore the real reasons of the navigation failure of Yinhe incident and improve the performance of the navigation countermeasures of Global Navigation Satellite System (GNSS), the paper discussed the possibility of regional shutdown of Global Positioning System (GPS) signals: from the perspective of basic principles and benefit ratio, the possibility of turning off GPS signals regionally under the background of regional navigation warfare was disproved; and the advantages of using electromagnetic interference as a means of attack in navigation warfare were analyzed; then the significance of establishing BeiDou navigation satellite System (BDS) was argued; finally the countermeasures to improve the anti-jamming ability of navigation satellite systems were given.

Keywords: satellite navigation; global positioning system; navigation warfare; anti-jamming; Yinhe incident

0 引言

导航技术对于人类的生存与发展具有十分重要的意义。从中国古代的“指南车”“司南”, 到西方近代的“十字测角器”“航海六分仪”, 导航技术的进步拓展了人类的生存空间, 为人们的生产和生活带来了便利。随着时代的发展, 传统的导航技术在一定程度上显现出可靠性差、使用场合受限、定位精度低、操作复杂等缺陷, 已经不能满足现代社会对导航定位的需求^[1]。

20世纪50年代末, 人类开始研究以人造卫星作为无线电导航信号台的全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)^[2]。历经半个多世纪的探索和研究, 卫星导航相关技术取得了长足的进步。目前, GNSS因具有定位精度高、定位时间短、无累积误差、导航要素齐全、终端成本低廉、全天时全天候工作等优势, 已经成为现代社会最重要的导航手段之一, 在各国的国防建设和经济社会发展中具有非常重要的意义^[3]。迄今为止, 美国的全球定位系统(global positioning

收稿日期: 2020-05-28

基金项目: 航天工程大学士官学校预研基金项目(Y Y1901)。

第一作者简介: 任思衡(1993—), 男, 辽宁沈阳人, 硕士, 讲师, 研究方向为卫星导航及导航对抗。

通信作者简介: 尚国强(1981—), 男, 河南林洲人, 硕士, 讲师, 研究方向为卫星通信对抗与卫星遥感。

system, GPS)、中国的北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS)、俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统 (global navigation satellite system, GLONASS) 及欧盟的伽利略卫星导航系统 (Galileo navigation satellite system, Galileo) 是世界上应用最为广泛的“四大卫星导航系统”^[4]。

自卫星导航技术广泛应用以来, GNSS 的应用与对抗一直是卫星导航领域研究的热点问题。现有的研究在提高导航系统稳定性、提升导航定位精度、增强信号抗干扰性等方面进行了深入探讨, 但有关区域性导航战 (navigation warfare, NAVWAR) 相关策略的研究还比较少。而在军事导航领域, 有关导航战背景下“卫星导航系统可能被区域性关闭”的问题受到关注, 其中以“银河号”事件为背景的所谓“GPS 被区域性关闭事件”影响最为广泛。

本文从基本原理及效益比的角度, 论证通过关闭部分导航卫星的方式, 阻断特定区域 GPS 服务是不可行的, 判断有关“银河号”GPS 信号被区域性关闭的说法是不真实的, 分析以电磁干扰作为导航战攻击手段的优势, 并探讨提升 GNSS 抗干扰性能的对策。

1 “银河号”事件简介

1993年7月23日, 在公海发生了震惊中外的“银河号”事件。“银河号”是隶属于中国远洋运输总公司的集装箱货轮, 事发时已从天津新港出发, 预计前往迪拜、达曼和科威特等国家和地区进行小商品和染料贸易。在“银河号”行驶到阿曼湾海域时, 突然遭到美军直升机和军舰袭扰, 称其“装载了用于制造化学武器的原料”, 并公然违反国际法和相关国际准则, 强行要求“银河号”接受检查。

8月2日晚, “银河号”被迫在霍尔木兹海峡以东抛锚停船, 并在极度缺少食品、淡水、药品和燃料的情况下坚持到8月24日。最终, “银河号”在国际检查团的联合检查下证明了自己的清白^[5-6]。

时至今日, 在各类报道和热门书籍中, 有关“美军通过关闭部分 GPS 卫星信号的方式, 阻断了‘银河号’所在区域的 GPS 民用服务, 导致‘银河号’被迫停船”的言论广为流传^[7]。不仅如此, 在一些学术研究中, 认为美军可以通过关闭特定区域的 GPS 民用信号阻止敌方使用 GPS 服务的观点依然存在, 并有学者据此提出了相应的抗干扰对策^[8]。

2 区域性关闭信号的原理与影响

从技术的角度, 通过关闭部分 GPS 卫星信号的方式阻断特定区域的 GPS 服务并不难实现, 但其带来的影响值得分析讨论。

2.1 区域性关闭信号的基本原理

要评估 GPS 区域性关闭带来的影响, 可以从 GNSS 导航定位的基本原理进行分析。GNSS 定位的基本原理是用户接收机根据接收到的卫星导航信号, 确定卫星与用户接收机之间的距离, 从而进一步解算出用户接收机的空间位置, 即“三球交汇定位原理”。具体公式为

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} \quad (1)$$

式中: ρ_i 为导航卫星到用户接收机的距离; (x_i, y_i, z_i) 为导航卫星的坐标; (x_u, y_u, z_u) 为用户接收机的坐标。由于卫星导航信号包含了信号播发时刻的信息, 并以电磁波的形式在空间中传播, ρ_i 亦可表示为

$$\rho_i = c \cdot (T_2 - T_1) \quad (2)$$

式中: c 为信号传播速度即光速 3×10^8 m/s; T_2 和 T_1 分别为导航信号被接收的时刻和导航信号播发的时刻。根据式 (1) 和式 (2), 由于卫星在固定的轨道上运行, 参考导航信号中的卫星星历等信息可以很容易确定信号播发时刻卫星的坐标 (x_i, y_i, z_i) , 而 T_2 和 T_1 均为可观测量, 所以要求解用户接收机的坐标 (x_u, y_u, z_u) , 需联立 3 个方程, 即需要接收机同时接收 3 颗卫星的导航信号。

但在实际中, 卫星的时钟为高精度的原子钟, 而用户接收机受到成本和体积等因素的限制, 其时钟一般采用低精度的晶振材料, 导致卫星与接收机存在钟差 Δt 。由于信号传播速度为光速, 卫星与接收机间 1 ms 的钟差将导致 300 000 m 的距离误差, 如不考虑钟差将导致定位结果不可用。因此, 在式 (2) 基础上增加了变量钟差, 并考虑了信号通过电离层和对流层所产生的误差, 即

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2} + c \cdot \Delta t + D \quad (3)$$

式中: Δt 为钟差; D 为信号通过电离层和对流层所产生的误差。在式 (3) 中, D 可以通过特定的模型计算得到, 故共存在 (x_u, y_u, z_u) 和 Δt 4 个未知数, 通过联立 4 个方程构成 1 个非线性方程组, 将非线性方程组线性化即可求解, 其定位原理如图 1 所示。

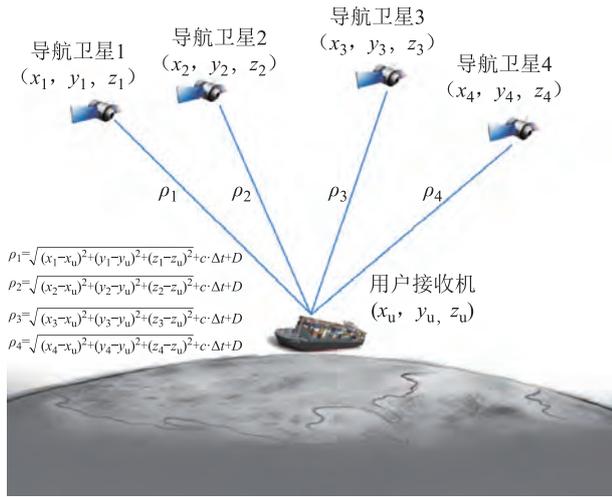


图 1 GNSS 定位原理

当 GNSS 用户接收机同时接收 4 颗卫星的导航信号时, 即可完成 1 次定位^[9-10]。在没有基准站的航海导航过程中, “银河号” 货轮就是通过这种方式完成定位和导航的。而要想通过关闭部分卫星导航信号阻断特定区域的卫星导航服务, 就要让该区域内接收机可接收到的导航卫星数量小于 4 颗^[11]。

2.2 区域性关闭信号的影响

由于 GNSS 的信号通常为广播式信号, 无法具体控制导航信号的传播方向。以 GPS 为例, 其卫星轨道高度为 20 180 km, 信号范围约 28°, 对应的地球圆心角约 152°, 导航信号在地面的覆盖范围十分广泛^[12]。

通过国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS) 提供的精密星历, 可以对关闭部分卫星导航信号、阻断目标区域的卫星导航服务的情况进行仿真模拟。文献[13]以 GPS 星座为例, 通过 IGS 精密星历仿真模拟关闭部分卫星导航信号, 使在目标区域的可见卫星数目为 3 颗, 实现区域性不可定位^[13]。具体做法为, 将全球按照 1° 的经纬度分辨率, 划分为 360×180 个格网点, 基于不可定位区域最小准则(即分析每种关闭方式所导致的在全球范围内不可定位区域的面积, 选取其中不可定位面积最小的方式)的导航信号关闭策略下实现区域性定位阻断, 流程如下:

步骤 1: 在第 k 个观测历元, 采用 IGS 精密星历计算目标点的可观测卫星数 n。

步骤 2: 遍历 C_nⁿ⁻³ 种信号关闭策略, 并分别计算每种信号关闭策略下全球范围的不可定位面积。

步骤 3: 在 C_nⁿ⁻³ 种信号关闭策略中, 选取不

可定位面积最小的信号关闭策略作为实现区域性定位阻断的导航信号关闭策略, 并按照此策略对导航信号进行关闭。

步骤 4: k=k+1, 重复步骤 1。其中 k 为观测历元数, n 为可观测卫星数。

通过此种方式, 可以模拟在 24 h 内, 关闭阿富汗喀布尔地区民用 GPS 服务对区域外导航服务带来的影响。其中目标区域为 ABCD 4 点连线, A 点坐标 (34.07°N, 68.72°E), B 点坐标 (35.07°N, 68.72°E), C 点坐标 (35.07°N, 69.72°E), D 点坐标 (34.07°N, 69.72°E)。图 2 显示了 24 h 内基于不可定位区域最小准则, 对阿富汗喀布尔地区民用 GPS 导航信号关闭得到的全球格网定位可用性分布情况。

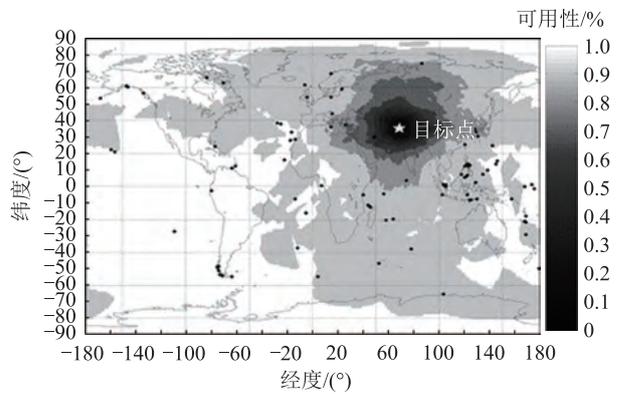


图 2 GPS 区域性关闭引起全球定位可用性变化分布^[13]

图 2 中阴影部分由黑到白分别表示可用性由 0 (全部时段不可用) 到 100% (全部时段可用), 其他数字则表示部分时段可用(如 0.5 表示 50% 的时段可用)。对结果分析可得, 关闭部分导航信号可以有效阻断一定区域的卫星导航服务, 但与此同时, 全球约 49% 以上地区的用户会因此无法使用民用定位服务, 约 9.5% 的地区定位可用性也会因此降至 90% 以下; 此外, 在目标点 1 640 km 范围内的地区, 定位可用性降到了 50% 以下^[13]。仿真结果显示, 利用关闭部分导航信号的办法对区域外 GPS 定位性能有很大影响, 甚至无法满足通常意义上的民用导航服务, 其影响区域已远超作战区域的范围, 故关闭部分导航信号的方法并不适用于导航战^[14]。

目前, GNSS 作为军民两用系统, 已经成为各国的导航基础设施, 广泛应用于国防、交通、电力、农业、建筑、通讯、能源、金融等诸多领域, 且许多领域均对卫星导航服务产生了较高的依赖度。一旦全球范围内 GPS 民用服务大面积中断, 世界

各国高度依赖 GPS 的众多领域将受到严重影响甚至瘫痪,给社会生产生活和公共秩序带来重大破坏,造成无法估量的巨大经济损失。而美国作为 GPS 的主要受益方和依赖 GPS 程度较高的国家,必将首当其冲受到影响。不难判断,在区域性导航战中, GPS 区域性关闭信号带来的正向收益远远小于全球范围内 GPS 中断对美国造成的损失。通过关闭部分 GPS 卫星信号的方式阻断特定区域的 GPS 服务将得不偿失,在实践上是不可行的。

事实上,“银河号”事件发生时, GPS 导航技术已经得到普遍应用,即使美国真的通过关闭部分 GPS 卫星信号的方式,关闭了“银河号”所在区域的 GPS 民用导航服务,受影响的将不只是一艘“银河号”,而是全世界范围内的众多车辆、货轮和客机,以及其他高度依赖 GPS 的人员和设备。但是,在现有的文献中,没有任何关于“银河号”事件发生时,全球范围内 GPS 信号异常的记录。

翻阅国内当时有关“银河号”事件的报道,不仅没有任何有关于“银河号”GPS 被关闭的记载,反而清楚地记录着是由于美国强行向有关国家施压,禁止“银河号”驶入港口,“银河号”才不得不在海上停泊了 22 天^[15-16]。目前,广泛存在的有关“银河号”GPS 被区域性关闭信号的陈述,均出现在 2008 年以后,直到今天仍不断。综上可以判断,美军通过关闭部分导航卫星让“银河号”所在区域的民用导航服务失效,迫使其停船的言论是假消息;战时,美军可以通过控制 GPS 卫星,关闭特定区域的 GPS 民用导航信号的观点是不成立的。

3 GPS 区域性电磁干扰

虽然直接关闭特定区域 GPS 信号的做法并不可行,但是在作战中,让特定区域的卫星导航信号失效的方法确实存在。在区域性导航战背景下,通常采用电磁干扰的手段对特定区域实施攻击。根据干扰方式的不同,针对 GNSS 的电磁干扰通常可分为压制式干扰和欺骗式干扰。

3.1 压制式干扰

压制式干扰是从信号强度上发动攻击,通过干扰机发出与导航信号同频段的干扰信号对卫星导航信号进行覆盖,从而使导航终端无法收到导航信号完成定位^[17]。

由于导航卫星距离用户非常遥远,其导航信号到达用户接收机的信号强度一般十分微弱^[18]。以 GPS 为例,其卫星到达地表的信号强度仅约为 $-160 \text{ dB}\cdot\text{W}$ ^[19],再加上无线电技术的广泛应用造成

的复杂电磁背景,卫星导航信号非常容易被强信号所覆盖和干扰。在目前的实际应用中,压制式干扰对军用导航信号和民用导航信号均可以起到较好的干扰效果。

3.2 欺骗式干扰

欺骗式干扰是从信号特征上发动攻击,通过伪基站发出一系列的虚假导航信号,诱骗导航终端依据虚假导航信号输出错误的导航信息或无法输出导航信息,从而干扰正常的导航服务^[20]。

由于军用导航信号采取安全性较高的军码,难以直接破译,因而军用导航终端一般不容易受到欺骗式干扰的有效攻击^[21]。而民用导航信号,因其格式、密码等信息高度公开,接收机比较容易受到欺骗。目前,欺骗式干扰可以较为有效地干扰民用导航信号^[22]。

3.3 电磁干扰的优势

在导航战中,电磁干扰效果好,成本低,且不会带来作战区域外的经济损失,是应用最为广泛的重要攻击手段。根据资料表明,通过购买市场上公开销售的电子元件,即可制作让半径 16 km 区域内的 GPS 接收机无法正常工作的干扰机,而其成本仅需 400 美元^[23]。如果当年“银河号”的 GPS 设备确实失效,则可能是美军采取了区域性电磁干扰的攻击手段。

4 抗干扰对策探讨

4.1 抗干扰的误区

认识到区域性导航战中, GPS 无法实现区域性关闭信号,可以纠正卫星导航领域过去的一些错误认识。在 BDS 投入使用前,曾有研究基于 GPS 区域性关闭信号的假设,提出采取 GPS 民用信号和 GLONASS 民用信号相结合的导航方式,意图增强抗干扰性,提高战时生存能力。实际上, GPS 并不会区域性关闭,在实际作战中主要采取电磁干扰的方式攻击敌方卫星导航系统。而干扰 GPS 民用信号与同时干扰 GPS 民用信号和 GLONASS 民用信号在成本和难度上几乎没有区别,这种“弱”加“弱”并不等于“强”。通过多个民用导航信号组合的方式意图提升抗干扰能力,在实战背景下将是完全无效的策略。

需要指出的是:认识到 GPS 区域性关闭的可能性不存在,并不意味着我们可以放心大胆地依赖美国的 GPS;恰恰相反,我们必须大力开发建设我国的 BDS。GPS 区域性关闭虽然并不现实,但 GPS 军用导航信号,出于安全考虑决不可能提供

给我国使用, 且 GPS 民用导航信号的抗干扰能力远低于军用导航信号, 所以只有自主研发完全属于我国的 GNSS, 才能满足我国高精度、高抗干扰性的导航定位需求, 更好地服务于我国的国防和经济建设。此外, 大力开发建设 BDS, 对于推动我国关键技术进步、培育专业技术人才、促进导航产业发展、提升我国综合国力都有着极其重要的意义。

4.2 抗干扰的对策

目前, 无论是对于 BDS 还是 GPS, 良好的抗干扰性都是导航系统正常工作的重要保障, 可以有效地提升战时的生存能力。要提升 GNSS 的抗干扰性能, 可以从以下几个方面入手:

1) 从系统科学的角度优化整体结构。GNSS 作为整体, 在设计时需统筹考虑其稳定性和抗干扰性。具体而言, 可以采用增设备份卫星和备份地面站, 改进星座结构, 构建星间链路^[24]等手段, 并避免出现短板效应。

2) 优化导航信号设计。导航信号设计与信号的干扰性具有密切关系^[25]。为提高信号抗干扰性可以采取两方面的措施优化信号:

一是军用信号独占频谱。在区域性导航战中, 对该区域敌方的所有导航信号和己方的民用导航信号都需要进行干扰。如果己方军用信号和民用信号重叠, 将无法实现有针对性的干扰。

二是增发无数据调制的导频信号。数据调制会影响信号接收的灵敏度, 通过播发无数据调制的导频信号, 可以提升接收信号的灵敏度, 提高信号抗干扰性。

3) 战时对导航卫星进行功率增强^[26]。以 GPS 的“Block III-C”卫星为例, 其高增益的点波束相

控阵天线技术, 能够在战时将 GPS 的信号强度提高数十分贝, 为用户终端提供抗干扰余量, 极大地提升 GPS 的战时可靠性与稳定性^[27]。

4) 改进接收机的抗干扰配置。接收机是 GNSS 与用户交互的终端, 直接影响着系统输出导航信息的准确性和有效性^[25]。通过改良接收机的抗干扰天线和滤波器等设备, 可以更有效地将干扰信号与导航信号进行分离, 在剔除干扰信号的同时, 确保对导航信号的影响最小化。此外, 用户接收机还可以采取将卫星导航技术与惯性导航技术、天文导航技术等自主式导航相结合的方式, 构成组合导航系统, 实现较好的复合抗干扰能力。

5) 在战区设置伪卫星平台。卫星导航系统抗干扰能力较弱, 重要原因之一是卫星到达接收机的信号微弱。通过在战区设置伪卫星平台, 播发与导航卫星频率、格式完全相同的导航信号, 可以成百上千倍地提高导航信号强度, 从而大大增加特定区域卫星导航系统的抗干扰能力。

6) 增强对干扰源的反侦察能力。在战时, 可以通过广泛设置的干扰源监测设备和反干扰定位系统, 找出敌方的干扰源, 并对其进行毁伤, 从而直接地消除敌方干扰。

5 结束语

对于 GPS 而言, 区域性关闭导航服务并非切实可行的手段。在导航战中, 电磁干扰是最为经济、高效和常用的攻击手段。要提高 GNSS 的稳定性和战时生存能力, 不能采取多种民用信号组合的方式, 而必须坚持改进抗干扰技术, 优化抗干扰策略, 从多个维度提升系统的抗干扰能力。

参考文献

- [1] 刘美生. 全球定位系统及其应用综述(一): 导航定位技术发展的沿革[J]. 中国测试技术, 2006, 32(5): 1-7.
- [2] 胡惠卿. BDS/GPS 双系统多频单历元定位方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [3] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 3-8.
- [4] 刘艳亮, 张海平, 徐彦田, 等. 全球卫星导航系统的现状与进展[J]. 导航定位学报, 2019, 7(1): 18-21, 27.
- [5] 李大光. 从“银河”号事件看经济安全[J]. 现代军事, 1998(4): 27-28.
- [6] 王巧荣. 严重侵犯中国主权的“银河”号事件[J]. 党史文汇, 2009(7): 10-14.
- [7] 东鸟. 中国输不起的网络战争[M]. 长沙: 湖南人民出版社, 2010: 22-25.
- [8] 陈佳琳. 北斗卫星导航系统自主可控能力评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2018.
- [9] 胡小平. 导航技术基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 96-100.
- [10] 汪金萍. BDS/GPS 定位解算算法研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [11] 彭竞. 挑战性环境下卫星导航数据处理关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2013.
- [12] 让-马利·佐格. GPS 卫星导航基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011: 33-36.

引文格式: 蔡艳辉, 章炜, 闫庆庆, 等. 导航电子地图位置精度及检测方法[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 10-14. (CAI Yanhui, ZHANG Wei, YAN Qingqing, et al. Position accuracy and its test method for navigation digital maps[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 10-14.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210103.

导航电子地图位置精度及检测方法

蔡艳辉¹, 章炜², 闫庆庆¹, 王晓迪¹, 白金¹, 马旭¹

(1. 国家测绘产品质量检验测试中心, 北京 100830; 2. 自然资源部地理信息管理局, 北京 100034)

摘要: 针对引入非线性偏转后, 导航电子地图的空间位置精度评估问题, 提出了地图图面位置偏差和用户可获得定位精度的概念, 构造了1种基于安卓(Android)平台架构的导航电子地图位置精度检测方法, 实测数据结果显示, 虽然当前导航电子地图图面位置偏差都在100 m以上, 但用户可获得定位服务精度平均为6 m左右。

关键词: 导航电子地图; 位置精度; 地图图面位置偏差; 用户可获得定位精度; 精度检测

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4999(2021)01-0010-05

Position accuracy and its test method for navigation digital maps

CAI Yanhui¹, ZHANG Wei², YAN Qingqing¹, WANG Xiaodi¹, BAI Jin¹, MA Xu¹

(1. National Quality Inspecting and Testing Center of Surveying and Mapping, Beijing 100830, China;
2. Geographic Information Management Department of MNR, Beijing 100034, China)

Abstract: In order to supplement the insufficient research on the spatial position accuracy evaluation of Navigation Digital Map (NGM) with the mandatory introduction of the nonlinear deflection, the paper proposed a test method of the positioning accuracy: concepts of the position deviation of map surface and the positioning accuracy that can be obtained by users were given; and the position accuracy detection method of navigation electronic maps based on Android platform architecture was constructed. Experimental result showed that the surface position deviation of current navigation electronic maps could be more than 100 m, while the average accuracy of positioning service obtained by users would be about 6 m.

Keywords: navigation digital map; position accuracy; spatial surface position bias; positioning accuracy obtained by users; precision test

0 引言

导航电子地图的空间位置精度既是重要的质量指标, 也是涉及安全的关键指标。作为1种公开版的地理信息产品, 导航电子地图空间位置需进行强制性技术处理^[1], 同时, 公开表示的地理信息内容也需要进行审查。因此, 导航电子地图在地图表现形式和地图功能上, 都不同于普通地图, 其中

最主要的就是, 导航电子地图与地物之间不再是纯地图投影关系, 在地图上直接进行空间分析将带来很大的误差。

由于公开版的导航电子地图引入了人为的非线性位置偏转, 所以在导航电子地图质量标准中, 一般都并未将空间位置精度作为质量元素^[2-3]。导航电子地图相关的学术研究中, 涉及空间位置精度的分析也相对较少。但在导航电子地图后台服

收稿日期: 2020-06-28

基金项目: 自然资源部地理信息安全监管能力建设项目(12113400000180003); 国家测绘产品质量检验测试中心“质量之翼”项目(2020-zlzy-015)。

第一作者简介: 蔡艳辉(1973—), 男, 湖北广水人, 博士, 研究员, 研究方向为GNSS高精度定位、水下定位技术、测绘与地理信息成果质量检验理论和方法等。

务系统提供的查询、线路规划、实时导航、缓冲区分析等各种地理信息应用中, 实际上都需要考虑数据精度问题。为了客观准确地评价公开版导航电子地图的空间位置精度以及相关的应用, 本文从地图数据和地图服务两个方面, 定义了导航电子地图图面位置偏差和导航电子地图用户可获得定位服务精度的概念, 同时, 提出 1 种基于安卓 (Android) 平台架构的导航电子地图位置精度检测方法。

1 导航电子地图的空间位置精度概念

1.1 地图位置精度

对于传统的纸质地图, 通常人眼能分辨的两点间的最小距离是约 0.1 mm, 把地形图上 0.1 mm 所能代表的实地水平距离称为比例尺精度^[4-5], 因此, 只要测量地物的位置精度小于比例尺精度, 就能满足该比例尺地图制图的数据源要求。另一方面, 地形图制作是 1 个复杂的过程, 从大地控制点成果、航测成图到编绘、印刷出版整个过程中的每一道工序, 都可能存在误差, 因此, 最后成图的地图位置精度, 定义为地图上某一地点或地物轮廓点偏离它们真实位置的程度, 其值大小通常表示为

$$\Delta d_i = \sqrt{(x_{\text{map}}^i - x_{\text{check}}^i)^2 + (y_{\text{map}}^i - y_{\text{check}}^i)^2} \quad (1)$$

式中: $(x_{\text{map}}^i, y_{\text{map}}^i)$ 为地图图解地物点坐标; $(x_{\text{check}}^i, y_{\text{check}}^i)$ 为实地测量地物坐标; Δd_i 为实测坐标和图解坐标的距离; i 为点的编号。通常需要对整个地图进行均匀采样, 统计计算出地图位置精度的中误差。

1.2 导航电子地图生产和服务

导航电子地图属于服务于大众的公开版地图, 其生产流程除了传统的地图生产环节外, 还需进行地图安全技术处理、地图内容的审查和出版登记。其中: 地图安全技术处理包括对矢量地图数据的空间位置进行非线性的位置偏转, 实现人为位置精度的降低处理, 其数据变换流程如图 1 所示。

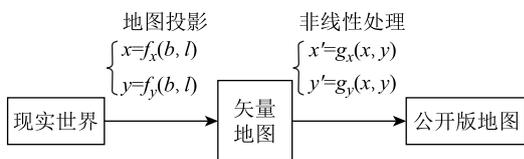


图 1 导航电子地图数据变换

地图投影为

$$\left. \begin{aligned} x &= f_x(b, l) \\ y &= f_y(b, l) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

非线性变换为

$$\left. \begin{aligned} x' &= g_x(x, y) \\ y' &= g_y(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: b, l 为地面点的经纬度坐标; $x = f_x(b, l)$ 、 $y = f_y(b, l)$ 为地图投影函数; $x' = g_x(x, y)$ 、 $y' = g_y(x, y)$ 为非线性位置偏转函数; x' 、 y' 为最终公开版地图空间位置坐标。

导航电子地图数据的非线性偏转处理由专门机构研发, 以应用程序编程接口 (application programming interface, API) 的方式发布, 授权使用。在实际应用中, 各地图生产厂商都需要通过 API 插件进行数据变换后, 才能为用户提供服务。

1.3 导航电子地图的空间位置精度

由于导航电子地图制作过程中增加了地图空间位置的人为偏转, 最终的地图数据已不再是测绘学意义下的地图投影变换数据, 实际上演变为 1 种广义的映射地图。随着互联网技术的发展, 导航电子地图服务一般都需要后台服务系统支持, 因此, 导航电子地图的空间位置精度可以从两个方面来定义:

1) 地图图面位置偏差。地图图面位置偏差定义为地图图面坐标与实测位置的偏差, 本质上就是将导航电子地图视为传统地图, 按 1.1 节的概念定义地图位置精度, 将人为的非线性偏转偏移量视为地图空间位置的点位误差, 按照图面图解坐标与实测坐标的差值统计地图的精度。所以, 地图上一点的图面位置偏差包含了地图本身的位置误差和非线性偏转引入的误差。即

$$\Delta D_i = \Delta d_i + \Delta g_i \quad (4)$$

式中: ΔD_i 为地图上第 i 点的位置偏差; Δd_i 为第 i 点的地图本身的位置误差; Δg_i 为第 i 点非线性偏转偏差。

由于人为的非线性偏差在一定的范围内表现为系统性偏差, 而非随机误差, 且数值远大于地图本身的位置精度; 因此采用“偏差”比“误差”更能准确表达其本质。在 $\Delta d_i \ll \Delta g_i$ 时, Δd_i 可忽略, ΔD_i 近似等于 Δg_i 。

尽管非线性位置偏转后的坐标可以公开, 但导

航电子地图图面一般不支持用户直接获取坐标,用户只能通过导航电子地图服务系统提供的专用接口获取偏转后的地图位置坐标数据。

2) 用户可获得定位服务精度。用户可获得位置服务精度的定义为,导航电子地图及其服务系统为用户提供的用户可获得的定位服务精度,该指标由导航电子地图数据和支持服务系统共同决定。

导航电子地图的导航服务与地图数据通常都是集成在一起提供的,用户使用导航电子地图时,实际上是使用导航电子地图软件系统提供的、基于地图数据的分析服务,导航电子地图所展示的仅仅是地图数据和分析结果的综合提示信息。因此,用户可获得定位服务精度是从用户应用的角度来定义的导航电子地图位置精度。

导航电子地图定位服务实际上是1个大系统,当用户启用全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)定位时,导航电子地图软件系统将获得当前实际位置坐标,并将位置信息发送到后台云端服务器,通过云计算完成相关空间数据分析,然后将结果发送到导航电子地图软件前端显示,导航电子地图显示的位置与用户实际位置之间存在一定偏差,如图2所示。



图2 导航电子地图用户可获得定位服务精度示意

根据定位导航服务的全过程,导航电子地图图面显示点的位置精度可表示为

$$\sigma_{All}^2 = \sigma_{Map}^2 + \sigma_{GNSS}^2 + \sigma_{others}^2 \quad (5)$$

式中: σ_{All} 为导航电子地图图面检测点的位置精度; σ_{Map} 为导航电子地图用户可获得定位服务精度; σ_{GNSS} 为 GNSS 测量的位置精度; σ_{others} 为导航电子地图定位服务云系统的其他误差影响。

当采用高精度 GNSS 定位时,可忽略 GNSS 定位误差和系统处理导致误差的条件,因此用户获得的定位服务精度就是用户所在位置与用户图面

显示位置之间差值的统计均方差。

2 导航电子地图精度检测方法

2.1 地图图面位置偏差检测方法

在导航电子地图上选取一些道路特征点和兴趣点(point of interest, POI)作为检测点,通过高精度参考数据或外业实地测量的方式,获得检测点的绝对坐标。同时通过导航电子地图软件接口,获取监测点的图面坐标,采用式(1)计算相同样本点之间的位置差值,统计评估导航电子地图图面的均方差为

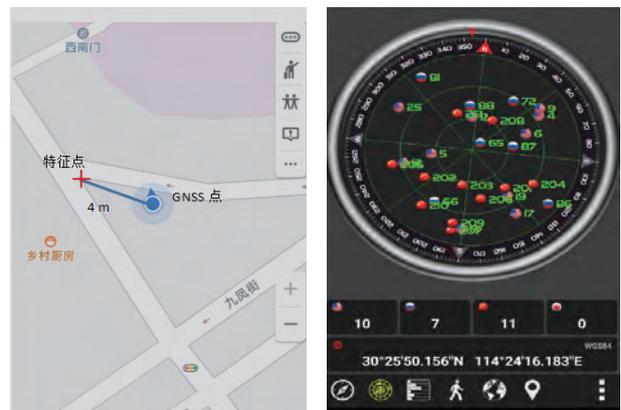
$$\sigma_{bais} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta d_i^2}{n}} \quad (6)$$

式中: Δd_i 为实测坐标和图解坐标的距离,本质上包含地图本身的误差和非线性偏转引入的误差; σ_{bais} 为地图图面位置偏差值的均方差。

2.2 用户可获得定位服务精度检测方法

用户可获得定位服务精度检测,需要通过导航电子地图软件系统的定位服务进行采样来完成。

在导航电子地图上选取道路及重要设施的特征点,如道路交叉点、建筑拐角、公交车站、天桥楼梯转角等作为特征点,在选取的特征点上,通过手机的 GNSS 定位软件(如图3所示)实地获取手机 GNSS 接收机的定位结果,同时记录导航电子地图软件定位的位置,由于导航电子地图上特征点的位置与特征点实地位置存在一定偏差,通过手持测距仪、皮尺、测量杆等方式,测量距离偏差。



(a) 手机导航电子地图的显示结果

(b) 手机GNSS定位软件的显示结果

图3 手机版导航电子地图特征点测量

为了降低 GNSS 定位误差,需进行多次测量,对多组测量结果取平均值,获得检测点的平

均定位结果和偏差平均值。实际应用中, 每个检测点的测量次数不少于 20 次^[6], 通过观测数据取平均, 计算最终的精度。通常手机 GNSS 定位精度约为 5 m^[7-10], 则测量 20 次平均值的精度 $\sigma_{\text{GNSS}} = \frac{5}{\sqrt{20}} = 1.1 \text{ m}$, 相比而言, GNSS 定位误差可忽略。由式 (5) 可得地图精度为

$$\sigma_{\text{Map}} = \sqrt{\sigma_{\text{All}}^2 - \sigma_{\text{GNSS}}^2 - \sigma_{\text{others}}^2} \quad (7)$$

在 Android 系统下, 应用软件都通过虚拟接口访问系统平台 GNSS 设备, 因此在静止条件下, 通过 GNSS 定位软件获取的位置坐标与导航电子地图获取的位置信息是同源的, 相当于将相同的数据分别送到了不同的应用系统, 等同于获取了导航电子地图使用的绝对位置坐标。

3 实验与结果分析

3.1 实验数据

为验证本文的方法, 选择了国内 4 个较有影响的导航地图产品(地图 1、地图 2、地图 3、地图 4), 测试硬件统一采用了 Android 系统的三星平板电脑 (portable Android device, PAD) 为硬件平台, PAD 内置有 GNSS 定位模块, 安装有 4 家的手机地图软件, 并集中下载采样区的数据到三星 PAD 中。

测试的样本数据覆盖大城市、省会、地县级城市。在全国范围内, 选择了 8 个检测样区, 每个检测样区内不少于 20 个点, 每个检测点需独立测量 20 次, 同时采用高精度卫星影像对地面特征点的坐标进行检校, 进一步消除 PAD 定位的粗差。

3.2 地图图面位置偏差检测结果

通过 4 家地图厂商提供的 API 接口, 分别获取各个检测点的开放坐标, 按式 (1) 计算偏差值, 统计结果如图 4 所示。

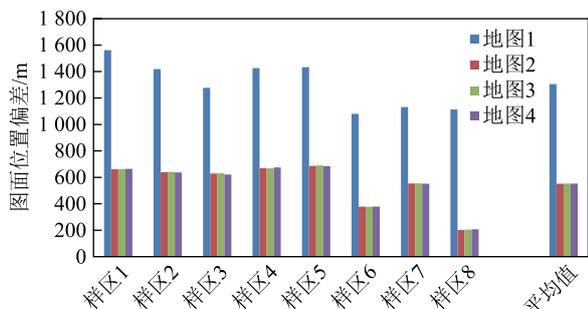


图 4 各样区地图绝对位置偏差

从图 4 可以看出: 地图 1 的公开坐标的平均偏差为 1305.3 m; 地图 2 的公开坐标的平均偏差平均

为 552.0 m; 地图 3 的公开坐标的平均偏差平均为 553.8 m; 地图 4 的公开坐标的平均偏差平均为 552.7 m。地图 2、地图 3 及地图 4 的位置偏差相近, 地图 1 的位置偏差明显大于其他 3 家。各家在样区 6 和样区 8 的位置偏差都明显低于其他检测样区。

地图图面位置偏差检测结果表明:

1) 不同城市导航电子地图图面位置偏差表现出较大的变化, 样区 5 结果与样区 8 结果相差达到 400 多米。

2) 不同厂商的导航电子地图产品图面位置偏差变化具有相关性, 尽管不同样区的偏差大小互异, 但整体具有一致的变化特性。

3) 地图 1 与地图 2、地图 3、地图 4 具有显著的偏差量, 另外 3 家地图产品的图面位置偏差的幅度基本一样。

测试结果也表明, 地图图面位置偏差值主要是非线性变换引入的偏差值, 且各家采用的非线性变换算法具有相似性。由于其偏移幅度远大于地图本身的随机误差, 整体表现为系统性偏差, 由于该偏差是人为引入的, 不能反映导航电子地图本身的地图精度特性。

3.3 用户可获得定位服务精度检测结果

用三星 PAD 进行现场测量并记录数据, 采用式 (6) 计算用户可获得定位服务精度, 忽略导航电子地图服务系统运算导致的误差影响, 统计分析结果如图 5 所示。

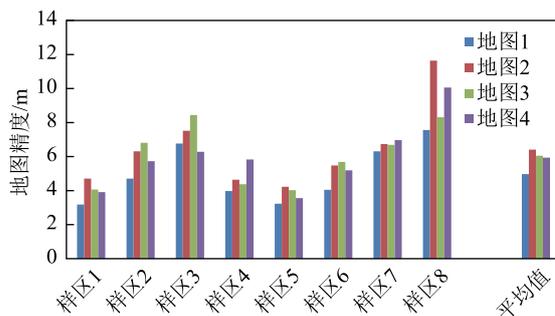


图 5 用户可获得服务精度

从图 5 可以看出: 地图 1 的用户可获得定位服务精度平均为 5.0 m; 地图 2 的用户可获得定位服务精度平均为 6.4 m; 地图 3 的用户可获得定位服务精度平均为 6.0 m; 地图 4 的用户可获得定位服务精度平均为 5.9 m。各家导航电子地图提供用户可获得的定位服务精度相当。

用户可获得定位服务精度检测结果表明:

1) 同一地图厂商的数据在不同城市之间, 用户可获得定位服务精度分布具有随机性;

2) 不同厂商的用户可获得定位服务精度分布, 在不同样区之间具有一致变化特性;

3) 尽管地图 1 图面位置偏差很大, 但地图 1 与其他 3 家地图产品的用户可获得定位服务精度平均值基本一致, 约为 6 m。

实测结果也表明, 用户可获得定位服务精度反映了导航电子地图数据本身的精度特性, 从用户的角度上看, 4 个地图提供给用户的导航体验基本一样, 各家没有本质区别。另一方面, 尽管公开版导航电子地图都增加了人为的非线性偏转变换, 空间位置存在较大的偏移, 但由于有后台的导航服务系统的支持, 用户仍然可以获得较高精度的定位服务。采用用户可获得定位服务精度的概念及其检测方法, 能够有效回

避非线性偏转的影响, 准确反映地图数据及其服务的精度特征。

4 结束语

导航电子地图的精度是提供高质量导航服务的基础, 本文从导航电子地图的数据和应用的角度, 定义了导航电子地图图面偏差和用户可获得服务精度概念, 对我国公开版导航电子地图的位置精度特性进行描述, 结合当前导航电子地图应用的实际, 给出了 1 种基于 Android 平台的导航电子地图位置精度检测方法。实测数据结果显示, 本文的方法能够较好地反映当前导航电子地图空间位置精度的情况, 可以服务于导航电子地图数据质量及安全监管。

参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 导航电子地图安全处理技术基本要求: GB 20263—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006: 1.
- [2] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 导航电子地图安全处理技术基本要求: GB/T28441—2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 3.
- [3] 蔡艳辉, 商瑶玲, 王晓迪, 等. 互联网导航电子地图质量检测[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 13-18.
- [4] 徐根才. 中、小比例尺地形图平面位置精度分析[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1989, 14(2): 59-68.
- [5] 吕玉霞, 薛明, 张小莉. 中美地图与地理空间数据精度模式的比较研究[J]. 测绘标准化, 2014, 30(4): 4-7.
- [6] 蔡艳辉, 程鹏飞, 张莉, 等. 测绘地理信息产品抽样检验的两类错误概率[J]. 测绘学报, 2019, 48(8): 954-959.
- [7] 孟照刚, 张岩, 牛学超, 等. 智能手机 GPS 定位精度分析实验[J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(12): 51-52, 71.
- [8] 刘经南, 吴杭彬, 郭迟, 等. 高精度道路导航地图的进展与思考[J]. 中国工程科学, 2018, 20(2): 99-105.
- [9] 张楷时, 焦文海, 李建文. Android 智能终端 GNSS 定位精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(10): 1472-1477.
- [10] 龚成锴, 沈飞, 曹新运, 等. 多系统智能手机的导航定位信号质量分析[C]//中国卫星导航系统管理办公室学术交流中心. 第十一届中国卫星导航年会论文集. 北京: 中科北斗汇(北京)科技有限公司, 2020: 20-28.

引文格式: 胡鑫, 陶贤露, 朱锋, 等. 行人低成本惯导自适应零速探测[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 15-24. (HU Xin, TAO Xianlu, ZHU Feng, et al. Adaptive threshold zero-velocity detection for pedestrian navigation with foot-mounted low-cost inertial sensors[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 15-24.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210104.

行人低成本惯导自适应零速探测

胡鑫¹, 陶贤露¹, 朱锋¹, 张小红^{1,2}

(1. 武汉大学 测绘学院, 武汉 430079; 2. 地球空间信息技术协同创新中心, 武汉 430079)

摘要: 为了进一步提升全球卫星导航系统的多传感器融合定位精度, 提出1种自适应阈值的零速探测方法: 利用安装在行人足部的低成本惯性测量单元进行行人航位推算, 并利用行人脚落地时的零速信息进行零速更新, 以抑制误差发散; 利用加速度计和陀螺仪输出构建极大似然检验统计量, 发现滑动窗口内检验统计量的幅值和最小值随着速度加快而增大; 然后通过幅值和最小值2个特征量, 建立自适应阈值模型, 阈值根据速度变化而动态调整, 确保每一步均能探测零速状态, 同时不会过多地探测零速; 最后通过用自适应阈值和固定阈值解算不同速度的数据加以验证。结果表明: 较小的固定阈值在行人速度较大时, 存在大量零速间隔的漏判; 较大的固定阈值则出现较多将动态判断为静态的情况; 用自适应阈值可准确地探测出100%的零速间隔, 明显优于固定阈值。

关键词: 低成本惯性测量单元; 行人航位推算; 极大似然法检验统计; 自适应阈值; 零速探测

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0015-10

Adaptive threshold zero-velocity detection for pedestrian navigation with foot-mounted low-cost inertial sensors

HU Xin¹, TAO Xianlu¹, ZHU Feng¹, ZHANG Xiaohong^{1,2}

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

2. Collaborative Innovation Center of Geospatial Technology, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to further improve the positioning accuracy of multi-sensor fusion in global navigation satellite system, the paper proposed an adaptive threshold zero-velocity detection method: the low cost Inertial Measurement Unit (IMU) mounted on the foot of the pedestrian was used for dead reckoning, and the zero speed update was carried out to suppress error divergence by using the zero speed information of pedestrian landing; the maximum likelihood test statistics were constructed by the outputs of accelerometer and gyroscope, and it was found that the magnitude and minimum values of the test statistics in the sliding window became larger with larger speed; then the adaptive threshold model was established with the magnitude and minimum values, by which the calculated threshold can be dynamically adjusted according to the speed change, ensuring that zero velocity state can be detected in each step without too much detection as zero-velocity state for the dynamic state; finally the feasibility of the method was verified by using adaptive thresholds and fixed thresholds to solve the different speed data. Result showed that: the smaller fixed thresholds would miss many zero-velocity intervals of faster walking data, and the larger fixed thresholds would have obvious misjudgment of dynamic as static; while the adaptive threshold zero-velocity detection method would accurately detect all zero-speed intervals, which means the proposed method could be significantly better than the fixed threshold method.

Keywords: low-cost inertial measurement units; pedestrian dead reckoning; maximum likelihood test statistics; adaptive threshold; zero-velocity detection

收稿日期: 2020-06-11

基金项目: 国家重点研发项目(2016YFB0501803)。

第一作者简介: 胡鑫(1995—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向为多源融合导航。

0 引言

全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)芯片在智能手机、智能可穿戴设备中可以实现全覆盖,在室外良好观测条件下,可提供10 m左右精度的定位结果,通过辅助GNSS技术,可以缩短首次定位时间,利用差分GNSS技术,可以提高GNSS定位精度,能够基本满足室外定位需求。在室内,通过无线局域网、低功耗蓝牙、超宽带、地磁、室内地图等信息源定位,可以实现局部区域的米级定位。但上述室外内定位方法受到使用范围和成本的限制,在城市、峡谷、高架桥下等遮挡区域,卫星导航信号减弱,仅使用GNSS无法获取连续的定位结果;而蓝牙、超宽带、室内地图等室内定位技术,则依赖基础设施和数据库,仅能在部署了基础设施、采集了数据库的区域使用^[1-3]。

随着传感器工艺水平迭代更新和性能提升,大众用户终端如智能手机和智能可穿戴设备搭载的低成本的传感器,具备了更高的精度和稳定性,可以利用其中的微机电系统(micro-electromechanical system, MEMS)惯性测量单元(inertial measurement units, IMU)进行行人航位推算(pedestrian dead reckoning, PDR)。PDR算法包括惯性导航系统和步长航向系统两类,惯性导航系统具有自主性强、动态性能好、导航信息全面且输出频率高等特点,可以获得高频率的位置、速度和姿态更新,更利于通过卡尔曼滤波与其他定位信息融合;步长航向系统通过计算行人每一步的位置变化,来进行水平位置更新^[4]。以PDR定位结果为辅助信息,在室外与GNSS定位结果融合,可以优化室外GNSS遮挡环境下的定位结果;在室内与蓝牙、超宽带、地磁和室内地图融合,可提升室内定位精度;在室外GNSS信号中断、室内无无线定位设施时,PDR可以在一定时间内维持较高精度的定位结果;在室外、室内定位切换区域,由于GNSS信号遮挡,而室内定位信号又不能很好覆盖时,利用PDR可实现室内外连续、高精度定位切换^[5-7]。但是用低成本的IMU进行机械编排,存在精度维持时间短的问题,由于高程和航向不可观测,高程和航向角长时间解算后,也会有明显的漂移。将传感器安装在行人足部,根据行人行走特征或其他传感器提供的观测信息,通过卡尔曼滤波进行观测更新,修正机械编排结果的误差。此外,在二次速度更新之间,

可以构建航向自观测模型来约束航向漂移^[8]。使用气压计、磁力计进行高程和航向时零速探测也很重要,例如进行航向角更新时,利用零速时加速度计3轴输出为重力分量的特点,只解算零速时刻的磁航向角,避免了高动态状况下提取重力分量误差大的问题,可提升磁航向角解算精度;零速间隔通常包含超过10个的连续零速状态历元,通过零速间隔内的磁航向角取中值的方法,可以提高磁航向角的可靠性。

零速探测效果决定了PDR解算和多源融合定位精度,一方面可以在机械编排过程中,通过速度、零角速度、零加速度约束抑制误差发散;另外一方面,在与其他传感器融合的过程中,通过解算零速间隔内的气压计高程和磁航向角并取中值,可以显著地提升高程和航向观测的精度和可靠性。因此,要减少将运动状态误判为零速的可能性,避免引入错误的高程、速度和航向观测;要提高将零速准确判断为零速的概率,确保能够及时进行观测更新,有效抑制误差的发散。现有的零速探测方法大多是基于检验统计量和固定阈值,当检验统计量小于阈值时,判断传感器处于静止状态,或通过多种零速探测方法组合,提高零速探测的可靠性^[9-12]。通过分析不同行走状态下检验统计量的特征,本文提出1种通过窗口内检验统计量最小值和幅值计算自适应阈值的方法,阈值能够根据窗口内检验统计量的特征变化进行动态调整,通过幅值参数降低将动态时刻误判为零速的概率,通过最小值保证每一步都能探测到零速。利用本文的自适应阈值零速探测结果,进行零速更新和多传感器融合定位,旨在避免引入异常观测信息的同时,确保能够及时地进行观测更新,有效地抑制误差发散,显著地提升多传感器融合定位精度。

1 传感器信息及信号模型

1.1 传感器信息

本文的研究基于1款低成本MEMS模块,该模块集成了加速度计、陀螺仪、磁力计、气压计,设置数据输出频率为100 Hz时,加速度计零偏为 $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$,陀螺零偏为 $0.05 \text{ (}^\circ\text{)}\cdot\text{s}^{-1}$,传感器数据通过蓝牙实时传输至自研手机行人导航软件。模块零售价格百元左右,内置了MPU-9250和BMP-280模块,性能和成本与智能手机、平板电脑等大众用户智能终端接近,远低于当前被广泛用于足部PDR研究的Xsens MTi、Inertial Elements、ADIS

等品牌产品^[9-14], 可以更好地满足大众用户对低成本、便携的要求。

1.2 传感器信号模型

加速度计测量模型为

$$\mathbf{I}_f = \mathbf{f} + \mathbf{b}_f + \mathbf{S}_1 \mathbf{f} + \mathbf{S}_2 \mathbf{f}^2 + \mathbf{N} \mathbf{f} + \delta \mathbf{g} + \boldsymbol{\varepsilon}_f \quad (1)$$

式中: \mathbf{I}_f 为加速度计测量值, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; \mathbf{f} 为真实比力, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; \mathbf{b}_f 为加速度计零偏, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; \mathbf{S}_1 为线性比例因子误差矩阵; \mathbf{S}_2 为非线性比例因子误差矩阵; \mathbf{N} 为交轴耦合矩阵; $\delta \mathbf{g}$ 为重力异常, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; $\boldsymbol{\varepsilon}_f$ 为加速度计传感器噪声, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。

陀螺仪测量模型为

$$\mathbf{I}_\omega = \boldsymbol{\omega} + \mathbf{b}_\omega + \mathbf{S} \boldsymbol{\omega} + \mathbf{N} \boldsymbol{\omega} + \boldsymbol{\varepsilon}_\omega \quad (2)$$

式中: \mathbf{I}_ω 为测量值, 单位为 $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$; $\boldsymbol{\omega}$ 为真实角速度, 单位为 $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$; \mathbf{b}_ω 为陀螺零偏, 单位为 $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$; \mathbf{S} 为陀螺比例因子矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_\omega$ 为陀螺仪传感器噪声矢量, 单位为 $(^\circ) \cdot \text{s}^{-1}$ 。

磁力计测量模型为

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{C}_{\text{no}} \mathbf{C}_{\text{sf}} \mathbf{C}_{\text{si}} \mathbf{C}_m (\mathbf{m} + \mathbf{b}_H) + \mathbf{b}_{zb} + \boldsymbol{\varepsilon}_m =$$

$$\mathbf{K} \mathbf{m} + \mathbf{b} + \boldsymbol{\varepsilon}_m = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{mx} \\ \varepsilon_{my} \\ \varepsilon_{mz} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{I}_m 为测量值, 单位为 μT ; \mathbf{C}_{no} 为非正交阵, 表示轴间耦合误差, 由于通常情况下是 1 个小角度, 对角线元素一般非常接近 1; \mathbf{C}_{sf} 为比例因子阵, 来源于各轴的灵敏度不一致, 对角矩阵上的每 1 个元素代表各轴的灵敏度; \mathbf{C}_{si} 为软磁误差矩阵; \mathbf{C}_m 为安装误差矩阵; \mathbf{m} 为真实磁场 3 轴分量, 单位为 μT ; \mathbf{b}_H 为硬磁误差; \mathbf{b}_{zb} 为零偏, 单位为 μT , 来源于磁力计各轴的常值偏差; $\boldsymbol{\varepsilon}_m$ 为磁力计传感器噪声^[15]。

1.3 零速状态传感器信号特征

将传感器固定在行人足部, 当安装传感器的脚落地处于静止状态时, 传感器的速度为零且速度、位置和姿态不变, 对应线性加速度和角度变化量、高程变化量的理想值为零。即静止状态时, 如果不考虑传感器误差及环境干扰等因素, 加速度计 3 轴输出为重力分量, 3 轴输出的模值等于重力, 前后历元间变化量为零; 陀螺仪 3 轴输出为零; 磁力计 3 轴输出的历元间变化量为零。

受到零偏、比例因子等传感器误差的影响, 静止时刻传感器输出特性并非如前所述。但加速度计和陀螺仪受环境影响相对较小, 静态和动态时刻数据差异明显, 适合用于零速检测。磁力计易受外界磁场环境干扰, 静态情况下受到较多磁干扰时, 磁力计输出变化较为剧烈, 用磁力计数据进行零速探测易受磁干扰影响。气压计的实际采样率和分辨率较低, 一方面无法准确探测零速时刻的具体时间, 另一方面由于测量噪声较大, 约为 1.3 Pa , 对应高程误差约为 0.11 m , 无法准确反映行人运动状态的变化。因此, 使用加速度计和陀螺仪的原始输出进行零速探测更加稳健可靠, 利用加速度计和陀螺仪输出进行零速探测时, 传感器输出可表示为

$$\mathbf{I}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_k^f \\ \mathbf{I}_k^\omega \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: \mathbf{I}_k^f 、 \mathbf{I}_k^ω 分别为 k 时刻加速度计输出的比力矢量和陀螺仪输出的角速度矢量。

当 k 时刻为零速时刻时, 理想情况下加速度计和陀螺仪输出为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{I}_k^f &= \mathbf{g} \cdot \mathbf{u}_{3 \times 1} \\ \mathbf{I}_k^\omega &= \mathbf{O}_{3 \times 1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: \mathbf{g} 为当地重力; $\mathbf{u}_{3 \times 1}$ 和 $\mathbf{O}_{3 \times 1}$ 为 3×1 列向量, 且 $\mathbf{u}_{3 \times 1}$ 的模为 1; \mathbf{O} 为矩阵元素为 0 的矩阵

2 零速探测方法

行人步行时, 足部的运动分为静止和运动 2 种模式。给定一段观测值序列, 通过该观测值序列进行零速探测。需要降低将运动状态误判为零速状态的概率, 因为如果将运动状态判断为零速状态, 将给导航系统引入较大的误差; 需要提高准确判断零速的概率, 因为每 1 个准确的零速状态历元都能对导航系统的误差进行修正, 提高定位精度。基于此, 将零速探测看成二元简单假设检验: H_0 为运动状态, H_1 为零速状态。零速探测的效果由将运动状态误判为零速的虚警概率 $P_{\text{FA}} = \Pr\{H_1 | H_0\}$ 和将零速状态准确判断为零速状态的探测概率 $P_D = \Pr\{H_1 | H_1\}$ 决定。为保证及时提供准确的零速修正信息, 需要把虚警概率控制在一定范围内, 并且让探测概率尽可能高。用奈曼-皮尔逊准则和极大似然法检验推导出检验统计量的计算方法^[13]为

$$\mathbf{T}(z_n) = \frac{1}{W} \sum_{k=n}^{n+W-1} \left(\frac{1}{\sigma_f^2} \left\| \mathbf{I}_k^f - g \frac{\bar{\mathbf{I}}_n^f}{\|\bar{\mathbf{I}}_n^f\|} \right\|^2 + \frac{1}{\sigma_\omega^2} \|\mathbf{I}_k^\omega\|^2 \right) \quad (6)$$

式中： W 为零速探测窗口大小； z_n 是零速窗口内的传感器输出， $z_n \triangleq \{\mathbf{I}_k\}_{k=n}^{n+W-1}$ ， σ_f^2 、 σ_ω^2 分别为加速度计和陀螺仪的噪声方差； $\bar{\mathbf{I}}_n^f$ 为零速探测窗口内加速度计输出各轴比力平均值矢量。

行人在不同的运动模式下，足部静止的特性不同。缓慢行走时，行人足部状态更接近完全静止状态；快速行走时，静止时刻足部状态没有缓慢行走时稳定；上楼梯时，行人抬脚高差大，落脚高差小；下楼梯时，行人抬脚高差小，落脚高差大。IMU的原始输出能够很好地反映出上述特性，具体表现在：随着行人行走速度变快，加速度计和陀螺仪输出幅值变大，解算的检验统计量 $\mathbf{T}(z_n)$ 的幅值及窗口内的最小值也变大；上下楼梯过程中，陀螺仪输出幅值与平地行走状态有明显区别，陀螺输出右方向幅值上楼梯明显小于平地行走，平地行走明显小于下楼梯，相应的检验统计量 $\mathbf{T}(z_n)$ 特征也有显著区别。

以行人不同速度绕1个直径18 m的圆行走4圈的数据为例，数据采样率为100 Hz，行人每1圈的平均速度从慢到快，加速度计、陀螺仪3轴输出和模值如图1、图2所示，检验统计量和水平速度如图3所示。

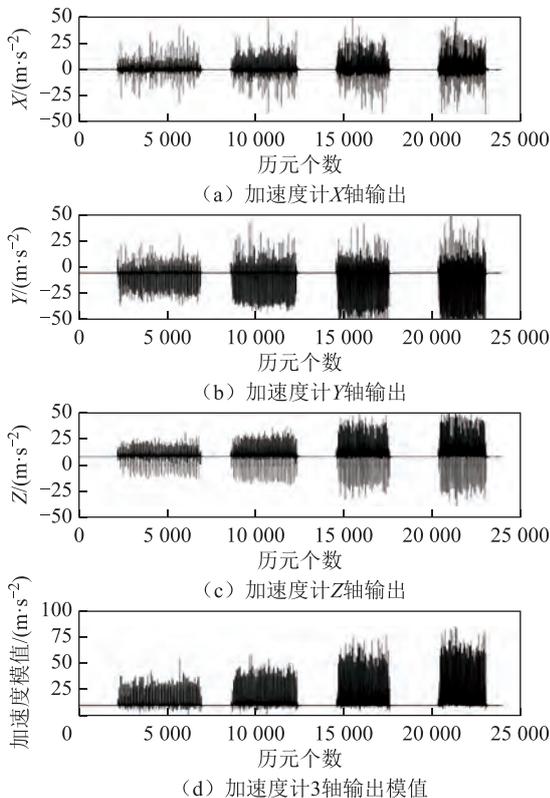


图1 加速度计原始输出及模值

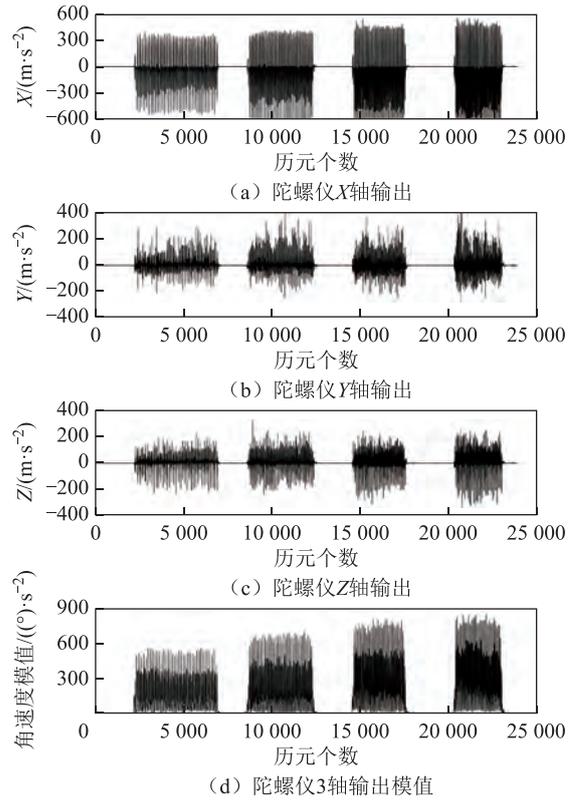


图2 陀螺仪原始输出及模值

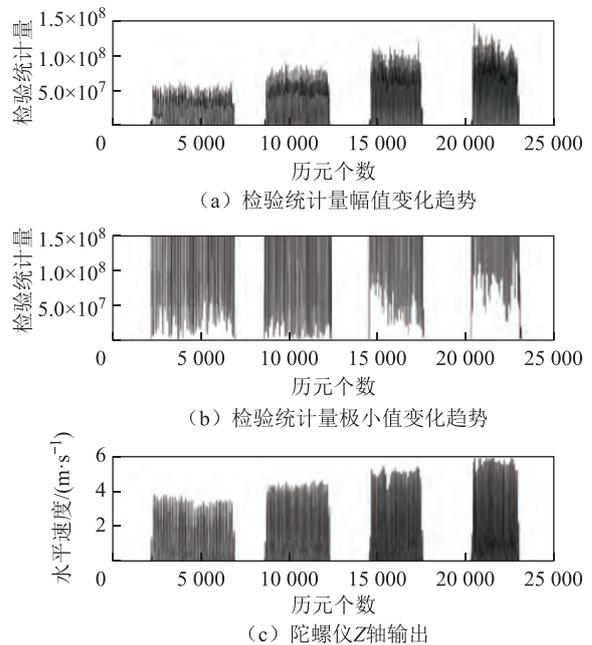


图3 检验统计量、水平速度

从图1至图3可以看出，加速度计、陀螺仪3轴输出和模值的幅值随着步行速度加快增大，检验统计量、检验统计量极小值也对步行速度敏感。如果设置阈值为 5×10^5 ，第1圈和第2圈能准确地探测出几乎所有的零速，但是第3圈和第4圈会有大量的零速状态不能准确地被探测出来。如果设置阈值大于 3×10^6 ，虽然能探测出第3圈和

第 4 圈所有步数的零速间隔, 但第 1 圈和第 2 圈探测出的零速间隔将会过长, 将静止状态前后的运动状态也探测为静止状态, 从而引入错误的速度观测信息。行人从站立状态到步行状态, 以及从步行到站立状态时的运动速度很小, 计算出的检验统计量也很小, 用固定阈值很容易将该时段误判为零速状态, 导致出发时刻就出现较大的姿态、速度误差。

还可以利用不同的检验统计量计算方法来改善零速探测效果, 包括加速度移动方差 (moving variance, MV)、加速度模值 (magnitude, MAG)、角速率能量 (angular rate energy, ARE) 等, 或将这些方法综合利用, 可以优化零速探测效果^[13]。相关检验统计量计算方法为:

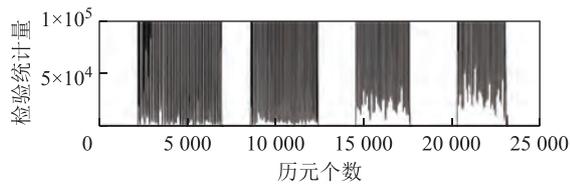
$$\mathbf{T}_{MV}(z_n) = \frac{1}{\sigma_a^2 W} \sum_{k=n}^{n+W-1} \|\mathbf{I}_k^f - \bar{\mathbf{I}}_n^f\|^2 \quad (7)$$

$$\mathbf{T}_{MAG}(z_n) = \frac{1}{\sigma_a^2 W} \sum_{k=n}^{n+W-1} (\|\mathbf{I}_k^f\| - g)^2 \quad (8)$$

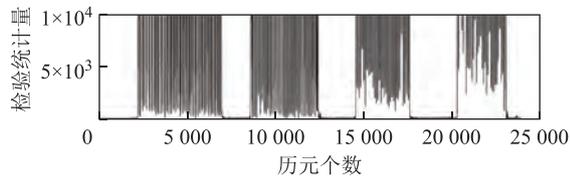
$$\mathbf{T}_{ARE}(z_n) = \frac{1}{\sigma_\omega^2 W} \sum_{k=n}^{n+W-1} \|\mathbf{I}_k^\omega\|^2 \quad (9)$$

式中: $\mathbf{T}_{MV}(z_n)$ 为加速度移动方差法计算的检验统计量; $\mathbf{T}_{MAG}(z_n)$ 为加速度模值法计算的检验统计量; $\mathbf{T}_{ARE}(z_n)$ 为角速率能量法计算的检验统计量。

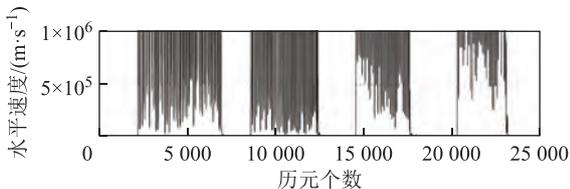
通过上述 3 种方法计算出的检验统计量极小值特征如图 4 所示。



(a) 加速度移动方差法检验统计量极小值



(b) 加速度模值法检验统计量极小值



(c) 角速率能量法检验统计量极小值

图 4 3 种方法计算检验统计量的极小值

从图 4 中可以看出: 不同方法计算的检验统计量, 同一时刻的幅值、极小值不同, 但窗口内的幅值和极小值均存在随速度变化的特性; 因此通过检验统计量与固定阈值相结合进行零速探测, 无法从根本上改善不同状态行走的零速探测问题。而通过姿态识别后设置不同的阈值组合, 利用先验速度调整阈值的方法对行人速度不够敏感, 在速度突变以及步行开始、结束时容易导致漏检或误判。

本文提出 1 种自适应阈值计算方法, 取长度为 W 的窗口计算窗口内统计检验量 $\mathbf{T}(z_n)$, 自适应阈值计算方法为

$$\lambda_a = \min(\mathbf{T}(z_n)) + q \cdot [\max(\mathbf{T}(z_n)) - \min(\mathbf{T}(z_n))] \quad (10)$$

式中: λ_a 为自适应阈值; \min 为取最小值; \max 为取最大值; q 为幅值参数。

该方法基于窗口内检验统计量的幅值和最小值, 计算得到的阈值能够很好地反映窗口内检验统计序列的特征, 继而能够反映运动速度的变化。通过窗口内取最小值, 可以保证每一步均能探测出零速状态, 以便及时进行零速更新, 保障零速更新效果。 q 可以在每一步都能探测出零速时刻的基础上, 将更多的零速状态准确探测出来: q 越大, 每一步被探测为零速的时间间隔越长, q 过大, 则会将部分非零速状态判断为零速状态; q 越小, 运动状态被误判为零速状态的概率越小, q 过小, 则会导致部分零速状态漏判。在机械编排/零速修正解算过程中, 如果将动态误判为零速状态, 则会引入错误的速度观测信息, 导致解算距离较真实距离更短; 但是在每一步都能探测出零速状态的基础上, 即便存在部分零速时刻被漏判, 也保证能及时进行零速更新, 且不会引入速度观测误差: 因此须要在确保不出现将动态误判为静态的情况下, 尽可能地提高将静态准确判断为静态的概率。经实验验证, q 取值为 0.01 左右时, 能够保证及时、足够地判断零速, 且能有效地避免误判零速的情况。因此本文 q 取值为 0.01。

3 自适应零速探测及零速修正结果

3.1 自适应零速探测结果

将绕直径 18 m 的圆, 以不同速度走 4 圈的数据分解为 4 组 1 圈的数据, 其中第 1 圈和第 2 圈的行走速度较慢, 第 3 圈和第 4 圈的行走速度较快, 4 组数据对应的用时、平均水平速度、步数如表 1 所示。

表1 四组测试数据信息

测试数据	用时/s	速度/(m·s ⁻¹)	步数
第1圈	47.7	1.19	38
第2圈	38.2	1.48	36
第3圈	30.5	1.85	34
第4圈	27.3	2.07	33

用自适应阈值 λ_a 、固定阈值 $\lambda_1=5\times 10^5$ 、固定阈值 $\lambda_2=3\times 10^6$ 分别解算表1中的4组数据,对比零速探测结果和零速修正解算结果。4组数据的检验统计量、自适应阈值 λ_a 、固定阈值 λ_1 、固定阈值 λ_2 的关系如图5至图8所示,对应的误检和漏检统计如表2、表3所示。

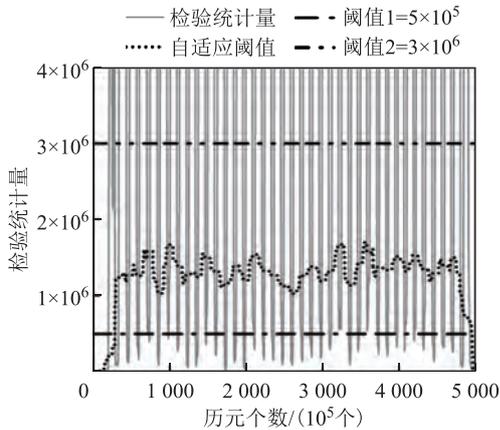


图5 第1圈检验统计量与不同阈值之间的关系

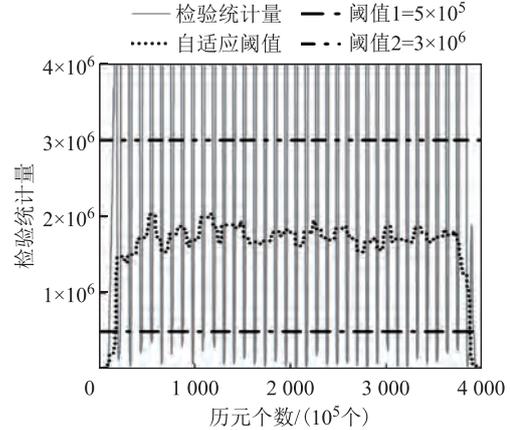


图6 第2圈检验统计量与不同阈值之间的关系

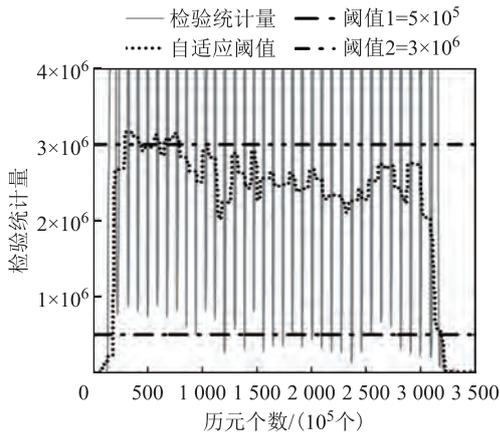


图7 第3圈检验统计量与不同阈值之间的关系

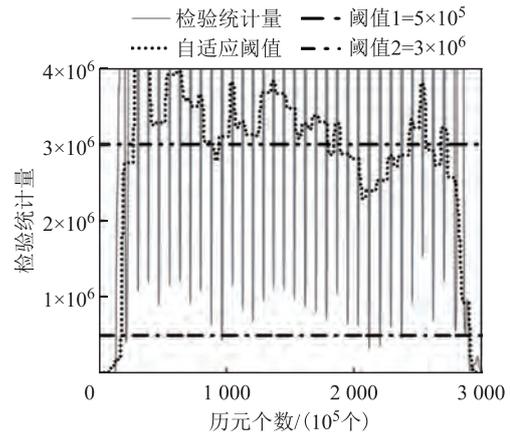


图8 第4圈检验统计量与不同阈值之间的关系

表2 不同零速探测阈值误检统计表

阈值	不同数据零速探测误检统计结果									
	第1圈		第2圈		第3圈		第4圈		4圈合计	
	误检步数	总步数	误检步数	总步数	误检步数	总步数	误检步数	总步数	误检步数	总步数
自适应阈值	0	38	0	36	0	34	0	33	0	141
5×10^5	0	38	0	36	1	34	0	33	1	141
3×10^6	1	38	1	36	1	34	1	33	4	141

表3 不同零速探测阈值漏检统计表

阈值	不同数据零速探测漏检统计结果									
	第1圈		第2圈		第3圈		第4圈		4圈合计	
	漏检步数	总步数	漏检步数	总步数	漏检步数	总步数	漏检步数	总步数	漏检步数	总步数
自适应阈值	0	38	0	36	0	34	0	33	0	141
5×10^5	2	38	0	36	13	34	25	33	40	141
3×10^6	0	38	0	36	0	34	0	33	0	141

从图 5 至图 8 可以看出, 随着平均步行速度加快, 检验统计量极小值的均值也变大。在正常行走时, 行人每一步的速度可能会受周围环境或其他因素的影响而有明显的变化, 仅能保证相对匀速行走。因此在慢速行走时, 可能出现某一步速度很快, 快速行走时, 可能出现某一步速度很慢的现象。自适应阈值 λ_a 能够很好地反映检验统计量的变化特征, 对步行速度非常敏感。在上述 4 组数据中, 随着行人平均速度增大, 自适应阈值的均值也变大; 同一组数据中速度发生变化时, 自适应阈值也能进行相应调整, 以保证探测效果; 数据中存在小步幅时, 检验统计值的极小值和幅值都很小的情况, 即使用小的固定阈值也会将整步误判为零速状态, 而自适应阈值能够及时地调整其大小, 避免错误检测。较小的固定阈值 λ_1 , 在慢速的情况下, 能够判断出几乎所有的零速间隔, 但是当行人速度较快时, 则存在较多漏检的情况; 较大的固定阈值 λ_2 , 虽然能保证探测出所有的零速间隔, 但是将导致虚警概率 P_{FA} 过大, 容易将运动时刻判断为零速时刻, 特别是在行人开始和结束步行时, 容易将速度很慢的小步全部探测为零速。

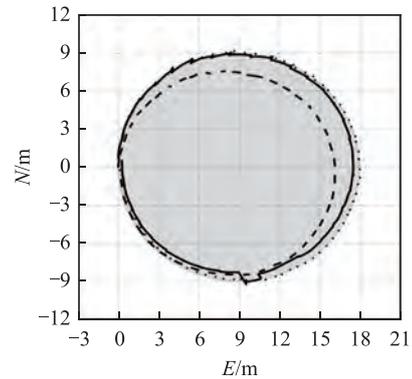
从统计结果来看: 自适应阈值不存在将整段零速间隔漏检或将一步全部误判为零速的情况; 较小的固定阈值 λ_1 出现过 1 次将整步误判为零速的情况, 但在速度较快的 2 圈, 则存在大量零速间隔漏检的情况; 较大的固定阈值 λ_2 , 虽然不存在将整段零速间隔漏检的情况, 但是存在将第 2—4 圈的最后一步全部误判为零速状态的情况, 也存在将第 1 圈第 1 步的部分运动状态误判为零速状态的情况。

3.2 零速修正结果

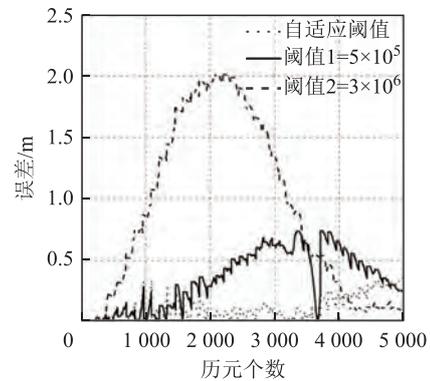
通过卡尔曼滤波方法对每 1 圈和 4 圈数据惯导机械编排结果进行零速修正, 测试路线起点为 (0 m, 0 m), 形状为 1 个直径 18 m 的圆圈。用解算结果到圆心的距离与参考轨迹半径的差作为水平误差, 在解算精度较高时, 该方法计算得到的水平误差能够反映真实误差, 而在解算结果发散严重时, 该方法计算的水平误差较真实误差小。不同阈值的零速修正结果及水平误差如图 9 至图 13 所示。

从解算轨迹和水平误差序列来看: 在 4 组测试数据中, 用自适应阈值零速探测方法由于不存在漏检或误检的情况, 解算轨迹无明显突刺, 与参考轨迹接近; 在慢速行走、用小的固定阈值 λ_1 时, 解算轨迹与参考轨迹比较接近, 解算精度与用自适应阈值零速探测结果进行零速修正的解算精度相

近; 由于第 1 圈连续漏检了 2 个零速间隔, 导致解算结果存在一处明显的突刺, 水平误差超过 0.7 m;

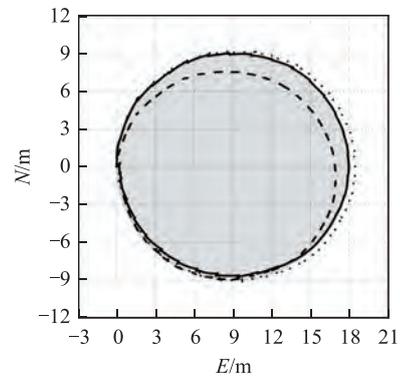


(a) 不同阈值零速修正结果轨迹

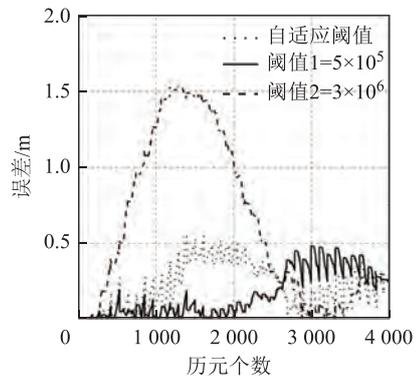


(b) 不同阈值零速修正结果误差序列

图 9 第 1 圈零速修正效果对比

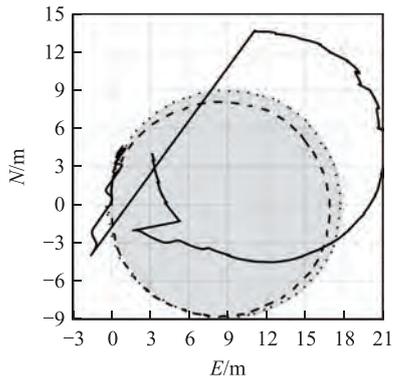


(a) 不同阈值零速修正结果轨迹

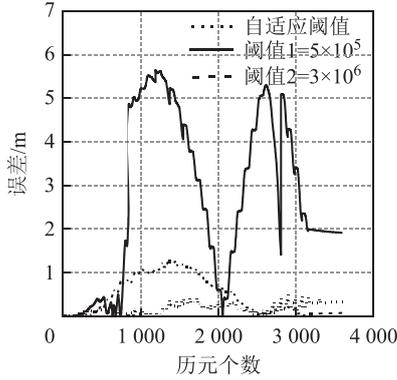


(b) 不同阈值零速修正结果误差序列

图 10 第 2 圈零速修正效果对比

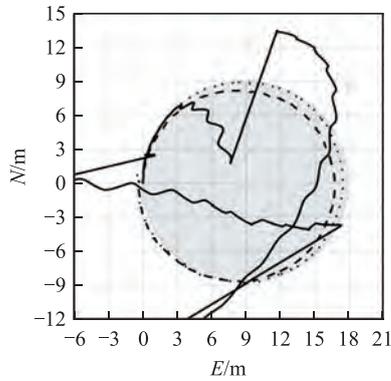


(a) 不同阈值零速修正结果轨迹图

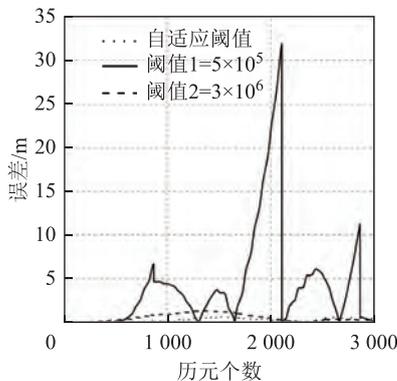


(b) 不同阈值零速修正结果误差序列

图 11 第 3 圈零速修正效果对比

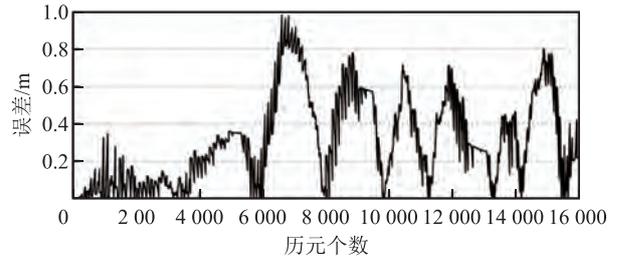


(a) 不同阈值零速修正结果轨迹

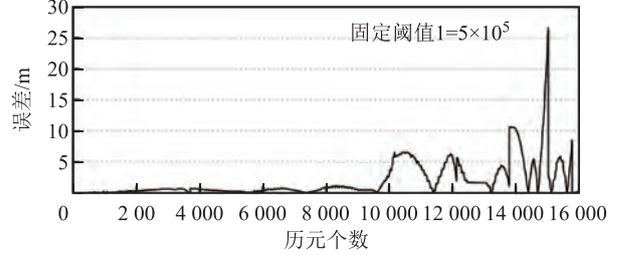


(b) 不同阈值零速修正结果误差序列

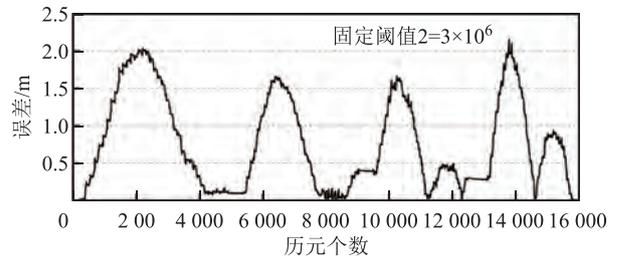
图 12 第 4 圈零速修正效果对比



(a) 自适应阈值零速修正结果误差序列



(b) 固定阈值1零速修正结果误差序列



(c) 固定阈值2零速修正结果误差序列

图 13 4 圈数据不同阈值零速修正结果误差序列

在快速行走时，由于漏检大量零速间隔，解算结果很快发散导致误差很大，最大误差超过 30 m。用大的固定阈值 λ_2 解算 4 圈轨迹，其结果与参考轨迹行状相近，但由于此时将部分动态判断为静态，错误的速度更新导致轨迹半径较参考轨迹小，其中慢速行走时，解算轨迹直径比参考轨迹小 1.5 m 左右。单圈和 4 圈联合解算水平误差的最大值、均值、均方根标准差统计如表 4 至表 7 所示。

从误差统计结果来看：在慢速行进的 2 圈中，自适应阈值效果与小的固定阈值的效果相当，明显优于大的固定阈值；在快速行进的 2 圈中，自适应阈值效果与大的固定阈值的效果相当，明显优于小的固定阈值。从 4 圈联合解算的零速修正结果来看，自适应阈值保证了不同步行速度下的零速修正效果，平均误差为 0.31 m，最大误差不超过 1 m，明显优于固定阈值。本文提出的自适应阈值法，通过动态调整阈值，保证了行人不同步行速度状态下的零速修正效果，即便速度短时发生较大变化，也能及时调整到合适的阈值，获得较好的零速修正效果，相对使用固定阈值，本文的方法具有更好的普适性和鲁棒性。

表 4 零速修正结果最大误差

阈值	第 1 圈结果/m	第 2 圈结果/m	第 3 圈结果/m	第 4 圈结果/m	4 圈联合解算结果/m
自适应阈值	0.35	0.57	0.49	0.68	0.98
5×10^5	0.74	0.48	5.64	31.89	26.58
3×10^6	2.0	1.54	1.33	1.39	2.16

表 5 零速修正结果平均误差

阈值	第 1 圈结果/m	第 2 圈结果/m	第 3 圈结果/m	第 4 圈结果/m	4 圈联合解算结果/m
自适应阈值	0.12	0.22	0.17	0.27	0.31
5×10^5	0.34	0.17	2.68	3.94	1.88
3×10^6	0.87	0.61	0.46	0.55	0.75

表 6 零速修正结果均方根误差

阈值	第 1 圈结果/m	第 2 圈结果/m	第 3 圈结果/m	第 4 圈结果/m	4 圈联合解算结果/m
自适应阈值	0.16	0.26	0.21	0.34	0.39
5×10^5	0.41	0.22	3.29	6.93	3.42
3×10^6	1.12	0.81	0.63	0.70	0.97

表 7 零速修正结果标准差

阈值	第 1 圈结果/m	第 2 圈结果/m	第 3 圈结果/m	第 4 圈结果/m	4 圈联合解算结果/m
自适应阈值	0.11	0.15	0.11	0.21	0.24
5×10^5	0.23	0.15	1.91	5.70	2.85
3×10^6	0.72	0.53	0.43	0.43	0.62

4 结束语

本文分析了不同步行速度下, 传感器原始数据和检验统计量的特征, 确定了利用窗口内检验统计量的最小值和幅值, 来计算零速探测阈值的方案, 实现了阈值随行人步行速度变化而自动调整, 本文方案的计算方法简单、实用。对比分析了自适应阈值、固定阈值的零速探测结果和零速修正效果: 小的固定阈值仅在慢速情况下, 能获得较理想的零速探测和零速修正结果, 在快速步

行情况下, 则存在大量漏检的情况; 大阈值在低速时容易出现错误检测, 包括将静止状态前后多个历元误判为零速、将“小步”判断为零速等情况, 导致错误的速度约束信息。与固定阈值相比, 自适应阈值能随行人步行速度变化而动态调整, 零速间隔探测准确度达 100%, 在不同速度下均能获得较好的零速修正结果, 绕直径 18 m 的圆, 以不同速度步行 4 圈获取了实验数, 其解算结果的水平误差不超过 1 m, 优于固定阈值方法的 26.58 和 2.16 m。

参考文献

- [1] ZHANG Xiaohong, TAO Xianlu, ZHU Feng, et al. Quality assessment of GNSS observations from an Android N smartphone and positioning performance analysis using time-differenced filtering approach[J]. GPS Solutions, 2018, 22(3): 70-81.
- [2] 闫大禹, 宋伟, 王旭丹, 等. 国内室内定位技术发展现状综述[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 5-12.
- [3] 陈锐志, 陈亮. 基于智能手机的室内定位技术的发展现状和挑战[J]. 测绘学报, 2017, 46(10): 1316-1326.
- [4] ROBERT H. A survey of indoor inertial positioning systems for pedestrians[J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2013, 15(3): 1281-1293.
- [5] 严恭敏, 邓瑀. 传统组合导航中的实用 Kalman 滤波技术评述[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 1-15.
- [6] 仪玉杰, 黄智刚, 苏雨. 一种 UWB 与 PDR 融合的行人室内定位方法[J]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 38-43.

- [7] 朱家松, 程凯, 周宝定, 等. 基于互补滤波融合 WiFi 和 PDR 的行人室内定位[J]. 测绘通报, 2019(5): 12-15, 34.
- [8] 张新喜, 张新喜, 张嵘, 等. 足绑式行人导航偏差角误差自观测算法[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(4): 43-52.
- [9] 田晓春, 陈家斌, 韩勇强, 等. 多条件约束的行人导航零速区间检测算法[J]. 中国惯性技术学报, 2016, 24(1): 7-11.
- [10] 王普, 潘凯, 任明荣, 等. 基于伪自适应阈值零速检测法的室内个人导航系统[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(9): 34-39.
- [11] 孟祥宾, 潘献飞, 胡小平. 一种优化的零速检测行人导航算法[J]. 导航与控制, 2016, 15(4): 32-37.
- [12] 戴洪德, 李松林, 周绍磊, 等. 基于伪标准差和 N-P 准则的行人导航零速检测[J]. 中国惯性技术学报, 2018, 26(6): 701-707.
- [13] SKOG I, HANDEL P, NILSSON J, et al. Zero-velocity detection: an algorithm evaluation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(11): 2657-2666.
- [14] NORRDINE A, KASMI Z, BLANKENBACH J. Step detection for ZUPT-aided inertial pedestrian navigation system using foot-mounted permanent magnet[J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(17): 6766-6773.
- [15] DENG Yang, ZHENG You, BIN Li, et al. Complete tri-Axis magnetometer calibration with a gyro auxiliary[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1223-1244.

(上接第 9 页)

- [13] 彭亮, 聂俊伟, 王飞雪. 关闭部分导航信号实现区域定位阻断对全球定位性能的影响分析[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(5): 547-555.
- [14] 彭亮, 聂俊伟, 王飞雪. 关闭部分导航信号阻止区域授时对全球定位授时性能的影响分析[J]. 国防科技大学学报, 2011, 33(4): 107-112.
- [15] 于海东. 震惊中外的“银河”号事件内幕[J]. 航海, 1994(1): 8-11.
- [16] 陈文如. “银河号”调查纪实[J]. 瞭望周刊, 1993(37): 42-43.
- [17] 郭艺. GPS 接收机空时抗干扰理论与实现关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [18] 王莹莹. 基于改进扩频技术的 GPS 抗干扰方法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- [19] 曾祥华. 卫星导航抗干扰中的时延、量化和运动适应性技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014: 1-8.
- [20] 边少锋, 胡彦逢, 纪兵. GNSS 欺骗防护技术国内外研究现状及展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2017, 47(3): 275-287.
- [21] 张博, 何相勇, 赵丽华, 等. 高功率压制干扰模式下多个 GPS 干扰站联合部署问题[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(4): 32-36.
- [22] 张鑫. 卫星导航欺骗干扰信号检测技术综述[J]. 全球定位系统, 2018, 43(6): 1-7.
- [23] 谢博. GPS: 美军高技术战争的起点[N]. 北京日报, 2015-07-29(19).
- [24] 陈忠贵. 基于星间链路的导航卫星星座自主运行关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [25] 李蓬蓬. 导航卫星信道模拟器关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2014.
- [26] 郭树人, 刘成, 高为广, 等. 卫星导航增强系统建设与发展[J]. 全球定位系统, 2019, 44(2): 1-12.
- [27] 高书亮. 导航战技术现状及其发展趋势[J]. 卫星与网络, 2018(9): 58-60.

引文格式: 金霄, 吴飞, 朱海, 等. 综合 AP 选择的蓝牙地铁站定位[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 25-30. (JIN Xiao, WU Fei, ZHU Hai, et al. Bluetooth metro station locationing selected by integrated AP[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 25-30.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210105.

综合 AP 选择的蓝牙地铁站定位

金霄, 吴飞, 朱海, 鄢松, 胡锐, 陆雯霞
(上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 针对在地铁站环境下, 利用蓝牙技术进行定位时存在部分区域定位精度低的问题, 提出 1 种综合接入点 (AP) 选择策略: 在离线阶段, 利用卡尔曼滤波对采集到的蓝牙数据进行处理; 再通过对定位环境 AP 区域性、波动性分析, 融合 AP 属地区域特征, 用最大平均值和稳定度排序的方法实现 AP 组合的最优化; 最后在线指纹匹配阶段, 利用加权 K 近邻的定位方式对定位性能进行评估。实验结果表明, 在地铁站使用综合 AP 选择策略, 平均定位误差为 1.09 m, 与未经 AP 选择的方法、最大均值法和信息增益法相比较, 平均定位误差较其他 3 种情况均减少 0.45 m 以上, 具有更好的定位效果。

关键词: 地铁站; 蓝牙技术; 接入点选择; 指纹匹配; 加权 K 近邻

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4999(2021)01-0025-06

Bluetooth metro station locationing selected by integrated AP

JIN Xiao, WU Fei, ZHU Hai, YAN Song, HU Rui, LU Wenxia

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: Aiming at the problem of low positioning accuracy in some areas when using bluetooth technology under subway station environment, the paper proposed a comprehensive Access Point (AP) selection strategy: on the offline stage, the collected bluetooth data were processed by Kalman filter; and combing with the characteristics of AP territorial regions, the regional and fluctuation analysis of the APs in the positioning environment was carried out; then the optimization of AP combination was realized by the ranking method of the maximum mean values and the stability; finally the weighted K nearest neighbor locationing method was used to evaluate the locationing performance in the online fingerprint matching phase. Experimental result showed that the average positioning error of the proposed method in the subway station could be 1.09 m, which reduced by more than 0.45 m compared with the non-AP selection, the maximum mean value method and the information gain method, indicating the better positioning effect.

Keywords: subway station; bluetooth technology; access point selection; fingerprint matching; weighted K nearest neighbor

0 引言

随着城市的不断建设, 地下空间带来的经济价

值不断突出^[1], 地下商场、地铁站、城市综合管廊等的出现, 使得以高精度定位为支撑的基于位置的服务 (location based services, LBS) 成为研究热点^[2]。

收稿日期: 2020-16-15

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (61902237); 上海市自然科学基金项目 (17ZR1411900); 上海市科技学术委员会重点项目 (18511101600); 上海市“科技创新行动计划”高新技术领域项目 (18511101600); 上海市科委青年科技英才“杨帆计划”项目 (19YF1418200); 上海高校青年教师培养资助计划项目 (ZZGCD15090)。

第一作者简介: 金霄 (1995—), 男, 浙江嵊州人, 硕士研究生, 研究方向为室内定位。

通信作者简介: 吴飞 (1967—), 男, 四川内江人, 博士, 教授, 研究方向为计算机网络与计算机能耗优化。

随着蓝牙 5.1 协议^[3]的发布，蓝牙应用空间得到了不断发展。在弱卫星信号环境的室内定位领域，蓝牙技术凭借着定位精度高、成本低、功耗低等特点适用于各类环境，并且作为构建“地下北斗系统”的 1 种研究方向受到广泛的关注。

在地铁车站环境下，被广泛关注的是基于蓝牙信号的多边定位法和指纹匹配定位法^[4]。多边定位法的缺点是在一些复杂环境下，信号易受到多径效应影响，导致部分区域定位精度低。指纹匹配定位法的缺点是由于环境问题导致指纹库庞杂。在实际工程应用中，普通地铁车站多为长条形，需要布置上百个蓝牙，其中有些接入点（access point, AP）会存在遮挡，造成散射、衍射、反射等现象^[5]，甚至有些 AP 信号值是错误的^[6]，这些都会对定位精度造成较大影响。文献[7]提出了基于误差分析的启发式 AP 选择算法，以有效选择 AP 子集用于定位，可以降低定位计算的复杂度，提高定位性能。文献[8]利用每个 AP 在参考点的信息增益，然后选取信息增益前 m 个 AP 构建指纹数据库，以降低接收信号强度（received signal strength, RSS）变化带来的影响，该方法仅仅独立地考察了单个 AP 的判

别能力。文献[9]只在某个采样点考虑该点处的平均信号强度，缺乏综合考量该处的区域性和波动性。

基于此，本文主要通过研究分析地铁环境下 AP 信号的特性，融合 AP 属区域特征，用最大平均值和稳定度排序的方法实现 AP 组合的最优化。

1 蓝牙指纹定位法

基于蓝牙信号的指纹定位技术是近年来室内定位技术的研究重点。指纹法就是将环境的位置与特定的指纹联系起来^[10-11]，指纹中存储 1 种或多种特征，在实际定位中，通过实际获得的多个特征与指纹库中的特征匹配来进行定位。蓝牙指纹定位过程分为 2 个阶段：离线阶段和在线阶段^[12]。离线阶段首先设定坐标系，获取全体待定位点位置坐标集合，然后选择第 i 个位置，测量 j 次来自 m 个 AP 的 RSS 值，最后收集完所有数据，对数据预进行处理，数据预处理主要针对数据滤波和 AP 选择，最终得到指纹库。在线阶段，选择适合的匹配算法，将指纹数据库和实时采集的指纹数据匹配，获得最终位置。图 1 为蓝牙指纹匹配整体流程。

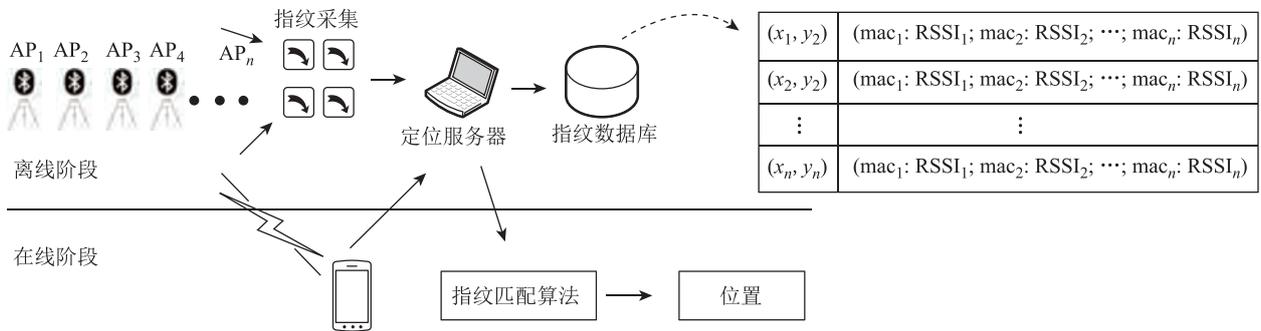


图 1 蓝牙指纹匹配整体流程

目前指纹匹配算法中使用最广的是 K 近邻 (K-nearest neighbor, KNN)，KNN 是著名的模式识别统计学方法，从定位角度理解，KNN 是从在线阶段采集的 RSS 中，选择前 k 个欧式距离最小的位置指纹，然后计算指纹对应位置坐标的平均值作为定位结果，其中欧式距离代表在线采集 RSS 和指纹库中 RSS 向量的接近程度，即

$$\left. \begin{aligned} (x, y) &= \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_i, y_i) \\ d &= \sqrt{\sum (RSS_{zk} - RSS_{jk})^2} \quad z=1,2,\dots,m, \quad k=1,2,\dots,n \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： (x_i, y_i) 为第 i 个采样点的位置坐标； (x, y) 为待定位点坐标； d 为待定位点 z 和第 i 个采样点的欧式距离。

加权 K 近邻 (weighted KNN, WKNN) 算法为改进的 KNN 法，充分考虑了不同采样点和待定位处的距离对定位结果的影响程度，指纹中最为接近的参考点的影响系数较大，反之影响系数较小。具体计算公式为

$$(x, y) = \sum_{i=1}^k \frac{\gamma}{d_i + \varepsilon} (x_i, y_i) \quad (2)$$

式中： γ 为权重系数； ε 为接近于 0 的正常数。

2 地铁站蓝牙 AP 特性

在错综复杂的地铁站环境下, 干扰无处不在, 从各个 AP 采集的 RSS 值具有随机性, 而且 RSS 集与定位距离并不完全成正比例关系, 可能同一位置不同的时间内采集到的 RSS 序列也不同, 所以光靠单一选择方式如最大平均值 AP 法^[13], 在地铁环境下的可行性不高。为找到合适地铁环境下的 AP 选择方案, 需要对地铁环境的特性进行综合分析。

2.1 AP 区域性分析

本实验分为 2 部分, 皆在上海地铁诸光路站站厅层内进行, 站厅层大致是由 4 个如图 2 所示的区域组合而成, 图 2 中圆点代表采样点, 三角形代表蓝牙 AP, 每个区域内部设置有长方形围廊。

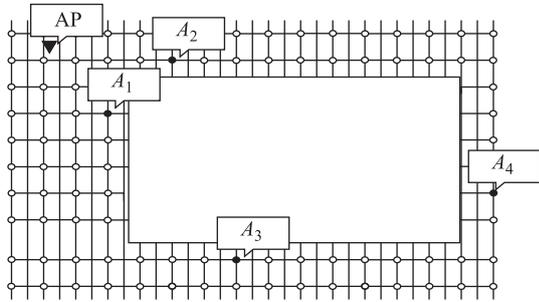


图 2 试验区域

第 1 部分试验是以 1 个 AP、4 个不同采样点进行分析, 即图中围廊的西北角布设有 1 个蓝牙 AP, 使用华为 P10 手机分别在 A₁、A₂、A₃ 和 A₄ 处采集数据, 采集频率为 1 Hz, 采集时长为 1 min。AP 与各个采集点的距离分别为 5.51、7.42、17.73、27.14 m。每个采集点的位置如图 2 所示。图 3 为该 AP 在不同位置下的信号强度, 可知在一段时间内皆是较为稳定的, 但是 RSS 值有着明显的变化, 尤其从图 3 (d) 可看出, 该位置 RSS 值较低, 原因是采集点与 AP 距离较大且存在建筑物对信号的遮挡, 所以在指纹采集时, 应根据属地特征, 注意不同位置的 AP 对定位区域的影响程度。

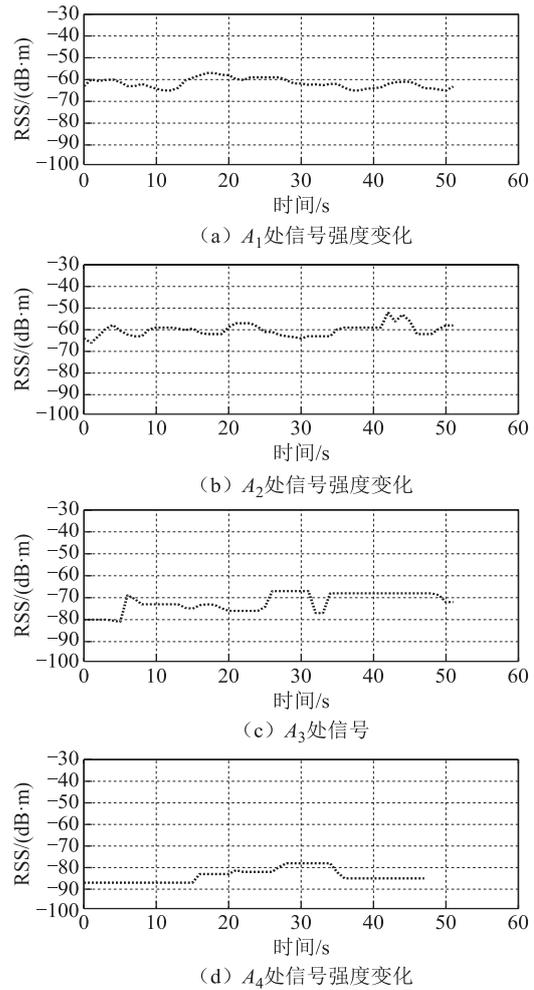


图 3 同 AP 不同位置信号强度变化

第 2 部分实验是在 AP 出现频率方面, 采样点及蓝牙分布如图 4 所示。实验以上海诸光路地铁站闸机附近抽取的 24 个采样点为采样区域, 24 个采样点用方块表示, 整个站厅层 42 个已编号的蓝牙用圆点表示。采样点出现的频次如图 5 所示。从图 5 可以出, 部分 AP 在实验区域出现次数较少。这是因为该区域在长条形车站的一端, 所以在该区域内采集到的 AP 个数有明显的差别。综上分析, 无论从单个 AP 还是整体 AP 都能说明, 区域性对整体定位有一定影响, 定位时应该结合属地特征综合考虑信号较强的 AP^[14]。

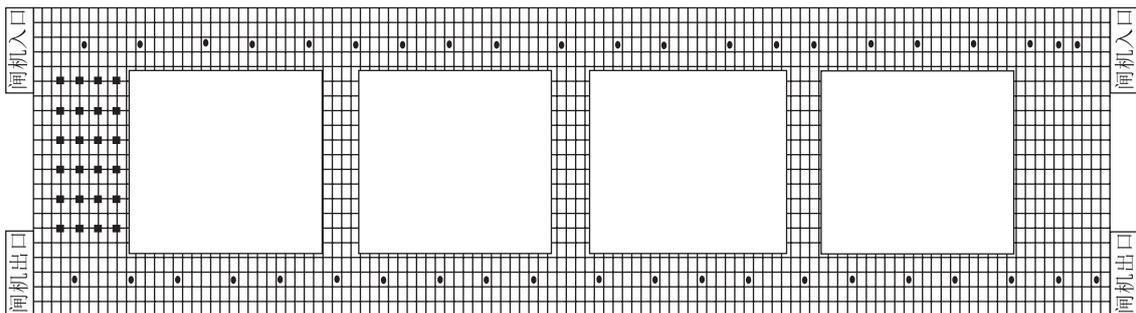


图 4 24 个采样点和 42 个蓝牙的分布

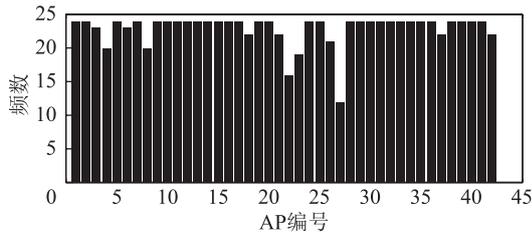


图5 24个采样点AP出现频率

2.2 AP信号的波动性分析

为了验证不同AP信号的波动性,在上海地铁诸光路站站厅层对其中的2个蓝牙进行分析,分别为AP₁和AP₂,用华为P10手机在同一点对2个蓝牙,以1 Hz的采集频率各采集8 min数据,其结果如图6所示。由图6(a)和图6(c)的波动图进行对比可得,AP₁波动幅度较大,AP₂波动幅度较小。从图6(b)和图6(d)所示的概率分布可以看出,2个蓝牙都类似于高斯分布,且RSS值多集中在-50 dB·m左右。产生上述结果是由于地

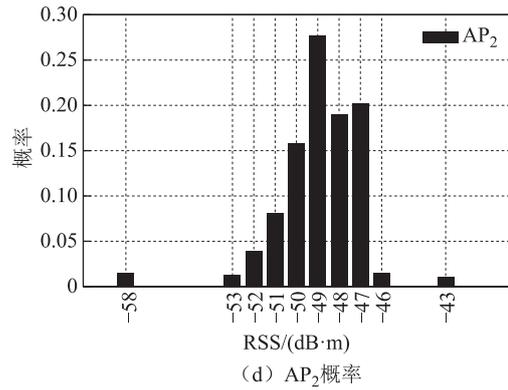


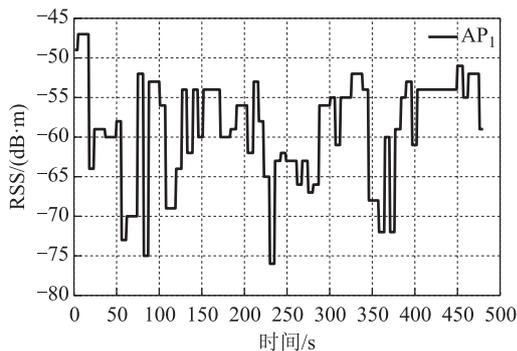
图6 AP信号强度变化及概率分布

铁环境复杂,易造成多径效应。因此,在进行AP选择时,要考虑该AP的整体集中程度。

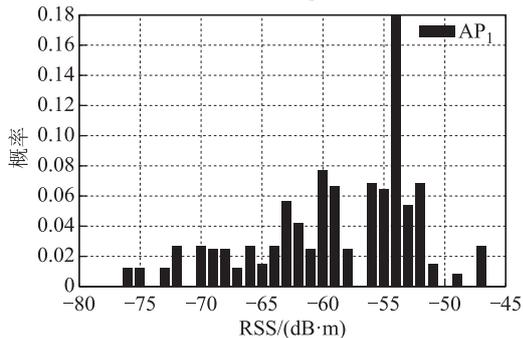
AP选择算法,大多通过RSS数据在样本中的出现概率以及对位置的分辨能力作为衡量标准,虽然减小了定位计算量,但都没有考虑AP的样本数据在特定环境下的稳定性,像在地铁车站里,空间实现指纹定位的缺点之一就是有一些特殊环境下,会遭遇无线信号不稳定,导致数据缺失,造成指纹库质量不高,所以需要在采样阶段,对指纹库AP进行稳定性筛选,去除掉影响较大的AP,便能够提高定位精度。地铁内4个蓝牙AP的性能如表1所示。

表1 地铁环境下RSS情况

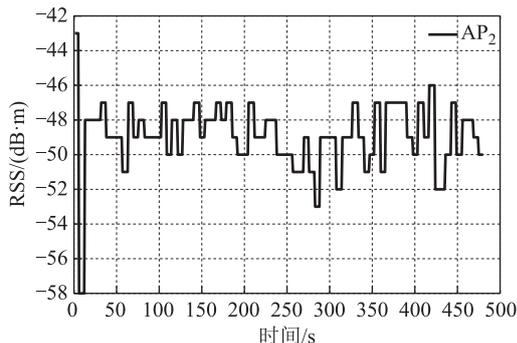
AP点编号	RSS 最小值/(dB·m)	RSS 最大值/(dB·m)	RSS 均值/(dB·m)	方差/(dB·m) ²
AP ₁	-76	-47	-58.99	43.56
AP ₂	-71	-56	-61.25	8.79
AP ₃	-58	-43	-48.92	3.72
AP ₄	-79	-54	-64.93	56.71



(a) AP₁信号



(b) AP₁概率



(c) AP₂信号

常用的AP选择,均未考虑RSS的离散程度即方差。其中,常用的最大均值AP选择法仅考虑了RSS的集中程度^[15]。从表1可知,AP₁的RSS最大值比AP₂高,然而其波动起伏较大,容易造成数据的变化,最终影响定位结果。所以稳定性也是AP选择时考量的重要因素,在稳定性上可以通过判断稳定度大小的方式进行选择。其中稳定度应包含采样位置的每个AP的波动幅度和AP信号在该采样位置接收的采集次数的频率。

3 综合AP选择策略

通过对信号特性分析,结合环境特征,提出了1种综合AP选择策略。该策略为在定位区域中,选择m个训练点采样,接收来自n个AP的RSS信

号, AP 集合表示成 $AP = \{AP_1, AP_2, \dots, AP_n\}$, 各训练点采集到的 RSS 值为 $RSS = \{RSS_1, RSS_2, \dots, RSS_m\}$, $RSS_{ij} = \{RSS_{ij1}, RSS_{ij2}, \dots, RSS_{ijk}\}$ 为第 i 个训练点处、第 j 个 AP 扫描的第 k 次数据, k 是每个训练点处的采样次数, $i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n$ 。

首先对采集到的 RSS 数据, 利用卡尔曼滤波进行滤波处理, 这样可去除奇异值, 同时平缓其变化范围, 令数据更加真实可靠。

然后对 RSS 数据进行排序, 在 m 个训练点的所有 AP 平均值中, 选取数值最大的前 x 个 RSS, 再进一步从所有训练点中, 选取出现频率最高的 y 个 AP ($y < x$)。将 y 个 AP 作为子集, 计算子集信号强度的方差, 即

$$\text{Var}(AP_j) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\overline{RSS_{ij}} - \overline{RSS_j})^2 + \varepsilon \quad (3)$$

式中: $\overline{RSS_{ij}}$ 为第 i 个训练点处、第 j 个 AP 的采样信号强度的均值; $\overline{RSS_j}$ 为每个 AP 发送的 RSS 信号均值。考虑到方差可能为 0, 所以加入拉普拉斯平滑因子 ε , 以避免方差为 0 的情况^[16], 与此同时, 考虑 AP 信号在该采样位置接收的采集次数的频率, 即

$$\text{Fre}(AP_j) = \frac{N_j}{\text{Sum}_{i=1}^m (N_i)} \quad (4)$$

式中: N_j 为整个采集过程中, AP_j 在 RSS 总体样本中出现的个数; $\text{Sum}_{i=1}^m (N_i)$ 为所有训练点采集

的数据。结合式 (3) 和式 (4), 可以得到 AP 集合中每 1 个 AP 的稳定度为

$$\text{Sta}(AP_j) = \frac{1}{\varepsilon + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\overline{RSS_{ij}} - \overline{RSS_j})^2} \cdot \frac{N_j}{\text{Sum}_{k=1}^m (N_k)} \quad (5)$$

最后对稳定度进行排序, 剔除稳定度较低的 AP, 保留了较为关键的 AP, 实现了对 AP 的更优选择。

4 实验与结果分析

4.1 实验环境

本文的实验场地选在上海地铁诸光路站站厅层付费区域, 如图 7 所示, 其中实验区域长 101 m、宽 19 m。实验测试环境中的 AP, 是地铁站厅层已布置的一共 42 个蓝牙 AP, 在图 7 中以圆点表示, 不会随意更改 AP 或者加入其他 AP。信号采集工具为自主开发的软件, 采集 RSS 信息的设备为华为 P10, 每 4 个小网格组成 1 个大网格, 以大网格中心为采集点, 采集时长为 60 s, 采集的频率为 5 Hz。为将定位结果量化, 将真实值与测量值之间的距离定义为误差, 即

$$\text{Error} = \sqrt{(x_i - x'_i)^2 + (y_i - y'_i)^2} \quad (6)$$

式中: (x_i, y_i) 为测试点的实际物理位置; (x'_i, y'_i) 为测试点的估算位置坐标。

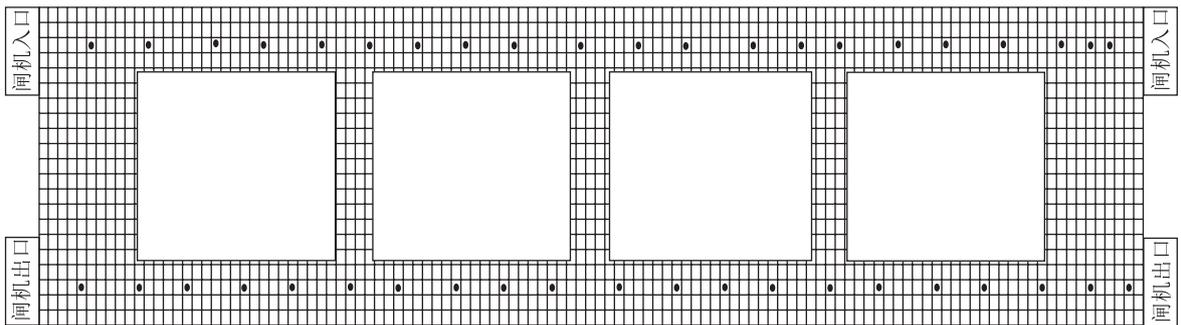


图 7 AP 站厅层付费区结构

4.2 结果分析

本文对站厅层实验区域 24 个采样点, 利用综合 AP 选择策略进行位置估计, 同时与未经 AP 选择的方法、最大均值法和信息增益法进行实验对比。经过反复试验, 实验中参数设置为: AP 最佳数目选择为 6, WKNN 的 k 值选择为 4; 权重为欧氏距离的倒数。24 个采样点部分采集指纹信息如表 2 所示。

表 2 24 个采样点部分采集指纹信息

部分 MAC 地址	部分采样点处的 RSS 值/(dB-m)					
AC:23:3F:20:79:64	-80	-81	-81	-82	-78	-79
AC:23:3F:20:79:63	-77	-76	-77	-83	-79	-79
AC:23:3F:20:79:62	-74	-74	-75	-78	-78	-77
AC:23:3F:20:79:61	-72	-69	-71	-75	-72	-72
AC:23:3F:20:79:60	-68	-64	-62	-72	-66	-72

图8为不同AP选择方法下定位误差的累积概率分布。

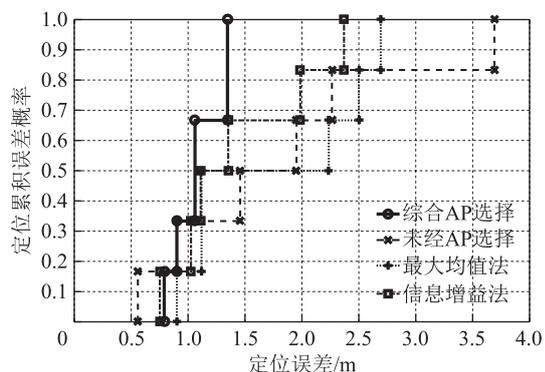


图8 不同AP选择方法的定位误差累积概率分布

从图8中可以看出,本文提出的综合AP选择策略与WKNN的定位效果更优,基本保证定位误差在2 m以内。作为比较,最大均值法和信息增益法相对于未经AP选择的方法虽具有一定效果,但并不明显,初步判断其原因是因为没有考虑属地特性和信号波动性;而综合AP选择策略考虑了波动性、区

域性、稳定性,使得AP组合为最优。通过对不同方法的平均误差分析,未经AP选择的平均定位误差为1.81 m,最大均值法平均定位误差为1.76 m,信息增益法的平均误差为1.43 m,本文的AP选择方法平均定位精度为1.09 m,其精度优于未经AP选择的方法,比平均定位精度提高0.45 m以上,且较为稳定。

5 结束语

在地铁环境下利用蓝牙技术进行定位时,本文采用指纹匹配法。在预处理AP选择阶段,通过对地下密闭空间的AP特性进行分析,提出了1种综合AP选择策略,该策略通过对AP波动性、区域性进行分析,结合AP属区域特征,经过最大平均值和稳定度排序,使得AP选择组合得到一定程度的优化,并利用WKNN算法进行定位验证。通过对比实验,结果表明,相较于普通AP选择法,平均定位精度提高了0.45 m以上。下一步将研究在AP布局方向上进行优化,使得指纹设计更加合理,以获得更优的定位效果。

参考文献

- [1] 万慧颖, 万旺根, 罗天杭. 基于蓝牙定位的地下空间逃生疏散系统设计及实现[J]. 电子测量技术, 2019, 42(24): 43-48.
- [2] 刘成. LBS定位技术研究与发展现状[J]. 导航定位学报, 2013, 1(1): 90-95.
- [3] 芦潇静. 蓝牙5.1/低功耗蓝牙模块助力具有测向和长距离连接功能的IoT产品设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2020, 20(3): 96.
- [4] 张立东, 孙煜, 万明俊. 基于蓝牙技术的城市轨道交通室内定位导航及应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019, 22(5): 166-170, 177.
- [5] 程金晶, 魏东岩, 唐阳阳. WLAN指纹定位中AP选择策略研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(3): 1-5.
- [6] HE S, LIN W, CHAN S H. Indoor localization and automatic fingerprint update with altered AP signals[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 16(7): 1897-1910.
- [7] 易驰杰. 基于iBeacon的位置指纹室内定位技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- [8] JHUANG F M, HUNG C F, TUAN C C, et al. An AP selection with RSS standard deviation for indoor positioning in Wi-Fi[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of the 2015 9th International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing. Blumenau: IEEE, 2015: 403-407.
- [9] 朱琼琼, 李平, 杨程, 等. 自适应AP选择无线室内定位算法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(14): 120-126.
- [10] 张伟, 花向红, 邱卫宁, 等. WiFi指纹定位的一种新组合算法[J]. 测绘工程, 2017, 26(3): 4-18.
- [11] 何洋, 吴飞, 张玉金, 等. 后验加权贝叶斯算法的WiFi室内定位[J]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 51-56.
- [12] YOUSSEF M A, AGRAWALA A, SHANKAR A U. WLAN location determination via clustering and probability distributions[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of the First IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications. Fort Worth, TX: IEEE, 2003: 143-150.
- [13] 桑楠, 袁兴中, 周瑞. 基于SVM分类和回归的WiFi室内定位方法[J]. 计算机应用研究, 2014, 31(6): 1820-1823.
- [14] 张帅, 郭际明, 许毅, 等. 基于WiFi室内定位的AP综合选择策略分析[J]. 测绘通报, 2019(增刊2): 1-5.
- [15] 李意顺. 基于机器学习理论的室内定位算法的改进与研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- [16] 沈阳. 基于指纹的无线室内定位中接入点选择算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

引文格式: 刘媛媛, 李亮, 李慧, 等. BDS 广播星历 A1 型故障完好性监测方法[J]. 导航定位学报, 2021, 9 (1): 31-37. (LIU Yuanyuan, LI Liang, LI Hui, et al. Type A1 fault integrity monitoring for BDS broadcast ephemeris[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9 (1): 31-37.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210106.

BDS 广播星历 A1 型故障完好性监测方法

刘媛媛, 李亮, 李慧, 程春

(哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 针对利用传统单一类型卫星观测量进行广播星历 A1 型故障监测时, 存在观测噪声大或模糊度解算复杂等问题, 提出 1 种顾及参数灵敏度的北斗卫星导航系统 (BDS) 广播星历 A1 型故障完好性监测方法: 联合伪距和载波相位观测量计算轨道误差; 并与基于广播星历参数变化灵敏度分析的位置误差函数结合, 根据系统的完好性风险要求, 估算最小可检测误差; 然后与检测门限比较, 完成广播星历 A1 型故障监测。实验结果表明: 无星历故障条件下, 该方法计算的最小可检测误差均小于满足完好性风险要求的检测门限; 而在故障发生时, 最小可检测误差超出检测门限, 能有效实现 BDS 广播星历 A1 型故障监测。

关键词: 北斗卫星导航系统; 星历故障监测; 参数灵敏度; 最小可检测误差; 完好性

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0031-07

Type A1 fault integrity monitoring for BDS broadcast ephemeris

LIU Yuanyuan, LI Liang, LI Hui, CHENG Chun

(College of Intelligent System Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Aiming at the problems of large observation noises and complicated ambiguity resolution in using the traditional single-type satellite observation method to monitor type A1 fault of broadcast ephemeris, the paper proposed a method of type A1 fault integrity monitoring for BeiDou navigation satellite System (BDS) broadcast ephemeris based on parameter sensitivity: the orbit errors were calculated by combining pseudo-range and carrier phase measurements; and according to the integrity risk requirement of the system, the minimum detectable error was estimated by integrating with the position error function based on the sensitivity analysis of broadcast ephemeris parameter change; then the detection threshold was compared for realizing type A1 fault integrity monitoring. Experimental result showed that: in the case of no ephemeris fault, the minimum detectable error calculated by the proposed method would be smaller than the detection threshold that meets the integrity risk requirement; while when the fault occurs, the minimum detectable error would exceed the detection threshold, indicating the feasibility of the method for BDS.

Keywords: BeiDou navigation satellite system; ephemeris fault monitoring; parameter sensitivity; minimum detectable error; integrity

0 引言

北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite

system, BDS) 是我国自行研制的全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS), 可全天候、全天时为各类用户提供高精度、高可靠的定

收稿日期: 2020-07-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61773132, 61633008, 61803115); 黑龙江省杰出青年基金项目 (JC2018019); 黑龙江省重点实验室开放基金重点课题项目 (HKL-2020-Z01); 青岛市博士后应用研究项目 (QDBSHYYYJXM20200101)。

第一作者简介: 刘媛媛 (1995—), 女, 吉林长春人, 硕士研究生, 研究方向为 GNSS 精密定轨定位数据处理。

通信作者简介: 李慧 (1987—), 女, 山东潍坊人, 博士, 讲师, 研究方向为 GNSS 精密定轨定位数据处理。

位、导航及授时服务,具备支持民航的导航能力^[1]。将卫星导航应用于民航系统,可有效地提高飞行安全和效率。服务于民航的导航系统,其性能需求主要体现在精度、完好性、连续性和可用性4个方面^[2]。飞机精密进近的完好性和连续性,是航空用户最关注的性能需求,其中卫星广播星历故障,是影响飞机精密进近的主要风险源之一。为保障与生命安全相关用户的定位完好性,对广播星历故障的监测是必不可少的。

卫星广播星历故障可根据是否与卫星机动有关而分为两大类^[3]:

1) A型故障。发生卫星机动后,广播星历参数错误;包括地面站知道卫星机动发生的A1型故障和地面站不知道卫星机动发生的A2型故障。

2) B型故障。没有发生卫星机动,但广播星历参数错误。

广播星历B型故障可根据预测星历减今日星历监测的方法进行监测。本文主要研究利用广播星历监测A型故障的方法,由于A2型故障发生的概率低于系统要求的误警率,所以文中仅对广播星历中A1型故障监测方法展开研究。

对广播星历A1型故障的监测,目前应用最多的方法是接收机自主完好性监测(receiver autonomous integrity monitoring, RAIM)算法^[4]。大多数RAIM算法采用伪距观测量进行完好性监测,由于其观测噪声较大、定位精度不高,只能满足航路飞行和非精密进近应用,不能满足精密进近服务的要求^[5]。基于载波相位观测量的实时导航技术,能够满足飞机精密进近的精度要求^[6],在短基线条件下,观测量的双差能够消除大部分测量误差。虽然基于载波相位观测量完好性监测的精度较高,但存在整周模糊度可靠解算等问题,增加了解算难度^[7]。部分学者也采用伪距和载波相位观测量联合的方式来实现完好性监测^[8],但仍存在大量的模糊度解算等问题,增加了系统算法的复杂度。

考虑到伪距和载波相位观测量在进行广播星历A1型故障监测时存在的问题,本文提出顾及参数灵敏度的广播星历A1型故障完好性监测方法。本文以北斗卫星导航(区域)系统即北斗二号(BeiDou navigation satellite (regional) system, BDS-2)、第三代北斗卫星导航系统即北斗三号(BeiDou navigation satellite system with global coverage, BDS-3)的C01~C30卫星为研究对象,采用伪距和载波相位观测量联合的方式测量轨道误差,并与卫星位置误差对广播星历参数变化的灵

敏度相结合,将关于卫星位置误差的观测方程转化为关于广播星历参数偏差的观测方程,在提高观测精度的同时,降低载波相位观测中模糊度解算的复杂度。本文首先分析卫星位置误差对广播星历参数变化的灵敏度,获取每个广播星历参数的不确定性对卫星位置精度的影响大小及位置误差函数。其次,采用伪距差分和双差载波相位测量轨道误差,与灵敏度分析中的位置误差函数结合构建观测方程。最后,根据系统的完好性风险要求计算最小可检测误差(minimum detectable error, MDE),并与满足地基增强系统(ground-based augmentation systems, GBAS)完好性风险要求的MDE检测门限比较,实现对BDS广播星历A1型故障的完好性监测。

1 广播星历参数灵敏度分析

通过卫星位置误差对广播星历参数变化的灵敏度进行分析,可获得每个广播星历参数的不确定性对卫星位置精度的影响大小以及关于广播星历参数偏差的位置误差函数,将其和测量轨道误差的观测方程结合,可转化为关于广播星历参数偏差的观测方程,以降低模糊度解算的复杂度。本文采用2019年全年BDS-2、BDS-3 C01~C30卫星的广播星历进行灵敏度分析。

广播星历正常的情况下,卫星位置误差对广播星历参数变化的灵敏度是可确定的。广播星历参数描述了在一定拟合间隔下的卫星轨道,它包括15个广播星历参数和1个星历参考时间 t_{oc} 。为书写方便,本文用矩阵 \mathbf{p} 表示15个广播星历参数,即

$$\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_{15}] = [M_0, \Delta n, e, a, \Omega_0, i_0, \omega, \dot{\Omega}, \dot{i}, C_{uc}, C_{us}, C_{rc}, C_{rs}, C_{ic}, C_{is}] \quad (1)$$

式中: M_0 为平近点角; Δn 为平均角速度校正值; e 为偏心率; a 为长半径; Ω_0 为升交点赤经; i_0 为轨道倾角; ω 为近地点角距; $\dot{\Omega}$ 为升交点赤经变化率; \dot{i} 为轨道倾角变化率; C_{uc} 为升交点角距余弦调和校正振幅; C_{us} 为升交点角距正弦调和校正振幅; C_{rc} 为轨道半径余弦调和校正振幅; C_{rs} 为轨道半径正弦调和校正振幅; C_{ic} 为轨道倾角余弦调和校正振幅; C_{is} 为轨道倾角正弦调和校正振幅。

根据15个广播星历参数和星历参考时间 t_{oc} ,可以在任意时刻 t ,使用BDS接口控制文件中定义的卫星位置非线性函数,计算卫星位置,计算公式为

$$\begin{bmatrix} x(p_1, \dots, p_{15}, t_{oe}, t) \\ y(p_1, \dots, p_{15}, t_{oe}, t) \\ z(p_1, \dots, p_{15}, t_{oe}, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(\mathbf{p}, t_{oe}, t) \\ y(\mathbf{p}, t_{oe}, t) \\ z(\mathbf{p}, t_{oe}, t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: x 、 y 、 z 分别为 3 维卫星位置的计算函数。卫星位置误差对广播星历参数变化的灵敏度可以通过卫星位置函数对每个广播星历参数的微分体现, 具体公式为

$$\begin{bmatrix} \delta x(t) \\ \delta y(t) \\ \delta z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x(\mathbf{p}, t_{oe}, t)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial x(\mathbf{p}, t_{oe}, t)}{\partial p_{15}} \\ \frac{\partial y(\mathbf{p}, t_{oe}, t)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial y(\mathbf{p}, t_{oe}, t)}{\partial p_{15}} \\ \frac{\partial z(\mathbf{p}, t_{oe}, t)}{\partial p_1} & \dots & \frac{\partial z(\mathbf{p}, t_{oe}, t)}{\partial p_{15}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta p_1 \\ \vdots \\ \delta p_{15} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: 等式右边的第 1 个矩阵为 3×15 的灵敏度矩

阵, 该矩阵中的每个项是 15 个卫星广播星历参数的函数。可将式 (3) 的位置误差函数简写为

$$\delta \mathbf{r}(t) = \mathbf{A}(\mathbf{p}, t_{oe}, t) \delta \mathbf{p} \quad (4)$$

将式 (4) 与广播星历参数偏差的标准差 $\sigma(\delta p_i)$ 结合, 可以得到每个广播星历参数变化导致的卫星位置变化, 即

$$\sigma(\delta \mathbf{r}_{p_i}) = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial p_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial p_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial p_i}\right)^2} \sigma(\delta p_i) \quad (5)$$

根据式 (5) 可以得到广播星历正常情况下卫星位置对地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO)、倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbits, IGSO) 及中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星每个广播星历参数变化的灵敏度曲线, 如图 1 所示。

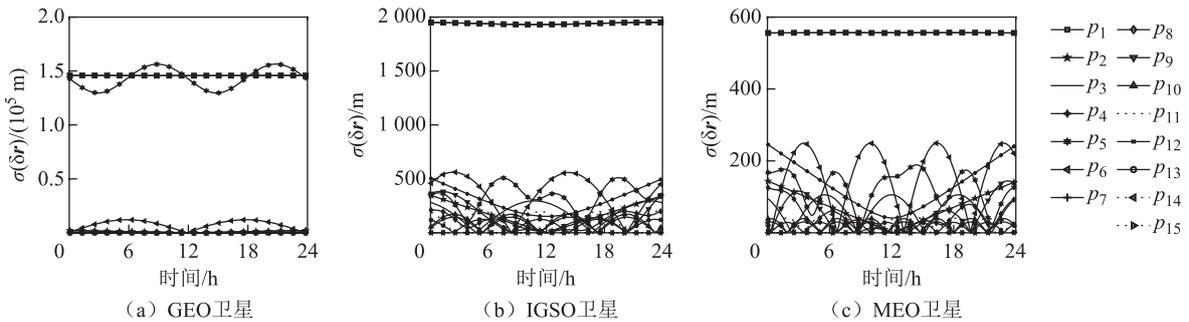


图 1 GEO、IGSO、MEO 卫星位置误差对星历参数变化的灵敏度曲线

图 1 中从左至右依次为 GEO、IGSO、MEO 卫星位置误差对每个广播星历参数变化的灵敏度曲线。其中 M_0 和 ω 参数的灵敏度曲线重合, 由于部分广播星历参数卫星位置误差较大, 导致部分位

置误差较小的 C_{ic} 和 C_{is} 灵敏度曲线在图 1 中并不明显, GEO、IGSO、MEO 卫星参数 C_{ic} 和 C_{is} 的灵敏度曲线如图 2 所示。

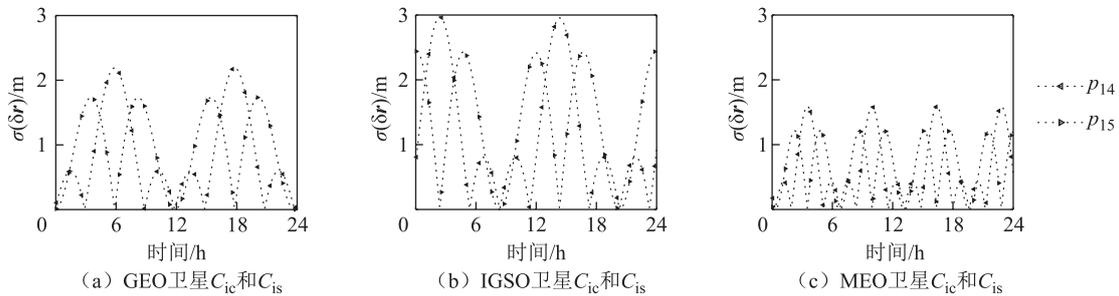


图 2 GEO、IGSO、MEO 卫星 C_{ic} 和 C_{is} 的灵敏度曲线

由图 1 和图 2 可以看出, GEO、IGSO、MEO 卫星大部分广播星历参数的灵敏度曲线存在一定的周期性。对于 GEO 卫星, 参数 M_0 、 Ω_0 和 ω 的变化对卫星位置影响较大; 对于 IGSO 卫星, 参数 M_0 和 ω 的变化对卫星位置影响较大; 对于 MEO 卫

星, 参数 M_0 、 a 、 Ω_0 、 i_0 和 ω 的变化对卫星位置影响较大。而参数 C_{uc} 、 C_{us} 、 C_{rc} 、 C_{rs} 、 C_{ic} 和 C_{is} 的变化, 对 GEO、IGSO、MEO 三类卫星位置的影响都比较小, 其中 C_{ic} 和 C_{is} 对卫星位置的影响最小, 其影响量均不超过 3 m。因此, 在构建广播星历 A1

型故障监测模型时,可忽略 C_{ic} 和 C_{is} 对卫星位置的影响,从而引入 2 个载波相位观测的整周模糊度。

2 A1 型故障完好性监测

广播星历以及根据卫星信号获得的伪距观测量或载波相位测量值,均可用于计算用户位置。因此,当广播星历发生故障后,将对定位结果产生很大影响。差分是消除许多误差源的有力手段。GBAS 是基于差分技术的局域卫星增强系统,将地面基准站全部可视卫星的差分修正量播发给机载用户,机载用户利用接收的差分修正量对自身观测量进行校正,采用修正后的观测量进行定位解算,从而能够提高用户定位精度,这有助于提升飞机精密进近的安全性能^[9]。GBAS 使用多个具有高性能、多径限制天线的接收机,以满足机载用户对导航精度、完好性、连续性和可用性的严格要求。

本文基于短基线参考接收机的地面设施,根据系统的完好性风险要求推导了 MDE: 采用伪距和载波相位观测量联合的方式测量轨道误差,构建关于位置误差的观测方程;结合广播星历参数灵敏度分析中的位置误差函数,将关于位置误差的观测方程转化为关于广播星历参数偏差的观测方程;根据最小二乘法得到卫星位置误差的协方差矩阵;最后计算 MDE 并与检测门限比较,实现广播星历 A1 型故障的完好性监测。

2.1 完好性风险约束

垂直保护水平是垂直方向的定位误差边界,与满足完好性风险要求的漏检率有关,飞机用户不断生成垂直保护水平来反映卫星位置误差^[10]。当垂直保护水平超过 GBAS 最低运行性能标准中规定的固定警报限值时,将会在飞机上发出警报^[11]。

垂直方向的卫星位置误差^[12]为

$$\delta\chi_{\text{vert},i} = S_{\text{vert},i} \left[\frac{\delta\mathbf{r}_i^T (\mathbf{I} - \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^T) \mathbf{x}}{\rho_i} \right] + S_{\text{vert},i} \mathbf{v}_p \quad (6)$$

式中: $S_{\text{vert},i}$ 为加权最小二乘投影矩阵中第 i 颗卫星的垂直系数; \mathbf{e}_i 为卫星视距方向单位向量; \mathbf{x} 为飞机天线与地面站天线的矢量位移; ρ_i 为卫星 i 到地面站接收机的标量范围; \mathbf{v}_p 为误差源投影到用户位置域的差分测距误差。

令 $\mathbf{E}_i = \mathbf{I} - \mathbf{e}_i \mathbf{e}_i^T$, 则 $\delta\mathbf{r}_i^T \mathbf{E}_i \mathbf{x}$ 为标量, 所以有

$$\delta\mathbf{r}_i^T \mathbf{E}_i \mathbf{x} \leq \|\mathbf{E}_i \mathbf{x}\| \|\delta\mathbf{r}_i\| \quad (7)$$

假设存在检验统计量 t_e , 则检测门限 T_e 可以定

义为

$$T_e = k_{\text{FFA}} \sigma_t \quad (8)$$

式中: σ_t 为检验统计量误差 v_t 的标准差; k_{FFA} 为确保无故障报警概率的参数。假设 v_t 服从零均值的正态分布, 则有

$$\|\delta\mathbf{r}_i\| < T_e + v_t \quad (9)$$

结合式 (6) 至式 (9), 可以得到

$$|\delta\chi_{\text{vert},i}| \leq |S_{\text{vert},i}| \left(\frac{\|\mathbf{E}_i \mathbf{x}\|}{\rho_i} \right) k_{\text{FFA}} \sigma_t + |S_{\text{vert},i}| \left(\frac{\|\mathbf{E}_i \mathbf{x}\|}{\rho_i} \right) v_t + |S_{\text{vert},i}| v_p \quad (10)$$

式中 σ_j 为 \mathbf{v}_p 的标准差, 即第 j 颗卫星无故障差分测距误差的标准差, 且有

$$\|\mathbf{E}_i \mathbf{x}\| \leq \|\mathbf{x}\| \quad (11)$$

定义 1 个基于漏检率的漏检检测参数 k_{md} , 则垂直保护水平的公式为

$$V_{\text{PL}}(i) = |S_{\text{vert},i}| \frac{(k_{\text{FFA}} + k_{\text{md}}) \sigma_t}{\rho_i} \|\mathbf{x}\| + k_{\text{md}} \sqrt{\sum_{j=1}^n S_{\text{vert},j}^2 \sigma_j^2} \quad (12)$$

MDE 的计算公式为

$$E_{\text{MD}} = (k_{\text{FFA}} + k_{\text{md}}) \sigma_t \quad (13)$$

地面站向每个卫星的空中用户广播的去相关参数 P_i 与 E_{MD} 的关系^[13]为

$$P_i = \frac{E_{\text{MD}}}{\rho_i} \quad (14)$$

所以飞机在星历失效下的垂直保护水平 V_{PL} 可以表示为

$$V_{\text{PL}} = \max_i \left(P_i |S_{\text{vert},i}| \|\mathbf{x}\| + k_{\text{md}} \sqrt{\sum_{j=1}^n S_{\text{vert},j}^2 \sigma_j^2} \right) \quad (15)$$

从式 (15) 可以看出, MDE 的值越小, 则垂直保护水平越小。MDE 为广播星历故障的检测能力, 全球定位系统 (global positioning system, GPS) 广播星历 A1 型故障监测方法中, MDE 的检测门限为 3 500 m^[14], 由于 BDS 目前的发展还没有 GPS 成熟, 在定位精度等方面劣于 GPS, 采用 GPS 的检测门限能够满足 BDS 的完好性风险要求^[15], 所以文本采用 3 500 m 作为 BDS 的

MDE 检测门限。

星历异常情况下, 检验统计量具有非中心的卡方分布, 该分布的最小非中心性参数 λ 与完好性风险要求的漏检率 P_{MD} 保持一致^[16], 相关公式为

$$P_{MD} = \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(\lambda_s/2)^j}{j!} e^{-\lambda_s/2} \Pr[\chi_{3+2j}^2 \leq T_e] \quad (16)$$

2×10^{-7} 的漏检率可以满足 GBAS 的完好性风险要求, 根据式 (16) 可得到 λ_s 的值。星历异常情况下, 最小非中心性参数的值小于检验统计量的值, 关系为

$$\lambda_s \leq \delta \mathbf{r}_e^T \mathbf{C}_{\delta \mathbf{r}_e}^{-1} \delta \mathbf{r}_e \quad (17)$$

式中: $\delta \mathbf{r}_e$ 为星历异常下的卫星位置误差; $\mathbf{C}_{\delta \mathbf{r}_e}$ 为卫星位置误差的协方差矩阵。

根据公式 (17) 可以得到

$$\lambda_s = |\max \delta \mathbf{r}_e|^2 [\max(\text{eig} \mathbf{C}_{\delta \mathbf{r}_e})]^{-1} \quad (18)$$

式中 $\text{eig} \mathbf{C}_{\delta \mathbf{r}_e}$ 为协方差矩阵的特征值。

MDE 的计算公式为

$$E_{MD} = \sqrt{\lambda \max(\text{eig} \mathbf{C}_{\delta \mathbf{r}_e})} \quad (19)$$

若根据式 (19) 计算的卫星 MDE 值均小于 BDS 的 MDE 检测门限, 则满足 GBAS 的完好性风险要求。

2.2 误差观测模型构建

单差观测方程是在同一时刻、2 台接收机对相同卫星的观测值相减得到的观测方程, 即站间差分。对于在同一时刻的同一卫星, 卫星具有的卫星钟差大小完全相同; 因此站间差分可以用来消除和卫星有关的误差项, 且在短基线情况下也可以通过站间差分的方式消除大气延迟误差^[17]。对于差分用户, 定位精度主要受正交于视距方向的轨道误差影响, 须采用精度较高的双差载波相位来测量正交于视距方向的轨道误差。投影到视距方向的轨道误差直接导致伪距测量误差, 对于视距方向的轨道误差, 可采用伪距差分测量, 在保证定位精度的同时降低模糊度解算难度。

采用伪距差分 z_k^ρ 测量卫星视距方向 \mathbf{e}_k 的轨道误差, 采用双差载波相位 z_k^ϕ 测量正交于视距方向的轨道误差, 并结合广播星历参数灵敏度分析中的位置误差函数, 即得到观测方程为

$$\left. \begin{aligned} z_k^\rho &= \mathbf{e}_k^T \mathbf{A}_k \delta \mathbf{p} + \nu_k^\rho \\ z_k^\phi &= l \frac{\mathbf{x}_b^T (\mathbf{I} - \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T)}{R_k} \mathbf{A}_k \delta \mathbf{p} + N \lambda_s + \nu_k^\phi \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: l 是基线长度; \mathbf{x}_b 是接收机基线方向单位向量; \mathbf{I} 是大小为 3×3 的单位矩阵; N 是整固模糊度; λ_s 是信号波长; R_k 是卫星到接收机的距离; ν_k^ϕ 是载波相位的测量误差; ν_k^ρ 是伪距测量误差。测量误差 ν_k^ρ 和 ν_k^ϕ 分别服从以下分布:

$$\nu_k^\rho \sim N(0, \sigma_\rho^2) \quad (21)$$

$$\nu_k^\phi \sim N(0, \sigma_\phi^2) \quad (22)$$

式中: k 为不同时刻, $k=1, 2, \dots, 24$; σ_ρ 是伪距差分测量误差的标准偏差; σ_ϕ 是差分载波相位测量误差的标准偏差。

将式 (20) 表示为

$$\mathbf{Z} = \mathbf{H} \delta \mathbf{p} + \mathbf{v} \quad (23)$$

式中: \mathbf{Z} 为所选取地面站的观测量矩阵; \mathbf{H} 为观测矩阵; \mathbf{v} 为观测误差矩阵。

根据式 (20) 可知观测矩阵 \mathbf{H} 为

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_k^T \mathbf{A}_k & \mathbf{O} & \mathbf{O} \\ l \frac{\mathbf{x}_a^T (\mathbf{I} - \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T)}{R_k} \mathbf{A}_k & \lambda & \mathbf{O} \\ l \frac{\mathbf{x}_b^T (\mathbf{I} - \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T)}{R_k} \mathbf{A}_k & \mathbf{O} & \lambda \end{bmatrix} \quad (24)$$

式中 \mathbf{O} 为矩阵元素为 0 的矩阵。

根据卫星位置误差对广播星历参数的灵敏度分析可知, C_{ic} 和 C_{is} 对 GEO、IGSO、MEO 卫星位置的影响最小, 所以在构建 A1 型故障监测模型时, 可忽略这 2 个参数。下文中的 $\delta \mathbf{P}_a$ 不包含 C_{ic} 和 C_{is} , 加入 2 个接收机的未知整周模糊度。

测量误差 \mathbf{v} 服从分布

$$\mathbf{v} \sim (0, \mathbf{V}) \quad (25)$$

式中

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}^\rho & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{I}_{(2n)} \sigma_\phi^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中 \mathbf{V}^ρ 为伪距差分测量误差矩阵。

由于 ν_k^ϕ 主要由接收机白噪声和多路径造成, 且多路径噪声的时间长度通常为 1 min, 采样时间大于 2 min, 上述多路径噪声通常不相关^[18]。而伪距差分测量误差随时间的变化可以描述为一阶高

斯马尔可夫过程为

$$\mathbf{V}_{ij}^{\rho} = \sigma_{\rho}^2 e^{(|i-j|\Delta t/\tau)} \quad (27)$$

式中： Δt 是采样时间间隔； τ 是伪距测量误差的时间常数。

通过加权最小二乘法得到广播星历参数偏差的最佳估计值及其协方差矩阵分别为：

$$\delta \hat{\mathbf{P}}_a = (\mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \mathbf{W} \mathbf{Z} \quad (28)$$

$$\mathbf{C}_{\delta \mathbf{P}_a} = (\mathbf{H}^T \mathbf{V}^{-1} \mathbf{H})^{-1} \quad (29)$$

式中 \mathbf{W} 为加权矩阵。

结合式(4)可得到卫星位置误差的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_{\delta \mathbf{r}} = \mathbf{A}_k \mathbf{C}_{\delta \mathbf{P}_a} \mathbf{A}_k^T \quad (30)$$

将式(30)代入式(19)中可以计算卫星的 MDE。MDE 的值与伪距测量误差的时间常数 τ 、伪距差

分测量误差的标准差 σ_{ρ} 、双差载波相位测量误差的标准差 σ_{ϕ} 有关，仅改变上述参数中的某个参数，令其他参数的值保持不变，分析 MDE 对每个参数的灵敏度。若计算的 MDE 值均小于 MDE 检测门限，则满足系统的完好性风险要求，完成 A1 型故障监测。

3 实验与结果分析

本文选取香港大地测量中心的 HKKS、HKSS、HKWS 三个观测站，2020-07-01 BDS-2、BDS-3 C01~C30 卫星的观测数据和广播星历进行 A1 型故障监测。本文选择 GPS 局域增强系统原型中，多径抑制天线性能中规定的 $\sigma_{\rho} = 10 \text{ m}$ 、 $\sigma_{\phi} = 0.05 \text{ m}$ 作为初始值。

首先改变 τ 的值，分别选取 τ 的值为 3、12 和 24 h 计算每个卫星的 MDE 值，部分卫星 MDE 实验结果如图 3 所示。

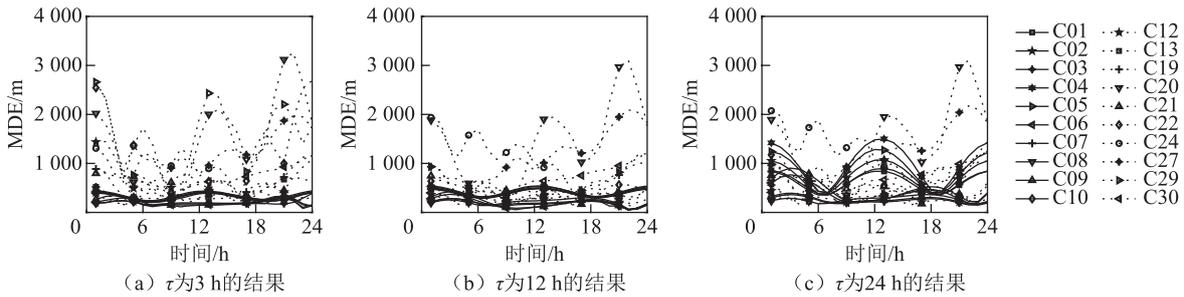


图 3 τ 分别为 3、12、24 h 时计算的 MDE

从图 3 可以看出， τ 取不同值时，计算的 MDE 结果近似，即 τ 的大小对 MDE 的结果值影响很小，且每个卫星的 MDE 值均小于 3 500 m 的检测门限，满足 GBAS 的完好性风险要求，所以在下面的实验中，选取 $\tau = 12 \text{ h}$ 。

其次改变 σ_{ρ} 的值，分别选取 σ_{ρ} 的值为 6、20 和 $1 \times 10^{10} \text{ m}$ ，计算各个卫星的 MDE，部分卫星结果如图 4 所示。根据图 4 可知，当 σ_{ρ} 值小于 20 m 时， σ_{ρ} 的改变对 MDE 的影响很小，每个卫星的 MDE 值均小于 3 500 m，满足 GBAS 的完好性风险要求。

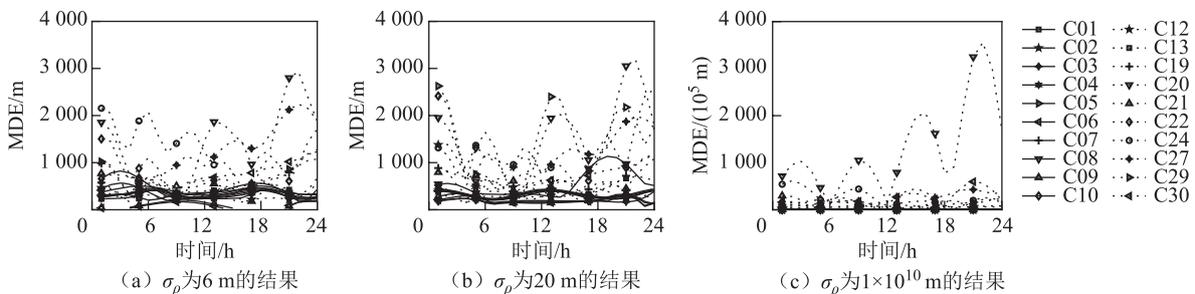


图 4 σ_{ρ} 分别为 6、20、 $1 \times 10^{10} \text{ m}$ 时计算的 MDE

最后改变 σ_{ϕ} 的值，分别选取 σ_{ϕ} 的值为 0.04 和 0.06 m 时计算 MDE，部分卫星结果如图 5 所示。由图 5 可以看出，当 σ_{ϕ} 的值为 0.06 m 时，C20 卫

星某时刻的 MDE 结果值略大于 3 500 m，即 σ_{ϕ} 的大小对 MDE 影响较大。所以，当 σ_{ϕ} 小于 0.06 m 时，满足 GBAS 的完好性风险要求。

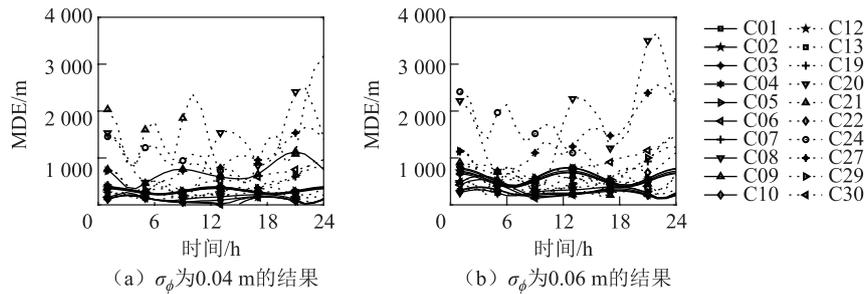


图 5 σ_ϕ 分别为 0.04、0.06 m 时计算的 MDE

为验证上述监测方法的有效性,选取上述初始值进行实验,在 0 时刻引入 C01 号卫星广播星历参数误差后,计算的 MDE 结果趋近于无穷大,远大于 3 500 m 的 MDE 检测门限。综上所述,选定天线性能要求的初始值后,仅改变影响 MDE 的某个参数后计算得到的 MDE 数值均小于检测门限,采用伪距和载波相位观测量联合的方式测量轨道误差,与卫星位置误差对广播星历参数变化的灵敏度结合,构建 A1 型故障监测模型是有效的。

4 结束语

针对目前广播星历 A1 型故障监测中存在的问题,推导了顾及参数灵敏度的广播星历 A1 型故障完好性监测方法,并利用实验数据进行了初步验证,得出以下结论:

1) 影响 MDE 的 3 个参数中,伪距测量误差的时间常数、伪距差分测量误差的标准差对 MDE 的结果影响较小,改变参数的数值后,各个卫星的 MDE 数值改变较小;而双差载波相位测量误差的标准差对 MDE 结果影响较大,大于一定数值后,个别卫星的 MDE 值超过 MDE 检测门限。

2) 选定天线性能要求的初始值后,仅改变影响 MDE 的某个参数后,计算得到的 MDE 数值均小于检测门限,满足 GBAS 的完好性风险要求。

3) 顾及参数灵敏度的广播星历 A1 型故障完好性监测方法,能有效地监测广播星历 A1 型故障。

4) 对于在双差载波相位测量误差的标准差较大的情况,为保证 MDE 的数值小于检测门限的同时,能有效监测广播星历 A1 型故障,需要优化故障监测算法,则有待进一步研究。

参考文献

- [1] 倪肖晨. 浅析北斗卫星导航系统的发展及通航应用[J]. 电子世界, 2019(1): 123-124, 127.
- [2] 刘晓华. 北斗卫星导航系统在民航导航中的应用分析[J]. 中国高新区, 2018(1): 22.
- [3] 李亮. 陆基增强系统定位与完好性监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [4] 石明旺. GPS/GLONASS/BDS 组合导航定位主要算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [5] 孟领坡, 吴杰, 袁义双. 载波相位差分接收机自主完好性监测研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(3): 271-275.
- [6] 吴杰, 彭敖, 石江宏. 基于部分可见星的接收机完好性监测方法[J]. 导航定位学报, 2016, 3(1): 25-32.
- [7] PERVAN B, CHAN F C. Detecting global positioning satellite orbit errors using short-baseline carrier-phase measurements[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2003, 26(1): 122-131.
- [8] 王寒. 北斗卫星 GBAS 完好性监测优化算法的研究[D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2019.
- [9] 原彬. 基于载波相位的卫星接收机自主完好性监测方法[C]//中国科协生命科学学会. 第十九届中国科协年会论文集. 北京: 中国科协生命科学学会, 2017.
- [10] 谢金石, 辛洁, 郭睿, 等. BDS 的 RAIM 算法设计与实现[J]. 导航定位学报, 2018, 6(1): 54-59, 75.
- [11] 甘兴利. GPS 局域增强系统的完善性监测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [12] PULLEN S, LEE J, LUO M, et al. Ephemeris protection level equations and monitor algorithms for GBAS[C]//The Institute of Navigation. Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2001). Salt Lake City, UT: the Institute of Navigation, Inc., 2001: 11-14.

(下转第 60 页)

引文格式: 刘泽军, 杜兰, 张栩晨, 等. 基于 Ku 波段 CEI 的 GEO 卫星定轨特性[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 38-43. (LIU Zejun, DU Lan, ZHANG Xuchen, et al. Analysis on orbit determination of GEO satellite based on Ku-band CEI[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 38-43.) DOI: 10.16547/j.cnki.10-1096.20210107.

基于 Ku 波段 CEI 的 GEO 卫星定轨特性

刘泽军¹, 杜兰¹, 张栩晨¹, 黄晓霞²

(1. 信息工程大学, 郑州 450001; 2. 61085 部队, 杭州 311200)

摘要: 为了进一步提高共位地球静止轨道 (GEO) 卫星实时监测的精度, 提出 1 种 GEO 卫星轨道确定方法: 利用 L 型正交双基线 Ku 频段连续干涉测量 (CEI) 测量系统进行干涉测量; 利用双行轨道根数 (TLE) 作为先验轨道信息, 确定整周模糊度, 采用批处理算法获得 GEO 卫星的精密轨道。实验结果表明: Ku 频段受对流层影响显著, 冬季大气较夏季更稳定, 信号空间传输路径中的对流层误差基本可以抵消, 使得观测数据质量明显好于夏季; 夏季的晚间数据质量好于白天; 冬季和夏季的内符合精度差别较小, 而冬季的外符合精度明显高于夏季; 外符合精度变化规律一致, 且存在明显的趋势项, 表明夏季和冬季观测数据都存在一定的系统误差。

关键词: 连线干涉测量; Ku 波段; 地球静止轨道卫星; 轨道确定

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0038-06

Analysis on orbit determination of GEO satellite based on Ku-band CEI

LIU Zejun¹, DU Lan¹, ZHANG Xuchen¹, HUANG Xiaoxia²

(1. Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China; 2. Troops 61085, Hangzhou 311200, China)

Abstract: In order to further improve the real-time monitoring accuracy of co-located Geostationary Earth Orbit (GEO) satellites, the paper proposed a GEO orbit determination method: the L-type orthogonal double baseline Ku band of Connected Element Interferometry (CEI) measurement system was used to do interferometry; meanwhile, Two Line Element (TLE) was used as prior orbit information to determine the ambiguity of the whole cycle, and the precise orbit of GEO satellite was obtained by batch processing algorithm. Experimental result showed that: due to the significant effect of the troposphere on Ku band, the atmosphere would be more stable in winter than in summer, and the troposphere error in the signal spatial transmission path could be basically offset, leading to the better observation data of winter compared to summer; while the data quality of evening would be better than that of daytime in summer; there would be little difference of internal coincidence accuracy between winter and summer, while the external coincidence accuracy in winter would be significantly higher than that in summer; moreover, in addition to an obvious trend term, the variation law of external coincidence accuracy in both seasons could be consistent, indicating that there would be certain systematic error in the observation data of both summer and winter.

Keywords: connected-element interferometry; Ku band; geostationary Earth orbit satellite; orbit determination

0 引言

为了充分利用有限的地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO) 资源, 分属不同

国家的多星共位技术应用越来越广泛。我国目前有两对并置双星, 1 颗与其他两国卫星组成的并置三星。此外, 地球赤道带区域还存在着大量的废弃卫星和空间碎片, 严重威胁着航天活动的安全^[1-3]。

收稿日期: 2020-07-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41804034, 41774038)。

第一作者简介: 刘泽军 (1983—), 男, 河南西峡人, 博士, 副教授, 研究方向为干涉测量与精密定轨。

为保障我方 GEO 卫星在轨安全, 对他方共位卫星的轨道进行实时监测是非常必要的。由于 GEO 的高轨和静地特性, 常规的监测技术限制了 GEO 卫星监测精度的提高, 更不适用于对共位的他方卫星进行监测。

连线干涉测量 (connected element interferometry, CEI) 技术提供了新的测量手段, 尤其对空间他方目标轨道监测具有天然优势^[2]。CEI 技术起源于天文学领域用于研究射电源结构的甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 技术, 但是受限于时延的测量精度, 导致未能发挥其独特的优势。

近几年来, 由于高精度时间频率及传递技术^[4-6]和干涉测量接收、标校技术的迅速发展, 以及快速准确的相位整周模糊确定方法的不断进步^[7-9], 大大提高了时延的测量精度。因此, CEI 技术开始重新得到了充分运用和发展。文献[10]利用布设在美国菲尼克斯和图森相距 180 km 的连线干涉测量系统, 获得了全球定位系统 (global positioning system, GPS) 卫星 30 m 的轨道精度, 以及 GEO 卫星 3 km 的轨道精度。文献[11]利用相距 5.6 m 的一对 1.2 m 直径的 C 波段天线, 对 GEO 卫星的经度进行了连续监测, 可以粗略确定其的机动窗口。

文献[8]给出了连线干涉测量系统设计及测量数据处理方法, 并对测量中的关键技术与设备特性、测量数据精度进行了初步分析。文献[12]通过对连线干涉测量体制的分析, 给出了基线长度的设置建议。文献[13-14]利用连线干涉测量系统对 GEO 卫星实施观测试验。文献[1,14]讨论了 CEI 在静地卫星精密定轨中的应用。文献[15-16]利用建成的 35 m×75 m C 波段正交短基线干涉测量实验系统, 开展了中星 10 卫星的轨道监测。

本文对原有干涉测量系统进行了升级改造, 更换了接收天线和接收机, 实现了 Ku 波段的连线干涉测量。利用该测量系统, 对亚太 7 卫星号进行连续观测, 初步分析 Ku 波段 CEI 对 GEO 卫星的定轨特性。

1 CEI 测量与测量系统

由 2 个测站组成的 1 条基线可以得到 1 个方向的测角信息, 因此要组成完整的 CEI 测定轨系统, 至少需 3 个测量站形成 2 条不平行的基线。各个测量站包括接收天线、高频头 (low noise block, LNB); 数据采集和处理包括频率综合器和基带变换器、数据采集记录系统和数据处理中心。CEI 干涉测量系统如图 1 所示。

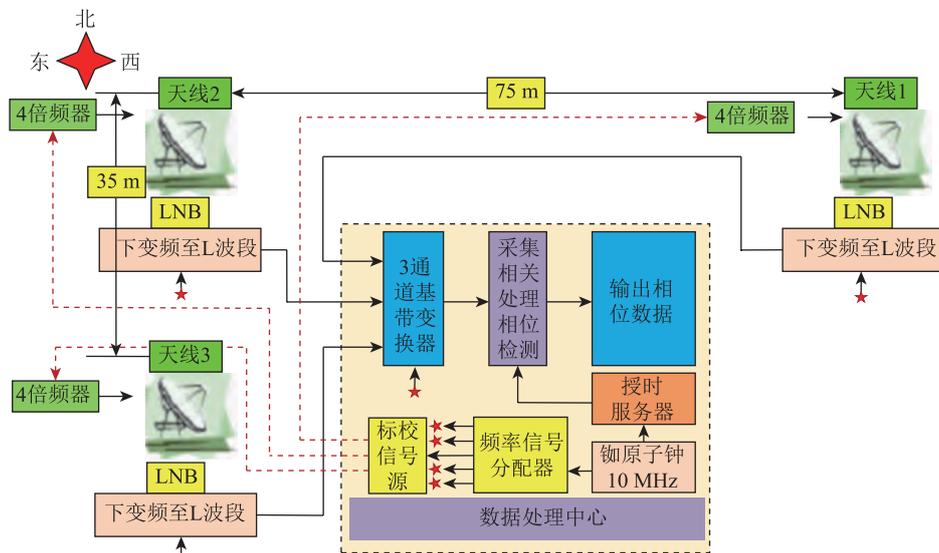


图 1 短基线 CEI 测量实验系统

1.1 CEI 测量模型

相位干涉测量的观测量是同 1 个无线电信号波前到达基线两端天线 (测站) 的相位差, 如需要, 可以根据观测频率将它换算为相位时延。观测数据互相关处理后到的只是相位差不足 1 个波长的小数部分。量测方程可以根据卫星发出的信号按

球面波传播方式来建立, 即

$$\phi + \lambda N = \rho_A - \rho_B = |\mathbf{R}_A(t_1) - \mathbf{r}(t_0)| - |\mathbf{R}_B(t_2) - \mathbf{r}(t_0)| + c\Delta t_{\text{clock}} + \Delta\rho_{\text{atm}} + \Delta\rho_{\text{ins}} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: ϕ 和 N 分别为相位差的观测量和整周期数; λ 为卫星下行波段的信号波长; ρ_A 和 ρ_B 为卫星到

测站 1、测站 2 的距离; t_0 为卫星发出信号的时刻; t_1 和 t_2 为信号达到基线两端天线的时刻; r 和 R_A 、 R_B 为卫星和测站 1、测站 2 的位置向量; c 为光速; Δt_{clock} 为 2 个测站钟差互差; $\Delta \rho_{\text{atm}}$ 为站间大气传播延迟的残余误差, 主要包括对流层和电离层的传播误差的影响; $\Delta \rho_{\text{ins}}$ 为测量系统延迟引起的距离误差; ε 为观测噪声。在定轨计算中, 确定整周模糊度 N 就需要一定精度的先验轨道信息, 文中采用两行轨道根数 (two line element, TLE) 作为先验轨道来确定模糊度 N 。

1.2 CEI 测量系统

CEI 相位干涉测量实验系统包括接收传输系统、采集处理系统和标校系统 3 部分。接收传输系统主要是接收天线、LNB 和传输电缆; 采集处理系统主要是信号采集、相关处理和轨道解算, 包括相应的软硬件等。标校系统包含信号发生器、频率信号分配器、倍频器和耦合器等。

1) 接收传输系统。室外天线设备包括 3 个 1.8 m 天线 (东西距离 75 m, 南北距离 35 m, 如图 2 所示)。低噪声放大器及下变频器 (具有一级变频能力)。天线均由 100 m 长的同轴电缆 (包含低噪声放大器电源电缆、本振上行电缆和中频下行电缆) 相连, 并连接至室内信号采集设备。



图 2 Ku 波段接收天线

2) 采集处理系统。硬件设备包括 LNB 电源、频标信号分配器、基带变换器、铷原子钟和服务器 (含数据采集卡和数据可视化及存储软件)。通过数据处理, 可以实现对 GEO 卫星的实时精密相位测量, 解算得到卫星的精密轨道。

3) 标校系统。标校系统采用接收天线同时接收 3 路由信号发生器发出与卫星信号在同一频段

的信号 (与观测频点差 2 MHz)。具体做法为: 采用信号发生器产生 C 波段标校信号送至 3 个天线, 在天线附近采用 4 倍频至 Ku 频点 (Ku 衰减过大, 直接传输成本过高); 与卫星信号经耦合器进入高频头, 经二次混频后, 至采集存储终端。硬件设备如图 3 所示。



图 3 室外接收变频设备

在数据处理的过程, 把接收卫星信号的相位变化与标校的信号相位相减后的值作为干涉相位的测量结果。

2 实验与结果分析

2.1 观测条件

1) 观测时段。时段 1 的 UTC 时间为 2018-06-13—2018-06-15, 时段 2 的 UTC 时间为 2019-01-07—2019-01-11。图 4、图 5 中对应两个时段横坐标的起点分别为 2018-06-13 UTC 00:00 和 2019-01-07 UTC 00:00。

2) 观测卫星为亚太 7 号卫星, 其定点位置的坐标为 76.5°E 。

3) 观测频点的频率为 12.442 GHz。

4) 信号发生器输出标校信号频率为 12.440 GHz。

5) 室外天线的布局见图 1。天线 1 与天线 2 组成东西基线, 长度为 75 m, 记为 1—2 基线; 天线 2 与天线 3 组成南北基线, 长度为 35 m, 记为 2—3 基线。

2.2 卫星信号和标校信号的变化

图 4 和图 5 分别给出了 2 个观测时段内 2 条基线卫星信号、标校信号和校正后卫星信号相位的变化。由图 4 和图 5 可以看出, 标校信号对当前测量系统是非常必要的, 尤其对于时段 1 的观测数据更是如此。从图 4 (a) 和图 4 (b) 根本无法看出卫星信号相位的变化规律, 只有标校后卫星信号相位

才呈现出明显的变化趋势 (如图 4 (c) 所示)。相比较图 5, 未标校的卫星信号相位的变化就有明显的规律性, 标校后的卫星信号相位变化抖动更小, 也说明时段 2 的观测数据质量要明显好于时段 1。其原因为: 观测时段 1 在夏季, 大气温度高导致湍流强度大, 另外 Ku 频段受对流层影响更显著, 虽然测站距离很近, 但信号空间传输路径中的对流层误差无法完全抵消; 而在冬季, 大气中的水汽含量低、温度低, 大气较夏季更稳定, 使得信号空间传输路

径中的对流层误差基本可以抵消, 使得冬季的观测数据明显变好。

由标校后的卫星信号相位的变化 (图 4 (c) 和图 5 (c)) 可以看出: 1 d 内观测数据质量也存在差异, 尤其时段 1 的相位数据更是如此。即白天数据的抖动明显高于晚间, 因为晚上的大气更稳定, 这对受对流层影响显著的 Ku 波段更加明显; 另外下行中频信号传输电缆的温度变化小, 这与 C 波段 CEI 测量结果具有一定类似性。

2.3 模糊度的固定

相位模糊度计算是 CEI 测量需要解决的关键问题, 所需先验轨道的精度与基线长度和观测波段直接相关。本文利用单历元固定模糊度, 根据式 (1) 可以利用 TLE 生成 GEO 卫星的星历, 以及测量天线的站址坐标, 可以计算出卫星到基线两端测站的理论距离差。因为基线距离短, 信号在空间路径上的传输的误差基本可以完全抵消, 因此不须对信号传输路径进行修正, 即

$$\{\Delta t_{\text{clock}} \approx 0 \quad \Delta \rho_{\text{atm}} \approx 0\} \quad (2)$$

模糊度 N 为

$$N = \text{int} \left[\frac{\rho_A - \rho_B}{\lambda} \right] \quad (3)$$

通过比较理论计算相位 ϕ_c 和观测相位 ϕ , 可以粗略计算系统的相位时延为

$$\Delta \rho_{\text{ins}} = \phi - \phi_c \quad (4)$$

2.4 定轨结果分析

2.4.1 定轨策略

利用批处理算法对 GEO 卫星进行精密定轨。考虑的摄动力包含非球形摄动、日月引力摄动和太阳辐射压力摄动; 地球引力场模型采用 GGM03C 模型; 地球定向参数来自国际地球自转服务组织 (International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS)。

选用 2018-06-13—2018-06-15 和 2019-01-07—2019-01-11 两个时段的观测数据进行轨道确定。时段 1 为夏季, 时段 2 为冬季, 可以分析季节不同对定轨精度的影响。

轨道精度采用内符合精度和外符合精度 2 种进行评价, 其中内符合精度评价采用重叠弧段检验的方法 (定轨弧长为 24 h, 重叠弧段 4 h); 外符合精度是利用国家授时中心提供的精密星历 (精度为米级) 做精度评定 (定轨弧长为 24 h)。

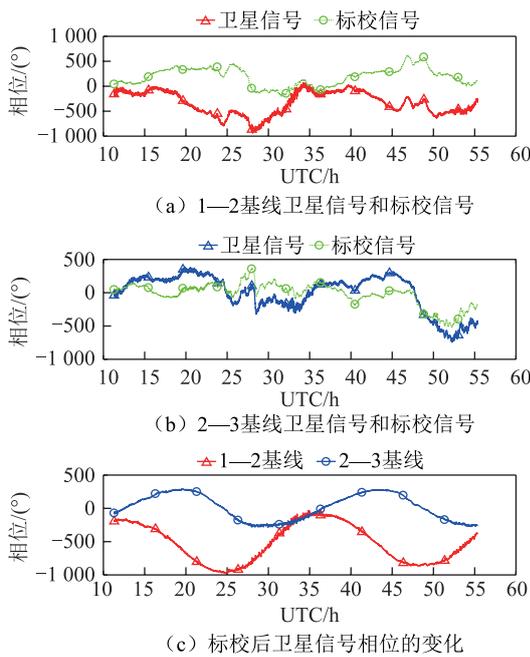


图 4 2018-06-13—2018-06-15 观测相位的变化

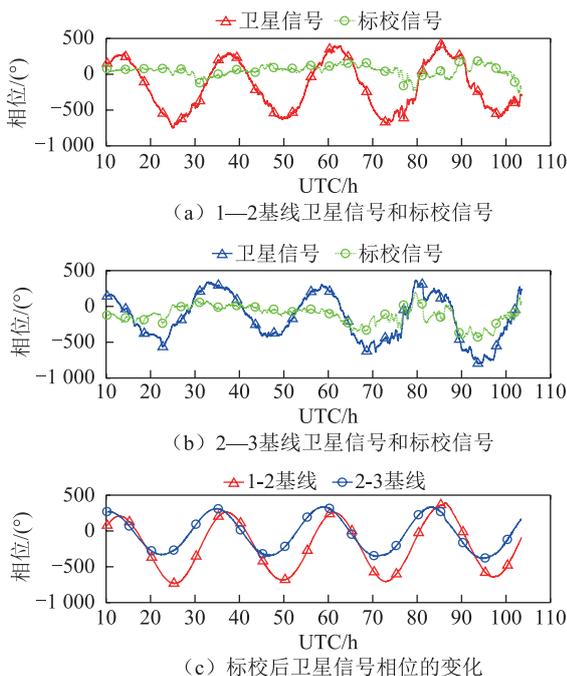


图 5 2019-01-07—2019-01-11 观测相位的变化

2.4.2 观测量残差

图6分别给出2个时段的2条基线的24h观测弧段定轨残差。时段1两条基线残差的均方根 (root mean square, RMS)分别为1.79和1.88 mm; 时段2两条基线残差的RMS分别为0.849和2.073 mm。即时段2的定轨残差明显低于时段1, 同时印证了冬季观测的数据质量要好于夏季。另外从图6还可以看出, 残差变化有明显趋势项, 也表明观测数据还存在一定的系统误差, 需要进一步标校系统差。

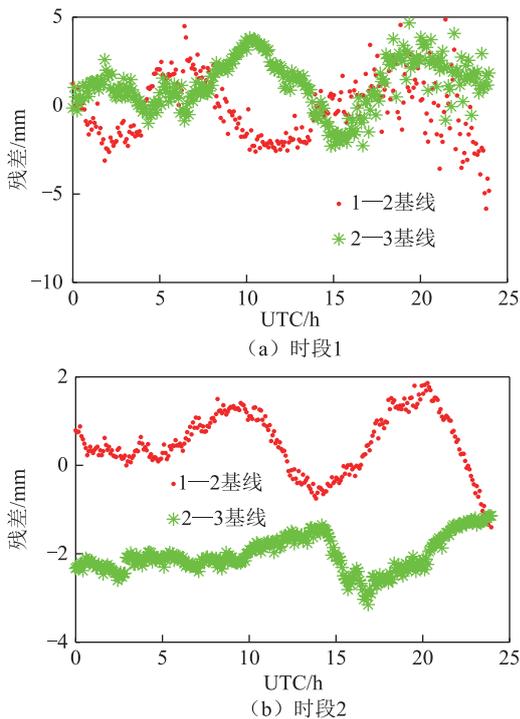
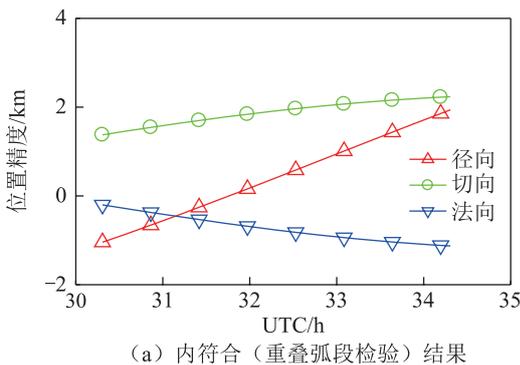


图6 两个时段两条基线的定轨残差

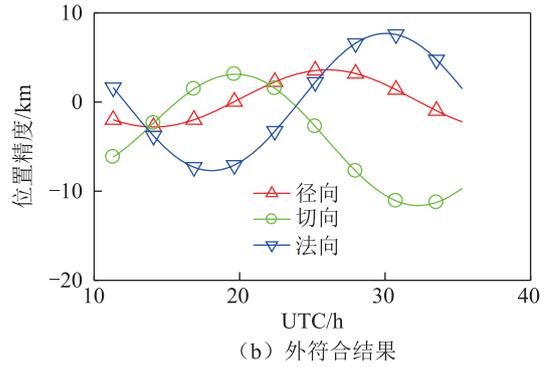
2.4.3 轨道精度

图7和图8分别给出了两个时段径向、切向和法向的内符合精度与外符合精度, 表1给出了两个观测时段定轨精度的RMS。

从图8可以看出两个时段的内符合精度差别

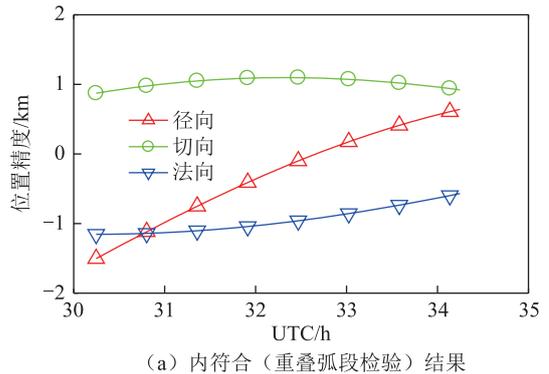


(a) 内符合 (重叠弧段检验) 结果

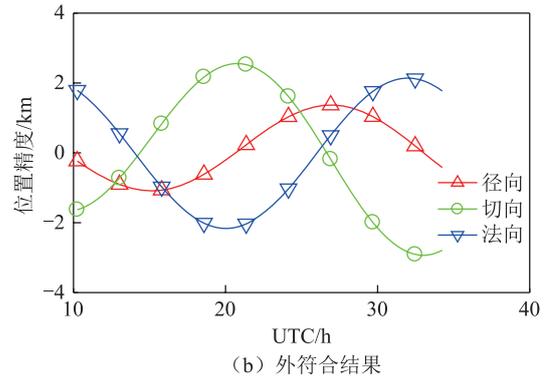


(b) 外符合结果

图7 时段1的定轨精度



(a) 内符合 (重叠弧段检验) 结果



(b) 外符合结果

图8 时段2的定轨精度

不大, 时段2的精度略好, 且变化趋势基本一致。因为两个观测时段观测数据对应的时刻基本相同, 重叠弧度也基本一致, 这就表明无论是夏季还是冬季, 观测数据质量在天与天之间的差别不大, 即周日变化较小。对比两个时段的外符合精度可以看出, 精度的变化规律基本一致, 时段2的外符合精度明显高于时段1。因为选择定轨的弧段基本相同, 这就再次表明Ku波段受大气的影响更加显著, 导致了冬季的观测数据质量要明显好于夏季。

另外由图7(b)和图8(b)还可以看出, 外符合精度变化趋势一致, 再次表明无论是夏季还是冬季, 观测数据都存在系统误差。如果能够精确标定系统差的周日变化规律, 系统的定轨精度还有进一步提升的空间。

表 1 2 个观测时段定轨精度的 RMS

观测时段	评价方式	不同方向的精度值/m			
		3 维位置	径向	切向	法向
2018-06-13—2018-06-15	内符合	2 269.07	968.19	1 897.03	782.66
	外符合	8 779.89	2 307.46	6 487.84	5 447.03
2019-01-07—2019-01-11	内符合	1 575.33	694.09	1 031.69	967.22
	外符合	2 549.76	870.15	1 850.77	1 522.76

3 结束语

本文利用 75 m×35 m 的 L 型 Ku 波段短基线干涉测量系统, 对亚太 7 号 GEO 电视卫星开展了轨道确定实验研究, 结果表明:

1) 标校信号对当前测量系统是非常必要的, 尤其对于夏季的观测数据更是如此。Ku 频段受对流层影响更显著, 冬季大气较夏季更稳定, 信号空间传输路径中的对流层误差基本可以抵消, 导致了冬季的观测数据明显好于夏季。1 d 内观测数据

质量也存在差异, 晚间数据质量好于白天的现象在夏季更加显著。

2) 夏季和冬季时段的内符合精度差别不大, 冬季的精度略好, 且变化趋势基本一致。冬季的外符合精度明显高于夏季。表明冬季的观测数据质量要明显好于夏季, Ku 波段受大气的影响更加显著。

3) 相同定轨弧段的外符合精度变化规律一致, 且存在明显的趋势项。表明无论是夏季还是冬季观测数据都存在系统误差。

参考文献

- [1] 杜兰, 李晓杰, 王若璞. 基于同波束 CEI 的 GEO 共位卫星相对轨道监视[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(3): 50-54.
- [2] KAWASE S. 无线电干涉测量与卫星跟踪[M]. 李智, 译. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [3] BREMER M. Atmospheric phase correction for connected-clement interferometry and for VLBI[C]//Astronomical Society of the Pacific. Proceedings of Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range of ASP Conference. San Francisco, California: Astronomical Society of the Pacific, Inc., 2002: 238-245.
- [4] 黄磊, 李海涛, 郝万宏. 频率源特性对 CEI 精度影响分析[J]. 飞行器测控学报, 2014, 33(5): 371-376.
- [5] 杨飞. 单频光纤激光器及光纤时频传递技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
- [6] 白钰. 光纤时频网络化精密同步及航天测量应用[D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [7] 胡凯, 洪家财, 路伟涛, 等. 连线干涉测量扩频测控信号解模糊算法[J]. 遥测遥控, 2014, 35(1): 56-59.
- [8] 陈明, 刘庆会, 唐歌实, 等. 连线干涉系统测量共位双星宽带信号处理与分析[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2011, 32: 168-178.
- [9] 任天鹏, 唐歌实, 刘景勇, 等. 基于 CEI 的高精度相位干涉测量试验[J]. 遥测遥控, 2015, 36(6): 8-12.
- [10] MORRISON D, POGORELC S, CELANO T, et al. Ephemeris determination using a connected element interferometer[J]. Journal of Hepatology, 2002, 60(6): 528.
- [11] KAWASE S, SAWADA F. Interferometric tracking for close geosynchronous satellites[J]. Journal of Astronautical Science, 1999, 47(1): 29.
- [12] 路伟涛, 杨文革, 洪家财. 连线干涉测量体制误差因素分析[J]. 航天控制, 2014, 32(5): 71-76.
- [13] 任天鹏, 曹建峰, 唐歌实, 等. 基于单基线干涉测量的 GEO 卫星轨道测定与验证[J]. 遥测遥控, 2016, 37(4): 20-25.
- [14] 李晓杰, 黄金, 潘玲. 改进单组 CEI 基线对卫星定轨精度的影响研究[J]. 海洋测绘, 2012, 32(3), 50-54.
- [15] LIU Z, SHI C, DU L, et al. Experiment research on GEO satellite orbit measurement by using CEI[C]//China Satellite Navigation System Management Office. Proceedings of China Satellite Navigation Conference (CSNC). Shanghai, China: China Satellite Navigation System Management Office, 2017: 238-245.
- [16] LIU Z, DU L, ZHU Y, et al. Investigation on GEO satellite orbit determination based on CEI measurements of short baselines[J]. The Journal of Navigation, 2019, 72(6): 1585-1601.

引文格式: 吉长东, 朱锦帅, 黎虎, 等. BDS 卫星钟差短期预报的 LSTM 算法[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 44-52. (JI Changdong, ZHU Jinshuai, LI Hu, et al. LSTM algorithm for short-term prediction of BDS satellite clock bias[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 44-52.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210108.

BDS 卫星钟差短期预报的 LSTM 算法

吉长东¹, 朱锦帅^{1,2}, 黎虎², 张萌¹, 吕广涵¹

(1. 辽宁工程技术大学 测绘与地理科学学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 张家界市测绘院, 湖南 张家界 427000)

摘要: 针对北斗卫星导航系统 (BDS) 超快速钟差产品预报部分性能不够好的问题, 提出 1 种将修正 1 次差与长短时记忆 (LSTM) 模型相组合的钟差预报模型: 对钟差数据相邻历元求 1 次差后的序列进行基于改进中位数的异常值探测; 并将预处理后的 1 次差序列数据用 LSTM 模型进行训练、预测; 然后将预测的 1 次差值叠加还原为预报钟差; 最后对国际全球卫星导航系统监测评估系统 (iGMAS) 发布的 BDS 产品中超快速钟差产品观测部分数据进行实验。结果表明: 钟差数据经过修正 1 次差的预处理后, LSTM 模型预报精度明显提高; LSTM 模型 24 h 预报精度较超快速产品预报部分钟差和小波神经网络模型分别提高了 74% 和 44%。

关键词: 北斗卫星导航系统; 超快速卫星钟差预报; 长短时记忆模型; 数据预处理

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999 (2021) 01-0044-09

LSTM algorithm for short-term prediction of BDS satellite clock bias

JI Changdong¹, ZHU Jinshuai^{1,2}, LI Hu², ZHANG Meng¹, LYU Guanghan¹

(1. School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000, China;

2. Zhangjiajie City Institute of Surveying and Mapping, Zhangjiajie, Hunan 427000, China)

Abstract: Aiming at the problem of the underperformance for China international GNSS (Global Navigation Satellite System) Monitoring and Assessment System (iGMAS) Ultra-rapid Predicted (ISU-P) Satellite Clock Bias (SCB) products, the paper proposed a SCB prediction model combining the modified single difference with the Long-Short Time Memory (LSTM) model: the outlier detection based on the improved Median Absolute Deviation (MAD) was carried out for the sequence of SCB after single difference between adjacent calendars; and the data of the single difference sequence after preprocessing were trained and predicted by LSTM model; then the predicted single difference was superimposed to restore the forecast SCB; finally the data of iGMAS Ultra-rapid Observed (ISU-O) SCB of BeiDou navigation satellite System (BDS) products were test. Results showed that: the prediction accuracy of LSTM model would be improved obviously by the proposed method; moreover, compared with SCB of ISU-P products and wavelet neural network (WNN) model, the 24 h prediction accuracy of LSTM model after the preprocessing could be improved by 74% and 44%.

Keywords: BeiDou navigation satellite system; ultra-rapid satellite clock bias prediction; long short-term memory; data preprocessing

0 引言

在多导航系统并存的环境下, 实时卫星钟差产

品的精度直接影响到全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的服务能力^[1-2]。

我国北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite

收稿日期: 2020-05-26

第一作者简介: 吉长东 (1970—), 男, 辽宁锦州人, 博士, 教授, 研究方向为卫星导航与定位数据处理。

通信作者简介: 朱锦帅 (1993—), 男, 河南登封人, 硕士研究生, 研究方向为卫星导航与定位数据处理。

system, BDS) 搭载的原子钟均为自主研发, 其精度和稳定性与美国全球定位系统 (global positioning system, GPS) 和欧盟伽利略卫星导航系统 (Galileo navigation satellite system, Galileo) 的卫星钟不同, 因此, BDS 钟差产品的精度和稳定性应受到更多的关注^[3]。

超快速钟差产品作为国际 GNSS 服务组织 (International GNSS Service, IGS) 的核心产品之一, 是实现分米级实时定位服务的重要一环。文献[4-5]通过二次多项式加 1 个周期项拟合, 预报 IGS 超快速产品中的 GPS 钟差, 但其精度与广播星历相比并没有显著改善。文献[6]把小波神经网络 (wavelet neural network, WNN) 模型应用到钟差短期预报中, 将小波分析与神经网络结合, 预报精度优于二项式模型和灰色模型。文献[7]以 WNN 模型为基础, 对数据预处理方法进行改进后, 以 IGS 发布的 GPS 超快速钟差进行实验并得到优于超快速钟差预报部分数据的结果。文献[8]使用径向基函数 (radial basis function, RBF) 神经网络, 对 GPS 钟差进行超短期 5 min 和 1 h 以及短期 1 d 预报, 均可取得高精度预报结果。文献[9]提出的循环神经网络 (recurrent neural network, RNN) 是 1 种具有记忆功能的深度学习模型。文献[10]通过修改隐藏层的结构, 建立 1 种基于 RNN 的长短时记忆 (long short-term memory, LSTM) 模型, 进而削弱了 RNN 在长序列训练过程中的梯度消失和梯度爆炸问题。

目前, 只有德国地学研究中心 (Deutsches Geo Forschungs Zentrum, GFZ) 和我国的全球连续监测评估系统 (international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS) 提供开放式 BDS 钟差产品, 且现有的钟差预报算法主要集中于稳定的 GPS 钟差数据以及 IGS 发布的钟差产品, 对于 BDS 以及 iGMAS 发布的钟差产品缺少研究。为此, 针对 BDS 超快速钟差, 提出 1 种将修正 1 次差的钟差预处理方法和 LSTM 模型相组合的钟差短期预报方法。

1 钟差数据预处理及 LSTM 预报原理

iGMAS 综合钟差产品的时标采用北斗时 (BDS time, BDT), 用户将 iGMAS 的 BDT 产品转换到 GPS 时 (GPS time, GPST) 时, 不考虑微小量可以时^[11], 其计算方法为

$$t_{\text{GPST}} \approx t_{\text{BDT}} + 14 \quad (1)$$

式中: 涉及物理量的单位均为 s; t_{GPST} 为 t 时刻 GPS 钟差值; t_{BDT} 为 t 时刻 BDS 钟差值。iGMAS 提供的钟差产品具体数据如表 1 所示, 钟差产品精度用均方根值 (root mean square, RMS) 表示。

表 1 iGMAS 钟差产品介绍^[11]

文件类型	精度 (RMS)/ns	延迟 时间	发布 周期	采样 间隔
超快速 (预报部分)	大约 10	实时	每 6 h 发布 1 次	15 min
超快速 (观测部分)	大约 1	3 h	每 6 h 发布 1 次	15 min
快速	大约 0.6	17 h	每 1 d 发布 1 次	5 min
最终	大约 0.5	12 d	每 7 d 发布 1 次	5 min

1.1 钟差 1 次差预报方法原理

为了获得高精确度的时间信息值, 原始卫星钟差相位数据具有更多的有效位数。文献[6]提出了对钟差相位数据相邻历元间求 1 次差的方法, 这不仅可以降低原始钟差数据序列中趋势项的影响, 进而得到 1 组有效数字位数减少且数值较大的 1 组数据序列。设 $L = \{l_i, i = 1, 2, \dots, n\}$ (l_i 为 i 时刻钟差值) 为任意 1 组钟差序列, 对序列中 2 个相邻历元的钟差做差, 可以得到钟差的 1 次差分序列 $\Delta L = \{\Delta l_i, i = 2, 3, \dots, n\}$, 其中 $\Delta l_i = l_i - l_{i-1}$ 。利用 1 次差分后的序列 ΔL 进行学习、建模并预报第 n 个历元以后 m ($m > 0$) 个历元的钟差的 1 次差分序列 $\Delta L_m = \{\Delta l_j, j = n + 1, n + 2, \dots, n + m\}$, 最后根据预报的 1 次差分序列求累加和与第 n 个历元的钟差值 l_n 相加, 即可得第 k 个历元的钟差相位值^[6]为

$$l_k = l_n + \sum_{n+1}^k \Delta l_k \quad (2)$$

式中: Δl_k 为预报的第 k 个历元的 1 次差值, $k = n + 1, n + 2, \dots, n + m$ 。

1.2 基于钟差 1 次差分序列的粗差处理

针对钟差相位数据相邻历元间求 1 次差后的数据序列, 文献[12]设计了 1 种修正 1 次差法数据预处理方法, 以改进中位数为基础的抗差估计探测粗差方法: 将每个钟差 1 次差分数据 Δl_i 与 1 次差分序列的中数及绝对中位数 (median absolute deviation, MAD) 数倍之和进行比较, MAD 可表示为

$$\text{MAD} = \text{Median} \left\{ \frac{|\Delta l_i - k_\Delta|}{0.6745} \right\} \quad (3)$$

式中: k_Δ 为 1 次差分序列的中间数; Median 为对序列取中位数, 即 $k_\Delta = \text{Median}\{\Delta L\}$ 。若钟差 1 次差分值满足式 (4), 则将其判定为异常值并剔除该值, 然后

通过内插或者置零的方法补充该点数据^[13], 即

$$\begin{cases} \Delta l_i > (k_{\Delta} + a \cdot \text{MAD}) \\ \Delta l_i > (k_{\Delta} - a \cdot \text{MAD}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 为根据实际情况需要确定的 1 个正整数。

本文遵循探测出的异常值个数不超过建模数据的 5% 的原则, 将 a 设置为 3, 这样既在一定程度上降低异常值对模型预报性能的影响, 又避免了有效信息的剔除。对于剔除数据历元, 这里使用线性插值的方法补全历元。

1.3 循环神经网络原理

循环神经网络是 1 种可以有效提取、利用和处理时间序列的高位非线性动力学模型^[14]。在循环神经网络中, 神经元不但可以接受其他神经元的的信息, 也可以接受自身的的信息, 将神经元最近 1 次 (或几次) 的结果导入自己接下来的运算中, 形成具有环路的网络结构。设 $\mathbf{x}=(x_1, x_2, x_t)$ 为模型输入, $\mathbf{y}=(y_1, y_2, y_t)$ 为模型输出, 在 1 个完全连接的 RNN 模型中, 在时刻 t 时, 令 \mathbf{x}_t 表示网络的输入, \mathbf{y}_t 表示网络输出, 网络模型如图 1 所示。

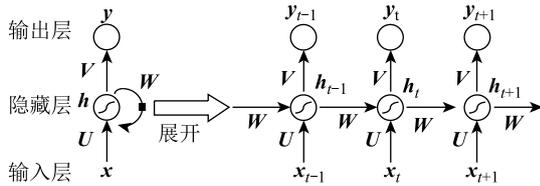


图 1 RNN 模型及其展开示意图

图 1 中: \mathbf{h} 为隐藏层状态 (即隐藏层神经元的活性值, 也称之为状态或隐状态), \mathbf{h}_{t-1} 、 \mathbf{h}_t 为 $t-1$ 、 t 时刻活性值; \mathbf{U} 、 \mathbf{W} 和 \mathbf{V} 均为网络参数, \mathbf{U} 为状态—状态的权重矩阵, \mathbf{W} 为状态—输入的权重矩阵, \mathbf{V} 为状态—输出的权重矩阵。则 RNN 模型在时刻 t 的参数更新公式为:

$$\mathbf{z}_t = \mathbf{U}\mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{W}\mathbf{x}_t + \mathbf{b} \quad (5)$$

$$\mathbf{h}_t = f(\mathbf{z}_t) \quad (6)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{V}\mathbf{h}_t \quad (7)$$

式中: \mathbf{z}_t 为 t 时刻隐藏层的净输入; \mathbf{b} 表示偏置向量; $f(\mathbf{z}_t)$ 表示非线性的激活函数。从图 1 和式 (5)、式 (6) 可以看出, t 时刻隐藏层的状态 \mathbf{h}_t 不仅有与时刻 t 的输入 \mathbf{x}_t 相关, 也和上一时刻隐藏层的状态 \mathbf{h}_{t-1} 有关。

1.4 LSTM 原理

在 RNN 实际应用中, 隐藏层存储的时间是有限的, 同时梯度消失的问题也是长程时间序列预测中存在的主要问题。基于此, 文献[15]以 LSTM

模型为基础, 在网络中引入 1 个新的内部状态 \mathbf{c}_t 和门控机制, 专门进行线性的循环信息传递, 同时 (非线性的) 输出信息给隐藏层的外部状态 \mathbf{h}_t 。在 t 时刻, 内部状态 \mathbf{c}_t 的公式计算为:

$$\tilde{\mathbf{c}}_t = f_{\text{tanh}}(\mathbf{W}_c \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_c \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{b}_c) \quad (8)$$

$$\mathbf{c}_t = \mathbf{f}_t \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{i}_t \tilde{\mathbf{c}}_t \quad (9)$$

$$\mathbf{h}_t = \mathbf{o}_t f_{\text{tanh}}(\mathbf{c}_t) \quad (10)$$

式中: $\tilde{\mathbf{c}}_t$ 为通过非线性函数 f_{tanh} 得到的候选状态; f_{tanh} 为 tanh 型非线性函数; \mathbf{i}_t 为 t 时刻输入门限, 输入门限控制当前时刻的候选状态 $\tilde{\mathbf{c}}_t$ 有多少信息需要保存; \mathbf{f}_t 为 t 时刻遗忘门限, 遗忘门限控制上 1 个时刻的内部状态 \mathbf{c}_{t-1} 需要遗忘多少信息; \mathbf{o}_t 为 t 时刻输出门限, 输出门限控制时刻的内部状态 \mathbf{c}_t 有多少信息需要输出给外部状态 \mathbf{h}_t 。3 个门限的计算方法为:

$$\mathbf{i}_t = f_{\text{sig}}(\mathbf{W}_i \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_i \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{V}_i \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_i) \quad (11)$$

$$\mathbf{f}_t = f_{\text{sig}}(\mathbf{W}_f \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_f \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{V}_f \mathbf{c}_{t-1} + \mathbf{b}_f) \quad (12)$$

$$\mathbf{o}_t = f_{\text{sig}}(\mathbf{W}_o \mathbf{x}_t + \mathbf{U}_o \mathbf{h}_{t-1} + \mathbf{V}_o \mathbf{c}_t + \mathbf{b}_o) \quad (13)$$

式中 f_{sig} 为 sigmoid 型激活函数。

2 钟差预报的 LSTM 模型构造

利用 LSTM 模型建立钟差预报模型的方式包括钟差数据的训练和预报两部分。在训练阶段, 将钟差序列作为神经网络的训练数据, 输入的训练数据既作为网络的输入也作为网络的期望输出, 通过 LSTM 神经元的训练, 使其掌握数据前后间的映射关系; 在预报阶段, 将当前时刻的钟差数据作为网络的输入, 通过已建立的网络之间前后映射及拓扑关系, 依次进行外推得到预报结果。

根据训练输入的钟差序列有限个样本点的数据特征, 参考 LSTM 预报模型的从简设计原则, 构建基于 LSTM 的深度循环神经网络。对于钟差序列预报的整体框架如图 2 所示。

LSTM 模型预报部分由输入层、隐藏层、输出层、网络训练和参数优化 5 个部分组成。输入层负责对输入的钟差时间序列进行处理, 使得输入的钟差时间序列满足 LSTM 神经元的输入要求; 隐藏层使用基于 LSTM 神经元的深度循环神经网络; 网络训练部分使用自适应优化算法中的亚当 (Adam) 算法结合 LSTM 神经元对输入数据进行训练; 使用网格搜索和交叉验证算法进行超参数的优化; 输出层负责预报结果的输出。

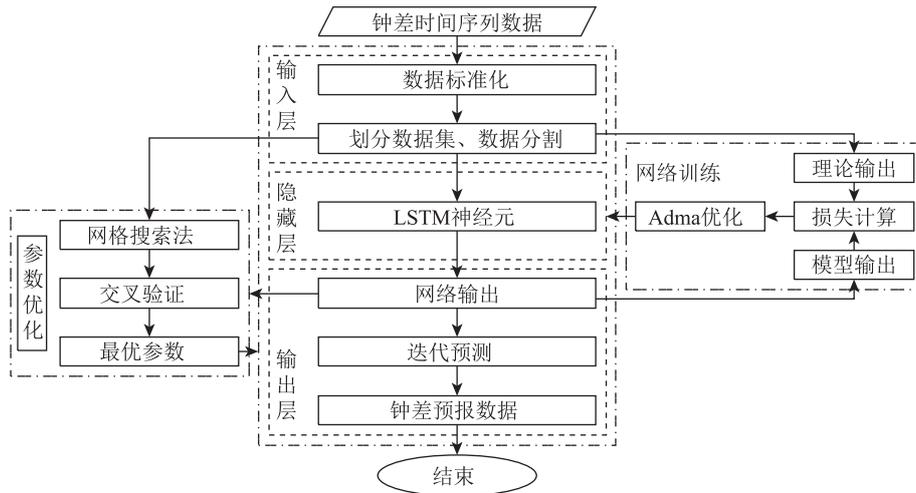


图 2 LSTM 预报模型流程

以预处理后钟差时间序列 $\mathbf{L}_0 = \{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ 为例, 将其导入网络进行训练、预报计算的具体流程如下:

1) 数据标准化。将预处理后的钟差时间序列 $\mathbf{L}_0 = \{l_1, l_2, \dots, l_r\}$ 分为训练集 $\mathbf{L}_r = \{l_1, l_2, \dots, l_s\}$ 和测试集 $\mathbf{L}_e = \{l_{s+1}, l_{s+2}, \dots, l_r\}$, 其中 $1 < s < r$ 。之后, 对训练集中的每个数据 $l_u (1 \leq u \leq s)$ 通过式(14)进行 Z-score 标准化, 得到标注化数据集 $\mathbf{L}'_r = \{l'_1, l'_2, \dots, l'_s\}$, 即

$$l'_u = \frac{l_u - \mu}{\sigma} \quad (14)$$

式中: μ 为序列 \mathbf{L}_r 的均值; σ 为序列 \mathbf{L}_r 的标准差。

2) 数据分割。根据数据分割长度 L , 将标准化后的训练数据集 \mathbf{L}'_r 分割为长度为 L 的 $(s-L+1)$ 个数列, 使训练集输入变为 $\mathbf{X} = \{\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_{s-L+1}\}$, 其中 $\mathbf{X}_p = \{l'_{p+1}, l'_{p+2}, \dots, l'_{p+L}\}$; 则此刻对应的理论输出 $\mathbf{Y} = \{\mathbf{Y}_1, \mathbf{Y}_2, \dots, \mathbf{Y}_{s-L+1}\}$, 其中 $\mathbf{Y}_p = \{l'_{p+1}, l'_{p+2}, \dots, l'_{p+L}\}$, $1 \leq p \leq s-L+1$ 。

3) 数据训练。当模型的输入为 \mathbf{X} 时, 令其经隐藏层计算后的输出为 $\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \dots, \mathbf{P}_{s-L+1}\}$, 则 $\mathbf{P}_p = f_{\text{LSTM-forward}}(\mathbf{X}_p, \mathbf{c}_{p-1}, \mathbf{h}_{p-1})$, \mathbf{X}_p 表示当前时刻的输入, \mathbf{c}_{p-1} 表示前一历元 LSTM 神经元的状态值, \mathbf{h}_{p-1} 表示前一历元 LSTM 神经元的输出值, $f_{\text{LSTM-forward}}$ 表示 LSTM 神经元的更新公式。网络训练过程中以求得损失函数结果更小为模型优化目标, 在这个过程中使用小批量梯度下降法 (mini-batch gradient descent, M-BGD), 每次选择批尺寸大小为 B 个输入值作为 1 批输入网络进行训练, 通过 Adam 优化器使得网络不断更新各个参数的权重, 最后得到 1 个对输入序列 \mathbf{X} 拟合效果最好的 LSTM 模型, 记作 $f_{\text{LSTM-net}}$ 。

4) 超参数优选。将网格搜索和交叉验证方法结合, 对数据分割长度 L 和批尺寸大小 B 进行优选。

5) 数据预测。预测是采用逐个历元数据迭代的方法, 利用训练好的 $f_{\text{LSTM-net}}$ 模型, 将训练集的最后一组数据 $\mathbf{X}_{s-L+1} = \{l'_{s-L+2}, l'_{s-L+3}, \dots, l'_s\}$ 输入 $f_{\text{LSTM-net}}$ 中, 得到的输出结果为 $\mathbf{P}_{s-L+1} = f_{\text{LSTM-net}}(\mathbf{Y}_{s-L+1}) = \{p_{s-L+2}, p_{s-L+3}, \dots, p_{s+1}\}$ 。将 $s+1$ 时刻的预测值 p_{s+1} 与 \mathbf{Y}_L 合并为 1 组新的数据 $\mathbf{Y}_{L+1} = \{l'_{s-L+2}, l'_{s-L+3}, \dots, p_{s+1}\}$; 将 \mathbf{Y}_{L+1} 带入 $f_{\text{LSTM-net}}$ 中, 可以得到 $s+2$ 时刻的预测值 p_{s+2} ; 按照这个方法依次计算, 得到预测序列 $\mathbf{P}_0 = \{p_{s+1}, p_{s+2}, \dots, p_r\}$ 。将预测序列 \mathbf{P}_0 进行 Z-score 反标准化还原, 就可以得到预报结果。

3 实验与结果分析

实验数据选取 iGMAS 超快速 (iGMAS ultra-rapid, ISU) 钟差文件, 其中包括超快速观测部分 (ISU observed, ISU-O) 和超快速预报部分 (ISU predicted, ISU-P), 数据文件格式为 isu*****_00.clk, *****为 BDT, 前 4 位是 BDT 星期, 第 5 位是星期内天)。考虑 BDS 包含地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO)、倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbits, IGSO) 及中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 三种不同轨道的卫星, 不同轨道所处空间环境不同, 因此在每个轨道随机选取某一刻卫星进行实验, 本文选取的是 C04、C07 和 C12 三颗卫星进行实验。最后, 以实测部分 ISU-O 为训练数据和期望输出, 采用均方根误差 (root mean squared error, RMSE) 和极差 (Range) 2 个性能指标来评估预报结果的精度与稳定性^[9]。RMSE 和 R 的具体定义为:

$$\varepsilon_i = l_i - \hat{l}_i \quad (15)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad (16)$$

$$R = |\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}| \quad (17)$$

式中： R 为极差； ε_i 为 i 时刻期望输出 l_i 与预报值 \hat{l}_i 的残差； ε_{\max} 和 ε_{\min} 分别代表差值序列中的最大值与最小值。

3.1 超参数优选实验分析

结合网格搜索和交叉验证的方法，对 LSTM 神经网络中使用的超参数窗口分割长度 L 和批尺寸大小 B 两种超参数进行优化。根据数据类型设计超参数的取值范围，其中窗口分割长度分别取 0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、6.0 及 12 h 内的数据个数，即 $L \in \{2, 4, 6, \dots, 24, 48\}$ ，批尺寸大小 $B \in \{2, 4, \dots, 48\}$ ，以训练集中训练数据的误差函数最小为目标进行训练，运用多层网格搜索对超参数 L 、 B 进行优选。

以 C12 卫星的 ISU 钟差预报为例，选取 2019-01-14 的 15 min 采样率共 96 个历元的 ISU-O 数据进行训练，预报 96 个历元数据。以 2019-01-15 的

ISU-O 数据为真值，计算 RMSE 值，遍历本文所选的 L 、 B 两个超参数的取值范围，绘制超参数优选图如图 3 所示。

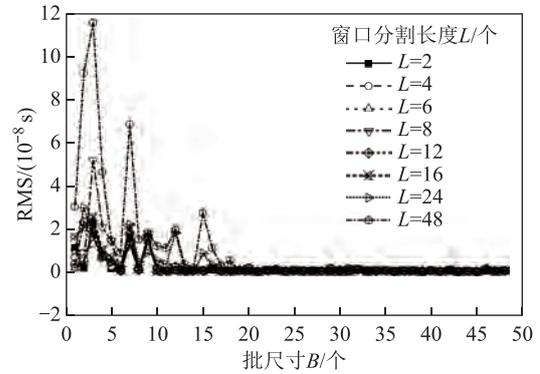


图 3 参数优选

从图 3 中可以看出，当批尺寸大小 B 的取值在 20 以内时，LSTM 网络的预报结果不甚理想，且容易陷入局部最优解， B 的取值大于 20 时，不同的窗口分割长度预报结果的 RMSE 值变化在 $0 \sim 1.2 \times 10^{-8}$ 的范围内。表 2 给出了 C04、C07 和 C12 三颗卫星使用上述预报方案时，前 5 组最优参数组合以及预测精度。综合来看，当 $L=4$ 、 $B=30$ 时，预报精度更为理想。

表 2 C04、C07、C12 卫星 LSTM 模型前 5 组最优参数组合及预测精度

排名	C04 卫星的计算结果			C07 卫星的计算结果			C12 卫星的计算结果		
	L /个	B /个	RMSE/ns	L /个	B /个	RMSE/ns	L /个	B /个	RMSE/ns
1	4	28	7.22	6	30	4.30	4	26	4.30
2	6	26	8.02	4	27	4.99	2	30	4.38
3	6	29	8.26	8	31	4.95	4	27	4.58
4	8	25	8.44	4	28	6.09	6	29	6.51
5	4	22	9.08	4	28	9.77	4	28	7.31

3.2 不同数据预处理方法的 LSTM 预报实验

不同数据预处理方法对神经网络的预报精度有着重要影响，使用文中提到的 2 种 1 次差数据预处理方法与未使用 1 次差处理的数据进行 LSTM 模型预报精度分析。为了便于区分，将未使用 1 次差处理钟差数据的 LSTM 预报方案命名为 LSTM_1，使用钟差 1 次差法处理的预报方案命名为 LSTM_2，经过改进 MAD 法粗差处理后的 1 次差数据预报方案命名为 LSTM_3。为了对比这 3 种方案的预报性能，以日期 2019-01-09 的 ISU-O 数据进行预处理，然后训练预报第 2 天(2019-01-10)的钟差，以第 2 天的 ISU-O 数据为真值与预报结果作对比，其部分预报结果的相位数据及 1 d 的预

报残差如图 4 所示。

将图 4 中实验结果与对应的真值进行对比后可以看出，LSTM_2 方案的预报残差变化范围最大，其前 5 个历元的预报结果最好，经过 1 次差处理后，钟差数据中的粗差被放大，导入网络训练的输入数据中粗差对网络训练的影响增大，干扰了模型的训练、拟合过程，造成网络出现过拟合现象，使网络结构极不稳定，因此当预报数据长度超过 20 个历元后，其预报残差将持续增大(包括向正无穷与负无穷)。对比 LSTM_1 和 LSTM_3 这 2 种实验方案：前 5 个历元，2 种方法的残差大小和变化趋势有明显差距，在前 20 个历元内，2 种方法的预报残差趋于稳定，变化趋势相近；但是 LSTM_3

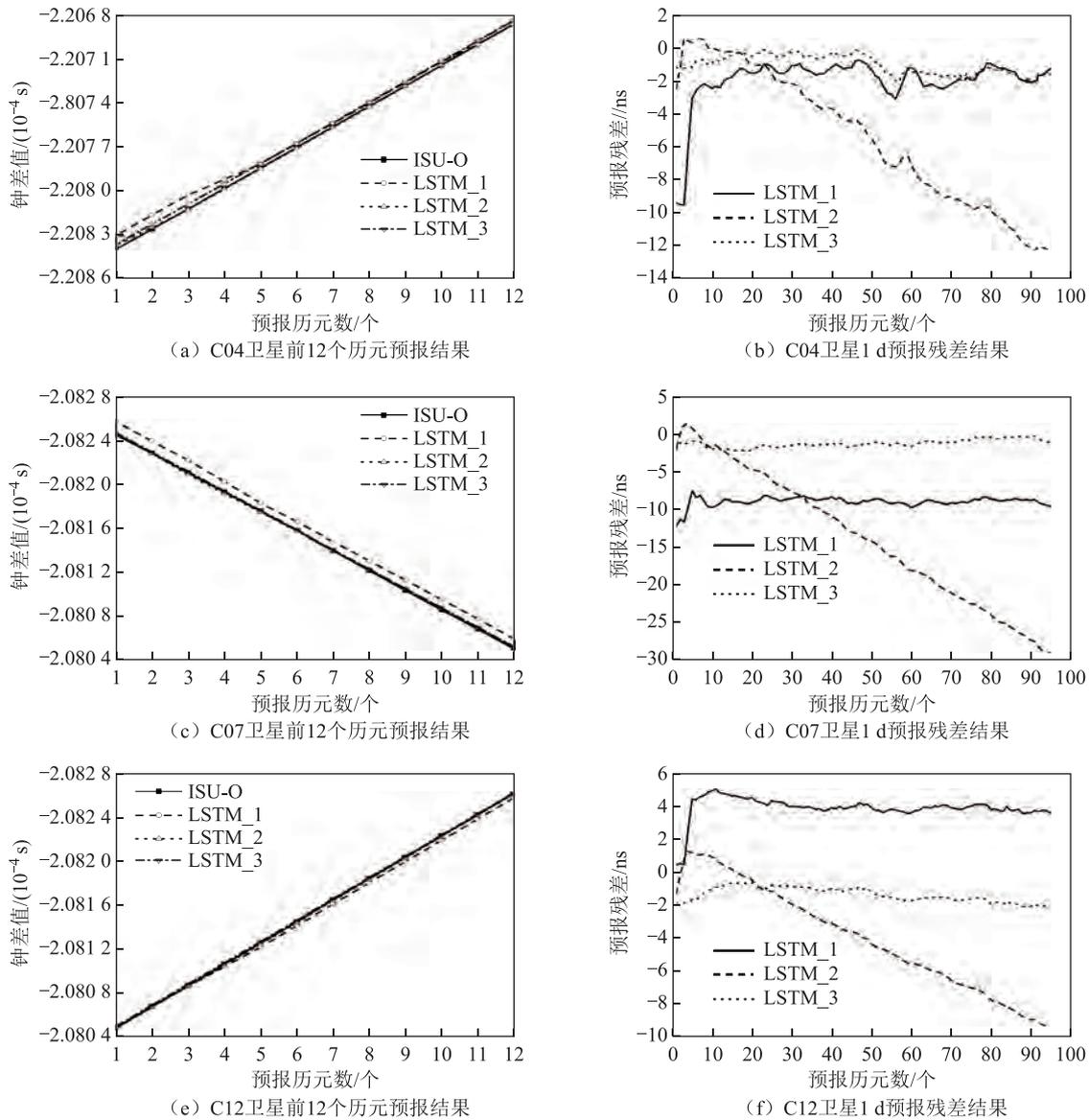


图 4 不同预处理方法后预报结果与残差图

的残差波动幅度明显较 LSTM₁ 的残差浮动小。

为进一步对比 3 种预处理方法对预报结果精度的影响, 将预报结果与 ISU-O 真值进行 RMSE 和 R 值统计, 如表 3 所示。

从表 3 可以看出: LSTM₂ 由于原始数据中粗差被放大造成网络训练过程中不稳定, 其 R 值

从 6 ns 到 30 ns, 而 RMSE 值高达 16 ns, 预报结果的精度和稳定度较差; 对比 LSTM₁ 和 LSTM₃, 这 2 个模型的 RMSE 和 R 值均在纳秒级, 其中以 LSTM₃ 方案的结果最好, 其 RMSE 和 R 值都能保持在 2 ns 以内。通过对 1 次差序列进行改进 MAD 法粗差探测、剔除与补齐, 不仅

表 3 不同数据预处理方法预报精度统计表

单位: ns

卫星号	LSTM ₁ 的精度指标		LSTM ₂ 的精度指标		LSTM ₃ 的精度指标	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
C04	2.50	8.74	6.82	12.99	1.18	1.97
C07	4.67	8.92	30.48	16.35	2.05	1.29
C12	4.61	3.99	10.83	4.10	1.50	1.42
平均值	3.93	7.22	16.04	11.15	1.58	1.56

削弱了钟差相位数据中趋势项和粗差数据对网络训练的影响,还能减少输入数据有效数位长度,使输入的数据更能表征数据的变化特点,减少网络的冗余。

3.3 ISU 钟差预报精度分析

为了进一步验证 LSTM 在 BDS 的 ISU 钟差产品中的预报性能,选用日期 2019-01-09 的 ISU-O 数据作为 LSTM 和 WNN 模型的训练数据,以 ISU

钟差产品中的预报部分和 WNN 预报结果作为对照。选择 3.2 实验中 LSTM_3 使用的数据预处理方法对实验数据进行预处理,然后将预处理后的数据,分别通过 WNN 和 LSTM 两种神经网络模型进行训练并预报第 2 天(2019-01-10)的钟差,以第 2 天的 ISU-O 数据为真值,对比 ISU-P 数据以及 WNN 和 LSTM 预测结果,其部分预报结果的相位数据及 1 d 的预报残差如图 5 所示。

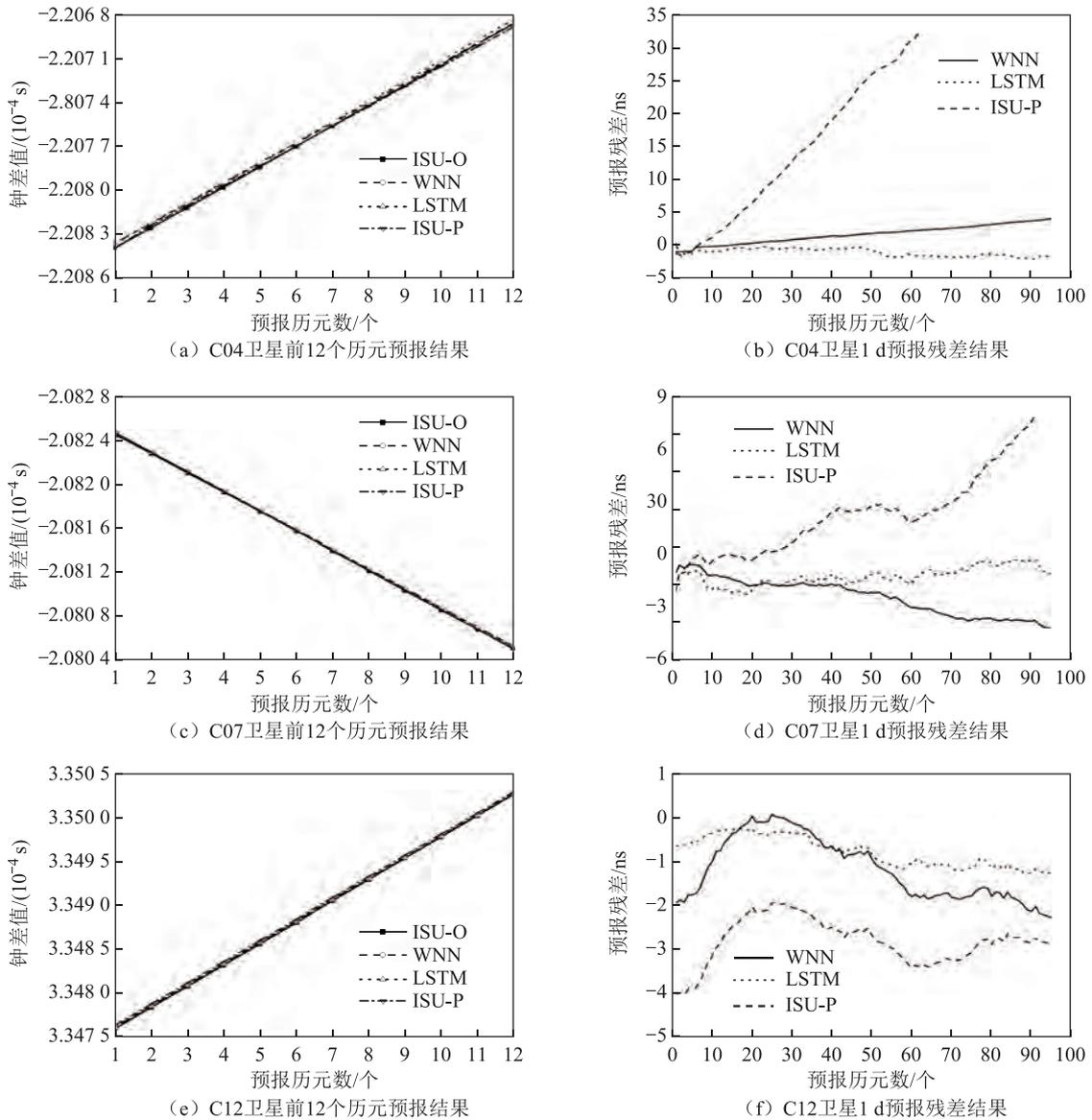


图5 ISU-O 短期预报结果与残差

从图 5 每颗卫星前 12 个历元的预报钟差值可以发现: LSTM、WNN 和 ISU-P 的结果与 ISU-O 的数据趋势基本相同,结合预报残差图分析,ISU-P 数据的残差偏离程度最大,尤其是 C04 卫星,其 ISU-P 数据的残差呈递增趋势,其预报误差达到了 30 ns 以上;WNN 的预报结果具有明显的趋势项,从 C04 和 C07 2 颗卫星的预报结果来看,其

预报误差呈明显的递增或递减趋势,但是其离散程度与 ISU-P 的残差相比明显较小;而 LSTM 的预报结果较前二者明显更好一些,表现了明显的“自我约束能力”。

为了反映 LSTM、WNN 和 ISU-P 短期预报的性能,将 3 种预报结果前 1、2、3、4、6 及 12 h 的预报结果精度进行 RMSE 统计,如表 4 所示。

表 4 LSTM、WNN 和 ISU-P 短期预报 RMSE 统计表

预报 时长/h	C04 卫星的结果/ns			C07 卫星的结果/ns			C12 卫星的结果/ns		
	ISU-P	WNN	LSTM	ISU-P	WNN	LSTM	ISU-P	WNN	LSTM
1	1.24	0.89	1.23	1.44	0.78	0.75	3.96	1.86	0.61
2	0.97	0.70	1.07	0.86	0.66	0.98	3.85	1.74	0.56
3	1.22	0.58	1.01	1.27	0.83	0.81	3.60	1.51	0.50
4	2.04	0.50	0.91	1.50	0.96	0.70	3.37	1.33	0.45
6	4.40	0.49	0.77	1.66	1.23	0.57	3.02	1.09	0.41
12	12.72	0.97	0.63	1.66	1.23	0.57	2.69	0.86	0.50

从表 4 可以看出: 3 种预报方案在最初 1~2 h 的预报精度波动较为明显, 随着预报时间增加, 预报精度逐步提升。为了整体了解 LSTM、WNN 和

ISU-P 3 种结果的预报精度和稳定度, 将 3 颗卫星的 3 种结果与 ISU-O 作比较表征其精度与稳定度的 RMSE 与 R 值进行统计如表 5 所示。

表 5 LSTM、WNN 和 ISU-P 1d 预报精度统计表

单位: ns

卫星号	ISU-P 的精度指标		WNN 的精度指标		LSTM 的精度指标	
	R	RMSE	R	RMSE	R	RMSE
C04	33.94	17.59	4.00	2.17	1.97	1.18
C07	9.98	3.15	3.64	2.58	2.05	1.28
C12	2.11	2.84	2.35	1.36	1.02	0.85
平均值	15.34	7.86	3.33	2.04	1.68	1.10

从表 5 中可以看出, LSTM 模型的预报精度和稳定性在 3 颗卫星中表现得最好, 3 颗卫星平均精度在 1 ns 左右, 稳定度在 2 ns 左右, 尤其是 C12 卫星的预报精度可达 0.85 ns, 稳定度在 1 ns 左右。而 ISU-P 的预报精度和稳定性最差, 1 d 内误差最大可达 33 ns, 同时精度也达到 18 ns, 这样的精度在进行单点定位时误差在米级。

对比这 3 种预报结果, WNN 和 LSTM 的日预报精度均优于 ISU-P 数据, 其中在 C04、C07 和 C12 三颗卫星中, LSTM 的预报精度较 ISU-P 数据相比精度分别提高了 93%、59% 和 70%, 较 WNN 分别提高了 45%、50% 和 38%。相较于 WNN 模型, LSTM 更适合作为 1 种较有效的钟差预报方法应用到钟差短期预报中。

4 结束语

为了提高钟差短期预报性能, 提出 1 种 1 次差和 LSTM 模型组合的钟差预报模型。经过超参

数优选及 2 种数据预处理方法对比, 搭建适合 BDS 超快速钟差预报的组合 LSTM 模型, 将 LSTM 预报结果分别与 WNN 模型预报结果及 ISU-P 数据比较, 得到如下结论:

1) 采用网格搜索和交叉验证结合的方法对 L 和 B 共 2 个超参数进行优选, 提高了 LSTM 模型的预报性能和泛化能力。当 $L=4$ 、 $B=30$ 时, LSTM 模型预报精度较好。

2) 对钟差 1 次差分数据进行粗差剔除, 不仅可以消除钟差数据中的异常点, 还减少了有效数据长度, 可降低 LSTM 网络的复杂程度。通过这种预处理方法后, LSTM 模型预报结果较直接使用 LSTM 模型进行预报的精度提高了 76%。

3) 钟差数据 1 次差剔除粗差预处理后, 再使用 LSTM 模型预报钟差, 其单日预报精度较 WNN 预报模型提高了 45%, 与 ISU-P 数据相比, 则提高了 74%。该模型至少在日内预报精度优于 ISU-P 数据, 可以作为 1 种较为有效的钟差预报模型。

参考文献

- [1] AHMED E M, MANOJ D. Maintaining real-time precise point positioning during outages of orbit and clock corrections[J]. GPS Solutions, 2017, 21(3): 937-947.

- [2] YANG Y X, CUI X Q. Adaptively robust filter with multi adaptive factors[J]. Survey Review, 2008, 40(309): 260-270.
- [3] HUANG G W, CUI B B, ZHANG Q, et al. An improved predicted model for BDS ultra-rapid satellite clock offsets[J]. Remote Sensing, 2018, 10(1): 60-78.
- [4] HUANG G W, ZHANG Q. Real-time clock offset prediction with an improved model[J]. GPS Solutions, 2014, 18(1): 95-104.
- [5] HEO Y J, CHO J, HEO M B. Improving prediction accuracy of GPS satellite clocks with periodic variation behaviour[J]. Measurement Science and Technology, 2010, 21(7): 1-8.
- [6] 王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 卫星钟差预报的小波神经网络算法研究[J]. 测绘学报, 2013, 42(3): 323-330.
- [7] WANG Y P, LYU Z P, QU Y, et al. Improving prediction performance of GPS satellite clock bias based on wavelet neural network[J]. GPS Solutions, 2017, 21(2): 523-534.
- [8] 王国成, 柳林涛, 徐爱功, 等. 径向基函数神经网络在 GPS 卫星钟差预报中的应用[J]. 测绘学报, 2014, 43(8): 803-807, 817.
- [9] HOPFIELD J J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities[J]. National Academy of Sciences of the United States of America, 1982, 79(8): 2554-2558.
- [10] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.
- [11] 佚名. iGMAS 系统: 产品介绍[EB/OL]. [2020-04-13]. http://www.igmas.org/Product/Cpdetail/detail/nav_id/4/cate_id/36.html.
- [12] 王宇谱, 吕志平, 陈正生, 等. 一种新的钟差预处理方法及在 WNN 钟差中长期预报中的应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(3): 373-379.
- [13] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.
- [14] 吉长东, 王强, 王贵朋, 等. 深度学习 LSTM 模型的电离层总电子含量预报[J]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 76-81.
- [15] GERS F A, SCHMIDHUBER J, CUMMINS F. Learning to forget: continual prediction with LSTM[J]. Neural Computation, 2000, 12(10): 2451-2471.

引文格式: 杨玉锋, 彭勇, 刘梦晗, 等. BDS-3 在轨卫星钟性能评估与分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 53-60. (YANG Yufeng, PENG Yong, LIU Menghan, et al. Performance evaluation and analysis of BDS-3 on-orbit satellite clocks[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 53-60.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210109.

BDS-3 在轨卫星钟性能评估与分析

杨玉锋, 彭勇, 刘梦晗, 邱嘉平

(中国地质大学 地理与信息工程学院, 武汉 430078)

摘要: 为了弥补对北斗三号(BDS-3)卫星钟性能相关研究的不足, 提出对 BDS-3 在轨卫星钟性能进行评估与分析: 利用武汉大学卫星导航定位技术研究中心的精密钟差产品, 通过最小二乘法拟合钟差数据, 计算卫星钟的频率准确度和频率漂移率; 并采用重叠哈达玛方差, 讨论卫星钟的频率稳定度; 然后对 BDS-3 卫星钟差模型拟合残差序列长期变化特点进行分析和精度统计; 最后与北斗二号(BDS-2)和伽利略卫星导航系统(Galileo)的卫星钟进行对比分析。结果表明, BDS-3 所搭载的新一代铷钟和氢钟的各项性能均优于 BDS-2 卫星钟, 其中 BDS-3 氢钟与 Galileo 卫星钟的各项性能相当。

关键词: 卫星钟; 钟差模型; 频率稳定度; 性能分析

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0053-08

Performance evaluation and analysis of BDS-3 on-orbit satellite clocks

YANG Yufeng, PENG Yong, LIU Menghan, QIU Jiaping

(School of Geography and information engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430078, China)

Abstract: In order to supplement the insufficiency of related study on the satellite clock performance of BeiDou navigation satellite System with global coverage (BDS-3), the paper proposed to evaluate and analyze the performance: the precision clock difference products of Global Navigation Satellite System (GNSS) Research Center of Wuhan University were used to calculate the frequency accuracy and the frequency drift rate of the satellite clocks by least square method fitting clock difference data; and the frequency stability of the satellite clock was discussed using overlapping Hadamard variance; then the characteristics of the long-term variation of the fitted residual sequence of the BDS-3 satellite clock error model were analyzed and the accuracy was statistically counted; finally the indicators of BeiDou navigation satellite (regional) System (BDS-2) and Galileo satellite clocks were utilized to do the comparative analysis. Results showed that the new generation of rubidium clocks and hydrogen clocks on BDS-3 could have better performance than BDS-2 satellite clocks, and the performance of BDS-3 hydrogen clocks could be equivalent to that of Galileo satellite clocks.

Keywords: satellite clock; clock difference model; frequency stability; performance analysis

0 引言

星载原子钟维持着导航系统的星上时间基准, 决定了导航卫星在轨寿命, 其性能不仅会影响全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的自主导航能力, 还会对其系统服务能力

产生较大影响, 所以有必要对 GNSS 卫星钟的性能进行长期实时的监测评估^[1]。

基于精密卫星钟差数据分析星载原子钟的性能, 是掌握和评估卫星钟性能及运行状况的 1 种重要手段^[1-6]。近年来, 国内外学者在利用钟差数据评估导航卫星星载原子钟的性能方面, 进行了

收稿日期: 2020-06-03

第一作者简介: 杨玉锋(1995—), 男, 河南洛阳人, 硕士研究生, 研究方向为 GNSS 卫星钟差数据处理及应用。

大量的研究。但目前卫星钟性能的评估主要集中在全球定位系统(global positioning system, GPS)、格洛纳斯卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)、伽利略卫星导航系统(Galileo navigation satellite system, Galileo)和北斗卫星导航(区域)系统即北斗二号(BeiDou navigation satellite (regional) system, BDS-2)上^[7-14], 对于第3代北斗卫星导航系统即北斗三号(BeiDou navigation satellite system with global coverage, BDS-3)卫星钟性能的研究不够全面, 具体表现在: ①现今对BDS-3的研究大多停留在早期的实验卫星, 对后期投入的新一代卫星研究较少; ②缺少在长时间尺度下, 对BDS-3星载原子钟在轨特性与服务性能较为全面的评估^[12, 14]; ③没有全面对比分析BDS-3星载原子钟与其他导航系统卫星钟性能的差异。

针对上述问题, 本文基于武汉大学卫星导航定位技术研究中心的精密钟差产品, 使用组合中位数(median absolute deviation, MAD)法进行数据质量控制; 然后利用预处理后钟差数据计算频率准确度、频率漂移率、频率稳定度、模型拟合残差等指标; 最后对BDS-3在轨卫星的运行状态与星载钟的特性进行全面评估, 并详细讨论当前阶段BDS-2/BDS-3与Galileo卫星钟之间的性能差异。

1 卫星钟差模型及评估方法

1.1 卫星钟差模型

通常采用包含表征卫星钟时频特性的相位、频率、频漂的二次多项式模型来构造精密卫星钟差模型, 其表达式^[2]为

$$L_i = a_0 + a_1(t_i - t_0) + a_2(t_i - t_0)^2 + \Delta_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: L_i 为历元时刻 t_i 的卫星钟差; a_0 、 a_1 、 a_2 分别为卫星钟参数, 对应着相位、钟速(频率)和钟漂(频漂); t_0 为卫星钟参考时间; Δ_i 为钟差模型残差; n 为钟差观测量个数。

1.2 性能评估方法

卫星钟性能的性能指标主要包括频率准确度、频率漂移率、频率稳定度、拟合残差精度。通过拟合式(1)可得钟差数据的拟合残差, 下面给出其余3个指标的计算方法。

频率准确度描述了实际频率相对于标称值的一致性程度, 频率漂移率反映了原子钟受各种相

关因素的影响而造成其输出频率值的单调变化^[6]。基于最小二乘法拟合钟差序列, 便可求得 T 时间段的频率准确度 K_T 和频率漂移率 D_T ^[2, 7]为:

$$K_T = \frac{\sum_{i=1}^n (L_i - \bar{L})(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (2)$$

$$D_T = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i(T) - \bar{y}(T))(t_i - \bar{t})}{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2} \quad (3)$$

式中: T 为取样时间间隔; \bar{t} 、 \bar{L} 、 \bar{y} 为 T 时间段内测量钟差时刻、钟差数据和相对频率值的均值。

频率稳定度是描述原子钟输出频率受噪声影响而产生的随机起伏情况, 表征了原子钟授时的稳定性^[5]。采用能够较好消除频漂影响的重叠阿达马(Hadamard)方差来计算卫星钟的频率稳定度。基于钟差(相位)数据的重叠Hadamard方差计算公式^[2, 5]为

$$H\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{6\tau^2(N-3m)} \sum_{i=1}^{n-3m} (L_{i+3m} - 3L_{i+2m} + 3L_{i+m} - L_i)^2 \quad (4)$$

式中: $\tau = m\tau_0$ 为平滑时间, τ_0 为相邻钟差数据的采样间隔; m 为平滑因子, 一般取 $1 \leq m \leq \text{int}[(n-1)/3]$ 。

图1给出了本文BDS-3卫星钟性能评估与分析的整个流程。图1中加粗的字体表示性能评估时所采用的性能指标。

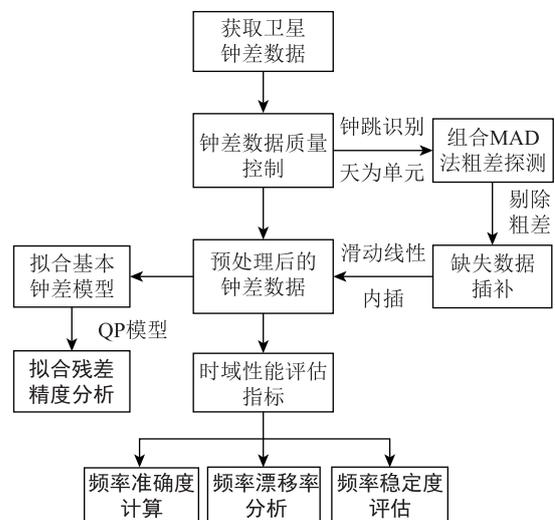


图1 性能评估与分析的流程

2 实验与结果分析

2.1 实验数据

本文采用武汉大学卫星导航定位技术研究中心通过多星定轨联合解算的精密钟差数据 (WUM*.clk), 数据选取的时间段为 2019 年全年的钟差产品, 由于有整天数据缺失的情况, 故实验

数据共 323 d, 采样间隔为 30 s。考虑到实验时段内 30 s 间隔的钟差数据量过大, 故从中提取采样间隔为 5 min 的钟差序列加以分析。

选取 8 颗 BDS-3 卫星作为代表进行分析, 同时为了更好地评估其性能, 选取 BDS-2 与 Galileo 卫星作为对比, 实验卫星具体信息如表 1 所示。

表 1 卫星相关信息

导航系统名称	卫星号	星载钟类型	卫星类型	发射时间	
BDS-2	C11	铷钟	中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO)	2012	
	C14	铷钟		2012	
BDS-3	C19	铷钟		2017	
	C21	铷钟		2018	
	C23	铷钟		2018	
	C25	氢钟		2018	
	C28	氢钟		2018	
	C30	氢钟		2018	
	C34	氢钟		2018	
Galileo	C37	铷钟		2018	
	E11	铷钟	在轨验证 (design and on-orbit verification, IOV)	2011	
	E19	氢钟		2012	
	Galileo	E24	氢钟	完全运行能力 (full operational capability, FOC)	2015
		E01	氢钟		2016
		E27	氢钟		2017
E33		氢钟	2018		

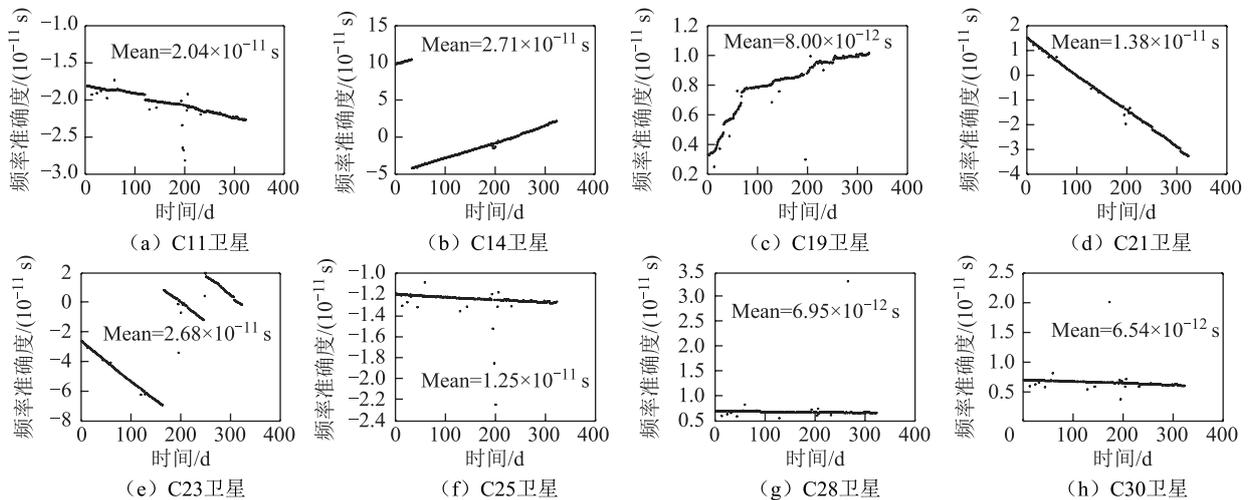
2.2 卫星钟性能分析

卫星在轨运行过程中, 由于空间环境干扰及信号异常等情况, 获取的钟差序列中经常会包含粗差和数据中断等异常情况^[2, 3-5]。在进行卫星钟性能评估时, 需要先对钟差序列进行预处理, 本文利用探测效果较可靠的组合 MAD 法^[3, 8]对钟差数据进行

质量控制。

2.3 频率准确度分析

采用预处理后的钟差序列, 利用式 (2) 以天为取样时间间隔, 计算得到频率准确度序列, 同时对各卫星钟频率准确度绝对值序列的平均值进行统计, 其结果如图 2 所示。图 2 中, Mean 为平均值。



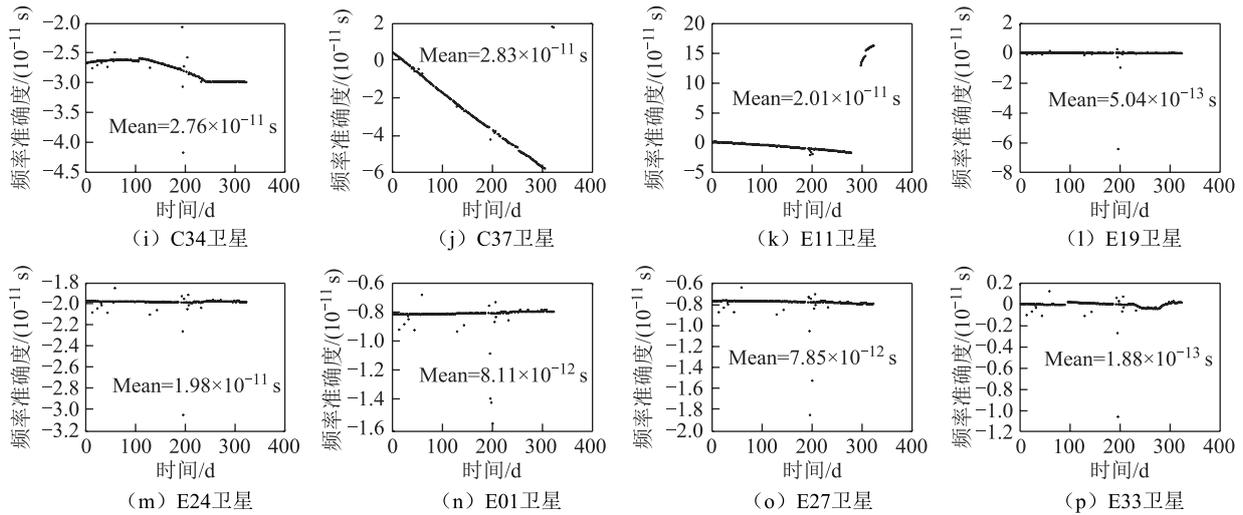


图2 卫星钟频率准确度指标的长期变化特点

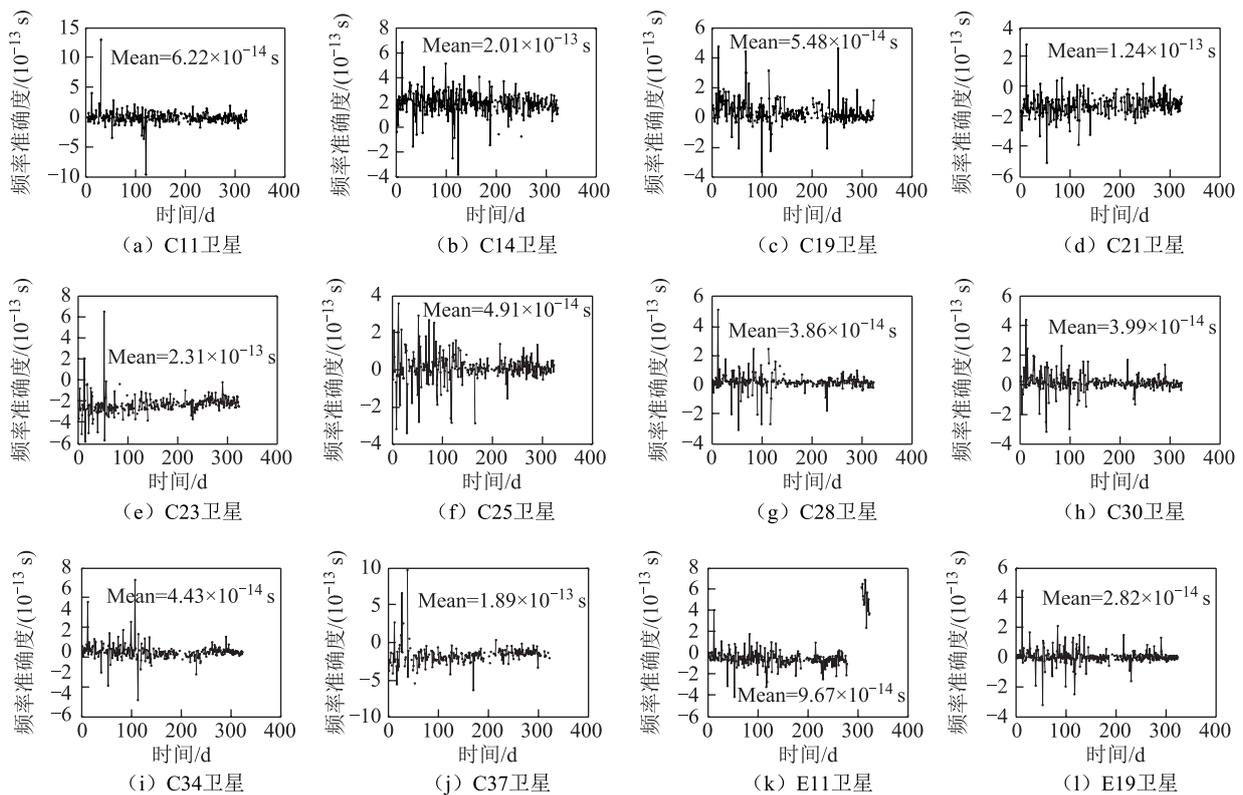
从图2可以看出，BDS在轨各卫星钟的频率准确度存在较为明显的差异，BDS-3中的C19、C28和C30卫星钟频率准确度较好，整体处于 1×10^{-12} s量级，其余BDS卫星钟频率准确度均值处于 1×10^{-11} s量级。部分卫星钟的频率准确度值随着时间的推移越来越大，但增大到一定程度时，BDS运控系统会做适当的调整，使频率准确度的值稳定在一定范围内，如C23卫星钟频率准确度序列。Galileo的E19和E33卫星钟频率准确度远远优于其余卫星，同时发现Galileo卫星钟频率准确度跳变的频次较高，可能地面运控系统的频繁

调相操作有关^[2]。总的来看，BDS和Galileo在轨卫星钟的频率准确度整体变化较为平稳。

2.4 频率漂移率分析

以天作为处理单元，采用式(3)计算卫星钟的频率漂移率，对日漂移率序列绝对值的平均值进行统计，如图3所示。

由图3可知，BDS-3卫星钟的频率漂移率序列存在明显的分段现象，前期频漂较大，后续逐渐趋于处于较好的水平，如C25、C28、C30和C37。3类卫星日漂移率均值处于 1×10^{-14} 量级左右，除跳变点外，整体变化较为平稳。E11卫星后期出现



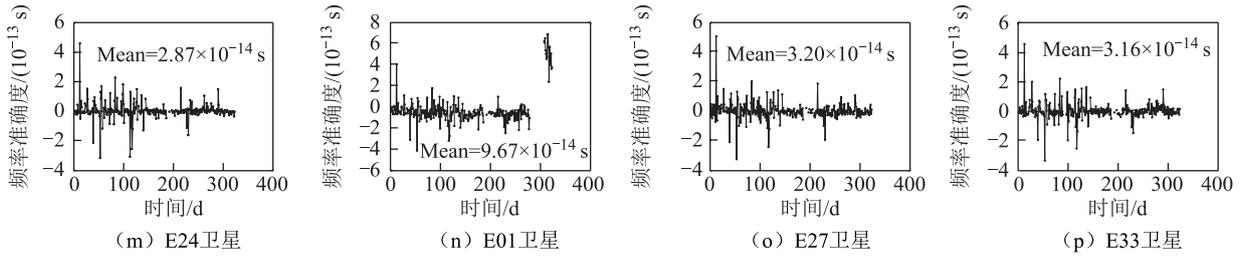


图 3 卫星钟日漂移率长期变化特点

频漂异常数据段, 可能与地面运控系统的相关操作或该卫星钟的切换有关。总的来看, Galileo 卫星钟的频率漂移率优于 BDS-2 和 BDS-3 卫星钟, 并且波动范围较小。

2.5 频率稳定性分析

以天为取样间隔, 平滑因子取 50, 利用式 (4) 计算重叠 Hadamard 方差, 统计重叠 Hadamard 方差平方根序列的平均值, 以此来表征卫星钟在平滑 15 000 s

下的稳定度^[2-4] (万秒稳), 其结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 与 BDS-2 卫星钟相比, BDS-3 与 Galileo 卫星钟具有较高的频率稳定度。BDS-3 万秒稳序列存在存在显著长周期信号如 C21、C23、C30 卫星等, 但其频漂序列中并不明显, 此类长周期信号可能是受频率序列中周期特性的影响, 或与装载的卫星钟硬件设备特性有关。同时发现 C23、C25、C37 卫星前期稳定性较差, 后随时间增加万

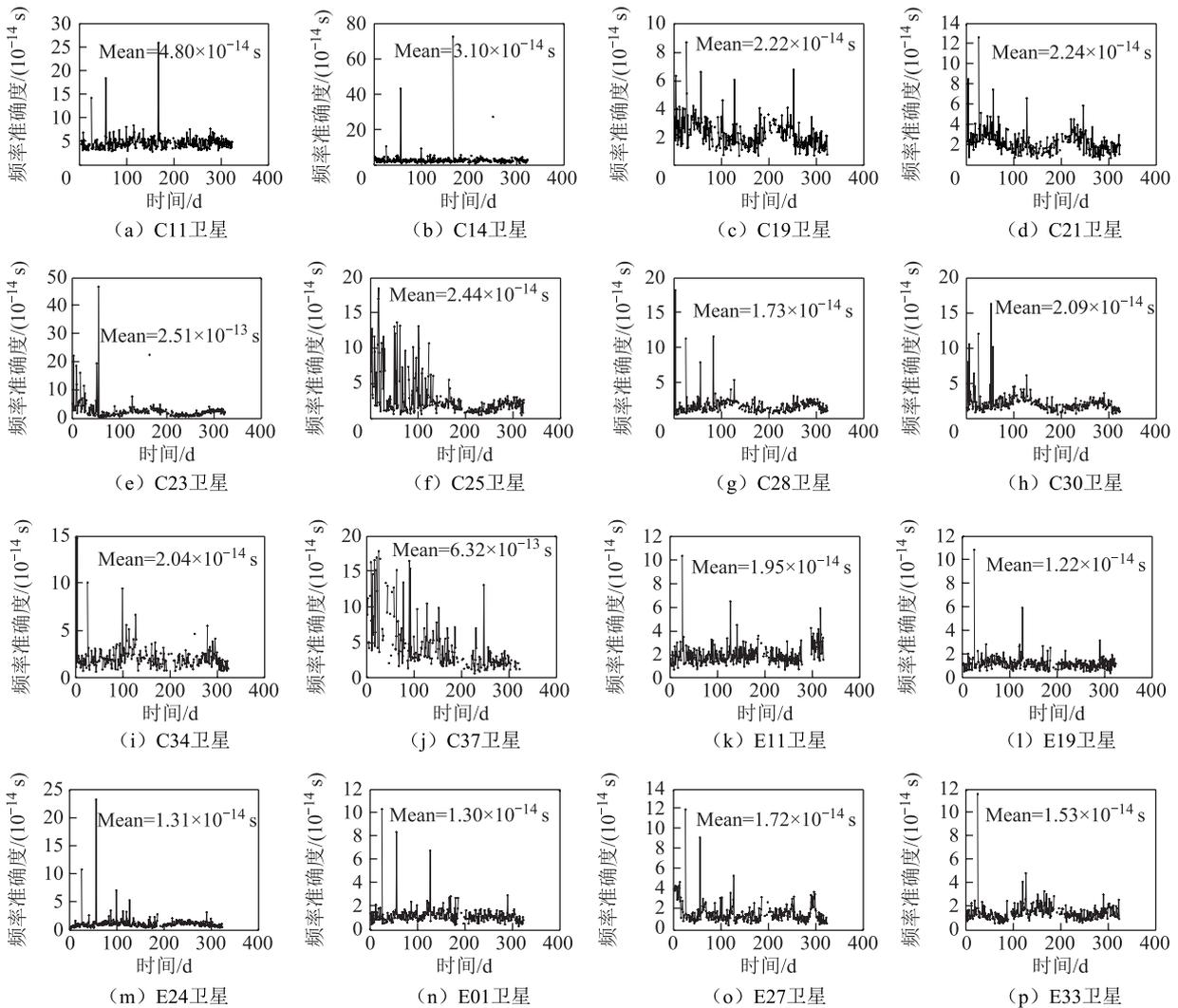


图 4 卫星钟万秒稳长期变化特点

秒稳逐渐趋于较好水平,这与 BDS-3 初始运行不稳定有关,运行一段时间后卫星钟性能逐渐达到最佳。Galileo 中, E11 卫星的万秒稳序列与其日漂移率序列一样出现一段较为明显的异常,其余卫星万秒稳变化较为平稳。总的来看, BDS-3 卫星钟的万秒稳波动范围较大,但其稳定度与 Galileo

卫星钟相当。

2.6 模型拟合残差

利用式(1),以天为单元对预处理后的钟差数据进行拟合,得到其对应的拟合残差序列,并统计实验时段内各卫星钟钟差模型拟合残差的均方根 (root mean square, RMS),其结果如图 5、图 6 所示。

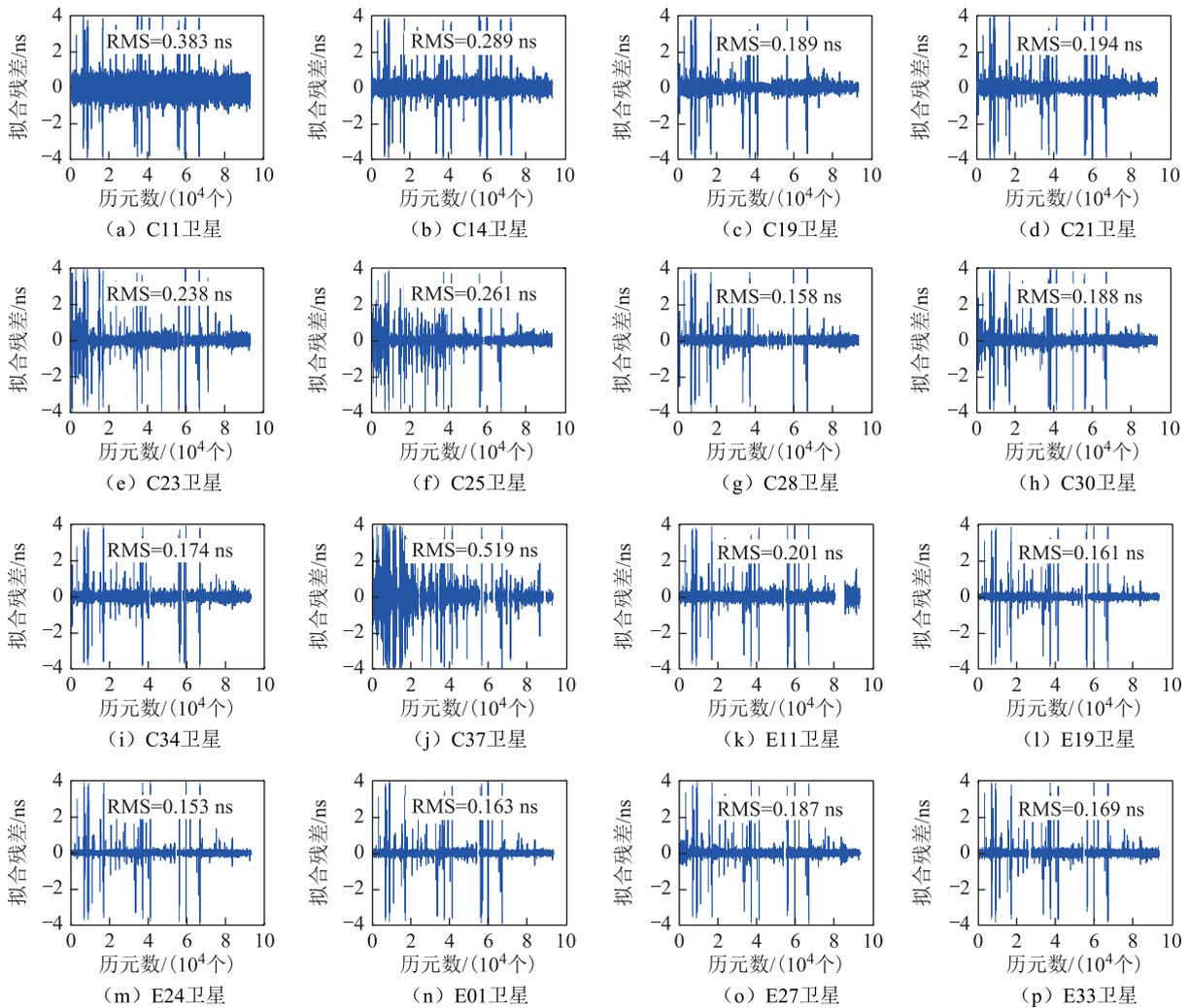


图 5 卫星钟钟差模型拟合残差序列

由图 5 和图 6 可知, BDS 在轨各卫星钟钟差模型拟合残差的精度均优于 0.6 ns, Galileo 卫星钟钟差模型拟合精度优于 0.2 ns。对比 C23、C25、C34、C37、E11 和 E33 卫星拟合残差系列与万秒稳序列,发现二者随时间尺度变化特征较一致,说明卫星钟的频率稳定度指标与其钟差模型拟合残差间存在着一定的代数关系。三类卫星拟合残差均存在较为显著的周期波动特性,这可能是多模 GNSS 实验跟踪网 (multi-GNSS experiment, MGEX) 多星联合解算钟差产品中存在周期性影响的系统误差所造成的。BDS-3 部分卫星钟差模型拟合残差精度较差 (如 C37 卫星),可能与其初始运行状态或星载钟特性有关。

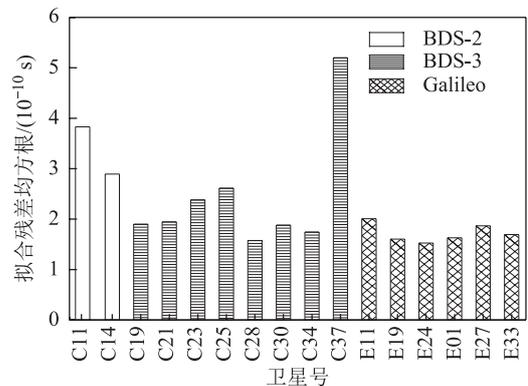


图 6 拟合残差精度统计

2.7 统计分析

为了进一步分析 BDS-3 卫星钟的性能, 计算

了各项性能指标的年平均值, 并与 BDS-2 和 Galileo 卫星钟进行对比, 结果列入表 2。

表 2 性能指标对比

导航系统名	卫星号	星载钟类型	频率准确度/s	频率漂移率/s	频率稳定度/s	拟合残差精度/ns
BDS-2	C11	铷钟	2.04×10^{-11}	6.22×10^{-14}	4.80×10^{-14}	0.383
	C14		2.71×10^{-11}	2.01×10^{-13}	3.10×10^{-14}	0.289
	Mean		2.37×10^{-11}	1.32×10^{-13}	3.95×10^{-14}	0.336
BDS-3	C19	铷钟	8.00×10^{-12}	5.48×10^{-14}	2.22×10^{-14}	0.189
	C21		1.38×10^{-11}	1.24×10^{-13}	2.24×10^{-14}	0.194
	C23		2.68×10^{-11}	2.31×10^{-13}	2.51×10^{-14}	0.238
	C37		2.83×10^{-11}	1.89×10^{-13}	6.32×10^{-14}	0.519
	Mean		1.92×10^{-11}	1.49×10^{-13}	3.32×10^{-14}	0.285
BDS-3	C25	氢钟	1.25×10^{-11}	4.91×10^{-14}	2.44×10^{-14}	0.261
	C28		6.95×10^{-12}	3.86×10^{-14}	1.73×10^{-14}	0.158
	C30		6.54×10^{-12}	3.99×10^{-14}	2.09×10^{-14}	0.188
	C34		2.76×10^{-11}	4.43×10^{-14}	2.04×10^{-14}	0.174
	Mean		1.34×10^{-11}	4.30×10^{-14}	2.08×10^{-14}	0.195
Galileo	E11	铷钟	2.01×10^{-11}	9.67×10^{-14}	1.95×10^{-14}	0.201
	E19		5.04×10^{-13}	2.82×10^{-14}	1.22×10^{-14}	0.161
	E24	氢钟	1.98×10^{-11}	2.87×10^{-14}	1.31×10^{-14}	0.153
	E01		8.11×10^{-12}	2.79×10^{-14}	1.30×10^{-14}	0.163
	E27		7.85×10^{-12}	3.20×10^{-14}	1.72×10^{-14}	0.187
	E33		1.88×10^{-13}	3.16×10^{-14}	1.53×10^{-14}	0.169
	Mean			9.42×10^{-12}	4.09×10^{-14}	1.50×10^{-14}

由表 2 可以看出: ①BDS-3 所搭载的新一代铷钟的频率准确度优于 BDS-2 的卫星钟, 其氢钟的频率准确度要远远好于铷钟, 但略差于 Galileo 的氢钟; ②频率漂移率方面, BDS-3 和 Galileo 的氢钟频漂相差不大, 处于 1×10^{-14} s 量级左右, 远胜于 2 者所搭载的铷原子钟; ③BDS-3 卫星钟比 BDS-2 卫星钟更加稳定, 拟合残差精度更高。同时 Galileo 的氢钟与 BDS-3 的氢钟相比具有更高的频率稳定度, 钟差模型拟合残差更小。总的来看, BDS-3 所搭载的新一代铷钟和氢钟的各项性能均优于 BDS-2 卫星钟, 其中 BDS-3 氢钟与 Galileo 卫星钟的各项性能相当。

3 结束语

本文基于武汉大学卫星导航定位技术研究中

心的精密钟差产品, 使用组合 MAD 法进行数据质量控制, 然后利用预处理后, 对钟差数据计算了频率准确度、频率漂移率、频率稳定度、模型拟合残差等指标, 最后对 BDS-3 在轨卫星的运行状态与星载钟的特性进行了全面评估, 并详细讨论了当前阶段 BDS-2/BDS-3 与 Galileo 卫星钟之间的性能差异。分析实验结果得出以下结论:

①BDS-3 所搭载的新一代铷钟和氢钟的各项性能均优于 BDS-2 卫星钟; ②BDS-3 的铷原子钟各项性能差于其所搭载的氢原子钟; ③不论指标序列分布还是精度统计, 现阶段 Galileo 的氢钟的各项性能最优, 但初始运行阶段 BDS-3 的氢钟性能与其相差不大, 也处在较好水平, 且还有进一步提升的空间。

参考文献

- [1] 唐升, 刘娅, 李孝辉. 星载原子钟自主完好性监测方法研究[J]. 宇航学报, 2013, 34(1): 39-45.
- [2] 潘雄, 杨玉锋, 卿晨昕, 等. Galileo 在轨卫星钟性能评估与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2020, 28(1): 53-59.
- [3] 刘帅, 贾小林, 孙大伟. GNSS 星载原子钟性能评估[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(2): 277-284.
- [4] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. 北斗在轨卫星广播星历精度分析[J]. 宇航学报, 2018, 39(9): 1013-1021.

- [5] 王阳, 胡彩波, 徐金锋, 等. BD-2 在轨卫星钟性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2019, 39(3): 252-255, 268.
- [6] 黄观文, 余航, 郭海荣, 等. 北斗在轨卫星钟长期钟差特性分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(7): 982-988.
- [7] 王宇谱, 吕志平, 王宁. BDS 星载原子钟长期性能分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(2): 157-169.
- [8] 毛亚, 王潜心, 胡超, 等. 北斗三号试验卫星的钟差评估及预报[J]. 天文学报, 2018, 59(1): 58-71.
- [9] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.
- [10] HUNG G, ZHANG Q, LI H, et al. Quality variation of GPS satellite clocks on-orbit using IGS clock products[J]. Advances in Space Research, 2013, 51(6): 978-987.
- [11] ZHAO Q, WANG C, GUO J, et al. Precise orbit and clock determination for BeiDou-3 experimental satellites with yaw attitude analysis[J]. GPS Solutions, 2018, 22(1): 4-9.
- [12] LOU Y, LIU Y, SHI C, et al. Precise orbit determination of BeiDou constellation: method comparison[J]. GPS Solutions, 2016, 20(2): 259-268.
- [13] 崔博斌. GNSS 卫星钟时频特性及预报算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [14] 李文涛, 边少锋, 任青阳, 等. 基于粒子群优化核极限学习机的北斗超快速钟差预报[J]. 宇航学报, 2019, 40(9): 1080-1088.

(上接第 37 页)

- [13] LEE J, PULLEN S, ENGE P, et al. Monitoring global positioning system satellite orbit errors for aircraft landing systems[J]. Journal of Aircraft, 2006, 43(3): 799-808.
- [14] TANG H, PULLEN S, ENGE P, et al. Ephemeris type a fault analysis and mitigation for LAAS[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of Position Location and Navigation Symposium. Palms Springs: IEEE, 2010: 654-666.
- [15] SCHUSTER W, BAI J, FENG S, et al. Integrity monitoring algorithms for airport surface movement[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 65-75.
- [16] 倪育博. GNSS 民航导航服务性能评估[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.
- [17] 卢德兼, 陈秀万. GNSS 系统接收机自主完好性监测算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(11): 10-12.
- [18] PERVEN B, GRATTON L. Orbit ephemeris monitors for local area differential GPS[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2005, 41(2): 449-460.

引文格式: 王浩浩, 黄观文, 付文举, 等. BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差的性能分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 61-67. (WANG Haohao, HUANG Guanwen, FU Wenju, et al. Performance analysis of BDS-2/BDS-3 real-time satellite clock offset joint estimation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 61-67.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210110.

BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差的性能分析

王浩浩¹, 黄观文¹, 付文举², 谢威¹, 曹钰¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 为了弥补对北斗三号 (BDS-3) 实时卫星钟差的定位服务性能及北斗二号 (BDS-2) 的定位服务性能提升幅度相关研究的不足, 提出 1 种性能分析方法: 基于非差模型分别对 BDS-2 和 BDS-2/BDS-3 的实时卫星钟差进行估计及精度分析; 并利用估计的卫星钟差产品进行实时动态精密单点定位 (PPP) 模拟实验。结果表明: 实时估计的 BDS-2、BDS-2/BDS-3 卫星钟差标准差 (STD) 均优于 0.5 ns; 随着 BDS-3 卫星的加入, 联合估计 BDS2/BDS3 钟差的 STD 相对于 BDS-2 单系统结果平均提升了 18%; BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP 定位相对于 BDS-2 单系统能够取得更短的收敛时间和更优的定位精度。

关键词: 北斗三号; 非差模型; 卫星钟差估计; 动态精密单点定位

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0061-07

Performance analysis of BDS-2/BDS-3 real-time satellite clock offset joint estimation

WANG Haohao¹, HUANG Guanwen¹, FU Wenju², XIE Wei¹, CAO Yu¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to supplement the insufficiency of related study on the positioning service performance of BeiDou navigation satellite System with global coverage (BDS-3) real-time satellite clock bias and the improvement extent of positioning service performance of BeiDou navigation satellite regional System (BDS-2), the paper proposed a performance analysis method: BDS-2, BDS-2/BDS-3 real-time satellite clocks were estimated respectively and the accuracy was evaluated based on the undifferenced model; and real-time kinematic Precise Point Positioning (PPP) stimulation experiments were performed with the real-time estimated satellite clock product. Results showed that the Standard Deviations (STD) of the real-time estimated BDS-2 and BDS-2/BDS-3 satellite clock offsets could be both better than 0.5 ns; with the participation of BDS-3 satellites, the STD of the joint real-time estimated BDS-2/BDS-3 satellite clock offsets would be averagely improved by 18% compared to BDS-2; meanwhile, the positioning performance of BDS-2/BDS-3 real-time kinematic PPP could achieve shorter convergence time and better positioning accuracy relative to BDS-2 single-system.

Keywords: BeiDou navigation satellite system with global coverage; undifferenced model; satellite clock estimation; kinematic precision point positioning

0 引言

实时卫星轨道和实时钟差产品作为实时精密单

点定位 (real-time precise point positioning, RT-PPP) 的先决条件, 其时效性和精度决定了 RT-PPP 服务的性能^[1]。在卫星导航定位领域, 精确的位置测量

收稿日期: 2020-06-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41774025); 二代导航重大专项 (GFZX0301040308); 陕西省杰出青年基金项目 (2019JC-20)。

第一作者简介: 王浩浩 (1995—), 男, 河南许昌人, 硕士研究生, 研究方向为 GNSS 实时精密卫星钟差估计。

通信作者简介: 黄观文 (1983—), 男, 江苏淮安人, 博士, 教授, 研究方向为 GNSS 精密定位和精密钟差。

实际上就是精确的时间测量^[2]。由于星载原子钟极易受外界环境及本身物理特性的影响,很难通过数学模型对卫星钟差进行准确预报^[3],因此必须利用地面跟踪站的实时观测数据进行卫星钟差的实时估计^[4]。

中国自主研发、独立运行的北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)于2020年全面完成北斗三号(BDS with global coverage, BDS-3)全球组网,BDS-3实时高精度服务性能必将受到全球关注。目前已有部分学者对BDS-3精密定轨和钟差产品展开相关研究。文献[5]研究结果表明,BDS-3卫星定轨重叠弧段的3维均方根值(root mean square, RMS)小于10 cm,精密定轨精度优于北斗卫星导航(区域)系统即北斗二号(BeiDou navigation satellite (regional) system, BDS-2)。文献[6]基于事后精密轨道和钟差产品,进行BDS-2与BDS-3联合静态PPP,在东(E)方向、北(N)方向、高程(U)方向的定位精度分别为10.7、19.5、20.4 mm;加入BDS-3卫星后,3个方向的收敛时间相对于BDS-2分别提升了27.15%、27.87%、35.76%。文献[7]进行的BDS-3实时静态PPP,其结果在N方向基本优于1 cm,E方向及U方向为1~4 cm,水平和高程方向相较于BDS-2分别提升50.23%、60.24%。BDS-3的加入,对BDS-2实时钟差的提升幅度、BDS-3实时钟差的定位服务性能等已成为BDS应用领域关注的焦点问题之一,但目前的公开研究成果较少,亟需开展相关的工作。

实时精密卫星钟差估计模型目前主要包括非差模型、历元间差分模型和混合差分模型^[8]。其中,非差模型观测量之间不存在相关性,不依赖于某一初始卫星钟差,同时也保留了模糊度参数,有利于后续非差模糊度固定以及相位硬件延迟特性研究等^[9],理论模型较为严密。鉴于此,本文采用多模全球卫星导航系统(global satellite navigation system, GNSS)实验跟踪网(multi-GNSS experiment, MGEX)和国际GNSS监测评估系统(international GNSS monitoring and assessment system, iGMAS)监测站的数据,基于非差模型进行BDS-2和BDS-3实时精密卫星钟差估计和精度评估,并利用6个测站的数据进行实时动态PPP模拟实验,验证评估目前BDS-2和BDS-3卫星钟差的定位服务性能。

1 基于非差观测量的实时卫星钟差估计

1.1 非差观测方程

本文采用无电离层组合伪距和载波相位观测量,在非差观测方程中,固定卫星轨道和测站坐标,利用模型改正相位缠绕等误差,实时估计卫星钟差。观测方程可表达为

$$\left. \begin{aligned} v_{\text{PC}} &= \tilde{t}_r - \tilde{t}^s + M_r d_{\text{trop}} - I_{\text{PC},r}^s \\ v_{\text{LC}} &= \tilde{t}_r - \tilde{t}^s + M_r d_{\text{trop}} + \lambda_{\text{IF}} \tilde{N}_r^s - I_{\text{LC},r}^s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:PC、LC分别表示伪距和载波;r、s分别表示测站和卫星; v_{LC} 、 v_{PC} 为无电离层组合载波和伪距的残差; \tilde{t}_r 、 \tilde{t}^s 为接收机和卫星钟差; d_{trop} 和 M_r 分别表示对流层天顶延迟及其投影函数; \tilde{N}_r^s 为吸收了接收机端和卫星端伪距和相位的硬件延迟后的模糊度参数; λ_{IF} 为无电离层组合的波长; $I_{\text{LC},r}^s$ 和 $I_{\text{PC},r}^s$ 分别为星站间几何距离与LC、PC观测值之差。

若直接用式(1)求解卫星钟差,法方程会出现秩亏,就必须引入1个基准钟,才能求解得到其他接收机钟和卫星钟相对于该基准钟的钟差^[10]。研究表明,当基准钟的钟差精度优于 1×10^{-6} s时,相对钟差和绝对钟差对用户的定位结果是一致的^[11]。因此,本文采用引入某个外接高精度原子钟的接收机钟,作为基准钟进行先验约束。同时,考虑到伪距观测值噪声水平约为相位观测值噪声水平的100倍,基于卫星高度角函数对伪距和载波相位的无电离层线性组合观测值赋予不同的先验权^[12]。

1.2 实时卫星钟差估计算法实现

实时钟差参数估计方法有序贯最小二乘估计、卡尔曼滤波估计以及均方根信息滤波估计等。其中序贯最小二乘估计是1种经常用于动态定位的经典方法,可避免不精确状态模型信息的影响^[13]。本文即采用序贯最小二乘估计方法进行实时卫星钟差解算。

在序贯最小二乘估计的程序实现中,历元更新包括不活动参数的移除以及新参数的引入。实时更新的有效信息矩阵将作为下一个历元的先验信息,从而实时估计接收机钟差和卫星钟差等参数。将解算得到的参数代入误差方程中,计算出相应的残差值,进而可得到估计历元的单位权标准差。随后所有参数再次分为活动参数和不活动参数,序贯应用到下一个历元,然后实现实时卫星钟差估计的序贯最小二乘平差。当先验信息

严密可靠时, 实时序贯最小二乘估计具有无偏最优性。

非差模型的实时卫星钟差估计算法实现流程如图 1 所示。

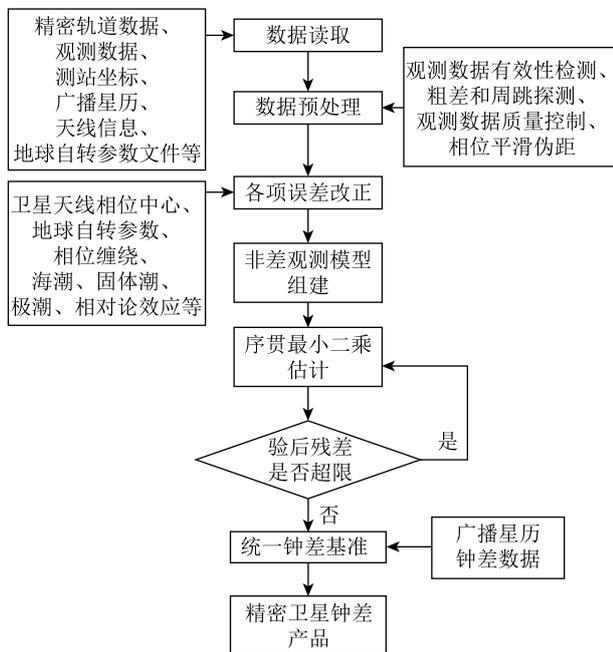


图 1 非差模型的实时卫星钟差估计算法实现流程

2 BDS 实时精密卫星钟差估计与结果分析

2.1 实验数据与处理策略

本文选取均匀分布在全球的 58 个 MGEX 站、10 个 iGMAS 站, 2019-10-14—2019-10-19 (年积日第 287—292 天) 连续 6 d、采样间隔为 30 s 的观测数据, 采用武汉大学国际 GNSS 服务 (Internal GNSS Service, IGS) 数据中心 (分析中心识别号为 WUM) 精密轨道产品, 分别进行 BDS-2、BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差估计。然后

利用没有参与实时卫星钟差解算的 6 个测站 (站名分别为 GUAM、KAT1、SEYG、TOW2、USUD、YARR)、采样间隔为 30 s 的观测数据, 用 BDS-2/BDS-3 组合实时估计的卫星钟差, 进行实时动态 PPP 模拟实验, 进一步验证实时估计卫星钟差的定位性能。用于实时精密卫星钟差估计以及实时动态 PPP 定位验证的测站分布如图 2 所示, 实时精密卫星钟差估计采用的测站用圆形表示, 实时动态 PPP 验证采用的测站用三角形表示。

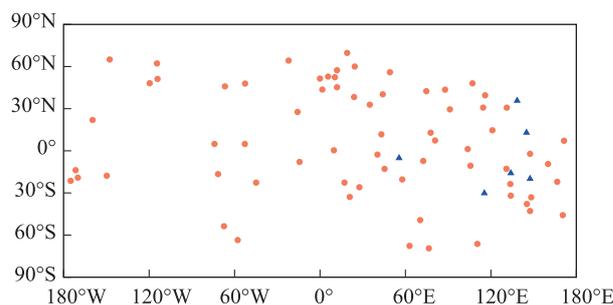


图 2 用于实时卫星钟差估计和实时动态 PPP 的测站分布

表 1 总结了实时精密卫星钟差估计采用的模型和参数估计策略, 其中接收机和卫星钟差参数作为白噪声进行估计, 每个测站的天顶对流层延迟部分则作为分段常数进行估计。

目前能够跟踪到 BDS-3 的 C35、C36、C37、C59 卫星的测站数量较少, 观测数据不足, 导致卫星的定轨精度较其他卫星较差^[7]。由于轨道与钟差的耦合性, 在实时估计过程中, 卫星钟差会吸收一部分轨道误差。因此, 为避免在钟差解算过程中对其他卫星的解算结果造成影响, 对上述 4 颗卫星不予估计。

表 1 实时卫星钟差估计采用的模型和参数估计策略

项目	参数	处理方法
观测量	观测值	非差无电离层载波相位和伪距观测值
	频点	BDS-2/BDS-3: B11/B3I
	截止高度角	7°
	观测量加权	高度角(ϵ)定权(p), $p = \begin{cases} 1, \epsilon > 30^\circ \\ 2\sin(\epsilon), \epsilon \leq 30^\circ \end{cases}$
误差改正	相位缠绕	模型改正 ^[14]
	卫星天线相位中心和变化	IGS14.atx
	大气负荷	不考虑
	潮汐改正	固体潮、海洋潮汐、极移潮
	相对论效应	模型改正: IERS 2003

(续表 1)

项目	参数	处理方法
参数估计	参考钟	固定 1 个接收机钟 (按顺序选取 YAR3、JFNG、CEDU 中的 1 个接收机钟为参考钟, 余下的为备选参考钟)
	卫星轨道	固定, WUM 事后精密轨道
	测站坐标	固定, IGS 周解
	接收机钟差	估计, 白噪声
	卫星钟差	估计, 白噪声
	对流层延迟	分段常数进行估计
	相位模糊度	常数估计, 每个连续弧段为 1 个常数

2.2 实时卫星钟差精度分析

卫星钟差精度评估选取 WUM 事后精密钟差产品作为参考, 采用二次差法计算实时钟差与参考钟差的差异, 利用该差异统计标准差 (standard deviation, STD) 来评估实时卫星钟差精度^[15]。由于不同软件钟差解算时选取的钟差基准并不相同, 因此上述两套钟差差异中, 还包含各自钟差基准的偏差, 本文通过当前历元所有卫星的钟差差异取平均, 作为基准偏差进行扣除, 避免所选的参考卫星钟差出现较大偏差时影响评估结果^[16-17]。图 3 和图 4 分别为实时估计的 BDS 卫星钟差单天和单

颗卫星 STD 值的统计。

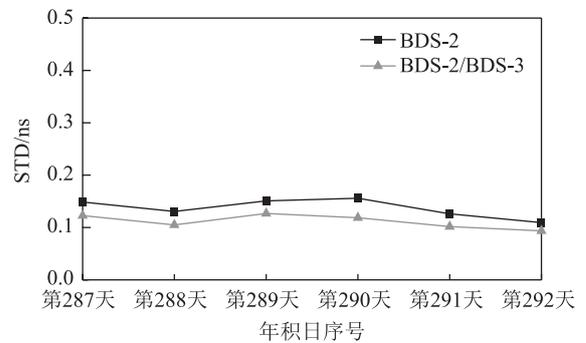


图 3 实时估计的 BDS 卫星钟差单天 STD 值

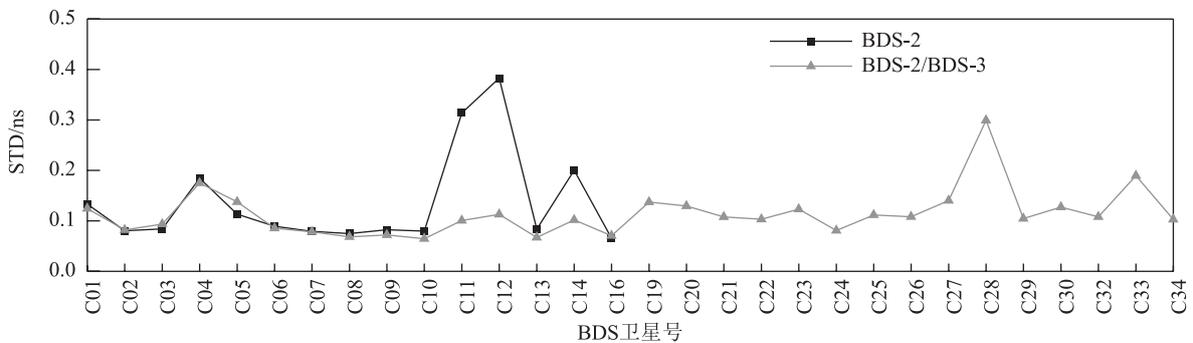


图 4 实时估计的 BDS 卫星钟差单颗卫星 STD 值

从图 3 可以看出, BDS-2、BDS-2/BDS-3 实时估计的卫星钟差每天的 STD 分别为 0.11~0.16 及 0.09~0.13 ns, 后者相对于前者的 STD 平均提升约 18%。从图 4 可以看出, BDS-2、BDS-2/BDS-3 实时估计的每颗卫星的卫星钟差平均 STD 分别为 0.06~0.38 和 0.06~0.30 ns。其中, BDS-2 实时估计的 C11、C12 和 C14 这三颗中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星的钟差精度较差, 可能是因为被跟踪到的测站相对于地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO) 卫星和倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbits, IGSO)

卫星较少导致。可以发现, 大部分 BDS-2 实时估计卫星钟差的 STD 随着 BDS-3 卫星参与实时钟差解算得到提高, 其中 C11、C12、C14 这 3 颗 MEO 卫星钟差的改善效果尤为明显。这是因为可观测卫星的数量增加, 极大地改善了卫星的几何分布, 地面监测站能够在较长时间内观测到 BDS-2/BDS-3 卫星, 以至于总体观测数据增多, 有利于在钟差解算过程中, 很好地分离接收机钟差和卫星钟差, 提高实时卫星钟差估计精度。

2.3 实时钟差单历元解算时间分析

Inter (因特) Core (酷睿) i5-3230M 2.60 GHz

个人计算机处理下, 2019-10-14—2019-10-19 (年积日第 287—292 天) BDS-2/BDS-3 组合实时卫星钟差估计的单历元解算耗时统计如图 5 所示。

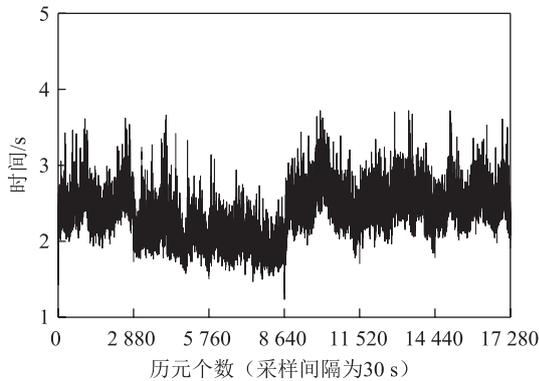


图 5 BDS-2/BDS-3 实时卫星钟差估计单历元解算时间

从图 5 中可以看出, 在全球均匀分布的 68 个跟踪站网的情况下, 所有历元估计时间均小于 4 s, 平均每个历元的解算时间约为 2.3 s。单历元实时卫星钟差解算耗时, 能够满足目前 IGS 多家分析中心所提供的 5 s 更新率的实时卫星钟差产品。

3 基于估计钟差的实时动态 PPP 定位性能分析

为了进一步评估实时卫星钟差性能, 对基于 BDS2/BDS3 组合实时估计的卫星钟差, 进行了实时动态 PPP 定位性能分析。考虑到事后精密产品天与天之间的轨道跳变, 对钟差解算会存在一定的影响, 选取 2019-10-15(年积日第 288 天)02:00—22:00, 采样率为 30 s 的 MGEX 测站静态观测数

据, 分别进行 BDS-2、BDS-2/BDS-3 的实时动态 PPP 模拟实验, 并与使用 WUM 事后精密钟差产品进行 BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP 模拟实验的定位结果作比较。动态 PPP 在实时处理模式下, 采用序贯最小二乘估计方法, 历元间不继承坐标信息, 进而实现测站坐标的实时动态解。以上 3 种实时动态 PPP 模拟实验分别对应实验 1、实验 2、实验 3。图 6 和表 2 为实时动态 PPP 在 E、N、U 方向上定位结果的 RMS 统计。

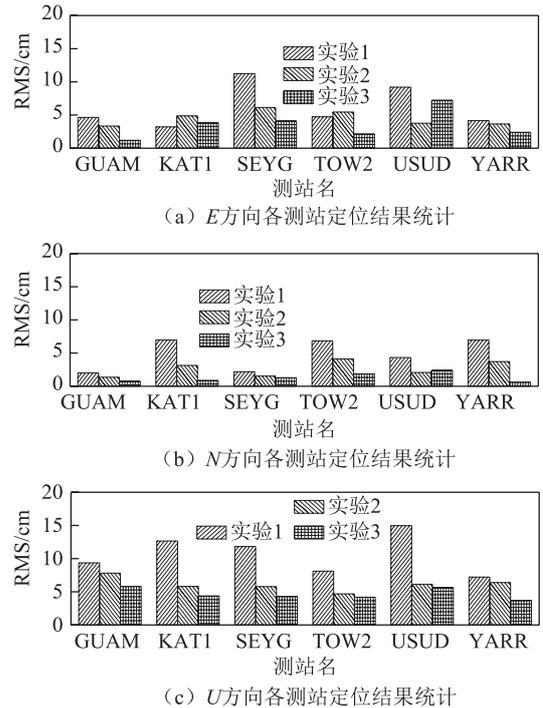


图 6 各测站在 E、N、U 方向的实时动态 PPP 定位精度 RMS 统计

表 2 所有测站实时动态 PPP 的 RMS 平均精度统计

单位: cm

钟差产品	不同组合下、不同方向的定位精度					
	E 方向		N 方向		U 方向	
	BDS-2	BDS-2/BDS-3	BDS-2	BDS-2/BDS-3	BDS-2	BDS-2/BDS-3
WUM 事后精密钟差		3.47		1.30		4.66
实时估计钟差	6.20	4.54	4.88	2.66	11.89	5.21
差值	2.73	1.07	3.58	1.36	7.23	0.55

从图 6 可以看出, 大部分测站 BDS-2 实时动态 PPP 定位精度, 在水平方向优于 10 cm, 高程方向优于 15 cm。随着 BDS-3 卫星的加入, 大部分测站 BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP 定位精度在水平方向优于 5 cm, 高程方向优于 10 cm。相对于 BDS-2 单系统, 定位精度在水平和高程方向均有提升。从表 2 的所有测站实时动态 PPP 的

RMS 平均可以看出, 与使用 WUM 事后精密钟差产品进行的 BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP 定位结果相比, 使用 BDS-2/BDS-3 组合实时估计的卫星钟差、分别进行的 BDS-2、BDS-2/BDS-3 实时动态 PPP 定位精度, 在 E、N、U 方向上均有减弱, 考虑到年积日第 288 天实时估计的卫星钟差 STD 在 0.2 ns (等效距离为 6 cm) 以内, 这种

定位结果差别,能够进一步说明实时估计的钟差与事后钟差差异不大,符合效果很好。所有测站 BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP 的 RMS 平均定位精度,在 E 、 N 、 U 方向上分别达到约 4.54、2.66、6.11 cm,相对于 BDS-2 单系统的 RMS 平均定位精度,在 E 、 N 、 U 方向上分别提升了 26.77%、45.49%、56.18%。同时对所有测站的实时动态 PPP 的平均收敛时间进行统计,当有连续超过 20 个历元的定位精度优于 10 cm 时,则认为达到收敛。所

有测站 BDS-2 实时动态 PPP,在 E 、 N 、 U 方向上的平均收敛分别约为 73、50、104 min, BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP,在 E 、 N 、 U 方向上的平均收敛时间相对于 BDS-2 分别提升了 56.16%、48.00%、50.96%。

同时以 SEYG、TOW2 测站为例,图 7 和图 8 分别给出了 SEYG、TOW 两测站 BDS-2、BDS-2/BDS-3 实时动态 PPP,在 E 、 N 、 U 方向上的定位误差时间序列以及相应的可见卫星数目。

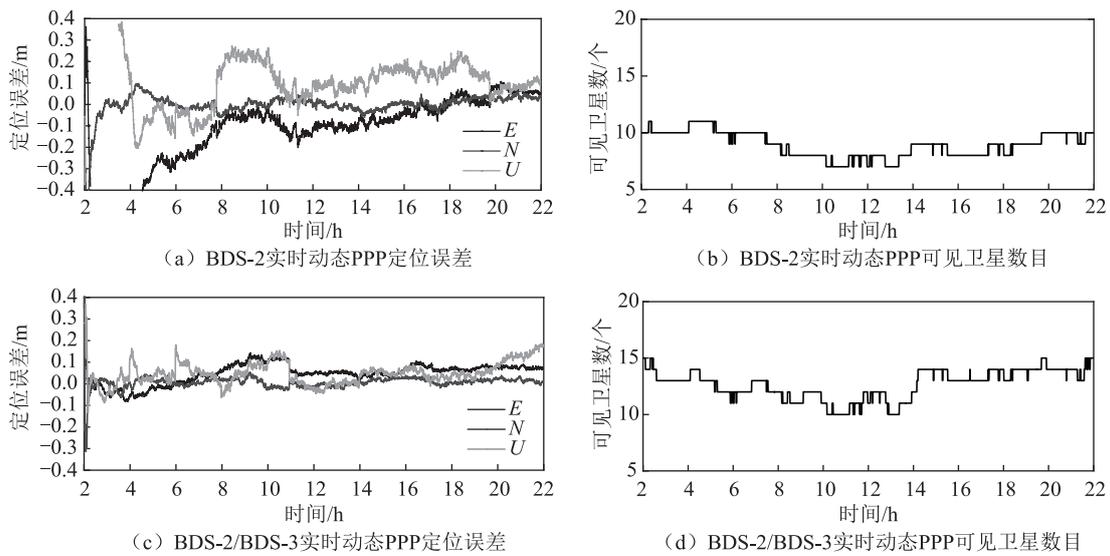


图 7 SEYG 测站实时动态 PPP 时间序列

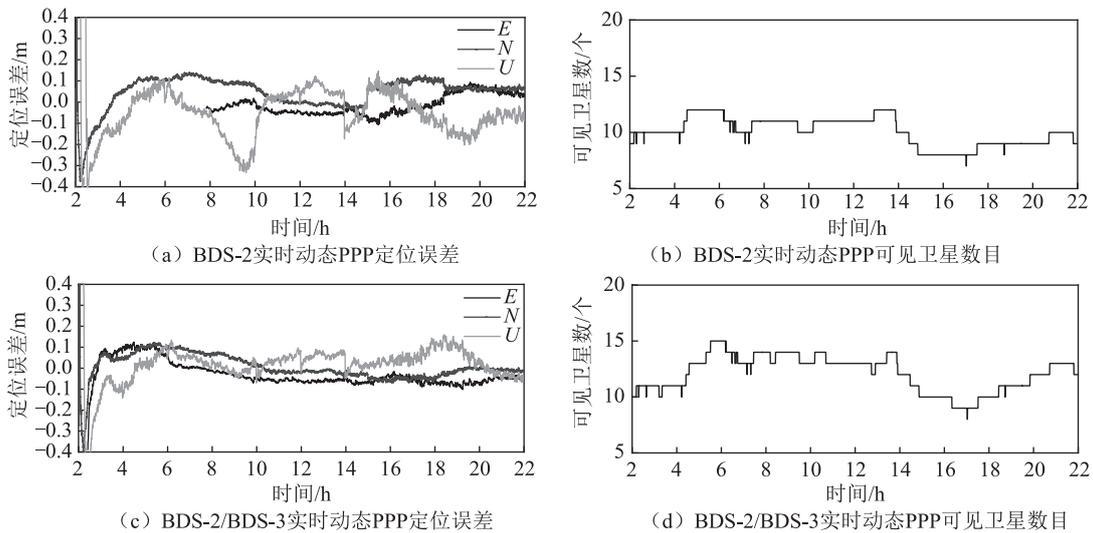


图 8 TOW2 测站实时动态 PPP 时间序列

从图 7 和图 8 可以看出, BDS-3 卫星的加入,使得可观测的卫星数增加,能够提高观测数据的数量与质量,加快收敛时间,对提高高程方向定位精度的效果尤为明显,同时也能够在较长时间内,保持稳定的定位性能。因此,相对于 BDS-2 实时动态 PPP, BDS-2/BDS-3 组合实时

动态 PPP 能够取得更短的收敛时间和更优的定位精度。

4 结束语

本文采用 MGEX 和 iGMAS 的 68 个跟踪站的观测数据,实现了 BDS-2、BDS-2/BDS-3 组合实时

精密卫星钟差估计, 利用 6 个测站的观测数据进行实时动态 PPP 模拟实验, 对目前 BDS-3 实时卫星钟差的定位服务性能以及对 BDS-2 的提升幅度进行了分析, 得到以下结论:

1) BDS-2、BDS-2/BDS-3 组合实时精密卫星钟差估计的卫星钟差产品的 STD 均优于 0.5 ns, BDS-2/BDS-3 组合估计的实时卫星钟差 STD 相对

于 BDS-2 单系统平均提升了 18%。

2) BDS-2/BDS-3 组合实时动态 PPP 在 E 、 N 、 U 方向上的 RMS, 分别为 4.54、2.66、6.11 cm, 相对于 BDS-2 单系统的相应结果分别提升了 26.77%、45.49%、56.18%, 平均收敛时间分别提升 56.16%、48.00%、50.96%。

参考文献

- [1] FU W J, HUANG G W, ZHANG Q, et al. Multi-GNSS real-time clock estimation using sequential least square adjustment with online quality control[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 963-976.
- [2] 郭海荣. 导航卫星原子钟时频特性分析理论与方法研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2006.
- [3] 黄观文. GNSS 星载原子钟质量评价及精密钟差算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
- [4] 宋伟伟. 导航卫星实时精密钟差确定及实时精密单点定位理论方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2011.
- [5] ZHANG B, JIA X L, SUN F P, et al. Performance of BeiDou-3 satellites: signal quality analysis and precise orbit determination[J]. *Adv Space Res*, 2019, 64: 687-695.
- [6] JIAO G Q, SONG S L, GE Y L, et al. Assessment of BeiDou-3 and multi-GNSS precise point positioning performance[J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2496.
- [7] 戴金倩, 吴迪, 戴小蕾, 等. BDS-3 实时精密单点定位精度分析[J]. *测绘通报*, 2020(1): 30-34.
- [8] GE M R, CHEN J P, DOUSA J, et al. A computationally efficient approach for estimating high-rate satellite clock corrections in real-time[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(1): 9-17.
- [9] 赵齐乐, 戴志强, 王广兴, 等. 利用非差观测量估计北斗卫星实时精密钟差[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2016, 41(5): 686-691.
- [10] 李星星, 徐运, 王磊. 非差导航卫星实时/事后精密钟差估计[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2010, 35(6): 661-664.
- [11] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2002.
- [12] FU W J, YANG Y X, ZHANG Q, et al. Real-time estimation of BDS/GPS high-rate satellite clock offsets using sequential least squares[J]. *Adv Space Res*, 2018, 62(2): 477-487.
- [13] YANG Y X, HE H B, XU G H. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning[J]. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(2/3): 109-116.
- [14] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. *Manuscr Geod*, 1993, 18(2): 91-98.
- [15] 楼益栋, 施闯, 周小青, 等. GPS 精密卫星钟差估计与分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(1): 88-91.
- [16] 戴志强. GNSS 实时精密定位服务系统若干关键技术研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
- [17] HUANG G W, CUI B B, ZHANG Q, et al. An improved predicted model for BDS ultra-rapid satellite clock offsets[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 60-79.

引文格式: 袁海军, 施宏凯, 何秀凤, 等. 在线 PPP 服务系统定位和 ZTD 估计精度的比较[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 68-77. (YUAN Haijun, SHI Hongkai, HE Xiufeng, et al. Accuracy comparison of online PPP service system positioning and ZTD estimation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 68-77.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210111.

在线 PPP 服务系统定位和 ZTD 估计精度的比较

袁海军¹, 施宏凯¹, 何秀凤¹, 徐学永²

(1. 河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100; 2. 北方信息控制研究院集团有限公司, 南京 211153)

摘要: 针对不同全球卫星导航系统 (GNSS) 在线精密单点定位 (PPP) 服务系统间的服务特性及性能等存在差异的问题, 提出对 GNSS 在线 PPP 服务系统的性能进行评估: 比较分析 5 种服务系统 (APPS、magicGNSS、CSRS-PPP、Net_Diff、RTX-PP) 的服务特性; 并分析评估不同服务系统间的动态、静态定位精度和天顶对流层延迟 (ZTD) 精度。实验结果表明: APPS、magicGNSS、CSRS-PPP 和 Net_Diff 服务系统动态定位均可达到分米级精度, 以 CSRS-PPP 服务系统表现最优; 5 种服务系统静态定位均可达到厘米级精度, APPS 和 RTX-PP 服务系统静态定位精度明显优于其他系统, 更能满足用户厘米甚至毫米级定位的需求; APPS、magicGNSS 和 CSRS-PPP 服务系统解算的 ZTD 具有较高的精度, 与国际 GNSS 服务 (IGS) 组织发布的 ZTD 产品也具有较高的一致性。

关键词: 精密单点定位; 在线解算系统; 动态定位; 静态定位; 对流层延迟

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0068-10

Accuracy comparison of online PPP service system positioning and ZTD estimation

YUAN Haijun¹, SHI Hongkai¹, HE Xiufeng¹, XU Xueyong²

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Northern Information Control Research Institute Group Co., Ltd., Nanjing 211153, China)

Abstract: Aiming at the problem of different performances of Global Navigation Satellite System (GNSS) online Precise Point Positioning (PPP) service systems, the paper proposed to evaluate the performances of the systems: the service characteristics of five service systems (APPS, magicGNSS, CSRS-PPP, Net_Diff, RTX-PP) were comparatively analyzed; and the accuracy of kinematic and static positioning and Zenith Tropospheric Delay (ZTD) between different service systems was evaluated. Experimental result showed that: the kinematic positioning accuracy of the four service systems (APPS, magicGNSS, CSRS-PPP, Net_Diff) could reach the decimeter level, among which the CSRS-PPP service system would be the best; moreover, the static positioning accuracy of the five service systems could all reach the centimeter level, among which the systems of APPS and RTX-PP would be significantly better than the other systems, even meeting the needs of centimeter-level or millimeter-level positioning; meanwhile, the ZTDs of APPS, magicGNSS and CSRS-PPP service systems would have high accuracy, which could be high consistent with the ZTD products released by IGS as well.

Keywords: precision point positioning; online solving system; kinematic positioning; static positioning; tropospheric delay

收稿日期: 2020-05-25

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (41830110)。

第一作者简介: 袁海军 (1998—), 男, 江西抚州人, 硕士研究生, 研究方向为卫星导航与定位。

通信作者简介: 何秀凤 (1962—), 女, 江苏泰州人, 博士, 教授, 研究方向为卫星导航与定位、变形监测技术、InSAR 及 GPS 集成技术。

0 引言

自从 20 世纪 90 年代末, 美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 的学者宗伯格 (Zumberge) 提出精密单点定位 (precision point positioning, PPP) 技术以来^[1], 全球卫星导航系统 (global satellite navigation system, GNSS) PPP 技术逐渐成为卫星导航定位的热门研究领域之一。PPP 技术是指通过利用单台接收机采集的伪距和载波相位观测值, 及国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 等组织提供的精密星历和卫星钟差等产品, 对各项误差综合引入外部多项改正来实现高精度单点定位。和传统的差分相对定位不同, PPP 技术可实现利用单台 GNSS 接收机进行高精度的绝对单点定位, 已广泛应用到精密时间传递、地震监测、电离层建模、水汽监测等方面, 具有重要的应用前景^[2]。常用高精度数据处理软件有伯尔尼 (BERNESE)、加米特 (GAMIT)、吉普

赛 (GIPSY) 及攀达 (PANDA) 等, 这些处理软件操作难度较大, 要求操作人员掌握扎实的专业知识^[3]。随着计算机和互联网等技术的高速发展, 国内外一些科研机构向 PPP 用户推出了免费的 GNSS 在线 PPP 服务系统^[4]。这些服务系统不要求用户掌握具体的高精度数据处理过程, 只需用户将 GNSS 观测文件上传至各服务系统, 即可得到相应解算结果。常用 GNSS 在线 PPP 服务系统主要包括自动精密定位服务 (automatic precision positioning service, APPS)、马吉克 (magic) 精密单点定位解算服务 (magic precise point positioning solution, magic GNSS)、加拿大空间参考系统精密定位 (Canadian spatial reference system-precise point positioning, CSRS-PPP)、天宝中心实时扩展后处理 (Trimble centerpoint real time extended post-processing, RTX-PP) 等^[5], 对这些服务系统按照所属机构的不同进行归类, 结果如表 1 所示。

表 1 GNSS 在线 PPP 服务系统归类

服务系统名称	所属机构	系统网址
APPS	美国喷气动力实验室 (Jet Propulsion Laboratory)	https://apps.gdgps.net/apps_howtouse.php
magicGNSS	GMV 航空航天与国防 (GMV Aerospace and Defence)	https://magicgnss.gmv.com/ppp
CSRS-PPP	加拿大自然资源部 (Natural Resources Canada)	https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php
Net_Diff	上海天文台 GNSS 分析中心 (GNSS Analysis Center at Shanghai Astronomical Observatory)	http://center.shao.ac.cn/shao_gnss_ac/
RTX-PP	美国天宝 (Trimble) 公司	https://www.trimblertx.com/UploadForm.aspx

目前已有不少学者对这些 GNSS 在线 PPP 服务系统的服务性能及可靠性进行了分析。研究表明, 不同服务系统间解算结果的定位精度及稳定性存在差异, 但均能实现静态定位厘米级及动态定位分米级的精度, 解算的天顶对流层延迟 (zenith tropospheric delay, ZTD) 也具有较高的精度^[6-10]。另外, 这些服务系统在南极地区的静态定位精度也可达到分米级精度^[11]。也有学者通过研究发现, 这些服务系统均可对钟跳数据进行一定程度的处理, 但不同服务系统间的处理能力存在差异, 以 CSRS-PPP 服务系统的稳健性最好, 可有效处理三类毫秒级钟跳的数据^[12]。上述研究都是基于部分 GNSS 在线 PPP 服务系统或单天 GNSS 观测数据展开的, 此外, 随着 PPP 技术的不断发展, 各服务系统及其所依附的数据处理软件均有不同程度的更新, 导致各服务系统的服务特性和定位性能均有所改变。近期上海天文台 GNSS 分析中心

(GNSS Analysis Center at Shanghai Astronomical Observatory, SHAO) 也新推出了 Net_Diff 在线精密单点定位服务 (online PPP service of Net_Diff, Net_Diff)。因此, 有必要利用多天多站的 GNSS 观测数据, 对 GNSS 在线 PPP 服务系统的服务特性及定位性能等进行重新评估。

本文首先对 GNSS 在线 PPP 服务系统 (APPS、magicGNSS、CSRS-PPP、Net_Diff、RTX-PP) 的服务特点及处理模式进行简要概述, 然后选取全球均匀分布的 18 个 IGS 站的 GNSS 观测数据, 将观测文件分别提交到各服务系统进行动态及静态定位实验, 利用各服务系统的解算结果在东 (E)、北 (N)、天 (U) 三个方向上的定位精度来评估各服务系统的定位性能, 并从各服务系统静态定位的解算结果中提取出相应 ZTD, 以 IGS 发布的 ZTD 产品为参考值, 比较分析不同服务系统间的 ZTD 精度。

1 GNSS 在线 PPP 服务系统

PPP 用户只须利用单台 GNSS 接收机采集原始观测数据, 把转换为接收机自主交换格式 (receiver independent exchange format, RINEX) 的观测数据通过网页、Ftp 或邮箱等方式提交给各服

务系统, 即可通过网页或邮件等方式获取各服务系统的解算结果^[13]。这些 GNSS 在线 PPP 服务系统 (APPS、magicGNSS、CSRS-PPP、Net_Diff、RTX-PP) 的服务特点存在一定的差异, 各系统服务特点的比较如表 2 所示。

表 2 GNSS 在线 PPP 服务系统的服务特点对比

服务系统名	支持的定位模式	支持的卫星导航系统	支持的文件格式	输出结果
APPS	静态、动态	全球定位系统 (global positioning system, GPS)	RINEX 2	国际地球参考框架 (international terrestrial reference frame, ITRF) 2014 中的空间直角坐标、大地坐标及对应方差、对流层延迟和钟差等
magic GNSS	静态、动态	GPS, 格洛纳斯卫星导航系统 (global navigation satellite system, GLONASS) 及伽利略卫星导航系统 (Galileo navigation satellite system, Galileo)	RINEX 2 RINEX 3	ITRF2014 中的空间直角坐标、大地坐标及对应方差、对流层延迟、钟差和观测卫星数等
CSRS-PPP	静态、动态	GPS, GLONASS	无明确限制	ITRF2014 中的大地坐标、对流层延迟、钟差及对应方差、观测卫星数和几何精度衰减因子等
Net_Diff	静态、动态	GPS, GLONASS, Galileo, 北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 及日本准天顶卫星系统 (quasi-zenith satellite system, QZSS)	RINEX 2 RINEX 3	ITRF2014 中的空间直角坐标、大地坐标等
RTX-PP	静态	GPS, GLONASS, Galileo, BDS, QZSS	RINEX 2 RINEX 3	ITRF2014 中的空间直角坐标、大地坐标和观测卫星数等

由表 2 可知: APPS、magicGNSS、CSRS-PPP 和 Net_Diff 服务系统均支持静态和动态定位, RTX-PP 服务系统仅支持静态定位; Net_Diff 和 RTX-PP 服务系统支持四大主要导航系统, 其他服务系统仅支持部分导航系统。

另外, 这些 GNSS 在线 PPP 服务系统依附的数据处理软件、采用的定位模型、对流层延迟模型及映射函数也存在一定的差异, 如表 3 所示。根据观测测量间的组合方式及对模糊度参数的处理方式不同, 常用的 PPP 定位模型主要分为非差非组合模型、无电离层组合模型、卡尔加里大学 (The University

of Calgary, UofC) 模型和无模糊度模型^[14]。

PPP 非差非组合模型采用双频伪距和载波相位原始观测值, 对应形式为

$$\left. \begin{aligned} P_i &= \rho + c(t_r - t^s) + T + \gamma_i I_1 + d_{r,i} - d_i^s + m_i + \varepsilon_p \\ L_i &= \rho + c(t_r - t^s) + T - \gamma_i I_1 + \lambda_i N_i + D_{r,i} - D_i^s + \\ & B_{r,i} - B_i^s + M_i + \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $i=1,2$, 为各观测值的频段; P_i 、 L_i 分别为相应频段上的伪距和载波相位观测值; ρ 为信号发射时刻的卫星位置到信号接收时刻接收机位置之间的几何距离; c 为真空中的光速; t_r 、 t^s 分别

表 3 GNSS 在线 PPP 服务系统处理模式对比

服务系统名称	处理软件	定位模型	对流层模型	映射函数
APPS	GISPY	无电离层组合模型	流体静力学模型	全球投影函数 (global mapping function, GMF) 函数
magicGNSS	NAPEOS	无电离层组合模型	萨斯塔莫伊宁 (Saastamoinen) 模型	维恩纳投影函数 (Vienna mapping function, VMF) 函数
CSRS-PPP	CSRS-PPP	无模糊度模型	霍普菲尔德 (Hopfield) 模型	VMF1 函数
Net_Diff	Net_Diff	无电离层组合模型	Saastamoinen 模型	VMF1 函数
RTX-PP	RTX-PP	无电离层组合模型	无明确说明	无明确说明

为接收机钟差和卫星钟差; T 为对流层延迟影响;

I_i 是 L_i 频率上的电离层影响; $\gamma_i = \frac{f_1^2}{f_i^2}$; λ_i 、 N_i 分

别为相应载波的波长和整周模糊度; $d_{r,i}(D_{r,i})$ 、 $d_i^s(D_i^s)$ 分别为伪距(载波相位)上的接收机和卫星硬件延迟; $B_{r,i}$ 、 B_i^s 分别为载波相位上的接收机端和卫星端的初始相位偏差; m_i 、 M_i 分别为伪距和相位观测值的多路径误差; ε_{P_i} 、 ε_{L_i} 分别为伪距和相位观测值的观测噪声及未模型化误差。

非差非组合模型既可充分利用伪距和载波相位观测值中存在的有效信息, 又能有效地控制观测噪声和多路径效应不被放大; 但它引入较多未知参数, 对 PPP 解算速度和结果的稳定性有一定影响。

无电离层组合模型是应用最广泛的 PPP 定位模型, 它采用双频伪距和载波相位观测值分别构成无电离层组合, 对应形式为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{IF}} &= \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(t_r - t^s) + T + d_{r,\text{IF}} - \\ &\quad d_{\text{IF}}^s + m_{\text{IF}} + \varepsilon_{P_{\text{IF}}} \\ L_{\text{IF}} &= \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(t_r - t^s) + T + \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}} + \\ &\quad D_{r,\text{IF}} - D_{\text{IF}}^s + B_{r,\text{IF}} - B_{\text{IF}}^s + M_{\text{IF}} + \varepsilon_{L_{\text{IF}}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: P_{IF} 、 L_{IF} 分别为伪距和载波相位的无电离层组合观测值; $d_{r,\text{IF}}(D_{r,\text{IF}})$ 、 $d_{\text{IF}}^s(D_{\text{IF}}^s)$ 分别为无电离层组合中伪距(载波相位)上的接收机和卫星硬件延迟; $B_{r,\text{IF}}$ 、 B_{IF}^s 分别为无电离层组合中载波相位上的接收机端和卫星端的初始相位偏差; λ_{IF} 、 N_{IF} 分别为无电离层组合中载波的波长和整周模糊度; m_{IF} 、 M_{IF} 分别为无电离层组合下的伪距和相位观测值的多路径误差; $\varepsilon_{P_{\text{IF}}}$ 、 $\varepsilon_{L_{\text{IF}}}$ 分别为无电离层组合下的伪距和相位观测值的观测噪声及未模型化误差。

无电离层组合模型消除了一阶电离层延迟对 PPP 的影响, 但它会放大原始伪距和载波相位观测值的观测噪声, 对位置参数的解算有较大影响。

Uofc 模型由加拿大卡尔加里大学(The University of Calgary)高扬教授提出, 该模型也是 1 种无电离层组合模型, 和传统的无电离层组合模型不同, 它还采用了双频伪距和载波相位平均形式的组合^[15], 对应形式为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{IF},i} &= \frac{P_i + L_i}{2} = \rho + c(t_r - t^s) + T + \frac{\lambda_i N_i}{2} + m_{\text{IF}} + \varepsilon_{P_{\text{IF}}} \\ L_{\text{IF}} &= \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(t_r - t^s) + T + \lambda_{\text{IF}} N_{\text{IF}} + M_{\text{IF}} + \varepsilon_{L_{\text{IF}}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Uofc 模型消除了一阶电离层延迟的影响, 还可降低伪距观测值的观测噪声, 但仍存在系统性延迟和误差, 这些偏差和模糊度参数难以分离, 使得模糊度参数不具备整数特性。

无模糊度模型采用伪距无电离层组合观测值和载波相位历元间差分观测值, 对应形式为

$$\left. \begin{aligned} P_{\text{IF}} &= \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c(t_r - t^s) + T + m_{\text{IF}} + \varepsilon_{P_{\text{IF}}} \\ \Delta L_{\text{IF}} &= L_{\text{IF}}(k) - L_{\text{IF}}(k-1) = \Delta \rho(k, k-1) + \\ &\quad c(\Delta t_r(k, k-1) - \Delta t^s(k, k-1)) + \Delta T + M_{\text{IF}} + \varepsilon_{L_{\text{IF}}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

无模糊度模型可消除模糊度参数, 解决了单站模糊度难以固定的问题, 但它会引起观测值间的数学相关性, 使得各未知参数求解精度降低。

2 动态定位精度评估

实验选取全球均匀分布的 18 个 IGS 站的 GNSS 观测数据, 所选 IGS 站点分布如图 1 所示, 其中横轴是经度, 纵轴是纬度, 观测时间为 24 h (2019-09-01, 年积日为 2019 年第 244 天)。

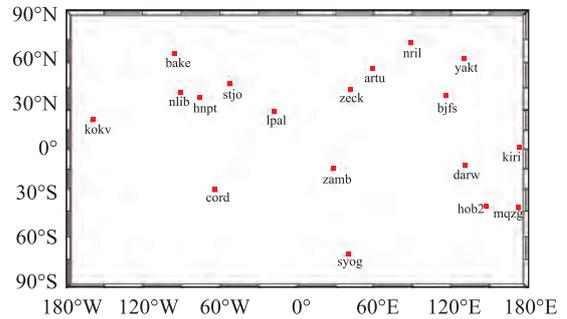


图 1 实验选取 IGS 站点分布

由于 RTX-PP 服务系统不支持动态定位模式, 故实验仅比较分析其他 4 种服务系统的动态定位性能。首先利用网页上传或邮件发送的方式, 将观测文件分别提交到 APPS、magicGNSS、CSRS-PPP 和 Net_Diff 服务系统中进行在线动态定位解算, 并下载获取各服务系统的解算结果, 然后将各服务系统解算的测站坐标与 IGS 发布的周解文件中各测站参考坐标求差, 并将差值转换到 E 、 N 、 U 三个方向上进行比较。其中将 E 、 N 、 U 三个方向上定位偏差首次小于 10 cm 且其后 20 个历元都小于 10 cm 视为定位收敛^[16], 各服务系统动态定位结果的均方根 (root mean square, RMS) 是指定位首次收敛后计算得到的 RMS, 实验结果如表 4 和图 2 所示, 其中动态定位 RMS 相对最小和最大的 2 个测站(hob2、bake)定位偏差时序图如图 3 和图 4 所示。

表4 GNSS 在线 PPP 服务系统动态定位

解算系统	RMS 均值对比		
	E 方向的 RMS 均值	N 方向的 RMS 均值	U 方向的 RMS 均值
APPS	3.94	5.07	14.79
magicGNSS	2.69	2.51	4.50
CSRS-PPP	0.78	0.75	1.81
Net_Diff	5.32	3.74	12.51

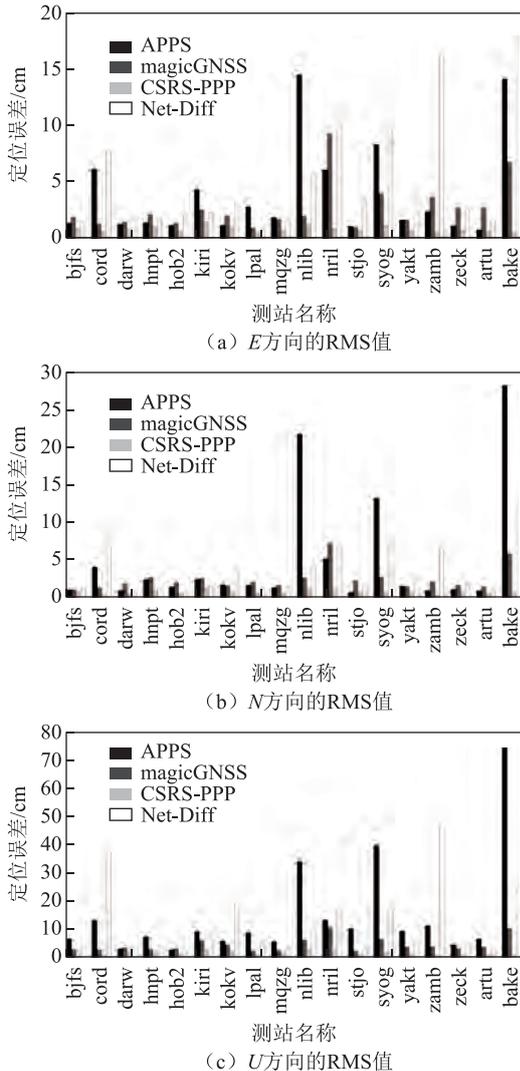


图2 GNSS 在线 PPP 服务系统各测站动态定位 RMS 对比

由表4和图2可知：4种服务系统动态定位均达到了分米级甚至厘米级精度；但不同服务系统间动态定位性能存在差异，其中以CSRS-PPP服务系统动态定位性能表现最优，magicGNSS服务系统次之，APPS和Net_Diff服务系统相对较差。APPS服务系统在N和U方向上的测站平均误差最大，分别约为5.07和14.79cm，其中bake测站在U方向上达到了最大误差74.28cm。CSRS-PPP

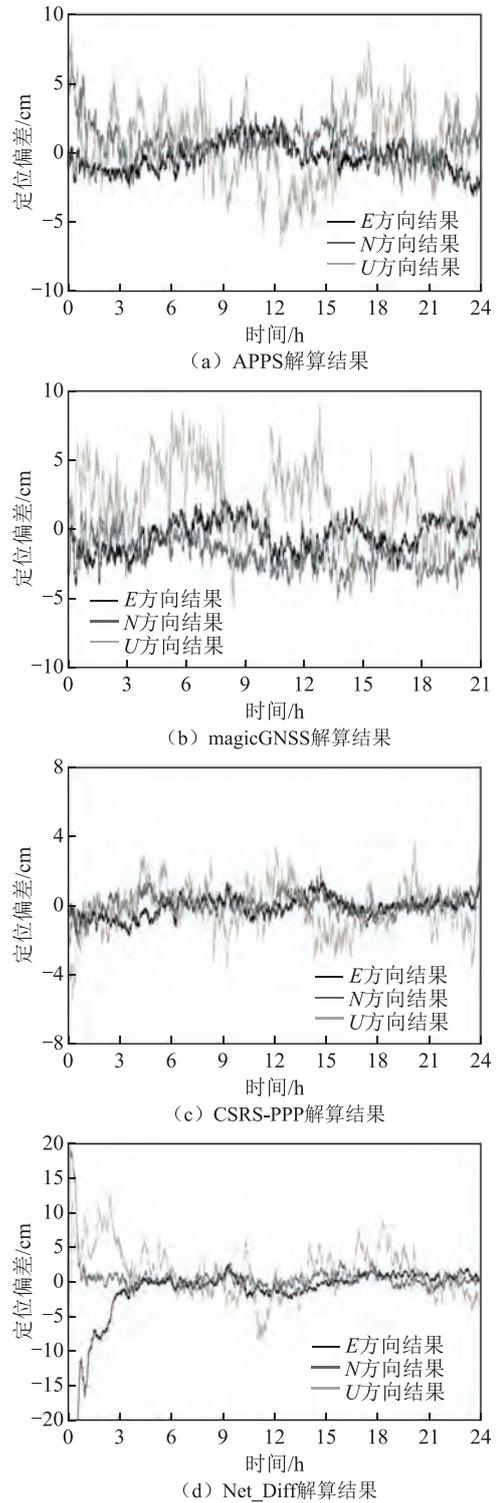


图3 GNSS 在线 PPP 服务系统 hob2 测站动态定位偏差对比

服务系统在E、N、U三个方向上的测站平均误差最小，分别约为0.78、0.75和1.81cm，全部测站都达到了厘米级定位精度。Net_Diff服务系统在E方向上的测站平均误差最大，约为5.32cm，其中大部分测站达到了厘米级定位精度。另外，APPS和Net_Diff服务系统的部分测站(cord、nlib、nril、

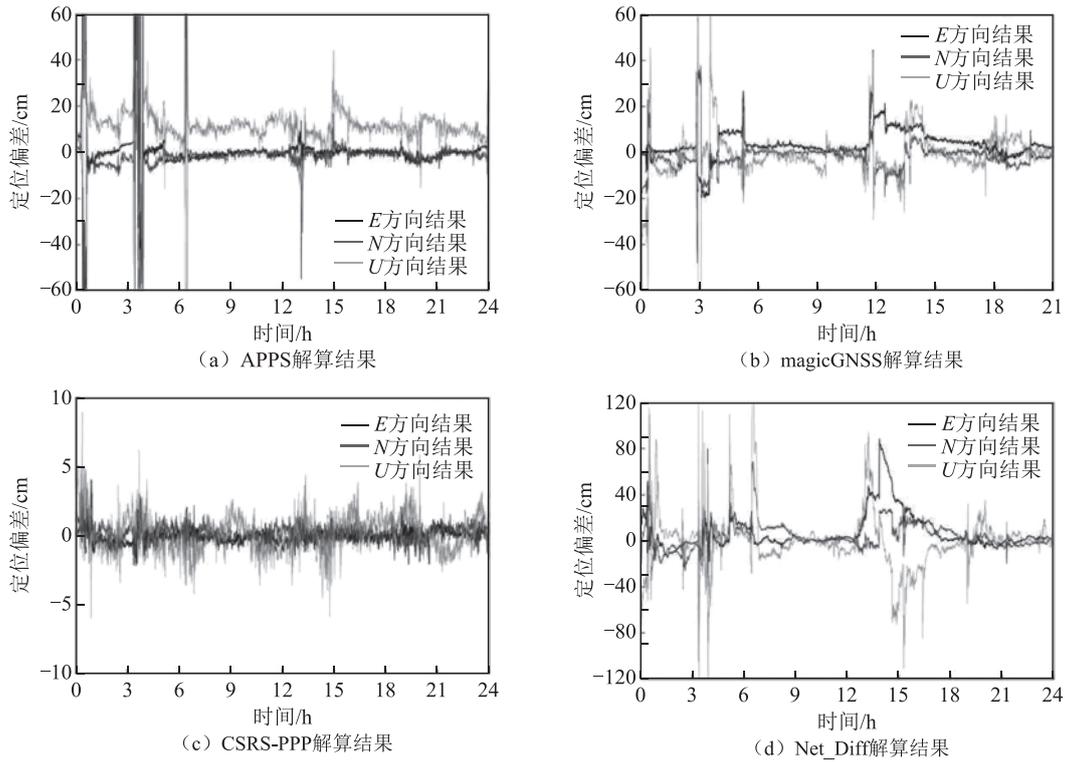


图 4 GNSS 在线 PPP 服务系统 bake 测站动态定位偏差对比

syog、zamb、bake) 动态定位表现出相对较大的误差, 其中近极地或极地区域测站(nril、soyg、bake) 定位误差相对较大与其所处地理纬度有关, cord、nlib 和 zamb 测站在动态定位过程中, 出现定位首次收敛后又信号失锁而重新初始化的情况, 原因可能是观测数据欠佳及系统对此处理能力较弱, 而本实验 RMS 是定位首次收敛后计算得到, 因此导致动态定位误差相对较大。

3 静态定位精度评估

实验选取与动态定位实验相同的 IGS 站, 7 d 的

GNSS 观测数据, 每天的观测时间为 24 h, 时间间隔为 2019-09-01—2019-09-07, 即年积日为 2019 年第 244—250 天。首先利用网页上传或邮件发送的方式, 将 7 d 的观测文件提交到 APPS、magicGNSS、CSRS-PPP、Net_Diff 和 RTX-PP 服务系统中进行在线静态定位解算, 并下载获取各服务系统的解算结果, 然后将各服务系统解算的测站坐标与 IGS 发布的周解文件中测站参考坐标求差, 并将差值转换到 E、N、U 三个方向上。各服务系统对同一天所有测站在 3 个方向上的定位偏差分别取平均值进行比较分析, 实验结果如表 5 至表 6 和图 5 所示。

表 5 GNSS 在线 PPP 服务系统静态定位 E 方向平均偏差对比

单位: cm

年积日序号	不同服务系统的解算结果				
	APPS	magicGNSS	CSRS-PPP	Net_Diff	RTX-PP
第 244 天	0.19	1.11	0.70	1.10	0.34
第 245 天	0.14	1.11	0.84	0.97	0.45
第 246 天	0.20	1.04	0.78	1.01	0.38
第 247 天	0.16	1.17	0.69	1.13	0.44
第 248 天	0.17	1.20	0.75	1.14	0.38
第 249 天	0.13	1.41	0.78	0.97	0.39
第 250 天	0.15	2.02	0.64	0.96	0.32
均值	0.16	1.29	0.74	1.04	0.39

表6 GNSS在线PPP服务系统静态定位N方向平均偏差对比

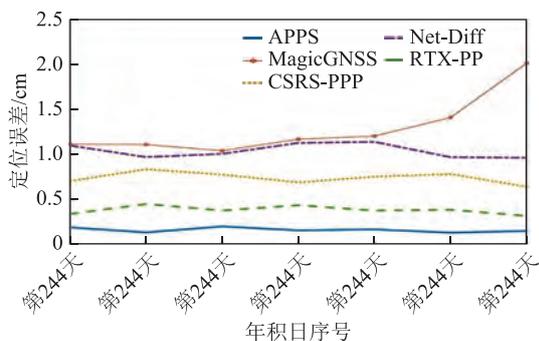
单位: cm

年积日序号	不同服务系统的解算结果				
	APPS	magicGNSS	CSRS-PPP	Net_Diff	RTX-PP
第244天	0.18	1.43	0.40	0.51	0.30
第245天	0.18	1.48	0.38	0.64	0.33
第246天	0.23	1.36	0.41	0.57	0.26
第247天	0.13	1.23	0.40	0.53	0.25
第248天	0.29	1.17	0.44	0.65	0.24
第249天	0.19	1.05	0.36	0.52	0.28
第250天	0.24	1.50	0.42	0.55	0.28
均值	0.21	1.32	0.40	0.57	0.28

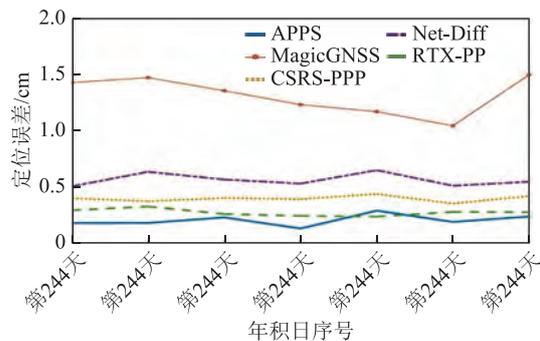
表7 GNSS在线PPP服务系统静态定位U方向平均偏差对比

单位: cm

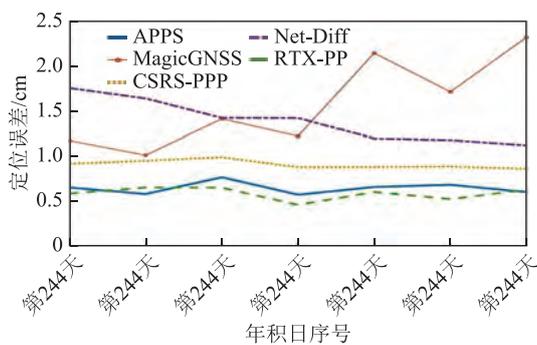
年积日序号	不同服务系统的解算结果				
	APPS	magicGNSS	CSRS-PPP	Net_Diff	RTX-PP
第244天	0.65	1.17	0.91	1.75	0.59
第245天	0.58	1.01	0.95	1.63	0.65
第246天	0.77	1.41	0.99	1.42	0.65
第247天	0.57	1.22	0.88	1.42	0.46
第248天	0.66	2.14	0.88	1.19	0.60
第249天	0.68	1.71	0.88	1.17	0.52
第250天	0.60	2.31	0.86	1.12	0.63
均值	0.64	1.57	0.91	1.39	0.59



(a) E方向平均偏差



(b) N方向平均偏差



(c) U方向平均偏差

图5 GNSS在线PPP解算系统静态定位7d平均偏差对比

由实验结果可知, 5 种服务系统静态定位的解算结果在 E 、 N 、 U 三个方向上均达到了毫米至厘米级精度, 但不同服务系统间定位偏差存在差异。其中 APPS 和 RTX-PP 服务系统表现出相对最好的静态定位性能, 7 d 的定位偏差也最稳定; CSRS-PPP 和 Net_Diff 服务系统次之; magicGNSS 服务系统相对最差, 静态定位偏差相对较大, 7 d 的定位偏差也相对较不稳定。APPS、CSRS-PPP 和 RTX-PP 服务系统在 E 、 N 、 U 三个方向上, 7 d 的定位偏差都小于 1 cm。其中 APPS 服务系统在 E 、 N 方向上定位偏差相对最小, 7 d 的平均偏差分别约为 0.16 和 0.21 cm; RTX-PP 服务系统在 U 方向上定位偏差相对最小, 7 d 的平均偏差约为 0.59 cm; Net_Diff 服务系统在 E 、 U 方向上, 7 d 的定位偏差均小于 2 cm, N 方向上 7 d 的定位偏差均小于 1 cm; magicGNSS 服务系统在 E 、 U 方向上, 7 d 的定位偏差均小于 2.5 cm, N 方向上 7 d 的定位偏差均小于 2 cm, 3 个方向

上均在年积日第 250 天表现出相对最大的定位偏差。

4 对流层延迟估计的精度评估

实验选取与上述实验相同的 IGS 站 GNSS 观测数据, 观测时间为 24 h (2019-09-01, 年积日为 2019 年第 244 天)。由于仅有 APPS、magicGNSS 和 CSRS-PPP 服务系统的解算结果提供 ZTD, 故实验仅比较分析这 3 种服务系统解算的 ZTD 精度。首先将观测文件分别提交到这 3 种服务系统中进行静态定位解算, 并从解算结果中提取出相应 ZTD, ZTD 估计时间间隔为 5 min, 然后以 IGS 发布的 ZTD 产品为参考值, 求解出各服务系统解算的 ZTD 精度及与 IGS 发布的 ZTD 产品的相关系数, 实验结果如表 8 所示, 其中与 IGS 提供的 ZTD 间相关系数相对最大和最小的 2 个测站 (hob2、hnpt) 的 ZTD 估计时序图如图 6 和图 7 所示。

表 8 GNSS 在线 PPP 服务系统解算的 ZTD 与 IGS 提供的 ZTD 比较的统计结果

测站名称	APPS 的解算结果			magicGNSS 的解算结果			CSRS-PPP 的解算结果		
	最大偏差/mm	RMS/mm	相关系数	最大偏差/mm	RMS/mm	相关系数	最大偏差/mm	RMS/mm	相关系数
bjfs	13.1	5.73	0.83	34.5	9.64	0.70	21.4	7.07	0.77
cord	20.4	5.73	0.78	18.7	4.98	0.86	20.3	6.08	0.78
darw	9.9	4.61	0.98	25.7	5.54	0.97	18.0	5.19	0.97
hnpt	15.0	5.87	0.56	22.2	5.66	0.58	18.8	5.74	0.60
hob2	7.7	3.61	0.99	21.4	3.81	0.99	9.3	3.46	0.99
kiri	15.2	6.48	0.99	33.7	11.64	0.95	39.8	14.35	0.92
kokv	14.2	7.04	0.93	17.2	6.09	0.95	42.8	9.22	0.87
lpal	12.0	5.78	0.93	13.8	5.41	0.93	33.3	6.63	0.89
mqzg	7.6	4.03	0.91	16.2	4.81	0.86	19.0	5.09	0.84
nlib	31.3	11.48	0.90	32.3	11.34	0.88	38.5	14.83	0.79
nril	8.4	3.37	0.99	31.0	7.08	0.95	48.1	6.08	0.95
stjo	10.3	5.41	0.94	15.5	6.32	0.92	14.2	6.24	0.92
syog	13.0	5.32	0.73	15.4	5.93	0.76	26.6	9.33	0.71
yakt	7.7	3.03	0.87	11.8	4.63	0.68	+9.8	4.79	0.66
zamb	16.7	6.80	0.57	16.2	7.27	0.61	30.7	6.40	0.74
zeck	15.3	5.73	0.94	20.3	7.11	0.93	23.1	6.00	0.93
bake	37.0	9.47	0.74	34.9	10.85	0.61	38.0	9.43	0.68
artu	12.8	4.52	0.71	14.6	4.79	0.74	10.0	4.00	0.76
均值	14.9	5.78	0.85	22.0	6.83	0.83	25.7	7.22	0.81

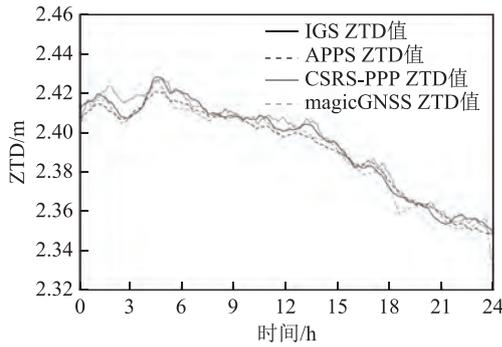


图6 GNSS 在线 PPP 服务系统 hob2 测站 ZTD 估计值与 IGS 提供的 ZTD 比较

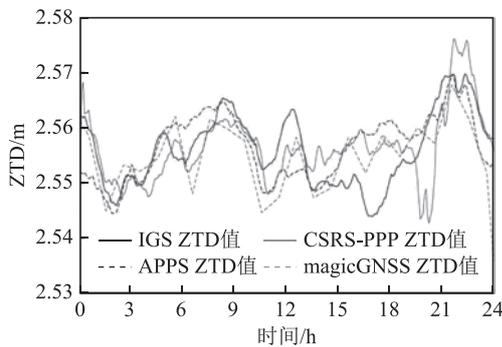


图7 GNSS 在线 PPP 服务系统 hnpt 测站 ZTD 估计值与 IGS 提供的 ZTD 比较

由表 8 可知, 3 种服务系统解算的 ZTD 均具有较高的精度, 与 IGS 发布的 ZTD 产品也具有较高的一致性。其中 APPS 服务系统解算的 ZTD 精度相对最优, 大部分测站的 ZTD 精度均优于 9.5 mm, RMS 均值约为 5.78 mm, 与 IGS 发布的 ZTD 产品平均相关系数高达 0.85; magic GNSS 服务系统解算的 ZTD 精度略低于 APPS 服务系统, 全部测站的 ZTD 精度均优于 12 mm, RMS 均值约为 6.83 mm, 平均相关系数为 0.83; CSRS-PPP 服务系统解算的 ZTD 精度相对最差。另外, 位于美国东部的 hnpt 和 nlib 测站表现出相对较差的一致性和估计精度, 原因是美国东部在实验时段内遭受了飓风, 导致 2 个测站在实验时段内所处环境及湿度等因素发生变化。

5 结束语

本文阐述了 5 种 GNSS 在线 PPP 服务系统 (APPS、magicGNSS、CSRS-PPP、Net_Diff、RTX-PP) 的服务特点、采用的定位模型、对流层延迟模型及映射函数的差异; 利用全球均匀分布的 18 个 IGS 测站的 GNSS 观测数据, 分别进行了动态和静态定位实验, 对比分析了这些服务系统动态和静态定位在 E 、 N 、 U 三个方向上的定位精度; 并从静态定位解算结果中提取出相应 ZTD, 对比分析了相应的 ZTD 精度及与 IGS 发布的 ZTD 产品间的相关系数, 可得以下结论:

1) APPS、magicGNSS、CSRS-PPP 和 Net_Diff 服务系统动态定位均达到了分米级定位精度, 其中 CSRS-PPP 服务系统动态定位性能最优, 在 E 、 N 、 U 三个方向上的平均误差最小, 分别约为 0.78、0.75 和 1.81 cm。magicGNSS 服务系统次之, APPS 和 Net_Diff 服务系统动态定位性能相对最差。

2) 5 种 GNSS 在线 PPP 服务系统静态定位精度均达到了厘米级甚至毫米级, 其中 APPS 和 RTX-PP 服务系统静态定位性能相对最优, 7 d 的静态定位偏差相对稳定, magicGNSS 服务系统静态定位偏差相对最大, 7 d 的静态定位偏差较不稳定。

3) 新推出的 Net_Diff 服务系统动态定位精度相对较差, 但大部分测站都达到了厘米级定位精度, 在 E 、 U 方向上, 7 d 静态定位的定位偏差均小于 2 cm, N 方向上 7 d 的定位偏差均小于 1 cm, 静态定位性能较好且支持四大主要导航系统, 在静态定位方面具有相对较大的适用性。

4) APPS、magicGNSS 和 CSRS-PPP 服务系统解算的 ZTD 均具有较高的精度, 与 IGS 发布的 ZTD 产品也具有较高的一致性。其中 APPS 服务系统解算的 ZTD 精度相对最优, CSRS-PPP 服务系统相对最差。

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] 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.
- [3] 姜卫平. GNSS 基准站网数据处理方法与应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2017: 21-48.
- [4] DOUCET K, HERWIG M, KIPKA A, et al. Introducing ambiguity resolution in webhosted global multi-GNSS precise positioning with Trimble RTX-PP[C]//The Institute of Navigation. Proceedings of the 25th International Technical

- Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2012). Nashville, TN: the Institute of Navigation, 2012: 1115-1125.
- [5] 高攀, 郭斐, 吕翠仙, 等. 精密单点定位在线 GNSS 数据处理精度比较分析[J]. 全球定位系统, 2011, 36(3): 21-25.
- [6] 王挥云. 4 种在线 PPP 服务系统定位精度分析[J]. 测绘通报, 2016(7): 66-69.
- [7] 周要宗, 匡翠林, 刘紫平, 等. GNSS 在线 PPP 数据处理系统性能分析[J]. 导航定位学报, 2018, 6(3): 113-118.
- [8] 陈良, 赵齐乐, 赵颖. 四种在线精密单点定位服务系统的比较与精度分析[J]. 测绘信息与工程, 2011, 36(6): 11-12.
- [9] 韦依坪, 吴远昆, 严丽. PPP 在线解算服务系统性能分析[J]. 导航定位学报, 2019, 7(2): 124-130.
- [10] 夏朋飞, 蔡昌盛, 陈必焰. 三种在线 GPS 精密单点定位软件的精度比较[J]. 全球定位系统, 2012, 37(2): 61-64.
- [11] 左耀文, 张胜凯, 鄂栋臣, 等. 南极四种在线 GPS 定位服务系统的精度比较与分析[J]. 测绘科学, 2017, 42(1): 7-14.
- [12] 郭斐, 张小红. 在线 PPP 服务系统对钟跳的处理能力分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(11): 1333-1336.
- [13] 李斐, 刘智敏, 郭金运, 等. GNSS 在线数据处理系统对比分析[J]. 全球定位系统, 2016, 41(6): 92-97.
- [14] 赵兴旺, 王胜利, 邓健, 等. 精密单点定位中 4 种函数模型解算性能分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(6): 751-756.
- [15] GAO Y, SHEN X. Improving ambiguity convergence in carrier phase-based precise point positioning[C]//The Institute of Navigation. Proceedings of the 14th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS 2001). Salt Lake City: the Institute of Navigation, 2001: 1532-1539.
- [16] 丁赫, 孙付平, 李亚萍, 等. BDS/GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型及性能分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(4): 303-307.

引文格式: 卜宇航, 李博峰, 臧楠, 等. BDS/Galileo/GPS 三频精密单点定位模型比较与分析[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 78-87. (BU Yuhang, LI Bofeng, ZANG Nan, et al. Comparison and analysis of BDS/Galileo/GPS triple-frequency precise point positioning models[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 78-87.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210112.

BDS/Galileo/GPS 三频精密单点定位模型比较与分析

卜宇航¹, 李博峰¹, 臧楠², 苟浩洋³

(1. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092; 2. 哈尔滨工程大学 智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001;
3. 山东省交通规划设计院有限公司, 济南 250031)

摘要: 为了进一步研究多系统三频精密单点定位 (PPP) 的性能, 提出对其不同数学模型的定位性能进行评估比较: 分析全球卫星导航系统 (GNSS) 原始观测方程中码硬件延迟的特性; 然后合理参数化三频 PPP 中的多频码硬件延迟; 最后给出北斗卫星导航系统 (BDS)、全球定位系统 (GPS) 和伽利略卫星导航系统 (Galileo) 三系统组合的二种可估三频 PPP 函数模型和随机模型。实验结果表明: 三频 PPP 相比于双频 PPP, 可以有效地改善定位精度及初始收敛时间, 并提高定位结果的可靠性; 三系统组合三频 PPP 静态定位在 E 、 N 和 U 方向的精度分别优于 0.8、0.5 和 1.1 cm, 动态定位分别优于 1.4、1.0 和 2.9 cm; 三系统组合三频 PPP 静态定位收敛时间优于 21.7 min, 动态定位收敛时间优于 24.0 min。

关键词: 北斗卫星导航系统; 全球定位系统; 伽利略卫星导航系统; 三频精密单点定位; 非差非组合模型; 双无电离层组合模型; 定位性能

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0078-10

Comparison and analysis of BDS/Galileo/GPS triple-frequency precise point positioning models

BU Yuhang¹, LI Bofeng¹, ZANG Nan², GUO Haoyang³

(1. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. College of Intelligent Systems Science and Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 15001, China;
3. Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250031, China)

Abstract: In order to further study the performance of multi-system triple-frequency Precise Point Positioning (PPP), the paper proposed to evaluate the positioning of different triple-frequency PPP models: the characteristics of code hardware delay in Global Navigation Satellite System (GNSS) raw observation equations were analyzed; and the multi-frequency code hardware delay of the PPP was reasonably parameterized; finally two estimable triple-frequency PPP mathematics models were given for the combination of BeiDou navigation satellite System (BDS), Galileo navigation satellite system (Galileo) and Global Positioning system (GPS). Experimental result showed that: compared with dual-frequency PPP, triple-frequency PPP could effectively improve the positioning accuracy and shorten the initial convergence time, and enhance the reliability of positioning results; meanwhile, the static positioning accuracy on E , N and U directions for the triple-frequency PPP of BDS/Galileo/GPS scheme would be better than 0.8, 0.5 and 1.1 cm, with the kinematic accuracy better than 1.4, 1.0 and 2.9 cm, respectively; moreover, the convergence time of static and kinematic positioning for triple-frequency PPP of BDS/Galileo/GPS scheme would be better than 21.7 and 24.0 min respectively.

Keywords: BeiDou navigation satellite system; global positioning system; Galileo satellite navigation system; triple-frequency precise point positioning; nondifference noncombinatorial model; dual ionosphere-free combined model; positioning performance

收稿日期: 2020-08-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41874030); 国家重点研发计划项目 (2017YFA0603102); 上海市科委-科技创新行动计划项目 (18511101801)。

第一作者简介: 卜宇航 (1995—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 研究方向为多模多频精密单点定位。

通信作者简介: 李博峰 (1983—), 男, 陕西咸阳人, 博士, 教授, 研究方向为卫星精密定位与导航位置服务的理论与应用。

0 引言

全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 的高速发展与革新, 为用户提供了三频及更多频率的信号^[1-2]。我国北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 作为全球首个全星座可播发三频信号的系, 北斗二号 (BeiDou navigation satellite (regional) system, BDS-2) 已提供了 B1I、B2I 和 B3I 的信号服务, 为了增强多系统的兼容互操作性, 北斗三号 (BeiDou navigation satellite system with global coverage, BDS-3) 新增了 B1C、B2a、B2b 和 B2a+b 四个信号, 且未来 BDS-2 播发的 B2I 信号将逐渐被 BDS-3 的 B2a 信号取代^[3]。截止到 2019 年 9 月, 美国全球定位系统 (global positioning system, GPS) 发射的 12 颗 Block IIF 卫星、在播发 L1 和 L2 信号的基础上, 新增了 L5 信号服务。欧盟伽利略卫星导航系统 (Galileo satellite navigation system, Galileo) 可播发 5 个频率的信号, 包括 E1、E5a、E5b、E5 和 E6。

三频信号为 GNSS 精密定位中模糊度固定、周跳探测和快速收敛等问题开拓了新的解决方案^[4-7]。精密单点定位 (precise point positioning, PPP) 技术, 因具备操作灵活、成本低且精度高等特点, 已成为广泛应用的 GNSS 精密定位技术之一^[8]。传统 PPP 是围绕双频定位模型展开的, 随着多频信号的播发, 三频 PPP 的研究及定位性能的评估对多频 PPP 的发展具有十分重要意义。目前, 三频 PPP 的研究也取得了一定的进展。文献[9-10]利用 GPS Block IIF 卫星信号, 展开了关于三频 PPP 算法的研究, 指出为了充分利用三频观测值, 必须考虑频率间的偏差影响。文献[11]提出了 3 种三频 PPP 模型, 实验结果表明, 三频 PPP 较传统双频 PPP 可缩短约 10% 的收敛时间, 当收敛后, 二者定位精度相当。文献[12]基于全球大量测站的 GPS 单系统数据, 进行了三频实验, 研究表明, 受噪声系数以及待估参数的不同影响, 三频 PPP 定位模型间存在性能差异。文献[13-14]基于 BDS 三频数据也展开了相关三频 PPP 定位算法等研究。目前大部分文献仅针对 BDS 或 GPS 单系统三频 PPP 定位性能评估, 关于多系统组合三频 PPP 定位性能, 以及多系统组合对 BDS 单系统定位性能的提升尚有待深入研究。因此, 本文首先通过合理参数化, 推导了 2 种满秩可估的三频 PPP 函数模型, 包括非差非组合模型和双无电离层组合模型, 并给出了 2 种模型拓展到多系统中的具体表达。随后采用 BDS、GPS

和 Galileo 三系统观测数据对 2 种三频 PPP 模型的定位性能进行了评估。

1 三频 PPP 定位模型

1.1 GNSS 观测方程

令接收机为 r 、卫星为 s , 则载波相位 Φ 和伪距 P 的观测方程^[15]为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{j,r}^s &= \rho_r^s + T_r^s - \mu_{jt}^s + dt_r - dt^s + B_{j,r} - b_j^s - a_{j,r}^s + \varepsilon_\phi \\ P_{j,r}^s &= \rho_r^s + T_r^s + \mu_{jt}^s + dt_r - dt^s + D_{j,r} - d_j^s + \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: 下标 j 为频率编号; ρ_r^s 为卫星与测站之间的几何距离; T_r^s 为对流层延迟; t_r^s 为频率 f_1 的斜路径电离层延迟, $\mu_j = f_1^2 / f_j^2$ 为频率相关的电离层延迟因子; dt_r 和 dt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差; $B_{j,r}$ 和 b_j^s 分别为频率 f_j 上的接收机和卫星相位硬件延迟; $D_{j,r}$ 和 d_j^s 分别为频率 f_j 上的接收机和卫星的码硬件延迟; $a_{j,r}^s$ 是吸收了接收机与卫星初始相位偏差的模糊度; ε_ϕ 和 ε_p 为相位和伪距的观测噪声, 包含了各自多路径效应等其他未模型化误差。需要特别注意的是, 各表达量均以 m 为单位。观测方程中的其他误差项 (如: 天线相位中心改正、相位缠绕效应、潮汐负荷变形、相对论效应和地球自转等) 均采用模型改正^[16]。

式(1)中的卫星钟差、接收机钟差、硬件延迟、电离层延迟及模糊度等参数相关, 这势必导致法方程秩亏。因此, 需要通过合理参数化的方式解决参数不可估的问题^[17]。为了便于表达, 定义参数为

$$\left. \begin{aligned} \alpha_{ij} &= \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \\ \beta_{ij} &= \frac{-f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \\ \text{DCB}_{ij}^s &= d_j^s - d_i^s \\ \text{DCB}_{r,ij} &= D_{r,j} - D_{r,i} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: α_{ij} 和 β_{ij} 分别为频率 f_i 和 f_j 的无电离层组合系数; DCB_{ij}^s 和 $\text{DCB}_{r,ij}$ 分别为卫星端和接收机端的差分码偏差。

首先, 采用德国地学研究中心 (Deutsches Geo Forschungs Zentrum, GFZ) 提供的精密钟差产品改正卫星钟差, 其中 BDS、GPS、Galileo 三个系统解算的基础频点分别为 B1I/B3I、L1/L2、E1/E5a。由于精密卫星钟差 dt^{sr} 是基于双频无电离层组合解算的, 吸收了各系统解算基础频点的无电离层组合的卫星端码硬件延迟^[18], 即

$$dt^{s\text{IF}} = dt^s + \alpha_{12}d_1^s + \beta_{12}d_2^s \quad (3)$$

因此, 卫星 s 的钟差和频率 f_j 的卫星端, 码硬件延迟可通过精密钟差及 DCB 产品进行改正, 即

$$dt^s + d_j^s = dt^{s\text{IF}} - \alpha_{12}\text{DCB}_{r,j1}^s - \beta_{12}\text{DCB}_{r,2j}^s \quad (4)$$

类似地, 接收机钟差、接收机端码硬件延迟和电离层参数间存在相关性。为了独立参数化, 参考文献 [17], 定义无电离层钟差参数为

$$dt_{\text{IF}} = dt_r + \alpha_{12}D_{r,1} + \beta_{12}D_{r,2} \quad (5)$$

相对码延迟参数 (relative inter-frequency code bias, RIFCB) δD_{1j} 为

$$\delta D_{1j} = \text{DCB}_{r,j1} - \frac{\beta_{12}}{\beta_{1j}}\text{DCB}_{r,21} \quad (j > 1) \quad (6)$$

显然, 无电离层钟差 dt_{IF} 吸收了无电离层组合的双频硬件延迟。采用这两个参数, 则任意频率的接收机钟差与其硬件延迟之和, 以及电离层参数可表达为:

$$dt_r + D_{r,j} = dt_{\text{IF}} - \delta D_{1j} - \mu_j \cdot \beta_{12} \cdot \text{DCB}_{r,12} \quad (7)$$

$$\tilde{t} = t - \beta_{12} \cdot \text{DCB}_{r,12} \quad (8)$$

式中 \tilde{t} 吸收了与电离层参数相关的码硬件延迟 $\beta_{12} \cdot \text{DCB}_{r,12}$ 。最后, 根据模糊度与硬件延迟存在线性相关, 构造新的可估模糊度参数为 $\tilde{a}_{j,r}^s = a_{j,r}^s - B_{j,r} + b_j + D_{j,r} - d_j^s$ 。

经过精密产品改正及合理的参数化处理, 观测方程式 (1) 可表达为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{j,r}^s &= \rho_r^s + dt_{\text{IF}} + T_r^s - \mu_j \tilde{t}_r^s - \tilde{a}_{j,r}^s + \varepsilon_\phi \\ P_{j,r}^s &= \rho_r^s + dt_{\text{IF}} + T_r^s + \mu_j \tilde{t}_r^s - \delta D_{1j} + \varepsilon_p \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

1.2 三频非差非组合模型

根据基本式 (9), 则观测 n 颗卫星的单历元三频非差非组合观测方程为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_r &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_r) \tau + \mathbf{e}_{3n} dt_{\text{IF}} - \\ &\quad (\boldsymbol{\mu} \otimes \mathbf{I}_n) \tilde{\mathbf{t}}_r - \tilde{\mathbf{a}}_r \\ P_r &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_r) \tau + \mathbf{e}_{3n} dt_{\text{IF}} + \\ &\quad (\boldsymbol{\mu} \otimes \mathbf{I}_n) \tilde{\mathbf{t}}_r - (\mathbf{c}_3 \otimes \mathbf{e}_n) \delta D_{13} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $\Phi_r = [\Phi_{1,r}^1, \dots, \Phi_{1,r}^n, \Phi_{2,r}^1, \dots, \Phi_{2,r}^n, \Phi_{3,r}^1, \dots, \Phi_{3,r}^n]^T$ 分别为单历元相位和伪距观测值向量; \mathbf{x}_r 为测站坐标改正量; \mathbf{A}_x 为其对应的系数阵; τ 为测站天顶方向湿对流层延迟; $\mathbf{g}_r = [g_r^1, \dots, g_r^n]^T$ 为其对应的投影函数系数阵; $\tilde{\mathbf{t}}_r = [\tilde{t}_r^1, \dots, \tilde{t}_r^n]^T$ 为电离层延迟参数; $\boldsymbol{\mu} = [\mu_1, \mu_2, \mu_3]^T$ 为其对应的系数阵; $\tilde{\mathbf{a}}_r = [\tilde{a}_{1,r}^1, \dots, \tilde{a}_{1,r}^n, \tilde{a}_{2,r}^1, \dots, \tilde{a}_{2,r}^n, \tilde{a}_{3,r}^1, \dots, \tilde{a}_{3,r}^n]^T$ 为模糊度参数; \mathbf{e}_n 为全部元素为 1 的 n 维列向量; \mathbf{I}_n 是 n 维单位矩阵; 运算符号 \otimes 表示克罗内克积; $\mathbf{c}_3 = [0, 0, 1]^T$ 表示只有在第 3 频率上增加了相对码延迟参数 δD_{13} 。该模型的待估参数为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_r, \tau, dt_{\text{IF}}, \tilde{\mathbf{t}}_r, \tilde{\mathbf{a}}_r, \delta D_{13}] \quad (11)$$

1.3 三频双无电离层组合模型

无电离层组合利用电离层延迟的数值特性, 通过线性组合消除其一阶项的影响。根据等价性原理, 每颗卫星的三频伪距和相位观测值可构成 5 个无电离层组合观测值, 其中有一个是由相位和伪距构成的无电离层组合。研究表明, 尽管该方式能充分利用所有观测值信息, 但这个相位和伪距构成的无电离层组合带来的信息增益非常有限, 且导致 5 个无电离层组合观测值相关, 处理相对比较复杂^[19]。因此, 本文采用三频伪距和相位观测值分别构成双无电离层组合的模型。一般而言, 三频观测值可以组成三个无电离层组合。各系统采用的三频观测值如表 1 所示, 其中 BDS 在采用 B1I 和 B3I 基础上, BDS-2 和 BDS-3 分别各自采用了 B2I

表 1 BDS、GPS、Galileo 双频无电离层组合系数及噪声系数

导航系统名称	频率信号组合	无电离层组合系数 α	无电离层组合系数 β	噪声系数
BDS	B1I/B2b (B2I)	2.48	-1.48	2.90
	B1I/B3I	2.94	-1.94	3.53
	B2b (B2I) /B3I	9.59	-10.59	14.29
GPS	L1/L2	2.54	-1.54	2.98
	L1/L5	2.26	-1.26	2.59
	L2/L5	12.25	-11.25	16.64
Galileo	E1/E5a	2.26	-1.26	2.59
	E1/E5b	2.42	-1.42	2.81
	E5a /E5b	19.92	-18.92	27.47

和 B2b 频点。考虑到噪声系数的影响, 未采用 BDS 的 B2b (B2I) /B3I、GPS 的 L2/L5 和 Galileo 的 E5a/E5b 无电离层组合。

三频双无电离层组合模型可通过对非差非组合观测方程 (10) 左乘一个转换矩阵 R_3 得到, 其中

$$R_3 = \begin{bmatrix} \alpha_{12} & \beta_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_{13} & 0 & \beta_{13} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{12} & \beta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \alpha_{13} & 0 & \beta_{13} \end{bmatrix} \otimes I_n \quad (12)$$

变换后得三频双无电离层组合模型为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{IF}} &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_n) \tau + \mathbf{e}_{2n} dt_{\text{IF}} - \tilde{\mathbf{a}}_{\text{IF}} \\ P_{\text{IF}} &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_n) \tau + \mathbf{e}_{2n} dt_{\text{IF}} + (\mathbf{c}_2 \otimes \mathbf{e}_n) \delta D_{13\text{IF}} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} dt_{\text{IF,C}} &= dt_{\text{IF,G}} + \eta_{\text{CG}} \\ dt_{\text{IF,E}} &= dt_{\text{IF,G}} + \eta_{\text{EG}} \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $\mathbf{c}_2 = [0, 1]^T$; $\delta D_{13\text{IF}} = \beta_{12} \cdot \text{DCB}_{21} - \beta_{13} \cdot \text{DCB}_{31}$ 是相对码延迟参数在双无电离层组合模型中的表达形式。双无电离层组合模型的待估参数为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}_r, \tau, dt_{\text{IF}}, \tilde{\mathbf{a}}_{\text{IF}}, \delta D_{13\text{IF}}] \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} \Phi_r^G &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x^G) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_{n,G}) \tau + \mathbf{e}_{3n,G} dt_{\text{IF,G}} - (\mu^G \otimes I_{n,G}) \tilde{\mathbf{t}}_r^G - \tilde{\mathbf{a}}_r^G \\ \Phi_r^C &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x^C) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_{n,C}) \tau + \mathbf{e}_{3n,C} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{3n,C} \eta_{\text{CG}} - (\mu^C \otimes I_{n,C}) \tilde{\mathbf{t}}_r^C - \tilde{\mathbf{a}}_r^C \\ \Phi_r^E &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x^E) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_{n,E}) \tau + \mathbf{e}_{3n,E} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{3n,E} \eta_{\text{EG}} - (\mu^E \otimes I_{n,E}) \tilde{\mathbf{t}}_r^E - \tilde{\mathbf{a}}_r^E \\ P_r^G &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x^G) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_{n,G}) \tau + \mathbf{e}_{3n,G} dt_{\text{IF,G}} + (\mu^G \otimes I_{n,G}) \tilde{\mathbf{t}}_r^G - (\mathbf{A} \otimes \mathbf{e}_{n,G}) \delta D_{13,G} \\ P_r^C &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x^C) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_{n,C}) \tau + \mathbf{e}_{3n,C} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{3n,C} \eta_{\text{CG}} + (\mu^C \otimes I_{n,C}) \tilde{\mathbf{t}}_r^C - (\mathbf{c}_3 \otimes \mathbf{e}_{n,C}) \delta D_{13,C} \\ P_r^E &= (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{A}_x^E) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_3 \otimes \mathbf{g}_{n,E}) \tau + \mathbf{e}_{3n,E} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{3n,E} \eta_{\text{EG}} + (\mu^E \otimes I_{n,E}) \tilde{\mathbf{t}}_r^E - (\mathbf{c}_3 \otimes \mathbf{e}_{n,E}) \delta D_{13,E} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

类似地, 三系统双无电离层模型拓展到多系统为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_{\text{IF}}^G &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x^G) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_{n,G}) \tau + \mathbf{e}_{2n,G} dt_{\text{IF,G}} - \tilde{\mathbf{a}}_{\text{IF}}^G \\ \Phi_{\text{IF}}^C &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x^C) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_{n,C}) \tau + \mathbf{e}_{2n,C} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{2n,C} \eta_{\text{CG}} - \tilde{\mathbf{a}}_{\text{IF}}^C \\ \Phi_{\text{IF}}^E &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x^E) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_{n,E}) \tau + \mathbf{e}_{2n,E} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{2n,E} \eta_{\text{EG}} - \tilde{\mathbf{a}}_{\text{IF}}^E \\ P_{\text{IF}}^G &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x^G) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_{n,G}) \tau + \mathbf{e}_{2n,G} dt_{\text{IF,G}} - (\mathbf{c}_2 \otimes \mathbf{e}_{n,G}) \delta D_{13\text{IF},G} \\ P_{\text{IF}}^C &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x^C) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_{n,C}) \tau + \mathbf{e}_{2n,C} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{2n,C} \eta_{\text{CG}} - (\mathbf{c}_2 \otimes \mathbf{e}_{n,C}) \delta D_{13\text{IF},C} \\ P_{\text{IF}}^E &= (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{A}_x^E) \mathbf{x}_r + (\mathbf{e}_2 \otimes \mathbf{g}_{n,E}) \tau + \mathbf{e}_{2n,E} dt_{\text{IF,G}} + \mathbf{e}_{2n,E} \eta_{\text{EG}} - (\mathbf{c}_2 \otimes \mathbf{e}_{n,E}) \delta D_{13\text{IF},E} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

2 三频 PPP 的随机模型

本文采用的相位观测值天顶方向的观测精度 σ_{90° 为 2 mm, 相位和伪距观测值精度比为 1:100。采用卫星高度角函数确定观测值间关系, 则非差非组合 PPP 随机模型为

$$\Sigma_{\text{UC}} = f(\theta) \cdot \sigma_{90^\circ}^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \ 000 \end{bmatrix} \otimes I_3 \quad (18)$$

1.4 多系统三频 PPP 模型

本文研究的多系统包括 BDS、GPS 和 Galileo。多系统融合的关键之一是合理地处理系统间硬件延迟偏差。通常有 2 种处理方式: 一种是每个系统独立估计各自的接收机无电离层钟差; 另一种是引入系统间码硬件延迟偏差参数 (inter-system code hardware bias, ISCB)^[20], 考虑到 ISCB 的稳定性, 从而减少待估接收机无电离层钟差参数。本文采用引入 ISCB 参数方式, BDS 和 Galileo 的接收机钟差为

式中: 下标 G、C 和 E 分别代表 GPS、BDS 和 Galileo; $\eta_{\text{CG}} = D_{\text{rIF,C}} - D_{\text{rIF,G}}$ 和 $\eta_{\text{EG}} = D_{\text{rIF,E}} - D_{\text{rIF,G}}$ 分别为 BDS 和 Galileo 的 ISCB 参数, 其中 $D_{\text{rIF}} = \alpha_{12} D_{\text{r,1}} + \beta_{12} D_{\text{r,2}}$, 为接收机端码硬件延迟无电离层组合。因此, 三系统三频非差非组合模型为

式中 θ 为卫星高度角。 $f(\theta) = \frac{1.02}{\sin\theta + 0.02}$ 为卫星高度角定权函数^[21]。根据方差-协方差传播定律, 得到双无电离层组合模型的随机模型为

$$\Sigma_{\text{DIF}} = R_3 \Sigma_{\text{UC}} R_3^T = f(\theta) \cdot \sigma_{90^\circ}^2 \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 10 \ 000 \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} \alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2 & \alpha_{12} \alpha_{13} \\ \alpha_{12} \alpha_{13} & \alpha_{13}^2 + \beta_{13}^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

3 实验与结果分析

3.1 实验数据及解算策略

选取了 12 个包含 GPS、BDS 和 Galileo 三频观测值的国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 组织建立的多模 GNSS 实验跟踪网 (multi-GNSS experiment, MGEX) 测站, 测站分布如图 1 所示, 数据选取了 2019 年年积日第 121—

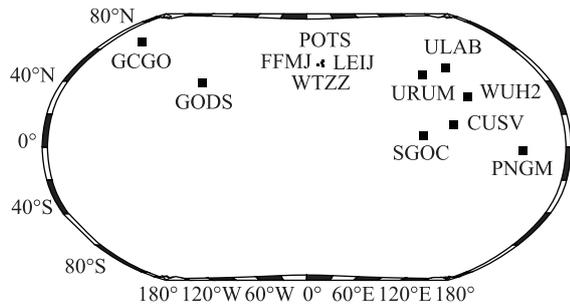


图 1 实验所选取的 12 个 IGS MGEX 观测站分布

130 天共 10 d 数据, 数据采样间隔为 30 s。分别利用 BDS 单系统和三系统组合的三频和双频观测数据进行静态和模拟动态实验。

为了充分评估双频和三频 PPP 不同定位模型在静态和动态模式下的性能, 采用 4 种评估方案:

- ① 双频非差非组合模型 (DF-UC);
- ② 双频无电离层模型 (DF-IF);
- ③ 三频非差非组合模型 (TF-UC);
- ④ 三频双无电离层组合 (TF-DIF)。

针对这 4 种方案, 采用定位精度和收敛时间两个指标分析了 BDS 单系统与三系统组合定位效果, 收敛条件为三个方向同时达到收敛阈值且连续 60 个历元 (采样时间为 30 min) 均稳定在阈值内, 以 IGS 中心 SINEX 文件中的坐标作为各测站的参考坐标。具体的 PPP 数据处理策略如表 2 所示。

表 2 实验数据 PPP 处理策略

处理策略	参数设置
估计方法	序贯最小二乘 (静态模式) / 离散卡尔曼滤波 (动态模式)
观测值	伪距和相位双频、三频观测值
采样率	30 s
截止高度角	10°
定权方案	高度角定权, 相位和伪距天顶精度 2 mm 和 0.2 m
对流层延迟	UNB3 模型和 GMF 投影函数 ^[22]
电离层延迟	DF-IF 与 TF-DIF: 无电离层组合消除一阶项影响; DF-UC 与 TF-UC: 随机游走估计, 频谱密度值为 $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
相对论效应	模型改正
测站偏移	利用国际地球自转和参考系服务 (The International Earth Rotation and Reference Systems Service, IERS) Convention 2010 模型改正固体潮和海洋潮
卫星端相位中心偏差 (phase center offset, PCO)、 相位中心变化 (phase center variation, PCV)	PCO 改正情况: GPS 的 L1/L2 频率; BDS 的 B1/B3/B2 频率和 Galileo 的 E1/E5A/E5B 频率; GPS 的 L5 频率采用 GPS 的 L2 频率替换; PCV 改正情况: BDS 未改正; GPS 的 L1/L2 频率和 Galileo 的 E1/E5A/E5B 频率; GPS 的 L5 频率采用 GPS 的 L2 频率替换
接收机端 PCO、PCV	只改正 GPS 的 L1/L2 频率, BDS 和 Galileo 采用 GPS 对应改正值
相位缠绕效应	采用平均相位极化效应模型改正
卫星端 DCB	采用 IGS 公布的 MGEX 硬件延迟偏差 (different code bias, DCB) 产品改正
卫星轨道和钟差	采用 GFZ 中心精密轨道和钟差产品改正
接收机钟差	白噪声估计
相对码延迟参数	随机游走, 频谱密度值为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
系统间码硬件延迟偏差	随机游走, 频谱密度值为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
模糊度	浮点解算估计

3.2 静态 PPP 实验

3.2.1 BDS 定位性能分析

图 2 给出了 2019 年年积日第 124 天 FFMJ、

LEIJ 和 ULAB 三个测站 BDS 单系统可视卫星数目与位置精度衰减因子 (position dilution of precision, PDOP) 值随时间变化情况。FFMJ 与 LEIJ 测站位

于欧洲中高纬度地区, 观测的地球静止轨道 (geostationary Earth orbit, GEO) 与倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbits, IGSO) 卫星数较少, 导致 PDOP 值较差; 且随中圆地球轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星数量的变化, 数

值波动较大。图 3 为 BDS 静态 PPP 双频和三频 2 种模型在 E 、 N 和 U 方向以及 3 维点位的误差序列。在定位初始化阶段, 同一时刻 2 种模型的三频 PPP 定位性能相比于双频均有明显提高, 可视卫星几何分布较差的 FFMJ 与 LEIJ 测站改善效果更加明显。

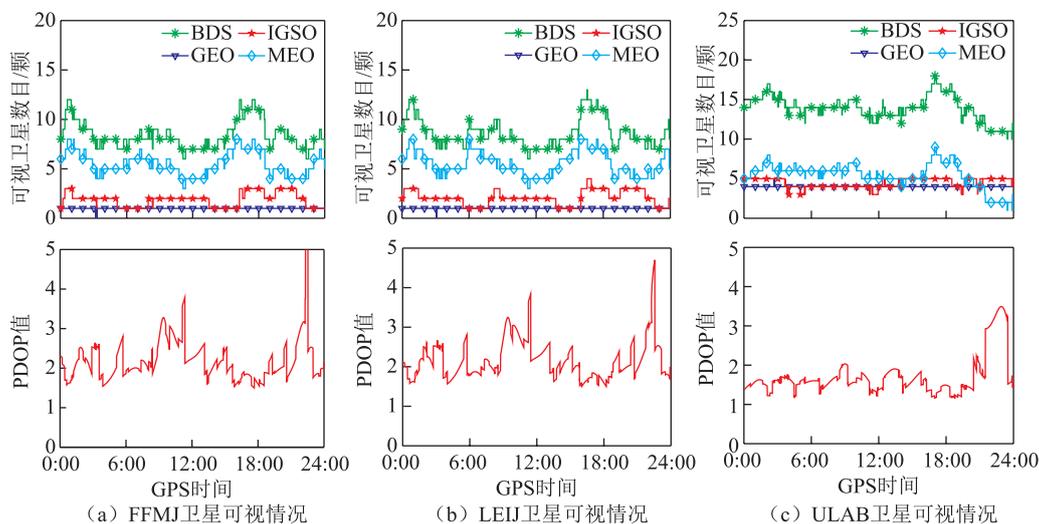


图 2 FFMJ、LEIJ 和 ULAB 测站可视的 BDS 可视卫星数目与 PDOP 值

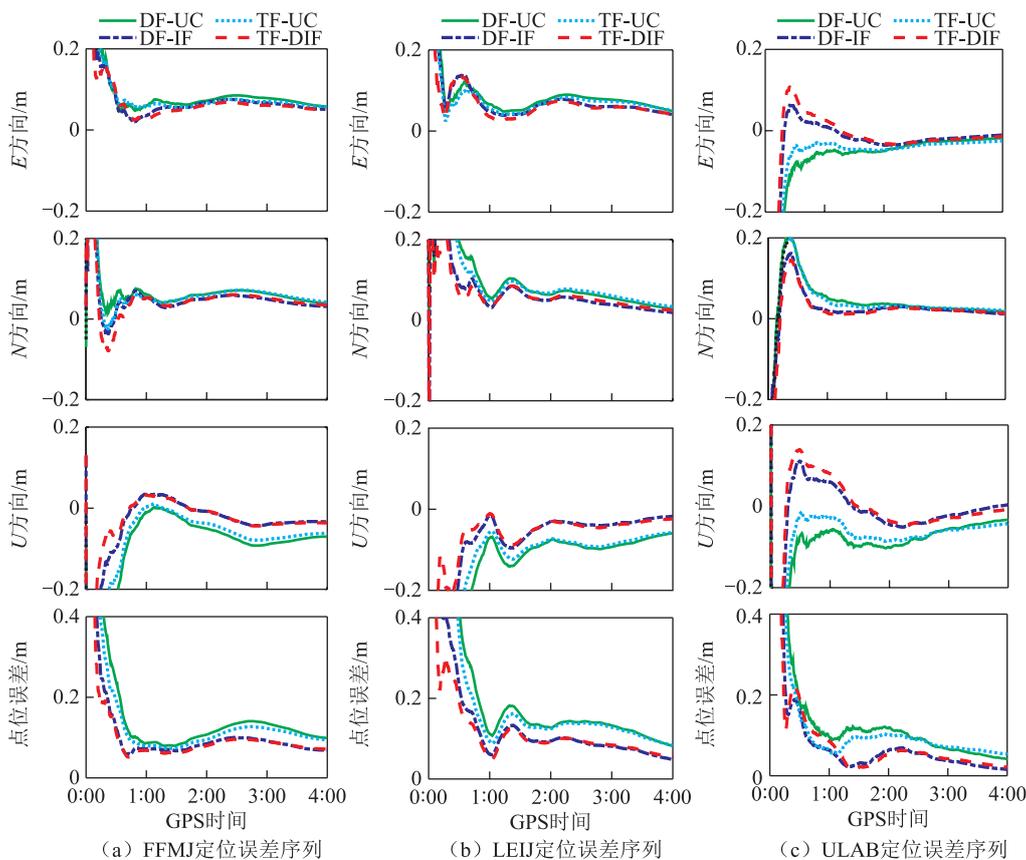


图 3 FFMJ、LEIJ 和 ULAB 测站 BDS 单系统静态 PPP 定位误差 (0 时至 4 时)

图 4 给出了 4 种方案所有测站连续 10 d 收敛至不同阈值的单天解均方根 (root mean square, RMS) 和收敛时间的平均值。当收敛阈值为 0.1 m

时, DF-UC 模型 E 、 N 和 U 三个方向 RMS 分别为 1.62、1.18 和 4.19 cm; TF-UC 模型为 1.42、1.05 和 3.87cm, 提升约 12.3%、11.0%和 7.6%。DF-IF

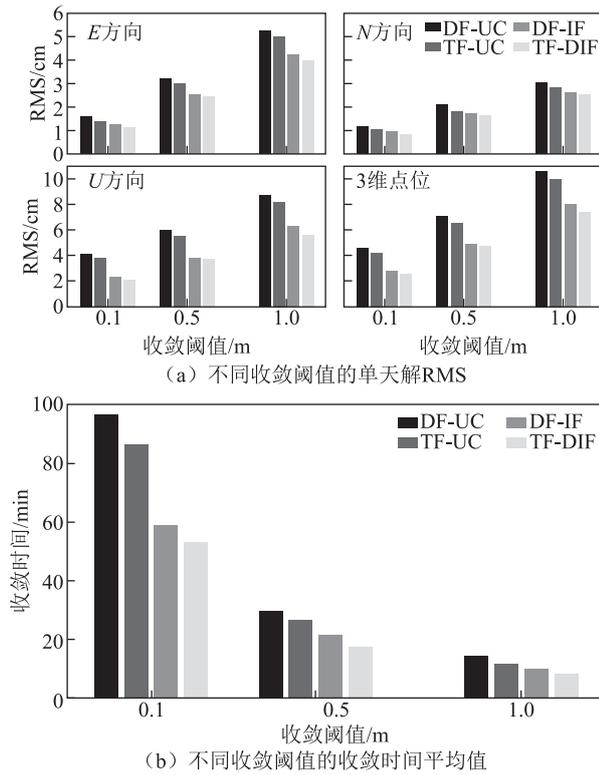


图4 BDS单系统静态PPP四种方案不同收敛阈值单天解RMS和收敛时间平均值

模型E、N和U三个方向RMS分别为1.28、

0.95和2.33 cm, TF-DIF模型分别为1.14、0.86和2.18 cm, 提升约10.6%、9.1%和6.4%。从定位精度角度比较三频相比于双频的提升, TF-UC模型略优于TF-DIF模型。当收敛阈值达到0.1、0.5和1 m时, TF-UC较DF-UC模型分别提高了10.0%、10.4%和16.4%; TF-DIF较DF-IF模型分别提高了13.7%、16.4%和18.3%。从收敛时间角度比较三频相比于双频的提升, 三频PPP可有效缩短收敛时间, 尤其是初始化收敛阶段并且TF-DIF模型优于TF-UC模型。

从以上算例可以分析得出: 由于TF-UC模型待估参数较多且参数之间存在一定时空相关性; 因此导致在初始收敛时间方程性态差, 收敛时间长。TF-DIF模型由于组合观测值之间的相关性导致该模型在定位精度上提升不如TF-UC模型明显。

3.2.2 三系统组合定位性能分析

图5给出了FFMJ、LEIJ和ULAB三个测站三系统组合的可视卫星数目与PDOP值。三系统组合的PDOP值在1左右, 显著小于BDS单系统, 即多系统组合有效改善了可视卫星的空间分布几何构型。图6展示了上述三个测站静态PPP四种方案的定位误差, 由图看出三频略优于双频定位结果, 较BDS单系统有明显提高。

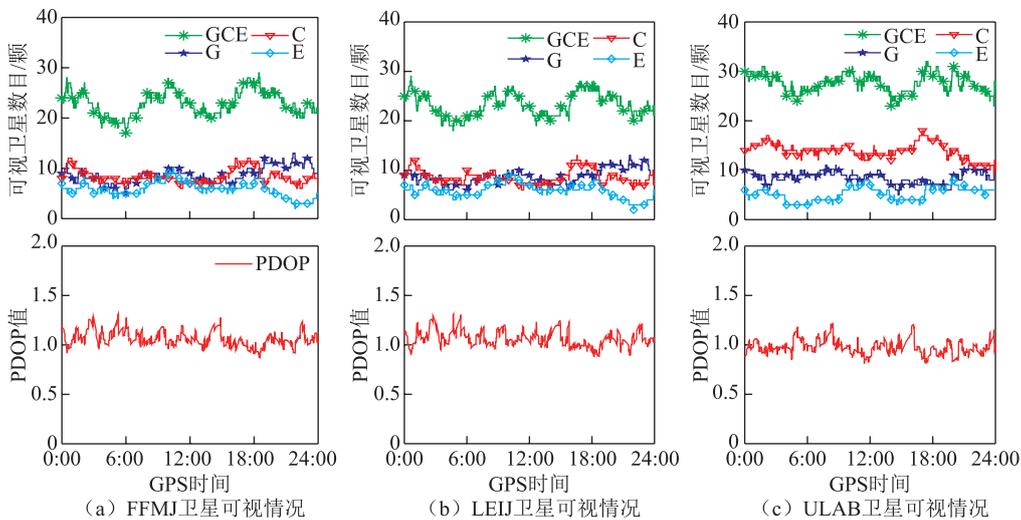
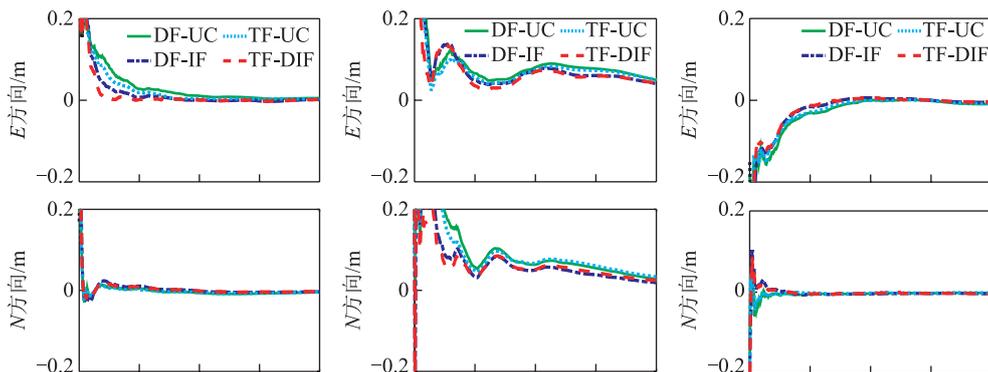


图5 FFMJ、LEIJ和ULAB测站可视的三系统可视卫星数目与PDOP值



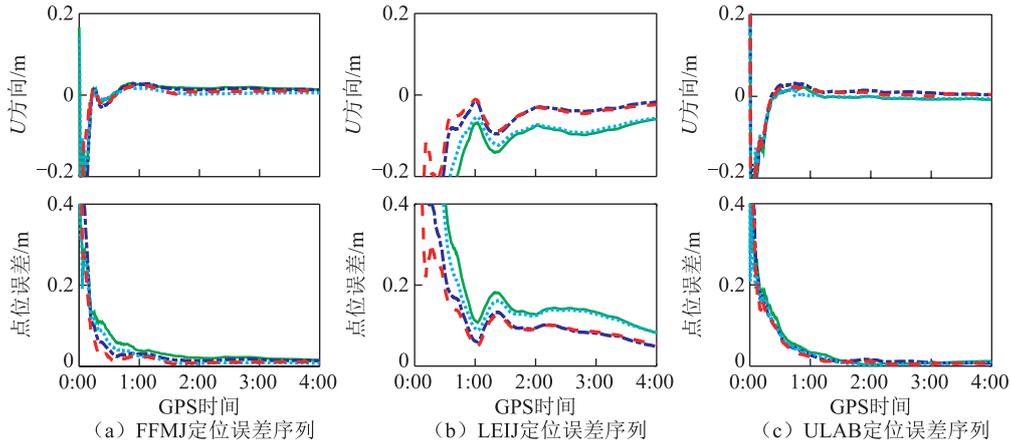


图 6 FFMJ、LEIJ 和 ULAB 测站三系统静态 PPP 定位误差 (0 时至 4 时)

图 7 统计了三系统组合的 4 种 PPP 方案所有测站连续 10 d 收敛至不同阈值的单天解 RMS 值和收敛时间的平均值。当收敛阈值为 0.1 m 时, DF-UC 模型在的 E 、 N 和 U 三个方向的 RMS 分别为 0.82、0.55 和 1.23 cm, TF-UC 模型为 0.71、0.49 和 1.13 cm, 相对提升了 13.4%、10.9% 和 8.0%。DF-IF 模型三个方向 RMS 分别为 0.81、0.53 和 1.07 cm, TF-DIF 模型分别为 0.72、0.48 和 1.02 cm, 对应提升了 11.1%、9.1% 和 4.6%。三系统组合与 BDS 单

系统相比, 三个方向的 TF-UC 模型分别提高了 50.0%、53.3% 和 70.8%, TF-DIF 分别提高了 36.8%、44.2% 和 53.2%。由图 7 (b) 得出收敛至 0.1 m 时, 三系统组合的 TF-UC 和 TF-DIF 模型仅需 21.7 min 和 18.6 min, 较 BDS 单系统分别提高了 77.6%、78.6%。但是就三系统组合而言, 三频较双频的收敛时间提升不明显, 这主要是因为三系统组合的卫星数目充足且分布合理, PDOP 值得到了极大改善, 使得三频对收敛时间的增益有限。

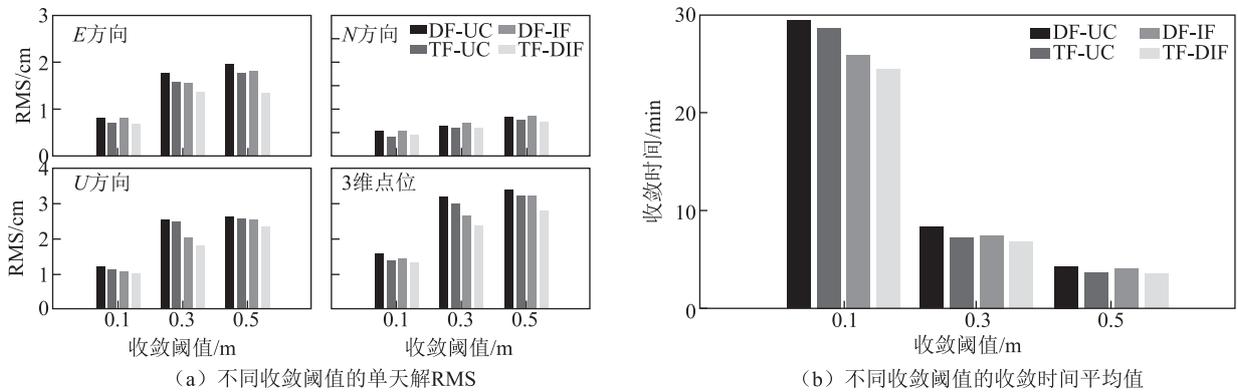
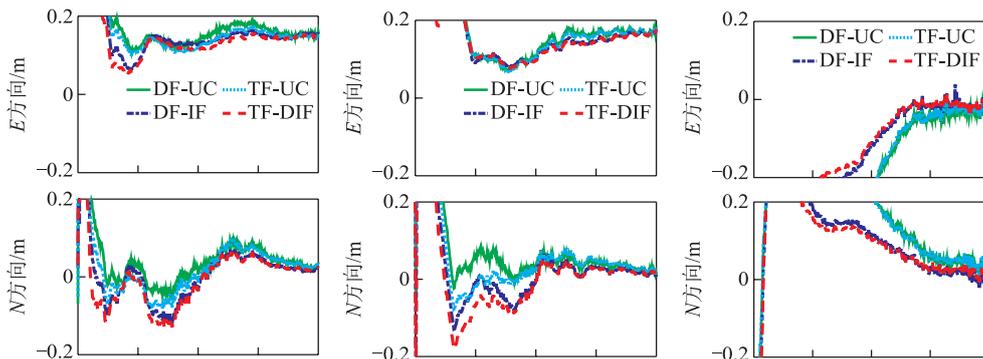


图 7 三系统组合静态 PPP 四种方案在不同收敛阈值下的单天解 RMS 和收敛时间

3.3 模拟动态 PPP 实验

图 8 给出了 BDS 单系统 FFMJ、LEIJ 和 ULAB 三个测站动态 PPP 在 (0:00—4:00) 时段 E 、 N 和

U 三个方向以及 3 维点位的误差序列图。在初始化阶段, 三频 TF-UC 和 TF-DIF 模型较双频模型具有更高的定位精度。



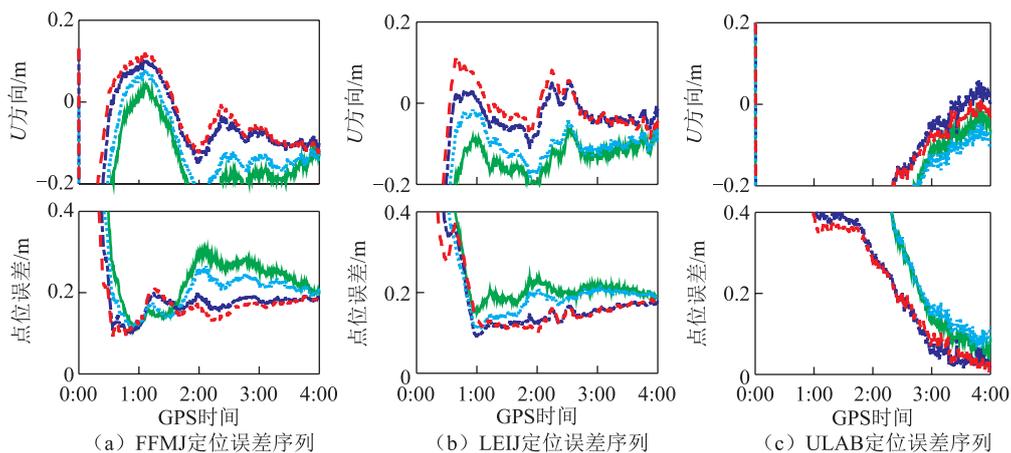


图8 FFMJ、LEIJ和ULAB测站BDS单系统动态PPP定位误差(0时至4时)

图9给出了三系统组合动态PPP的定位误差,相较于BDS单系统,三系统组合动态定位结果更加稳定,收敛更快。

表3和表4分别统计了12个测站10d数据BDS单系统和三系统组合定位三个方向同时收敛至0.1m的RMS和收敛时间。结果表明,BDS单

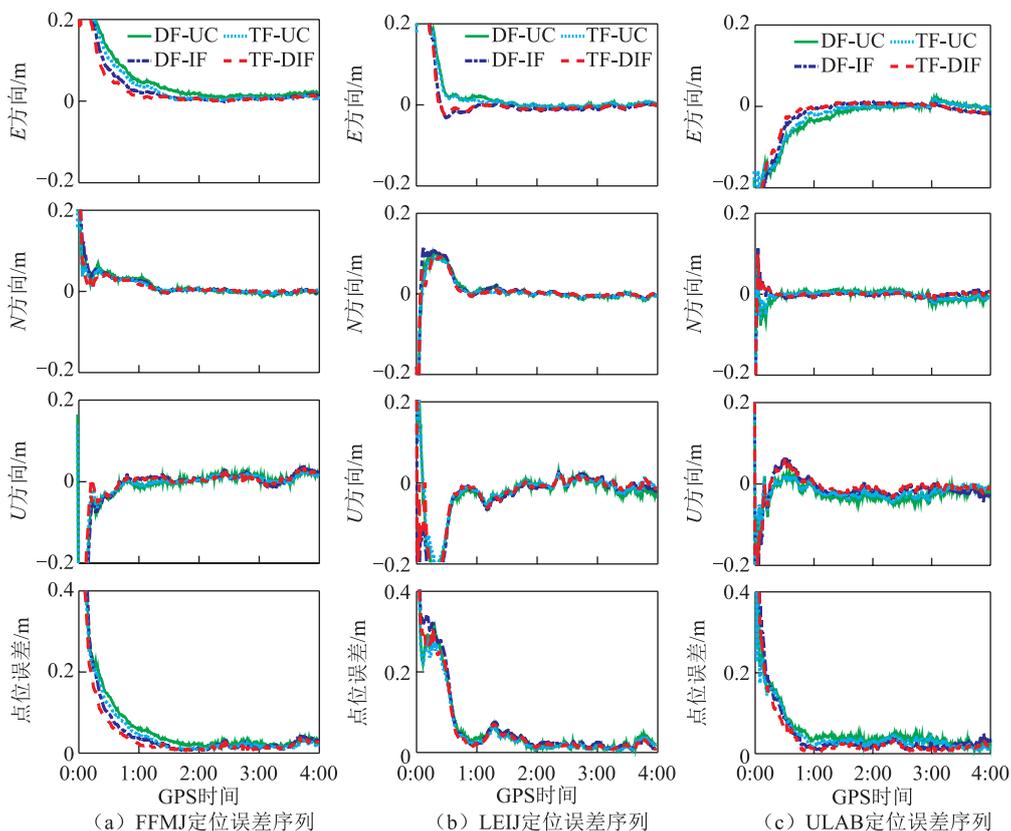


图9 FFMJ、LEIJ和ULAB测站三系统组合动态PPP定位误差(0时至4时)

表3 BDS单系统动态定位性能统计

定位模型	不同方向的RMS/cm			收敛时间/ min
	E	N	U	
DF-UC	2.85	2.41	5.59	178.94
TF-UC	2.33	2.11	5.24	144.52
DF-IF	2.73	2.29	5.32	155.90
TF-DIF	2.34	2.09	5.19	123.75

表4 三系统组合方案动态定位性能统计

定位模型	不同方向的RMS/cm			收敛时间/ min
	E	N	U	
DF-UC	1.60	1.12	3.13	27.64
TF-UC	1.42	1.03	2.89	24.00
DF-IF	1.49	1.05	2.96	25.66
TF-DIF	1.36	0.97	2.81	22.85

系统和三系统组合三频定位模型结果在三个方向上的定三精度和收敛时间均优于双频模型定位结果。三系统组合的三频 TF-UC 模型三个方向精度分别为 1.42、1.03 和 2.89 cm, 相比 BDS 单系统提高了 39.1%、51.2% 和 44.8%。三系统组合三频 TF-DIF 模型三个方向精度分别为 1.36、0.97 和 2.81 cm, 相比 BDS 单系统提高了 41.8%、53.6% 和 45.9%。同时, 三系统组合三频定位模型相比 BDS 单系统三频定位模型的收敛时间显著缩短, TF-UC 模型的收敛时间从 144.5 缩短至 24.0 min, TF-DIF 模型的收敛时间从 123.7 缩短至 22.8 min, 分别提高了 83.4%、81.6%。

4 结束语

本文从基本观测方程出发, 详细地介绍了 2 种

三频 PPP 定位模型: 非差非组合模型和双无电离层组合模型。通过实验, 从定位精度与收敛时间 2 个角度比较与分析得出以下结论:

1) 在卫星分布较少、PDOP 值较差的情况下, 三频 PPP 相比双频 PPP 可以有效提高定位结果的精度与可靠性, 尤其是在定位初始阶段。

2) 相较于双频 PPP, 三频 PPP 两种定位模型的定位性能均有所提高。定位精度方面, 非差非组合模型提升优于双无电离层组合模型; 收敛时间方面, 双无电离层组合模型提升优于非差非组合模型。

3) 受益于 GPS、Galileo 和 BDS 融合对卫星空间几何分布构型的改善, 三系统组合的三频 PPP 定位性能较 BDS 单系统有大幅度的提升。

参考文献

- [1] COLLIER P A. Preface: impacts and benefits of new global navigation satellite systems[J]. *Journal of Spatial Science*, 2008, 53(2): 25-28.
- [2] LI B F. Review of triple-frequency GNSS: ambiguity resolution, benefits and challenges[J]. *Journal of Global Positioning Systems*, 2018, 16(1): 1-11.
- [3] YANG Y X, GAO W G, GUO S R, et al. Introduction to BeiDou-3 navigation satellite system[J]. *Navigation*, 2019, 66(1): 7-18
- [4] LI B F, FENG Y M, SHEN Y Z. Three carrier ambiguity resolution: distance-independent performance demonstrated using semi-generated triple frequency GPS signals[J]. *GPS Solutions*, 2010, 14(2): 177-184.
- [5] GENG J H, BOCK Y. Triple-frequency GPS precise point positioning with rapid ambiguity resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 449-460.
- [6] ZHANG X H, LI P. Benefits of the third frequency signal on cycle slip correction[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 451-460.
- [7] LI B F, QIN Y N, LI Z, et al. Undifferenced cycle slip estimation of triple-frequency BeiDou signals with ionosphere prediction[J]. *Marine Geodesy*, 2016, 39(5): 348-365.
- [8] ZUMBERGE J, HEFLIN M, JEFFERSON D, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(3): 5005-5017.
- [9] TEGEDOR J, OVSTEDAL O. Triple carrier precise point positioning (PPP) using GPS L5[J]. *Survey Review*, 2014, 46(337): 288-297.
- [10] ELSOBEIBY M. Precise point positioning using triple-frequency GPS measurements[J]. *Journal of Navigation*, 2015, 68(3): 480-492.
- [11] DEO M, ELMOWAFY A. Triple-frequency GNSS models for PPP with float ambiguity estimation: performance comparison using GPS[J]. *Survey Review*, 2018, 50(360): 1-13.
- [12] PAN L, ZHANG X, LIU J, et al. A comparison of three widely used GPS triple-frequency precise point positioning models[J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 1-13.
- [13] LI P, ZHANG X H, GE M R, et al. Three-frequency BDS precise point positioning ambiguity resolution based on raw observables[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(12): 1357-1369.
- [14] 张小红, 柳根, 郭斐, 等. 北斗 3 频精密单点定位模型比较及定位性能分析[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2018, 43(12): 2124-2130.

(下转第 121 页)

引文格式: 陈永贵, 朱玉香, 安春华. 不同星历产品反演 CMONOC/PWV 的精度评估[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 88-93. (CHEN Yonggui, ZHU Yuxiang, AN Chunhua. Accuracy evaluation of CMONOC/PWV inversion by different ephemeris products[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 88-93.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210113.

不同星历产品反演 CMONOC/PWV 的精度评估

陈永贵¹, 朱玉香¹, 安春华²

(1. 河南测绘职业学院, 郑州 451464; 2. 河南省科学院地理研究所, 郑州 451464)

摘要: 针对最终精密星历发布延迟时间达 14~18 d, 更新时间慢, 无法满足气象学中实时反演大气可降水量的要求, 提出利用不同星历产品反演大气可降水量并评估其精度: 借助中国大陆构造环境监测网络 (CMONOC) 的观测数据, 对比分析最终精密星历、快速星历、超快速星历产品对 CMONOC 解算精度、反演天顶对流层延迟 (ZTD) 精度及大气可降水量 (PWV) 精度的影响。结果表明: 不同星历产品解算 CMONOC 的精度相当; 最终精密星历产品反演 ZTD 的精度最高, 快速星历产品次之, 超快速星历产品精度最低, 均方根误差 (RMSE) 分别为 2、8、12 mm; 最终精密星历产品反演 PWV 的精度最高, 快速星历产品次之, 超快速星历产品精度最低, 分别优于 1、2、4 mm, 精度都优于 1 cm, 可以满足实时反演大气降水量的要求, 为进行短临天气预报提供参考。

关键词: 最终精密星历; 快速星历; 超快速星历; 中国大陆构造环境监测网络; 大气可降水量

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0088-06

Accuracy evaluation of CMONOC/PWV inversion by different ephemeris products

CHEN Yonggui¹, ZHU Yuxiang¹, AN Chunhua²

(1. Henan Collage of Surveying and Mapping, Zhengzhou 451464, China;

2. Institute of Geography, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 451464, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is not easy to meet the requirement of real-time inversion of atmospheric precipitation in meteorology due to the delayed release of the final precise ephemeris by 14-18 d and the slow update time, the paper proposed to invert the atmospheric precipitable water by different ephemeris products and evaluate the accuracy: the observation data of the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC) were used to comparatively analyze the influence of final products, rapid products and ultra-rapid products from International GNSS (Global Navigation Satellite System) Service (IGS) on the accuracy of CMONOC solution, zenith tropospheric delay inversion and Perceptible Water Vapor (PWV) retrieval. Results showed that: the accuracy of CMONOC solution by different ephemeris products would be the same; the accuracy of zenith tropospheric delay inversion by IGS final products could be the highest, followed by that of IGS rapid products, and that of IGS ultra-rapid products could be the lowest, with root mean square error (RMSE) 2, 8 and 12 mm respectively; for the inversion of PWV, the precision of IGS final products would be the highest, followed by that of IGS rapid products, and that of IGS ultra-rapid products could be the lowest, better than 1, 2 and 4 mm respectively, indicating that the precision could be all better than 1 cm, which meets the requirement of the real-time retrieval of atmospheric precipitable water, and provides a reference for short-term and imminent weather forecast.

Keywords: final products; rapid products; ultra-rapid products; crustal movement observation network of China; precipitable water vapor

收稿日期: 2020-05-11

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (20B170002)。

第一作者简介: 陈永贵 (1979—), 男, 吉林辽源人, 硕士, 副教授, 研究方向为工程测量、GNSS 测量与数据处理。

通信作者简介: 朱玉香 (1982—), 女, 湖南邵阳人, 硕士, 讲师, 研究方向为大地测量数据处理理论与方法。

0 引言

水汽分布的不均匀性和形态错综的变化会引起全球天气变化。水汽在大气中占据比例很低, 却是大气中最活跃的成分。针对复杂多变的水汽, 如何准确地确定其分布特征及变化规律, 是气象学的主要问题之一^[1-3]。自从贝维斯 (Bevis) 首次提出“全球卫星导航系统 (global navigation satellite system, GNSS) 气象学”的概念以来, GNSS 气象学就得到了快速发展和实际应用^[4]。在 GNSS 气象学中, 探测大气可降水量 (precipitable water vapor, PWV) 常用的手段包括探空站、微波辐射、卫星遥感和太阳光谱分析等^[5], 这些技术探测 PWV 成本较高, 操作难度大且复杂; 而地基 GNSS 探测水汽, 具有高时空分辨率、低成本、高实时性和灵活性等优点。我国自主研发的北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 也已全球组网, 这为 GNSS 气象学的发展提供了丰富的数据支撑^[6]。

国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 中心提供的最终精密星历 (IGS final products, IGF) 精度较高, 但更新时间较慢, 不具备实时性, 无法满足实时水汽反演的需要。国内外许多学者就快速精密星历 (IGS rapid products, IGR) 和超快速精密星历 (IGS ultra-rapid products, IGU) 是否可以代替最终精密星历等诸多实际应用问题进行了研究。文献[7]选取不同的卫星星历产品, 分别进行了静态精密单点定位实验, 与 IGS 发布的产品进行对比分析, 结果表明: 采用最终星历、快速星历和超快星历的计算结果与实测静态精密单点定位结果的精度一致; 而采用超快星历进行外推计算时, 精度略低。文献[8]针对香港地区二次

暴雨发生过程, 基于 IGF 星历反演得到的 PWV, 与实际降雨量进行对比分析, 其结果表明, 大气环境越不稳定, 降水概率也就越高。文献[9]借助上海地区全球定位系统 (global positioning system, GPS) 观测数据反演 PWV 时, 确定了计算方式的选择、站坐标的确定和约束、轨道的使用方法、网外辅助站最佳数量、海潮对实时计算 PWV 的影响、实时应用于气象服务时的端部效应等问题的最佳方案。文献[10]针对卫星星历的时效性差异导致低轨卫星精密轨道获取滞后的问题, 对比分析了不同星历对定轨的精度影响, 实验结果表明, IGF/IGR/IGU 定轨结果精度相当。文献[11]用快速精密星历和超快速精密星历代替最终精密星历, 对实测的连续运行参考站 (continuously operating reference stations, CORS) 数据进行基线解算, 其结果表明, 使用这 2 种星历代替最终精密星历进行基线解算是可行的。

本次实验借助中国大陆构造环境监测网络 (crustal movement observation network of China, CMONOC) 的观测数据, 利用 CMONOC 覆盖中国大陆的高精度、高时空分辨率的特点^[12-14], 使用探空站数据为参考值, 对比分析了 IGF/IGR/IGU 对 CMONOC/PWV 反演精度的影响。

1 IGF/IGR/IGU 产品对比分析

IGS 中心提供 IGF、IGR、IGU 产品服务, 不同的星历产品在轨道精度、钟差精度、滞后时间、更新率和采样率方面存在差异, IGU 星历的轨道时长 48 h, 包括实测和外推 2 个部分 (其中前 24 h 是实测轨道, 后 24 h 是外推预报轨道)。IGF/IGR/IGU 产品具体参数如表 1 所示。

表 1 IGF/IGR/IGU 产品对比分析表

星历类型	轨道精度/cm	钟差精度	滞后时间	更新率	轨道采样率/min	钟差采样率/min
IGF	2.5	75 ps	12~18 d	1 星期更新 1 次	15	5
IGR	2.5	75 ps	17~41 h	1 d 更新 1 次	15	5
IGU-obs	3.0	3 ns	3~9 h	6 h 更新 1 次	15	15
IGU-pre	5.0	5 ns	无	6 h 更新 1 次	15	15

从表 1 可以看出: IGF 星历的轨道、钟差精度都优于 IGR、IGU 星历, 但是滞后时间较长 (12~18 d), 更新率较慢; IGF、IGR、IGU 星历轨道采样率都为 15 min; 钟差采样率 IGF、IGR

星历优于 IGU 星历; IGU-pre 星历具有实时性的特点, 这是其他类型星历所不具备的。因此, 基于 IGU-pre 星历可以实时地反演 CMONOC 站点的大气可降水量。

2 地基 GNSS 反演大气可降水量原理

近年来,随着 GNSS 技术的快速发展,地基 GNSS 气象学也快速发展起来,数据处理软件也快速发展。基于 GNSS 高精度数据处理的软件有加米特(GAMIT)、格洛布克(GLOBK)等,可以用 GAMIT/GLOBK 软件获取对流层天顶总延迟,结合气象观测资料和天顶静力延迟计算模型,就可以得到天顶静力学延迟,即

$$\left. \begin{aligned} ZHD &= 0.2277 \times \frac{P}{F(\varphi, h_0)} \\ F(\varphi, h_0) &= 1 - 0.0026 \times \cos(2\varphi) - 0.00028 \times h_0 \end{aligned} \right\} (1)$$

式中: φ 为测站的纬度; h_0 为测站海拔高度,单位为 km; P 为测站地面气压,单位为 hPa; ZHD (zenith hydrostatic delay) 为天顶静力学延迟,单位为 cm,此处采用萨斯塔莫宁(Saastamonien)模型计算得到。天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay, ZTD)减去 ZHD 就能得到天顶湿延迟(zenith wet delay, ZWD),即

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (2)$$

再利用贝叶斯经验公式计算出加权平均温度 T_m ,进而得到水汽转换系数 I 。天顶湿延迟与水汽转换系数相乘即可得到大气可降水量,即

$$PWV = I \cdot ZWD \quad (3)$$

式中 I 是无量纲转换因子,估计值约为 0.15^[12-14]。

3 实验与结果分析

3.1 数据来源

本次实验选取 CMONOC 站点中,数据连续性好、数据质量为合格或为优的观测数据。观测站均匀分布在中国大陆地区,能够较好反映不同星历

对整个 CMONOC/PWV 的反演结果,站点分布如图 1 所示。

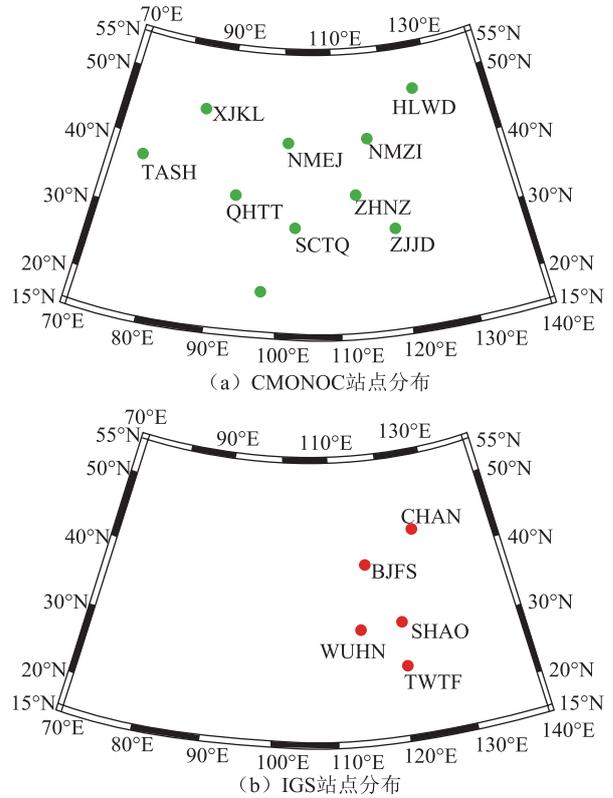


图 1 站点分布

从美国怀俄明州立大学网站^[15-17]上获取探空站数据,解算过程中加入 BJFS 站、CHAN 站、SHAO 站、TWTF 站和 WUHN 站的数据进行联合解算,其目的是为了削弱对流层相关性。IGS 观测数据和星历产品通过 IGS 发布中心获取^[8]。

3.2 方案设计

借助 GAMIT/GLOBK 软件,分别按方案 1 至方案 4 进行解算,解算策略如表 2 所示。表 2 中,GMF(global mapping function)为全球投影函数;LC_HELP 为无电离层组合。

表 2 解算方案

方案编号	星历类型	截止高度角/(°)	电离层模型	映射函数	加权平均温度模型
方案 1	IGF	15	LC_HELP	GMF	Bevis
方案 2	IGR	15	LC_HELP	GMF	Bevis
方案 3	IGU-obs	15	LC_HELP	GMF	Bevis
方案 4	IGU-pre	15	LC_HELP	GMF	Bevis

在解算时,把 CMONOC 观测站中的 XJKL 站、TASH 站、NMEJ 站、QHTT 站、SCQT 站、MMNS 站、NMZL 站、ZHNZ 站、HLWD 站、JLCB 站及 ZJJD 站作为参考站一同解算,4 个方案区别在于,

解算过程中使用的卫星星历产品的不同,以此来判断 IGF/IGR/IGU-obs/IGU-pre 对反演 CMONOC/PWV 的精度影响。

3.3 结果分析

3.3.1 IGF/IGR/IGU 基线结果对比分析

标准化均方根误差 (normalized root mean square, NRMS) 用来表示 GAMIT 基线解算结果中基线值偏离加权平均值的程度。一般情况下认为: NRMS 值越小, 基线解算结果越好、精度越高, 反之越差。一般情况下, NRMS 小于 0.3; 若大于 0.3, 则认为基线解算失败, 其原因可能是周跳未修复或起算坐标有误等, 需重新解算。采用 4 种不同星历产品, 对 2018 年年积日第 1—7 天的观测数据进行基线解算, 不同星历 IGF/IGR/IGU-obs/IGU-pre 对应基线解算结果如图 2 所示。

由图 2 可知, IGF/IGR/IGU-obs/IGU-pre 对应基线解算结果的 NRMS 值都小于 0.25, 可以认为参与基线解算的数据都是合格的, 且同一天 4 种星历产品基线解算的 NRMS 值都很接近, 说明不同精密星历对基线解算结果没有明显的差异, 可以使用 IGR/IGU-obs/IGU-pre 代替 IGF 进行基线解算, 其结果是合理的, 且具备实时性的特点。

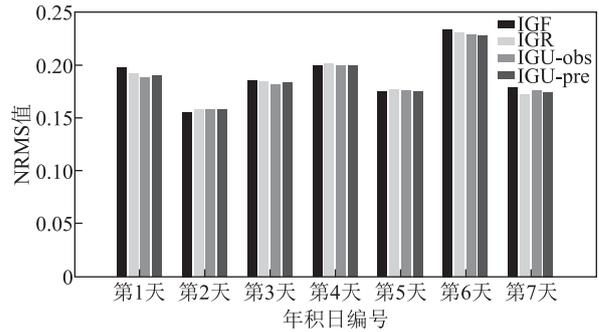


图 2 IGF/IGR/IGU-obs/IGU-pre 对应基线解算结果

3.3.2 IGF/IGR/IGU 对 ZTD 的解算精度分析

基于 CMONOC 观测数据反演 PWV 值的精度, 主要是由 ZTD 的精度决定的。将不同星历解算得到的 ZTD 数据, 与中国地震局 GNSS 数据产品服务平台 (GNSS Data Products of China Earthquake Administration, CGPS) 公布的对流层产品进行对比分析, 来验证 IGF/IGR/IGU 对 ZTD 的影响。由于篇幅限制, 在此仅给出 ZJJD 站对比分析结果, 如图 3 和表 3 所示。

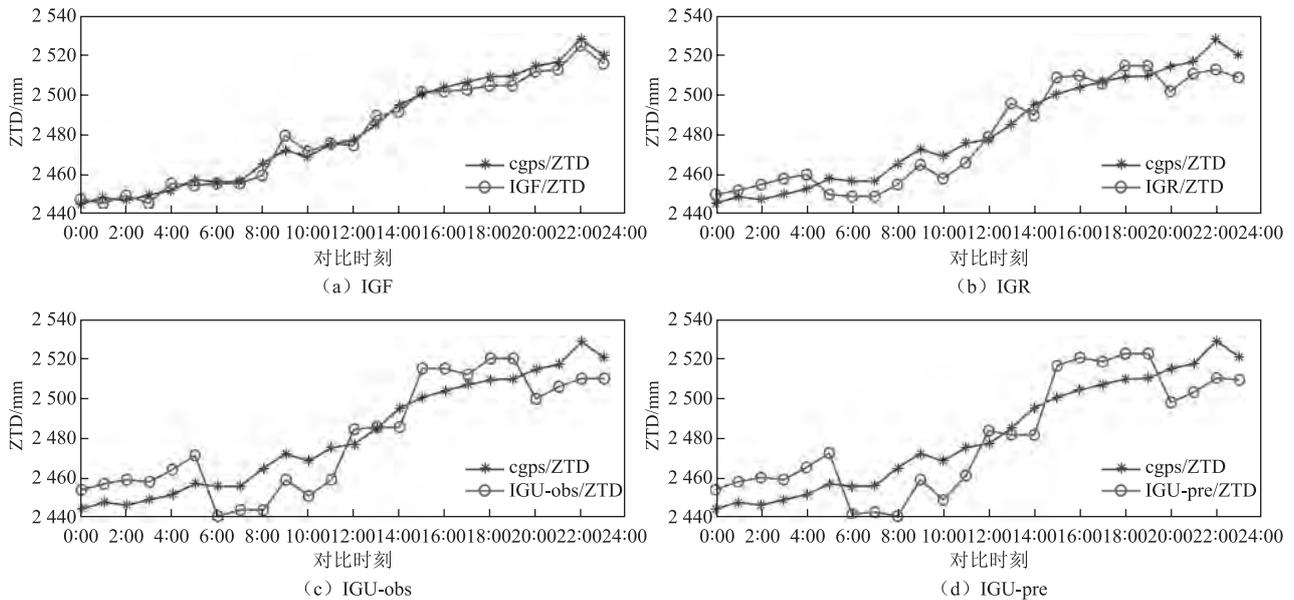


图 3 不同星历解算 ZTD 与 CGPS 产品对比分析

表 3 不同星历解算 ZTD 的偏差结果

单位: mm

站名	卫星星历产品	解算结果				
		最大值 (MAX)	最小值 (MIN)	平均值 (MEAN)	标准差 (STD)	均方根误差 (RMSE)
ZJJD	IGF	5.80	-7.20	1.16	3.45	3.52
	IGR	15.2	-10.6	1.95	8.22	8.26
	IGU-obs	20.8	-13.6	1.28	12.67	12.72
	IGU-pre	23.8	-15.6	1.33	13.92	13.95

由图3可以看出:IGF产品解算ZTD精度最高,IGR产品次之,IGU-obs和IGU-pre产品效果最差;IGU-obs和IGU-pre产品解算ZTD的精度相当。其余10个未给出结果的测站与ZJJJ站结果一致。

通过表3可以得出:不同星历产品解算得到的ZTD与CGPS之间均方根误差(root mean square

error, RMSE)分别为3.52、8.26、12.72和13.95 mm;不同星历产品解算得到的ZTD与CGPS之间的标准差(standard deviation, STD)分别为3.45、8.22、12.67和13.92 mm;IGU-obs/ZTD和IGU-pre/ZTD的RMSE和STD差值都在2 mm内,二者精度相当。图4给出了CMONOC反演ZTD的RMSE值。

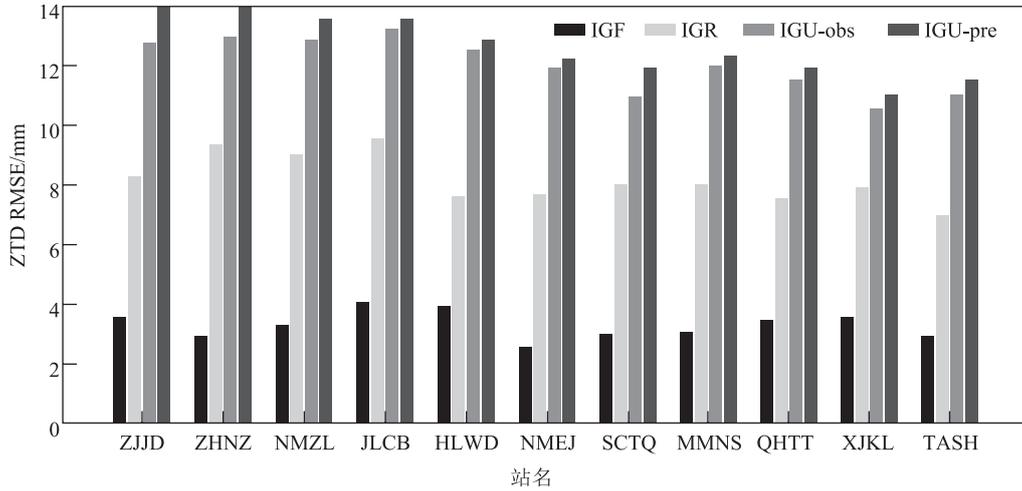


图4 CMONOC不同星历反演ZTD RMSE值

由图4可知:各个测站对不同星历反演ZTD精度具有较好的一致性,IGF/ZTD的精度最高, RMSE在2 mm左右;IGR/ZTD的精度次之, RMSE在8 mm左右;IGU-obs/ZTD和IGU-pre/ZTD的精度最低, RMSE在12 mm左右,且二者精度相当。

3.3.3 IGF/IGR/IGU对PWV解算的精度分析

美国怀俄明州立大学提供的探空数据产品被认为是当今精度最高的水汽产品。探空站产品向用户提供时间分辨率为12 h(UTC 00:00和UTC

12:00)的数据。选取探空站(YANJI, 42662)的探空数据产品与CMONOC中JLCB站的数据,来分析不同星历对反演PWV的精度影响。探空站YANJI站与CMONOC中的JLCB站,在地理位置上距离小于5 km,可以忽略二者在地理位置上的差异而引起的PWV的细小差异。基于2018年年积日为第2—31天共计30 d,60组JLCB站的观测数据来验证IGF/IGR/IGU对PWV的影响,探空站PWV数据记为Radio/PWV,结果如图5所示。

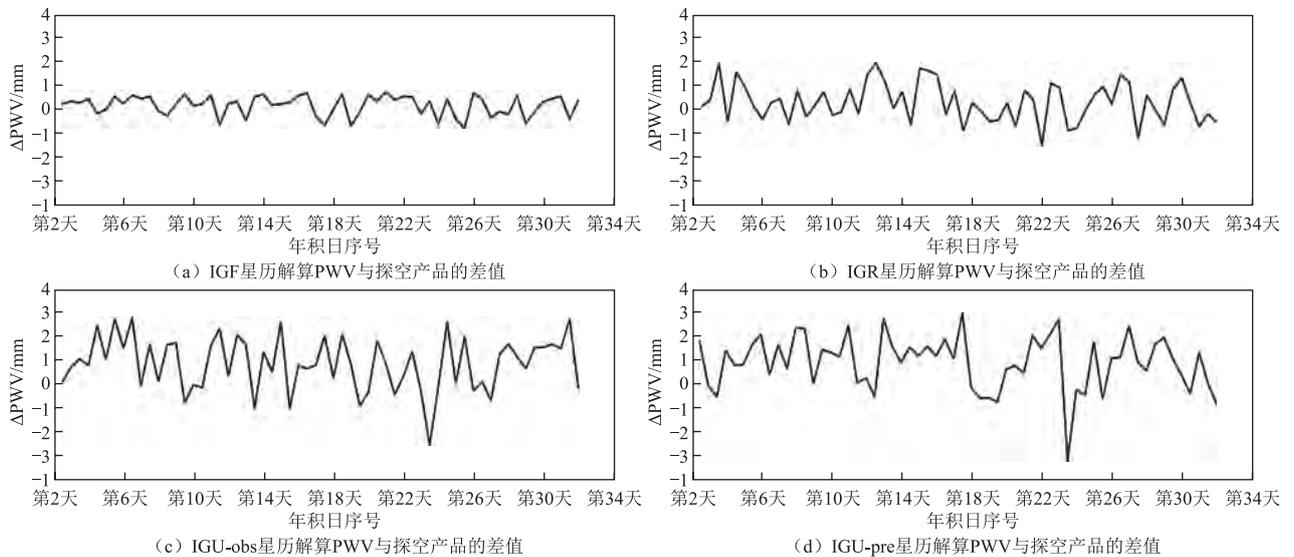


图5 不同星历解算PWV与探空产品的差值

从图 5 可以看出, IGF/PWV、IGR/PWV、IGU-obs/PWV 和 IGU-pre/PWV 的差值 Δ PWV 分别为 $[-1, 1]$ 、 $[-2, 2]$ 、 $[-4, 4]$ 、 $[-4, 4]$, 这些数据说明: IGF/PWV 精度较高, 优于 1 mm; IGR/PWV 精度次之, 优于 2 mm; IGU-obs/PWV 和 IGU-pre/PWV 精度最差, 但优于 4 mm, 且二者反演 PWV 的精度相当。

4 结束语

本文借助 CMONOC 的观测数据, 评估了最终精密星历、快速星历、超快速星历产品反演大气可降水量的精度, 得到以下结论:

1) 不同星历产品解算 CMONOC PWV 的精度相当;

2) 最终精密星历产品反演 ZTD 的精度最高, 快速星历产品次之, 超快速星历产品精度最低, RMSE 分别为 2、8、12 mm;

3) 最终精密星历产品反演 PWV 的精度最高, 快速星历产品次之, 超快速星历产品精度最低, 其结果都优于 1 cm, 在未公布最终精密星历产品情况下, 可以用快速精密星历和超快速精密星历产品代替最终精密星历产品进行反演大气可降水量, 其精度可以满足实时短期预报的需求, 为进行短临天气预报提供依据。

致谢: 中国地震局 GNSS 数据产品服务平台和美国怀俄明州立大学提供了数据支撑。

参考文献

- [1] 李国平, 黄丁发, 郭洁, 等. 地基 GPS 气象学[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [2] 尹利文, 韩保民, 郑勇, 等. GPS 气象预报的可行性分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(增刊 1):130-133.
- [3] DOUSA J. The impact of errors in predicted GPS orbits on zenith troposphere delay estimation[J]. GPS Solutions, 2010, 14(3):229-239.
- [4] 姚宜斌, 孙章宇, 许超钤. Bevis 公式在不同高度面的适用性以及基于近地大气温度的全球加权平均温度模型[J]. 测绘学报, 2019, 48(3):276-285.
- [5] ROSS R J, Elliott W P. Tropospheric water vapor climatology and trends over north america:1973-93[J]. Journal of Climate, 1996, 9(12):3561-3574.
- [6] 何义磊. 北斗三号最简系统卫星信号质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3):394-402.
- [7] 徐爱功, 徐宗秋, 隋心. 精密单点定位中卫星星历对天顶对流层延迟估计的影响[J]. 测绘科学, 2013, 38(2):19-21.
- [8] 陈于, 赵遐龄, 王开通, 等. GPS 天顶对流层延迟与可降水量的相关性[J]. 测绘科学, 2016, 41(8):59-62.
- [9] 宋淑丽, 朱文耀. 区域 GPS 网实时计算可降水量的若干问题[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2003:20-27.
- [10] 吴琼宝, 赵春梅, 田华. 不同星历下低轨卫星轨道精度分析[J]. 导航定位学报, 2017, 5(4):21-24.
- [11] 王树东, 万军. 不同星历的 GAMIT 高精度基线解算[J]. 导航定位学报, 2018, 6(1):103-107.
- [12] 赵庆志. 地基 GPS 大气可降水量估计及水汽层析研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
- [13] 姚宜斌, 孙章宇, 许超钤. Bevis 公式在不同高度面的适用性以及基于近地大气温度的全球加权平均温度模型[J]. 测绘学报, 2019, 48(3):276-285.
- [14] 刘智敏, 李斐, 郭金运, 等. GPT2 模型用于 SDCORS 反演可降水汽精度评估[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(3):305-309, 320.
- [15] 刘宗强, 党亚民, 杨强, 等. 对流层映射函数对陆态网解算精度的影响[J]. 测绘通报, 2017(5):6-10.
- [16] COSTER A J, BUONSANTO M, GOPOCHKIN E M. Ionosphere and tropospheric path delay obtained from GPS integrated phase[J]. Adv Space Res, 1990(10):105-108.
- [17] 张海平. 陆态网络基准网数据处理策略分析[J]. 地理空间信息, 2018, 16(9):120-122, 12.

引文格式: 窦邵华, 何 骞, 龚春龙, 等. GNSS 反射测量技术在水位变化探测中的应用[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 94-101. (DOU Shaohua, HE Qian, GONG Chunlong, et al. Application of GNSS reflectometry in water level change detection[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 94-101.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210114.

GNSS 反射测量技术在水位变化探测中的应用

窦邵华¹, 何 骞¹, 龚春龙², 刁锦通¹, 程铭宇¹

(1. 广州市城市规划勘测设计研究院, 广州 510060; 2. 深圳市水务规划设计院股份有限公司, 广东 深圳 518001)

摘要: 为进一步研究全球卫星导航系统 (GNSS) 反射测量技术 (R) 在不同水域环境中水位变化监测的精度, 提出利用 GNSS R 技术对大坝、航道以及海域等 3 种水域环境进行水位变化探测反演。结果表明: 在 3 种水域环境下, 大坝水位反演精度最高, 北斗卫星导航系统 (BDS) 和全球定位系统 (GPS) 的卫星信号反演水位变化量与实测水位变化量相关系数均达到 0.99, 并且在该环境下, BDS 卫星信号反演水位变化量与实测水位变化量差值的均方根 (RMS) 值为 0.09 m, GPS 卫星信号反演得到的 RMS 为 0.11 m; 在航道环境中, 反演精度最差, GPS 卫星信号反演水位变化量与实测水位变化量相关系数达 0.94, 二者差值的 RMS 值为 0.58 m; 在海域环境中, GPS 卫星信号反演水位变化量与实测水位变化量相关系数达 0.96, 二者差值的 RMS 值为 0.16 m。

关键词: 全球卫星导航系统; 反射测量; 频谱分析; 菲涅尔反射; 卫星反射点轨迹; 水位变化

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0094-08

Application of GNSS reflectometry in water level change detection

DOU Shaohua¹, HE Qian¹, GONG Chunlong², DIAO Jintong¹, CHENG Mingyu¹

(1. Guangzhou Urban Planning Survey Design and Research Institute, Guangzhou 510060, China;

2. Shenzhen Water Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518001, China)

Abstract: In order to further study on the monitoring accuracy of water level change by Global Navigation Satellite System Reflectometry (GNSS R) technology in different water environments, the paper proposed to retrieve the detection of water level change under the environments of dam, waterway and sea area with GNSS R. Results showed that: under the three water environments, the inversion accuracy of dam water level could be the highest, the correlation coefficients between the inversion and the measured water level change data by BeiDou navigation satellite System (BDS) and Global Positioning System (GPS) would both reach 0.99, and in this environment, the Root Mean Square (RMS) of difference of the water level change from BDS inversion would be 0.09 m, while from GPS 0.11 m; and the inversion accuracy of the waterway environment could be the worst, the correlation coefficient by GPS would be 0.94, and the RMS of difference would be 0.58 m; moreover, in the sea environment, the correlation coefficient by GPS would be 0.96, and the RMS 0.16 m.

Keywords: global navigation satellite system; reflectometry; spectrum analysis; Fresnel reflection; satellite reflection point trajectory; water level change

0 引言

水资源与人类的生活息息相关, 对水位变化进行监测, 对人类科学合理地保护利用水资源具有重要意义。如对大坝进行水位监测, 可以更好地确

保大坝安全运行; 对航道进行水位监测, 可以更好地确保船只安全航行; 对海平面进行水位监测, 可以更好地研究海面变化规律。

1993 年, 文献[1]提出全球定位系统 (global positioning system, GPS) 反射测量技术, 开启了利

收稿日期: 2020-05-25

第一作者简介: 窦邵华 (1990—), 男, 河南鹤壁人, 硕士, 研究方向为 GNSS 数据质量分析和 GNSS 地表环境监测。

用全球卫星导航系统反射测量 (global navigation satellite system reflectometry, GNSS R) 方法遥感地球表面这一新的领域。文献[2]对 GPS 信噪比 (signal-to-noise ratio, SNR) 观测值中直射信号、反射信号的分离及反射信号与反射环境之间的关系进行了研究。文献[3]提出利用常规测量型 GPS 接收机进行地表参数信息反演的的方法, 进一步拓宽了 GNSS 在遥感领域的发展和应。文献[4]对 GNSS R 技术的进展和应用前景进行了综述介绍, 讨论了 GNSS R 原理和方法及最新的应用进展。目前国内外学者在水位变化监测方面, 主要采用的方法是信噪比技术, 文献[5-11]从原理到应用等多个方面, 对 GNSS R 在潮位变化监测中的应用进行了深入研究, 结果表明: GNSS R 技术获取的潮位变化与验潮站连续观测结果的一致性较好, 反演精度在分米级, 可以作为验潮站的有效补充, 进一步拓宽了 GNSS 在海洋遥感领域的应用。文献[12]对 GNSS R 技术在大坝水位变化探测中的应用进行了研究, 结果表明: GPS L1 频率和北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) B1 频率可以最大限度地保证卫星利用率和反演成功率, 反演结果与实测结果的相关系数可达 0.9 以上。文献[13-14]对 GNSS R 技术在河水面测高中的应用进行了分析, 结果表明: GPS 干涉反射测量 (GPS interferometric reflectometry, GPS-IR) 技术在水面相对平静且变化平缓的水域有着很好的测高精度。

对于水面而言, 有波动比较大的海面, 也有比较平静的大坝水面, 有水域面狭长的航道, 也有水域开阔的海面。为了综合分析 GNSS R 技术在不同水域环境下水位变化监测的精度, 本文对大坝、航道以及海面 3 种不同水域环境进行水位变化的探测分析。

1 GNSS R 探测水位变化相关理论

1.1 GNSS R 原理

多路径效应是影响 GNSS 高精度定位的主要误差, 它与反射面的结构以及电介质参数等密切相关。当卫星高度角较低时, 接收机接收到的反射信号会和直射信号发生相干作用。GNSS R 反射测量技术正是利用直射信号和反射信号之间的延迟, 再根据卫星、接收机和反射点之间的几何关系来反演地表参数特征的。测量方式分为双 GNSS 天线法和单 GNSS 天线法。本文主要针对单 GNSS 天线法, 并对利用 SNR 技术进行水位探测的原理进行介绍。GNSS R 探测水位变化的原理如图 1 所示。

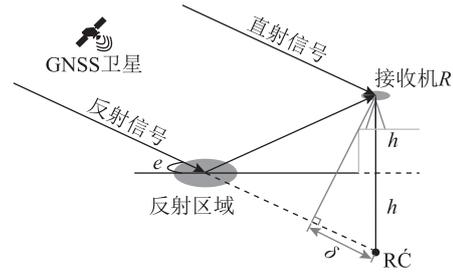


图 1 GNSS+R 探测水位变化原理

图 1 中: e 表示卫星高度角, 即信号入射角, 单位为 ($^{\circ}$); h 为接收机天线相位中心到反射面的垂直距离, 单位为 m ; δ 为直射信号和反射信号的程差, 单位为 m 。由于程差的存在, 直射信号和反射信号之间会存在相位延迟 ψ , 以 rad 为单位, 即

$$\psi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi h}{\lambda} \sin e \quad (1)$$

式中 λ 为载波波长。从式 (1) 可以看出, 直射信号和反射信号之间的相位延迟与卫星高度角有关, 因此随时间变化而变化。对于测量型 GNSS 接收机, 当存在反射信号时, 由几何关系可知, 接收到的复合信号可以表示为

$$A_c^2 = SNR^2 = A_d^2 + A_r^2 + 2A_d A_r \cos \psi \quad (2)$$

式中: A_c 为复合信号的振幅; A_d 为直射信号的振幅; A_r 为反射信号的振幅。

当卫星高度角较低时, 由于低高度角时多路径和天线增益模式的影响, 直射信号决定了复合信号的整体变化趋势。为了提取能够反演地表参数的反射信号信息, 需要对信噪比数据使用低阶多项式去除趋势项。结合式 (1), 去除趋势项后的信噪比残差序列可以表示为

$$A_r = A \cos(\psi + \varphi) = A \cos\left(\frac{4\pi h}{\lambda} \sin e + \varphi\right) \quad (3)$$

式中 A 为信号振幅。设 $t = \sin e$, $f = \frac{2h}{\lambda}$, 则式 (3)

可以表示为

$$A_r = A \cos(2\pi f t + \varphi) \quad (4)$$

式 (4) 中的频率 f 包含了接收机相位中心至反射面的垂直距离 h , 因此对去除趋势项的信噪比残差序列进行频谱分析, 获取振幅最大值所对应的频率值, 便可以得到接收机相位中心至反射面的垂直距离, 从而实现利用 GNSS 信噪比数据反演水面水位。由于 t 是卫星高度角的正弦函数值, 为非等间隔采样, 因此采用洛姆-斯卡吉尔 (Lomb-Scargle, L-S) 频谱分析方法进行处理。

1.2 菲涅尔反射区计算

根据惠更斯-菲涅尔原理,菲涅尔反射区是在收发天线之间,对于波长为 λ 的电波,由电波的直线路径与折线路径的行程差为 $n \cdot \frac{\lambda}{2}$ 的折点(反射点)形成的,以收发天线位置为焦点,以直线路径为轴的椭球面。其中 $n=1$ 的区域是接收点信号最强的区域,称为第一菲涅尔区,如图2所示。

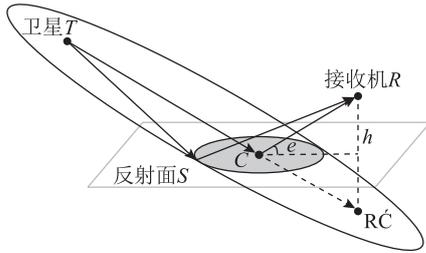


图2 菲涅尔反射区示意图

为了更好地应用于GNSS R技术,国外学者拉森(Larson)^[15]对第一菲涅尔反射区的表达式进行了修正,可以表示为:

$$C_x = h \cos e + \frac{\lambda \cot e}{2 \sin e} \quad (5)$$

$$C_y = 0 \quad (6)$$

$$a = \frac{b}{\sin e} \quad (7)$$

$$b = \sqrt{\frac{\lambda h}{\sin e} + \left(\frac{\lambda}{2 \sin e}\right)^2} \quad (8)$$

式中: (C_x, C_y) 为反射区中心点C的坐标; a 为反射区椭圆的长半轴; b 为反射区椭圆的短半轴。

1.3 卫星反射点轨迹计算

卫星天空视图可以反映卫星的空间几何分布,卫星反射点轨迹则能更直观地反映可以用于水位探测的卫星数据分布。结合卫星、反射点与接收机的几何关系,卫星反射点轨迹可以表示为:

$$x = h \cdot \cot e \cdot \sin \theta \quad (9)$$

$$y = h \cdot \cot e \cdot \cos \theta \quad (10)$$

式中: x 为反射点轨迹在X轴的分量; y 为反射点轨迹在Y轴的分量; θ 为卫星方位角。

2 实验与结果分析

2.1 实验设计

为了分析GNSS R技术在不同水域环境中水位探测的精度问题,本文选取了大坝、航道和海面3种典型水域环境进行反演分析,水域环境特点及实验数据如表1和表2所示。

表1 水域环境特点

水域	特点
大坝	水面宽阔,水位变化平缓
航道	水面狭窄,水位变化剧烈
海面	水面宽阔,水位变化剧烈

表2 实验数据

水域	测站名	实验数据时段	GNSS 发射 的载波信号	GNSS 接收 机采样/s	水位数据
大坝	XK03	2018年年积日第180—280天,共101d	GPS L1 BDS I2	1	人工采集,每天早上08:00采集1次
航道	BRST	2018年年积日第300—334天,共35d	GPS L1	5	相距500m左右的验潮站,分辨率1min
海面	CACC	2018年年积日第300—334天,共35d	GPS L1	30	测站同一位置的验潮站,分辨率6min

由于GNSS R技术得到的是反射面到天线相位中心的高度,水位数据为实测水位高度,为了更好地对比分析二者之间的差距和相关性,本文对2种测量方法得到的水位变化量进行对比分析,其中水位变化量表示为

$$\Delta w = w_i - \frac{\sum w_i}{n} \quad (11)$$

式中: Δw 为水位变化量; w_i 为第*i*个水位观测

值; n 为观测值的个数。

考虑到实测水位采样率以及反演水位时刻的不确定性,采用表3的预处理策略对成果数据处理之后再行对比分析。

2.2 大坝水位变化探测结果分析

大坝GNSS数据采用的是深圳茜坑水库变形监测系统采集的数据。XK03测站位置如图3所示。

表 3 反演水位变化量与实测水位变化量对比分析预处理策略

测站	预处理策略
XK03 (大坝)	将一天之中反演得到的水位变化量的均值作为当天的反演结果
BRST (航道)	采用与反演结果时间接近的实测水位
CACC (海面)	采用与反演结果时间接近的实测水位



图 3 XK03 测站位置

结合图 3 测站位置及周边环境情况, 大坝实验数据采用方位角为 220°~350°的数据进行反演分析。为了选择合适的卫星观测高度角进行反演分析, 本文模拟了当反射面到接收机天线相位中心的垂直距离为 6 m 时, XK03 测站周边的菲涅尔反射区如 (图 4 所示)。

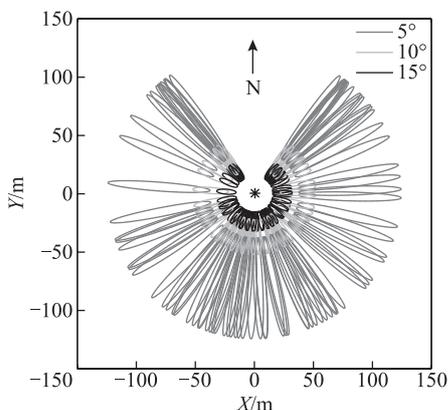


图 4 XK03 菲涅尔反射区

从图 4 可以看出, 当卫星高度角在 5°~15° 范围内变化时, 接收机可以接收到测站周边 120 m 范围内的反射信号, 并且卫星高度角越高, 反射区域距离接收机天线越近, 反射范围也越小。

为了更好地了解反演分析所采用的卫星数据的情况, 本文以 GPS 为例绘制了 XK03 测站同时满足方位角和高度角要求的卫星数据的反射点轨迹, 如图 5 所示。图 5 反映了用于大坝水面高度反

演分析的各 GPS 卫星对应的反射点轨迹。综合测站周边及数据情况, 为了获得更高精度的反演结果, XK03 测站采用卫星高度角在 5°~15°范围内的数据进行反演解算。

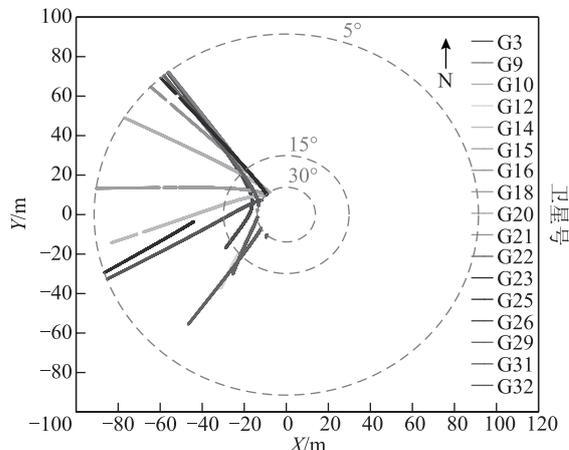


图 5 XK03 测站反射点轨迹

以 G29 卫星为例, 卫星去除趋势项后的信噪比数据与卫星高度角的关系如图 6 所示, 可以看出二者之间存在正弦函数关系, 符合式 (3) 所表达的关系。结合式 (4), 采用 L-S 频谱分析方法可以得到如图 7 所示的结果。

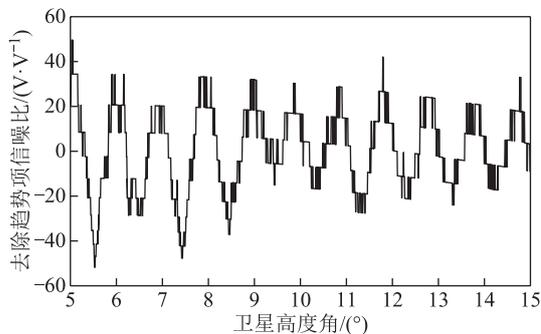


图 6 去除趋势项信噪比

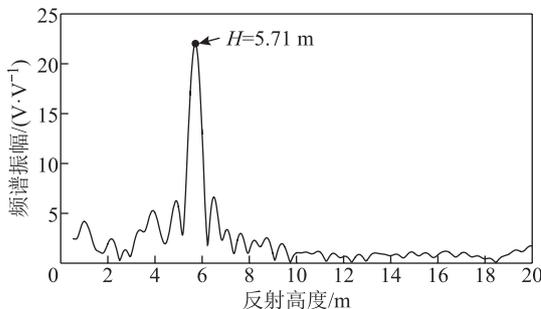


图 7 L-S 频谱分析

图 7 中频谱振幅最大所对应的高度 H 即为反射水面到天线相位中心的距离 h , 从图 7 可以看出, G29 卫星反演的水面到天线相位中心的距离为 5.71 m。

GPS 和 BDS 反演的水位变化量与实测水位变化量的对比结果如图 8 所示。

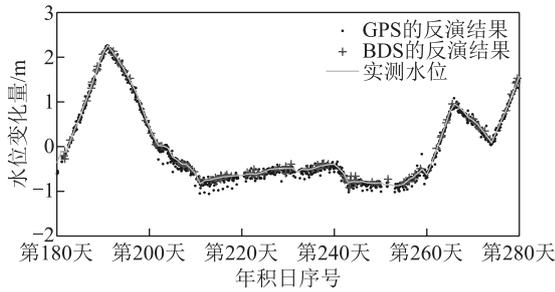


图 8 反演水位变化量与实测水位变化量

由于 GNSS R 技术每天可以反演得到多个水位变化量结果, 而实测数据只有 1 个, 为了进行统计分析, 考虑到大坝 1 d 之中水位变化量较小, 将 1 d 之中 GPS 和 BDS 各自的反演结果求平均后作为当天反演的水位变化量结果, 与当天实测水位变化量作差之后的差值如图 9 所示。

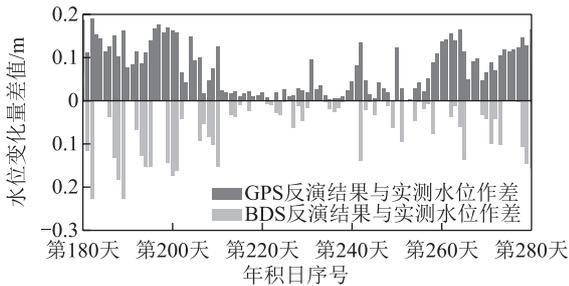


图 9 GNSS 反演水位变化量与实测水位变化量的差值

从图 8 可以看出, 2 种导航卫星系统的反演结果与实测结果趋势基本一致, GPS 反演的结果较多, BDS 反演的结果较少。分析原因为由于大坝所处的位置以及能够接收到的 BDS 卫星个数较少, 符合水位反演条件的卫星个数较少, 因此得到的反演结果也比较少。

统计结果显示, XK03 测站 GPS 反演水位变化量与实测水位变化量的差值的均方根 (root mean square, RMS) 值为 0.11 m, BDS 反演的 RMS 值为 0.09 m。考虑到 GPS 反演的结果在 1 d 之中多个时段有分布, 本文求平均的方法会降低 GPS 反演的精度, 因此认为 BDS 反演精度和 GPS 反演的精度相当。

GPS 和 BDS 反演水位变化量与实测水位变化量的相关性分析分别如图 10 和图 11 所示。从图 10 和图 11 可以看出, 二者的反演结果与实测结果的相关系数均达到 0.99。结合前面的结果, 表明 BDS 和 GPS 均可以较好地反演大坝的水位变化情况。

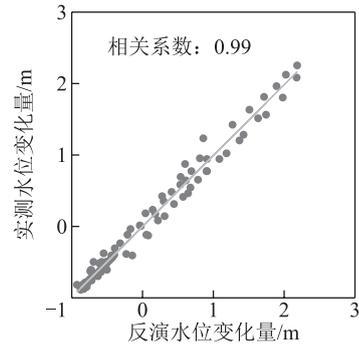


图 10 GPS 反演水位与实测水位相关性分析

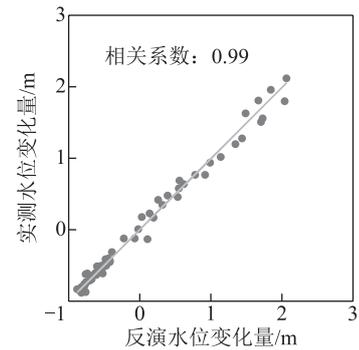


图 11 BDS 反演水位与实测水位相关性分析

2.3 航道水位变化探测

航道 GNSS 数据来自法国国家地理和森林信息研究所 (Institut National de l'information Géographique et Forestière, IGN) 的 BRST 站, BRST 站位置如图 12 所示。

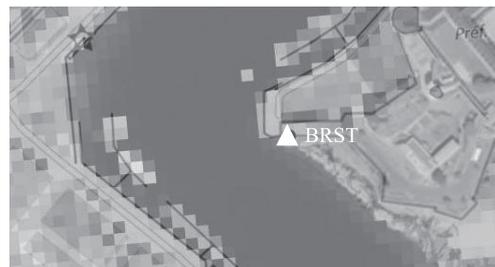


图 12 BRST 测站位置

结合图 12 测站位置及周边环境情况, 航道实验数据采用方位角为 $130^{\circ}\sim 270^{\circ}$ 的数据用于反演分析。为了选择合适的卫星观测高度角进行反演分析, 本文模拟了当反射面到接收机天线相位中心的垂直距离为 15 m 时, BRST 站周边的菲涅尔反射区 (如图 13 所示)。从图 13 可以看出, 当卫星高度角在 $15^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 范围内时, 接收机可以接收到周边 80 m 范围的反射信号。

为了更好地了解反演分析所采用的卫星数据的情况, 本文以 GPS 为例, 绘制了 BRST 站同时

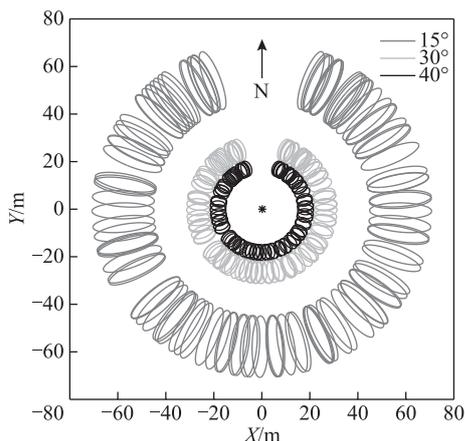


图 13 BRST 测站菲涅尔反射区

满足方位角和高度角要求的卫星数据的反射点轨迹如图 14 所示。

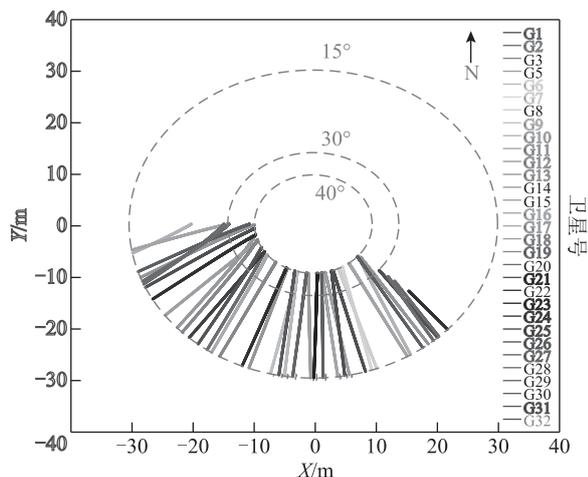


图 14 BRST 测站反射点轨迹

图 14 反映了用于航道水面高度反演分析的各 GPS 卫星对应的反射点轨迹。考虑到航道宽度限制,当卫星高度角低于 15°时,接收机接收到的反射信号将不来自于水面。因此, BRST 测站采用卫星高度角在 15°~40°范围内的数据进行反演解算。

BRST 测站 GPS 反演的水位变化量与实测水位变化量的对比如图 15 所示,二者相关性如图 16

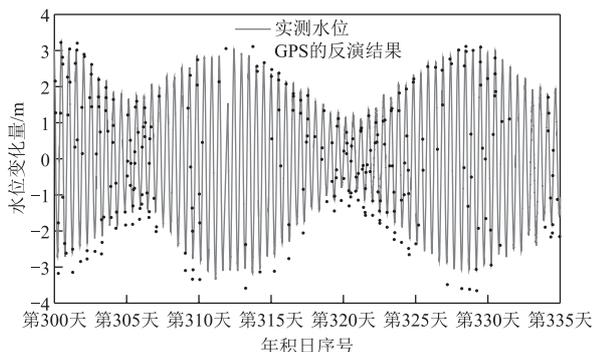


图 15 反演水位变化量与实测水位变化量

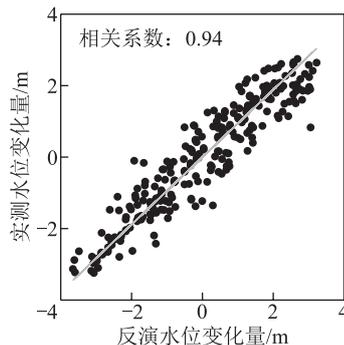


图 16 反演水位与实测水位相关性分析

所示。从图 15、图 16 可以看出,反演结果与实测结果基本一致。统计结果显示 BRST 站 GPS 反演水位变化量与实测水位变化量的差值的 RMS 值为 0.58 m,相关系数达 0.94。分析原因是由于航道宽度限制,反演所采用的数据卫星高度角较大,所以航道反演精度比大坝数据反演的精度低。

2.4 海面变化探测

海面 GNSS 数据来自美国国家大地测量局 (The National Geodetic Survey, NGS) 连续运行基准站 (continuously operating reference station, CORS) 的 CACC 站。CACC 测站位置如图 17 所示。



图 17 CACC 测站位置

结合图 17 测站位置及周边环境情况,海面实验数据采用方位角为 240°~360°的数据用于反演分析。为了选择合适的卫星观测高度角进行反演分析,本文模拟了当反射面到接收机天线相位中心的垂直距离为 6 m 时,CACC 站周边的菲涅尔反射区(如图 18 所示)。从图 18 可以看出,当卫星高度角在 5°~15°范围内时,接收机可以接收到周边 120 m 范围的反射信号。

为了更好地了解反演分析所采用的卫星数据的情况,本文以 GPS 为例绘制了同时满足方位角和高度角要求的卫星数据的反射点轨迹(如图 19 所示)。图 19 反映了用于海面高度反演分析的各 GPS 卫星对应的反射点轨迹。综合测站周边及数据情况,为了获得更高精度的反演结果,CACC 站

采用卫星高度角在 5°~15°范围内的数据进行反演解算。

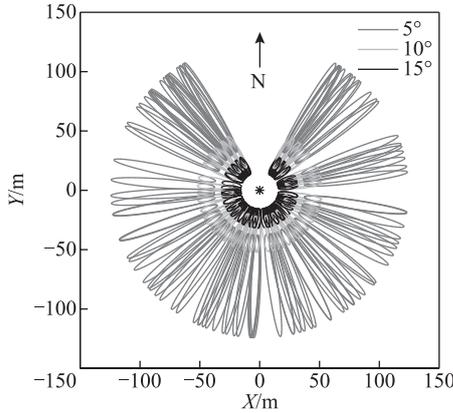


图 18 CACC 测站菲涅尔反射区

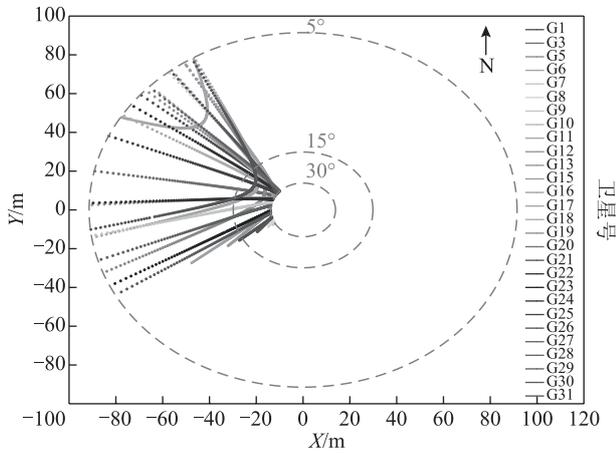


图 19 CACC 测站反射点轨迹

CACC 站 GPS 反演的水位变化量与实测水位变化量的对比如图 20 所示，二者相关性如图 21 所示。

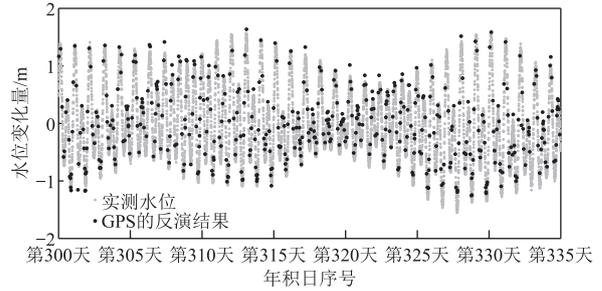


图 20 反演水位变化量与实测水位变化量

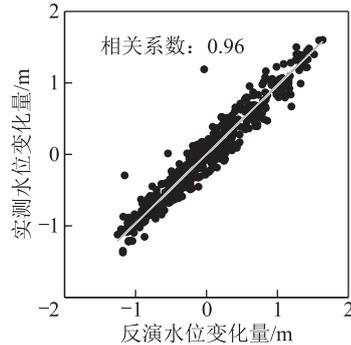


图 21 反演水位与实测水位相关性分析

从图 19、图 20 可以看出，反演结果与实测结果基本一致。统计结果显示，GPS 反演水位变化量与实测水位变化量的差值的 RMS 值为 0.16 m，相关系数达 0.96。这是由于海面数据波动较大，导致数据反演精度较大坝水位反演精度低，但是所采用的数据卫星方位角较低，因此海面反演精度优于航道数据反演精度。

不同水域环境，GNSS R 水位探测结果的对比分析如表 4 所示，其中变化量差值为采用不同测量方法得到的水位变化量的差值。

表 4 不同水域环境 GNSS+R 水位探测结果对比分析

测站	方位角/(°)	高度角/(°)	GNSS 信号	相关系数	变化量差值的 RMS 值/m
XK03 (大坝)	220~350	5~15	GPS L1	0.99	0.11
			BDS I2	0.99	0.09
BRST (航道)	130~270	15~40	GPS L1	0.94	0.58
CACC (海面)	240~360	5~15	GPS L1	0.96	0.16

3 结束语

GNSS 成为地表环境监测的新兴遥感手段。本文在详细介绍 GNSS R 基本原理及如何通过菲涅尔反射区和卫星反射点轨迹选择合适 GNSS 卫星信号数据的基础上，对大坝、航道以及海域 3 种水域环境的数据进行了反演分析，验证了 GNSS R 技术在水位变化监测应用中的可行性。实验结果表明：

1) 在 3 种水域环境下，GNSS R 反演结果和实测数据在整体趋势上吻合较好，大坝水位反演精度最高，BDS 和 GPS 反演水位变化量与实测水位变化量相关系数均达到 0.99，并且在该环境下，BDS 反演水位变化量与实测水位变化量的差值的 RMS 值为 0.09 m，GPS 得到的 RMS 为 0.11 m，考虑到 GPS 反演的结果在 1 d 之中多个时段有分布，本文求平均的方法会降低 GPS 反演的精度，因此认为

BDS 反演精度和 GPS 反演的精度相当; 在航道环境中, 由于采用数据的卫星高度角相对较高, 反演精度最差, GPS 反演水位变化量与实测水位变化量相关系数达 0.94, 二者差值的 RMS 值为 0.58 m; 在海域环境中, GPS 反演水位变化量与实测水位变化量相关系数达 0.96, 二者差值的 RMS 值为 0.16 m。

2) GNSS R 技术在水位变化探测应用中, 水位变化的剧烈程度和可用于 GNSS R 反演解算的卫星高度角, 对于水位反演精度的影响很大, 水位变化相对平缓、反演数据使用的卫星高度角相对较低时, 均可提高反演的精度。

参考文献

- [1] MARTIN-NEIR A M. A passive reflectometry and interferometry system (PARIS) application to ocean altimetry [J]. ESA Journal, 1993, 17(4): 331-355.
- [2] BILICH A, LARSON K M, AXELRAD P. Observations of signal-to-noise ratios (SNR) at geodetic GPS site CASA: implications for phase multipath [EB/OL]. [2020-03-28]. https://www.kristinelarson.net/wp-content/uploads/2015/10/gps_multipathV2.pdf.
- [3] 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.
- [4] 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): 191-200.
- [5] LÖFGREN J S, HAAS R. Sea level measurements using multi-frequency GPS and GLONASS observations: EURASIP [EB/OL]. [2020-03-28]. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1186/1687-6180-2014-50.pdf>.
- [6] SANTAMARÍA-GÓMEZ A, WATSON C. Remote leveling of tide gauges using GNSS reflectometry: case study at Spring Bay, Australia [J]. GPS Solutions, 2016, 21(2): 1-9.
- [7] 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.
- [8] WANG N Z, XU T H, GAO F, et al. Sea level estimation based on GNSS dual-frequency carrier phase linear combinations and SNR [J]. Remote Sensing, 2018, 10(3): 470.
- [9] LEE C M, KUO C Y, SUN J, et al. Evaluation and improvement of coastal GNSS reflectometry sea level variations from existing GNSS stations in Taiwan [J]. Advances in space research, 2019, 63(3): 1280-1288.
- [10] ROGGENBUCK O, REINKING J, LAMBERTUS T. Determination of significant wave heights using damping coefficients of attenuated GNSS SNR data from static and kinematic observations [J]. Remote Sensing, 2019, 11(4): 409-421.
- [11] 匡翠林, 刘凯, 周要宗. 基于 GPS 信噪比数据观测海平面变化研究 [J]. 海洋测绘, 2018, 38(6): 40-43.
- [12] 吕铮, 冯威, 黄丁发. GNSS SNR 信号反演大坝水位变化 [J]. 大地测量与地球动力学, 2020, 40(2): 146-151.
- [13] 吴继忠, 杨荣华. 利用 GPS 接收机反射信号测量水面高度 [J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(6): 135-138.
- [14] 南阳, 张双成, 黄亮, 等. GPS-IR 技术用于河水面测高实验分析 [J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 126-131.
- [15] 戴凯阳. GNSS-MR 用于雪深监测研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.

引文格式:寇瑞雄,杨树文,化希瑞.切比雪夫多项式在 GLONASS 广播星历中的应用[J].导航定位学报,2021,9(1): 102-108.(KOU Ruixiong, YANG Shuwen, HUA Xirui.Application of Chebyshev polynomial in GLONASS broadcast ephemeris[J].Journal of Navigation and Positioning,2021,9(1): 102-108.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210115.

切比雪夫多项式在 GLONASS 广播星历中的应用

寇瑞雄, 杨树文, 化希瑞

(兰州交通大学 测绘与地理信息学院/地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心/
甘肃省地理国情监测工程实验室, 兰州 730070)

摘要: 针对格洛纳斯卫星导航系统 (GLONASS) 广播星历在计算卫星坐标时需要二次积分并不断迭代, 在实时导航中会降低卫星坐标计算效率的问题, 提出利用切比雪夫多项式拟合卫星轨道的方法: 利用广播星历原有方法计算卫星坐标并与精密星历进行对比, 验证 GLONASS 广播星历的卫星坐标精度是米级; 然后利用切比雪夫多项式对卫星坐标进行拟合, 可知不同因素对拟合精度有影响, 在固定拟合时间间隔时, 随着节点个数增加最优拟合阶数不断增大, 而在不同时间间隔下, 最优拟合阶数不完全一致。实验结果表明, 使用切比雪夫多项式拟合 GLONASS 广播星历时, 根据需求选择合适的拟合时间间隔和拟合阶数, 其拟合精度可以满足需要。

关键词: 格洛纳斯卫星导航系统; 广播星历; 切比雪夫多项式; 拟合精度

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0102-07

Application of Chebyshev polynomial in GLONASS broadcast ephemeris

KOU Ruixiong, YANG Shuwen, HUA Xirui

(Faculty of Geomatic, Lanzhou Jiaotong University/National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring/Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is easily reduced for the efficiency of satellite coordinate calculation in real-time navigation due to two integrations and constant iteration during calculating satellite coordinates by GLOBAL NAVIGATION Satellite System (GLONASS) broadcast ephemeris, the paper proposed to fit satellite orbits with Chebyshev polynomial: the satellite coordinates were calculated by the original method of broadcast ephemeris and compared with the precise ephemeris, and it was verified that the satellite coordinate precision of the GLONASS broadcast ephemeris was on meter level; then Chebyshev polynomial was used to fit the satellite coordinates, knowing the influence of different factors on the fitting accuracy, on the one hand, during the fixed fitting time interval, the optimal fitting order increased with the number of nodes getting larger, on the other hand, during different time intervals, the optimal fitting orders were not completely consistent. Experimental result showed that the fitting accuracy could meet the needs with the appropriate fitting time interval and fitting order selected according to the requirements when using Chebyshev polynomial to fit the GLONASS broadcast ephemeris.

Keywords: global navigation satellite system; broadcast ephemeris; Chebyshev polynomial; fitting accuracy

收稿日期: 2020-04-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFB0504201); 国家自然科学基金项目 (41761082); 兰州交通大学优秀平台支持项目 (201806)。

第一作者简介: 寇瑞雄 (1995—), 男, 甘肃天水人, 博士研究生, 研究方向为 GNSS 数据处理。

通信作者简介: 杨树文 (1975—), 男, 甘肃靖远人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为遥感数字图像处理及信息自动提取、灾害遥感。

0 引言

格洛纳斯卫星导航系统 (global navigation satellite system, GLONASS) 于 1996 年初卫星组网成功并正式投入运行, 2003 年, 俄罗斯政府启动 GLONASS 现代化工作, 2010 年重新建成了 24 颗卫星组成的星座, 2015 年发射新卫星并改善了各系统的性能^[1]。俄罗斯航天局计划在 2019—2033 年间, 发射 46 颗不同型号的导航卫星^[2], 并于 2019 年 5 月 27 日成功发射了一颗“GLONASS-M”导航卫星^[3], 因此, 需要持续关注 GLONASS 的发展状况。实时导航定位需要用广播星历计算卫星位置, 但 GLONASS 计算卫星位置时, 需要以参考时刻为中心向前、向后积分并不断迭代^[4], 这样会消耗较长时间和占用较多内存空间, 影响计算效率。为此, 可用 1 个时间多项式来表示卫星星历, 计算卫星位置时只需调用多项式系数, 这样能提高运算效率^[1]。

当前研究全球定位系统 (global positioning system, GPS) 和北斗卫星导航系统 (BeiDou navigation satellite system, BDS) 广播星历拟合的文献较多^[5-9], 且 BDS 和 GPS 使用广播星历计算卫星坐标都采用 16 参数模型^[10], 而 GLONASS 广播星历计算卫星坐标是通过二次积分且不断迭代的方法, 与 GPS 和 BDS 所用方法完全不同, 导致 GLONASS 广播星历拟合存在差异。文献 [11-12] 只对 GLONASS 卫星广播星历的精度进行了分析; 文献 [13] 分析了 GLONASS 广播星历和 GPS 广播星历的精度, 使用拉格朗日插值法对 GLONASS 广播星历进行插值分析。但拉格朗日插值法在对离散数据进行插值时, 随着阶数的增高会出现明显的“龙格”现象, 影响插值精度。本文研究切比雪夫多项式拟合法对 GLONASS 卫星坐标拟合精度的影响。

1 GLONASS 广播星历

1.1 GLONASS 卫星位置计算

GLONASS 广播星历与 GPS 广播星历提供的参数完全不一样: GPS 给出卫星的开普勒轨道数据和卫星时钟, 每 2 h 广播 1 次; 而 GLONASS 广播星历提供在俄罗斯大地坐标框架 (parametry zelmy1990, PZ90) 下参考时刻的卫星位置 (X, Y, Z)、卫星 3 个方向的速度和 3 个方向的日月摄动加速度, 每 30 min 广播 1 次^[1]。

GLONASS 卫星广播星历采用 PZ90 坐标系, 通常以卫星参数为轨道初值, 根据卫星运动摄动

力模型, 使用数值积分法计算卫星坐标。文献 [14] 给出详细计算过程, 其中加速度的简略公式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}x + \frac{3}{2}C_2^0 \frac{GM \cdot a_e^2}{r^5}x(1 - \frac{5z^2}{r^2}) + \omega^2x + 2\omega v_y + a_x \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}y + \frac{3}{2}C_2^0 \frac{GM \cdot a_e^2}{r^5}y(1 - \frac{5z^2}{r^2}) + \omega^2y + 2\omega v_x + a_y \\ \frac{dv_z}{dt} &= -\frac{GM}{r^3}z + \frac{3}{2}C_2^0 \frac{GM \cdot a_e^2}{r^5}z(3 - \frac{5z^2}{r^2}) + a_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: GM 为地球引力常量 ($GM=398\ 600.44\ \text{km}^3/\text{s}^2$); (x, y, z) 为卫星 3 维坐标; (v_x, v_y, v_z) 为卫星 3 个方向的速度; r 为卫星到地球质心的距离, $r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$; a_e 为地球的长半径, $a_e = 6\ 378.136\ \text{km}$; C_2^0 为地球重力系数, $C_2^0 = 0.001\ 082\ 63$; ω 为地球自转加速度, $\omega = 0.000\ 072\ 921\ 15\ \text{rad/s}$; (a_x, a_y, a_z) 为日月摄动加速度。

将式 (1) 卫星加速度表达成关于坐标、速度和日月摄动加速度的函数形式, 可得 t_i 时刻的加速度函数式为

$$\left. \begin{aligned} a_{x_i} &= f_1(t_i, x_i, y_i, z_i, u_i, v_i, w_i, a_x) \\ a_{y_i} &= f_2(t_i, x_i, y_i, z_i, u_i, v_i, w_i, a_y) \\ a_{z_i} &= f_3(t_i, x_i, y_i, z_i, u_i, v_i, w_i, a_z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: (u_i, v_i, w_i) 为 t_i 时刻 (x_i, y_i, z_i) 方向的速度; ($a_{x_i}, a_{y_i}, a_{z_i}$) 为 t_i 时刻时 3 个方向上的加速度; (a_x, a_y, a_z) 为日月摄动加速度。

以参考时刻 t_0 为初始状态, 则 t_b 时刻卫星位置的积分方程表示为:

$$v(t_b) = v_0 + \int_{t_0}^{t_b} a dt \quad (3)$$

$$s(t_b) = s(t_0) + \int_{t_0}^{t_b} v dt \quad (4)$$

式中: $s(t_0)$ 为 t_0 时刻的卫星位置; a 为卫星加速度; v_0 为 t_0 时刻的卫星速度。使用定步长 4 阶朗格-库特 (Runge-Kutte) 法对卫星轨道进行积分, 经过二次积分, 会得到 t_b 时刻卫星位置。文献 [4] 对使用定步长 4 阶 Runge-Kutte 法的积分过程有详细介绍。

1.2 GLONASS 广播星历精度评定

广播星历对实时导航定位精度有着重要的作用, 且 GLONASS 各系统一直处于不断完善的状态, 所以评定 GLONASS 广播星历的精度有着重要意义。本文使用德国地学研究中心 (Deutsches Geo Forschungs Zentrum, GFZ) 提供的 2019-08-29 混合广播星历和混合精密星历。用广播星历计算

精密星历历元时刻的卫星位置，由于混合星历的时间系统不是 GLONASS 时，所以计算时，需要注意时间系统的统一^[15]。

混合精密星历一般提供 24 颗 GLONASS 卫星的坐标，但当天 R04、R06 和 R11 卫星缺失数据，因此用剩下的 21 颗精密星历坐标为真值，验证广播星历计算卫星坐标的精度。统计得到当天有数据卫星的广播星历相对于精密星历的误差绝对值的最大值、绝对值的平均误差和均方差，如图 1、图 2 和图 3 所示。

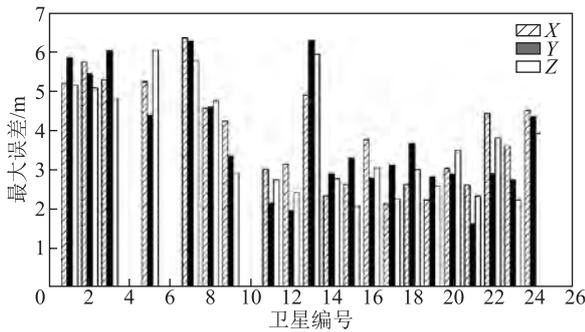


图 1 GLONASS 广播星历最大误差

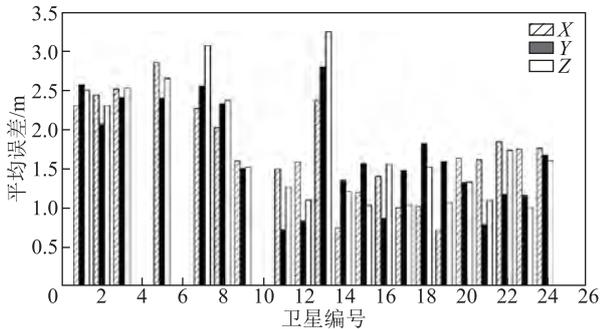


图 2 GLONASS 广播星历平均误差

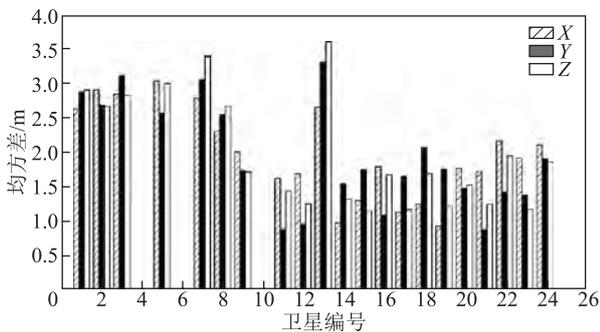


图 3 GLONASS 广播星历均方差

从图 1 至图 3 可得，该天 GLONASS 广播星历的最大误差出现在 R07 星的 X 方向上，为 6.38 m，大多数卫星在 X、Y 和 Z 方向上的最大误差不超过 5 m，最大平均误差出现在 R13 星的 Z 方向上，为 3.24 m，只有 R01 星、R05 星、R07 星和 R13 星在

部分方向上的平均误差大于 2.5 m，R11 星在 Y 方向上的平均误差最小，为 0.72 m。R01 星、R02 星、R03 星、R05 星、R07 星和 R08 星在每个方向上的均方差为 2.5~3.5 m 之间；R13 星在 Z 方向上的均方差为 3.6 m，是该天均方差的最大值，除了 R13 星之外，在 R11 星至 R24 星的均方差基本都小于 2 m。从整体上看，GLONASS 广播星历给出的大多数卫星在每个方向上的均方差都小于 3 m。

2 切比雪夫多项式拟合原理

对 GLONASS 广播星历，在 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 时间间隔内，使用 n 阶切比雪夫多项式进行拟合，其中 t_0 为初始历元， Δt 为拟合区间长度。首先将 $t \in [t_0, t_0 + \Delta t]$ 处理成 $\tau \in [-1, 1]$ 的形式，即

$$\tau = \frac{2}{\Delta t}(t - t_0) - 1, \quad t \in [t_0, t_0 + \Delta t] \quad (5)$$

因而卫星的 3 维坐标可表示为

$$\left. \begin{aligned} X(t) &= \sum_{i=0}^n C_{X_i} T_i(\tau) \\ Y(t) &= \sum_{i=0}^n C_{Y_i} T_i(\tau) \\ Z(t) &= \sum_{i=0}^n C_{Z_i} T_i(\tau) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中： n 为切比雪夫多项式阶数； C_{X_i} 、 C_{Y_i} 和 C_{Z_i} 分别为 3 个坐标分量的切比雪夫多项式系数；切比雪夫多项式 $T_i(\tau)$ 用下式递推得到，即

$$\left. \begin{aligned} T_0(\tau) &= 0 \\ T_1(\tau) &= \tau \\ &\vdots \\ T_n(\tau) &= 2\tau T_{n-1}(\tau) - T_{n-2}(\tau) \end{aligned} \right\}, \quad |\tau| \leq 1, \quad n \geq 2 \quad (7)$$

以 X 坐标为例，使用间接平差的方法求解多项式系数，将式 (6) 的第 1 个式子列误差方程并整理成矩阵形式为：

$$V = TC - X \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} V_{X_1} \\ V_{X_2} \\ V_{X_3} \\ \vdots \\ V_{X_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_0(\tau_1) & T_1(\tau_1) & T_2(\tau_1) & \cdots & T_n(\tau_1) \\ T_0(\tau_2) & T_1(\tau_2) & T_2(\tau_2) & \cdots & T_n(\tau_2) \\ T_0(\tau_3) & T_1(\tau_3) & T_2(\tau_3) & \cdots & T_n(\tau_3) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_0(\tau_m) & T_1(\tau_m) & T_2(\tau_m) & \cdots & T_n(\tau_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{X_0} \\ C_{X_1} \\ C_{X_2} \\ \vdots \\ C_{X_n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ \vdots \\ X_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 m 为 X 坐标个数。

从而可以计算 X 坐标的切比雪夫多项式系数 C 为

$$C = (T^T T)^{-1} T^T X \quad (10)$$

同理, 使用上述方法可以求得 Y 和 Z 坐标的切比雪夫多项式系数, 根据计算得到的多项式可以计算拟合区间内任意时刻的 3 维坐标。

3 GLONASS 广播星历拟合精度分析

本文使用 2019-08-28—2019-09-06 的总共 10 d 的 GLONASS 广播星历数据, 由于 GLONASS 卫星轨道都是圆形轨道, 所以选取 R01 星的广播星历进行实验分析。GLONASS 广播星历每 30 min 发布 1 次, 每颗卫星 1 d 内共有 48 组轨道参数, R01 星 10 d 共有 480 组轨道参数。

文献[14]提出以参考历元前后 15 min 为有效的拟合区间, 使用第 2 节的方法计算出所有参考历元前后 15 min 时间段内, 以 30 s 为时间间隔的卫星 3 维坐标, 作为后续切比雪夫多项式拟合结果检核的真值。将拟合出的卫星坐标与对应时刻原有方法求得的卫星坐标求差, 对残差进行统计,

求得绝对值的最大值、平均值和均方差, 进行拟合精度评定。由于切比雪夫多项式拟合精度与时间间隔、节点个数和拟合阶数都有关系, 需要分两个方面进行讨论: 一方面是在固定时间间隔下, 不同节点个数和拟合阶数对精度的影响; 另一方面是在不同时间间隔下, 达到理想拟合精度时, 节点个数和拟合阶数最优组合的变化情况。

3.1 不同节点数和拟合阶数下的拟合精度

在 1 个参考历元前后 15 min 的时间段内, 设节点时间间隔为 120 s, 则 30 min 共有 16 个已知点; 每 30 s 设置 1 个检核点, 则总共有 61 个检核点, 通过选取不同节点个数和拟合阶数对广播星历进行拟合, 并统计在 X 、 Y 和 Z 方向上的拟合误差。本节总共使用 480 个参考历元拟合区间, 检核点最多时达到 29 280 个, 统计在不同节点个数和拟合阶数下广播星历 3 个方向的拟合误差, 具体如表 1 至表 3 所示, 需要注意的是, 节点个数要大于等于拟合阶数, 所以表 1 至表 3 给出了表格的上三角部分。用误差绝对值的最大值 (Max)、误差绝对值的平均值 (Mean) 和误差的均方差 (Std) 作为拟合精度的评价指标。

表 1 X 方向上节点个数与拟合阶数不同组合的拟合误差

拟合阶数	7 个节点的拟合结果/mm			10 个节点的拟合结果/mm			13 个节点的拟合结果/mm			16 个节点的拟合结果/mm		
	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std
6	167.3	41.73	41.15	1 616	480.3	373	8 290	2 631	1 945	29 726	97 158	7 127
7	1.613	0.247	0.362	16.99	4.031	3.67	110.7	30.28	24.26	486.7	143.1	108.5
8				0.242	0.031	0.03	1.441	0.303	0.270	7.316	1.816	1.464
9				0.178	0.009	0.01	0.081	0.008	0.009	0.160	0.022	0.019
10							0.130	0.008	0.011	0.112	0.008	0.009
11							0.276	0.011	0.018	0.134	0.008	0.010
12							0.592	0.018	0.039	0.197	0.009	0.012
13							20.16	0.351	1.158	0.585	0.015	0.032
14										2.176	0.033	0.093
15										27.90	0.344	1.317
16										370.6	4.508	17.68

表 2 Y 方向上节点个数与拟合阶数不同组合的拟合误差

拟合阶数	7 个节点的拟合结果/mm			10 个节点的拟合结果/mm			13 个节点的拟合结果/mm			16 个节点的拟合结果/mm		
	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std
6	167.3	41.61	41.1	1 615	478.8	373	8 286	2 622	1 942	29 720	9 678	7 117
7	1.583	0.248	0.36	16.99	4.042	3.68	110.7	30.36	24.29	486.9	143.6	108.6
8				0.235	0.031	0.04	1.431	0.302	0.269	7.309	1.808	1.462
9				0.168	0.009	0.01	0.101	0.009	0.009	0.160	0.022	0.020

(续表 2)

拟合阶数	7个节点的拟合结果/mm			10个节点的拟合结果			13个节点的拟合结果/mm			16个节点的拟合结果/mm		
	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std
10							0.111	0.008	0.010	0.097	0.008	0.009
11							0.216	0.011	0.017	0.130	0.006	0.009
12							0.685	0.018	0.042	0.216	0.008	0.012
13							17.62	0.323	1.080	0.506	0.014	0.030
14										2.000	0.030	0.088
15										22.12	0.324	1.210
16										341.8	4.520	17.75

表 3 Z方向上节点个数与拟合阶数不同组合的拟合误差

拟合阶数	7个节点的拟合结果/mm			10个节点的拟合结果/mm			13个节点的拟合结果/mm			16个节点的拟合结果/mm		
	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std
6	52.15	13.14	12.9	501.3	151.2	117	2 565	828.0	610.2	9 194	3 057	2 235
7	0.359	0.055	0.08	3.782	0.860	0.79	24.65	6.463	5.278	108.4	30.54	23.64
8				0.104	0.010	0.01	0.246	0.046	0.040	1.024	0.269	0.207
9				0.175	0.011	0.02	0.093	0.010	0.011	0.081	0.010	0.010
10				0.771	0.035	0.07	0.142	0.010	0.012	0.096	0.009	0.010
11							0.276	0.013	0.020	0.119	0.009	0.011
12							0.667	0.024	0.050	0.188	0.011	0.012
13							20.50	0.400	1.295	0.540	0.018	0.036
14										1.453	0.041	0.103
15										24.92	0.403	1.478
16										285.3	6.299	21.68

从表 1 至表 3 可知, 当节点个数和拟合阶数都为 7 时, X 、 Y 和 Z 三个方向的误差绝对值的最大值分别为 1.613、1.583 和 0.359 mm; 当节点个数为 10, 拟合阶数为 8 时, X 、 Y 和 Z 三个方向的拟合精度指标均小于 1 mm; 当节点个数为 13, 拟合阶数为 8 时, Z 方向的误差绝对值的最大值为 0.246 mm、平均值为 0.046 mm、均方差为 0.04 mm, X 和 Y 方向误差绝对值的最大值小于 2 mm。当节点个数为 16 时, 整体上随着拟合阶数的增加拟合精度迅速提高, 拟合阶数为 9 时, 3 个方向误差绝对值的最大值均为小于 1 mm; 当拟合阶数取 10~14 的情况下, 3 个方向的误差均在逐渐变大, 3 个方向的误差绝对值的最大值为 2.176 mm, 远小于 GLONASS 广播星历米级的误差; 但当拟合阶数取 15 和 16 时, 3 个方向的拟合误差较大且需

要消耗更多时间, 因此在广播星历拟合过程要考虑拟合误差和计算效率的问题。

3.2 不同时间间隔下的最优拟合阶数

考虑到在固定时间间隔下, 拟合误差不会随拟合阶数的增大而一直减小, 因此, 将在固定拟合区间里, 不同时间间隔下, X 、 Y 和 Z 三个方向的拟合精度指标均达到亚毫米级且拟合阶数最小的拟合阶数定义为该时间间隔下的最优拟合阶数。继续使用 10 d 的 R01 卫星的广播星历, 在每个参考历元前后 15 min 区间里, 将时间间隔分别设为 120、150、180 和 210 s, 统计得到最优组合拟合阶数, 拟合精度分析如表 4 所示。同时给出 R01 卫星在时间间隔为 210 s 拟合最优组合时的 X 、 Y 和 Z 三个方向是 480 个参考历元区间内的所有检核点拟合误差, 如图 4 至图 6 所示。

表 4 不同时间间隔下的节点个数和拟合阶数的最佳组合

时间 间隔/s	节点 个数	拟合 阶数	X 方向的结果/mm			Y 方向的结果/mm			Z 方向的结果/mm		
			Max	Mean	Std	Max	Mean	Std	Max	Mean	Std
120	16	9	0.160	0.022	0.019	0.160	0.022	0.020	0.081	0.010	0.010
150	13	9	0.227	0.023	0.023	0.212	0.023	0.024	0.108	0.011	0.011
180	11	9	0.286	0.024	0.031	0.286	0.024	0.031	0.156	0.013	0.015
210	9	9	0.451	0.024	0.039	0.492	0.024	0.040	0.365	0.021	0.032

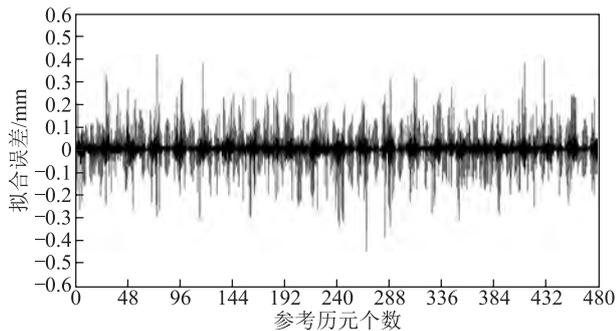


图 4 210 s 时间间隔最佳拟合阶数下 X 方向的拟合误差

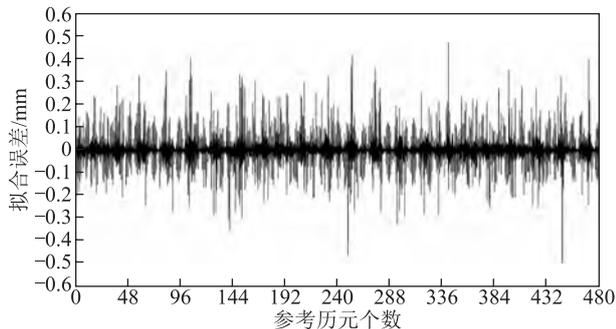


图 5 210 s 时间间隔最佳拟合阶数下 Y 方向的拟合误差

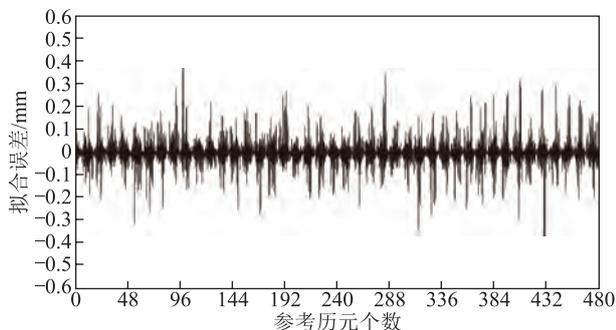


图 6 210 s 时间间隔最佳拟合阶数下 Z 方向的拟合误差

分析表 4 可得: 在固定拟合区间内, 不同时间间隔下, 节点个数不同, 拟合阶数取 9 阶的情况下, 最大误差、平均误差和均方差都小于 1 mm,

满足精度需求; 在相同拟合条件下, Z 方向的拟合精度高于 X 和 Y 方向的拟合精度。同样从图 4 至图 6 明显看出, Z 方向的拟合误差小于 X 和 Y 方向的拟合误差, 但 3 个方向的拟合误差均小于 1 mm, 所以对广播星历的精度影响可以忽略。在实际应用时, 根据精度需求和运算效率, 选择上述不同的切比雪夫多项式拟合组合, 可以很好地拟合 GLONASS 广播星历。

4 结束语

本文首先使用 2019-08-28—2019-09-06 共 10 d 的 GLONASS 广播星历数据, 计算了卫星坐标, 然后选取 2019-8-29 的卫星坐标数据, 评定了广播星历的精度, 最后利用切比雪夫多项式拟合法对 10 d 的卫星坐标进行拟合, 得出以下结论:

1) GLONASS 广播星历计算出的坐标卫星(X、Y、Z), 在 3 个方向上的均方差绝大多数不超过 3 m, 最大误差小于 6.5 m, 误差平均值基本小于 2.5 m, 总之广播星历的误差处于米级。

2) 当节点时间间隔固定时, 不同节点个数的最优拟合阶数不完全一样。随着节点个数的增加, 拟合阶数过低或者过高的拟合精度, 均低于最优拟合阶数的精度, 在时间间隔为 120 s, 节点个数为 16, 选择拟合阶数为 9 时, 拟合误差最大值为 0.16 mm, 远小于广播星历米级误差, 可以忽略不计。

3) 在固定拟合区间的情况下, 不同时间间隔的最优拟合阶数变化不大, 当拟合阶数为 9 阶时, 拟合精度可以达到亚毫米级, 满足精度要求。尽管拟合时间间隔取值较密时, 精度相对较高, 但效率会有所下降。因此在实际使用过程中, 须兼顾精度和效率, 选择合适的拟合时间间隔和阶数。

4) 切比雪夫多项式拟合法适用于 GLONASS 广播星历的卫星坐标拟合, 在选取合适的拟合时间间隔和拟合阶数时, 拟合精度足以满足要求。故切比雪夫多项式可以作为 1 种新的广播星历计算卫星坐标的形式。

参考文献

- [1] 李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2016.
- [2] 中国卫星导航系统管理办公室. 俄罗斯: 拟在 15 年内发射 46 枚“格洛纳斯”卫星[EB/OL]. (2019-05-11)[2020-04-23]. http://www.beidou.gov.cn/yw/gjdt/201905/t20190530_18387.html.
- [3] 中国卫星导航系统管理办公室. 俄罗斯: 成功发射一颗格洛纳斯卫星[EB/OL]. (2019-05-31)[2020-04-23]. http://www.beidou.gov.cn/yw/gjdt/201906/t20190603_18401.html.
- [4] 葛奎, 王解先. GLONASS 卫星位置计算与程序实现[J]. 测绘与空间地理信息, 2009, 32(2): 137-140.
- [5] 孙华丽, 张政治. 全球定位系统卫星位置计算中插值方法精度分析[J]. 导航定位学报, 2013, 1(3): 89-93.
- [6] 陶庭叶, 高飞, 刘文星, 等. 利用 RBF 神经网络对 GPS 广播星历插值[J]. 大地测量与地球动力学, 2012, 32(2): 44-46.
- [7] 王海春, 贾小林, 李鼎, 等. 北斗三号卫星广播星历精度评估分析[J]. 导航定位学报, 2019, 7(4): 60-63, 74.
- [8] 王解先, 王君刚, 陈俊平. 基于卫星位置与速度发北斗卫星广播星历拟合[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(1): 155-160.
- [9] 文援兰, 刘光明, 张志. 基于无奇异变换的广播星历拟合算法[J]. 宇航学报, 2011, 32(12): 2478-2483.
- [10] 徐永明, 刘志平, 张明凯. BDS 开普勒轨道参数时变特性分析[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2019, 38(5): 64-71.
- [11] 刘路, 郭金运, 夏要伟, 等. GLONASS 广播星历轨道误差分析与精度评估[J]. 中国科技论文, 2019, 14(2): 232-238.
- [12] 郭际明, 孟祥广, 李宗华, 等. GLONASS 卫星广播星历精度分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(1): 68-71.
- [13] 肖琴琴, 崔先强, 周忠于, 等. GLONASS 和 GPS 广播星历参数及拟合算法分析[J]. 导航定位学报, 2016, 4(3): 20-25.
- [14] Global Navigation Satellite System (GLONASS). Interface control document (Edition 5. 1) [EB/OL]. [2020-04-23]. <http://russianspacesystems.ru/wp-content/uploads/2016/08/ICD-GLONASS-CDMA-General.-Edition-1.0-2016.pdf>.
- [15] 余文坤, 戴吾蛟, 蔡昌盛, 等. GPS/GLONASS 广播星历精度分析[J]. 工程勘察, 2012, 40(8): 79-83.

引文格式: 潘博闻, 李志, 牛彦波. 一种基于 GNSS-RTK 的大跨径桥梁模态参数识别方法[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 109-115. (PAN Bowen, LI Zhi, NIU Yanbo. A modal parameter identification method of long-span bridges based on GNSS-RTK technology[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 109-115.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210116.

一种基于 GNSS-RTK 的大跨径桥梁模态参数识别方法

潘博闻¹, 李志², 牛彦波³

(1. 天津市陆海测绘有限公司, 天津 300304; 2. 长江科学院, 武汉 430010; 3. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300350)

摘要: 为了进一步改善运营期大跨径桥梁结构模态参数的识别精度, 提出一种基于全球卫星导航系统 (GNSS) 实时动态差分 (RTK) 的大跨径桥梁模态参数识别方法: 给出方法的基本原理; 利用切比雪夫滤波方法对 GNSS 原始观测信息进行滤波处理; 然后利用互补集合经验模态分解 (CEEMD) 与随机减量技术 (RDT), 从滤波信号中提取结构的模态参数 (固有频率与阻尼比)。实验结果表明: 该方法可以去除由于噪声影响所产生的虚假模态, 并且模态提取结果与有限元分析结果吻合; GNSS-RTK 技术可有效应用到大跨径桥梁结构变形监测中。

关键词: 全球卫星导航系统; 实时动态差分; 大跨径桥梁; 互补集合经验模态分解; 随机减量技术; 模态参数识别方法

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0109-07

A modal parameter identification method of long-span bridges based on GNSS-RTK technology

PAN Bowen¹, LI Zhi², NIU Yanbo³

(1. Tianjin Surveying and Hydrography Co., Ltd., Tianjin 300304, China;

2. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

3. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China)

Abstract: In order to further improve the identification accuracy of modal parameters of long-span bridges in operation period, the paper proposed a method of the modal parameter identification based on Global Navigation Satellite Systems (GNSS) under the Real Time Kinematic (RTK) mode: the basic principle of the method was given; and Chebyshev filter was used to filtering the original observation information of GNSS; then the structural modal parameters of natural frequencies and damping ratios were extracted from the filter signals by using Complementary Ensemble Empirical Mode Decomposition (CEEMD) and Random Decrement Technique (RDT). Experimental result showed that the proposed method could overcome the problem that there may be illusive modes in the vibration signals; and the modal extraction output could agree well with the predicted values of the finite element analysis, which also illustrated that GNSS-RTK technique could be efficiently applicable to monitor the dynamic displacements of long-span bridges.

Keywords: global navigation satellite system; real time kinematic; long-span bridge; complementary ensemble empirical mode decomposition; random decrement technique; modal parameter identification method

0 引言

全球卫星导航系统 (global navigation satellite

systems, GNSS) 可全天候实时监测结构的 3 维坐标信息, 测站之间无需通视, 测程大, 可同步测量多个测点, 尤其是高采样率、多系统 GNSS 的发

收稿日期: 2020-06-28

第一作者简介: 潘博闻 (1986—), 男, 天津人, 本科, 助理工程师, 研究方向为结构健康监测、GNSS 应用。

通信作者简介: 李志 (1989—), 男, 湖北十堰人, 博士后, 研究方向为数据异常检测、海洋测绘。

展,使得该项技术在高精度动态测量中的优势得以体现,目前已经在大型土木工程结构健康监测领域得到了广泛的应用^[1-3]。实时动态差分(real time kinematic, RTK)是1种基于载波相位双差模型的定位技术,根据基线两端的相关性原理,可完全消除相对论效应误差、卫星时钟误差及接收机时钟误差的影响,且对大气折射误差、卫星星历误差有很好的抑制作用。而多路径效应主要取决于测站与反射物之间的距离、反射系数及卫星信号的方向等,即使很短的基线,RTK技术对多路径效应的抑制作用也不大,因此需要采用1种有效的数据滤波方法来削弱其所带来的影响。最新研究表明,切比雪夫滤波器在提高GNSS动态定位精度、抑制多路径效应方面有着良好的表现^[4],因此,本文设计1个5阶切比雪夫1型滤波器,来削弱GNSS传感器背景噪声带来的影响。

结构的模态参数(固有频率、振型、阻尼比)是评估结构使用性能,了解确认结构是否损伤的最基本动力参数。通常情况下,固有频率与振型是通过评估结构有限元模型的自由振动响应来确定的,而结构的阻尼比往往凭经验假定,因此结果可能存在争议。通过现场监测,从结构的响应信号中提取结构的模态参数,对于掌握结构的真实健康状况具有重要的意义。传统模态测试方法,需要在同时已知输入和输出响应的前提下,估计脉冲响应函数或频响函数,进而实现模态参数辨识^[5]。对于大跨径桥梁结构而言,施加激励难度大、成本高,而且易造成结构损伤,因此,仅仅依赖结构的输出响应信号实现结构的模态参数辨识,无疑是最佳的方式,运营模态参数识别方法由此得到了发展,同时也成为了参数辨识领域中的研究热点^[6]。值得注意的是,现有运营模态识别方法均假定结构的振动响应是平稳的,然而,外部激励往往是非平稳的,因此,有必要研究非平稳外激励下的模态参数识别。本文提出1种基于GNSS-RTK的大跨径桥梁模态参数识别方法。

1 大跨径桥梁模态参数识别方法

为了进一步改善运营期大跨径桥梁结构模态参数的识别精度,本文提出1种大跨径桥梁模态参数识别方法。该方法首先在RTK工作模式下,由GNSS接收机获取结构的振动响应信息;其次利用切比雪夫滤波方法,削弱传感器背景噪声的影响并得到结构的动态位移;最后采用互补集合

经验模态分解(complementary ensemble empirical mode decomposition, CEEMD)与随机减量技术(random decrement technique, RDT),从滤波信号中提取结构的模态参数(固有频率与阻尼比)。

1.1 GNSS RTK 获取大跨径桥梁结构振动响应信息

加速度计已经被证明是1种有效的桥梁动态变形监测方法,具有测量精度高、采集频率高、灵敏度好等特点;但是对0.2 Hz以下结构的低频振动不敏感,而且通过二次积分获取的位移会偏离真值。而GNSS接收机可直接获取结构的位移信息,尤其是多系统RTK差分定位技术的出现,使得该方法在大跨径桥梁变形监测领域得到了广泛的应用。文献[7]采用10 Hz高频全球定位系统(global positioning system, GPS)技术,对韩国某一大跨径桥梁的安全性能进行了评估,结果显示,桥面的平均挠度为8.26 mm,桥梁的频率变化为0.004 Hz,均在安全限值以内。文献[8]提出采用GPS与北斗卫星导航系统(Beidou navigation satellite system, BDS)双频测量技术,对1座大跨径悬索桥进行现场实验,结果显示,相比GPS单系统,双系统组合定位技术的精度提高了20%~30%,得到了可靠的桥梁动态变形监测信息。本文使用的GNSS接收机可同时接收GPS、BDS与格洛纳斯卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)三个卫星导航系统的导航卫星信号,为获取结构的高精度振动响应信号提供了可靠的依据。

1.2 切比雪夫滤波方法削弱传感器背景噪声的影响

多路径误差主要位于监测信号的低频部分,低频噪声较高频噪声对结果的影响更为显著;因此本文拟采用切比雪夫1型高通滤波器,来削弱传感器低频背景噪声的影响。该滤波器的幅值二次响应函数 $|H(\omega)|^2$ 可以表示为

$$|H(\omega)|^2 = 1 / \left(1 + \varepsilon^2 T_n^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \right) \quad (1)$$

式中: ε 为通带内幅度波动的程度, ε 越大,波动幅度越大; T_n^2 为阶切比雪夫多项式; ω 为有效通带截至频率; ω_c 为通带波纹。

1.3 互补集合经验模态分解算法消除噪声引起的重构误差

集合经验模态分解(ensemble empirical model decomposition, EEMD)算法^[9]能够将1个非平稳、非线性信号分解为一系列具有明确定义的、从高频至低频排列的准稳态固有模态函数(intrinsic

mode function, IMF) 分量。每 1 个 IMF 分量含有的频率成分, 不仅与原信号的分析频率有关, 而且具有自适应的特点, 具有很高的信噪比。互补集合经验模态分解 CEEMD 方法是针对 EEMD 方法中, 由白噪声引起的重构误差提出的 1 种信号处理方法, 通过在原始信号中引入成对的正负辅助噪声来去除重构信号中的残余辅助噪声。这样做还能够减少引入的噪声集合次数, 提高运算效率^[10]。其具体分析步骤如下:

1) 在原始信号 $y(t)$ 中添加一组白噪声序列 $\eta^\pm(t)$, 形成 2 个新的信号 $Y^\pm(t)$, 即

$$\begin{cases} Y^-(t) = y(t) + \eta^-(t) \\ Y^+(t) = y(t) + \eta^+(t) \end{cases} \quad (2)$$

利用经验模态分解方法 (empirical model decomposition, EMD) 对式 (2) 进行分解, 假定每个信号经分解后得到 N 个 IMF 分量, 则总共会得到 $2N$ 个 IMF 分量^[11];

2) 通过对多个 IMF 分量进行平均运算, 得最终结果, 即

$$\overline{\text{IMF}_i(t)} = \frac{1}{2N} \sum_{j=1}^{2N} \text{IMF}_i^j(t) \quad (3)$$

式中: $\overline{\text{IMF}_i(t)}$ 为经 CEEMD 分解后的第 i 阶 IMF 分量; $\text{IMF}_i^j(t)$ 为第 j 个信号中的第 i 个 IMF 分量。CEEMD 法较好地解决了 EEMD 中由于添加白噪声造成的噪声污染问题, 使得信号重构误差得到了极大的改善。

值得注意的是, 在 IMF 分量中, 可能存在有噪声引起的虚假模态, 1 个简单的解决办法是利用式 (4) 计算每阶分量与待分解信号的相关系数 ρ , 相关系数小于 0.1 的, 就被视为虚假分量予以剔除, 即

$$\rho_i = \frac{\text{cov}(\text{IMF}_i(t), y(t))}{\sigma_{\text{IMF}_i(t)} \sigma_{y(t)}} \quad (4)$$

式中: $\text{cov}(\text{IMF}_i(t), y(t))$ 是第 i 阶 IMF 分量与原始信号 $y(t)$ 的协方差; $\sigma_{\text{IMF}_i(t)}$ 与 $\sigma_{y(t)}$ 分别是第 i 阶 IMF 分量与原始信号 $y(t)$ 的标准差。

1.4 随机减量技术提取结构模态参数

随机减量技术是 1 种简单且有效的时域信号预处理方法, 该方法通过对结构振动响应信号进行多段截取, 并对截取信号进行总体平均运算, 来去掉信号中的随机部分; 进而可得到监测信号中的确定性部分, 即自由衰减信号 (random decrement signal, RDS) $R(\tau)$ ^[12]; 最后可利用对数衰减法, 从

自由衰减信号中提取结构的模态参数。 $R(\tau)$ 的表达形式为

$$R(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \{x(t_i + \tau) | x(t_i) = C\} \quad (5)$$

式中: $x(t)$ 为位移响应信号; $x(t_i + \tau)$ 为划分的时间样本函数; M 为样本数; C 为 $x(t)$ 在时刻 t_i 处的初始条件。

结构的模态频率 ω 可以表示为

$$\omega = \frac{1}{T} \quad (6)$$

式中 T 表示自由衰减信号循环 1 次得到的平均周期。

阻尼比 ξ 可以通过求解方程得到, 即

$$\xi = \sqrt{\frac{\delta^2}{4\pi^2 + \delta^2}} \quad (7)$$

式中 δ 表示对数衰减率, 其计算方法为

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left| \frac{A_i}{A_{i+n}} \right| \quad (8)$$

式中: A_i 、 A_{i+n} 分别为自由衰减信号第 i 次与第 $i+n$ 次循环的幅值。

2 实验与结果分析

2.1 实验方案

选择天津市彩虹大桥作为研究对象, 该桥是 1 座三跨钢管混凝土拱桥, 全桥长 1 215.69 m, 主桥长 504 m, 桥宽 29 m, 计算跨度 160 m, 如图 1 所示。

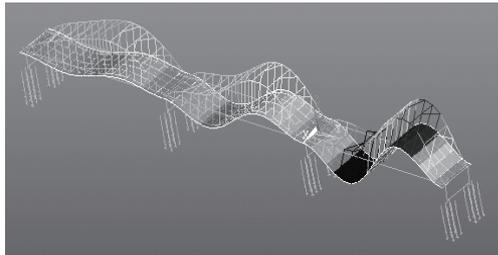


图 1 天津市彩虹大桥

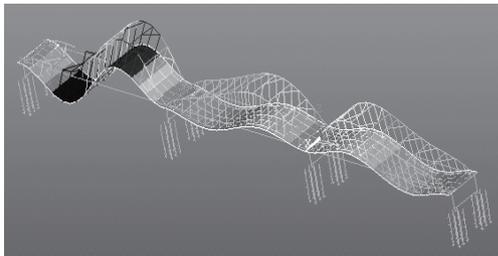
迄今为止, 远远超过了设计荷载的超重车辆的长期通行, 对彩虹桥造成了严重损害。2010 年 6 月, 主桥的 1 个纵向混凝土梁开裂, 导致相邻

2个纵向混凝土梁受到不同程度的损坏。一份检查报告显示,这座桥存在安全隐患。随后,用组合梁替换了所有纵向混凝土梁,并限制大型卡车通行。

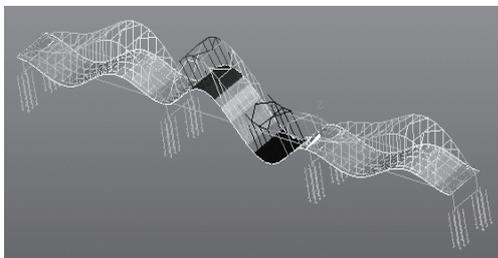
在进行现场监测之前,首先利用安西斯(Ansys)有限元分析软件,建立了桥梁的3维有限元模型,预测了结构前6阶竖向振型,如图2所示。相应的模态频率分别为0.6787、1.0361、1.4171、2.1254、



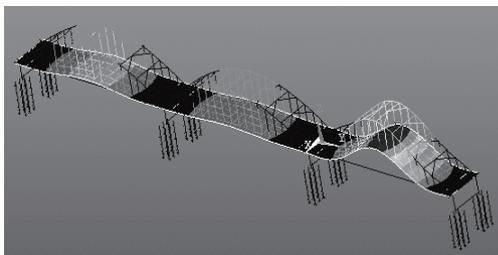
(a) 1阶振型



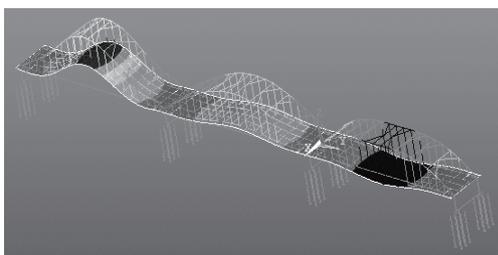
(b) 2阶振型



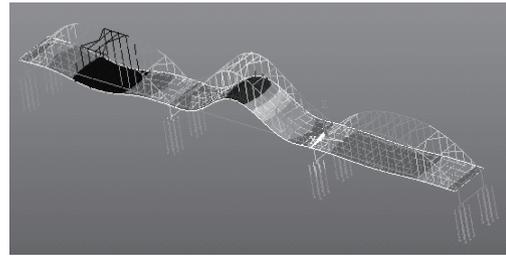
(c) 3阶振型



(d) 4阶振型



(e) 5阶振型



(f) 6阶振型

图2 天津市彩虹大桥有限元模态分析结果

2.3225、2.6945 Hz。在此模型中,钢管、风撑、横梁、纵梁和桥墩均采用 BEAM44 单元进行模拟,系杆采用 LINK10 单元进行模拟,桥面板采用 SHELL63 单元进行模拟,共计 1765 个结点,2727 个单元,每个结点有 6 个自由度,即沿 x 、 y 、 z 轴的平移与绕 x 、 y 、 z 轴的旋转。

观察有限元分析结果可知,变形极大值出现在每跨的 $1/4$ 处、 $1/2$ 处及 $3/4$ 处,在变形极大值处布置传感器,可以有效的反映结构的振动特性,获取到结构较多的振动模态。因此,现场监测尝试采用 10 台高频 GNSS 接收机,将其采样率设置为 50 Hz,用来监测结构在正常运营状态下的振动响应。根据奈奎斯特采样定理,当采样频率大于信号中最高频率的 2 倍时,采样之后的信号能完整地保留原始信号中的信息,本文采用 50 Hz 是能充分满足要求的。GNSS 接收机现场布置如图 3 所示。其中,1 台 GNSS 接收机作为参考站,通过三脚架固定



(a) 参考站



(b) 移动站

图3 GNSS 传感器现场布置

在坚实的地面上, 距离主桥约 120 m, 如图 3 (a) 所示; 其余 9 台 GNSS 接收机作为移动站布置在桥的一侧, 如图 3 (b) 所示, 共计 9 个测点, 其编号为 C1、C2、C3、C4、C5、C6、C7、C8 及 C9。实验时间为 2019:07:10 T 09:00—18:00, 连续监测 9 h。

2.2 数据处理与分析

选取主跨跨中测点进行分析, 其余测点类似, 不再赘述。图 4 (a) 与图 4 (b) 给出了 GNSS 接收机原始观测数据及相应的功率谱密度 (power spectral density, PSD) 分布图。

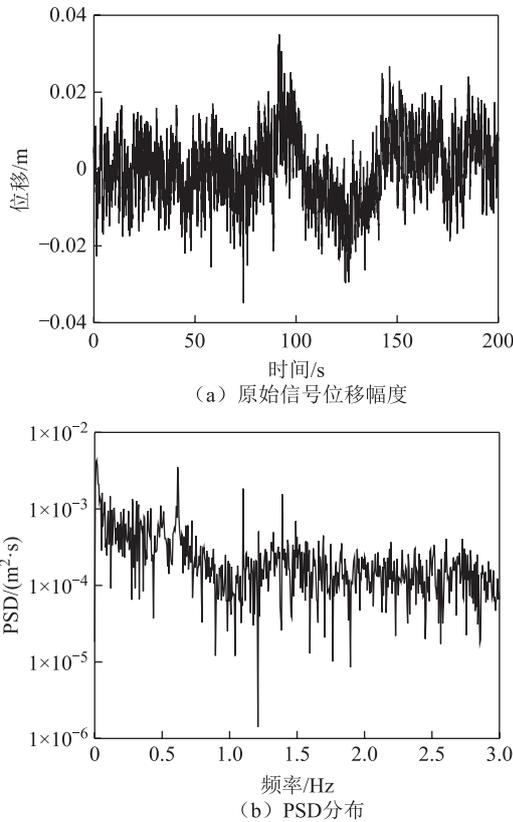


图 4 原始观测信号与相应的 PSD 分布

从图 4 可以看出: 位移在 -0.034 9 与 0.035 0 m 之间变化, PSD 图中存在明显的 3 处峰值对应结构的前 3 模态频率, 分别为 0.616 9、1.096 0 与 1.389 9 Hz。与有限元模态分析结果相比, 二者基本吻合。

采用 5 阶切比雪夫 1 型高通滤波器, 可削弱传感器低频背景噪声的影响。值得注意的是, 在削弱噪声的同时, 也移除了结构的准静态位移, 剩下的仅仅是结构的动态振动部分, 结果如图 5 所示。与原始信号相比, 位移幅值明显降低, 在 -0.024 7 与 0.025 3 m 之间变化。滤波前后信号的均方根值 (root mean square, RMS) 分别为 0.009 1 与 0.007 2 m。

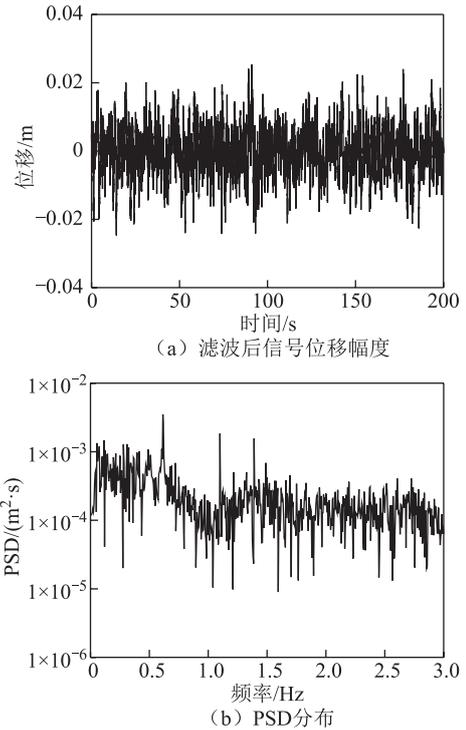


图 5 切比雪夫滤波信号与相应的 PSD 分布

利用 CEEMD 法分解图 5 (a) 所示滤波信号, 得到 13 阶 IMF 分量, 如图 6 所示。利用式 (3) 求每阶分量与滤波信号的相关系数, 结果如表 1 所示。

表 1 待分解信号与每阶 IMF 分量的相关系数

IMF 分量名	相关系数 ρ
IMF1	0.165 9
IMF2	0.241 6
IMF3	0.291 9
IMF4	0.360 2
IMF5	0.504 2
IMF6	0.519 5
IMF7	0.338
IMF8	0.294 4
IMF9	0.228 1
IMF10	0.064 9
IMF11	0.000 7
IMF12	0.010 3
IMF13	0.018 5

由表 1 可以看出: 最后 4 阶分量与滤波信号的相关系数小于 0.1, 视其为虚假分量予以剔除; 对其余分量利用快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 算法, 求其功率谱密度函数, 可知前 3 阶模态主要存在于 IMF4、IMF5 及 IMF6 分量中, 因此仅仅用这 3 阶分量来进一步获取结构的阻尼信息。

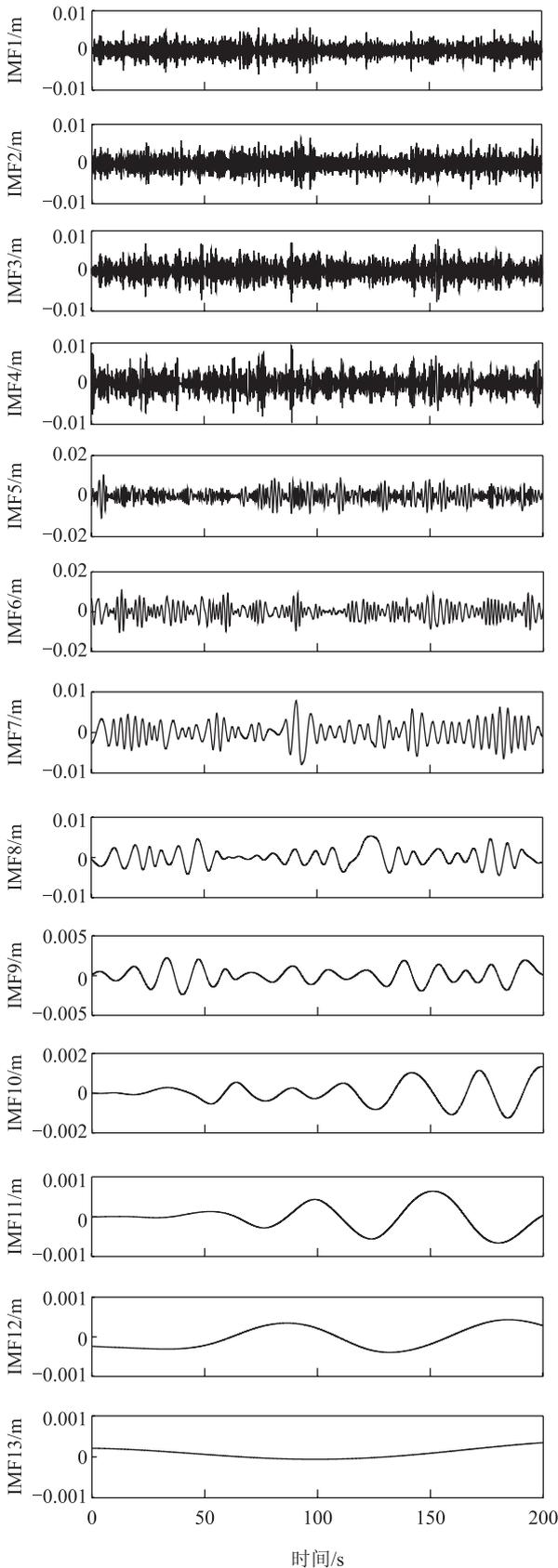


图6 经CEEMD分解后所得IMF分量的时程曲线

利用RDT法从IMF4、IMF5及IMF6分量中，提取结构的自由衰减信号，其结果如图7(a)、图7(b)及7(c)所示。

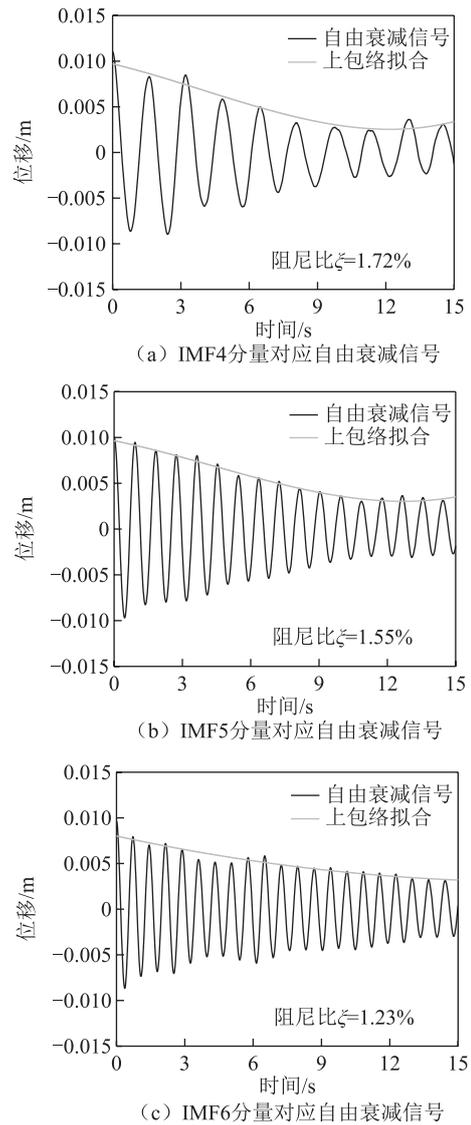


图7 从IMF分量中提取的自由衰减信号的时程曲线

需要注意的是，利用RDT法提取结构的自由衰减响应信号，截取时间的选取是十分重要的：如果时间取的过大，在衰减的后期会出现波形畸变，相对偏差也会比较大；如果时间取的过小，则会出现由于计算衰减曲线的点不足而导致拟合结果精度低的情况，为了尽可能获取理想的拟合精度，需要进行反复尝试。本文设置截取时间为15s，并进一步基于式(7)得到结构的阻尼比，分别为1.72%、1.55%与1.23%。至此，成功得到了结构的前3阶模态频率与阻尼比。

3 结束语

本文利用GNSS-RTK传感技术对运营期1座大跨径桥梁结构振动响应进行现场实时监测，提出1种基于GNSS-RTK的大跨径桥梁模态参数识别方法。利用该方法从桥梁振动响应信号中，

成功地提取了结构的前 3 阶模态频率与阻尼比, 技术可有效地应用到大跨径桥梁振动响应的监测中。验证了算法的有效性; 同时也说明, GNSS-RTK 测中。

参考文献

- [1] YI T H, LI H N, GU M. Full-scale measurements of dynamic response of suspension bridge subjected to environmental loads using GPS technology[J]. *Science China Technological Sciences*, 2010, 53(2): 469-479.
- [2] NIU Y B, XIONG C B. Analysis of the dynamic characteristics of a suspension bridge based on RTK-GNSS measurement combining EEMD and a wavelet packet technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(8): 085103.
- [3] MOSCHAS F, STIROS S. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer[J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(1): 10-17.
- [4] XI R, JIANG W, MENG X, et al. Bridge monitoring using BDS-RTK and GPS-RTK techniques[J]. *Engineering Structures*, 2015, 83: 30-49.
- [5] MUKHOPADHYAY S, LUŞ H, BETTI R. Modal parameter based structural identification using input-output data: minimal instrumentation and global identifiability issues[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2014, 45(2): 283-301.
- [6] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. System identification of suspension bridge from ambient vibration response[J]. *Engineering Structures*, 2008, 30(2): 462-477.
- [7] KALOOP M R, HUSSAN M, KIM D. Time-series analysis of GPS measurements for long-span bridge movements using wavelet and model prediction techniques[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(11): 3505-3521.
- [8] XI R, CHEN H, MENG X, et al. Reliable dynamic monitoring of bridges with integrated GPS and BeiDou[J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2018, 144(4): 04018008.
- [9] WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition: a noise-assisted data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2009, 1(1): 1-41.
- [10] YE H J R, SHIEH J S, HUANG N E. Complementary ensemble empirical mode decomposition: a novel noise enhanced data analysis method[J]. *Advances in Adaptive Data Analysis*, 2010, 2(2): 135-156.
- [11] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1998, 454(1971): 903-995.
- [12] 魏博文, 钟紫蒙, 李火坤. 基于 HHT-RDT 算法的高拱坝泄流结构工作模态识别方法[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(10): 106-113.

引文格式: 项伟, 王园, 李锋, 等. GNSS 超长基线差分定位方法在机场工程控制测量中的应用[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 116-121.
(XIANG Wei, WANG Yuan, LI Feng, et al. Application of GNSS ultra-long baseline differential positioning in airport engineering control surveying[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 116-121.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210117.

GNSS 超长基线差分定位方法在机场工程控制测量中的应用

项伟¹, 王园², 李锋¹, 梁自忠¹, 陈金磊¹, 张昌昌¹

(1. 空军研究院 工程设计研究所, 北京 100076; 2. 西安建筑科技大学, 西安 710055)

摘要: 针对在机场建设工程控制测量中, 由于国家控制点不足, 若采用传统的分级测量模式, 则无法满足相关规范要求的问题, 提出 1 种机场工程控制测量方法: 采用基于国际全球卫星导航系统 (GNSS) 服务组织 (IGS) 基准站的超长基线差分定位模式; 并基于快速精密星历进行基线解算; 然后通过框架转换获得基于 2000 国家大地坐标系 (CGCS2000) 的坐标成果; 最终建立机场工程控制网。结果表明: 该方法在国家控制点稀疏或缺失的情况下, 亦能灵活快速地建立平面控制网, 获取 CGCS2000 坐标系下的坐标, 其坐标精度能够达到厘米级; 但 IGS 基准站分布以及速度场的精度, 仍是制约获取优于厘米级成果的关键。

关键词: 全球卫星导航系统; 超长基线差分定位; 框架转换; 工程控制网

中图分类号: P228

文献标志码: A

文章编号: 2095-4999(2021)01-0116-06

Application of GNSS ultra-long baseline differential positioning in airport engineering control surveying

XIANG Wei¹, WANG Yuan², LI Feng¹, LIANG Zizhong¹, CHEN Jinlei¹, ZHANG Changchang¹

(1. Engineering and Designing Research Institute, Airforce Academy, Beijing 100076, China;

2. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to meet the related standard requirement for the traditional hierarchical surveying model in the engineering control surveying of airport construction due to the lack of national control points, the paper proposed an engineering control surveying method for airports: the ultra-long baseline differential positioning mode based on International GNSS (Global Navigation Satellite System) Service (IGS) reference stations was used; and the baseline calculation was carried out based on rapid precise ephemeris; then the coordinates based on China Geodetic Coordinate System 2000 (CGCS2000) were obtained through frame transformation; finally the engineering control network of airports was established. Results showed that: in the case of sparse or missing national control points, the proposed method could help flexibly and rapidly implement the horizontal control surveying to obtain the coordinates with centimeter-level accuracy under CGCS2000; while the distribution of IGS reference stations and the accuracy of the velocity field would be still the key constraints to obtain the results better than centimeter level.

Keywords: global navigation satellite system; ultra-long baseline differential positioning; frame transformation; engineering control network

收稿日期: 2020-06-17

第一作者简介: 项伟 (1978—), 男 (满族), 天津宝坻人, 硕士, 工程师, 研究方向为 GNSS 高精度定位在工程建设中的应用。

通信作者简介: 王园 (1984—), 男, 陕西咸阳人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为 GNSS 高精度定位研究及应用。

0 引言

在机场建设工程控制测量工作中,传统的高精度定位工作通常采用分级测量模式,以工作区域为基本观测单位,滚动式逐步展开。采用全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)接收机进行施测时,至少要与 3 个已知国家高等级平面控制点联测,同步基线长度有一定限制,一般不超过 10 km^[1-2];使用随机附带解算软件,基于广播星历进行解算。采用这种方法,在西部偏远地区,当建设区域国家控制点稀疏或者数量不足 3 个时,无法满足规范相关要求^[2],导致工作无法开展。

某机场建设工程位于西部某市,收集到基于 2000 国家大地坐标系(China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000)的国家控制点 4 个,距离场区的距离均为 10 km 左右。经过踏勘,只找到 2 个控制点,另外 2 个控制点未找到(后来通过测量证实 1 个埋设于地面下 1.5 m,另外 1 个已被破坏),因而国家控制点不足 3 个,不能满足规范要求。针对此情况,通常采用非差精密单点定位或者通过联测国际 GNSS 服务组织(International GNSS Service, IGS)基准站的超远距离差分定位模式,采用加米特(GAMIT)、伯尔尼(BERNESE)等高精度的 GNSS 解算软件进行解算,从而获得高精度的定位成果。这两款软件各有特色,尤其是 GAMIT 软件功能强大,而且由于其源代码开放,软件无偿使用,成为众多学者的研究对象^[3-5]。但是由于 GAMIT 运行平台不支持视窗(Windows)操作系统,使其使用受到一定的限制,同时由于参数设置复杂,解算文件多,也给使用者带来很多问题。为此,本文采用基于 IGS 基准站的超远距离差分定位模式,利用自主开发的高精度软件,基于快速精密星历进行解算,再通过框架转换,获得基于 CGCS2000 的坐标成果,从而建立工程首级控制网。

1 控制网布设及数据采集

采用 4 台徕卡 GS18 双频 GNSS 接收机,确定在 1 个单天内,将仪器架设在场区布设的 4 个待定点和 2 个国家控制点上进行数据采集,每点观测 1 个时段,数据采集时段长度大于 5 h,设置采样率 15 s,卫星截止角 10°,与 IGS 连续运行基准站组成超长基线差分定位模式,基线长度 790~3 100 km。同时保证场区 4 个待定点 GD01、GD02、GD03 及 GD04 之间有 1 h 的同步观测时

段,组成同步观测环,满足 D 级 GPS 网布设的相关要求^[2]。超长基线控制网和场区控制网的布设分别如图 1、图 2 所示。

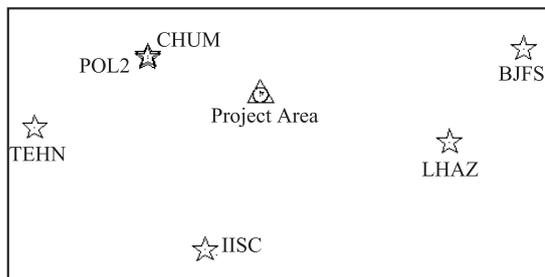


图 1 超长基线控制网

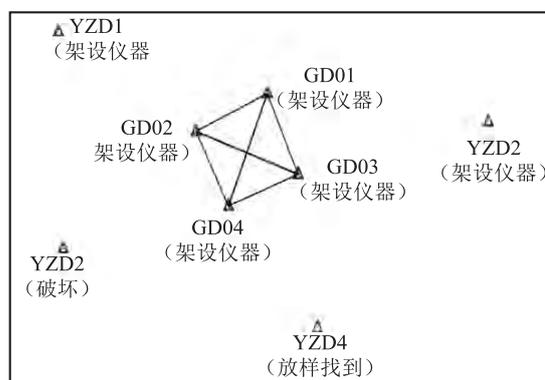


图 2 场区控制网

2 控制网数据处理

2.1 数据处理策略

为了满足 Windows 环境下进行数据处理,用 10.60 版本的 GAMIT/格洛布克(GLOBK)软件进行二次开发,完成了一款高精度数据处理软件。该软件可以对基准站观测文件、精密星历、广播星历、表文件等实现一键自动下载,完成自动定位后,进一步通过获取文件位置、文件名称从而读入观测文件、星历文件和已知点文件,并完成创建目录、拷贝移动文件和创建快捷方式等操作。基线解算利用分布处理方式,只用 1 个命令即可完成文件链接、坐标历元改算及格式转换、创建解算目录、轨道积分、卫星时钟生成、测站时钟生成及观测二进制数据生成、基线批处理命令生成、基线处理和 平差等操作。处理完成后,将解算结果和解算精度存到指定目录,方便查看。

该软件面向 Windows 人机交互界面,减少了人工操作的步骤,大大节省了文件配置准备工作,只需要 1 个命令即可完成基线解算,减少大量命令代码的记忆,降低了使用难度^[6]。软件数据处理流程如图 3 所示。

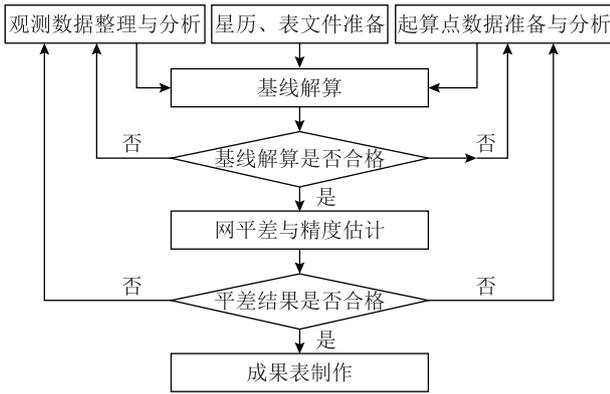


图3 数据处理工艺流程图

2.2 数据预处理

观测数据采用接收机自主交换格式 (receiver independent exchange format, RINEX) 的标准化数

据文件 SITEDAYS.YYO。依据外业观测数据和下载的基准站观测数据, 将同一观测时段的数据整理在一起, 并进行点名一致性、年积日一致性、接收机与天线型号、天线高等数据的正确性检验。

天线高采用量高尺以垂直方式量测, 并通过高精度数据处理软件, 选择相匹配对应的天线型号, 自动计算改正值, 获取天线相位中心位置, 并归算至待定点标识面。

2.3 基线解算与网平差

采用 IGS 连续运行基准站为基准进行差分, 求得精度达到 0.1 m 的先验坐标。基线解算采用自主开发的高精度数据处理软件, 其解算软件参数设置基于 Windows 人机操作界面, 简单明了。主要参数设置界面图 4 所示。



图4 参数设置

采样频率设置为 15 s, 卫星截止高度角为 10°; 基线解算采用松弛 (relax) 解模式; 卫星轨道基于快速精密星历; 参考基准为国际地球参考框架 (international terrestrial reference frame, ITRF) 2014、历元为 2 020.257。

观测时段基线解算标准化均方根 (normalized root mean square, NRMS) 值为 0.206 79, 小于 0.3, 周跳剔除干净; 对整网的全部基线结果进行 χ^2 检验, 其结果为 0.173, 小于 1, 基线解算合格。

基线解算合格后, 进行网平差。约束收集的 6 个 IGS 连续运行基准站成果, 做 3 维约束平差, 求出待定点基于参考框架 ITRF2014、历元为 2 020.257 下的空间直角坐标成果。

3 维约束平差完成, GNSS 点的空间直角坐标 X、Y、Z 方向上的最大值为 8.8 mm; 北 (N) 方向、东 (E) 方向、高程 (U) 方向上的最大值为 10.4 mm。GNSS 点坐标精度统计如表 1 所示。

表1 坐标精度统计

单位: mm

项目	不同方向的中误差值					
	X 方向	Y 方向	Z 方向	N 方向	E 方向	U 方向
最小值	6.8	8.6	5.6	3.1	6.5	10.0
最大值	6.9	8.8	5.9	3.2	6.5	10.4
平均值	6.8	8.7	5.7	3.2	6.5	10.2

2.4 坐标成果转换

解算成果的参考基准为参考框架 ITRF2014、历元为 2 020.257, 而工程建设中要求的坐标成果基准为 CGCS2000 (参考框架 ITRF97、历元 2000.0)^[7], 因此需要进行基于不同参考框架的坐标成果的转换。不同参考框架成果的转换法主要有强制约束法、参数转换法、速度场拟合法等^[8-10]。与传统经典的 3 维 7 参数转换模型^[11-12]不同, 基于不同参考框架的坐标转换需要考虑参考框架的时变^[13], 转换模型中包含 14 个未知参数, 至少需要 5 个公共点才可求解转换参数^[14-15]。

由于缺少足够的公共点, 本文中的坐标转换采用速度场拟合法。首先完成参考框架转换, 即由基于参考框架 ITRF2014、历元为 2 020.257 的空间直角坐标成果向基于参考框架 ITRF97、历元为 2 020.257 的空间直角坐标成果转换, 参考框架间的转换即为基于不同参考椭球的空间直角坐标之间的转换。然后再完成历元转换, 即基于参考框架 ITRF97、历元为 2 020.257 的坐标成果向基于参考框架 ITRF97、历元为 2 000.0 的坐标成果转换。历元转换则需要历元值和待定点处精确的速度成果^[16-17]。文中采用“格网平均值”速度获取的方法, 完成成果的历元转换。格网平均值法是将中国大陆分成 137 个 3°×3° 的格网, 计算出每个格网内“网络”点的平均速度, 代表格网内任一点的速度。该方法得到的“网络”点的速度计算值与其参考值之差的统计值分别为 ±1.81、±1.05、±1.55 mm/a, 位置运动速度

的误差 ±2.61 mm/a^[16]。确定工程建设区域所对应的“格网”位置, 用该“格网”的平均速度作为待定点的速度, 即可完成相应的历元转换。但应该指出, 由于该工程建设所处格网内无“网络”点, 其速度平均值由临近格网速度值推算得到, 因此精度要差些。

3 控制网成果质量分析

3.1 基线成果质量分析

将解算获得的基于 CGC2000 的空间直角坐标, 反算出的基线向量成果与同步观测解算获得的基线向量成果相比较, 进行基线检核。同步观测数据解算采用徕卡勒戈 (LGO) 解算软件, 基于广播星历, 进行无约束平差后即可解算获得任意两点间高精度的基线成果。

需要指出的是, 同步观测解算获得的基线成果基于 1984 世界大地坐标系 (world geodetic coordinate system 1984, WGS84) (参考框架 ITRF2000、历元为 2 001.0), 而反算获得的基线成果基于 CGCS2000 (参考框架 ITRF97、历元为 2 000.0)。GCS2000 与 WGS84 参考椭球在 原点、方向、尺寸等方面的定义基本相同, 只是在椭球扁率上有微小差别。这种差别体现到大地坐标坐标值差值理论上仅为亚毫米, 在坐标系的实现精度范围内; 在仅考虑参考椭球常数差异的情况下, CGCS2000 坐标与 WGS84 坐标是一致的^[18-20], 因此可以认为基线向量成果也是一致的。基线成果检核结果如表 2 所示。

表 2 基线成果检核

单位: m

基线名称	同步基线与坐标反算基线差值			
	东方向差值 ΔE	北方向差值 ΔN	高程方向差值 ΔU	距离差值 ΔD
GD01→GD02	-0.006 3	-0.008 8	-0.008 1	-0.004 1
GD03→GD04	-0.005 1	-0.004 1	0.006 1	-0.007 1
GD03→GD01	-0.007 2	0.002 3	0.005 0	-0.000 5
GD03→GD02	-0.003 3	-0.008 8	-0.005 6	-0.001 3
GD04→GD01	-0.001 4	0.006 8	-0.001 6	-0.004 1
GD04→GD02	-0.007 7	-0.004 8	-0.002 7	-0.002 1

由表 2 基线向量成果检核可以看出: 通过同步观测数据无约束平差解算获得的基线成果, 与解算获得的 CGCS2000 的空间直角坐标成果反算出的基线成果在 E 、 N 、 U 三个方向上的差值均优于 1 cm, 说明通过采用基于 IGS 基准站的超远距离差分定位获得的 4 个待定点间的相对位置关系是

准确的, 其精度达到了毫米级, 可以认为与场区控制点整体性一致。

3.2 坐标成果质量分析

经过框架和历元转换后, 将解算获得的国家控制点成果同收集到的国家控制点已知成果相比较, 对解算结果进行坐标成果检核。对比结果如表 3 所示。

表3 坐标成果检核

单位: m

点号	不同方向的已知成果高斯投影 (CGCS2000) 值		不同方向的转换成果高斯投影值 (ITRF2014、2020.257→CGC2000)		差值	
	x	y	x	y	Δx	Δy
YZD1	XXX6.218	XXX2.856	XXX6.192	XXX2.887	-0.026	0.031
YZD2	XXX1.394	XXX2.064	XXX1.371	XXX2.093	-0.023	0.029

注: 因涉密, 用“XXX”表示部分数值。

由表3坐标成果检核可以看出, 受速度场精度的影响, 通过历元转换后, 收集到的国家控制点的解算成果同已知成果在 x 方向上差值为2 cm左右, 在 y 方向上的差值为3 cm左右。同时应该看出, 差值表现出一致性, 可理解为系统差。

通过表2、表3的成果检核可以得出结论, 基于IGS基准站的超远距离差分定位方式在该机场建设工程控制测量的应用中, 场区控制点间的相对位置精度优于1 cm, 整体性一致。受限于速度场精度的影响, 最终解算结果与已知成果间存在系统差, 其值在 x 方向上为-2.0 cm, 在 y 方向上为3.0 cm。通过基于IGS基准站的超远距离差分定位方式获得的成果, 基于3个以上的控制点建立该工程测区的转换模型, 通过实时动态差分(real-time kinematic, RTK)放样的方式, 获得收集到的国家控制点的精确位置, 找到了第3个国家控制点后, 再采用传统的分级测量模式, 获得场区待定点的高精度CGCS000坐标。将两种方法获得的结果相比较, 也体现出了在 x 方向上为-2.0 cm、 y 方向上为3.0 cm系统性误差的特征(篇幅原因, 这里不再赘述)。结合控制网基线长度进行精度验证统计后, 约束点间的边长相对中误差 $m_d \leq$

1/100 000, 最弱相对中误差优于2.5 cm/km, 达到了卫星定位测量控制网四等的技术要求^[1]。

4 结束语

本文探讨了在西部某机场建设工程控制测量中, 由于国家起始控制点不够, 在按照传统的基于广播星历的高精度分级测量模式无法开展工作的情况下, 采用基于IGS基准站的超远距离差分定位模式, 利用自主开发的GNSS高精度解算软件, 结合快速精密星历进行建立工程首级控制网的尝试。结果表明, 该方法在西部偏远地区国家高等级控制点稀疏或缺失的情况下, 亦能灵活快速地进行工程建设的平面控制测量, 获取基于CGCS2000坐标系精度达到厘米级的坐标成果。同时, 通过本文的探讨分析, 若工程建设区域周边IGS基准站分布合理, 再结合高精度的速度场成果, 利用文中方法甚至可以获得优于厘米级的坐标成果, 这使得机场建设工程的控制测量工作无须再踏勘国家起始控制点来进行分级布网联测, 可以根据场区实际情况来因地制宜地进行控制网的设计, 使得控制网的布设更加灵活, 无疑会大大提高工作效率。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部. 工程测量规范: GB 50026-2007 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2008: 6-11.
- [2] 全国地理信息标准化技术委员会. 全球定位系统(GPS)测量规范: GB/T 18314-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 2-4.
- [3] WEI Haohan, HE Xiufeng, FENG Yanming, et al. Snow depth estimation on slopes using GPS-interferometric reflectometry[J]. Sensors, 2019, 19(22), 4994.
- [4] 刘洋洋, 党亚民, 许长辉. 基于GAMIT对国家GNSS基准站进行的北斗基线解算分析[J]. 测绘工程, 2019, 28(3): 25-29.
- [5] 刘彦军, 李建章, 刘江涛, 等. 新版GAMIT10.70解算GPS/BDS基线精度对比分析[J]. 导航定位学报, 2019, 7(2): 138-142.
- [6] 项伟. GNSS精密定位技术在高海拔山区机场建设测量中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2016.
- [7] 程鹏飞, 成英燕, 文汉江. 2000国家大地坐标系实用宝典[M]. 北京: 测绘出版社, 2008.
- [8] 程鹏飞, 成英燕, 秘金钟, 等. CGCS2000板块模型构建[J]. 测绘学报, 2013, 42(2): 159-167.
- [9] 蒋光伟, 程传录, 郭春喜, 等. 地球参考框架ITRF2008在中国大地基准中的应用[J]. 大地测量与地球动力学,

- 2012, 32(2): 86-90.
- [10] 蒋志浩, 张鹏, 秘金钟, 等. 基于 CGCS2000 的中国地壳水平运动速度场模型研究[J]. 测绘学报, 2009, 38(6): 471-476.
- [11] 陈宇, 白征东. 基于非线性最小二乘算法的空间坐标转换[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 129-132.
- [12] 项伟, 白征东, 汤晓禹. 阻尼最小二乘法在任意欧拉角坐标转换中的应用[J]. 大地测量与地球动力学, 2016, 36(2): 167-170.
- [13] 李志才, 孙占义, 张庆兰, 等. 我国 CGCS2000 坐标框架与全球 ITRF2008 框架的融合研究[J]. 测绘通报, 2016(12): 10-12.
- [14] 赵忠海, 蒋志楠, 朱李忠. WGS-84(G1674)与 CGCS2000 坐标转换研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(4): 188-189.
- [15] 施闯, 刘经南, 姚宜斌. 高精度 GPS 网数据处理中的系统误差分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2002, 27(2): 148-152.
- [16] 魏子卿, 刘光明, 吴富梅. 2000 中国大地坐标系: 中国大陆速度场[J]. 测绘学报, 2011, 40(4): 403-410.
- [17] 崔家武, 张兴福, 王峰, 等. GNSS 精密单点定位成果的框架与历元转换方法[J]. 大地测量与地球动力学, 2018, 38(2): 172-175.
- [18] 程鹏飞, 文汉江, 成英燕, 等. 2000 国家大地坐标系椭球参数与 GRS 80 和 WGS 84 的比较[J]. 测绘学报, 2009, 38(3): 189-194.
- [19] 李鹤峰, 党亚民, 秘金钟, 等. BDS/GPS/GLONASS 融合定位模型及性能分析[J]. 测绘通报, 2014(9): 1-5.
- [20] 元荣. BDS/GPS 基线算法研究及软件开发[D]. 北京: 清华大学, 2014.
-

(上接第 87 页)

- [15] LI B F, ZANG N, GE H B, et al. Single-frequency PPP models: analytical and numerical comparison[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(12): 2499-2514.
- [16] WU J T, WU S C, HAJJ G A, et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase[J]. Man Geodetica, 1993, 18(2): 91-98.
- [17] 臧楠, 李博峰, 沈云中. 3 种 GPS+BDS 组合 PPP 模型比较与分析[J]. 测绘学报, 2017, 46(12): 1929-1938.
- [18] DOW J M, NEILAN R E, RIZOS C, et al. The international GNSS service in a changing landscape of global navigation satellite systems[J]. Journal of Geodesy, 2009, 83(7): 689-689.
- [19] 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.
- [20] ZANG N, LI B F, NIE L W, et al. Inter-system and inter-frequency code biases: simultaneous estimation, daily stability and applications in multi-GNSS single-frequency precise point positioning[J]. GPS Solutions, 2020, 24(1): 1-13.
- [21] LI B F, LI Z, ZHANG Z T, et al. ERTK: extra-wide-lane RTK of triple-frequency GNSS signals[J]. Journal of Geodesy, 2017, 91(9): 1031-1047.
- [22] BOEFM 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.

引文格式: 王雅仪, 余萌, 朱锋. 线面特征结合的三维激光 SLAM 算法及性能评估[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 122-129. (WANG Yayi, YU Meng, ZHU feng. 3D LiDAR SLAM algorithm and performance evaluation based on edge and surface features[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 122-129.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210118.

线面特征结合的三维激光 SLAM 算法及性能评估

王雅仪, 余萌, 朱锋
(武汉大学 测绘学院, 武汉 430079)

摘要: 针对自动驾驶的高精度定位中, 传统激光同步定位和制图 (SLAM) 点云配准采用的迭代最临近点法 (ICP) 计算效率低、易误匹配的问题, 提出 1 种 3 维激光 SLAM 点云配准方法: 通过基于特征的 ICP 变种算法, 对在不同时刻扫描的重叠点云进行配准; 并分析有无全球卫星导航系统 (GNSS) 数据融合下的激光 SLAM 自主定位性能。实验结果表明, 纯激光 SLAM 的位置误差存在线性发散, 其值约为行车里程的 1.98%, 融入 GNSS 数据后, 可以提高 SLAM 全局姿态的一致性, 达到分米级定位精度。

关键词: 激光同步定位与制图; 特征提取; 点云配准; 迭代最临近点法; 全球卫星导航系统

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0122-08

3D LiDAR SLAM algorithm and performance evaluation based on edge and surface features

WANG Yayi, YU Meng, ZHU feng
(School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Aiming at the problems of low computational efficiency and mismatching of the Iterative Closest Point (ICP) method used by the traditional Light Detection and Ranging (LiDAR) Simultaneous Location and Mapping (SLAM) point cloud registration algorithm in the high-precise positioning of automatic driving, the paper proposed a point cloud registration method of 3D LiDAR SLAM: the overlapping point clouds scanned at different times were registered by ICP variant algorithm based on features; and the autonomic positioning performances of LiDAR SLAM with or without Global Navigation Satellite System (GNSS) fusion were analyzed. Experimental result showed that the linear divergence of the positioning error of LiDAR SLAM could be 1.98% of the driving mileages, while the integration of GNSS data could help improve the overall position and attitude consistency of SLAM with the positioning accuracy of decimeter level.

Keywords: light detection and ranging simultaneous location and mapping; feature extraction; point cloud registration; iterative closest point; global navigation satellite system

0 引言

自动驾驶是 1 个集精准定位、环境感知、决策控制等多功能于一体的复杂系统, 而定位又是这些功能发挥作用的先决条件。当前的定位定姿技术众多, 但均存在缺陷, 如卫星导航容易在信号

遮挡的环境下失效; 高精度的惯导设备成本极高、且定位误差随着时间增加而快速发散; 视觉导航易受光照和视角变化的影响, 基于无线信号即无线保真 (wireless fidelity, WiFi)、蓝牙、发光二极管 (light emitting diode, LED) 等的定位方案, 须预先布置使用场景^[1]。文献[2-3]指出: 激光雷达

收稿日期: 2020-05-20

基金项目: 湖北省技术创新专项 (2019AAA043)。

第一作者简介: 王雅仪 (1996—), 女, 四川成都人, 硕士研究生, 研究方向为视觉/激光点云数据处理和组合导航与定位。

(light detection and ranging, LiDAR) 具有测量精度高、时间和空间分辨率精细、无需事先布置场景、能够快速响应环境变化、可融合多传感器等优点, 与基于视觉同步定位和制图 (simultaneous location and mapping, SLAM) 技术相比, 激光 SLAM 自主定位更加安全、稳健, 成为了国内外研究的热点。

激光 SLAM 框架, 一般分为前端扫描匹配、后端优化、回环检测、地图构建等 4 个关键模块。前端扫描匹配是 SLAM 最核心的功能, 实现前后两帧点云的相对位姿恢复, 也被称为前端里程计。前端里程计的主流匹配算法有: 迭代最临近点法 (iterative closest point, ICP) 及其变种、相关性扫描匹配法 (correlation scan match, CSM)、正态分布变换 (normal distribution transformation, NDT)、基于特征的匹配等等。ICP 是由文献[4]在 1992 年提出的, 迭代转换矩阵使得待匹配的两帧点云欧氏距离最小化, 但是传统的 ICP 需要对全点云进行优化, 存储和计算消耗大; 基于特征的匹配, 通过抽象出 3 维点云的几何信息, 能更好地辅助前端进行点云匹配, 在相同时间下准确度更高, 是当下的研究热点。

2009 年, 文献[5]首次在点特征直方图 (point feature histograms, PFH) 的基础上, 提出了更加稳定的快速点特征直方图 (fast point feature histograms, FPFH), 类似于视觉特征子的描述符一样, 描述了 3 维 (3D) 点云集中 1 个点周围的局部几何特征, 通过直方图的相似度确定同名点对, 再进行基于同名点的 ICP 配准; 文献[6]提出利用建筑物边界约束进行点云数据配准, 通过探测建筑物垂直外墙和地面相交处的边角点, 预先构建出地图, 然后通过 ICP 实现地图匹配来校正车辆位置; 文献[7]采用分开—合并框架提取点线特征, 还融合了不同观测值的置信度; 文献[8]采用“点—切平面”的特征对重叠点云进行配准; 2016 年, 文献[9]提出的激光雷达里程计与地图构建 (LiDAR odometry and mapping, LOAM) 成为 3 维激光 SLAM 最流行的点云匹配方法, 它基于线面特征进行了点云特征提取, 并将激光雷达里程计的输出和点云子地图进行特征匹配, 对里程计恢复的位姿进行优化, 但系统实时性差; 基于 LOAM 的基本思想, 列戈-洛姆 (LeGO-LOAM)^[10]引入了基于历史位置的最近邻搜索做闭环检测, 采用两步优

化的方式降低设计矩阵的维数, 可以满足系统实时性的要求。

相对于点线面特征, 更加抽象的语义特征能如实地反映 3 维场景, 提供正确的特征匹配。苏黎世联邦理工大学开发的 LeGO-LOAM 软件^[11], 则基于分割算法进行回环检测, 首先从 3D 点云中聚类并标注分割物, 将它们用于匹配已经走过的地方和使用几何验证对比的方法选出回环检测的候选点云。文献[12]提出的塞格·马特赫 (SegMatch), 采用漫水填充方法消除错误的类别标签, 识别动态物体并剔除, 构建带有语义约束的 ICP 模型, 提高了定位的稳定性。

本文采用 1 种线面特征相结合的 3 维激光 SLAM 算法, 通过基于特征的 ICP 变种算法, 对在不同时刻扫描的重叠点云进行配准, 恢复行驶车辆的 6 个自由度位姿; 为提高解算精度, 提出全球卫星导航系统 (global satellite navigation system, GNSS) 数据融合激光 SLAM 的方案。

1 算法理论及实现

3 维激光 SLAM 的任务是估计载体自身的位姿, 同时建立周围的环境地图。因为激光雷达可以准确测量障碍点的角度与距离, 环境地图通过对正确的位姿进行点云叠加即可获得, 可见激光 SLAM 的关键在于提高位姿估计的精度。本文提出的 SLAM 基本框架可以分为: 预处理、前端里程计和后端优化 3 个模块, 如图 1 所示, 图 1 中的 ICP 是指基于特征的迭代最临近点法, 实验中采用的激光点云采样率设为 10 Hz, 而 GNSS 接收机位置先验信息则以低频 1 Hz 的速度输入系统, 最终的位姿估计的频率与点云采样率一致, 在 GNSS 接收机良好的场景下可以用 GNSS 接收机辅助构建点云地图。

1.1 预处理

预处理分为点云分割和特征提取 2 个步骤, 点云分割能提高特征提取的速度和精度。对原始点云进行聚类, 去除冗余点, 仅留下包含结构化特征的分割点云, 包括地面点和大型物体上的点 (如树干)。采用基于密度的聚类方法, 以某一点为启发点向四周探索, 计算相邻方位角、相邻扫描线上邻点的距离和角度, 足够靠近的一群点云组成 1 个簇, 只有点云簇含 30 个点以上才被认为是候选点云。接着, 从分割点云中再提取对应的线特征点和面特征点。

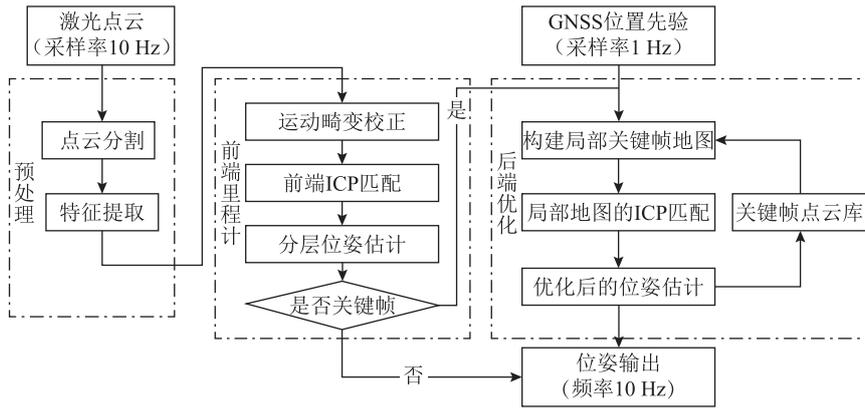


图1 本文提出的3维激光SLAM算法流程

本文采用文献[9]提出的线面特征提取方法，定义激光点的局部平滑度为

$$c_i = \frac{1}{2n} \left\| \sum_{j \in [i-n, i+n], j \neq i} \frac{\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j}{\|\mathbf{P}_i - \mathbf{P}_j\|} \right\| \quad (1)$$

式中： n 为选取与点 \mathbf{P}_i 同一激光扫描线的邻点的个数； c_i 为点 \mathbf{P}_i 与其相邻 $2n$ 个激光点形成的单位向量之和的模。

当激光束打在“面”上， \mathbf{P}_i 与其邻点分布在近似一条直线上，因此这些邻点与 \mathbf{P}_i 构成的向量相互抵消， c_i 值较小。当激光束打在“线”上，邻点与 \mathbf{P}_i 形成的向量无法相互抵消， c_i 值较大。

为获取空间均匀分布的特征，将每根扫描线等分为6段，在段内依据激光点的局部平滑度进行排序，每一段选取平滑度大于0.1的最大2个点为线特征点，选取平滑度小于0.1的最小4个点为面特征点。特征提取的效果如图2所示。

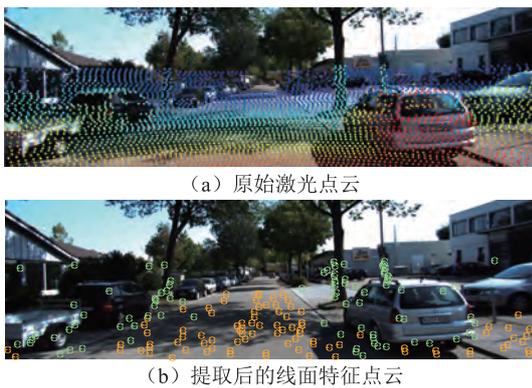


图2 线面特征提取示意图

原始激光点云数约为11.7万个，提取特征后，线特征点数量为667个，面特征点数量为845个，总特征点数为1512个，待估观测数据大大减少，并且如图2所示，提取出的线特征点主要聚集在树干、路沿、车辆边缘、房屋角点等处，而面特征点聚集在地面，能如实反映3维环境的结构化特征。

1.2 前端里程计

里程计主要负责每帧点云的位姿估计，当结构化线面特征输入系统后，采用畸变校正和扫描匹配并行的算法，恢复出相邻帧的位姿关系。

考虑到常用的激光雷达都是旋转扫描的工作方式，车辆在激光雷达一帧扫描的周期内，会行驶过一段距离，导致一帧内的所有激光点并不是处于同一个局部坐标系，经过畸变校正可以恢复到同一局部坐标系下。点云的去畸变需要已知帧间运动量，而求解帧间运动量又依赖于去畸变后扫描匹配，因此可以用位姿插值的办法将畸变校正和扫描匹配放在1个算法中同时处理。假设扫描周期内汽车的运动是平滑的，基于匀速运动模型，不同时刻对应的位姿可以插值表示，设在第 k 帧期间，车体的运动量等价于帧尾时刻的局部坐标系 $\{L_{k+1}\}$ 相对于帧头时刻的局部坐标系 $\{L_k\}$ 的旋转和平移，用 \mathbf{T}_k 表示， $\mathbf{T}_k = [\theta_x, \theta_y, \theta_z, t_x, t_y, t_z]^T$ 。

如果已知某点在一帧扫描内的相对时间，记为 s ，那么该点对应 $\{L_k\}$ 的旋转和平移量为（以绕 Y 轴旋转和平移为例）

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{R}_i(\theta_y) &= \begin{pmatrix} \cos(s \cdot \theta_y) & 0 & -\sin(s \cdot \theta_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(s \cdot \theta_y) & 0 & \cos(s \cdot \theta_y) \end{pmatrix} \\ \mathbf{t}_i(t_y) &= s \cdot t_y \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

在对每帧点云进行特征提取操作后，本文采用PCL库中的FLANN匹配器快速查找前后两帧点云的匹配特征点对，线特征点只和线特征点进行最近邻匹配，面特征点只和面特征点进行最近邻匹配。对于线特征点而言，虽然最近邻点和它可能不是同一个点，但是它们在同一条结构线上的可能性很大，因此在目标点云中找到最近邻点和次近邻点，观测方程就变成了最小化点到线/面的距离

之和的函数, 相比于传统全点云 ICP, 线面-ICP 能够建立更准确的观测方程。

对于线特征点, 其算法模型为

$$\{\mathbf{R}, \mathbf{t}\} = \arg \min \sum_{i=1}^n \text{Function}(\text{Project}(\mathbf{R}_i, \mathbf{t}_i, \mathbf{s}_i), \mathbf{d}_i^1, \mathbf{d}_i^2) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{s}_i = [s_{ix}, s_{iy}, s_{iz}]^T$ 是当前源点云中的点; $\mathbf{d}_i = [d_{ix}, d_{iy}, d_{iz}]^T$ 是目标点云中的匹配点; \mathbf{R}_i 、 \mathbf{t}_i 代表经过位姿插值后的旋转矩阵和平移矩阵; \mathbf{R} 、 \mathbf{t} 代表旋转矩阵和平移矩阵; 函数 $\text{Project}(\cdot)$ 是将源点云中的线特征点 \mathbf{s}_i 归算到帧头时刻对应的局部坐标系下, 记为 \mathbf{s}'_i , 和目标点云所在局部坐标系一致; 函数 $\text{Function}(\cdot)$ 是指计算点 \mathbf{s}'_i 到 \mathbf{d}_i^1 和 \mathbf{d}_i^2 所形成的线的距离。相似地, 对于当前帧的面特征点, 需要在参考帧中找到最近邻的 3 个面特征点, 误差函数表示为点 \mathbf{s}'_i 到 \mathbf{d}_i^1 、 \mathbf{d}_i^2 、 \mathbf{d}_i^3 所形成的面的距离。

以同一数据测试全点云, ICP 算法和线面特征结合的 ICP 算法, 得到全点云 ICP 算法每一帧的计算时间平均为 3.183 s, 而改进后的 ICP 算法只需要 0.292 s, 这主要是因为特征提取减小了匹配点对的数量, 提高了匹配速率; 另外, 考虑到用最小二采估计位姿速度慢, 本文采用分层优化的方法^[10]减小设计矩阵求逆的维度, 如图 3 所示, 在同等精度下可以减少 35% 的计算时间。

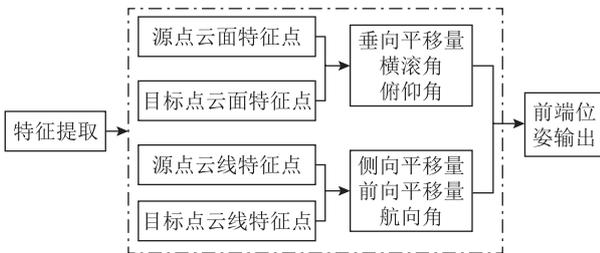


图 3 分层优化算法

1.3 后端优化

前端里程计每一步的解算都存在误差, 随着航位推算的距离增加, 全局位姿的误差也在累积, 根据位姿拼接起来的地图也会发生畸变。在 SLAM 领域, 又提出了后端优化的关键技术, 对位姿进行优化, 得到全局一致的轨迹和地图。始终假设后一时刻的估计较前一时刻带有更多的误差, 因此对已经构建的地图的信任程度远高于相邻帧点云配准后的运动估计。

本文通过帧间距离和角度的关系来划分关键帧, 距离相隔 1 m 或者角度转过 30° 就向后端输入 1 个关键帧; 一旦前端判断当前帧为关键帧后, 从后端的关键帧库中查询在当前位置 80 m 范围内

的关键帧轨迹点; 并将对应的点云叠加、构建局部地图, 进行基于地图的线面-ICP 匹配; 最后将优化后的位姿更新到关键帧点云库和轨迹库中。

如果系统中还有 GNSS 数据融合, 考虑到 GNSS 数据具有不发散的良好特性, 可以用来抑制激光 SLAM 的长时性漂移, 保证了 SLAM 轨迹漂移在 1 个可控范围之内。将车辆的初始时间和位置和 GNSS 时间和坐标系对准后, 设定每 1 Hz 得到对应的 GNSS 先验数据。系统首先进行 3 维激光点云配准, 然后融合 GNSS 先验位置数据和对应位姿点, 经过 GNSS 融合后的位姿估计才被存储到关键帧点云库和轨迹库中。基于式 (3) 的观测模型, 观测值为源点云到最近邻目标点云形成的线/面的欧氏距离, 可以引入 1 个附加先验信息的最小二乘估计器, 假设观测方程线性化后得到系数矩阵为 \mathbf{B} , 观测值为 \mathbf{L} , 观测值权阵为 \mathbf{P} , 则附加先验信息的最小二乘法方程为

$$\begin{pmatrix} \mathbf{N}_{11} & \mathbf{N}_{12} \\ \mathbf{N}_{21} & \mathbf{N}_{22} + \mathbf{P}_G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{t} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_2 + \mathbf{P}_G \mathbf{L}_G \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中: 待估的 6 自由度的位姿 $(\mathbf{R} \ \mathbf{t})$ 是当前帧相对于全局坐标系的旋转、平移量; \mathbf{N} 、 \mathbf{W} 的值由公式 $\mathbf{N} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{B}$, $\mathbf{W} = \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{L}$ 求得; \mathbf{P}_G 是具有先验信息的平移量 \mathbf{t} 的权阵, 根据经验设定; \mathbf{L}_G 表示 \mathbf{t} 的 GNSS 先验值减去前端 ICP 位姿估计值的差。

2 实验与结果分析

为了对激光 SLAM 系统的车载导航性能进行测试和评估, 采用不同道路环境的数据对算法的整体定位定姿性能以及 GNSS 融合对定位结果的影响进行分析。本文测试了卡尔斯鲁厄工学院和丰田技术学院联合采集的开源数据集基蒂 (KITTI)^[13], 其采集环境包括公路、城市及乡村。采集设备有一套 OXTS RT3003 的 GNSS 与惯性测量系统 (inertial measurement unit, IMU) 组合导航系统和一台 Velodyne 64 线激光雷达。激光雷达以 10 Hz 的频率进行旋转扫描, 测距精度 0.02 m ($< 1 \delta$), 水平视角 360° , 水平分辨率 0.09° , 竖视角为 26.8° ; 涵盖三类环境, “公路” 道路宽、车速快; “城市” 道路两旁是建筑物, “乡村” 道路两旁是大量植被。其实验设备、采集环境如图 4 所示。

2.1 整体精度分析

把 GNSS/INS 的解算结果视为参考真值, 和纯激光 SLAM 实时输出的定位定姿结果进行误差分

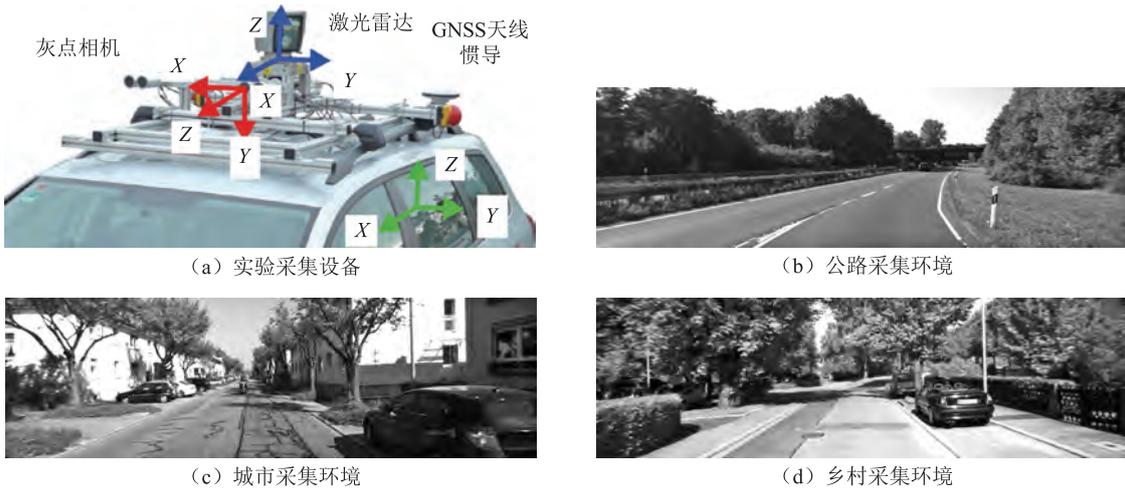


图4 实验装备与采集环境

析, 水平轨迹误差的大小由灰度深浅来表示, 灰度越深代表偏差越大, 如图5所示。

KITTI 共有 11 组数据, 但是由于公路场景下车速达到 80 km/h, 点云变化速度快, 特征提取稀疏, SLAM 位姿误差随时间很快地发散了, 在图5中没

有展示出来。由图5可知, 大部分的轨迹和参考真值重合度高, 但是仍明显存在着累计误差随行驶距离增大而增大的情况。这里采用平均相对误差进行精度分析, 每行驶 100 m 计算 1 次误差, 得到整体的定位定姿精度如表1所示。

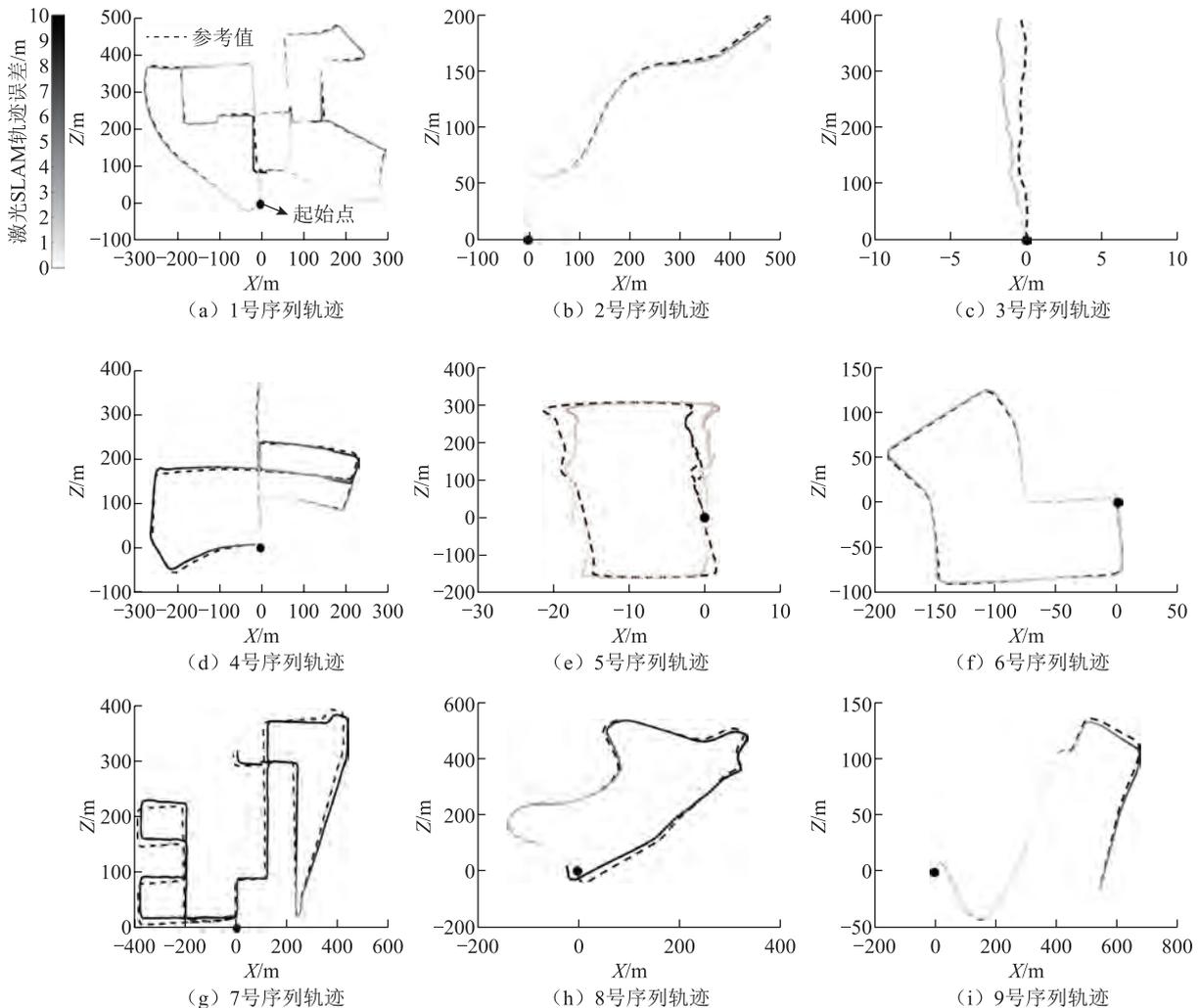


图5 整体轨迹误差结果

表 1 KITTI 数据描述以及整体解算精度

序号	数据描述			水平相对误差均值/%	角度相对误差均值/($^{\circ}$)
	路程/m	车速/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	采集环境		
1	3 722	29.51	城市	1.738 8	0.002 3
2	559	25.12	乡村	0.866 3	0.011 9
3	393	52.21	乡村+公路	0.874 5	0.004 1
4	2 204	28.74	城市	3.099 6	0.002 7
5	1 232	40.28	城市	1.332 7	0.003 6
6	694	22.69	城市	1.269 0	0.007 1
7	3 213	28.41	城市+乡村	4.036 3	0.003 1
8	1 702	38.51	城市+乡村	3.492 4	0.004 8
9	917	27.49	城市+乡村	1.160 0	0.005 8

由表 1 可知, 本文给出的线面特征结合的纯激光 SLAM 在车速 20~50 km/h 的结构化环境下, 能较好地维持车辆的位姿, 整体定位精度约为 1.98%, 即行驶 100 m, 偏离真值 1.98 m, 角度误差为 0.005 1($^{\circ}$)/m。分析几个相对误差较大的轨迹, 如序号 4、序号 8 的轨迹, 明显是误差随着行驶距离的增加而累积, 所以激光雷达必须融合其他具备绝对定位能力的传感器数据, 才能抑制自身长时性漂移; 对序号 7 的异常轨迹分析发现, 车辆经过了多次快速转弯、环境退化(大量相似及不稳定特征干扰导致)的场景, 在平面上产生了严重漂移。

2.2 后端优化对定位定姿结果的影响

后端优化将当前关键帧和距离 80 m 以内的历史关键帧组成的地图关联起来, 用构建好的地图对当前帧的位姿进行精化。为了具体分析后端地图优化模块对整体定位定姿精度的影响, 以序列 6 数据为例, 这是 1 组城市道路的数据, 全长 700 m 左右。分析不加地图优化和加入地图优化后, 对比两种模式下估计出来的轨迹和定位定姿结果的误差序列, 结果如图 6 至图 8 所示。

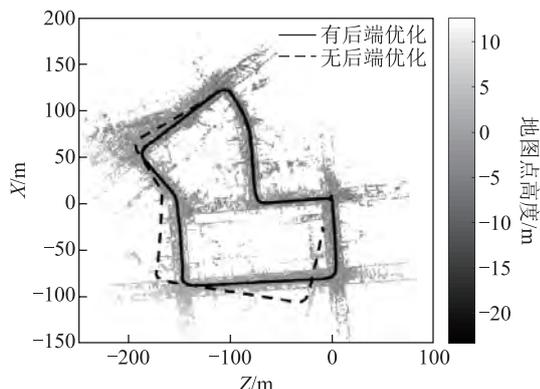


图 6 后端优化对整体精度的影响

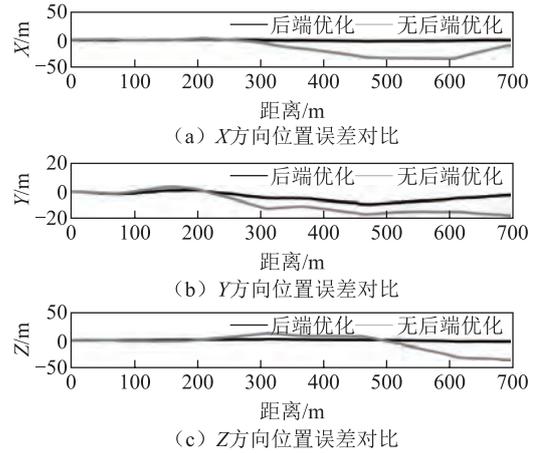


图 7 后端优化对位置估计的影响

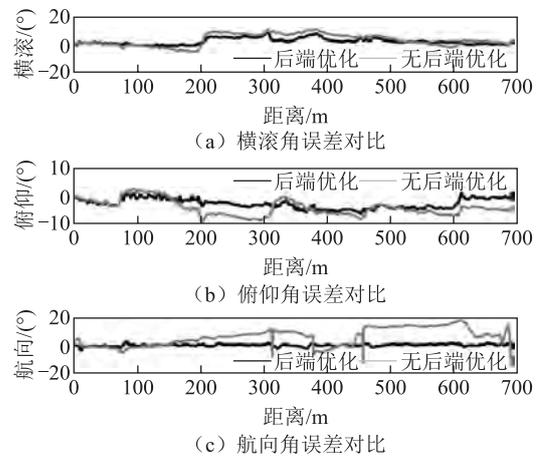


图 8 后端优化对姿态估计的影响

由图 6 可以看出: 没有进行后端优化的轨迹尺度漂移明显, 各方向的位置、角度逐渐偏离真值。反之, 成功的地图优化可使得起点和终点高度重合, 最大偏差显著降低。本文采用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为评价标准, 来定量地分析优化前后相对精度变化, 其结果如表 2 所示。

表 2 后端优化前后 RMSE

模式	不同方向的距离 RMSE/m			不同方向的角度 RMSE/($^{\circ}$)		
	侧向	垂向	前向	横滚	俯仰	航向
无地图优化	17.660	11.294	15.887	4.689	5.022	8.452
有地图优化	0.885	4.654	1.534	2.787	3.044	1.115

水平定位精度提升至 1~2 m, 角度精度约为 2 $^{\circ}$, 提高了 66.7% 的姿态精度, 说明优化后整体精度有了显著提高, 验证了后端优化的有效性。在没有其他传感器的融合辅助下, 成功的后端优化可以在一定程度上抑制激光 SLAM 自身的长时性漂移。

2.3 GNSS 融合对定位定姿结果的影响

为进一步分析多传感器融合对 3 维激光 SLAM 位姿估计的影响,在后端优化中引入 GNSS 位置先验数据,采用有先验约束的整体平差法进行数据融合,这是 1 种松组合的方法,便于多传感

器的拓展。将车辆的初始时间和位置与 GNSS 时间和坐标系对准后,参考真值转换为 GNSS 约束条件,模拟实时 GNSS 约束输入。以长路程的序列 1、序列 7 的数据为例,GNSS 融合后估计出来的轨迹和建图效果如图 9 所示。

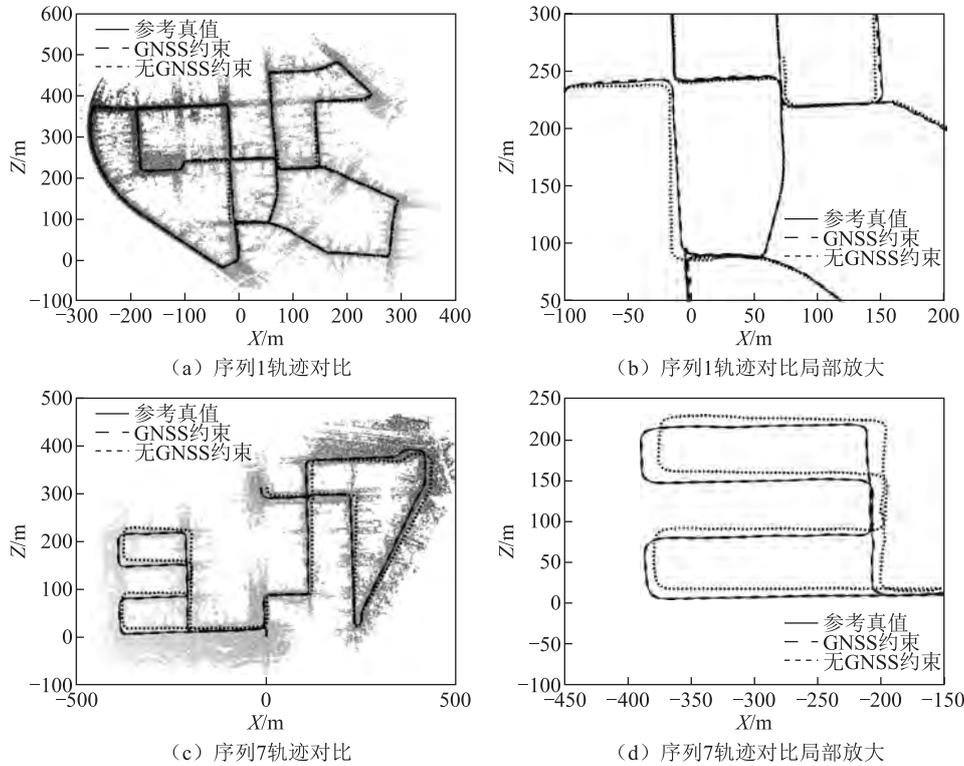


图 9 GNSS 融合对整体精度的影响

由图 9 可知,融合了 GNSS 数据的计算轨迹和参考真值轨迹的重合度更高: 当有 GNSS 数据约束时,可抑制激光雷达里程计的漂移发散; 没有 GNSS 数据约束时,激光雷达里程计依赖自身航位推算进行位姿估计与建图。

表 3 分析了车辆行驶中水平方向上的定位精度。

表 3 KITTI 数据定位结果分析

序号	模式	位置误差均值/m		位置误差均方根/m		位置相对误差/%
		侧向	前向	侧向	前向	
0	无 GNSS 约束	1.467 5	1.368 7	2.134 2	1.719 6	1.738 8
	有 GNSS 约束	0.093 5	0.131 4	0.161 2	0.353 4	0.384 7
7	无 GNSS 约束	10.343 1	5.715 6	11.460 0	6.948 5	4.036 3
	有 GNSS 约束	0.120 1	0.112 9	0.188 5	0.255 9	0.179 3

由表 3 可知,通过精度对比,GNSS/激光 SLAM 的融合算法明显优于纯 SLAM 位姿优化算法。该定位方法不存在由里程计引起的累积误差,在 30 km/h 左右的速度下,表现出良好的定位性能,

适用于在 GNSS 条件良好下的点云地图构建。定位精度提高至 25 cm 左右时,和纯 GNSS 定位精度相当,但融合算法能输出更高频率的位姿结果,有助于生成点云密度更高、一致性良好的点云地图。

3 结束语

本文针对传统全点云 ICP 算法存储和运算消耗大、点云误匹配的问题,提出了 1 种线面特征结合的点云精配准算法。通过对获取的点云进行分割和特征提取,再对结构化的线、面特征点云进行精配准,并在精配准的过程中,同时实验姿点云运动的畸变校正,最后通过 KITTI 测试,对算法的可行性和有效性进行了评估,验证了该算法的整体定位相对精度约为 1.98%,定姿相对精度约为 0.005 1(°)/m; 后端优化在一定程度上可抑制激光 SLAM 自身的长时性漂移; 当有 GNSS 约束时,轨迹无发散,定位精度约为 25 cm,达到分米级定位精度。

参考文献

- [1] 刘浩敏, 章国锋, 鲍虎军. 基于单目视觉的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(6): 855-868.
- [2] 李晨曦, 张军, 靳欣宇, 等. 激光雷达 SLAM 技术及其在无人车中的应用研究进展[J]. 北京联合大学学报, 2017(4): 67-75.
- [3] 危双丰, 庞帆, 刘振彬, 等. 基于激光雷达的同时定位与地图构建方法综述[J]. 计算机应用研究, 2020, 37(2): 327-332.
- [4] CHEN Y, MEDIONI G. Object modelling by registration of multiple range images[J]. Elsevier, 1992, 10(3): 145-155.
- [5] RUSU R B, BLODOW N, BEETZ M. Fast point feature histograms (FPFH) for 3d registration[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. Kobe, Japan: IEEE, 2009: 3212-3217.
- [6] IM J H, IM S H, JEE G I. Vertical corner feature based precise vehicle localization using 3D LiDAR in urban area[J]. Sensors, 2016, 16(8): 1268-1290.
- [7] WANG Y T, PENG C C, RAVANKAR A A, et al. A single LiDAR-based feature fusion indoor localization algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(4): 1294-1312.
- [8] 闫利, 戴集成, 谭骏祥, 等. SLAM 激光点云整体精配准位姿图技术[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 49-57.
- [9] ZHANG J, SINGH S. Low-drift and real-time LiDAR odometry and mapping[J]. Autonomous Robots, 2017, 41(2): 401-416.
- [10] SHAN T, ENGLLOT B. LeGO-LOAM: lightweight and ground-optimized lidar odometry and mapping on variable terrain[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Madrid, Spain: IEEE, 2018: 4758-4765.
- [11] DUBÉ R, DUGAS D, STUMM E, et al. Segmatch: segment based place recognition in 3d point clouds[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore: IEEE, 2017: 5266-5272.
- [12] CHEN X, MILIOTO A, STACHNISS C, et al. SuMa++: efficient lidar-based semantic slam[C]//The Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE). Proceedings of International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). Macau, China: IEEE, 2019: 4530-4537.
- [13] GEIGER A, LENZ P, STILLER C, et al. Vision meets robotics: the KITTI dataset[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(11): 1231-1237.

引文格式: 孙列, 杨梓晗. 车联网中基于交通流量感知的数据路由[J]. 导航定位学报, 2021, 9(1): 130-134. (SUN Lie, YANG Zihan. Traffic volume-aware data routing in vehicular networks[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2021, 9(1): 130-134.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210119.

车联网中基于交通流量感知的数据路由

孙列¹, 杨梓晗²

(1.西安航空学院 飞行器学院, 西安 710077; 2.湖北工业大学 工业设计学院, 武汉 430068)

摘要: 针对智能交通系统中, 车载网络数据传输由于网络拓扑的短暂特性, 存在不稳定、低可靠的缺点, 使得相关信息不能及时传递至所需车辆的问题, 提出 1 种数据传输方法: 依据路段路由, 先将路段划分矩形格, 并推导路径的连通率; 再选择具有最高连通率的路段传输数据, 完成基于交通流量感知的数据路由 (TVDR)。仿真结果表明, 该方法可以有效地提高数据传输吞吐量, 并抑制系统开销。

关键词: 车联网; 路由; 路段; 连通率; 矩形格

中图分类号: P228 文献标志码: A 文章编号: 2095-4999(2021)01-0130-05

Traffic volume-aware data routing in vehicular networks

SUN Lie¹, YANG Zihan²

(1. School of Aircraft, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China;

2. School of Industrial Design, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Aiming at the problem that there exist the disadvantages of instability and low reliability for the data transmission of vehicular networks in intelligent transportation system due to the transient nature of network topology, so the relevant information cannot be delivered to the required vehicles in time, the paper proposed a data transmission method: based on the road segment routing, the road segments were divided into rectangular grids, and the connectivity rate of the path was deduced; then the road segment with the highest connectivity rate was selected to transmit data; finally the Traffic Volume-Aware Data Routing (TVDR) was implemented. Simulation result showed that the proposed method could effectively improve the throughput of data transmission and suppress the overhead of system.

Keywords: vehicular networks; routing; road segment; connectivity rate; rectangular lattice

0 引言

作为现代社会最重要的基础设施, 交通系统的效率直接影响居民生活质量。然而, 随着交通流量的增加以及道路车辆数的激增, 交通事故频繁发生^[1-2]。因此, 如何有效地提高道路安全, 是交通系统亟待解决的问题。

车载网络 (vehicular networks, VNs) 已成为智能交通系统 (intelligent transportation system, ITS)

的重要组成部分, 能有效地缓解交通事故的发生^[3]。VNs 利用车辆间 (vehicle-to-vehicle, V2V) 的通信和车辆与基础设施 (vehicle-to-infrastructure, V2I) 的通信, 提高道路行驶安全。

然而, 由于车辆的高速移动, 以及移动方向的变化, 车载网络存在不稳定、低可靠的特性。这使得安全相关的消息可能不能及时传递至道路上所有车辆。因此, 如何有效地将消息传输到车辆, 成为 VNs 的研究热点^[4]。

收稿日期: 2020-04-26

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61601177); 湖北省自然科学基金项目 (2019CFB530)。

第一作者简介: 孙列 (1984—), 男, 陕西西安人, 硕士, 工程师, 研究方向为基于人机工程的飞机装配技术。

通信作者简介: 杨梓晗 (1985—), 女, 山东济南人, 硕士, 工程师, 研究方向为基于人机工程的产品设计。

由于拓扑的快速变化, 传统的基于移动自组织网络 (mobile ad hoc networks, MANETs) 的路由, 如链路状态协议 (optimized link state routing, OLSR)^[5]、按需距离矢量路由 (ad hoc on demand distance vector, AODV)^[6] 等并不能获取好的路由性能^[7]。研究人员把目光转向地理位置路由。依据源节点和目的节点的位置信息决策路由, 如文献[8]提出的基于位置信息的车联网路由, 利用全球定位系统 (global positioning system, GPS) 接收机提供的行车参数信息, 并利用这些信息恢复路由; 文献[9]提出基于地理位置改进的车联网路由, 根据车辆移动方向和速度, 预测车辆运动轨迹, 并据此轨迹选择下一跳转发路由, 进而保证路由的可靠性; 文献[10]提出 1 个混合路由协议, 将贪婪边界状态路由 (greedy perimeter stateless routing, GPSR) 和层次位置服务 (hierarchical location service, HLS) 策略相结合, 通过 GPSR 策略传输数据包。当目标节点位置不确定时, 就通过 HLS 策略获取目标节点的位置。

此外, VNs 是依据道路上的车辆转发数据的, 所以如何选择路段传输数据是数据转发的关键。为此, 研究人员提出基于流量感知的交叉口路由和基于道路的地理位置路由。例如, 文献[11]针对 3 维城市道路, 提出了改进的定向路由。该路由采用动态的传输范围, 并采用虚拟邻居节点策略选择可靠路由。然而, 该路由并没有给出如何调整车辆的传输范围, 也未能分析传输范围对路由性能的影响。为此, 本文提出交通流量感知的数据路由 (traffic volume-aware data routing, TVDR)。TVDR 路由由先将道路划分为不同的矩形格, 并推导基于路段连通的概率, 然后选择连通率最高的路径传输数据。

1 约束条件

TVDR 路由是依据路段的连通情况传输数据的, 并通过预测流量信息估计每个路段的路径连通率。引入布尔变量 C_i 来表示路段 i 是否为数据源参数, 如果 C_i 大于预定的阈值, 则 C_i 为 1; 否则 C_i 为零。

由于高频信号的穿透性差, 假定数据包只沿着道路传输, 另假定道路是双向的, 且每个方向至少有 2 个车道。只要在源节点通信范围 R_c 内的车辆, 都可作为转发节点, 如图 1 所示。同一方向车辆可以转发数据包, 反方向车辆也可转发数据包。数据转发示例如图 2 所示。

将路段照射于矩形格, 每个格的长度为 $r = R_c / 2$, 如图 2 (a) 所示。假定在矩形格内每辆

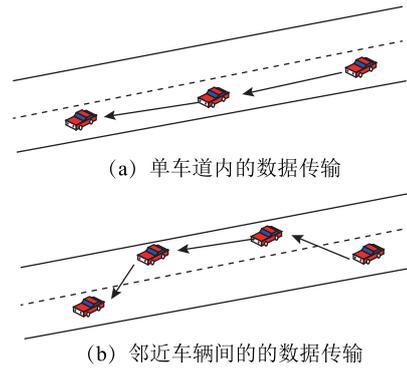


图 1 数据转发策略

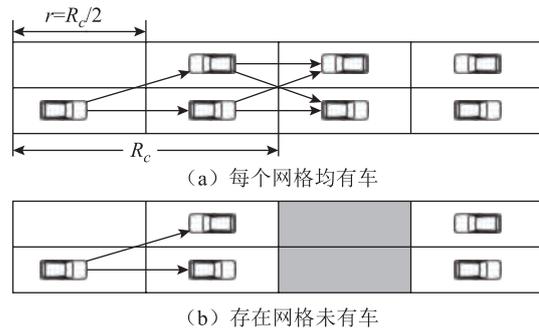


图 2 数据转发示例

车能够与邻近矩形格内的其他车辆直接通信。在每个方向上, 1 辆车至少有 2 条潜在的转发链路。换言之, 如果在 2 个矩形格内没有车辆, 则表明不存在转发数据的链路, 如图 2 (b) 所示。

2 TVDR 路由

TVDR 路由主要路段连通率估计和贪婪数据转发 2 个阶段构成。

2.1 路段连通率估计

令 $V_t^{(i)d}$ 表示在时间段 $[t, t + \Delta t]$ 内通过路段 i 、方向 d 上的总的车辆数, 其也称为总流量数。 $\Delta t = 15 \text{ min}$ 。

可依式 (1) 计算在时间段 Δt 内的平均车辆数 $\mu_t^{(i)d}$, 单位为每分秒车辆数, 即

$$\mu_t^{(i)d} = V_t^{(i)d} / \Delta t \quad (1)$$

式中: d 表示方向的布尔变量, 其定义如图 3 所示。

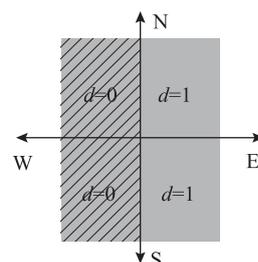


图 3 道路方向示意图

接下来, 推导以下两种情况下的路段连通情况:

1) 理想情况。在理想情况下, 假定车辆以平均速度 $\bar{g}_t^{(i)}$ 均匀行驶在道路上, 则在路段 i 上平均车辆数为

$$\bar{N}_t^{(i)} = \frac{L_t}{\bar{g}_t^{(i)}} \cdot \mu_t^{(i)d} \quad (2)$$

因此, 在每个矩形格内的平均车辆数为

$$\bar{n}_t^{(i)} = \frac{\bar{N}_t^{(i)}}{L_t} \cdot \frac{R_c}{2} \quad (3)$$

式中 R_c 为车辆的通信半径。

当在矩形格有 1 辆车, 车辆就能够转发数据。换言之, 当路段 i 上的方向平均车辆数 $\bar{n}_t^{(i)}$ 大于 1, 则该路段是连通的, 因此就能够通过该路段转发数据。

2) 非理想情况。假定在该路段上的车辆仍以均速行驶, 但车辆并不服从均匀分布, 而是服从泊松分布。令 $m_t^{(i)d}$ 为平均达到率, 则有

$$m_t^{(i)d} = 1 / \mu_t^{(i)d} \quad (4)$$

因此, 在时间段 $[t, t + \Delta t]$ 内, 路段 i 方向 d 上的平均车辆密度为

$$\rho_t^{(i)d} = \mu_t^{(i)d} / \bar{g}_t^{(i)d} \quad (5)$$

由于到达该路段上的车辆服从泊松分布, 在每个矩形格内的车辆数服从式 (6) 所示的概率质量函数 (probability mass function, PMF), 即

$$p_n(V_t^{(i)d} = n) = \frac{(R_c \rho_t^{(i)d})^n}{2^n n!} \exp\left(-\frac{R_c \rho_t^{(i)d}}{2}\right) \quad (6)$$

式中: $p_n(V_t^{(i)d} = n)$ 表示 $V_t^{(i)d}$ 为 n 的概率。若路段 2 个方向上 2 个连续矩形格无车辆, 则此路段不连通。因此, 该算路段 i 的连通率 $P_C^{(i)}$ 为

$$P_C^{(i)} = \prod_{j=1}^{\lceil 2L_t/R_c \rceil} \left[1 - \prod_{d=0}^1 p_n(V_t^{(i)d} = 0) \right] \quad (7)$$

2.2 数据转发策略

为了抑制因数据转发所引起的广播风暴问题, 只在路径搜索区域内传输路径发现消息。由源车辆和目的车辆的相对移动构建路径搜索区, 如图 4 所示。

具体而言, 将源车辆的移动方向作为 x 轴, 由

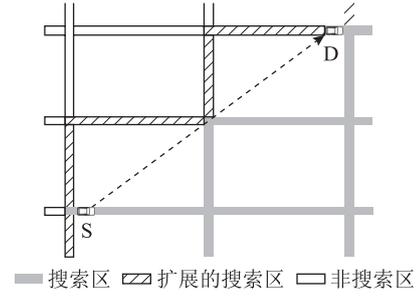


图 4 路径搜索区域示例

源车辆和目的车辆的移动轨迹构建路径搜索区域。不失一般性, 路径搜索区域越大, 可选择的路径就越多。对路径搜索区域进行扩展, 图 4 中的斜线阴影部分就是扩展后的区域。

最后, 可归纳执行 TVDR 路由的步骤如下:

步骤 1: 源节点沿着路段, 并在 2 个方向上传输路径请求消息 (path request, PREQ)。PREQ 以 HELLO 消息格式为基础, 并进行修改, 如图 5 所示。

源节点 ID	源节点位置	源节点速度	目的节点 ID	路径搜索区	转发路径序号
--------	-------	-------	---------	-------	--------

图 5 PREQ 消息格式

PREQ 消息包括源车辆的速度、目的节点身份标识号 (identity, ID) 以及路径搜索区、转发路段序列号、路段连通率。TVDR 路由采用贪婪方式转发 PREQ, 直到 PREQ 传输至位于每个路段交叉口的路边单位 (road side unit, RSU)。

步骤 2: 当 RSU 接收到 PREQ, 就进入路径发现阶段。RSU 从 PREQ 消息中提取目的节点 ID, 判断是否在自己覆盖的范围内。如果目的节点在自己的覆盖范围内, RSU 就向该目的节点传输 PREQ 消息; 否则, RSU 就更新 PREQ 中路段序列号, 并向下一个 RSU 转发。

步骤 3: 目的节点在预定的等待时间 T_{waiting} 内, 可能接收到多条 PREQ 消息。换言之, 可能存在多条从源节点至目的节点路径。假定存在 m 条路径, 目的节点就从中选择具有最高连通率的路径传输数据。然后, 沿着该路径向源节点回复确认消息 ACK。

3 性能分析

3.1 仿真环境

利用矩阵实验室 (matrix laboratory, MATLAB) 软件建立仿真平台, 分析 TVDR 路由的性能。引用曼哈顿 (Manhattan) 移动模型^[12]产生车辆的移动轨迹数据, 如图 6 所示。在 $1\ 000\ \text{m} \times 1\ 000\ \text{m}$ 城

市区域内部署 100~1 000 辆车。每个路段的长度为 200 m, 车辆相关的仿真参数如表 1 所示。

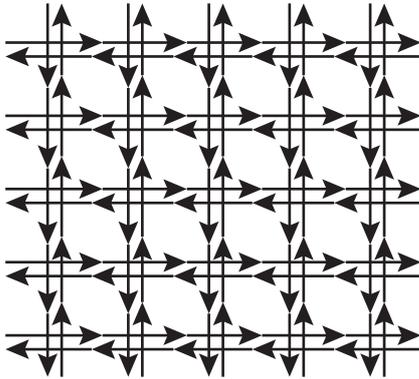


图 6 Manhattan 移动模型示例

Manhattan 为网格场景, 场景区域面积为 1 km², 每次实验独立重复 30 次, 取平均值作为最终的实验数据。

表 1 仿真参数

仿真参数	值
传输功率	2.2 mW
通信半径	300 m
数据率	18 Mbit/s
场景	Manhattan 网络
车流密度	700~1 500 辆/km ²

为了更好地分析 TVDR 路由的性能, 选择文献[6]的 AODV 路由作为参照, 并对比它们的控制开销和吞吐量性能。

3.2 吞吐量

首先分析理想情况和非理想情况下的吞吐量, 分别如图 7 (a)、图 7 (b) 所示。从图 7 可知, 车辆数的增加, 使平均吞吐量呈上升趋势, 但当车辆增加到一定数量后, 吞吐量上升缓慢。原因在于: 最初车辆的增加, 可大幅地提升数据传输量; 但当车辆增加到一定量后, 车辆数的增加会提高网络的拥塞率, 从而抑制了数据传输成功率。

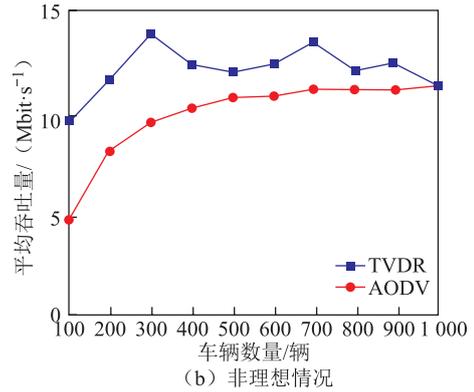
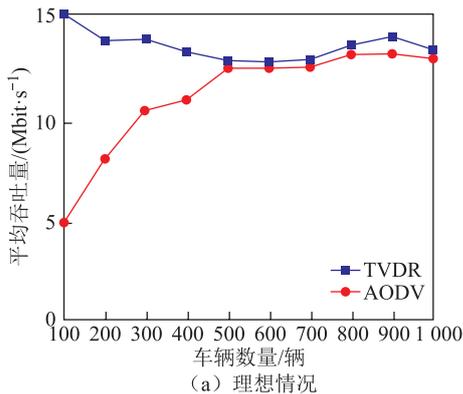


图 7 吞吐量

从图 7 可知, 相比于 AODV 路由, 提出的 TVDR 路由的吞吐量得到有效提高。这主要是因为 TVDR 路由利用路段连通率传输数据, 提高了数据传输成功率。

3.3 系统开销

最后, 分析理想情况和非理想情况下的系统开销。系统开销是指每传输 1 条消息所产生的控制消息数, 分别如图 8 (a)、图 8 (b) 所示。

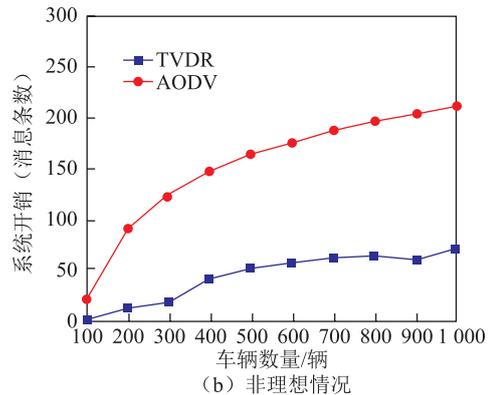
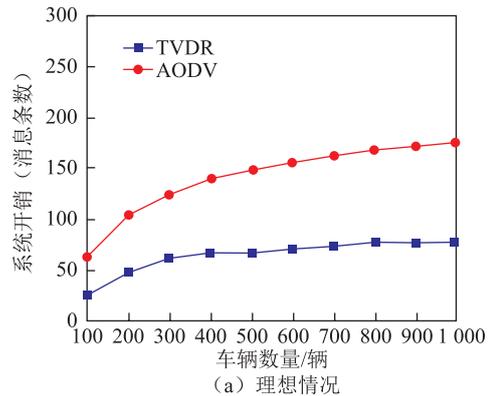


图 8 系统开销

从图 8 可知, 在理想和非理想 2 种情况下, 相比于 AODV, TVDR 路由能有效地控制系统开销。例如, 在理想情况下, 当车辆数为 1 000 时, TVDR 路由的开销为 13, 而 AODV 路由的开销达到约 170。原因在于 AODV 路由采用泛洪策略传输控制消息。

对比图 8 (a)、图 8 (b) 不难发现, 非理想情况下的 TVDR 路由的开销大于理想情况。

4 结束语

本文对车载网络的数据传输问题进行分析, 提出交通流量感知的数据路由 TVDR。TVDR 路

由从路段角度选择路径: 先依据车辆的流量信息, 推导路段连通率, 再依据连通率选择数据传输的路径。仿真结果表明, 相比于 AODV 路由, 提出的 TVDR 路由可有效提高系统吞吐量, 并能有效减少控制系统开销。

参考文献

- [1] 左明慧, 郑成增. 车联网安全消息传输的安全性研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(5): 514-518
- [2] 徐会彬, 焦克莹. 车联网中 V2I 通信路由的研究[J]. 传感技术学报, 2018, 31(8): 1430-1436.
- [3] 孟芸, 胡欣, 代亮, 等. 干扰车载网络中增强连通性的资源分配算法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(7): 9-15.
- [4] 张建东. 车联网中一种新的紧急消息转发方案[J]. 中国电子科学研究院学报, 2019, 14(10): 1032-1036.
- [5] BHUVANESWAR R, RAMACHANDRAN R. Denial of service attack solution in OLSR based manet by varying number of fictitious nodes[J]. Cluster Computing, 2018, 22(4): 1-11.
- [6] KUMAR A, SINHA M. Design and analysis of an improved AODV protocol for black hole and flooding attack in vehicular ad-hoc network (VANET)[J]. Journal of Discrete Mathematical Sciences & Cryptography, 2019, 22(4): 453-463.
- [7] GOUDARZI F, ASGARI H, RAWESHIDY H S. Traffic-aware vanet routing for city environments: a protocol based on ant colony optimization[J]. IEEE System Journal, 2018, 4(5): 1-11.
- [8] 刘国田, 杨永军, 刘征宇, 等. 基于位置信息的车联网路由恢复方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(8): 716-720.
- [9] 姚坚, 彭好佑, 魏应彬, 等. 基于车载网络 GPSR 路由协议的改进[J]. 计算机应用与软件, 2014, 31(8): 118-120.
- [10] SILVA A, REZA N, OLIVEIRA A. Improvement and performance evaluation of GPSR-based routing techniques for vehicular Ad Hoc networks[J]. IEEE Access, 2019, 7: 21722-21733.
- [11] ZHU L, LI C, XIA B. A hybrid routing protocol for 3-D vehicular ad hoc networks[J]. IEEE System Journal, 2017, 11(3): 1239-1248.
- [12] 常建娥, 王璐, 莫易敏, 等. 基于 Manhattan 距离的汽车总装车间带时间窗多 AGV 小车调度优化[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(4): 57-62.

引文格式: 李浩军, 李博峰, 杨玲, 等. 卫星导航定位课程中爱国主义教育内容的融入探讨[J]. 导航定位学报, 2020, 9(1): 135-138. (LI Haojun, LI Bofeng, YANG Ling, et al. Discussion on the integration with patriotism education of satellite navigation and positioning discipline[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2020, 9(1): 135-138.) DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.20210120.

卫星导航定位课程中爱国主义教育内容的融入探讨

李浩军, 李博峰, 杨玲, 王解先, 楼立志

(同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092)

摘要: 爱国主义教育在大学教育的重要组成部分, 在专业课程中, 挖掘融入爱国主义教育内容, 是爱国主义教育多维度展开的补充。结合卫星导航定位课程, 从卫星导航定位在战争中的应用、独立自主建设系统和人才培养的重要性出发, 激发学生的学习兴趣, 形成爱国主义教育与文化知识相互促进的作用。

关键词: 爱国主义教育; 北斗卫星导航系统; 卫星导航定位; 人才培养

中图分类号: P228 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-4999(2021)01-0135-04

Discussion on the integration with patriotism education of satellite navigation and positioning discipline

LI Haojun, LI Bofeng, YANG Ling, WANG Jiexian, LOU Lizhi

(College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Patriotism education is an important part of college education, and the excavation from and integration with professional courses is a supplement to the multidimensional development of patriotism education. It's important to stimulate students' learning interest and form the mutual promotion of patriotism education and cultural knowledge by combining the course of satellite navigation and positioning, basing on the importance of the application for satellite navigation and positioning in warfare, the independent construction of systems and cultivation of talents.

Keywords: patriotism education; BeiDou navigation satellite system; satellite navigation and positioning; training of talents

0 引言

大学生正值于人生美好的年华, 拥有活跃的思维, 是未来国家发展的中坚力量, 梁启超在 1900 年发表的《少年中国说》中, 提到“少年强, 则中国强”。大学生们肩负民族复兴的重要使命, 对他们进行爱国情感的培养至关重要。《新时代爱国主义教育实施纲要》中指出: “要把青少年作为爱国主义教育的重中之重, 将爱国主义精神贯穿于学校教育全过程, 推动爱国主义教育进课堂、进教材、进头脑。在普通中小学、中职学校, 将爱国主义教

育内容融入语文、道德与法治、历史等学科教材编写和教育教学, 在普通高校将爱国主义教育与社会学相关专业课程有机结合, 加大爱国主义教育内容的比重。”^[1]

卫星导航定位是通过接收到的人造卫星信号, 进行定位、导航和定时 (positioning navigation and timing, PNT) 服务的, 它是一个国家的关键基础设施。2020 年 7 月 31 日上午, 第三代北斗卫星导航系统即北斗三号 (BeiDou navigation satellite system with global coverage, BDS-3) 建成暨开通仪式在北京举行。中共中央总书记、国家主席、中央军委主

收稿日期: 2020-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41974025, 41674029); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 2020 “同济大学课程思政教育教学改革”项目。

第一作者简介: 李浩军 (1981—), 男, 甘肃平凉人, 博士, 教授, 研究方向为 GNSS 卫星大地测量。

席习近平出席仪式,宣布北斗三号正式开通。我国成为世界上第3个独立拥有全球卫星导航系统(global navigation satellite system, GNSS)的国家。北斗卫星导航系统(BeiDou navigation satellite system, BDS)是国之重器,对提升我国综合国力、增强民族自信心具有重要意义。

卫星导航定位课程讲授卫星导航的相关理论与方法,目的是培养从事卫星导航定位方向应用、开发、系统运维、更新等相关工作的人才,为我国国防与国民经济建设和发展做出贡献。卫星导航定位课程中,爱国主义教育内容的融入,对激发学生的爱国情怀,增强学生的学习兴趣有积极作用,也是爱国主义教育多维度展开的补充。

1 爱国主义教育

中华民族五千年的悠悠历史中,爱国主义始终薪火相传。爱国,既要有对社会自然的热爱与尊重,也要有对国家各项权利的支持与信任^[2]。习近平主持中共中央政治局第二十九次集体学习中指出:“爱国主义是中华民族精神的核心,爱国主义精神深深根植于中华民族心中,是中华民族的精神基因,维系着华夏大地上各个民族的统一,激励着一代又一代中华儿女为祖国发展繁荣而不懈奋斗。”^[3]

爱国主义作为一种强大的精神力量,可以不断推动国家经济、科技等实力的增强,进而推动国家综合实力的增强。爱国主义教育是在掌握了一定的正确的爱国主义观念下,对全民尤其是广大青少年的民族自尊心与自豪感的培养,树立热爱祖国并为祖国的繁荣发展奉献奋斗的思想教育。爱国主义的复杂性和爱国主义对象的多样性,决定了爱国主义教育的实施需要多层次、多方面、多角度、分步骤的逐步进行。

作为学生,要能在接受知识的同时融入对情感的培养,促进学生在学的过程中,升华自己对国家对民族的深厚情感,正确引导学生的价值理念,从多角度培养学生的爱国主义情感。学生时代是价值体系形成的重要阶段,适当的引导交流,能够帮助他们树立积极正确的人生方向,增强民族自尊心和自信心,拥有判别是非的能力,以积极向上的心态学习进步,为祖国未来的发展添砖加瓦,奉献自己的力量。

2 卫星导航定位课程爱国教育内容的融入

卫星导航定位起始于1958年科研人员对多普

勒定位的理论研究和多普勒卫星及接收机的研发。1973年,美国启动了全球定位系统(global positioning system, GPS)项目,由美国国防部研制和维护。目前,除美国GPS之外,还有俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS),欧盟的伽利略卫星导航系统(Galileo navigation satellite system, Galileo)等全球系统,还有日本准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)及印度区域卫星导航系统(Indian regional navigational satellite system, IRNSS)。韩国亦计划于2039年完成韩国定位系统(Korean positioning system, KPS)的研发。拥有自主知识产权的空基导航定位系统,已成为世界强国的重要标志之一。

GNSS可为全球地面任何一处或近地空间的军事用户连续且精确地提供3维(3D)位置、3D运动速度和时间服务,可在任何气候条件下,为用户提供PNT服务。

为了让学生能够掌握GNSS导航的原理,导航定位课程内容包括导航定位系统介绍、观测值、定位原理和参数估计方法等^[4-9]。该课程对应的知识框架如下图1所示。

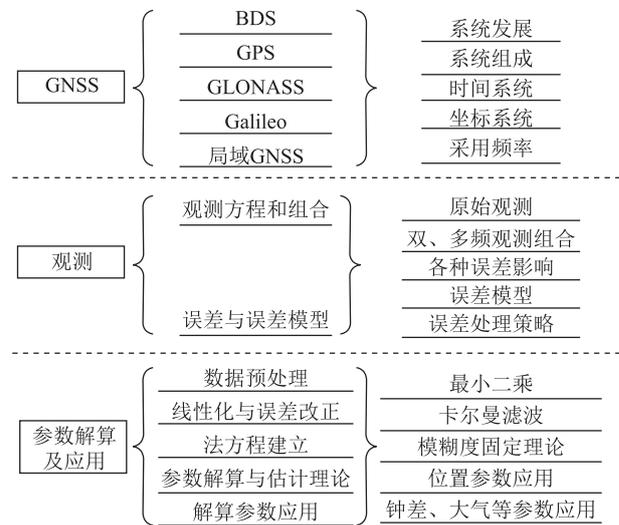


图1 卫星导航定位课程知识框架结构

结合课程内容,可以展开内容如下:

1) 大力弘扬和传承“北斗精神”。GNSS介绍部分,包括各GNSS所采用的频率、坐标系统、时间系统以及建设发展等,在讲授这些内容时,可以结合我国BDS的建设历程^[10],宣传“北斗精神”^[11]。“北斗精神”就是我国航天人,在建设BDS过程中表现出来的“自主创新、开放融合、万众一心、追求卓越”的新时代精神。以国

为重是“北斗精神”的核心价值观^[11]。习近平总书记指出：“26年来，参与北斗系统研制建设的全体人员迎难而上、敢打硬仗、接续奋斗，发扬‘两弹一星’精神，培育了新时代北斗精神，要传承好、弘扬好。”^[11]

20世纪80年代初，我国开始探索适合国情的卫星导航系统发展道路，形成了“三步走”发展战略，历经20多年的发展，实现了卫星导航的全球服务，已经在交通运输、农林渔业、水文监测、气象测报、通信授时、电力调度、救灾减灾、公共安全等方面得到广泛应用。这些都离不开“同舟共济、群策群力，有困难共同克服，有难题共同解决，有风险共同承担”等航天人精神，为了实现BDS的完全自主可控，解决了星载原子钟、芯片、空间链路等核心技术，实现了全球服务能力，为国际导航定位发展贡献了“中国智慧”、“中国方案”和“中国创造”。我国在BDS建设中的创新性思想，也得到了国际同行的广泛认可和赞许。“北斗精神”这部分内容融入到导航定位课程中，是大力发扬和传承“北斗精神”的直接途径之一，可以激励学生努力学习，树立正确的价值观，为我国航天事业贡献自己的力量。

2) BDS是国之重器，是国防建设的重要基础设施之一。“探索浩瀚宇宙，发展航天事业，建设航天强国，是我们不懈追求的航天梦。”习近平总书记对新时期我国航天事业的发展高度重视，提出了期许，指明了方向，规划了蓝图。对于中国而言，发展航天事业对国防安全具有重要意义。随着军用航空的发展，各种军用卫星、载人航天器、弹道导航以及反弹道导航等空间新式武器，形成了一体化的太空军事系统，并将在联合战役中发挥重要作用。如各种侦察卫星可用来侦察监视战场，可起到探测、跟踪、定位的作用；导航卫星则是定位陆战场人员和装备、海战场舰艇和敌军目标方位的重要工具；气象卫星能够提供准确的地面、海洋和空中气象资料；通信卫星则可把作战命令、信息传递到每个指挥官和士兵。未来高科技条件下的联合战役中，太空战场军事系统对陆、海、空战场战役行动所提供的支援和保障，将越来越重要，BDS的建成，将为这些提供有力的保障。这一内容的融入，可以增强学生的自豪感，从而激发学生的爱国情怀和热情。

3) 卫星导航定位技术在战争中的应用。1991年，在以美国为首的多国部队对伊拉克发动的海湾战争中，美国仅仅凭借当时还未完全建成的GPS，

有效地对伊拉克的各种重要设施进行了精准打击。在中东茫茫沙漠中，GPS为美军提供了精确定位服务，使得在没有任何地形特征的情况下，美军就胜利地横穿了西部沙漠。从爱国的基本概念出发，融入卫星导航定位在战争中的应用事例，使学生热爱祖国，树立保家卫国、为祖国的繁荣发展奉献奋斗的理想信念。

4) 独立自主建设卫星导航定位的重要性。美国的GPS经过近50年的发展，其系统、卫星、软件经历了几代更新，已逐步走向GPS现代化。由于GPS无须任何授权即可任意使用，美国因为担心敌对国家或敌对组织会利用GPS对其发动攻击，故在民用信号中实施了可用性选择政策(selective availability, SA)，以降低其定位精确度，使其最终定位精确度大概在100m左右。由此，让学生意识到建设我国自主知识产权的定位系统尤为重要，鼓励他们良好的基础知储备武装自己，从建设祖国的角度出发，实现爱国主义教育。

5) 卫星导航定位人才培养的重要性。鉴于卫星导航定位的重要性，我国非常有必要对其加大投入。同时，卫星导航定位技术已经应用于众多领域，如气象、地震、智能交通、智能驾驶、巡防等方面，以及随着位置服务需求的逐渐增多和卫星导航定位技术的快速发展，国民经济及国防安全建设的诸多部门需要一大批能从事导航定位方面的技术研究、开发和的高级专业人才。尤其是，随着BDS的发展与应用推广，我国卫星导航与位置服务产业发展飞速，对卫星导航人才的需求也就愈加强烈，同时对人才培养的数量和质量也提出了更高的要求。

3 结束语

围绕《新时代爱国主义教育实施纲要》，挖掘大学课程教学中相应的爱国主义教育内容，融入爱国主义教育意义重大。卫星导航定位课程旨在培养卫星导航定位方向应用、开发、系统运维、更新等的相关人才。卫星导航定位在国防和国民经济建设中发挥重要作用，因此，我国独立自主建设了BDS，是国之重器，培育了新时代“北斗精神”，在卫星导航定位课程中融入BDS建设历程内容并倡议学生发扬“北斗精神”，努力成为应用BDS、开发BDS、保护BDS的导航定位人才，是《新时代爱国主义教育实施纲要》中“弘扬‘两弹一星’精神、载人航天精神等”和“创新爱国主义教育的

形式,丰富和优化课程资源,支持和鼓励多种形式开发微课、微视频等教育资源和在线课程,开发体现爱国主义教育要求的音乐、美术、书法、舞蹈、戏剧作品等,进一步增强吸引力感染力”内容的实施。从卫星导航定位在战争中的应用、独立自主建设系统和人才培养的重要性出发,激发学生的学习兴趣,形成爱国主义教育与文化知识相互促进的作用。

参考文献

- [1] 新华网. 中共中央国务院印发《新时代爱国主义教育实施纲要》[EB/OL]. (2019-11-12)[2020-10-21]. http://www.xinhuanet.com/politics/2019-11/12/c_1125223796.htm.
- [2] 蔡中华. 当代中国爱国主义教育及其机制研究[J]. 兰州学刊, 2011(6):160-165
- [3] 新华网. 习近平主持中共中央政治局第二十九次集体学习[EB/OL]. (2015-12-30)[2020-10-21]. http://www.xinhuanet.com/politics/2015-12/30/c_1117631083.htm.
- [4] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位数学模型[M]. 北京:测绘出版社, 1998.
- [5] 王解先. GPS 精密定轨定位[M]. 上海:同济大学出版社. 1997.
- [6] 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京:测绘出版社, 1993.
- [7] 李征航, 张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2009.
- [8] 高成发, 胡伍生. 卫星导航定位原理与应用[M]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [9] 黄丁发, 张勤, 张小红, 等. 卫星导航定位原理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2015.
- [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.
- [11] 王玉鹏. 大力弘扬新时代北斗精神(思想纵横)[EB/OL]. (2020-08-21)[2020-10-21]. <http://theory.people.com.cn/n1/2020/0821/c40531-31831005.html>.