

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 不同纬度区域电离层增强 PPP-RTK 性能分析
作者: 宋伟伟, 何成鹏, 辜声峰
DOI: 10.13203/j.whugis20210243
收稿日期: 2021-05-15
网络首发日期: 2021-09-07
引用格式: 宋伟伟, 何成鹏, 辜声峰. 不同纬度区域电离层增强 PPP-RTK 性能分析. 武汉大学学报(信息科学版). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20210243>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20210243

不同纬度区域电离层增强 PPP-RTK 性能分析

宋伟伟¹ 何成鹏¹ 辜声峰¹

¹ 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉, 430072

摘要：收敛速度慢一直是限制精密单点定位（precise point positioning, PPP）发展的重要因素。研究表明，通过高精度电离层延迟改正，进而实现 PPP-RTK(real-time kinematic)，可显著提升 PPP 的收敛速度。目前区域 PPP-RTK 中电离层主要采用单星多项式电离层模型（satellite-based ionospheric model with POLYnomial function, SIM_POLY）与反距离内插模型（satellite-based ionospheric model with inverse distance weight function, SIM_IDW）进行建模。为了验证上述两种模型在不同纬度的建模精度，对广东、湖北及河北三地上空电离层延迟进行建模，并将其应用于单/双系统、浮点解及固定解中，分析其定位性能。实验结果表明，低纬地区，SIM_IDW 模型表现略优于 SIM_POLY，中高纬地区则并无显著差异。浮点解 PPP 中，与无电离层组合（ionosphere-free PPP, IFPPP）及 CODG（centre for orbit determination in europe global ionospheric map, CODE GIM）电离层产品改正下的非差非组合结果进行比较，河北地区与广东及湖北地区相比收敛速度最快，单 GPS 解算模式下定位精度相较于 IFPPP 分别提升了 43.7% 和 43.0%。固定解 PPP 中，河北地区 GPS+北斗解算模式下，SIM_IDW、SIM_POLY 模型改正下的 PPP-RTK 首个历元模糊度固定成功率可达 86.09% 和 89.13%，且水平方向首个历元收敛至 5 cm，高程方向 1.5 min 内收敛至 10 cm；定位精度方面，在引入北斗系统之后，双系统 PPP-RTK 相较于单 GPS 在定位性能方面有明显提升，河北地区 GPS+北斗解算模式下，SIM_IDW、SIM_POLY 模型改正下的 PPP-RTK 水平及三维定位精度为 1.3 cm 及 3.5 cm。通过 SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型建立区域电离层模型进而实现 PPP-RTK，可以显著缩短 PPP 收敛时间，提高定位精度。

关键词：精密单点定位；PPP-RTK；非差非组合；电离层模型；多系统 PPP

中图分类号：P228

文献标志码：A

精密单点定位技术（precise point positioning, PPP）自 Zumberge 提出以来，受到各界广泛的关注^[1]。近年来，随着多频多系统 PPP 的发展，PPP 的定位精度不断提高，但是收敛时间长一直是限制 PPP 发展的一项重要影响因素。相较于 PPP 技术，实时载波相位差分技术（real-time kinematic, RTK）技术采用基准站解算差分改正数并实时播发给用户，提供高精度快收敛的定位服务，但是 RTK 的精度随距离的增加而降低，此外播放量大也是 RTK 不得不考虑的另一个重要限制因素。为了解决 PPP 收敛慢等问题，Wübbena 首次提出了 PPP-RTK 的概念，该技术通过已知的参考坐标站解算出实时的空间状态和各种误差参数，并将其播发给用户，实现用户在区域内的实时精密单点定位^[2]。在此基础上，Li 等^[3]引入 RTK 处理误差的方式，提出通过区域较为密集的 CORS 测站增强 PPP 的概念和方法，解决了模糊度快速固定的难题，并逐步成为目前 PPP-RTK 定位系统的原型。尽管目前对于 PPP-RTK

收稿日期：2021-05-15

项目资助：国家重点研究计划（2017YFB0503401）；国家自然科学基金（42174029）；教育部联合基金（6141A02011907）。

第一作者：宋伟伟，教授，长期从事 GNSS 数据处理工作。sww@whu.edu.cn

通讯作者：辜声峰，副教授，gsf@whu.edu.cn

的定义还存在些许争议，但是 PPP-RTK 应具有以下三个基本特征：采用 PPP 定位模型、实时定位、能快速固定模糊度^[4]。

PPP-RTK 技术的核心问题是解决模糊度的快速固定。由于 PPP 中模糊度参数与初始相位偏差以及相位硬件延迟之间存在高度的一致性，因此模糊度参数一直作为浮点数进行估计^[1]。为了恢复模糊度的整数特性，国内外学者开展了一系列的研究，并分别提出了未校正相位延迟（uncalibrated phase delays, UPD）、整数钟、解耦钟等模型^[5-7]。虽然整数钟模型理论上更为严密^[8]，但 UPD 方法与 IGS（international GNSS service）现有卫星钟差产品更为自洽。然而上述模型主要采用无电离层（ionosphere-free, IF）组合实现，近年来，随着多频多系统的发展，PPP-RTK 技术逐步从 IF 组合向非差非组合（un-differenced and un-combined, UDUC）演化。相较于传统的无电离层组合的 PPP，非差非组合 PPP 采用最原始的观测值进行估计，避免了因观测值组合带来的噪声放大问题。文献[9]从数学推导证明了 Uofc 模型与非组合模型两者是等价的，均优于传统的无电离层组合。而在此基础上附加电离层约束能有效提高模糊度的固定率，文献[10]基于理论推导指出当电离层改正精度小于 0.7 TECU 时，非组合相对于组合 PPP 模糊度固定才具有明显优势，并结合实测数据对其进行了验证，最后认为目前电离层改正精度不足是限制非组合 PPP 模糊度固定的关键。

基于非差非组合的 PPP-RTK 关键在于高精度的电离层延迟建模改正，文献[11]通过引入电离层产品并与传统 PPP 进行对比，显著提升了东方向的收敛速度，其他方向次之。然而目前常用于 PPP-RTK 服务的是基于斜路径方向总电子含量（slant total electron content, STEC）的内插建模，直接采用 STEC 进行内插建立单星电离层延迟模型 SIM（satellite-based ionospheric model）可以最大程度上减少投影函数带来的精度损失。文献[12]通过非差非组合提取 STEC，并将其应用于定位中，实验表明，附加大气约束后，模糊度固定率为 95.59%，收敛后水平方向和三维方向定位精度均方根误差（root mean square, RMS）分别为 2.35 cm 和 4.63 cm。文献[13]对欧洲区域的北斗 PPP-RTK 进行实验分析研究，利用多个基准站提取 STEC 进行单站增强，实现了单北斗 PPP-RTK 平面 1 cm、高程 3 cm 的定位精度。然而由于电离层具有强烈的时空特性，不同经纬度的电离层活动强弱不同，文献[14]通过对不同经纬度的 IGS 电离层产品进行分析，结果表明，电离层的活动随纬度变化明显，具有明显的单峰效应，在赤道附近的电离层活动最强烈，而在经度方向上的峰值具有延迟变化规律。然而上述 PPP-RTK 研究主要围绕中纬度地区展开，与低纬度相比，其电离层活动较为平静。

综上所述，为了深入分析不同纬度电离层模型精度以及其对 PPP-RTK 性能的影响，本文选取广东、湖北及河北于 2019 年 8 月 1 日—5 日（DOY213 至 DOY217）的实测数据，采用非差非组合的方式提取电离层延迟，利用反距离内插和多项式两种建模方法建立电离层延迟改正模型。随后将上述构建所得电离层模型应用于单/双系统双频 PPP 中，计算其浮点解/固定解，分析其收敛速度及收敛后的定位精度等，开展不同纬度区域电离层模型约束增强 PPP-RTK 性能的研究。

1 非差非组合数学模型

非差非组合模型采用原始的观测值，通过引入信号偏差参数，实现多频多系统数据的灵活处理，并满足电离层延迟提取以及 PPP-RTK 定位等各类需求。其基本观测方程如下^[15]：

$$\begin{cases} P_{r,f}^s = \rho_r^s + t_{r,sys} + \alpha_r^s T_z + \frac{40.3}{f^2} \gamma_r^s I_r^s - b^{s,f} + b_{r,f} + \varepsilon_p \\ \Phi_{r,f}^s = \rho_r^s + t_{r,sys} + \alpha_r^s T_z - \frac{40.3}{f^2} \gamma_r^s I_r^s + \lambda N_{r,f}^s + \varepsilon_\phi \end{cases} \quad (1)$$

式中， $P_{r,f}^s$ 、 $\Phi_{r,f}^s$ 分别为频率 f 上卫星 s 至接收机 r ，考虑天线相位中心、相对论效应、地球

自转、潮汐、相位缠绕等误差后的伪距和相位观测值； ρ_r^s 为卫星 s 至接收机 r 的几何距离； $t_{r,sys}$ 为接收机 r 对应 GNSS 系统的接收机钟差参数； T_z 为测站天顶对流层延迟， α_r^s 为对流层从天顶至斜路径的投影函数； I_r^s 为单层电离层模型穿刺点处天顶电离层延迟， γ_r^s 为电离层从天顶至斜路径的投影函数； $b^{s,f}$ 为卫星端硬件延迟； $b_{r,f}$ 为接收机端硬件延迟； $N_{r,f}^s$ 为浮点解模糊度参数， λ 为对应波长； ε_p 和 ε_ϕ 分别为伪距和相位观测噪声。

在非差非组合模型中，一般将电离层延迟作为一个独立的参数进行估计。对此，文献[16]提出了一种单站电离层估计模型 DESIGN (deterministic plus stochastic ionospheric delay modeling for GNSS)，利用多项式的方式对电离层延迟进行描述，其基本函数表达式为：

$$d\text{lon}_r^s(Z) = a_0 + a_1 dL + a_2 dL^2 + a_3 dB + a_4 dB^2 + r(t) \quad (2)$$

式中， $d\text{lon}_r^s(Z)$ 为接收机至卫星的天顶电离层延迟； a_i ($i = 0,1,2,3,4$) 分别描述电离层的空间变化； dL 、 dB 分别表示穿刺点和测站大致坐标的经纬度差值； $r(t)$ 表示电离层在时域上的随机特性。进一步，DESIGN 将确定性参数 a_i 在时域上进行傅里叶展开，并通过变异函数分析建立了随机性参数 $r(t)$ 的相关模型，该电离层参数化模型估计策略详见文献[17]。

此外，通过引入先验的电离层模型约束，可进一步提高非差非组合数据处理精度：

$$\tilde{I}(z)_r^s = a_0 + a_1 dL + a_2 dL^2 + a_3 dB + a_4 dB^2 + r(t) + \varepsilon_{\tilde{I}(z)_r^s} \quad (3)$$

实际处理中，服务端电离层产品建模时，一般可通过 KLOBUCHAR 模型或实时全球电离层格网图等作为先验背景电离层延迟。终端定位时，则可基于服务端区域电离层延迟产品，实现高精度的电离层延迟改正。由此，基于式(1)~(3)即可估计各测站相对于卫星的电离层延迟 STEC。与传统的零基线无几何距离 (geometry free, GF) 组合相位平滑伪距算法相比，该方法不易受测站多路径、噪声以及周跳的影响，可显著提升 GNSS 电离层延迟提取精度。

高精度的电离层建模是 PPP-RTK 实现的关键。为了减少投影函数带来的精度损失，本文直接采用提取所得 STEC，以 SIM 为基础，建立单星电离层延迟反距离内插模型 SIM_IDW 和单星电离层延迟多项式模型 SIM_POLY。

采用 SIM_IDW 方法构建模型时，对该历元内所有基准站相对同一颗卫星的 STEC 进行内插，获取当前历元流动站对于该卫星的电离层延迟，由此建立 SIM_IDW 模型。其基本公式如下：

$$\text{STEC}^i = \sum_{j=1}^n \frac{\text{STEC}^j}{D_{ij}^2} / \sum_{j=1}^n \frac{1}{D_{ij}^2} \quad (4)$$

式中， i 为用户编号； j 为参考站编号； D_{ij} 为用户与参考站之间的距离，通常取用户观测穿刺点与参考站上空穿刺点之间的几何距离。

与 SIM_IDW 方法不同，SIM_POLY 通过选取建模原点，对该历元或相应弧段内所有基准站相对于同一颗卫星的电离层延迟建立多项式模型。其基本公式如下^[18]：

$$\text{STEC}^j = a_0 + \sum_{i=1}^n (a_i d\lambda^i + b_i d\varphi^i) \quad (5)$$

式中， STEC^j 表示该历元 j 号卫星的测站上空穿刺点电离层延迟； a_i 、 b_i 表示多项式系数； $d\lambda$ 、 $d\varphi$ 表示用户与穿刺点上空经纬度之差。

2 实验分析

本文选取 2019 年 8 月 1 日 (DOY213) 至 8 月 5 日 (DOY217) 广东、湖北及河北的观测数据进行分析，并进一步将其分为基准站和流动站。其中基准站解算相位偏差以及大气延

迟改正产品；流动站作为定位解算站，利用基准站计算所得产品进行定位解算，并分析其定位性能。其中上述三地测站列表分布如图 1 所示（其中蓝色点为基准站，红色五角星为流动站）。

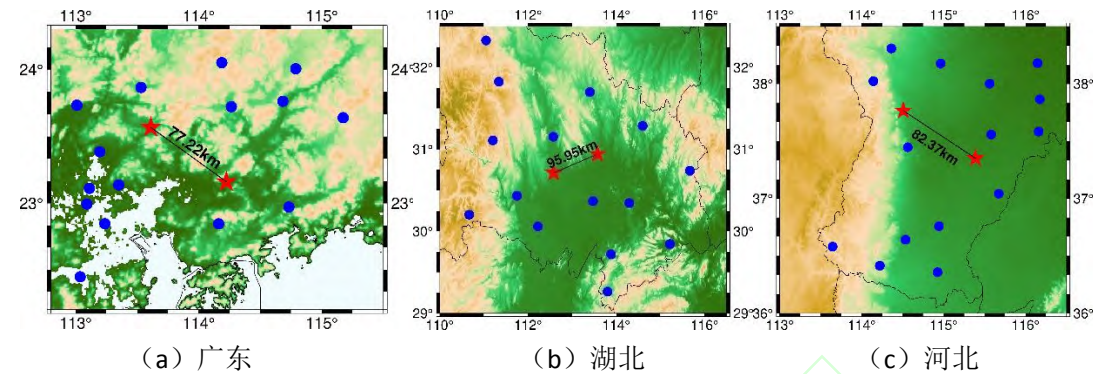


图 1 广东、湖北以及河北测站分布图

Fig.1 Distribution Map of Stations in Guangdong, Hubei and Hebei

2.1 解算策略

本文服务端相位偏差、大气延迟改正产品解算及终端定位等都基于武汉大学复兴软件 (FUSING) 软件展开，目前 FUSING 已实现多系统实时滤波定轨、精密卫星钟差与信号偏差估计、大气延迟建模与监测以及多源协同精密定位等^[19,20]。解算策略配置如表 1 所示。

表 1 解算配置策略

Tab.1 Strategy of Configuration

项目	相位偏差/大气延迟	终端定位	
		浮点解	固定解
试验时段	2019 年 8 月 1 号 (DOY 213) 至 8 月 5 号 (DOY 217)		
北斗信号	北斗二+北斗三 (B1I+B2I)		
区域	广东、湖北、河北		
测站数	15	2	2
解算策略	GPS/GPS+北斗、双频 PPP (每小时重收敛)		
文件记录间隔	30		
/s			
观测值	式 (1) 非差非组合观测值 (GPS/GPS+北斗)		
轨道、钟差	德国地学研究中心事后精密轨道/钟差产品, 钟差产品更新率 30 s, 轨道产品更新率 5 min		
相位偏差	模糊度吸收	模糊度吸收	相位偏差增强产品改正
对流层	GPT2 模型改正+湿延迟随机游走估计		
电离层	DESIGN 模型(2) + CODG 产品	无电离层组合/DESIGN 模型(2) +CODG 产品/SIM_IDW/SIM_POLY	DESIGN 模型(2) + CODG 产品 /SIM_IDW/SIM_POLY
测站坐标	固定	动态白噪声估计	
截止高度角/	7		
(°)			
观测值加权	伪距观测值 0.2 m, 相位观测值 0.002 m		
估计策略	基于平方根信息滤波的事后仿实时动态解		

2.2 电离层建模精度分析

为评估上述两种电离层模型的精度，本文将模型拟合的电离层延迟与流动站事后反算高精度电离层延迟作差，并统计其 RMS 作为电离层延迟模型精度。

表 2 给出了广东、湖北及河北地区、单 GPS/GPS+北斗解算模式下两种电离层模型残差 RMS。对比不同建模方法可知，湖北及河北地区两种模型精度无明显差异，而在纬度较低的广东地区，SIM_IDW 模型略优于 SIM_POLY 模型，这是由于广东地区纬度较低，电离层相对活跃，当用多项式模型表达时可能有一定精度损失。另一方面，结合三地所处纬度可以得知：随着纬度的升高，电离层活动减弱，电离层模型精度相应提高。

表 2 电离层建模精度残差 RMS/TECU

Tab.2 Residual of Ionospheric Modeling Accuracy RMS/TECU

区域	SIM_IDW			SIM_POLY		
	GPS	北斗	GPS+北斗	GPS	北斗	GPS+北斗
广东	0.248	0.384	0.312	0.285	0.386	0.339
湖北	0.195	0.332	0.262	0.199	0.310	0.261
河北	0.173	0.237	0.205	0.171	0.243	0.208

进一步，图 2 给出了上述三地 SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型 24h 的建模残差。可以看到在电离层活动较弱的 0~4 时，电离层建模差异较小；而在电离层活动较强的 8~16 时，三地电离层延迟残差出现了显著差异，高纬度地区电离层建模精度显著优于低纬度地区。此外，由图 2 对比两种模型可知，SIM_POLY 相对于 SIM_IDW 更为平滑，这也验证了为何 SIM_POLY 模型在电离层活跃地区，例如本文广东地区，其改正精度比 SIM_IDW 损失更多。

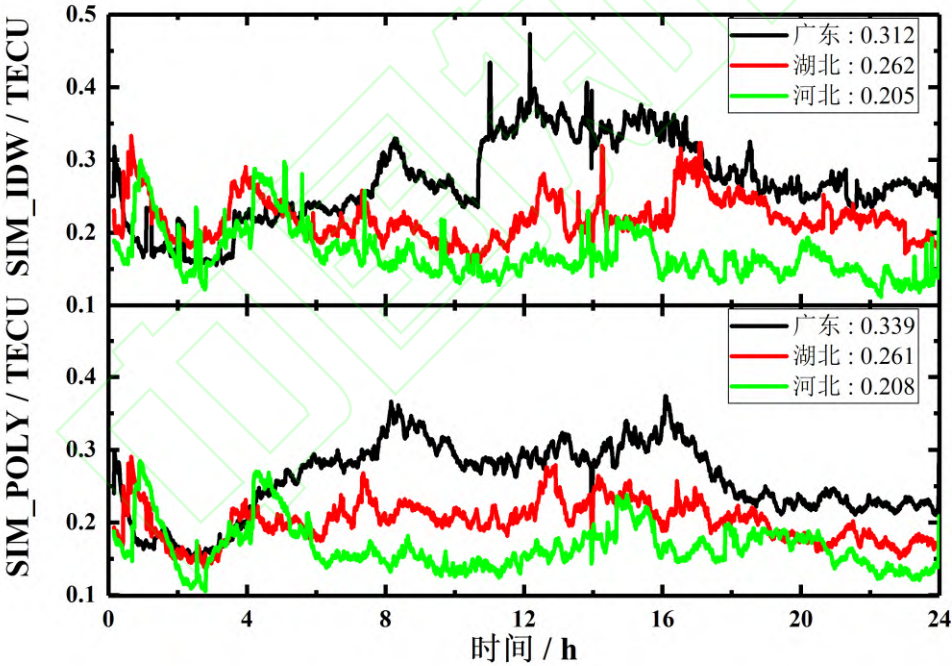


图 2 SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型 DOY213 至 DOY21724 h 平均电离层延迟残差

Fig.2 SIM_IDW and SIM_POLY Models' 24 hours Average Ionospheric Delay Residuals from DOY213 to DOY217

2.3 定位结果分析

本文将 SIM_IDW 模型与 SIM_POLY 模型应用于双频 PPP 中，并以无电离层组合 IFPPP 及基于 CODG 全球电离层格网图的非差非组合 PPP 为参考，评估区域电离层增强 PPP 收敛速度和收敛精度等性能。由于定位每小时重收敛，本文将所有弧段相同历元定位误差取绝对

值后从小到大排序，并取每个历元下 68%分位数下定位精度作为其收敛序列，收敛时间则以收敛序列水平方向首次连续十个历元收敛至 5 cm、高程方向首次连续十个历元收敛至 10 cm 所需时间作为评价指标；收敛精度则以收敛 30 min 后的 RMS 为参考，考虑定位每小时重启，因此该 RMS 是基于 30~60 min 的定位误差统计获得。

2.3.1 浮点解

浮点解的定位性能可以直接反映电离层模型的改正效果。为此，图 3 和图 4 分别给出了广东、湖北及河北地区单 GPS/GPS+北斗两种模式浮点解下不同电离层改正方式：IFPPP、CODG 产品、SIM_IDW 和 SIM_POLY 模型前 30 min 的 68%分位数收敛序列图。结合表 2 可以看到,湖北及河北地区 SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型改正下的浮点解收敛速度基本一致，而广东地区单 GPS 模式下 SIM_IDW 改正下的浮点解收敛速度较快；此外河北地区收敛速度略优于广东及湖北地区；最后 GPS+北斗双系统相较于单 GPS 也有一定提升。

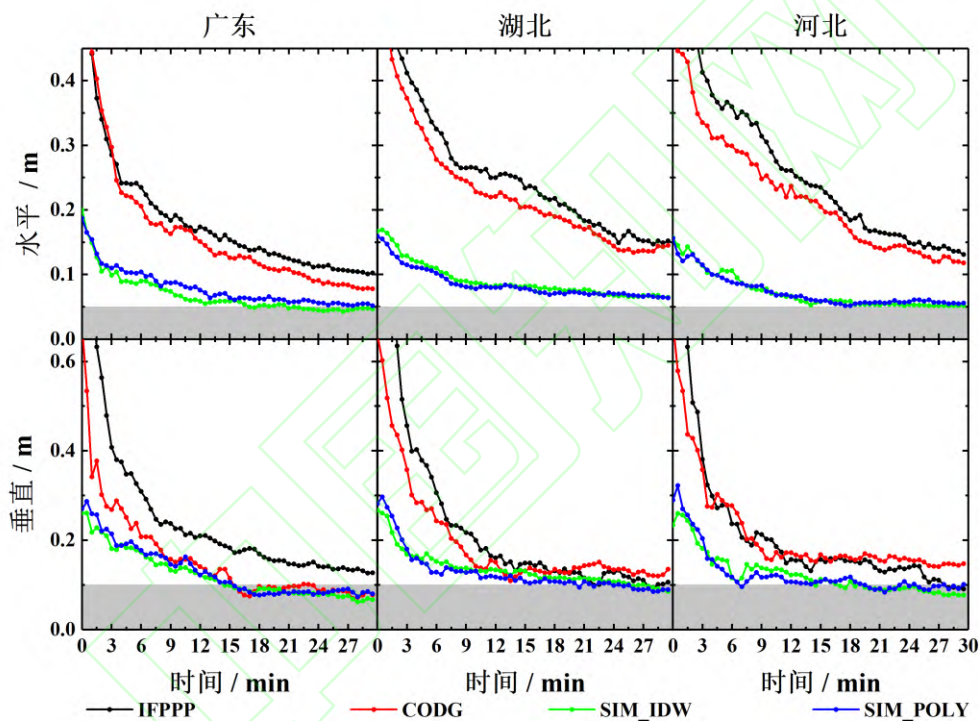


图 3 广东、湖北及河北地区单 GPS 浮点解收敛曲线

Fig.3 Convergence Sequence of Single GPS Float Solution in Guangdong, Hubei and Hebei

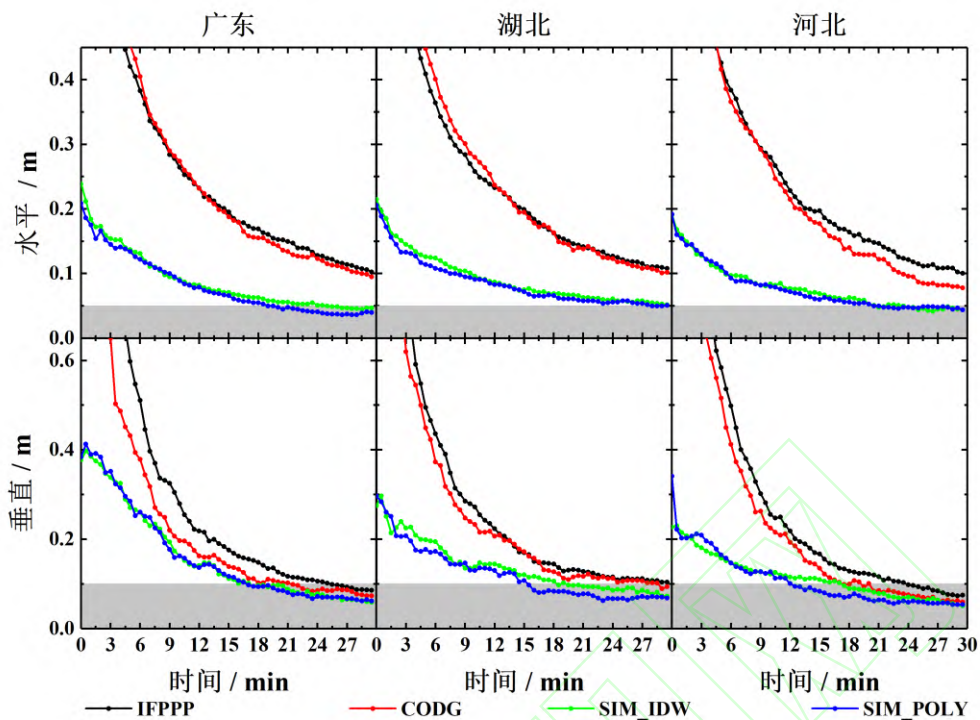


图 4 广东、湖北及河北地区 GPS+北斗浮点解收敛曲线

Fig.4 Convergence Sequence of GPS+BDS Float Solution in Guangdong, Hubei and Hebei

表 3 统计了广东、湖北及河北地区各站点采取不同电离层改正模式下浮点解的精度，并以 IFPPP 作为参考，统计上述两种电离层及 CODG 产品相较于 IFPPP 的三维精度提升比例。结合表 2 可以看到，湖北及河北地区 SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型改正下的浮点解定位精度并无显著差异，而广东地区单 GPS 下 SIM_IDW 模型下的浮点解定位精度略优于 SIM_POLY；最后 GPS+北斗双系统相较于单 GPS 在定位精度上也有显著提升。

值得注意的是，虽然整体上本文基于 CODG 全球电离层产品的非差非组合 PPP 收敛速度更快，但图 4 中湖北地区水平方向收敛速度 IFPPP 略优。一方面，目前研究表明，双频条件下，非差非组合 PPP 相对 IFPPP 提升并不明显，因此存在部分样本 IFPPP 性能略优于非差非组合 PPP^[15]；另一方面 CODG 电离层产品主要基于非中国区域 GPS、GLONASS 数据解算获得，因此其对中国区域北斗定位提升有限。

表 3 广东、湖北及河北地区浮点解 30-60 min 定位精度 RMS

Tab.3 Accuracy of Float Solution in Guangdong, Hubei and Hebei from 30 min to 60 min

地区	模式	单 GPS				GPS+北斗			
		水平/cm	高程/cm	三维 /cm	提升/%	水平/cm	高程/cm	三维 /cm	提升/%
广东	IFPPP	7.6	8.7	11.5	—	6.9	5.7	8.9	—
	CODG	7.1	7.8	10.6	7.8	6.4	5.3	8.3	6.7
	SIM_IDW	4.2	6.7	7.9	31.3	4.3	4.9	6.2	30.3
	SIM_POLY	4.7	7.8	9.2	20.0	3.9	5.0	6.2	30.3
湖北	IFPPP	10.7	8.7	13.8	—	6.9	7.6	10.3	—
	CODG	9.6	8.1	12.5	9.4	6.6	6.6	9.3	9.7
	SIM_IDW	5.5	7.8	9.5	31.2	4.4	6.3	7.6	26.2
	SIM_POLY	5.3	8.1	9.7	29.7	4.1	5.8	7.0	32.0

河北	IFPPP	11.4	9.8	15.1	—	6.8	6.3	9.2	—
	CODG	10.9	9.1	14.1	6.6	6.0	5.6	8.2	10.9
	SIM_IDW	4.7	7.1	8.5	43.7	4.0	4.9	6.3	31.5
	SIM_POLY	4.7	7.2	8.6	43.0	3.9	5.1	6.4	30.4

2.3.2 固定解

相较于浮点解，固定解通过相位偏差产品改正固定模糊度，进而提高定位精度。下面从收敛时间、收敛后精度以及模糊度首次固定时间（time to first fix, TTFF）等方面对比不同电离层模型增强、不同解算模式的定位结果进行分析。

图 5 和图 6 分别给出了广东、湖北及河北地区单 GPS/GPS+北斗两种模式固定解下不同电离层改正方式：CODE GIM 产品、SIM_IDW 和 SIM_POLY 模型前 30 min 的 68% 分位数收敛序列图。可以看到，与表 2 结果一致，湖北及河北 SIM_IDW、SIM_POLY 模型改正下的 PPP-RTK 收敛速度并无显著差异，而广东地区 SIM_IDW 模型改正下的 PPP-RTK 收敛速度略优于 SIM_POLY；此外河北地区收敛速度与广东及湖北地区相比相对较快；在引入了北斗系统后，PPP-RTK 收敛速度得到了显著提升。

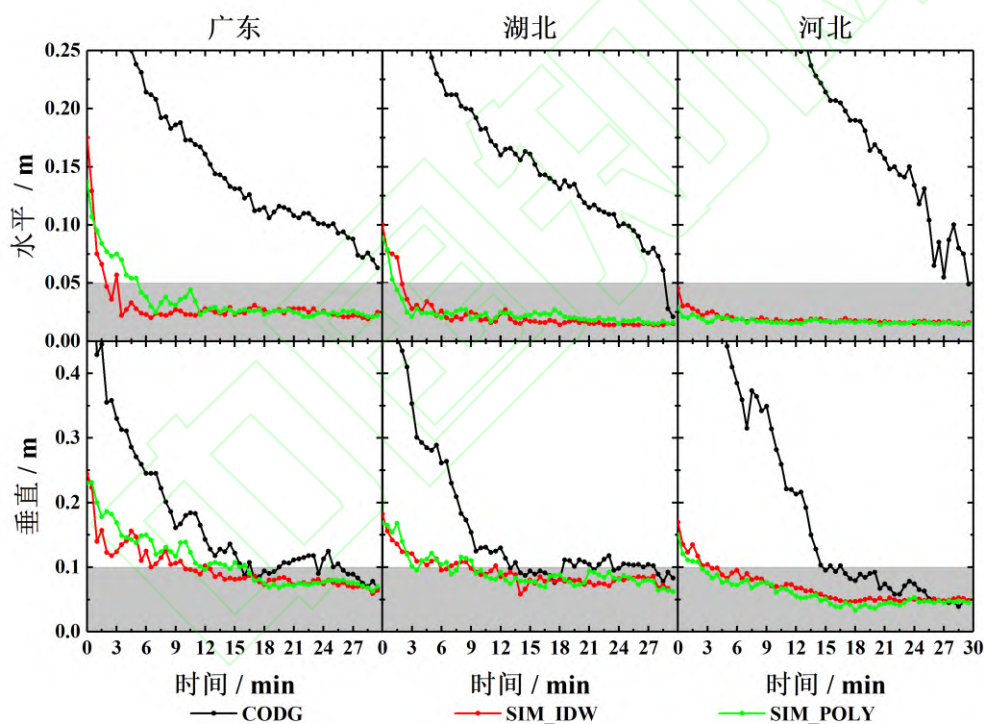


图 5 广东、湖北及河北地区单 GPS 固定解收敛曲线

Fig.5 Convergence Sequence of Single GPS Fixed Solution in Guangdong, Hubei and Hebei

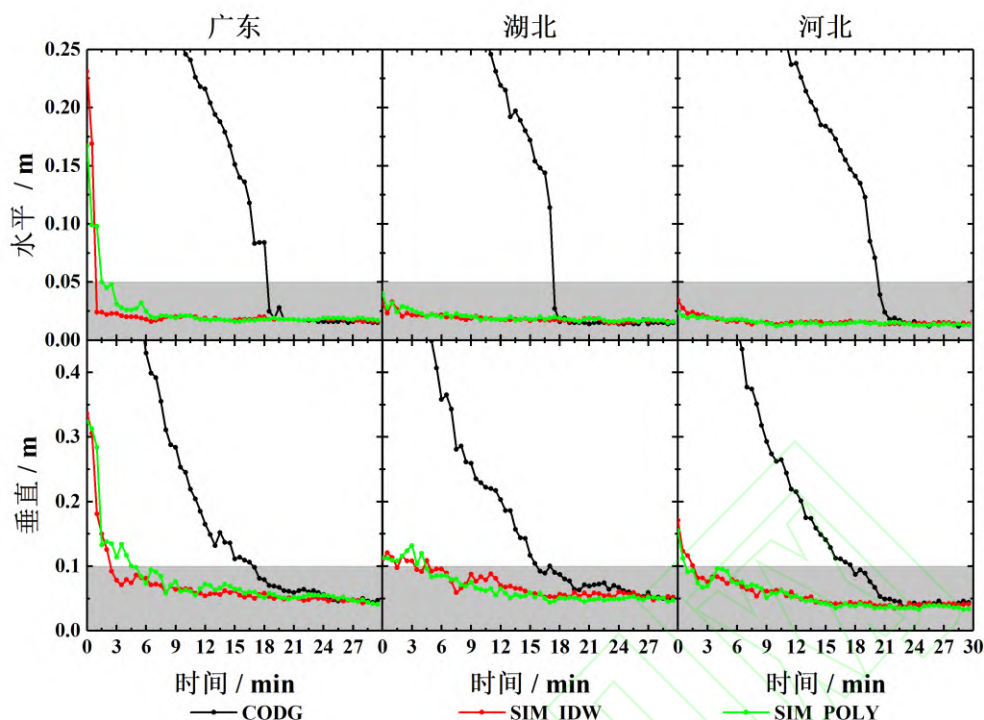


图 6 广东、湖北及河北地区 GPS+北斗固定解收敛曲线

Fig.6 Convergence Sequence of GPS+BDS Fixed Solution in Guangdong, Hubei and Hebei

表 4 则给出了三地两种模式下水平方向收敛至 5 cm、高程方向收敛至 10 cm 所需时间。结合表 2 可以看到，河北地区收敛速度最快，GPS+北斗定位模式下，水平方向首个历元即可收敛至 5 cm，高程方向 1.5 min 即可收敛至 10 cm；此外广东地区 SIM_IDW 模型改正下 PPP-RTK 收敛速度略优于 SIM_POLY，湖北及河北地区 SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型改正下的 PPP-RTK 并无显著差异；在引入北斗系统之后，PPP-RTK 收敛速度得到显著提升。

表 4 广东、湖北及河北地区固定解收敛时间统计表/min

Tab.4 Convergence Time of Fixed Solution in Guangdong, Hubei and Hebei/min

地区	解算策略	单 GPS		GPS+北斗	
		水平 (5 cm)	高程 (10 cm)	水平 (5 cm)	高程 (10 cm)
广东	CODG	—	26.0	18.5	17.0
	SIM_IDW	3.5	10.0	1.0	2.5
	SIM_POLY	5.5	16.5	1.5	4.5
湖北	CODG	29.0	28.0	17.5	16.0
	SIM_IDW	2.0	9.0	0.0	3.5
	SIM_POLY	1.5	9.5	0.0	4.5
河北	CODG	29.5	17.0	20.5	18.0
	SIM_IDW	0.0	3.5	0.0	1.5
	SIM_POLY	0.0	2.5	0.0	1.0

表 5 给出了广东、湖北及河北地区单 GPS、GPS+北斗模式下固定解的定位精度 RMS，统计方式与浮点解一致。可以看到，SIM_IDW 模型及 SIM_POLY 模型下的 PPP-RTK 定位精度相较于 CODG 产品改正下的 PPP-AR 有明显提升；在引入北斗系统之后，GPS+北斗 PPP-RTK 定位精度 RMS 相较于单 GPS 有显著提升。

表 5 广东、湖北及河北地区固定解 30~60 min 定位精度 RMS

Tab.5 Accuracy of Fixed Solution in Guangdong, Hubei and Hebei from 30 min to 60 min

地区	模式	单 GPS				GPS+北斗			
		水平/cm	高程/cm	三维/cm	提升/%	水平/cm	高程/cm	三维/cm	提升/%
广东	CODG	2.6	5.8	6.3	—	1.6	4.0	4.4	—
	SIM_IDW	2.0	4.8	5.2	17.5	1.5	4.0	4.3	2.3
	SIM_POLY	1.9	5.2	5.5	12.7	1.5	4.0	4.3	2.3
湖北	CODG	4.0	5.7	7.0	—	1.5	4.8	5.0	—
	SIM_IDW	2.1	5.5	5.9	15.7	1.6	4.6	4.9	2.0
	SIM_POLY	2.3	5.5	5.9	15.7	1.5	4.0	4.3	14.0
河北	CODG	1.5	4.2	4.5	—	1.3	3.5	3.7	—
	SIM_IDW	1.5	3.9	4.2	6.7	1.3	3.3	3.5	5.4
	SIM_POLY	1.4	4.0	4.3	4.4	1.3	3.3	3.5	5.4

图 7 给出了广东、湖北及河北三地单 GPS、GPS+北斗首次窄巷模糊度固定时间占比柱状图。从图 7 中可以看到，单 GPS 解算模式下，SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型改正下的 PPP-RTK 有 50% 以上的样本在首个历元实现了窄巷模糊度固定，而在 GPS+北斗解算模式下则有 60% 以上的样本在首个历元实现了固定，相较于 CODG 产品改正下的 PPP-AR 有明显提升。此外结合表 2 可以看到，随着电离层精度的提高，首个历元模糊度固定率也随之提高，GPS+北斗解算模式下，河北地区 SIM_IDW、SIM_POLY 首个历元模糊度固定率分别为 86.09% 和 89.13%。

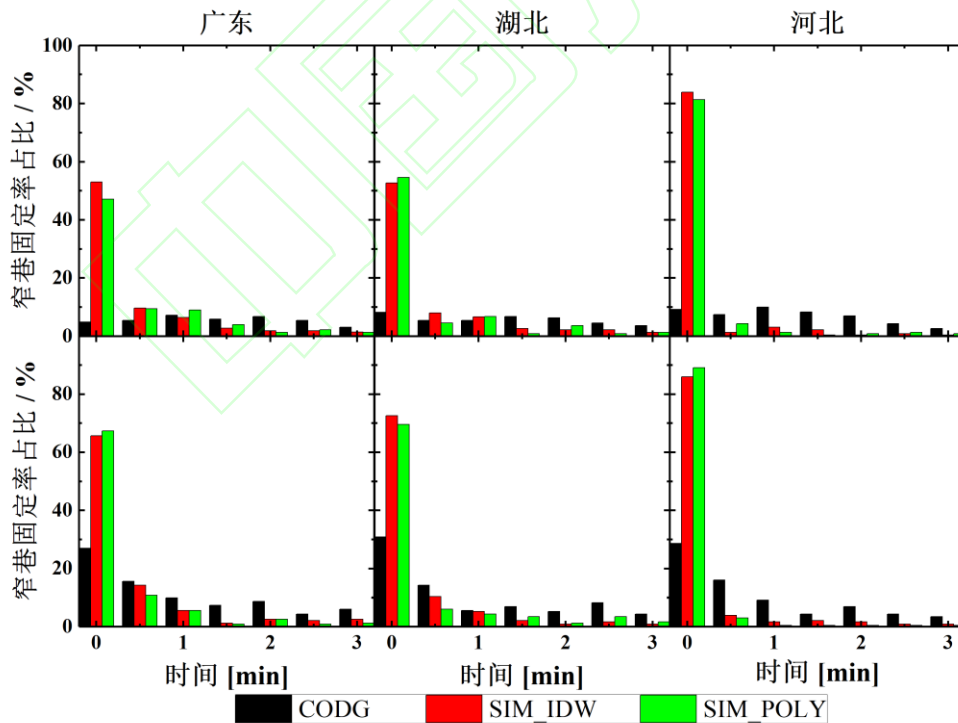


图 7 广东、湖北及河北地区首次窄巷模糊度固定时间占比
Fig.7 Proportion of the Time to First Fix in Guangdong, Hubei and Hebei

3 结 语

高精度的电离层延迟改正是实现 PPP-RTK, 提高 PPP 收敛速度的关键。本文通过广东、湖北及河北不同纬度地区观测数据, 采用单星电离层反距离内插建模 SIM_IDW 和单星电离层多项式内插建模 SIM_POLY, 对比分析上述电离层模型精度及其应用于定位中的性能, 可以得出以下结论:

1) 电离层建模方面。在电离层活动相对强烈的低纬度地区, SIM_IDW 模型略优于 SIM_POLY 模型, 而在中高纬度地区, SIM_IDW 及 SIM_POLY 模型并无显著差异。此外, SIM_POLY 模型与 SIM_IDW 模型相比更为平滑, 但却在一定程度上损失了建模精度。

2) 定位性能方面。定位结果收敛速度、定位精度随着电离层模型精度的提升而提高, 定位性能在引入北斗系统之后有显著提升, 具体结论如下:

1) 浮点解定位模式下: 随着纬度的升高, 电离层建模精度升高, 浮点解收敛速度及定位精度相较于 IFPPP 提升更为明显。

2) 固定解定位模式下: 电离层模型精度越高的地区首个历元模糊度固定率越高, GPS+北斗定位模式下, 河北地区 SIM_IDW、SIM_POLY 改正下的 PPP-RTK 首个历元固定成功率可达 86.09% 和 89.13%, 水平方向首个历元即可收敛至 5 cm, 高程方向 1.5 min 即可收敛至 10 cm; 在模糊度固定之后, PPP-RTK 相较于 PPP 浮点解其定位精度有显著提升, 河北地区 GPS+北斗定位模式下水平及三维方向 RMS 分别为 1.3 cm、3.5 cm。

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: Solid Earth, 1997, 102(B3): 5005-5017
- [2] Wubben G. PPP-RTK: Precise Point Positioning Using State-Space Representation in RTK Networks[C]. ION GNSS 2005, Long Beach, California, U.S., 2005
- [3] Ge M, Gendt G., Rothacher M, et al. Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations[J]. Journal of Geodesy, 2008, 82(7): 389-399
- [4] Zhang Xiaohong, Hu Jiahuan, Ren Xiaodong, New Progress of PPP/PPP-RTK and Positioning Performance Comparison of BDS/GNSS PPP[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(9): 1084-1100 (张小红, 胡家欢, 任晓东. PPP/PPP-RTK 新进展与北斗/GNSS PPP 定位性能比较[J]. 测绘学报, 2020, 49(9): 1084-1100)
- [5] Laurichesse D, Mercier F, Berthias JP, et al. Integer Ambiguity Resolution on Undifferenced GPS Phase Measurements and Its Application to PPP and Satellite Precise Orbit Determination[J]. Navigation, 2009, 56(2): 135-149
- [6] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing[J]. Navigation, 2010, 57(2): 123-135
- [7] Li X, Zhang X, Ge M. Regional Reference Network Augmented Precise Point Positioning for Instantaneous Ambiguity Resolution[J]. Journal of Geodesy, 2011, 85(3): 151-158
- [8] Teunissen P J G, Khodabandeh A. Review and Principles of PPP-RTK Methods[J]. Journal of Geodesy, 2015, 89(3):
- [9] Li Bofeng, Ge Haibo, Shen Yunzhong. Comparison of Ionosphere-free, Uofc and UnCombined PPP Observation Models[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44(7): 734-740 (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)
- [10] Gu Shengfeng, Shi Chuang, Lou Yidong, et al. Ionospheric Effects in Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-fixed PPP Based on Raw Observable Model[J]. *Journal of Geodesy*, 2015, 89(5): 447-457
- [11] Yao Yibin, Feng Xinying, Peng Wenjie, et al. Local Atmosphere Augmentation Based on CORS for Real-Time PPP[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(12): 1739-1748 (姚宜斌, 冯鑫滢, 彭文杰, 等. 基于 CORS 的区域大气增强产品对实时 PPP 的影响[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(12): 1739-1748)
- [12] Wu Guanbin, Chen Junping, Wu Xiaomeng, et al. Modeling and Assessment of Regional Atmospheric Corrections Based on Undifferenced and Uncombined PPP-RTK[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(11): 1407-1418 (伍冠滨, 陈俊平, 伍晓勤, 等. 基于非差非组合 PPP-RTK 的大气改正模型及其性能验证 [J]. 测绘学报, 2020, 49(11): 1407-1418)
- [13] Li Zhao, Chen Wu, Ruan Rengui, et al. Evaluation of PPP-RTK Based on BDS-3/BDS-2/GPS Observations: A Case Study in Europe[J]. *GPS Solutions*, 2020, 24 (2): 38
- [14] Yuan Fei, Li Yingbing, Miao Ge. Research on the Spatio-temporal Characteristics of IGS Ionospheric Products[J]. *GNSS World of China*, 2017, 42(1): 44-48 (袁菲, 李英冰, 缪格. IGS 电离层产品的时空特性研究[J]. 全球定位系统, 2017, 42(1): 44-48)
- [15] Gu Shengfeng. Research on the Zero-difference Un-combined Data Processing Model for Multi-frequency GNSS and Its Applications[D]. Wuhan : Wuhan University, 2013 (辜声峰. 多频 GNSS 非差非组合精密数据处理理论及其应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [16] Shi Chuang, Gu Shengfeng, Lou Yidong Lou, et al. An Improved Approach to Model Ionospheric Delays for Single-frequency Precise Point Positioning[J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(12): 1698-1708
- [17] Zhao Qile, Wang Yintong, Gu Shengfeng, et al. Refining Ionospheric Delay Modeling for Undifferenced and Uncombined GNSS Data Processing[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(4): 545-560
- [18] Hu Xian. Regional Ionospheric Modeling Based on the Data of Ground-based Multi-GNSS and Validation[D]. Wuhan : Wuhan University, 2017 (胡弦. 多模地基 GNSS 区域电离层建模及验证分析[D]. 武汉: 武汉大学, 2017)
- [19] Shi Chuang, Guo Shiwei, Gu Shengfeng, et al. Multi-GNSS Satellite Clock Estimation Constrained with Oscillator Noise Model in the Existence of Data Discontinuity[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(4): 515-528
- [20] Gu Shengfeng, Wang Yintong, Zhao Qile, et al. BDS-3 Differential Code Bias Estimation with Undifferenced Uncombined Model Based on Triple-frequency Observation[J]. *Journal of Geodesy: Continuation of Bulletin Géodésique and Manuscripta Geodaetica*, 2020, 94(401): 1-13

Performance and Analysis of Ionospheric Enhanced PPP-RTK in Different Latitudes

SONG Weiwei¹ HE Chengpeng¹ GU Shengfeng¹

Abstract: Objectives: Slow convergence has always been an important factor of limiting the development of precise point positioning (PPP). Studies have shown that the convergence speed of PPP can be significantly improved with high-precision ionospheric delay correction, and then to achieve PPP-RTK. At present, the ionosphere in the regional PPP-RTK mainly adopts the satellite-based ionospheric model with polynomial function (SIM_POLY) and the satellite-based ionospheric model with inverse distance weight function (SIM_IDW) for construction. **Methods:** In order to verify the modeling accuracy of the above two models at different latitudes, this paper first used the observation data of Guangdong, Hubei and Hebei to establish ionospheric delay models over Guangdong, Hubei and Hebei regions. Then applied the above models to float and fixed PPP under single GPS and GPS+BDS. And finally compared the above results with IFPPP (ionosphere-free PPP) and CODG (centre for orbit determination in europe global ionospheric map) correction. **Results:** Experimental results show that in the low-latitude regions, SIM_IDW slightly outperformed SIM_POLY, but there was no significant difference in the middle and high latitude regions. Compared with IFPPP and CODG correction in the float PPP, Hebei achieved the fastest convergence speed compared with Guangdong and Hubei, and the positioning accuracy in single GPS solution is improved by 43.7% and 43.0% compared with IFPPP, respectively. In the fixed PPP, the success rate of first epoch to fix the ambiguity of PPP-RTK under the correction of SIM_IDW and SIM_POLY models in GPS+BDS solution could reach 86.09% and 89.13% in Hebei area. Besides, it could converge to 5 cm in the first epoch in horizontal, and converged to 10 cm within 1.5 minutes in vertical, and the accuracy of GPS+BDS PPP-RTK had a significant improvement in positioning compared with single GPS, which was 1.3 cm in horizontal and 3.5 cm in three-dimensional under the correction of SIM_IDW and SIM_POLY models, respectively. **Conclusions:** Establishing a regional ionospheric model through SIM_IDW and SIM_POLY models to realize PPP-RTK can significantly shorten the PPP convergence time and improve positioning accuracy. **Key words:** PPP; PPP-RTK; un-differenced and un-combined; Ionospheric model; multi-system PPP

First author: SONG Weiwei, Professor. He is engaged in GNSS data processing for a long time. E-mail: sww@whu.edu.cn

Corresponding author: GU Shengfeng, associate professor. E-mail: gsf@whu.edu.cn

Foundation support: The National Key Research and Development Program of China (2017YFB0503401); the National Nature Science Foundation of China (42174029); the Joint Foundation for Ministry of Education of China (6141A02011907).