

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.05.013

多系统混频非差非组合精密单点定位方法研究

赵琳, 李宏宇, 侯毅男, 杨福鑫, 李亮

(哈尔滨工程大学智能科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要:多系统多频精密单点定位(PPP)因具有增加观测冗余信息、提高系统性能可靠性和提升导航性能指标等优势而被广泛研究。非差非组合 PPP 模型直接使用原始伪距和载波相位观测值,不做任何线性组合,适合多系统多频率的 PPP 数据解算。目前,各个系统虽已提供 3 个或更多频率,但除北斗系统外,其余系统无法保证全星座都提供三频信号,使得多系统多频 PPP 的性能分析多采用多系统双频或单系统三频模型,没有充分利用多系统多频的观测信息。因此,采用多系统混频模型进行非差非组合 PPP,该模型的具体表述为北斗三频+GPS 双频+GLONASS 双频 PPP 模型,充分利用可用的观测信息,提升了冗余度。利用 CUT0、JFNG、NNOR、SIN1 这 4 个测站的观测数据以及 MGEX 的精密轨道和钟差产品进行仿真实验,实验结果表明,多系统混频非差非组合 PPP 相较于多系统双频非差非组合 PPP 的平均静态解 RMS 在东向提高了 9.6%,北向相当,天向提高了 11%;平均动态解 RMS 在东向提高了 7.3%,北向相当,天向提高了 5.7%。

关键词:多系统;混频;精密单点定位;非差非组合

中图分类号:TN967.1

文献标志码:A

文章编号:2095-8110(2021)05-0096-07

Research on Undifferenced and Uncombined Precise Point Positioning Method of Multi-system and Mixing-frequency

ZHAO Lin, LI Hong-yu, HOU Yi-nan, YANG Fu-xin, LI Liang

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

Abstract: Precision point positioning(PPP) has been widely studied for its advantages of increasing redundant observation information, improving system performance reliability and improving navigation performance indicators. The undifferenced and uncombined PPP model directly uses the original pseudo range and carrier phase observations without any linear combination, which is suitable for PPP data calculation of multi-system and multi-frequency. At present, although each system has provided three or more frequency, no system except the BeiDou system can guarantee that all the constellations can provide three frequency signals. The performance analysis of multi-frequency and multi-system PPP model mostly adopt multi-system dual-frequency or single system triple-frequency model, while the observation information of multi-system and multi-frequency is not fully utilized. Therefore, this paper uses the multi-system mixing frequency model for undifferenced and uncombination PPP. The specific expression of the model is BeiDou triple frequency + GPS dual frequency + GLONASS dual frequency PPP model, which makes full use of available

收稿日期:2020-08-13;修订日期:2020-09-21

基金项目:国家自然科学基金(61773132,61633008,61803115);国家重点研发计划国际间合作项目(2017YFE0131400);中国工业和信息化部第七代超深水钻井平台创新专项;黑龙江省杰出青年基金(JC2018019);中央高校基本科研业务费专项基金(HEUCFP201768,3072019CF0401)

作者简介:赵琳(1968-),男,博士,教授,主要从事车载 MEMS 惯性/GPS 组合定位技术研究方面的研究。

observation information and improves the redundancy. Based on the observation data of CUT0, JFNG, NNOR and SIN1, as well as the precise orbit and clock offset products of MGEX, the experimental results show that the average static solution RMS of dual frequency undifferenced and uncombined PPP can be increased by 9.6% eastwards, equivalent northwards, and increased by 11% upwards; the RMS of the average dynamic solution can be increased by 7.3% eastwards, equivalent northwards, and increased by 5.7% upwards.

Key words: Multi-system; Mixing-frequency; Precise point positioning (PPP); Undifferenced and uncombined model

0 引言

精密单点定位 (Precision Point Positioning, PPP) 具有作业灵活、无需基站辅助的优势, 广泛应用于海洋高精度定位, 具有重要的应用价值。根据电离层处理策略的不同, PPP 模型可以分为无电离层组合模型、Uofc 模型以及非差非组合模型。其中, 非差非组合 PPP 模型直接使用原始伪距和载波相位观测值, 具有不会放大噪声; 可引入外部电离层约束, 加快收敛; 可提供高精度的电离层延迟信息的优点^[1]。随着全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的建设与发展, 围绕多系统多频率特征开展的相关研究已成为 GNSS 应用领域的重要研究内容。卢秋阳结合实测北斗三频数据, 通过对现有三频周跳检测与修复方法进行系统的比较研究, 提出了一种基于电离层变化的实时周跳探测方法^[2]。王泽民等论述了 Galileo 系统 4 个频率的载波组合观测值及相关的误差特性, 并按一定标准筛选出具有特定性能的组合观测值^[3]。张小红等从定位精度和收敛性两方面, 研究分析了三频无电离层组合模型、三频消电离层组合模型和三频非组合模型 PPP 静态及动态定位性能, 并与传统双频无电离层组合进行比较, 结论是三频 PPP 定位精度有所提高, 并且具有更高的可靠性和抗差性能^[4]。M. Elsobeiey 根据不同策略选取了 9 组全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 三频线性组合 PPP 方案, 实验结果表明, 三频线性组合 PPP 可将传统双频 PPP 的收敛时间和定位精度提高大约 10%^[5]。李博峰等研究了使用 GNSS 组合观测量进行长距离实时精密导航的方法^[6]。X. Lou 等研究了 GPS+GLONASS+BDS+Galileo 四系统联合的非差非组合 PPP 模型与算法, 并利用 105 个多模 GNSS 实验跟踪网 (Multi-GNSS Experiment, MGEX) 测站的多系统观测数据, 分析了不同系统联

合的单、双频 PPP 定位精度和收敛速度, 结果表明, 多系统观测值的加入可以明显改善 PPP 定位性能和可靠性^[7]。

在多模多频条件下, 沿用现有组合观测值的策略 (无电离层组合) 处理数量众多的原始观测值, 将存在以下问题: 1) 随着信号个数的增加, 待求的独立偏差个数增多, 特征组合数量增加, 合理选择与评价最优组合的难度就会随之增加; 2) 特征组合会损失某类信息; 3) 需要所有观测单元的原始观测值中必须包括组合所需的特征信号, 若缺失其中一类观测值, 将使得其他观测值也无法参与解算, 从而导致原始观测信息损耗; 4) 需要针对不同的解算目的选择特定的观测组合。采用非差非组合思路能够最大限度地保留原始观测信息, 利于单频、双频、多频模型的统一表达, 灵活兼容各类应用需求。

现有关于多模多频的研究几乎没有将多模与多频结合起来, 研究多系统采用多系统双频模型, 研究多频率采用单系统三频模型。这主要是由于除了北斗系统外, 其余系统无法保证全星座都提供三频信号。

综上, 本文对多系统混频非差非组合 PPP 进行了研究, 推导了多系统混频模型即北斗三频+GPS 双频+GLONASS 双频 PPP 模型, 实现了多系统混频非差非组合 PPP, 进而达到增强 PPP 可靠性、提高 PPP 定位性能的目的。

1 多系统混频非差非组合 PPP 函数模型

随着多导航系统多频观测值的获取以及数据处理理论的深入发展, 相对硬件延迟的定义也进一步延伸, 通常分为系统间偏差 (Inter-System Bias, ISB) 和频间偏差 (Inter-Frequency Bias, IFB)。ISB 描述了不同系统间的通道延迟偏差, 在使用多模信号时, 必须要考虑该项偏差; IFB 为同一系统不同频率信号的通道延迟偏差, 由于 GLONASS 系统采用

频分多址 (Frequency Division Multiple Access, FDMA) 技术, 不同卫星具有不同的频率、伪距和载波 IFB, 需考虑该项偏差。北斗系统采用三频信号, 同样需考虑 IFB。

1.1 标准双频非差非组合 PPP 模型

本文模型采用北斗三频+GPS 双频+GLONASS 双频非差非组合 PPP 模型, 需顾及系统间偏差、GLONASS 频间偏差以及 BDS 频间偏差。为了方便推导后续顾及 IFB、ISB 的 PPP 模型, 首先推导统一的标准双频非差非组合 PPP 模型。

非差非组合 PPP 处理模型由原始伪距和载波相位模型推导而成, 由于引入了各信号特征性时延偏差和电离层估计等参数, 在灵活建模的同时, 带来许多参数间相关的问题。卫星端非校正伪距硬件延迟 (Uncalibrated Code Delay, UCD) 与卫星钟差线性相关; 接收机端 UCD 与接收机钟差及电离层参数线性相关; 非校正相位硬件延迟 (Uncalibrated Phase Delay, UPD) 与模糊度线性相关。在没有额外基准约束的情况下, 上述参数无法分离, 故无法直接求解。

通常的解决方式是通过参数规整, 利用钟差、电离层延迟和模糊度等参数分别吸收部分伪距硬件延迟。相位硬件延迟与模糊度具有强相关性, 且通常具有极高的时间稳定性, 可被模糊度完全吸收^[8]。

此外, 观测方程中的其他误差项如卫星和接收机天线相位中心改正、测站对流层天顶干延迟、相对论效应、潮汐负荷形变 (固体潮、极潮和海潮)、萨奈克效应和卫星天线相位缠绕等改正, 均需事先通过模型改正^[9]。

为了更好地描述参数规整, 定义如下表达式

$$\begin{cases} \alpha_{mm}^Q = \frac{(f_m)^2}{(f_m)^2 - (f_n)^2}, \beta_{mm}^Q = -\frac{(f_n)^2}{(f_m)^2 - (f_n)^2} \\ DCB_{mm}^{s,Q} = d_m^{s,Q} - d_n^{s,Q}, DCB_{r,mm}^{s,Q} = d_{r,m}^{s,Q} - d_{r,n}^{s,Q} \\ d_{IF}^{s,Q} = \alpha_{mm}^Q \cdot d_m^{s,Q} + \beta_{mm}^Q \cdot d_n^{s,Q} \\ d_{r,IF}^s = \alpha_{mm}^Q \cdot d_{r,m}^{s,Q} + \beta_{mm}^Q \cdot d_{r,n}^{s,Q} \end{cases} \quad (1)$$

式中, 上标 s 表示卫星号, 上标 Q 表示卫星系统, 可取 G、R、C 分别表示 GPS、GLONASS 和 BDS; 下标 r、m、n (m, n = 1, 2, 3; m ≠ n) 分别表示接收机 ID 和观测值频段号; f 表示信号频率; α_{mm}^Q 和 β_{mm}^Q 是频率相关的放大因子, 表示无电离层组合因子; $DCB_{mm}^{s,Q}$ 和 $DCB_{r,mm}^{s,Q}$ 分别为频率相关的卫星和接

收机码间偏差 (Differential Code Bias, DCB); $d_m^{s,Q}$ 和 $d_{r,m}^{s,Q}$ 分别表示卫星端和接收机端 UCD; $d_{IF}^{s,Q}$ 和 $d_{r,IF}^{s,Q}$ 分别表示卫星端和接收机端 m、n 频率硬件延迟经组合后形成的无电离层组合伪距硬件延迟。

IGS 精密卫星产品一般基于 P1/P2 无电离层组合观测值估计, 因此, 其提供的卫星钟差产品包含了双频 P1/P2 伪距观测值 UCD 的线性组合, 即

$$\begin{aligned} dt_{IF12}^s &= [dt^s + (\alpha_{12} \cdot d_1^s + \beta_{12} \cdot d_2^s)] \\ &= dt^s + d_{IF}^s \end{aligned} \quad (2)$$

根据式 (1), dt_{IF}^s 是外部提供的精密卫星钟差; d_{IF}^s 是卫星端硬件延迟组合后形成的无电离层组合伪距硬件延迟。在引入 IGS 精密产品的同时引入了 d_{IF}^s , 与原始观测方程中的卫星端 UCD 进行参数规整后形成卫星端码间偏差 $DCB_{mm}^{s,Q}$, 可以被电离层延迟吸收, 也可以利用文件修正。

原始观测方程中接收机端 UCD ($d_{r,m}^{s,Q}$) 可表示为频率相关或频率无关的伪距硬件延迟。在双频条件下, GLONASS 由于使用频分多址技术, 拥有频率相关的伪距硬件延迟。具体表征如下

$$\begin{cases} d_{r,m}^{s,Q} = d_{r,m}^Q + \Theta_{r,m}^{s,Q}, & \text{当 Q 为 R} \\ d_{r,m}^{s,Q} = d_{r,m}^Q, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $d_{r,m}^Q$ 在频率 m 上对 Q 系统内所有卫星一致; $\Theta_{r,m}^{s,Q}$ 为频率相关的伪距硬件延迟。其中, $d_{r,m}^Q$ 可以同时被接收机钟差和电离层参数吸收。

引入精密卫星轨道和钟差改正, 对原始观测方程进行参数规整, 线性化后可以得到标准双频非差非组合 PPP 模型, 具体方程如下

$$\begin{cases} p_{r,j}^{s,Q} = \mathbf{u}_r^{s,Q} \cdot \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^Q + M_w \cdot Z_w + \\ \quad \gamma_j^Q \cdot \bar{I}_{r,1}^{s,Q} + c\Theta_{r,j}^{s,Q} + \epsilon_{r,j}^{s,Q} \\ l_{r,j}^{s,Q} = \mathbf{u}_r^{s,Q} \cdot \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^Q + M_w \cdot Z_w - \\ \quad \gamma_j \cdot \bar{I}_{r,1}^{s,Q} + \bar{N}_{r,j}^{s,Q} + \xi_{r,j}^{s,Q} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} cd\bar{t}_r = cd\bar{t}_r + cd_{r,IF12} \\ \bar{I}_{r,1}^{s,Q} = I_{r,1}^{s,Q} + c\beta_{12} DCB_{r,12}^Q \\ \bar{N}_{r,j}^{s,Q} = \lambda_j^{s,Q} (N_{r,j}^{s,Q} + b_{r,j}^{s,Q} - b_j^{s,Q}) + \\ \quad c(d_{IF12}^{s,Q} - d_{r,IF12}^Q) + \frac{c\gamma_j^Q}{1 - \gamma_2^Q} DCB_{r,12}^Q \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Theta_{r,j}^{s,Q} \neq 0, & \text{当 Q 为 R} \\ \Theta_{r,j}^{s,Q} = 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $p_{r,j}^{s,Q}$ 和 $l_{r,j}^{s,Q}$ 分别表示伪距和载波的观测量

减去计算量 (Observed-Minus-Computed, OMC); $\mathbf{u}_r^{s,Q}$ 为方向余弦; \mathbf{x} 为相对于初始坐标的三维位置增量; γ_j 为频率相关的电离层延迟放大因子 ($\gamma_j = (f_1/f_2)^2$); $d\bar{t}_r^Q, \bar{I}_{r,1}^{s,Q}, \bar{N}_{r,j}^{s,Q}$ 分别为重新参数化后的接收机钟差、电离层延迟和载波相位模糊度参数。接收机钟差吸收了接收机 UCD 中无电离层组合部分; 电离层延迟吸收了接收机与卫星 UCD 中与频率相关的部分; 模糊度与 UPD 强相关, 另外, 接收机钟差和电离层延迟重新参数化导致模糊度中引入接收机与卫星端 UCD, 因此模糊度只能作为浮点解估计。

该模型对应的待估参数 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, c \bar{d}t_r, Z_w, \bar{I}_{r,1}^Q, \bar{N}_{r,1}^Q, \bar{N}_{r,2}^Q]^T \quad (7)$$

1.2 GLONASS 非差非组合 PPP 模型

GLONASS 采用频分多址技术, 需要考虑伪距频间偏差的影响。在本文中考虑将频间偏差模型化为频率数的二次多项式函数。

GLONASS 伪距频间偏差可以表示为

$$\Theta_{r,j}^{s,R} = \kappa^{s,R} \Delta_{r,j}^R + (\kappa^{s,R})^2 \Omega_{r,j}^R \quad (8)$$

式中, $\kappa^{s,R}$ 表示 GLONASS 频率数 (-7~6); $\Delta_{r,j}^R$ 表示 IFB 依赖于频率数的斜率; $\Omega_{r,j}^R$ 表示 IFB 依赖于频率数的二次项部分。将式(8)代入式(4)并重新参数化可得 GLONASS 非差非组合 PPP 模型, 待估参数具体表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} c\bar{d}t_r = cdt_r + cd_{r,IF12} \\ \Delta_{r,12}^R = \Delta_{r,2}^R - \gamma_2 \Delta_{r,1}^R \\ \Omega_{r,12}^R = \Omega_{r,2}^R - \gamma_2 \Omega_{r,1}^R \\ \bar{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s + c\beta_{12} DCB_{r,12} + \kappa^{s,R} \Delta_{r,1}^R + (\kappa^{s,R})^2 \Omega_{r,1}^R \\ \bar{N}_{r,j}^{s,R} = \lambda_j^{s,R} (N_{r,j}^{s,R} + b_{r,j}^{s,R} - b_j^{s,R}) + c(d_{IF}^{s,R} - d_{r,IF}^R) + \frac{c\gamma_j^R}{1-\gamma_2^R} DCB_{r,12}^R + \gamma_2^R \kappa^{s,R} \Delta_{r,1}^R + \gamma_2^R (\kappa^{s,R})^2 \Omega_{r,1}^R \end{array} \right. \quad (9)$$

该模型对应的参数向量 \mathbf{X} 可表示为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, c \bar{d}t_r, \Delta_{r,12}^R, \Omega_{r,12}^R, Z_w, \bar{I}_{r,1}^R, \bar{N}_{r,1}^R, \bar{N}_{r,2}^R]^T \quad (10)$$

后续模型中, GLONASS 中的伪距频间偏差都采用该处理策略。

1.3 北斗三频非差非组合 PPP 模型

根据式(4)和式(5)可以得到北斗三频非差非组合模型, 但在第三个频率上的伪距观测值的码间偏差 ($DCB_{r,13}$) 无法被电离层参数完全吸收。所以需要在第三个频率的伪距上引入一个额外的频间

偏差参数 IFB, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{r,1}^s = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r + M_w \cdot Z_w + \bar{I}_{r,1}^s \\ l_{r,1}^s = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r + M_w \cdot Z_w - \bar{I}_{r,1}^s + \bar{N}_{r,1}^s \\ p_{r,2}^s = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r + M_w \cdot Z_w + \gamma_2 \cdot \bar{I}_{r,1}^s \\ l_{r,2}^s = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r + M_w \cdot Z_w - \gamma_2 \cdot \bar{I}_{r,1}^s + \bar{N}_{r,2}^s \\ p_{r,3}^s = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r + M_w \cdot Z_w + \gamma_3 \cdot \bar{I}_{r,1}^s + IFB \\ l_{r,3}^s = \mathbf{u}_r^s \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r + M_w \cdot Z_w - \gamma_3 \cdot \bar{I}_{r,1}^s + \bar{N}_{r,3}^s \end{array} \right. \quad (11)$$

其中

$$\left\{ \begin{array}{l} c\bar{d}t_r = cdt_r + cd_{r,IF12} \\ \bar{I}_{r,1}^s = I_{r,1}^s + c\beta_{12} DCB_{r,12} \\ IFB = \frac{\beta_{12}}{\beta_{13}} DCB_{r,12} - DCB_{r,13} \\ \bar{N}_{r,1}^s = \lambda_1^s (N_{r,1}^s + b_{r,1}^s - b_1^s) + c(d_{IF12}^s - d_{r,IF12}) + \frac{c}{1-\gamma_2} DCB_{r,12} \\ \bar{N}_{r,2}^s = \lambda_2^s (N_{r,2}^s + b_{r,2}^s - b_2^s) + c(d_{IF12}^s - d_{r,IF12}) + \frac{c\gamma_2}{1-\gamma_2} DCB_{r,12} \\ \bar{N}_{r,3}^s = \lambda_3^s (N_{r,3}^s + b_{r,3}^s - b_3^s) + c(d_{IF12}^s - d_{r,IF12}) + \frac{c\gamma_3}{1-\gamma_3} DCB_{r,12} \end{array} \right. \quad (12)$$

IFB 是 B3 频率上的伪距频间偏差, 作为时间常数估计。

该模型的待估参数 \mathbf{X} 为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, c \bar{d}t_r, Z_w, \bar{I}_{r,1}, IFB, \bar{N}_{r,1}, \bar{N}_{r,2}, \bar{N}_{r,3}]^T \quad (13)$$

1.4 多系统混频非差非组合 PPP 模型

将式(4)和式(5)扩展到多系统环境下, 考虑 IFB 参数; 引入 ISB 参数, 以 GPS 接收机钟差作为参考, 可得到多系统混频 PPP 模型, 即

$$\left\{ \begin{array}{l} p_{r,j}^{s,G} = \mathbf{u}_r^{s,G} \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r^G + M_w \cdot Z_w + \gamma_j^G \bar{I}_{r,1}^{s,G} + \epsilon_{r,j}^{s,G} \\ p_{r,j}^{s,R} = \mathbf{u}_r^{s,R} \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r^G + ISB_r^R + M_w \cdot Z_w + \Theta_{r,j}^{s,R} + \gamma_j^R \bar{I}_{r,1}^{s,R} + \epsilon_{r,j}^{s,G} \\ p_{r,j}^{s,C} = \mathbf{u}_r^{s,C} \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r^G + ISB_r^C + M_w \cdot Z_w + \gamma_j^C \bar{I}_{r,1}^{s,C} + \epsilon_{r,j}^{s,G} \\ p_{r,3}^{s,C} = \mathbf{u}_r^{s,C} \cdot \mathbf{x} + c\bar{d}t_r^G + ISB_r^C + M_w \cdot Z_w + \gamma_3^C \cdot \bar{I}_{r,1}^{s,C} + IFB + \epsilon_{r,j}^{s,G} \end{array} \right. \quad (14)$$

$$\begin{cases}
 l_{r,j}^{s,G} = \mathbf{u}_r^{s,G} \cdot \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + M_w \cdot Z_w - \gamma_j^G \bar{I}_{r,1}^{s,G} + \\
 \quad \lambda_j^{s,R} \bar{N}_{r,j}^{s,G} + \xi_{r,j}^{s,G} \\
 l_{r,j}^{s,R} = \mathbf{u}_r^{s,R} \cdot \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^G + ISB_r^R + M_w \cdot Z_w - \\
 \quad \gamma_j^R \bar{I}_{r,1}^{s,R} + \lambda_j^{s,R} \bar{N}_{r,j}^{s,R} + \epsilon_{r,j}^{s,R} \\
 l_{r,j}^{s,C} = \mathbf{u}_r^{s,C} \cdot \mathbf{x} + cd\bar{t}_r^C + ISB_r^C + M_w \cdot Z_w + \\
 \quad \gamma_j^C \bar{I}_{r,1}^{s,C} + \lambda_j^{s,C} \bar{N}_{r,j}^{s,C} + \epsilon_{r,j}^{s,C}
 \end{cases} \quad (15)$$

该模型对应的参数向量 \mathbf{X} 可表示为

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}, c \bar{d}t_r^G, Z_w, c ISB_r^Q, IFB, \bar{I}_{r,1}^Q, \bar{N}_{r,j}^Q]^T \quad (16)$$

2 试验及结果分析

本文采用开源软件 GAMP 进行二次开发,并在其中扩展了多系统混频 PPP 处理模块^[10]。

本节选取了 JFNG、CUT0、NNOR、SIN1 这 4 个站点在 2018 年 5 月(年积日为 121~124)总计 4d 的 30s 采样间隔的观测数据进行实验分析。实验采用了德国地学研究中心提供的精密轨道和钟差产品,卫星和接收机天线相位中心改正采用 IGS 绝对天线相位中心改正模型 igs14.atx。由于 BDS 接收机端的天线相位中心改正不可用,因此用相应的 GPS 信号对应的接收机端天线相位中心改正替代。卫星截止高度角设置为 10°。具体的 PPP 处理策略如表 1 所示。

表 1 多系统混频 PPP 处理策略

Tab. 1 Multisystem and mixing-frequency PPP processing strategy

事项	模型
方案	多系统混频非差非组合 PPP
估计器	卡尔曼滤波, GAMP 软件
采样间隔/s	30
截止高度角/(°)	10
权值策略	高度角加权
电离层延迟	白噪声过程估计
对流层延迟	干分量:模型修正;湿分量:随机游走过程估计
相对论效应	模型改正
相位缠绕	模型改正
固体潮	模型改正
地球自转	模型改正
卫星端相对硬件延迟	卫星端 DCB 使用 MGEX 的 DCB 产品改正;接收机端 DCB 被钟差和电离层吸收
接收机端频间偏差	时间常数估计
接收机钟差	白噪声过程估计
测站坐标	静态 PPP,以时间常数估计;动态 PPP,以白噪声估计
模糊度	浮点解

2.1 静态定位结果分析

由于双频非差非组合模型相比无电离层组合模型更有优势,本节使用两种模型进行静态精密单点定位,一种是 GPS+GLONASS+BDS 双频非差非组合模型(简称为 GRC-2),另一种为北斗三频+GPS 双频+GLONASS 双频模型(简称为 GRC-3)。图 1 给出了 4 个测站两种 PPP 定位模型下连续 4d 单天静态定位精度均方根(Root Mean Square, RMS)的平均值。图 1 中,横坐标轴表示 4 个测站,纵坐标表示 E、N、U 方向平均 RMS。从图 1 中可以看出,两种 PPP 模型在各测站的定位精度在 E、N、U 方向均优于 4cm, GRC-3 模型的定位精度优于 GRC-2 模型。具体分析可知,在 JFNG 与 NNOR 站点下两种模型的定位精度几乎没有差距,这 2 个站点下的定位精度相较其余 2 个站点(CUT0、SIN1)更好, NNOR 站点的 E、N 方向的定位精度达到了毫米级; CUT0、SIN1 站点的定位精度稍差, SIN1 站点 GRC-2 模型下 E 向的定位精度较差,达到了 4cm,这种情况下, GRC-3 模型下 E 向的定位精度有所提升。

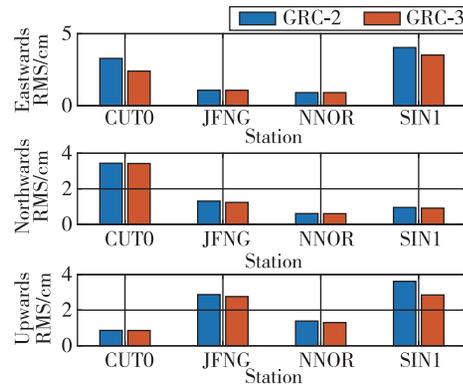


图 1 两种 PPP 模型 4 个测站单天静态定位平均 RMS

Fig. 1 Average RMS results for 4 stations of two PPP models in daily static solutions

表 2 统计了两种 PPP 模型下 4 个测站连续 4d 单天静态解的平均值。从表 2 的统计结果来看,相较于多系统双频非差非组合 PPP 模型,多系统混频非差非组合 PPP 模型的定位精度有所提高,以单个测站为例, NNOR 站点下两种模型的定位精度在 E、N 方向达到毫米级,定位结果较好, GRC-3 模型相较 GRC-2 模型的定位精度有所提升,但提升在 5% 以内,可以认为两者精度相当。可以说,当 GRC-2 模型能取得良好定位精度时,使用 GRC-3

模型也能取得同水平的定位精度,但很难提升。SIN1 站点的情况不同,该站点在 E、U 方向的定位精度在 4 个测站中是最差的,GRC-3 模型的定位精度相较 GRC-2 模型取得了较大提升,在东向上提高了 12.5%,在天向上提升了 21.3%。可以看出,当 GRC-2 模型的定位结果较差时,GRC-3 模型的定位精度会有明显提高。从 4 个测站 RMS 平均值综合来看,GRC-3 模型的定位精度相较 GRC-2 模型有所提高,在东向上提高了 9.6%,北向上相当,天向上提高了 11%。

表 2 两种模型 4 个测站单天静态定位 RMS 统计表

Tab. 2 RMS results for 4 stations of two PPP models in daily static solutions cm

测站	GRC-2			GRC-3		
	E	N	U	E	N	U
CUT0	2.71	3.44	0.86	2.4	3.48	0.85
JFNG	1.07	1.31	2.87	1.07	1.28	2.76
NNOR	0.90	0.61	1.39	0.91	0.60	1.33
SIN1	4.04	0.95	3.62	3.52	0.91	2.85
平均	2.18	1.58	2.18	1.97	1.57	1.94

表 3 统计了 4 个测站的平均收敛时间,以 E、N、U 这 3 个方向定位偏差连续 20 个历元均优于 10cm 时定义收敛。从表 3 中可以看出,两种模型下 4 个测站的静态定位平均收敛时间在 15min 左右,GRC-3 模型下的收敛时间较 GRC-2 模型有所增长,收敛性能有所下降。这主要是因为使用 GRC-3 模型有更多待估参数,虽然提高了冗余度,但在定位的初始阶段,待估参数更易受观测方程病态性的影响,影响了 GRC-3 模型的收敛时间,并且 GRC-3 模型的数据处理时间也更长。

表 3 两种模型 4 个测站静态定位收敛时间统计表

Tab. 3 Convergence time results for 4 stations of two PPP models in daily static solutions min

测站	GRC-2	GRC-3
CUT0	17.625	17.375
JFNG	11.875	12.125
NNOR	14	16.25
SIN1	14.75	15.375
平均	14.56	15.28

2.2 模拟动态定位结果分析

本节使用两种模型进行伪动态精密单点定位,

即解算测站坐标时使用白噪声过程进行估计。图 2 给出了 4 个测站两种 PPP 定位模型下连续 4d 单天动态定位精度 RMS 的平均值。图 2 中,横坐标轴表示 4 个测站,纵坐标表示 E、N、U 方向平均 RMS。从图 2 中可以看出,除了 SIN1 站点,两种 PPP 模型在各测站的定位精度在 E、N、U 方向均优于 4cm,GRC-3 模型定位精度优于 GRC-2 模型。在 JFNG 与 NNOR 站点下两种模型的定位精度几乎没有差距,这 2 个站点下的定位精度相较其余 2 个站点(CUT0、SIN1)更好。CUT0 和 SIN1 站点的定位精度稍差,SIN1 站点 GRC-2 模型下天向的定位精度较差,达到了 7cm,这种情况下,GRC-3 模型下天向的定位精度有所提升。

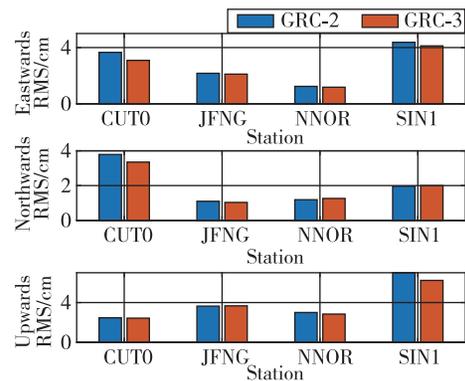


图 2 两种 PPP 模型 4 个测站单天动态定位平均 RMS
Fig. 2 Average RMS results for 4 stations of two PPP models in daily dynamic solutions

表 4 统计了两种 PPP 模型下 4 个测站连续 4d 单天伪动态解的平均值。从表 4 的统计结果来看,同静态结果类似,相较于多系统双频非差非组合 PPP 模型,多系统混频非差非组合 PPP 模型的定位精度有所提高,从 4 个测站 RMS 平均值综合来看,在东向上提高了 7.3%,北向上相当,天向上提高了 5.7%。

表 4 两种模型 4 个测站单天动态定位 RMS 统计表

Tab. 4 RMS results for 4 stations of two PPP models in daily dynamic solutions cm

测站	GRC-2			GRC-3		
	E	N	U	E	N	U
CUT0	3.66	3.79	2.47	3.09	3.36	2.43
JFNG	2.11	1.097	3.64	2.11	1.03	3.67
NNOR	1.24	1.19	3.00	1.18	1.26	2.84
SIN1	4.36	1.97	7.00	4.12	1.99	6.23
平均	2.84	2.01	4.03	2.63	1.91	3.80

表5统计了4个测站的平均收敛时间,以E、N、U这3个方向定位偏差连续20个历元均优于10cm时定义收敛。从表5中可以看出,两种模型下4个测站动态定位的平均收敛时间在23min左右,与静态结果类似,GRC-3模型下的收敛时间相较GRC-2模型有所增长,收敛性能有所下降。

表5 两种模型4个测站动态定位收敛时间统计表
Tab.5 Convergence time results for 4 stations of two PPP models in daily dynamic solutions min

测站	GRC-2	GRC-3
CUTO	16.67	19.5
JFNG	24.67	26.33
NNOR	18.5	18.5
SIN1	28.5	28.5
平均	22.08	23.20

3 结论

本文基于测站的观测数据,主要从定位精度和收敛性方面,研究分析了多系统混频非差非组合模型PPP的静态及动态定位性能。

同多系统双频非差非组合PPP相比,多系统混频非差非组合PPP的定位精度有所提高,静态解RMS在东向提高了9.6%,北向相当,天向提高了11%;动态解RMS在东向提高了7.3%,北向相当,天向提高了5.7%,但多系统混频PPP的收敛时间并没有提升。

在多系统双频PPP因某一频率异常导致定位精度较差时,多系统混频PPP仍能保证较高的定位精度,由于本文实验选用的观测数据都从测站下载,质量较好。有理由可以相信,在使用质量稍差的观测数据,如动态车载实验的观测数据时,多系统混频PPP模型相较多系统双频PPP模型可以得到更好的提升。

综上,多系统混频PPP的定位性能有所提升,但收敛时间和解算速度还有待进一步研究。

参考文献

[1] 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.
Li Bofeng, Ge Haibo, Shen Yunzhong. Comparison of ionosphere-free, Uofc and uncombined PPP obser-

vation models[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015,44(7):734-740(in Chinese).

- [2] Numajima T, Kihara M, Kubo Y, et al. INS/DGPS/VMS integration for in-motion alignment[C]//Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2002: 556-564.
- [3] 王泽民,柳景斌. Galileo卫星定位系统相位组合观测值的模型研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2003, 28(6):723-727.
Wang Zemin, Liu Jingbin. Study on the model of phase combination observation value of Galileo satellite positioning system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(6):723-727(in Chinese).
- [4] 张小红,柳根,郭斐,等. 北斗三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.
Zhang Xiaohong, Liu Gen, Guo Fei, et al. Comparison and positioning performance analysis of BeiDou three frequency precise point positioning model[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2018, 43(12):2124-2130(in Chinese).
- [5] Elsobeiey M. Precise point positioning using triple-frequency GPS measurements[J]. Journal of Navigation, 2014,68(3):480-492.
- [6] Li B, Feng Y, Gao W, et al. Real-time kinematic positioning over long baselines using triple-frequency BeiDou signals[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 51(4):3254-3269.
- [7] Luo X, Liu Z, Lou Y, et al. A study of multi-GNSS ionospheric scintillation and cycle-slip over Hong Kong region for moderate solar flux conditions[J]. Advances in Space Research, 2017, 60(5):1039-1053.
- [8] Cao X, Li J, Zhang S, et al. Uncombined precise point positioning with triple-frequency GNSS signals[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(9):2745-2756.
- [9] 周锋. 多系统GNSS非差非组合精密单点定位相关理论和方法研究[D]. 上海:华东师范大学,2018.
Zhou Feng. Theory and methodology of multi-GNSS undifferenced and uncombined precise point positioning[D]. East China Normal University, 2018 (in Chinese).
- [10] Zhou F, Dong D, Li W, et al. GAMP: an open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2):33.

(编辑:李瑾)