

一种改进的精密单点定位模型

赵兴旺¹ 刘 超¹ 邓 健² 余学祥¹

1 安徽理工大学测绘学院,安徽 淮南,232001
2 厦门理工学院计算机与信息工程学院,福建 厦门,361024

摘 要:针对现有精密单点定位(PPP)模型收敛慢的问题,提出了一种改进的 PPP 定位模型。采用码相位半组合观测值以及几何无关组合观测值分别降低码伪距观测噪声和轨道误差的影响,该模型不仅具有较小的观测噪声,还降低了轨道误差影响。实验结果表明,引入新的组合观测值后明显改善了 PPP 的解算性能。当观测时长为 0.5 h 时,采用所提模型的收敛率较标准非组合(un-combined model,UC)模型、UofC(university of calgary model)模型和标准非差无电离层组合(un-difference ionosphere free combined model,UD)模型分别提高了 37.6%、4.2%和 235.9%,且收敛速度有明显提高;在定位精度方面,新模型与 UofC 模型较为一致,但明显优于 UC 和 UD 模型;采用新模型估计的天顶对流层延迟与 UC 模型较为一致,且高于 UofC 和 UD 模型。

关键词:PPP 模型;收敛性能;定位精度;天顶对流层延迟
中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

精密单点定位(precise point positioning, PPP)技术具有独立高精度定位、不受基线长度限制等特点,在精密定位、卫星几何定轨、地震波探测等多个领域得到较为广泛的应用^[1-4]。有关 PPP 技术的主要研究集中在提高定位精度和收敛速度两方面。为了获得较好的定位性能,先后出现了多种函数模型,如标准非差无电离层组合模型(un-difference ionosphere free combined model,UD)^[5]、UofC 模型(university of calgary model)^[6]以及历元间差分模型^[7]等。这些模型通过观测值线性组合可消弱电离层误差的影响,但观测值组合后观测噪声和多路径效应被放大了,因此不利于 PPP 模糊度的快速收敛。张宝成^[8]采用参数估计形式将电离层延迟模拟成随机游走,建立了非差非组合模型(un-combined model,UC),既可消除电离层延迟的影响,又可快速实现精密定位。对于模型差异,文献^[9-10]给出了详细分析。

为了提高 PPP 的收敛速度,诸多学者做了大量研究工作。一方面,通过外部增强信息来加速模糊度解算,进而提高 PPP 收敛速度,如采用大

气延迟信息消除大气误差的影响^[11-12],采用相位偏差恢复整周模糊度特性^[13-14]等,取得了较好的定位效果^[15-18]。在静态模式下,单 GPS PPP 浮点解定位精度收敛到 10 cm 以内平均需要 30 min^[19],经相位偏差改正后,首次实现模糊度固定的初始化时间平均为 21.6 min,收敛速度得到了较好的改善^[20]。另一方面,多系统联合定位可提供更多的卫星资源、改善了卫星几何结构,亦有助于提高 PPP 定位的收敛性能^[21]。当采用 GLONSS 与 GPS 组合时,在静态模式下 PPP 浮点解收敛到 10 cm 以内定位精度时平均需要 12.4 min^[20]。虽然通过外部增强信息或多系统联合定位的方式可以改善 PPP 的收敛性能,但 PPP 位置解算仍需要基于上述 3 种基本模型,因此在优化 PPP 模型、降低观测噪声等角度仍需要进一步研究,以较好地提高 PPP 的解算性能。

本文以潜在误差影响、PPP 模型特点为切入点,提出了一种新的 PPP 模型。该模型不仅具有较小的观测噪声和轨道误差的影响,而且能够对大气参数进行估计。为了评价新模型的解算性能,采用全球分布的 144 个 IGS(International

GNSS Service)参考站实测数据进行 PPP 解算,并与目前常用的 UC、UofC、UD 等模型进行比较,从 PPP 实现 cm 级定位的收敛率、收敛时间以及位置精度等方面进行分析。

1 PPP 数学模型

在 GPS 应用中,常采用的原始观测量为伪距和载波相位观测值:

$$\begin{cases} P_i^s = \rho + c \cdot \delta t_r - c \cdot \delta t^s + M_d^s \cdot \delta_{zhd} + \\ M_w^s \cdot \delta_{zwd} + I_i^s + c(d_{r,i} - d_i^s) + \epsilon_p \\ \Phi_i^s = \rho + c \cdot \delta t_r - c \cdot \delta t^s + M_d^s \cdot \delta_{zhd} + \\ M_w^s \cdot \delta_{zwd} - I_i^s + \lambda_i(N_i^s + \varphi_{r,i} + \varphi_i^s) + \epsilon_\phi \end{cases} \quad (1)$$

式中, i 表示信号频率; s 表示卫星; P_i^s 、 Φ_i^s 分别表示伪距和载波相位观测值; ρ 表示卫星与接收机之间的几何距离; δt_r 表示接收机钟差; δt^s 表示卫星钟差; M_d^s 、 M_w^s 分别表示对流层干、湿延迟映射函数; δ_{zhd} 、 δ_{zwd} 分别表示对流层天顶方向干延迟和湿延迟, I_i^s 为电离层延迟; $d_{r,i}$ 、 d_i^s 分别为接收机和卫星的码偏差; N_i^s 表示载波相位整周模糊度; λ_i 表示波长, $\varphi_{r,i}$ 、 φ_i^s 分别为接收机和卫星的相位偏差; ϵ_p 、 ϵ_ϕ 分别表示伪距和载波相位观测值中观测噪声和未模型化的误差; c 表示光速。

据文献[13,22],接收机码和相位偏差在短时间内变化较为缓慢,故可看作常数。不同频率上的接收机码和相位偏差可表达为:

$$d_{r,i} = d_r^{\text{avg}} + \delta d_{r,i}, \varphi_{r,i} = \varphi_r^{\text{avg}} + \delta \varphi_{r,i} \quad (2)$$

式中, d_r^{avg} 和 φ_r^{avg} 分别为平均码偏差和相位偏差; $\delta d_{r,i}$ 和 $\delta \varphi_{r,i}$ 分别为与频率相关的码偏差和相位偏差,称为频间偏差(inter-frequency biases, IF-Bs)。

由于接收机平均码偏差与频率无关,故可将其与接收机钟差合并;在不固定模糊度的情况下,接收机和卫星相位偏差则被载波相位整周模糊度吸收。因此,观测方程(1)可简化为:

$$\begin{cases} P_i^s = \rho + c \cdot (\delta \bar{t}_r - \delta t^s) + M_d^s \cdot \delta_{zpd} + \\ M_w^s \cdot \delta_{zpw} + I_i^s + \delta d_{r,i} - d_i^s + \epsilon_p \\ \Phi_i^s = \rho + c \cdot (\delta \bar{t}_r - \delta t^s) + M_d^s \cdot \delta_{zpd} + \\ M_w^s \cdot \delta_{zpw} - I_i^s + \lambda_i \bar{N}_i^s + \epsilon_\phi \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\delta \bar{t}_r$ 、 \bar{N}_i^s 分别表示重新定义后的接收机钟差和模糊度参数,表达式分别为:

$$\begin{cases} \delta \bar{t}_r^i = \delta t_r + d_r^{\text{avg}} \\ \bar{N}_i^s = N_i^s + \varphi_{r,i} + \varphi_i^s - c \cdot d_r^{\text{avg}} / \lambda_i \end{cases}$$

由于 IGS 分析中心提供的精密钟差为真实卫星钟差和卫星端无电离层组合码延迟之和,对于无电离层组合模型可以直接消除^[9]。但在非组合 PPP 数据处理时,需要将式(3)中频间码偏差 $\delta d_{r,i}$ 和卫星码偏差 d_i^s 作为参数进行估计,但这样将会增加未知数个数,降低模型强度,因此本文依据文献[23]处理码偏差的思想,通过对伪距观测值降权的方式削弱码偏差的影响。将伪距观测值和载波相位观测值构建码相位半组合观测值 $L_{P_1\Phi_1}^s$ 和 $L_{P_2\Phi_2}^s$ 以降低伪距观测值中观测噪声的影响;并且,为了尽可能降低伪距观测值噪声的影响,可任选 $L_{P_1\Phi_1}^s$ 或 $L_{P_2\Phi_2}^s$ 半组合观测值构建新的 PPP 模型,本文选取 $L_{P_2\Phi_2}^s$ 观测值。另外,采用载波相位观测值 Φ_1^s 和 Φ_2^s 构建几何无关组合观测值 Φ_{GF}^s ,以降低轨道误差的影响,同时联合原始载波相位观测值 Φ_1^s 和 Φ_2^s ,并考虑电离层延迟对不同频率的影响 $I_2^s = f_1^2/f_2^2 \cdot I_1^s$,共同建立新的 PPP 函数模型为:

$$\begin{cases} \Phi_1^s = \rho + c \cdot \delta \bar{t}_r + M_d^s \cdot \delta_{zpd} + M_w^s \cdot \delta_{zpw} - \\ I_1^s + \lambda_1 \cdot \bar{N}_1^s + \epsilon_{\Phi_1^s} \\ \Phi_2^s = \rho + c \cdot \delta \bar{t}_r + M_d^s \cdot \delta_{zpd} + M_w^s \cdot \delta_{zpw} - \\ f_1^2/f_2^2 \cdot I_1^s + \lambda_2 \cdot \bar{N}_2^s + \epsilon_{\Phi_2^s} \\ L_{P_2\Phi_2}^s = (P_2^s + \Phi_2^s)/2 = \rho + c \cdot \delta \bar{t}_r + M_d^s \cdot \delta_{zpd} + \\ M_w^s \cdot \delta_{zpw} + \lambda_2 \cdot \bar{N}_2^s/2 + \epsilon_{L_{P_2\Phi_2}^s} \\ \Phi_{\text{GF}}^s = \Phi_1^s - \Phi_2^s = (f_1^2/f_2^2 - 1) \cdot I_1^s + \\ \lambda_1 \cdot \bar{N}_1^s - \lambda_2 \cdot \bar{N}_2^s + \epsilon_{\Phi_{\text{GF}}^s} \end{cases} \quad (4)$$

式中, ϵ 表示观测值中观测噪声和未模型化的误差。

由于该模型采用了部分非组合观测值,且能实现电离层延迟的估计,故将该模型称为改进的非组合模型(modified un-combined model, MUC)。相对于 UC、UofC 和 UD 模型,MUC 模型不仅具有较小的观测噪声,而且采用几何无关组合观测值 Φ_{GF}^s ,可适当降低轨道误差影响,还可以利用大气延迟平稳变化作为约束提高滤波收敛速度;同时,大气延迟的估计又可为大气误差建模的研究提供技术手段。因此,MUC 模型较其他模型而言具有更好的优越性。

对式(4)进行线性化,得矩阵形式为:

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X}(k) + \boldsymbol{\varepsilon}_y, \boldsymbol{\varepsilon}_y \sim N(0, \boldsymbol{\Omega}_y) \quad (5)$$

式中, $\mathbf{y}(k)$ 为观测向量; $\mathbf{X}(k)$ 为待估参数向量; \mathbf{A} 为设计矩阵; $\boldsymbol{\varepsilon}_y$ 为测量噪声向量; $\boldsymbol{\Omega}_y$ 为测量噪声

向量 $\boldsymbol{\varepsilon}_y$ 的协方差阵; $\mathbf{y}(k)$ 、 $\mathbf{X}(k)$ 和 \mathbf{A} 分别为:

$$\left\{\begin{aligned}\mathbf{y}(k) &= [\Phi_1^1 \quad \cdots \quad \Phi_1^j \quad \Phi_2^1 \quad \cdots \quad \Phi_2^j \\ &\quad L_{P_2\Phi_2}^1 \quad \cdots \quad L_{P_2\Phi_2}^j \quad \Phi_{GF}^1 \quad \cdots \quad \Phi_{GF}^j]^T \\ \mathbf{X}(k) &= [x \quad y \quad z \quad c \cdot \delta t_r \quad \delta_{zpw} \quad I_1^1 \quad \cdots \\ &\quad I_1^j \quad \bar{N}_1^1 \quad \cdots \quad \bar{N}_1^j \quad \bar{N}_2^1 \quad \cdots \quad \bar{N}_2^j]^T \\ \mathbf{A} &= \left[\begin{bmatrix} \mathbf{e}_3 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \otimes \mathbf{B} \quad \mathbf{C} \otimes \mathbf{I}_j \quad \mathbf{D} \otimes \mathbf{I}_j \right]\end{aligned}\right. \tag{6}$$

式中, x 、 y 、 z 为接收机三维位置; \otimes 表示克罗内克积; \mathbf{e}_3 为各元素均为 1 的 3 维列向量; \mathbf{I}_j 为 j 维单位矩阵。设 l 、 m 、 n 分别表示接收机到卫星的方向余弦,则 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 和 \mathbf{D} 子矩阵的含义分别为:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} l^1 & m^1 & n^1 & M_w^1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ l^j & m^j & n^j & M_w^j & 1 \end{bmatrix},$$
$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} -1 \\ -f_1^2/f_2^2 \\ 0 \\ f_1^2/f_2^2 - 1 \end{bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \\ 0 & \lambda_2/2 \\ \lambda_1 & -\lambda_2 \end{bmatrix}$$

2 MUC 模型性能分析

为了分析 MUC 模型的有效性和优越性,采用相同的误差改正策略,对相同观测条件下的实验数据进行静态 PPP 解算,分别与常用的 PP-PUD 模型、UC 模型和 UofC 等 3 种模型对比。实验数据选取 2013 年 6 月 17 日 144 个 IGS 参考站的单天观测数据,采样间隔为 30 s。IGS 参考站分布如图 1 所示。PPP 处理中,采用 15 min 间隔的精密星历和 5 min 间隔的钟差产品,卫星截至高度角设置为 5°。为便于评价本文 MUC 模型的有效性和准确性,采用 IGS 分析中心发布的参考站坐标作为坐标参考值,分别从收敛率、收敛时间,以及参数估计精度等方面进行对比分析。

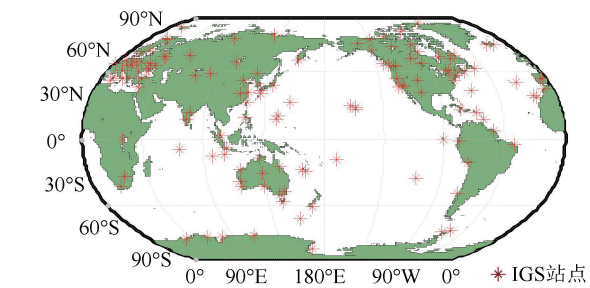


图 1 IGS 站点分布
Fig.1 Distribution of IGS Stations

2.1 收敛率和收敛速度分析

收敛率与收敛速度是衡量 PPP 模型有效性指标之一。本文对 144 个 IGS 站 24 h 的观测数据以每 1 h、0.5 h 和 0.25 h 观测时长进行截取,分别得 3 456、6 912 和 13 824 组数据,分别采用 4 种模型进行 PPP 解算。当水平位置偏差从某一历元开始均小于 10 cm 时,认为滤波收敛,即实现 cm 级定位;而从第一个历元到该历元的时间间隔为收敛时间。表 1 给出了 3 种不同观测时长下,4 种模型实现 cm 级定位的收敛率和平均收敛时间。

由表 1 的统计结果可知,随着观测时长的减少,PPP 收敛率逐渐降低,但 MUC 模型表现出较好的收敛性能。当观测时长为 1 h 时,MUC 模型与 UofC 模型均具有较高的收敛率,分别为 86.5%和 86.6%;而 MUC 模型较 UC 和 UD 模型收敛率分别提高了 6.7%和 43.9%。当观测时长缩短为 0.5 h 时,MUC 模型具有最高的滤波收敛率,较 UC、UofC 和 UD 模型分别提高了 37.6%、4.2%和 235.9%。当观测时长减少到 0.25 h 时,MUC 模型的收敛性能更为明显,收敛率为 27.4%,较 UC、UofC 和 UD 模型的收敛率有显著提高。因此,当观测时长较短时,MUC 模型更有利于 PPP 实现 cm 级定位。

表 1 不同观测时长下 4 种 PPP 模型的滤波收敛率信息

Tab.1 Convergence Rate of 4 PPP Models in Different Observation Duration/h			
模型	1	0.5	0.25
MUC 模型	86.5	70.2	27.4
UC 模型	81.1	51.0	7.8
UofC 模型	86.6	67.4	19.5
UD 模型	60.1	20.9	1.3

在静态 PPP 浮点解中,位置解收敛至 cm 级一般需要 20~30 min^[19-20]。因此,本文采用观测时长为 0.5 h 的数据对收敛速度进行分析。为了客观地评价 MUC 模型的收敛速度,选取 MUC 模型与 UC、UofC 以及 UD 的共同收敛部分,得到 3 007、4 090 和 1 180 组数据。图 2 为 0.5 h 观测时长下共同收敛部分的收敛时间统计信息。收敛速度通常受到观测噪声、轨道误差等方面的影响。结合模型特点可知,MUC 模型具有较小的观测噪声和轨道误差,MUC 模型和 UC 模型平均收敛时间分别为 12.1 min 和 15.7 min,较 UC 模型有明显提高(图 2(a))。尽管 UofC 模型同样具有较小的观测噪声,但 UofC 模型中采用

了多个伪距观测值,且受观测噪声的影响更为严重,阻碍了 PPP 快速收敛。由图 2(b)可知,在 4 090 组公共收敛数据序列中,15 min 内收敛到 cm 级的比例分别为 73.2%和 65.6%,较 UofC 模型提高了 10.4%,收敛性能整体上优于 UofC 模型。而对于 UD 模型,通过采用标准伪距无电离层组合消除电离层延迟的影响,从而将观测噪声

等误差放大了近 3 倍,导致了较慢的收敛速度。在 1 080 组数据中,平均收敛时间为 18.4 min,而采用 MUC 模型后,收敛速度得到了明显提高,平均收敛时间仅为 11.9 min(图 2(c))。因此,综合考虑 PPP 收敛率和收敛时间, MUC 模型具有更优越的收敛性能,有益于短时间内快速实现 PPP 的 cm 级定位。

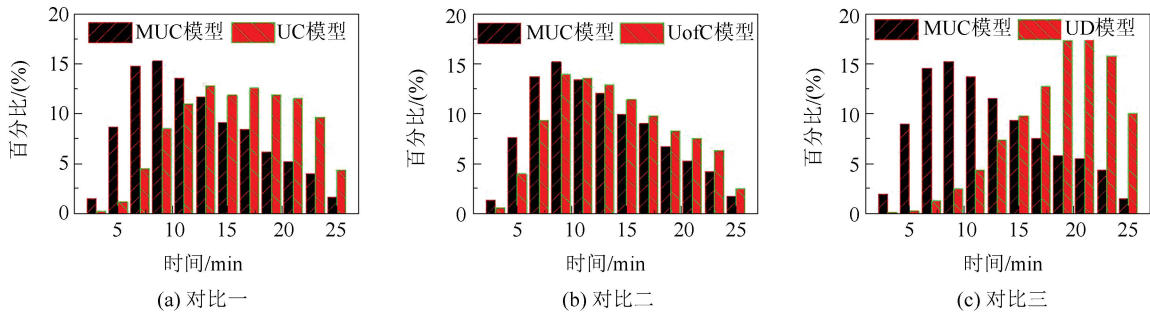


图 2 收敛时间统计结果
Fig.2 Statistical Results of Convergence Time

2.2 定位精度分析

为了分析 MUC 模型在短时间内的定位精度,采用 MUC 模型与 UC 模型、MUC 模型与 UofC 以及 MUC 模型与 UD 模型共同收敛的 3 007、4 090 和 1 180 组数据(观测时长为 0.5 h),分别与 UC 模型、UofC 模型和 UD 模型进行比较。图 3 为 0.5 h 观测时长下公共收敛部分 N(北)、E(东)和 U(天顶)方向偏差统计图,反映了不同比较情景中 N、E 和 U 方向的偏差分布情况。

图 3(a)为基于 MUC 模型和 UC 模型共同收敛的 3 007 组数据得到的 N、E 和 U 方向的偏差分布情况。MUC 模型和 UC 模型均将电离层延迟模拟为随机游走,有效控制了电离层延迟对定位的影响。然而,UC 模型采用了观测噪声较大的原始伪距观测值,对定位精度产生了一定的影响,3 个方向误差均值为(-0.47,-0.34,-0.66)cm,且偏差较为离散,标准差为(2.69,4.05,11.43)cm。MUC 模型采用了码相位观测值和相位几何无关组合观测值,更有利于提高定位精度,3 个方向误差均值为(-0.47,-0.10,-0.61)cm,标准差为(2.40,3.50,10.62)cm。另外,根据 3 007 组数据的统计结果可知,采用 MUC 模型后,N、E 和 U 方向偏差位于-5,5 cm 之间的比例分别为 94.7%、83.5%和 31.3%,而 UC 模型分别为 92.5%、75.3%和 33.7%,因此 MUC 模型在水平位置的定位精度优于 UC 模型。

对 MUC 模型和 UofC 模型共同收敛的 4 090

组数据进行定位结果统计,结果如图 3(b)所示。可以看出,两种模型均具有较高的定位精度,其原因主要为 MUC 模型和 UofC 模型具有较小的观测噪声影响。从图 3(b)中偏差均值和标准差可知,两种模型精度相当。而对 4 090 组数据进行统计发现,UofC 模型在 N、E、U 方向的偏差分别有 94.5%、79.9%和 34.1%位于(-5,5)cm 之间,MUC 模型在水平方向略优于 UofC 模型,N、E 方向分别为 94.8%、82.4%,U 方向略低,为 31.0%。因此,在水平方向定位精度略优于 UofC 模型。

4 种模型中,UD 模型采用双频伪距观测值,通过建立消电离层组合的方式避免了电离层延迟的影响,但放大了观测噪声,导致在短时间内的定位精度较差。从图 3(c)可知,MUC 模型的定位精度明显优于 UD 模型,3 个方向误差均值为(-0.6,-0.0,-0.5)cm,标准差为(2.4,3.5,10.6)cm,且分别有 95.0%、83.2%和 30.9%的偏差位于(-5,5)cm 之间。基于以上分析,在定位精度方面,MUC 模型略优于 UofC 模型,且明显高于 UC 模型和 UD 模型,因此,MUC 模型更利于短时间内获取高精度位置解。

2.3 对流层 ZTD 精度分析

为了分析 MUC 模型在天顶对流层延迟(zenith tropospheric delay,ZTD)估计方面的准确性,分别采用 4 种模型对 144 个 IGS 站 24 h 数据单天解算,并以 IGS 站提供的 ZTD 为参考值进行偏差统计。图 4 给出了不同偏差区间的统计

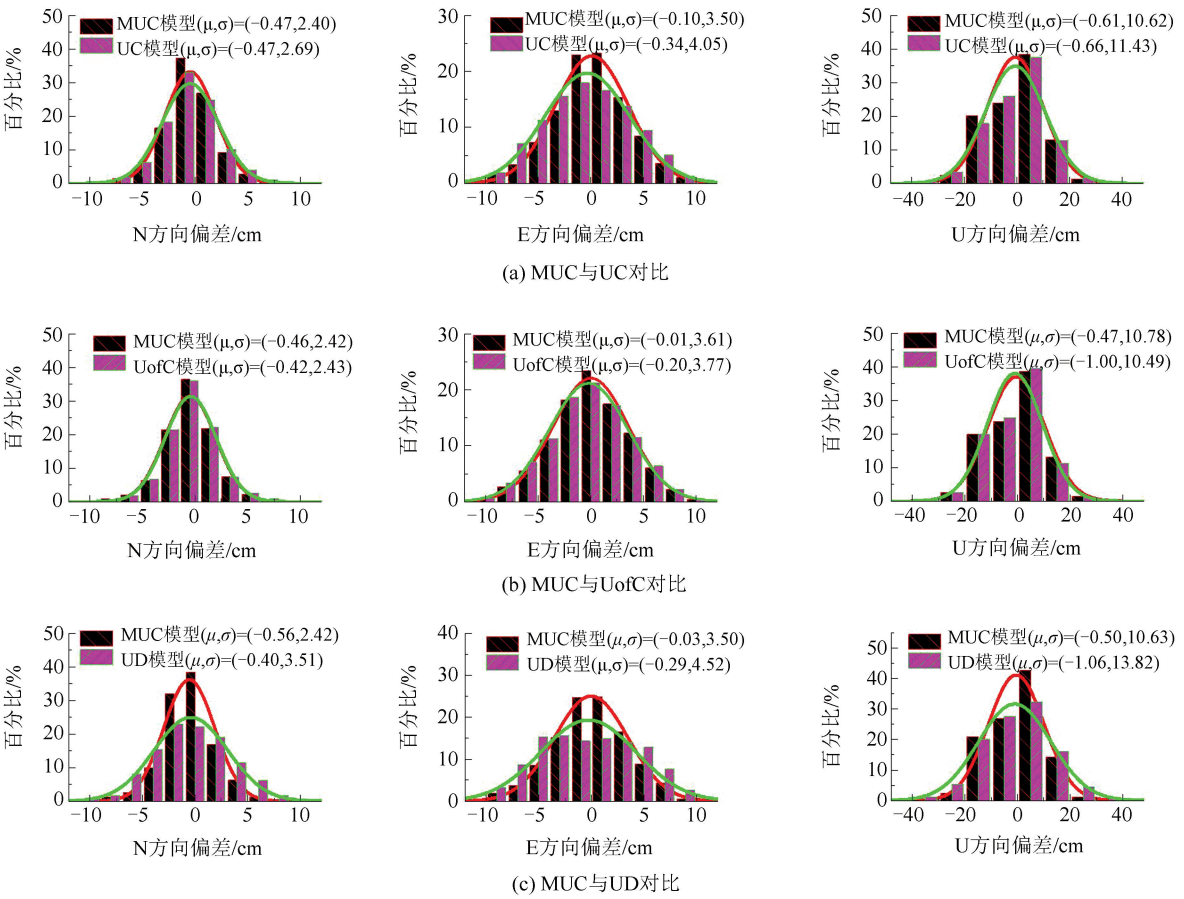


图 3 N、E、U 方向偏差统计结果

Fig.3 Statistical Results of the Biases in the N, E and U Components

结果。从图 4 中的统计结果可知，MUC 模型、UC、UofC 和 UD 模型分别有 63.2%、64.6%、60.4%和 54.2%的站点 ZTD 偏差位于(0,5)mm 以内，分别有 87.5%、86.1%、87.5%和 86.1%的站点 ZTD 偏差位于(0,10)mm 以内。由于 ZTD 计算采用滤波收敛后的 ZTD 估值平均得到，故 MUC 模型与其他 3 种模型对 ZTD 估计的精度基本一致，具有较高精度，满足地基 GPS 反演大气可降水量的要求。

3 结 语

位置收敛速度较慢是限制 PPP 技术广泛应用的主要原因。本文以观测噪声、轨道误差以及 PPP 模型特点为切入点，提出了一种新的精密单点定位模型。从大气误差约束的角度，新模型将观测值中对大气误差平稳变化特性作为约束条件，较 UofC 和 UD 模型更能有效改善滤波收敛的收敛性能。尽管 UC 模型也可估计对流层和电离层延迟，但其受观测噪声等影响较大。因此，本文所提新模型整体上具有最优性。通过全球分布的 IGS 参考站实测数据对新模型的解算性能进行分析，结果表明：在实现 cm 级定位方面，新模型不仅具有较高的收敛率，而且收敛速度最快，特别是观测时长较短时。如 0.5 h 的观测时长数据，MUC 模型较 UC、UofC 和 UD 模型收敛率提高了 37.6%、4.2%和 235.9%，且收敛速度有明显提高；在位置和天顶对流层延迟估计精度方面，均取得了较好的效果。因此，新模型在观测时长较短时表现出了更好的优越性，有助于短时间内 cm

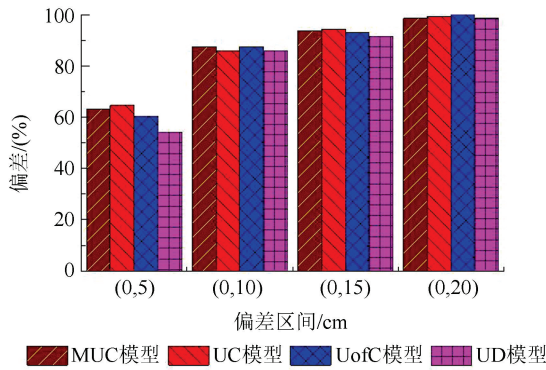


图 4 ZTD 偏差统计结果

Fig.4 Statistical Results of ZTD Biases

级定位的快速实现。

参 考 文 献

- [1] Zhang Xiaohong, Li Pan, Zuo Xiang. Kinematic Precise Orbit Determination Based on Ambiguity-Fixed PPP [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(9): 1 009-1 013 (张小红, 李盼, 左翔. 固定模糊度的精密单点定位几何定轨方法及结果分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(9): 1 009-1 013)
- [2] Li Li, Kuang Cuilin, Zhu Jianjun, et al. Rainstorm Nowcasting Based on GPS Real-Time Precise Point Positioning Technology [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(4): 1 129-1 136 (李黎, 匡翠林, 朱建军, 等. 基于实时精密单点定位技术的暴雨短临预报[J]. 地球物理学报, 2012, 55(4): 1 129-1 136)
- [3] Ahmed F, Vlacavovic P, Teferle F N, et al. Comparative Analysis of Real-Time Precise Point Positioning Zenith Total Delay Estimates [J]. *GPS Solutions*, 2014, 1-13
- [4] Xu P, Shi C, Fang R, et al. High-rate Precise Point Positioning (PPP) to Measure Seismic Wave Motions: An Experimental Comparison of GPS PPP with Inertial Measurement Units [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(4): 361-372
- [5] Kouba J, Heroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products [J]. *GPS Solutions*, 2001, 5(2): 12-28
- [6] Gao Y, Shen X. Improving Ambiguity Convergence in Carrier Phase-based Precise Point Positioning [C]. ION National Technical Meeting, Salt Lake City, 2001
- [7] Zheng Zuoya, Lu Xiushan. GPS Point Positioning Based on Weighted Between Pseudo-range and Time-differenced Carrier-phase Model [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2007, 32(5): 47-49 (郑作亚, 卢秀山. 基于加权的伪距和历元间相位差分模型 GPS 单点定位方法[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 47-49)
- [8] Zhang Baocheng, Ou Jikun, Yuan Yunbin, et al. Precise Point Positioning Algorithm Based on Original Dual-frequency GPS Code and Carrier-phase Observations and its Application [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2010, 39(5): 478-483 (张宝成, 欧吉坤, 袁运斌, 等. 基于 GPS 双频原始观测值的精密单点定位算法及应用[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 478-483)
- [9] Zhang Xiaohong, Zuo Xiang, Li Pan. Mathematical Model and Performance Comparison Between Ionosphere-Free Combined and Uncombined Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(5): 561-565 (张小红, 左翔, 李盼. 非组合与组合 PPP 模型比较及定位性能分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(5): 561-565)
- [10] Zhao Xingwang, Wang Shengli, Deng Jian, et al. Performance Analysis of Four Function Models for Precise Point Positioning [J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2014, 27(6): 751-756 (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)
- [11] Shi J B, Xu C Q, Guo J M, et al. Local Troposphere Augmentation for Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Earth, Planets and Space*, 2014, 66(1): 1-13
- [12] Li Li, Long Sichun, Li Haojun, et al. Precise Point Positioning Based on Reference Stations Augmentation Information [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(5): 481-485 (李黎, 龙四春, 李浩军, 等. 利用参考站增强信息进行精密单点定位[J]. 测绘学报, 2014, 43(5): 481-485)
- [13] 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
- [14] Laurichesse D, Mercier F, Berthias J P, 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
- [15] Zhang Baocheng, Teunissen P J, Odijk D, et al. Rapid Integer Ambiguity-fixing in Precise Point Positioning [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(7): 2 203-2 211 (张宝成, Teunissen P J, Odijk D, 等. 精密单点定位整周模糊度快速固定[J]. 地球物理学报, 2012, 55(7): 2 203-2 211)
- [16] Geng J H, Teferle F, Shi C, et al. Ambiguity Resolution in Precise Point Positioning with Hourly Data [J]. *GPS Solutions*, 2009, 13(4): 263-270
- [17] Collins P, Bisnath S, Lahaye F, et al. Undifferenced GPS Ambiguity Resolution Using the Decoupled Clock Model and Ambiguity Datum Fixing [J]. *Navigation*, 2010, 57(2): 123-135
- [18] Li X, Ge M, Zhang H, et al. A Method for Improving Uncalibrated Phase Delay Estimation and Ambiguity-fixing in Real-Time Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(5): 405-416
- [19] Bisnath S, Gao Y. Current State of Precise Point

Positioning and Future Prospects and Limitations [M]//Observing our Changing Earth. Berlin; Springer Berlin Heidelberg, 2009

[20] Li P, Zhang X H. Integrating GPS and GLONASS to Accelerate Convergence and Initialization Times of Precise Point Positioning [J]. *GPS Solutions*, 2014(18): 461-471

[21] Moreno B, Rodriguez-Caderot G, De Lacy C. Multi-frequency Algorithms for Precise Point Positioning: MAP3 [J]. *GPS Solutions*, 2014(18):355-364

[22] Teunissen P J G, Kleusberg A. GPS Observation Equations and Positioning Concepts [M]// Lecture Notes in Earth Sciences; GPS for Geodesy,1998

[23] Defraigne P, Baire Q. Combining GPS and GLONASS for Time and Frequency Transfer [J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(2), 265-275

A Modified Model for GPS Precise Point Positioning

ZHAO Xingwang¹ LIU Chao¹ DENG Jian² YU Xuexiang¹

1 School of Geodesy and Geomatics, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

2 School of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China

Abstract: According to the problem of slow convergence using existing PPP models, a modified PPP model was proposed. With this new model, a code-phase ionospheric-free combination is used to lower the code observation noise level, and a code-phase geometry-free combination is used to mitigate orbit errors. The new PPP model composed by the new combinations not only has a lower measurement noise, but also can reduce the impact of orbit error. Results show that the performance of PPP solution is improved by introducing the new combinations. For the 0.5 h duration observation data sets, the convergence percentage by using MUC model is increased by 37.6%, 4.2% and 235.9% compared with the Un-Combined (UC) model, UofC model and Un-Difference ionosphere-free combined (UD) model, respectively. Moreover, the positioning accuracies of the modified PPP model agree with those of the UofC model, which are better than those of the UC and UD models. The accuracy of zenith tropospheric delay agrees with those of the UC model, and these are better than those of the UofC and UD models.

Key words: precise point positioning model; convergence performance; positioning accuracy; zenith tropospheric delay

First author: ZHAO Xingwang, PhD, associate professor, specializes in the theories and methods of GNSS precise navigation and positioning .E-mail: xwzhao2008@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41704008,41474026,41404004; the Excellent Talents in University of Anhui Province of China, No. GXYQ2017008; the Postdoctoral Science Foundation of Anhui Province of China, No. 2015B044; the Anhui University of Science and Technology Foundation, No. QN201512; the Fujian Natural Science Foundation of China, No. 2015J01176.