引文格式：王剑,王鹤,侯育红. 结合钟差解耦的GNSS精密单点定位[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 15-19. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2025.02.004

结合钟差解耦的GNSS精密单点定位

王　剑[1]，王　鹤[1]，侯育红[2]
（1. 浙江省工程物探勘察设计院有限公司，浙江 杭州 310005；2. 广州市城市规划勘测设计研究院有限公司，广东 广州 510060）

摘　要：针对全球导航卫星系统（GNSS，global navigation satellite system）的消电离层模型组合噪声大以及动态场景少的问题，提出了基于钟差解耦的精密单点定位模型。在GNSS定位系统的用户端，设置固定卫星模糊度为随机整数，选择接收机钟差稳定的测站，将接收机的三类钟差设置为零，由此设定模糊度目标，实现GNSS精密单点定位系统的钟差解耦。对完成钟差解耦处理的GNSS定位信息，利用卡尔曼滤波算法进行滤波，通过预测和更新过程实现位置的估计。采用重参化方法对GNSS精密单点定位系统参数进行解耦，构建精密单点定位模型。实验结果表明，该模型可以实现GNSS相位钟和伪距钟的解耦，定位偏差在不同方向上均低于20 mm，具有很高的定位精度。

关键词：钟差解耦；GNSS；精密单点定位；卡尔曼滤波
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）02-0015-05

GNSS Precise Point Positioning Based on Clock Difference Decoupling

WANG Jian[1], WANG He[1], HOU Yuhong[2]
(1. Zhejiang Engineering Geophysical Survey and Design Institute Co., Ltd., Hangzhou 310005, China;
2.Guangzhou Urban Planning & Surveying & Designing Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract: Aiming at the problems of high combined noise and few dynamic scenes in the ionospheric model of global navigation satellite system (GNSS), we proposed a precise point positioning model based on clock offset decoupling. At the user end of GNSS positioning system, we set the fixed satellite ambiguity as a random integer, selected the station with stable receiver clock offset, and set the three types of clock offset of receiver to zero, thus setting the ambiguity target to achieve clock offset decoupling of the GNSS precise point positioning system. For the GNSS positioning information that had completed the clock offset decoupling processing, we used the Kalman filter algorithm to filter, and realized the position estimation through the prediction and update process. We used the reparameterization method to decouple the parameters of GNSS precise point positioning system, and constructed the precise point positioning model. The experimental results show that the model can achieve decoupling of GNSS phase clock and pseudo range clock, with positioning errors below 20 mm in different directions, and has high positioning accuracy.

Key words: clock difference decoupling, GNSS, precise point positioning, Kalman filter

精密单点定位功能提升了全球卫星导航系统的应用性能，使其在民用和商业领域的应用更广泛。全球卫星导航系统中，精密单点定位实时应用是当前的研究重点[1]。精密单点定位功能依赖于卫星轨道和钟差，以满足实时定位的需求。然而，超快速产品的钟差预报部分存在较大的等效距离误差，无法满足精密单点定位的需求。卫星原子钟容易受到自身和外界因素的影响，具有较高的变化性，因此需要根据实时观测数据对钟差进行估计。实时钟差是实现精密单点定位的基础，钟差估计的稳定性和精度直接影响到实时精密单点定位模型的定位精度。精密单点定位模型只需一个接收机就能实现高精度定位，已经在各个领域广泛应用。钟差解耦法是常用的精密单点定位方法[2]，它采用与整数相位定位相同的处理策略，通过钟差解耦获得解耦结果，然后利用这些结果得到精密单点定位模型的固定解。基于钟差解耦的精密单点定位模型在用户端和服务端的计算过程非常复杂，该方法充分考虑了卫星导航系统的时变特性，通过逐历元的估计方法获取全球卫星导航系统参数的实际状态，从而有助于进一步研究各类偏差随时间变化的特性。全球卫星导航系统观测量中的多路径效应、硬件延迟和伪距误差是导致钟差的主要原因。通过对相位和伪距进行解耦，钟差解耦模型改善了卫星导航定位系统的误差。目前已有大量学者针对精密单点定位模型进行了研究。例如，孙孝波等[3]提出了双频非组合快速偏差估计模型，该模型针对不同定位系统，在解决无法固

第一作者简介：王剑（1991—），本科，工程师，研究方向为测绘地理信息，E-mail：hohaihuplo@sina.com。

定模糊度的问题时，利用FCB估计模型提高了模糊度的固定率。另外，刘亚等[4]利用组合卫星信号接收机的改正数构建了精密单点定位模型，该方法充分考虑了轨道精度和钟差精度对定位精度的影响，提升了精密单点定位的精度。通过研究基于钟差解耦的GNSS精密单点定位模型，可以实现GNSS精密单点定位，并提高全球卫星导航系统的定位精度。基于钟差解耦的GNSS精密单点定位，旨在提高全球导航卫星系统（GNSS）的定位精度和可靠性。传统的GNSS定位存在钟差误差对精度的负面影响，而本文通过钟差解耦的方法，能够减少这种误差，并且提供更准确的定位结果。本文采用了一种创新的方法来解决钟差误差问题。传统方法中，钟差是直接加入时差项进行计算，而本文将钟差作为一个独立的参数，并与其他定位参数进行解耦处理，从而有效降低钟差误差对定位精度的影响。针对钟差解耦的GNSS定位进行了算法优化，包括改进的滤波算法和优化的数据处理过程。通过充分利用GNSS观测数据，准确估计钟差参数，并结合其他观测量进行优化计算，提高了定位的准确性和稳定性。

1 GNSS精密单点定位模型

1.1 GNSS精密单点定位的钟差解耦模型

GNSS系统的双频消电离层观测方程中，消电离层伪距表达式如下[5]：

$$P^{'}=\alpha P_1+\beta P_2=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_r+dt^s+T+d_r-d^s \tag{1}$$

式中，P_1与P_2为GNSS不同频率的原始伪距；c与ρ分别为光的传播速度以及GNSS各测站的星距；dt^s与dt_r分别为卫星钟差以及接收机钟差；α与β均为频率调节参数；d_r与d^s分别为消电离层接收机偏差以及卫星码偏差；T为斜向对流层延迟。

GNSS的相位观测值表达式如下：

$$L^{'}=\alpha L_1+\beta L_2=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_r+dt^s+T+A+b_r-b^s \tag{2}$$

式中，L_1与L_2分别为不同频率下的相位观测值；A为消电离层后的模糊度；b_r与b^s分别为消电离层接收机偏差以及卫星相位偏差。

设GNSS已经改正其他误差，忽略GNSS的观测噪声，用f_1与f_2表示GNSS的不同运行频率，将频率调节参数α与β转化[6]如下：

$$\begin{cases}\alpha=\dfrac{f_1^2}{f_1^2-f_2^2}\\ \beta=\dfrac{-f_2^2}{f_1^2-f_2^2}\end{cases} \tag{3}$$

由于GNSS的相位偏差和码偏差均存在时变特性[6]，将GNSS的偏差利用时变与非时变部分组合表达式如下：

$$\begin{cases}d_r=\Delta d_r+\delta d_r\\ d^s=\Delta d^s+\delta d^s\\ b_r=\Delta b_r+\delta b_r\\ b^s=\Delta b^s+\delta b^s\end{cases} \tag{4}$$

式中，δ与Δ分别为时变和常数部分。

综合以上公式，构建GNSS的消电离层组合模型如下：

$$\begin{cases}P^{'}=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_{r,I}+dt_I^s+T+\delta d_r-\delta d^s-\delta b_r+\delta b^s\\ L^{'}=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_{r,I}+dt_I^s+T+\bar{A}\end{cases} \tag{5}$$

式中，存在如下表达式为：

$$\begin{cases}dt_{r,I}=\dfrac{dt_r+\Delta d_r+\delta b_r}{\mathrm{c}}\\ dt_I^s=\dfrac{dt^s+\Delta d^s+\delta b^s}{\mathrm{c}}\\ \bar{A}=A+\Delta b_r-\Delta b^s-\Delta d_r+\Delta d^s\end{cases} \tag{6}$$

只有模糊度为严格不变的实数时，公式（5）才可成立。GNSS的实际定位过程中，历元间的模糊度存在变化，因此观测方程的误差项存在差异，定位系统的时变偏差对其他参数形成一定程度扰动。

重组参数后，构建GNSS的伪距观测值与相位观测值表达式如下：

$$\begin{cases}P^{'}=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_{r,P}+dt_P^s+T\\ L^{'}=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_{r,L}+dt_L^s+T+A\end{cases} \tag{7}$$

组合宽巷模糊度与窄巷模糊度表示定位系统的模糊度参数，便于模糊度更好固定。将定位系统的模糊度参数转化[7]如下：

$$A=\alpha\lambda_1N_1+\beta\lambda_2N_2=\lambda_nN_1-\beta\lambda_2N_w \tag{8}$$

式中，λ_1、λ_2与N_1、N_2分别为定位系统的不同频率波长以及模糊度参数；λ_n与N_w分别为窄巷模糊度波长以及宽巷模糊度。

通过以上过程，获取GNSS定位系统的钟差解耦模型如下：

$$\begin{cases}P^{'}=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_{r,p}+dt_P^S+T\\ L^{'}=\rho+\mathrm{c}\,\mathrm{d}t_{r,L}+dt_L^S+T+\lambda_nN_1+\beta\lambda_2N_w\\ A_m=\lambda_wb_{r,w}+b_w^s-\lambda_wN_w\end{cases} \tag{9}$$

对GNSS的不同类型观测值进行钟差解耦，获取的钟差参数与模糊度参数仍为线性相关。系统的用户端，利用初始历元设置固定卫星的模糊度为随机整数，即可有效消除秩亏。系统的服务端，选取接收机

稳定钟差的测站，将接收机的3类钟差均设置为0，作为钟差基础，以此设置模糊度基准，消除模糊度与钟差间的线性相关，完成GNSS定位系统的钟差解耦。

1.2　GNSS定位系统的卡尔曼滤波

对完成钟差解耦处理的GNSS定位系统，进行滤波处理。卡尔曼滤波算法[8-9]的状态模型以及观测模型表达式如下：

$$\begin{cases}\boldsymbol{X}_k=\boldsymbol{F}_{k,k-1}\boldsymbol{X}_{k-1}+\boldsymbol{w}_{k-1}\boldsymbol{w}_{k-1}\sim\boldsymbol{N}\left(0,\boldsymbol{Q}_{k-1}\right)\\ \boldsymbol{L}_k=\boldsymbol{H}_k\boldsymbol{X}_k+\boldsymbol{n}_k\boldsymbol{n}_k\sim N\left(0,\boldsymbol{R}_k\right)\end{cases}\tag{10}$$

式中，$\boldsymbol{X}_k$ 与 $\boldsymbol{k}$ 分别为GNSS定位系统的状态向量以及观测历元时刻；$\boldsymbol{H}_k$ 与 $\boldsymbol{F}_{k,k-1}$ 分别为系数矩阵以及状态转移矩阵；$\boldsymbol{n}_k$ 与 $\boldsymbol{w}_{k-1}$ 分别为观测噪声向量以及动态噪声矩阵[10]；$\boldsymbol{R}_k$ 与 $\boldsymbol{Q}_{k-1}$ 分别为 $\boldsymbol{n}_k$ 与 $\boldsymbol{w}_{k-1}$ 的协方差矩阵；$\boldsymbol{L}_k$ 为观测向量。状态转移矩阵和动态噪声矩阵表达式如下：

$$\boldsymbol{F}_{k,k-1}=\phi_k\boldsymbol{F}_{k-1}\boldsymbol{B}_k\tag{11}$$

$$\boldsymbol{w}_{k-1}=\begin{bmatrix}\sigma_p^{\ 2} & 0\\ 0 & \sigma_v^{\ 2}\end{bmatrix}\tag{12}$$

式中，$\boldsymbol{\phi}_k$ 与 $\boldsymbol{B}_k$ 分别为状态转移矩阵的系数矩阵以及控制信号的系数矩阵；σ_p 与 σ_v 分别为位置和速度的过程噪声方差；利用卡尔曼滤波算法修正GNSS定位系统的对流层延迟分量，修正表达式如下：

$$\boldsymbol{X}_k=\begin{bmatrix}V_x & V_y & V_z\\ a_x & a_y & a_z\\ \delta t_r & I_{(1\times m)}T^{w}_{(1\times m)}N^{1} & N^{m}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\tag{13}$$

卡尔曼滤波算法通过预测过程和更新过程实现GNSS定位系统滤波。采用静态模型和动态加速模型，作为卡尔曼滤波算法的运动模型。静态模型设置GNSS定位系统的接收机为静止状态，系统运行速度为0；动态加速模型设置GNSS定位系统的接收机载体以加速度变化的状态，做变速运动。

1.3　参数估计的GNSS精密单点定位模型

针对完成滤波处理后的GNSS定位系统，构建单点定位模型。GNSS定位系统中，非差伪距[11]与载波的原始观测方程如下：

$$\begin{cases}P_i=\rho+T+\mathrm{c}dt_{\mathrm{r}}-\mathrm{c}dt^{\mathrm{s}}+\gamma_i I_1+d_{i,r}-d_i^{\mathrm{s}}\\ L_i=\rho+T+\mathrm{c}dt_{\mathrm{r}}-\mathrm{c}dt^{\mathrm{s}}-\gamma_i I_1+\lambda_i N_i+b_{i,r}-b_i^{\mathrm{s}}-\delta b_i^{\mathrm{s}}\end{cases}\tag{14}$$

式中，r与s分别为GNSS定位系统的接收机与卫星；L 与 P 分别为GNSS定位系统的载波观测值与伪距观测值；ρ 与 i 分别为站星距和频率；c与 T 分别为光速以及对流层延迟[12]；γ 与 I 分别为相关系数以及电离层延迟；dt^s 与 dt_r 分别为解耦后的卫星钟差以及接收机钟差；λ 与 N 分别为波长及其整周模糊度；b 与 d 分别为相位硬件延迟以及伪距硬件延迟；δ 为频间钟差；δb 为具有时变特性的相位硬件延迟。

GNSS定位系统的待估计参数较多，众多参数为互相耦合状态[13]，无法同时获取全部的参数估计结果。采用重参化方法，对GNSS定位系统参数进行解耦，解耦过程如下：

$$\begin{cases}\mathrm{c}dt_{r12}=\mathrm{c}d_{tr}-\varphi d_{1,r}+\varphi d_{2,r}\\ I'_1=I_1+\alpha d_{1,r}-d_{2,r}+d_1^{s}-\beta\left(\delta b_2^{s}-\delta b_1^{s}\right)\end{cases}\tag{15}$$

式中，dt_{r12} 与 I'_1 分别为重参化处理后的电离层参数以及接收机钟差；φ 为无电离层组合系数。

GNSS精密单点定位模型的伪距观测方程如下：

$$\begin{cases}P_1=\rho+T+\mathrm{c}dt_{r12}-\mathrm{c}dt^{s}_{12}+I'_1+\xi_1\\ P_2=\rho+T+\mathrm{c}dt_{r12}-\mathrm{c}dt^{s}_{12}+\varphi I'_1+\xi_2\\ P_3=\rho+T+\mathrm{c}dt_{r12}-\mathrm{c}dt^{s}_{12}+\gamma_3 I'_1+\xi_3+\\ \left[(\gamma_3-1)\varphi B_{\mathrm{r},12}+B_{\mathrm{r},13}\right]-\left[(\gamma_3-1)\varphi B^{\mathrm{s}}_{12}+B^{\mathrm{s}}_{13}\right]\end{cases}\tag{16}$$

式中，$B_{r,12}$ 与 $B_{r,13}$ 分别为GNSS接收机端的差分码偏差；B^s_{12} 与 B^s_{13} 分别为GNSS卫星端的差分码偏差；ξ_i 为残余硬件偏差[14]，ξ_i 的表达式如下：

$$\begin{cases}\xi_1=2\varphi\delta b^{\mathrm{s}}_2+(\alpha-\beta)\delta b^{\mathrm{s}}_1\\ \xi_2=(\beta-\alpha)\delta b^{\mathrm{s}}_2+2\varphi\delta b^{\mathrm{s}}_1\\ \xi_3=(\gamma_3+1)\beta\delta b^{\mathrm{s}}_2-(\gamma_2+\gamma_3)\beta\delta b^{\mathrm{s}}_1\end{cases}\tag{17}$$

由于GNSS定位系统的载波方程与伪距方程的待估计参数具有较高的一致性，可得简化后的GNSS定位系统载波观测方程表达式如下：

$$\begin{cases}L_1=\rho+T+\mathrm{c}dt_{\mathrm{r}12}-\mathrm{c}dt^{\mathrm{s}}_{12}-I'_1+N'\\ L_2=\rho+T+\mathrm{c}dt_{\mathrm{r}12}-\mathrm{c}dt^{\mathrm{s}}_{12}-I'_1+\lambda_2 N'_2+\Delta\\ L_3=\rho+T+\mathrm{c}dt_{\mathrm{r}12}-\mathrm{c}dt^{\mathrm{s}}_{12}-\gamma_3 I'_1+\lambda_3 N'_3+\Delta\end{cases}\tag{18}$$

式中，Δ 与 N'_i 分别为待修正的相位硬件偏差以及浮点模糊度。其中 Δ 的表达式如下：

$$\Delta=\alpha-\frac{\alpha\gamma_3}{\gamma_2}\delta b^{\mathrm{s}}_1-\beta\gamma_3-\beta-\delta b^{\mathrm{s}}_2-\delta b^{\mathrm{s}}_3\tag{19}$$

通过以上过程，构建GNSS精密单点定位模型，提升GNSS定位系统的定位性能。

2　模型测试

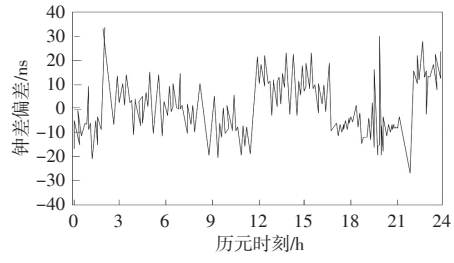
选取GNSS定位系统中的观测站，作为测试所构建精密单点定位模型定位性能的测试站点，设置观测数据的采样间隔为30 s。选取10个观测站分别作为用

户服务器端估计解耦钟差产品的测站以及用户精密单点定位模型的测站。首先，收集GNSS接收机的原始测量数据，包括卫星观测值和接收机时钟观测值。利用精密星历和钟差数据对卫星的位置、速度和钟差进行估计。将接收机时钟观测值与估计的卫星钟差值作差，得到去除时钟偏差的GNSS观测数据。设定初始状态向量和协方差矩阵，包括估计的目标位置、速度和钟差等。定义观测模型，将去除时钟偏差的GNSS观测数据与状态向量进行关联。通过预测和修正2个步骤不断更新状态向量和协方差矩阵。使用动态模型和观测模型的转移矩阵和过程噪声矩阵来描述系统的动态演化和噪声特性。通过滤波运算得到系统的最优估计状态向量和协方差矩阵。从卡尔曼滤波器的状态向量中提取目标的位置、速度和钟差估计结果。根据实际需求，对状态向量进行解耦，提取目标的各个参数。以目标位置为例，提取得到目标在地球坐标系下的经度、纬度和海拔高度等信息。采用本文模型在服务端以及用户端，通过钟差解耦方法确定模糊度浮点解以及固定解[26-27]。精密单点定位模型的实验设置如表1所示。

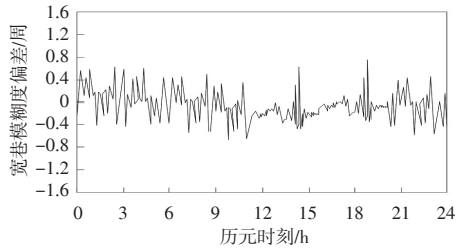
表1 实验参数设置

误差项	误差处理策略	来源
卫星星历	精密星历	情报采集卫星（information gathering satellite，IGS）
卫星钟差	精密钟差	IGS
对流层延迟	修正	–
电离层延迟	消电离层组合	–
卫星天线相位中心	天线相位中心变化（antenna phase center variation，PCV）产品	IGS
接收机天线相位中心	PCV产品	IGS
相位缠绕	修正	–
地球自转	修正	–

采用本文模型进行钟差解耦，评定钟差解耦的精度以及可靠性。以北斗卫星为例，本文模型解耦北斗卫星钟差分序列如图1所示。图1实验结果可以看出，通过对GNSS的相位钟和伪距钟进行解耦计算，相位钟差估值呈现较高的稳定性。采用本文模型对GNSS定位系统进行钟差解耦，其宽巷模糊度偏差估计值同样呈现较高的稳定性。图1实验结果验证，采用本文模型对GNSS定位系统进行钟差解耦，具有较高的解耦稳定性，有效提升GNSS精密单点定位模型的定位精度。



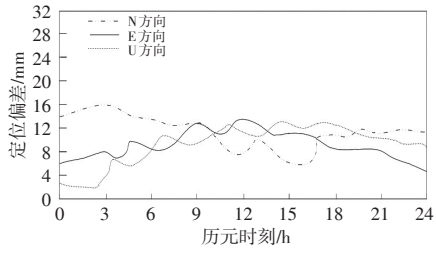
a 钟差偏差



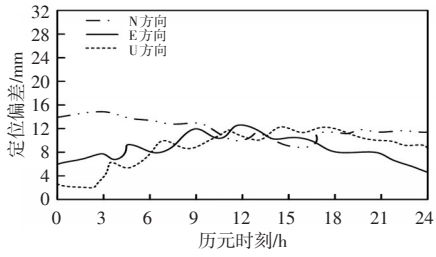
b 宽巷模糊度偏差

图1 解耦北斗卫星钟差分序列

采用所构建的精密单点模型进行不同测站的精密定位，GNSS定位偏差如图2所示。通过图2模型测试结果可以看出，采用本文模型进行目标定位时，GNSS定位系统在不同方向的定位偏差均低于20 mm，具有较高的定位精度。GNSS导航系统有效改善了观测值组合噪声放大的缺陷，提升了钟差精度，调整钟差误差。实验验证了本文模型对于提升定位精度的有效性。



a 用户服务器端估计解耦钟差产品的测站



b 用户精密单点定位模型的测站

图2 GNSS定位偏差

为进一步体现所构建的精密单点模型的定位精度，采用文献[13]方法和文献[14]方法作为对比方法，随机设置不同目标位置共100个，将100个目标位置按照地理位置距离远近分为5组，以便评估不同定位方法在不同地理位置上的性能差异，计算每个定位结果与真实位置之间的均方根误差，通过求得整体标准误差来评估定位方法的精度，验证不同方法的定位精

度结果如表2所示。

表2　不同方法的定位精度/mm

组别	本文方法	文献[13]方法	文献[14]方法
1	12	56	62
2	14	45	58
3	18	44	41
4	16	52	55
5	15	58	49

由表2可知，所构建的精密单点模型的定位精度平均为15 mm，而文献[13]方法和文献[14]方法的定位精度平均为51 mm和53 mm，表明所构建的精密单点模型具有显著的定位精度优势。

经实验验证，本文提出的精密单点定位模型在解耦卫星钟差、提高定位精度等方面取得了良好的结果。在钟差解耦方面，通过对GNSS的相位钟和伪距钟进行解耦计算，实验结果表明相位钟差估值具有较高的稳定性，而宽巷模糊度偏差估计值同样呈现较高的稳定性。同时，在精密定位实验中，采用本文模型对不同测站进行定位，在不同历元时刻下，不同目标方向的定位偏差均低于20 mm，显示出了较高的定位精度。对比实验结果进一步验证了该精密单点定位模型优于其他方法的定位精度优势，平均定位精度明显低于文献[13]方法和文献[14]方法的定位精度。综上所述，本文模型在实验中展示了解耦稳定性、提高定位精度等优良实验结果。

3　结　语

随着全球导航卫星系统的发展，人们对高精度定位的需求越来越大。在GNSS定位中，钟差是造成定位误差的主要因素之一。基于钟差解耦的GNSS精密单点定位模型是一种利用全球导航卫星系统（GNSS）进行高精度定位的方法，通过解耦钟差，可以减少由于钟差引起的定位误差，进而提高定位的精度，使得定位结果更为可靠。高精度的单点定位模型可以应用于各个领域，如地理测量、车辆导航、智能交通等，有助于提高工作效率和准确性。该模型适用于需要实现高精度定位的应用场景，如大地测量、导航定位等。通过解耦接收机钟差对定位解的影响，对接收机钟差进行建模和校正，从而提高了定位的精度。由于GNSS接收机的钟差是定位误差的一个重要来源，采用钟差解耦模型可以减小时钟差引起的系统误差。但该模型在高海拔地区或大海拔变化的环境中可能会受到更大的影响，因为在这些情况下，接收机钟差和信号传播时间会出现更明显的变化。

参考文献

[1] 林晓静. 基于PPP技术的省级CORS站点速度场及稳定性研究[J]. 地理空间信息,2022,20(8):24-26

[2] 李玉忠. EGM2008和北斗地基增强系统在工程测量中的应用[J]. 地理空间信息,2020,18(9):84-86

[3] 孙孝波,顾天琪,谷守周,等. 模糊度固定技术的GPS/BDS-2/BDS-3精密单点定位性能分析[J]. 测绘科学,2022,47(4):26-33

[4] 刘亚,何文涛. 组合SSR改正数实时精密单点定位性能研究[J]. 微电子学与计算机,2021,38(2):14-18

[5] 王阿昊,陈俊平,张益泽,等. 基于分区综合改正数的北斗卫星导航系统和GPS组合的动态精密单点定位[J]. 同济大学学报(自然科学版),2020,48(3):447-455

[6] Munoz-martin J F, Rodriguez-alvarez N, Bosch-lluis X, et al. Analysis of Polarimetric GNSS-R Stokes Parameters of the Earth's land Surface[J]. Remote Sensing of Environment,2023,287:113 491

[7] 马祥泰,史增凯,钱昭勇,等. 基于北斗卫星导航系统非组合精密单点定位算法的精密授时精度研究[J]. 电子与信息学报,2022,44(9):3 203-3 211

[8] 简濠骏,王逸石,张元泰,等. 北斗卫星广播星历精度评估与单点定位优化模型[J]. 大地测量与地球动力学,2022,42(3):291-297

[9] Gyagenda N, Hatilima J V, Roth H, et al. A Review of GNSS-independent UAV Navigation Techniques[J]. Robotics and Autonomous Systems,2022,152:104 069

[10] Rodriguez-alvarez N, Munoz-martin J F, Bosch-lluis X, et al. The First Polarimetric GNSS-reflectometer Instrument in Space Improves the SMAP Mission's Sensitivity Over Densely Vegetated Areas[J]. Scientific Reports,2023,13(1):3 722

[11] 李建刚,李红慧,柴祥君,等. GPS、BDS、GPS+BDS精密单点定位精度评估[J]. 测绘通报,2021(9):124-129

[12] 尹宏杰. BDS-3单频PPP定位精度与收敛性分析[J]. 地理空间信息,2023,21(6):112-115

[13] 鄂盛龙,周刚,龙海,等. BDS全球定位服务能力及天顶对流层延迟估计性能评估[J]. 大地测量与地球动力学,2021,41(8):789-794

[14] 廖福忠,胡冰峰,胡卫华,等. 电离层约束的BDS单频精密单点定位研究[J]. 测绘地理信息,2021,46(增刊):122-125