

引文格式: 陈文涛,程鹏飞,徐彦田.GPS/BDS/GLONASS 双频 RTK 定位算法研究[J].测绘通报,2020(1):55-60.DOI:10.13474/j.cnki.11-2246.2020.0012.

## GPS/BDS/GLONASS 双频 RTK 定位算法研究

陈文涛 程鹏飞 徐彦田

(中国测绘科学研究院 北京 100036)

**摘要:**针对 GLONASS 采用频分多址技术导致双差观测方程中双差模糊度失去整周特性的问题,提出了一种基于站间单差模糊度分别求解的方法,并结合附加模糊度参数的卡尔曼滤波模型,实现了 GPS/BDS/GLONASS 组合 RTK 定位。通过自编 RTK 程序对 GPS、BDS 与 GLONASS 双频实测短基线数据进行测试,并对比分析其他 RTK 模式下的稳定性与定位精度。结果表明,GLONASS 单频和双频定位的模糊度固定率分别为 99.8%、99.7%,其定位精度与 BDS、GPS 相差不大。在单频或双频 RTK 定位中,双系统、三系统组合定位的稳定性和定位精度明显高于单系统,其中三系统组合定位的稳定性最好,精度最高。随着频率增加,初始化时间明显减少,为实现单历元获得固定解提供了可能性。

**关键词:** GPS/BDS/GLONASS; RTK; 双频; 卡尔曼滤波; 单差模糊度

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 0494-0911(2020)01-0055-06

## Research on GPS/BDS/GLONASS dual-frequency RTK positioning algorithm

CHEN Wentao, CHENG Pengfei, XU Yantian

(Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100036, China)

**Abstract:** In the double difference observation equation, the double difference ambiguity loses the whole circumference characteristics for using FDMA technology for GLONASS. To solve it, this paper proposes a method based on the interstation single difference ambiguity, and additional ambiguity parameters Kalman filter, it implements GPS/BDS/GLONASS combined RTK positioning. The RTK program is used to solve measured short baseline data of the GPS, BDS and GLONASS dual-frequency, and the stability and positioning accuracy in other RTK modes are compared and analyzed. The results show that the fixed rate of ambiguity of GLONASS single frequency and dual frequency positioning is 99.8% and 99.7%, respectively, and its positioning accuracy is not much different from BDS and GPS. In single-frequency or dual-frequency RTK positioning, the stability and positioning accuracy of the dual-system and three-system combined positioning are significantly higher than that of the single system. The stability of the three-system combined positioning is the best and the highest precision. As the frequency increases, the initialization time is significantly reduced, providing the possibility to achieve a fixed solution for a single epoch.

**Key words:** GPS/BDS/GLONASS; RTK; dual-frequency; Kalman filter; single difference ambiguity

我国北斗卫星导航定位系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)在2012年实现了在中国及周边地区提供定位导航授时(positioning navigation timing, PNT)等服务。俄罗斯的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GLONASS)已于2011年12月31日恢复全球组网运行<sup>[1]</sup>。BDS、GLONASS成为继美国全球定位系统(Global Positioning System, GPS)之后可实现导航定位的卫星定位系统。多系统组合定位的优势在于:①可以增加观测卫星数,改善卫星空间分布的几何图形,从而提高定位精度和稳定性;②可以减小对单系统的依赖性;③

多频定位有利于在卫星几何构型糟糕的情况下,提高实时动态差分定位(real time kinematic, RTK)作业的可能性<sup>[2]</sup>。文献[2—3]研究了BDS/GPS双系统RTK定位精度和稳定性,可尝试增加GLONASS系统,实现三系统组合定位。文献[4]研究了基于卡尔曼滤波方法BDS/GLONASS组合RTK定位,GLONASS定位精度与BDS相差不大,双系统组合定位稳定性高于单系统,但未对系统频率进行分析。文献[5—6]针对GLONASS双差模糊度研究了一种基于站间单差模糊度分别求解的方法,再对相位频间偏差(inter-frequency biases, IFB)进行参数估计,

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-10-15

基金项目: 国家重点研发计划课题(2016YFB0502101; 2016YFB0502105); 北斗地基增强导航定位与HLJCORS融合服务研究项目(GA17A301); 中国测绘科学研究院基本科研业务费(AR1903)

作者简介: 陈文涛(1993—),男,硕士,研究方向为高精度GNSS定位算法。E-mail: 1091449186@qq.com

未对 BDS 进行组合及系统频率进行分析。

由于 GLONASS 卫星间的波长不同,组成双差观测方程后其双差模糊度失去了整周特性<sup>[7]</sup>。一般解决方法有:①建立以周为单位的观测方程,但需要对接收机钟差进行估计;②建立以长度为单位的观测方程,再通过数学变化将双差模糊度分解为一个具备整数特性的双差模糊度和一个与参考卫星有关的单差模糊度<sup>[4-6]</sup>。这两种方法均需要利用伪距信息辅助求解模糊度,故会受到伪距精度的影响。为降低伪距观测误差对双差模糊度固定的影响,本文提出一种基于站间单差模糊度分别求解的方法:建立以长度为单位观测方程,对单差模糊度参数进行估计,由于单差模糊度个数多于双差观测值个数,法方程必定会出现秩亏,通常给定单差模糊度参数初值,估计出以周为单位的单差模糊度后再通过线性变换得到具备整周特性的双差模糊度,最后利用最小二乘模糊度降相关平差法(least-square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)实现模糊度固定。本文选择相同类型的接收机实测的短基线数据进行试验,验证该方法的有效性,并对比分析其他 RTK 模式下的稳定性与定位精度。

## 1 GPS/BDS/GLONASS 时空基准统一

时间系统和坐标系统是导航定位的参考基准,任何形式下的导航定位都必须在一定的时间和坐标框架内进行<sup>[8]</sup>。GPS、BDS 和 GLONASS 系统间存在时空基准的差异。GPS 的时间基准是 GPST,与国际原子时 TAI、协调世界时 UTC 的关系式为

$$\text{GPST} = \text{TAI} - 19 \text{ s} = \text{UTC}(\text{USNO}) + 1 \text{ s} \times n - 19 \text{ s} \quad (1)$$

式中  $n$  表示 TAI 与 UTC 间不断调整的参数。

BDS 的时间基准是 BDST, BDST 与 UTC 的关系式为

$$\text{BDST} = \text{UTC}(\text{NTSU}) + 1 \text{ s} \times n - 19 \text{ s} - 14 \text{ s} \quad (2)$$

GLONASS 的时间基准是 GLONASST,与俄罗斯维持的协调世界时 UTC(SU) 存在 3 h 的整数差<sup>[8]</sup>,其关系式为

$$\text{GLONASST} = \text{UTC}(\text{SU}) + 3 \text{ h} \quad (3)$$

通过对 GPS、BDS、GLONASS 时间系统的分析可得,其时间基准均能与 UTC 建立关系,故可将 UTC 作为中间变量,实现 GPS、BDS、GLONASS 时间系统的统一<sup>[18]</sup>。

GPS 和 BDS 分别采用的是 WGS-84 和 CGCS2000 坐标系,均能够与 ITRF 建立一定的联系。GLONASS 采用的 PZ90 坐标系,其中 PZ90.02 与 ITRF2000 只存在原点的平移,3 个轴的定向与

ITRF 相同。PZ90.02 与 ITRF2000 的转换关系为<sup>[8]</sup>

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{\text{ITRF2000}} = \begin{bmatrix} -0.36 \\ +0.08 \\ +0.18 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_p \\ Y_p \\ Z_p \end{bmatrix}_{\text{PZ90}} \quad (4)$$

通过对 GPS、BDS、GLONASS 坐标系统的分析可得, WGS-84、CGCS2000 和 PZ90 均可以与 ITRF 建立关系,它们之间的转换本质上是在不同 ITRF 框架间实现统一<sup>[18]</sup>。

## 2 附加模糊度参数的卡尔曼滤波

附加模糊度参数的卡尔曼滤波状态方程和观测方程如下

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \quad (5)$$

$$L_k = H_k X_k + V_k \quad (6)$$

式中  $k-1$ 、 $k$  分别为第  $k-1$  历元和第  $k$  历元;  $\Phi$  为状态转移矩阵;  $L$  为观测值向量;  $H$  为系数阵;  $X$  为状态向量;  $W$  为动态噪声向量;  $V$  为观测噪声向量。

在短基线条件下,状态向量  $X_k$  只包含位置参数和单差模糊度参数  $X_k$  为

$$[x_k \ y_k \ z_k \ \dot{x}_k \ \dot{y}_k \ \dot{z}_k \ \ddot{x}_k \ \ddot{y}_k \ \ddot{z}_k \ \Delta N_1 \ \Delta N_2 \ \cdots \ \Delta N_n] \quad (7)$$

式中,前 9 个变量分别为三维坐标参数、三维速度参数及三维加速度参数;  $\Delta N$  为单差模糊度参数。状态向量的参数初始化,可采用伪距单点定位计算得到三维坐标,多普勒观测值计算得到三维速度,三维加速度设为 0 及伪距和相位观测值计算得到模糊度初始值。

卡尔曼滤波只需得到上一历元的状态估计值及其协方差和当前历元观测值就可计算得出当前历元状态估计值<sup>[2]</sup>。故可以通过位置均值的自适应算法<sup>[9]</sup>得到状态方程及预测值的方差阵

$$X_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} X_{k-1,k-1} \quad (8)$$

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1,k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_{k-1} \quad (9)$$

式中  $P$  表示协方差阵;  $Q$  表示系统噪声阵;  $T$  表示转置矩阵。通常在处理静态或匀速运动的观测数据时,系统噪声阵  $Q$  设置为零矩阵。协方差阵  $P$  的初始值根据参数间的权比确定。

利用该模型计算增益矩阵  $K$

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (10)$$

式中  $H$  表示已线性化后参数系数阵;  $R$  表示观测误差方差阵。卡尔曼滤波的核心在于增益矩阵  $K$  的计算,而观测误差方差阵  $R$  严重影响  $K$  精度<sup>[10]</sup>。本文对  $R$  值的设置采用文献[3]中的方法,故在此不再赘述。

最后,通过卡尔曼滤波更新状态向量  $X_k$ ,计算

得到参数最优估计值  $X_{k,k}$  (浮点解) 和最优协方差阵  $P_{k,k}$

$$X_{k,k} = X_{k,k-1} + K_k v_k \quad (11)$$

$$P_{k,k} = (I - K_k H_k^T) P_{k,k-1} \quad (12)$$

式中  $v$  表示双差观测方程残差项。

得到双差模糊度浮点解后, 采用 LAMBDA 算法固定双差整周模糊度<sup>[11]</sup>, 在利用下式求解出固定解

$$\dot{X} = \tilde{X} + Q_{\tilde{X}\tilde{N}} Q_{\tilde{X}\tilde{X}}^{-1} (\dot{N} - \tilde{N}) \quad (13)$$

式中  $\dot{X}$  表示坐标固定解;  $\tilde{X}$  表示坐标浮点解;  $\dot{N}$  表示模糊度固定解;  $\tilde{N}$  表示模糊度浮点解;  $Q_{\tilde{X}\tilde{N}}$  表示坐标与模糊度参数的协方差阵;  $Q_{\tilde{X}\tilde{X}}^{-1}$  表示模糊度协方差的逆矩阵。

### 3 GPS/BDS/GLONASS 组合 RTK 定位模型

多系统组合 RTK 定位中, 一般选择在系统内差分, 不考虑系统间差分, 系统间系统误差若处理不好, 反而会降低定位精度<sup>[12]</sup>。GPS 和 BDS 在 RTK 定位中通常采用双差观测方程的优势在于消除接收机钟差和卫星钟差的同时, 其双差模糊度也具备整数特性<sup>[13]</sup>。但对于 GLONASS 系统而言, 其卫星间的频率不同, 故卫星间存在着频间偏差 (inter-frequency bias, IFB)。文献[7]指出对于相同类型接收机而言, IFB 通常为零, 而对于不同类型接收机时, 必须考虑 IFB 对 GLONASS 双差模糊度的影响。不同 GLONASS 卫星的波长也不相同, 故在双差后其模糊度失去整周特性。针对波长不一致对双差模糊度的影响, 常见的两种解决方法:

(1) 以周为单位建立双差观测方程, 估计接收机钟差模型

$$\nabla \Delta \varphi_R^{ij} = \frac{1}{\lambda^i} \rho_R^i - \frac{1}{\lambda^j} \rho_R^j - \left( \frac{1}{\lambda^i} - \frac{1}{\lambda^j} \right) \delta t_R + N_R^{ij} + \nabla \Delta \text{trop} + \nabla \Delta \text{ion} + \text{IFB}_R^{ij} + \varepsilon_R^{ij} \quad (14)$$

式中,  $R$  表示 GLONASS 卫星;  $i, j$  表示卫星号;  $\nabla \Delta \varphi_R^{ij}$  表示双差载波相位观测值;  $\lambda^i, \lambda^j$  为  $i, j$  卫星的波长;  $\rho_R^i, \rho_R^j$  表示站星间几何距离;  $\delta t_R$  表示接收机钟差;  $N_R^{ij}$  为双差模糊度;  $\nabla \Delta \text{trop}$  和  $\nabla \Delta \text{ion}$  分别表示双差对流层延迟和双差电离层延迟 (短基线中可以忽略不计);  $\text{IFB}_R^{ij}$  为频间偏差;  $\varepsilon_R^{ij}$  为观测噪声。

分析可知, 该模型保留了双差模糊度的整周特性, 但由于卫星频率均不相同, 故接收机钟差无法消除, 需要对其进行相关处理。通常利用伪距观测值

解算接收机钟差, 再改正到双差相位观测值中。

(2) 以长度为单位建立双差观测方程, 并进行数学变换

$$\begin{aligned} \lambda^i \varphi_R^i - \lambda^j \varphi_R^j &= \nabla \Delta \rho_R^{ij} + \lambda^i \Delta N_R^i - \lambda^j \Delta N_R^j + \nabla \Delta \text{trop} + \\ &\quad \nabla \Delta \text{ion} + \text{IFB}_R^{ij} + \varepsilon_R^{ij} = \nabla \Delta \rho_R^{ij} + \lambda^i (\Delta N_R^i - \Delta N_R^j) + \\ &\quad (\lambda^i - \lambda^j) \Delta N_R^j + \nabla \Delta \text{trop} + \nabla \Delta \text{ion} + \text{IFB}_R^{ij} + \varepsilon_R^{ij} \end{aligned} \quad (15)$$

式中  $\Delta N_R^i, \Delta N_R^j$  为单差模糊度。

分析可知, 该模型消除接收机钟差, 并通过数学变化将浮点的双差模糊度转换成一个具备整周特性的双差模糊度和一个与参考卫星相关的单差模糊度。通常利用伪距辅助解算单差模糊度, 故会受到伪距精度的影响。

上述两种模型均需要利用伪距信息, 为降低伪距观测误差对双差模糊度固定的影响, 本文提出了一种基于站间单差模糊度分别求解的方法。

GPS/BDS/GLONASS 相位双差观测方程为

$$\lambda_G \varphi_G = \nabla \Delta \rho_G + \lambda_G \nabla \Delta N_G + \nabla \Delta \text{trop} + \nabla \Delta \text{ion} + \varepsilon_G \quad (16)$$

$$\lambda_B \varphi_B = \nabla \Delta \rho_B + \lambda_B \nabla \Delta N_B + \nabla \Delta \text{trop} + \nabla \Delta \text{ion} + \varepsilon_B \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \lambda^i \varphi_R^i - \lambda^j \varphi_R^j &= \nabla \Delta \rho_R^{ij} + \lambda^i \Delta N_R^i - \lambda^j \Delta N_R^j + \nabla \Delta \text{trop} + \\ &\quad \nabla \Delta \text{ion} + \text{IFB}_R^{ij} + \varepsilon_R^{ij} \end{aligned} \quad (18)$$

式中,  $G, B$  分别表示 GPS、BDS 卫星。

对于 GPS 和 BDS 系统而言, 由于不存在卫星间波长不一致的问题, 故在式(16)和式(17)中, 直接合并成具备整周特性的双差模糊度 ( $\nabla \Delta N_G$  和  $\nabla \Delta N_B$ )。由于 GLONASS 系统采用频分多址技术, 导致式(18)中双差模糊度 ( $\lambda^i \Delta N_R^i - \lambda^j \Delta N_R^j$ ) 失去了整周特性, 并且存在频间偏差 IFB。现有研究表明, 可用频率的线性函数表示接收机端相位 IFB, 该函数包含一个与频率成正比的一次项和一个常数项<sup>[12]</sup>。故接收机端相位 IFB 为

$$\text{IFB} = \kappa^i \Delta \gamma + \alpha \quad (19)$$

式中  $\kappa^i$  表示  $i$  号卫星的频率编号;  $\Delta \gamma$  表示变化率;  $\alpha$  为常数项。

由于  $\Delta \gamma, \alpha$  参数在同一频段下对于所有 GLONASS 卫星都是相同的<sup>[14]</sup>, 故在进行双差时, 可消除常数项  $\alpha$ 。此时双差后的 IFB 为

$$\text{IFB} = (\kappa^i - \kappa^j) \Delta \gamma \quad (20)$$

$\Delta \gamma$  前面的系数随着卫星号的变化而变化。本文选择相同类型的接收机实测得到的数据进行试验, 故 IFB 可以忽略不计。

针对 GLONASS 波长不一致导致双差模糊度失

去了整周特性的问题,首先给出单差模糊度参数的初始值,再利用卡尔曼滤波模型估计单差模糊度,保留单差模糊度的整周特性。考虑单差模糊度之间的相关性较大,故先确定基准卫星,固定基准卫星的单差模糊度  $\Delta N_R^i$ 。虽然基准卫星模糊度会受到取整精度的影响,但 GLONASS 卫星间的波长差很小(0.000 35~0.004 92 周),基准卫星模糊度 10 周的误差对双差观测值造成的非整数误差最大不超过 0.05 周<sup>[5-6]</sup>。估计出单差模糊度后,通过数学变换将单差模糊度参数转换为双差模糊度参数。

$$N_R^{dd} = DN_R^{sd} \quad (21)$$

式中  $N_R^{sd}$  表示单差模糊度参数;  $N_R^{dd}$  表示双差模糊度参数; 数学变换矩阵  $D$  为

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ -1 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

## 4 算例分析

### 4.1 GLONASS 单双频定位算例分析

本文数据为在河北省石家庄市使用 Trimble Net R9 接收机采集的 7 km 短基线数据,观测时间为 2016-04-13,采样率为 1 s,卫星截止高度角设为 15°。整数解中次小与最小验后方差比(Ratio)阈值设为 3,并用此判断模糊度是否固定。在试验分析中,分别以 G、B、R 表示 GPS、BDS、GLONASS 系统。

表 1 为 GLONASS 单频和双频 RTK 定位模糊度固定率,分别为 99.8%、99.7%,初步验证了该方法的有效性和可行性。

表 1 模糊度固定率

定位系统	总历元	固定历元	固定率/(%)
R 单频	4000	3992	99.8
R 双频	4000	3989	99.7

图 1—图 2 分别表示 GLONASS 单频和双频 RTK 定位时 E、N、U 方向上的坐标差。如图 1—图 2 所示,GLONASS 单频和双频 RTK 定位,其平面精度总体都在 -2~2 cm 范围内,高程精度基本都在 -5~5 cm 范围内,均符合 RTK 厘米级的定位精度,进一步验证了该方法的有效性和可行性。

### 4.2 其他系统双频定位算例分析

图 3 表示基准站和流动站在各系统中共视卫星数目变化。图 4 表示各系统的 PDOP 值变化。由图 3—图 4 可知,BDS 系统卫星一直保持在 9 颗,其

单系统 PDOP 值在 2.5~2.8 范围内变化,且波动十分平缓,主要是由于 BDS 的 GEO 和 IGSO 卫星分布较多,卫星空间构型较好。相比于 BDS 系统,GPS 和 GLONASS 系统卫星数波动较大,其卫星数分别在 6~9 颗、5~7 颗变化;GLONASS 的 PDOP 值浮动最大,GPS 次之,其 PDOP 值分别在 2~3.8、2.2~4.4 变化。而这种现象在双系统、三系统组合中得到很好的改善,其中三系统组合的卫星数最多且 PDOP 值最小,其次是双系统组合,最后是单系统。试验分析表明多系统组合定位能够改善卫星的空间分布构型及提高系统的稳定性。

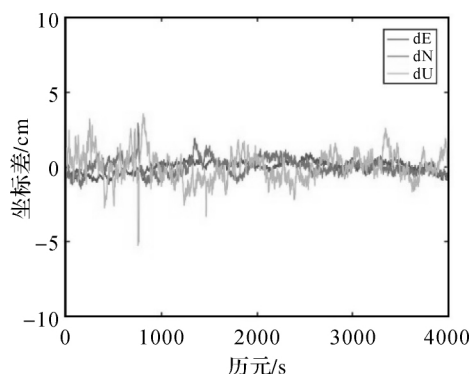


图 1 R 单频定位误差

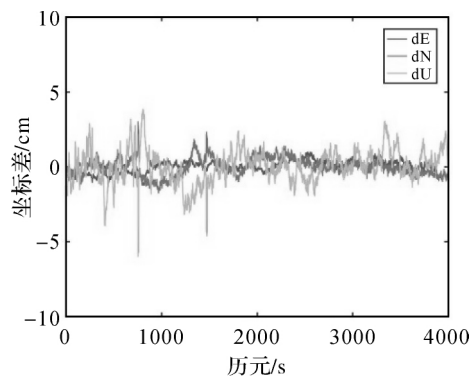


图 2 R 双频定位误差

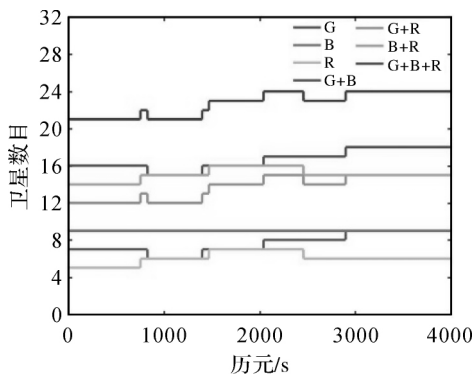


图 3 观测卫星数目变化

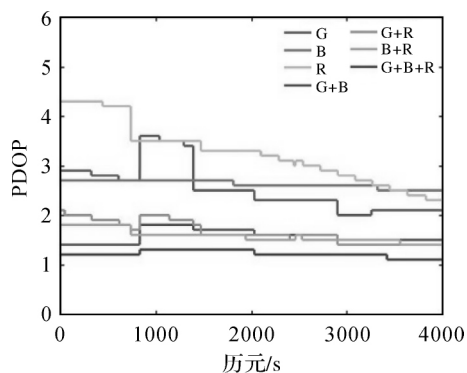


图 4 PDOP 值

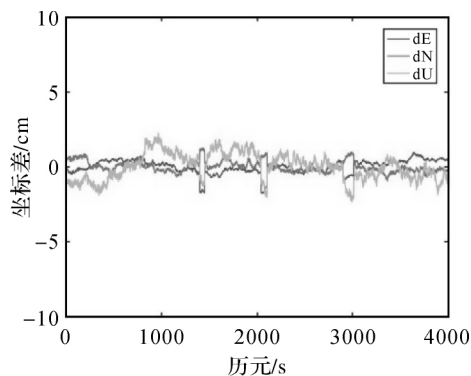


图 7 G+B( 双频) 定位误差

图 5—图 10 表示单系统、双系统及三系统组合双频定位在 E、N、U 方向上的坐标差。如图 2、图 5—图 10 所示,所有系统的 RTK 定位精度总体都在  $-5 \sim 5$  cm 范围内变化,均符合 RTK 定位精度要求。单系统中, GPS、BDS、GLONASS 的定位精度相差不大,但均在 U 方向上波动较大。双系统双频定位中, GPS+BDS 定位精度较好,且 U 方向上波动较小。在双频 RTK 定位中,三系统组合定位的精度最高且波动最小,其次是双系统,最后是单系统。初步表明,多系统组合 RTK 有利于提高定位精度。

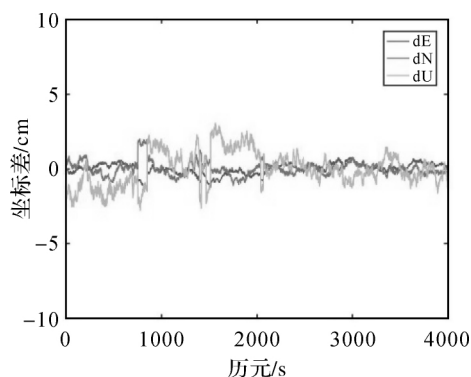


图 8 G+R( 双频) 定位误差

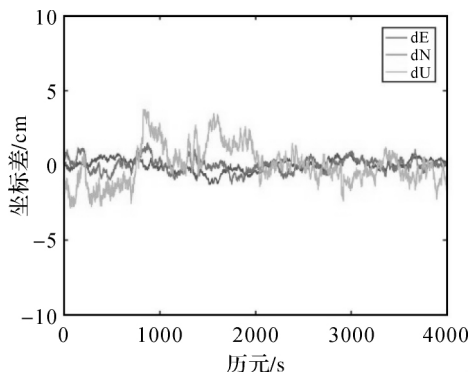


图 5 G 双频定位误差

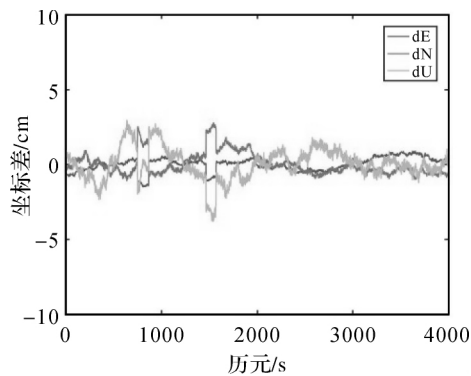


图 9 B+R( 双频) 定位误差

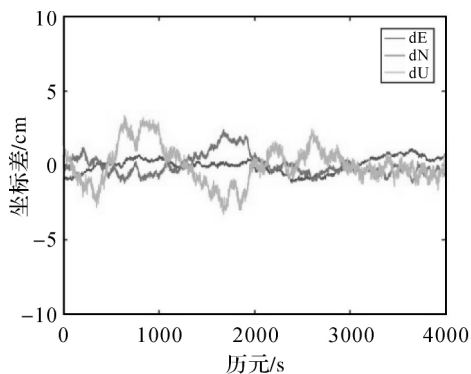


图 6 B 双频定位误差

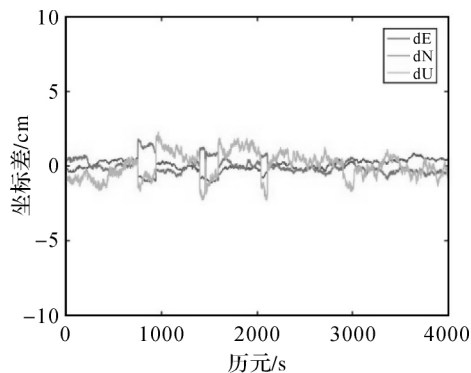


图 10 G+B+R( 双频) 定位误差

本文给出了各系统单频和双频定位的初始化时间和 RMS 值,见表 2、表 3。为更加直观地表明各系统各频率的定位精度,将其总体精度统计如图 11 所示。分析可知,除单系统单频定位外,其他系统定位的初始化时间均为 1 s,频率增加明显缩短了初始化时间。在双频定位中,GPS+BDS+GLONASS 定位的精度最高,且为 1.07 cm,其次是双系统,最后是单系统,而在单系统与双系统中,GPS 与 GPS+BDS 的精度最高,分别为 1.44、1.09 cm。同样的情况也出现在单频 RTK 定位中。试验分析表明多系统组合 RTK 有利于提高定位精度。对比同一系统不同频率定位,可以发现:随着频率增加,其定位精度反而有所下降。出现这种现象的原因可能是各系统的第二个频率信号相比于第一个频率信号的稳定性较差及受到电离层延迟影响较大。

表 2 各系统单频定位初始化时间和 RMS 值

定位系统	初始化时间/s	E 分量/cm	N 分量/cm	U 分量/cm
G	3	0.31	0.44	1.06
B	2	0.39	0.62	1.02
R	5	0.39	0.54	1.01
G+B	1	0.29	0.30	0.63
G+R	1	0.23	0.36	0.87
B+R	1	0.29	0.56	0.90
G+B+R	1	0.21	0.32	0.63

表 3 各系统双频定位初始化时间和 RMS 值

定位系统	初始化时间/s	E 分量/cm	N 分量/cm	U 分量/cm
G	1	0.40	0.47	1.30
B	1	0.51	0.71	1.28
R	1	0.38	0.60	1.59
G+B	1	0.47	0.36	0.91
G+R	1	0.38	0.47	1.14
B+R	1	0.46	0.73	1.05
G+B+R	1	0.41	0.48	0.87

## 5 结 语

本文基于站间单差模糊度分别求解的方法并通过卡尔曼滤波模型实现了 GPS/BDS/GLONASS 组合双频 RTK 定位,并根据实测短基线数据测试各系统的定位模式。试验分析表明,该方法能够正确固定 GLONASS 模糊度,其定位精度与 GPS、BDS 相差不大,均满足 RTK 厘米级定位精度要求。无论是单频或双频 RTK 定位,三系统组合定位精度最高、稳

定性最好,其次是双系统,最后是单系统,表明多系统组合定位有利于提高定位精度和稳定性。频率增加缩短了初始化时间。

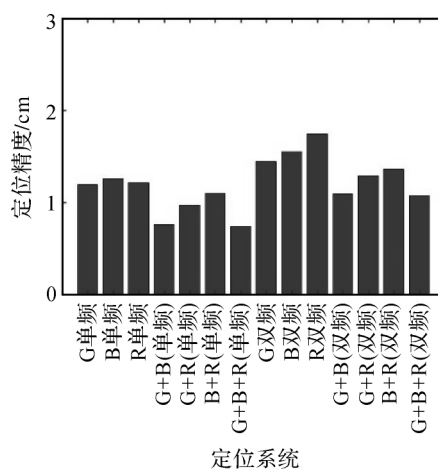


图 11 定位精度统计

## 参考文献:

- [1] 谢建涛,郝金明,于合理,等.基于 BDS/GLONASS 的短基线单历元多频 RTK 定位研究[J].大地测量与地球动力学,2016,36(6):529-533.
- [2] 袁宏超,秘金钟,徐彦田,等.BDS+GPS 双系统多频 RTK 算法研究[J].测绘通报,2016(9):5-8.
- [3] 王世进,秘金钟,李得海,等.GPS/BDS 的 RTK 定位算法研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2014,39(5):621-625.
- [4] 王艺希,秘金钟,徐彦田,等.卡尔曼滤波方法的 BDS/GLONASS RTK 定位算法[J].测绘科学,2017,42(12):112-117.
- [5] 刘慧敏,王振杰,欧吉坤,等.基于站间单差的 GPS/GLONASS 组合模糊度解算研究[J].大地测量与地球动力学,2017,37(12):1257-1262.
- [6] 章太馨,刘炎炎,鲍立桂,等.基于单差模糊度的 GPS/GLONASS 组合相对定位模型研究[J].测绘工程,2016,25(4):33-36.
- [7] WANNINGER L. Carrier-phase inter-frequency biases of GLONASS receivers[J]. Journal of Geodesy,2012,86(2):1-10.
- [8] 李鹤峰,党亚民,秘金钟,等.BDS 与 GPS、GLONASS 多模融合导航定位时空统一[J].大地测量与地球动力学,2003,33(4):73-78.
- [9] 高为广,杨元喜,张双成.基于当前加速度模型的抗差自适应 KALMAN 滤波[J].测绘学报,2006,35(1):15-18.
- [10] 宋迎春.动态定位中的卡尔曼滤波研究[D].长沙:中南大学,2006:22-23.

(下转第 70 页)

(2) 对于接收机天线相位中心偏差改正,可利用 GPS 接收机天线相位中心偏差改正值进行改正,但其精度改善情况随天线类型的不同而存在差异。水平方向上,精度影响为毫米级,高程方向与天线类型有关,精度影响最大可达厘米级。因此,在缺少 BDS 接收机天线相位中心偏差改正值的情况下,可考虑利用 GPS 接收机天线相位中心偏差改正值进行代替,以提高精密单点定位精度。

#### 参考文献:

- [1] 郭际明,史俊波,汪伟.天线相位中心偏移和变化对高精度 GPS 数据处理的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2007,32(12):1143-1146.
- [2] 涂锐,黄观文,邹顺.天线相位中心偏差变化及改正模型对精密单点定位精度的影响[J].大地测量与地球动力学,2010,30(3):113-117.
- [3] 胡志刚,赵齐乐,郭靖,等.GPS 天线相位中心校正对低轨卫星精密定轨的影响研究[J].测绘学报,2011,40(S1):34-38.
- [4] SCHMID R, STEIGENBERGER P, GENDT G, et al. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas[J]. Journal of Geodesy, 2007, 81(12): 781-798.
- [5] 张胜凯,左耀文,鄂栋臣,等.天线相位中心改正模型对南极 GPS 基线解算的影响[J].测绘科学,2018,43(8):151-156.
- [6] 张小红,李盼,李星星,等.天线相位中心改正模型对 PPP 参数估计的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2011,36(12):1470-1473.
- [7] 杨凯,刘鸿飞,赵倩,等.绝对天线相位改正模型对 GPS 精密数据处理的影响[J].武汉大学学报(信息科学版),2010,35(6):694-697.
- [8] 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.
- [9] 徐宗秋,于航,向琦,等.BDS 卫星天线相位偏差对 PPP 法估计 ZTD 的影响[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2017,36(4):445-448.
- [10] 黄观文,张睿,张勤,等.BDS 卫星天线相位中心改正模型比较[J].大地测量与地球动力学,2015,35(4):658-661.
- [11] DILSSNER F, SPRINGER T, SCHÖNEMANN E, et al. Estimation of satellite antenna phase center corrections for BeiDou[C]//Proceedings of IGS Network, Data and Analysis Center Workshop. Pasadena, California: [s.n.], 2014.
- [12] 张磊,兰孝奇,房成贺,等.天线相位中心改正对 GPS 精密单点定位的影响[J].测绘工程,2018,27(3):35-38,45.
- [13] 胡一帆,胡弦,陈俊平,等.GPS 卫星和接收机天线绝对 PCO、PCV 对高精度基线解算的影响分析[J].测绘通报,2017(5):11-16.
- [14] 胡新乔,刘万科,刘晓磊,等.北斗天线相位中心改正策略及其对定位精度的影响分析[J].大地测量与地球动力学,2018,38(11):1137-1142.
- [15] POPUGAEV A E, WANSCH R. Multi-band GNSS antenna[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2011.

(责任编辑:纪银晓)

(上接第 60 页)

- [11] TEUNISSEN P J G. A Canonical theory for short GPS baselines part II: the ambiguity precision and correlation[J]. Journal of Geodesy, 1997(71): 389-400.
- [12] PRATT M, BURKE B, MISRA P. Single-epoch Integer ambiguity resolution with GPS-GLONASS L1-L2 data[C]// Proceedings of the ION GPS-98. Nashville: [s.n.], 1998: 389-398.
- [13] 祝会忠,高星伟,秘金钟,等.一种 GPS 整周模糊度单历元解算方法[J].测绘科学,2011,36(4):9-11.
- [14] 隋心,徐爱功,郝雨时,等.实时 GLONASS 相位频间偏差粒子群优化估计方法[J].测绘学报,2018,47(5):584-591.

(责任编辑:杨瑞芳)