



长距离GPS/BDS双系统网络RTK方法

祝会忠¹ 路阳阳¹ 徐爱功¹ 李军¹

1 辽宁工程技术大学测绘与地理科学学院,辽宁 阜新,123000

摘要:基于区域参考站网的网络实时动态定位(real-time kinematic, RTK)方法是实现全球定位系统(global positioning system, GPS)、北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)高精度定位的主要手段。研究了一种长距离GPS/BDS双系统网络RTK方法,首先采用长距离参考站网GPS/BDS多频观测数据确定宽巷整周模糊度,利用引入大气误差参数的参数估计模型解算GPS/BDS双差载波相位整周模糊度;然后按照长距离参考站网观测误差特性的不同,分类处理参考站观测误差,利用误差内插法计算流动站观测误差,以改正流动站GPS/BDS双系统载波相位观测值的观测误差;最后使用流动站多频载波相位整周模糊度解算方法确定GPS/BDS载波相位整周模糊度并解算位置参数。使用长距离连续运行参考站(continuously operating reference stations, CORS)网的实测数据进行实验,结果表明,该方法能够利用长距离GPS/BDS参考站网实现流动站的厘米级定位。

关键词:GPS;BDS;长距离网络RTK;整周模糊度;误差改正

中图分类号:P228

文献标志码:A

全球定位系统(global positioning system, GPS)是目前最成熟、应用最广泛的全球卫星导航系统,北斗卫星导航系统(BeiDou satellite navigation system, BDS)也建成了覆盖亚太地区的区域导航定位系统,并于2018-12-27初步建成三代基本系统,开始提供全球服务。GPS/BDS融合定位与单系统相比,参与定位解算的卫星更多,卫星几何构型更强。多频观测数据可以提升载波相位整周模糊度的解算性能^[1],从而提高定位的稳定性。GPS/BDS双系统、单系统网络实时动态定位(real-time kinematic, RTK)技术已经成为实时动态定位领域的热点问题。

国内外学者对GPS网络RTK定位和全球卫星导航系统(global navigation satellite systems, GNSS)模糊度解算进行了大量研究^[2-13]。文献[2]针对单系统GPS网络RTK载波相位整周模糊度解算、参考站网误差内插、流动站载波相位整周模糊度解算模型进行了详细阐述;文献[14]采用站间距离为数十公里的GPS/BDS等多系统参考站网对比分析了多系统RTK的定位精度;文献[15]考虑了中长距离基线误差的影响,提出了自适应抗差滤波算法;文献[16]提出了BDS三

频网络RTK参考站载波相位整周模糊度的解算方法;文献[17]实现了BDS/GPS双系统参考站载波相位整周模糊度的快速解算。相对于参考站间距为几十公里的网络RTK方法,参考站间距离大于100 km的长距离网络RTK可以扩大作业面积,节省成本。电离层延迟、对流层延迟等误差的空间相关性受长距离网络RTK参考站间距离的影响较大,使得整周模糊度与双差残余误差的分离难度增加,参考站网误差改正模型的建立相对困难。目前,有关GPS/BDS双系统长距离网络RTK定位算法的研究较少。

本文利用长距离参考站网GPS/BDS多频伪距和载波相位观测值,研究了一种长距离GPS/BDS网络RTK方法。首先对参考站网的宽巷模糊度和多频载波相位整周模糊度进行解算;然后利用固定的参考站网载波相位整周模糊度计算参考站网观测值的双差观测误差,根据长距离参考站网观测误差特性的不同,利用分类误差内插法分别计算流动站色散性误差(电离层延迟误差)和非色散性误差(对流层延迟误差为主),以改正流动站的观测误差;最后解算流动站GPS/BDS单系统、双系统的整周模糊度和位置参数,

收稿日期:2020-05-28

项目资助:国家自然科学基金(42074012,42030109);辽宁省重点研发计划(2020JH2/10100044)。

第一作者:祝会忠,博士,副教授,主要从事GNSS高精度定位算法研究。zhuhuihong@whu.edu.cn

并采用实测 CORS(continuous operating reference station)网数据进行算法验证和实验分析。

1 长距离参考站网载波相位整周模糊度解算

长距离 GPS/BDS 网络 RTK 方法首先要准确解算参考站网 GPS/BDS 载波相位的整周模糊度。参考站的坐标精确已知,则参考站网双差载波相位和伪距观测方程分别为^[17]:

$$\lambda_i^S \cdot \Delta \nabla \Phi_i^S = \Delta \nabla \rho^S - \lambda_i^S \cdot \Delta \nabla N_i^S - \Delta \nabla I_i^S + \Delta \nabla T^S + \Delta \nabla \epsilon_i^S \quad (1)$$

$$\Delta \nabla P_i^S = \Delta \nabla \rho^S + \Delta \nabla I_i^S + \Delta \nabla T^S + \Delta \nabla \epsilon_{iP}^S \quad (2)$$

式中, $\Delta \nabla$ 表示双差; Φ 表示载波相位观测值; P 表示伪距观测值;上标 S 表示卫星, GPS、BDS 分别简称为 G 、 B ;下标 i 代表频率; ρ 表示测站到卫星的几何距离; λ 表示波长; N 表示载波相位模糊度; I 表示电离层延迟误差; T 表示以对流层延迟为主的非色散性误差; ϵ 代表载波相位观测噪声; ϵ_P 代表伪距观测噪声。

首先解算 GPS/BDS 第一、二频率的宽巷整周模糊度,然后建立引入大气误差参数的载波相位整周模糊度解算模型。采用单系统分别估计的方式进行宽巷整周模糊度的确定。利用 Melbourne-Wubben (M-W) 组合观测值不受大气误差、卫星轨道误差影响的特性,解算长距离参考站间的宽巷整周模糊度。各系统 M-W 组合观测值和宽巷模糊度可由式(1)、(2)推导得到,其分别表示为:

$$\Delta \nabla MW_{12}^G = \frac{c \cdot \Delta \nabla \Phi_1^G - c \cdot \Delta \nabla \Phi_2^G}{f_1^G - f_2^G} - \frac{f_1^G \cdot \Delta \nabla P_1^G + f_2^G \cdot \Delta \nabla P_2^G}{f_1^G + f_2^G} \quad (3)$$

$$\Delta \nabla N_{12}^G = \frac{(f_1^G - f_2^G) \cdot \Delta \nabla MW_{12}^G}{c} \quad (4)$$

$$\Delta \nabla MW_{i,i+1}^B = \frac{c \cdot \Delta \nabla \Phi_i^B - c \cdot \Delta \nabla \Phi_{i+1}^B}{f_i^B - f_{i+1}^B} - \frac{f_i^B \cdot \Delta \nabla P_i^B + f_{i+1}^B \cdot \Delta \nabla P_{i+1}^B}{f_i^B + f_{i+1}^B} \quad (5)$$

$$\Delta \nabla N_{i,i+1}^B = \frac{(f_i^B - f_{i+1}^B) \cdot \Delta \nabla MW_{i,i+1}^B}{c} \quad (6)$$

式中, $\Delta \nabla MW_{12}^G$ 表示 M-W 组合观测值; $\Delta \nabla N_{12}^G$ 表示 GPS 宽巷模糊度; f_1^G 、 f_2^G 表示 GPS 频率; $\Delta \nabla MW_{i,i+1}^B$ 代表 BDS 的第 i 、 $i+1$ 频率形成的 M-W 组合观测值; $\Delta \nabla N_{i,i+1}^B$ 表示 BDS 宽巷模糊度; f_i^B 、 f_{i+1}^B 表示 BDS 第 i 、 $i+1$ 两个频率,其中 $i=1, 2$;

为光速。其他符号含义与式(1)、(2)相同。

采用式(4)、式(6)计算宽巷整周模糊度。由于伪距观测噪声会影响宽巷整周模糊度的计算精度,因而采用对各历元模糊度的计算值取平均的方式提高宽巷模糊度的精度,并利用 M-W 组合观测值对 GPS、BDS 多频观测数据进行预处理,确保式(3)、式(5)观测值的连续性。各系统双差宽巷模糊度计算值和中误差分别为^[18]:

$$\Delta \nabla \hat{N}_{12}^G = \langle \Delta \nabla N_{12}^G \rangle \quad (7)$$

$$\sigma_{\Delta \nabla \hat{N}_{12}^G} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta \nabla N_{12}^G - \Delta \nabla \hat{N}_{12}^G)^2}{n}} \quad (8)$$

$$\Delta \nabla \hat{N}_{i,i+1}^B = \langle \Delta \nabla N_{i,i+1}^B \rangle \quad (9)$$

$$\sigma_{\Delta \nabla \hat{N}_{i,i+1}^B} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta \nabla N_{i,i+1}^B - \Delta \nabla \hat{N}_{i,i+1}^B)^2}{n}} \quad (10)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示求平均值; $\Delta \nabla \hat{N}_{12}^G$ 表示 $\Delta \nabla N_{12}^G$ 的多历元平均值; $\Delta \nabla \hat{N}_{i,i+1}^B$ 表示 $\Delta \nabla N_{i,i+1}^B$ 的多历元平均值; n 是观测数据的历元数。双差宽巷整周模糊度根据双差宽巷模糊度计算值及其中误差确定,采用的宽巷整周模糊度确定准则为:双差宽巷模糊度计算值与最接近的整数差小于整周模糊度波长的 0.25 周;双差宽巷模糊度取整成功率超过 99.9%;双差宽巷整周模糊度的中误差小于 0.01 周。

$\Delta \nabla N_{12}^G$ 、 $\Delta \nabla N_{i,i+1}^B$ 准确确定后,不采用宽巷组合或无电离层组合计算窄巷整周模糊度或载波相位模糊度,而是根据宽巷整周模糊度数值构建载波相位整周模糊度约束方程,添加到法方程中解算载波相位整周模糊度。GPS/BDS 双差宽巷整周模糊度与载波相位整周模糊度的关系如下:

$$\begin{cases} \Delta \nabla N_{12}^G = \Delta \nabla N_1^G - \Delta \nabla N_2^G \\ \Delta \nabla N_{i,i+1}^B = \Delta \nabla N_i^B - \Delta \nabla N_{i+1}^B \end{cases} \quad (11)$$

参考站观测值的对流层延迟误差使用对流层投影函数和天顶延迟误差表示^[19]。两个距离较近的参考站间同颗卫星的投影函数较接近,可将其天顶对流层延迟误差归化为相对天顶对流层延迟误差参数。因此,使用相对天顶对流层延迟误差作为待估参数,采用分段常数进行估计,双差对流层延迟误差参数表示为:

$$\begin{cases} \Delta \nabla T^G = \Delta \text{Map}^G \cdot \text{RZTD} \\ \Delta \nabla T^B = \Delta \text{Map}^B \cdot \text{RZTD} \end{cases} \quad (12)$$

式中, ΔMap 是星间投影函数之差,投影函数采用全球投影函数(global mapping function, GMF);RZTD (relative zenith tropospheric delay) 是参考站间相对天顶对流层延迟误差参数。

由 GPS、BDS 参考站双差载波相位观测方程 可得：

$$\begin{cases} \lambda_1^G \cdot \Delta \nabla \Phi_1^G = \Delta \nabla \text{Map}^G \cdot \text{RZTD} - \Delta \nabla I_1^G - \lambda_1^G \cdot \Delta \nabla N_1^G + \Delta \nabla \rho^G + \Delta \nabla \epsilon_1^G \\ \lambda_2^G \cdot \Delta \nabla \Phi_2^G = \Delta \nabla \text{Map}^G \cdot \text{RZTD} - \Delta \nabla I_2^G - \lambda_2^G \cdot \Delta \nabla N_2^G + \Delta \nabla \rho^G + \Delta \nabla \epsilon_2^G \\ \lambda_i^B \cdot \Delta \nabla \Phi_i^B = \Delta \nabla \text{Map}^B \cdot \text{RZTD} - \Delta \nabla I_i^B - \lambda_i^B \cdot \Delta \nabla N_i^B + \Delta \nabla \rho^B + \Delta \nabla \epsilon_i^B \\ \lambda_{i+1}^B \cdot \Delta \nabla \Phi_{i+1}^B = \Delta \nabla \text{Map}^B \cdot \text{RZTD} - \Delta \nabla I_{i+1}^B - \lambda_{i+1}^B \cdot \Delta \nabla N_{i+1}^B + \Delta \nabla \rho^B + \Delta \nabla \epsilon_{i+1}^B \end{cases} \quad (13)$$

第 k 历元参考站 GPS、BDS 求解载波相位模糊度和其他未知参数的方程组为：

$$L = A \cdot Y \quad (14)$$

式中, A 表示待估参数系数矩阵; L 表示常数项; Y 表示待估参数。

利用多历元观测数据对式(14)中的未知参数进行估计。电离层延迟误差随着卫星穿刺点的变化和时间的推移而变化,因此采用参数消去法消去电离层延迟误差参数,主要对整周模糊度参数和对流层延迟误差参数进行估计。首先使用最小二乘法估计双差载波相位整周模糊度浮点解,然后利用模糊度浮点解和方差-协方差矩阵解算双差载波相位整周模糊度。当参考站数量大于两个时,参考站间双差整周模糊度的数值和为零,可利用该闭合条件检验搜索出的双差载波相位整周模糊度结果,以提高载波相位整周模糊度确定的准确性。

2 长距离参考站双差误差分类内插计算

GPS/BDS 长距离网络 RTK 方法实现厘米级定位的关键是通过参考站网计算出的误差改正数削弱流动站观测误差残差的影响,使残差不影响流动站载波相位整周模糊度的准确确定和高精度定位的实现。通常网络 RTK 采用各类观测误差综合处理的方式进行参考站网误差的改正。在长距离的情况下,使用综合误差处理的方式很难精确求出流动站的误差改正数,需要根据误差特性的不同,对双差观测误差进行分类计算。区域观测误差分类内插方法的实现过程如图 1 所示。

图 1 中, A 、 B 、 C 为 3 个参考站, u 为流动站用户,平面 1、2 分别是参考站和流动站所在的平面和中心电离层平面,在各自平面上内插计算流动站双差非色散性误差和双差色散性误差。误差内插面 2 上,点 I_p 、 I_q 为卫星电离层穿刺点,下标 p 、 q 为卫星号。图 2 为双差非色散性误差在误差内插面 1 上的测站分布,其中 X 、 Y 表示参考站和流动站的平面坐标, A 、 B 、 C 、 u 表示测站。

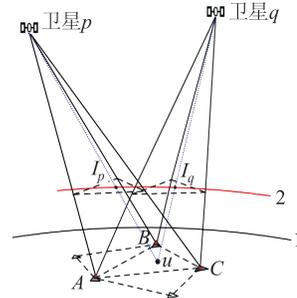


图 1 分类误差内插示意图

Fig.1 Diagram of Classified Error Interpolation

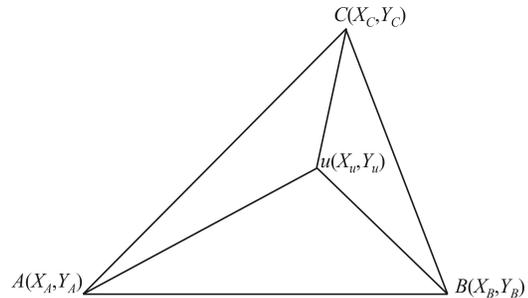


图 2 测站平面分布图

Fig.2 Plane Distribution of Stations

在确定参考站网双差载波相位整周模糊度之后,可以计算出参考站 AB 、 AC 的双差非色散性误差 $\Delta \nabla m_{AB}^S$ 、 $\Delta \nabla m_{AC}^S$,则流动站的双差非色散性误差 $\Delta \nabla m_{Au}^S$ 计算值为：

$$\Delta \nabla m_{Au}^S = \begin{pmatrix} X_u - X_A & Y_u - Y_A \\ X_B - X_A & Y_B - Y_A \\ X_C - X_A & Y_C - Y_A \end{pmatrix}^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \Delta \nabla m_{AB}^S \\ \Delta \nabla m_{AC}^S \end{pmatrix} \quad (15)$$

双差色散性误差的内插计算模型与式(15)一致,不同的是色散性误差内插公式的系数是由参考站、流动站的共视卫星电离层穿刺点处的平面坐标计算得到的。当参考站间载波相位整周模糊度确定之后,计算参考站网的双差电离层延迟误差,并在中心电离层上进行流动站双差电离层延迟误差的内插计算。

3 流动站整周模糊度解算及位置确定

流动站 GPS/BDS 载波相位和伪距双差观测方程分别为：

$$\lambda_i^S \cdot \Delta \nabla \Phi_i^S = \Delta H^S \cdot \delta X + \Delta \nabla \rho^S - \lambda_i^S \cdot \Delta \nabla N_i^S - \Delta \nabla I_i^S + \Delta \nabla T^S + \Delta \nabla \epsilon_i^S \quad (16)$$

$$\Delta \nabla P_i^S = \Delta H^S \cdot \delta X + \Delta \nabla \rho^S + \Delta \nabla I_i^S + \Delta \nabla T^S + \Delta \nabla \epsilon_i^S \quad (17)$$

式中, ΔH^S 表示流动站坐标参数 δX 的系数矩阵。利用长距离参考站网计算流动站 GPS/BDS 观测值的误差改正数, 可以恢复模糊度参数的整数特性, 有利于实现流动站的厘米级定位, 但需准确确定 GPS/BDS 多频载波相位的整周模糊度。各系统宽巷和 L1、B1 载波相位整周模糊度的解算同时进行, 流动站坐标参数和整周模糊度参数解算的观测方程矩阵形式为:

$$\begin{cases} \Delta \nabla L_1^G = \Delta H^G \cdot \delta X + H_N^G \cdot \Delta \nabla N_1^G \\ \Delta \nabla L_1^B = \Delta H^B \cdot \delta X + H_N^B \cdot \Delta \nabla N_1^B \\ \Delta \nabla L_W^G = \Delta H^G \cdot \delta X + H_W^G \cdot \Delta \nabla N_W^G \\ \Delta \nabla L_W^B = \Delta H^B \cdot \delta X + H_W^B \cdot \Delta \nabla N_W^B \end{cases} \quad (18)$$

式中, $\Delta \nabla L$ 表示经过参考站网观测误差改正数改正后的包括几何距离计算值的已知向量; ΔH 表示坐标参数系数矩阵; $\Delta \nabla N$ 表示整周模糊度估计参数向量; H_N 、 H_W 表示相应 $\Delta \nabla N$ 的系数矩阵。下标 W 表示与宽巷模糊度有关, 1 表示与各系统第一频率有关。如果进行流动站单系统定位, 只需将另一个系统的位置参数和模糊度参数的系数矩阵设为 0。采用最小二乘法解算式 (18), 宽巷整周模糊度按照系统不同, 用最小二乘模糊度降相关平差法 (least-square ambiguity decorrelation adjustment, LAMBDA) 分别搜索确定^[20]。利用固定的宽巷整周模糊度约束载波相位整周模糊度参数的解算, 添加到载波相位整周模糊度解算的方程中, 加速载波相位整周模糊度的搜索, 进而计算流动站的位置坐标参数。

长距离 GPS/BDS 网络 RTK 的实现流程如图 3 所示。首先利用参考站网的 GPS/BDS 多频观测数据进行宽巷整周模糊度的计算, 然后通过顾及大气误差的载波相位整周模糊度解算模型解算双差载波相位整周模糊度。宽巷整周模糊度确定之后, 将载波相位整周模糊度间的整数关系添加到参数估计的方程中。将观测误差进行分类处理, 分别计算流动站的电离层延迟误差和非色散性误差, 并改正流动站的 GPS/BDS 观测误差, 使用流动站多频载波相位整周模糊度解算方法确定 GPS/BDS 单系统、双系统的载波相位整周模糊度和位置参数。

GPS/BDS 双系统融合定位需要统一的时空基准^[17], BDS 和 GPS 的时间系统都是原子时, 无

闰秒, 且秒长定义相同, 不同的是系统时间起算点, 除相差 1 356 周外, 还保持 14 s 的系统差, 可根据这两项差异进行时间变换。国家大地坐标系 (China geodetic coordinate system 2000, CGCS2000) 和 WGS-84 的坐标系统构成相同, 只是 4 个参考椭球参数的扁率有微小差异。为了实现两个系统之间的坐标基准统一, 利用参考站网中各参考站 CGCS 和 WGS-84 坐标系统下的已知坐标解算 BDS 和 GPS 的坐标转换参数。如果采用统一轨道后的双系统预报星历, 那么参考站和流动站都不需要进行坐标基准的统一。

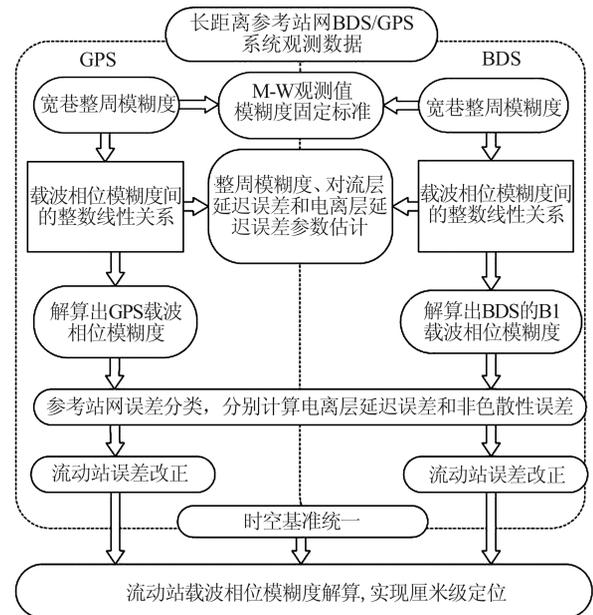


图 3 长距离 GPS/BDS 网络 RTK 流程图
Fig.3 Flowchart of Network RTK Between Long Range with GPS/BDS

4 实验与分析

采用华中地区 3 个参考站 A、B、C 和 1 个流动站 U 的 GPS/BDS 实测数据, 采集时间为 2018-03-31 24 h 的观测数据, 采样率为 1 Hz。参考站间基线 AB、BC、CA 的长度分别是 132 km、154 km、127 km, 测站的地理分布如图 4 所示。

首先计算参考站网 GPS 和 BDS 的宽巷整周模糊度, 以 BDS 的 C14 卫星和 GPS 的 PRN10 卫星 (以 G10 表示) 第一、二频率宽巷模糊度为例, 其计算结果分别如图 5、图 6 所示。从图 5、图 6 的计算结果可知, 利用宽巷整周模糊度计算方法获得的模糊度计算值能够快速收敛, 并能准确确定宽巷整周模糊度。以参考站间基线的双差模糊度数值代数和为 0 作为闭合条件, 对宽巷整周模糊度固定结果进行检验, 进一步提高模糊度固定

的可靠性。M-W组合观测值能够有效消除长距离参考站间观测误差(观测噪声除外)的影响,对于长距离参考站间GPS/BDS宽巷整周模糊度的解算具有很强的适用性。

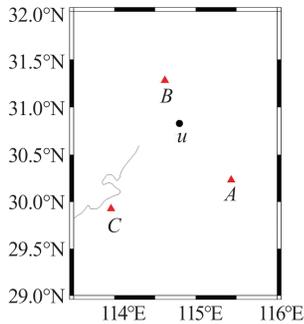


图4 测站地理分布图

Fig.4 Geographical Distribution of Stations

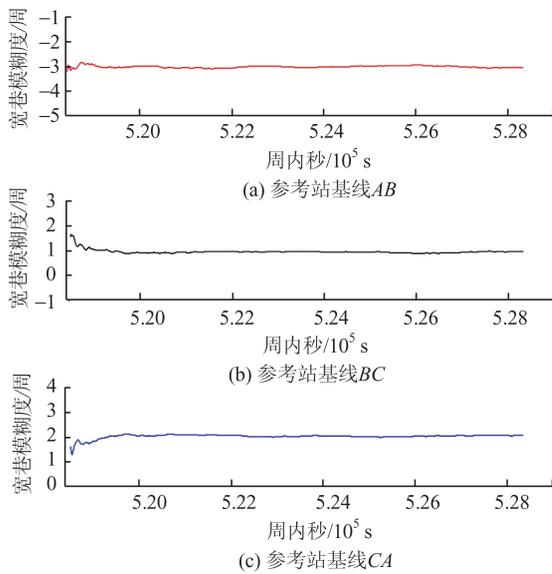


图5 C14卫星宽巷模糊度计算结果

Fig.5 Computed Results of Wide-Lane Ambiguity of C14 Satellite

在宽巷整周模糊度准确确定的情况下,使用引入大气误差参数的载波相位模糊度解算模型可以确定载波相位的整周模糊度,并进行参考站网观测误差的计算,图7~10分别为参考站卫星C14、G10的双差电离层延迟误差和非色散性误差的计算结果。由于C14、G10为中圆轨道卫星,在24h的观测时长中仅有部分时段可见,只有可见时段可以观测到数据,其余不可见时段未观测到数据,因此图7~10中的数据空白部分表示此阶段卫星不可见。由图7~10可见,各误差相邻历元间的变化较小(除基准卫星变换引起的数值抖动外),历元之间以对流层延迟为主的非色散性误差变化量符合正常情况下的对流层变化规

律,说明载波相位整周模糊度的解算正确;双差误差的数值随着双差卫星对的改变而变化,基准卫星变换时不影响流动站的误差改正精度。在参考站网载波相位整周模糊度准确固定的前提下,流动站的误差改正精度不受到测站基准卫星变换的影响,测站间距离和区域观测误差改正模型是影响观测误差改正效果的主要因素。分别选取各系统当前历元中的高度角卫星作为基准卫星,当相邻历元的基准卫星发生变换时,对之前历元的宽巷模糊度计算信息或已固定载波相位整周模糊度的GPS、BDS双差卫星进行基准卫星的变换,并利用当前弧段的观测值继续进行双差整周模糊度的解算。

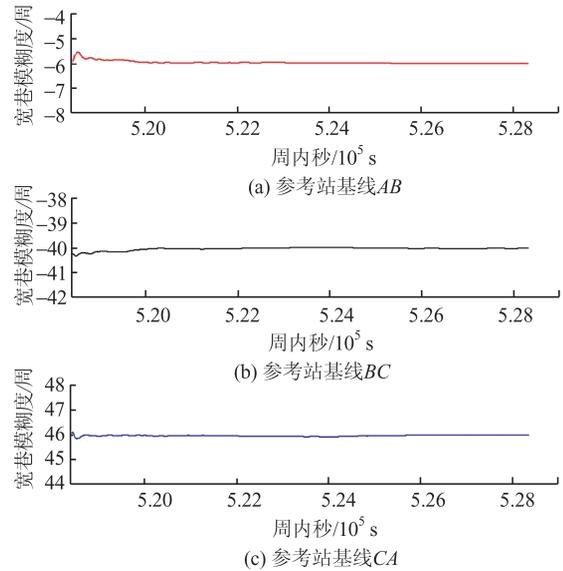


图6 G10卫星宽巷模糊度计算结果

Fig.6 Computed Results of Wide-Lane Ambiguity of G10 Satellite

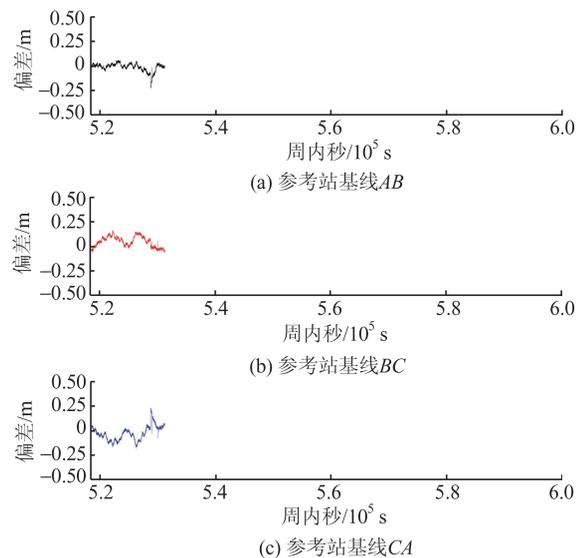


图7 C14卫星电离层延迟误差

Fig.7 Ionospheric Delay Errors of C14 Satellite

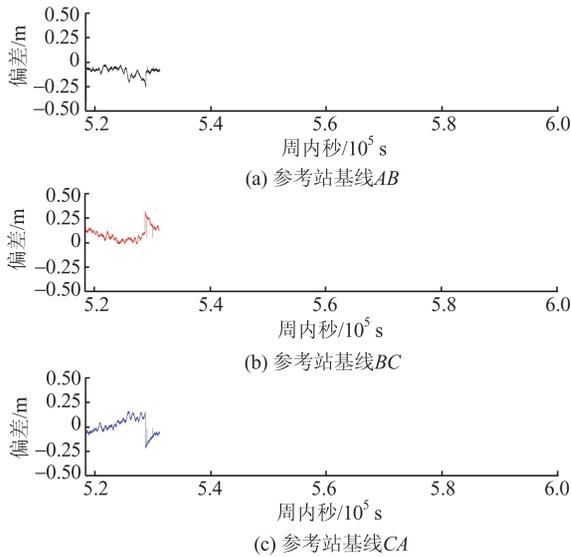


图 8 C14 卫星非色散性误差

Fig.8 Non-dispersive Errors of C14 Satellite

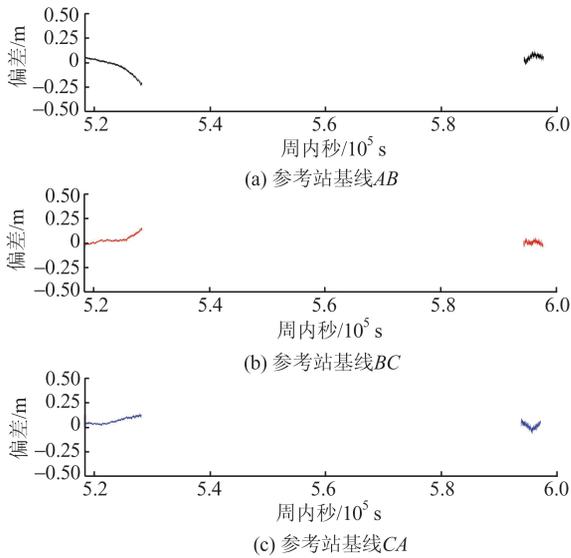


图 9 G10 卫星电离层延迟误差

Fig.9 Ionospheric Delay Errors of G10 Satellite

由于多数历元的大气误差影响大于载波相位半个波长,因此电离层延迟误差和非色散性误差既是影响长距离参考站网载波相位整周模糊度准确解算的主要因素,也是参考站网利用误差改正模型计算流动站观测误差改正信息和解算流动站模糊度时必须考虑的因素。利用§2 的误差分类内插方法,计算流动站的电离层延迟误差和非色散性误差改正数,并对流动站观测值进行改正。使用导航定位数据分析软件(position and navigation data analysist, PANDA)和测站的已知坐标,准确计算出流动站 GPS/BDS 两系统 L1、B1 载波相位的观测误差,对内插出的电离层延迟、非色散性误差改正数总和进行对比。利用综合误差内插法和误差分类内插法得到的卫星

C14、G10 的误差改正数残差分别如图 11、图 12 所示。

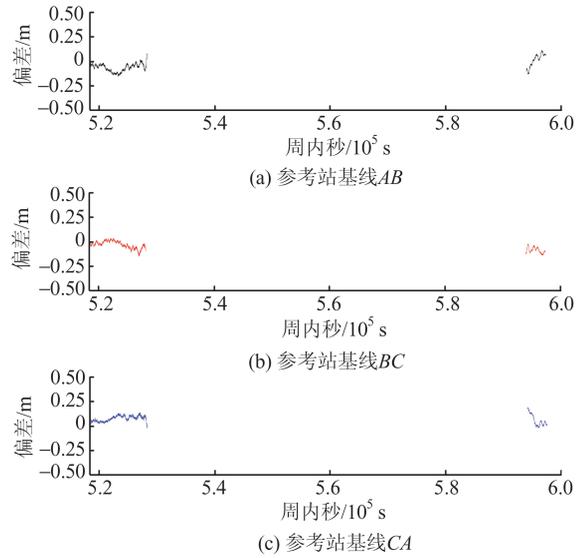


图 10 G10 卫星非色散性误差

Fig.10 Non-dispersive Errors of G10 Satellite

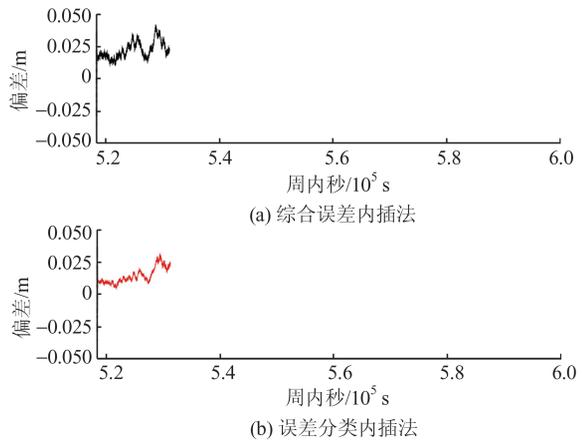


图 11 两种方法的 C14 卫星误差改正数残差

Fig.11 Residuals of Error Correction of C14 Satellite by Two Methods

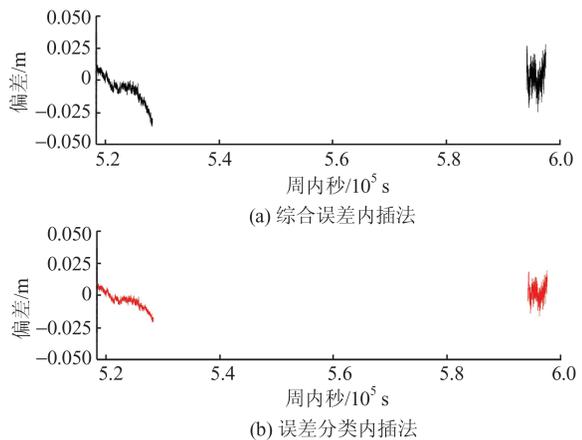


图 12 两种方法的 G10 卫星误差改正数残差

Fig.12 Residuals of Error Correction of G10 Satellite by Two Methods

对于长距离误差计算和改正,使用分类误差内插计算方法单独对中心电离层高度处的电离层延迟误差进行内插计算更符合实际情况。从图11、12的误差改正数残差图可知,虽然两种方法均可获得流动站厘米级精度的误差改正信息,

并能恢复流动站模糊度的整周特性,有利于载波相位整周模糊度的准确解算,但误差分类内插法的精度高于综合误差内插法。对流动站载波相位整周模糊度解算的几种策略进行了实验对比,初始化时间对比结果如表1所示。

表1 不同解算策略的整周模糊度初始化时间/s

Tab.1 Initialization Time of Integer Ambiguity with Different Solution Strategies/s

解算策略	定位系统		
	GPS/BDS	GPS	BDS
先解算宽巷整周模糊度,再解算载波相位整周模糊度	16	27	68
直接估计L1载波相位整周模糊度	—	116	—
直接估计B1载波相位整周模糊度	—	—	201
直接估计L1/B1载波相位整周模糊度	118	—	—

从表1可知,与直接估计流动站L1、B1双差整周模糊度相比,先解算宽巷整周模糊度,再解算载波相位整周模糊度的策略在解算速度上具有明显优势,这是因为多频组合可形成更长波长的虚拟观测值,利用该特性可加快整周模糊度的解算速度,所以建议选择先估计GPS/BDS宽巷整周模糊度、再解算L1、B1双差载波相位整周模糊度的解算策略。

在载波相位整周模糊度解算正确的情况下,流动站观测误差经参考站网误差改正数改正之后,其位置参数解算的精度直观反映了参考站网观测误差的改正数是否可靠。使用GPS/BDS两系统L1/B1载波相位观测值解算坐标参数,计算出流动站BDS、GPS单系统、GPS/BDS双系统的定位结果与已知坐标在东(east, E)、北(north, N)、高程(up, U)方向的差值,结果分别如图13~15所示。

从图13~15的定位结果差值可以看出,长距离GPS/BDS网络RTK方法解算出的流动站坐标与流动站已知的准确坐标在E、N、U3个坐标分量上的差值均为厘米级。BDS、GPS、GPS/BDS定位结果差值的均方根(root mean square, RMS)如表2所示。

由上述实验结果可以看出,长距离参考站网GPS/BDS双系统网络RTK方法可以有效消除流动站GPS、BDS的观测误差。3种模式下流动站的定位精度都达到了厘米级,GPS的定位精度整体优于BDS的定位精度。且从表1中可以看出,双系统融合的模糊度解算时间相对于单系统有所缩短,可见GPS/BDS双系统融合有利于加快流动站模糊度的解算速度。

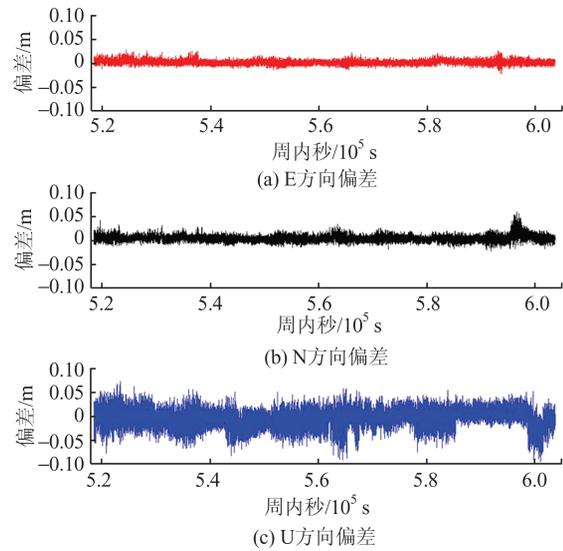


图13 BDS定位结果差值

Fig.13 Errors of BDS Positioning

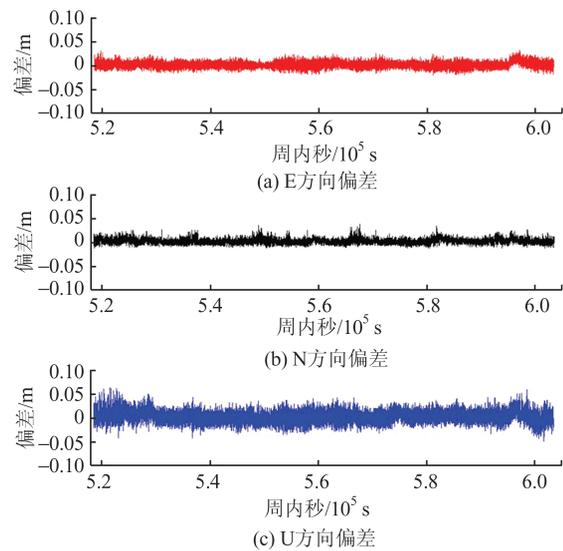


图14 GPS定位结果差值

Fig.14 Errors of GPS Positioning

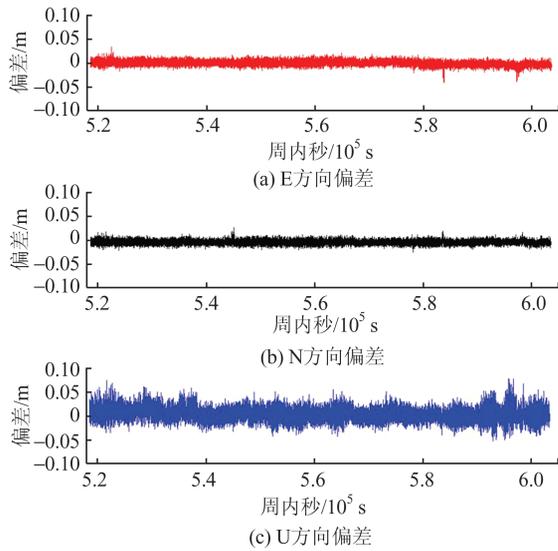


图 15 BDS/GPS 定位结果差值

Fig.15 Errors of BDS/GPS Positioning

表 2 定位结果差值的 RMS/m

Tab.2 RMS of Positioning Errors/m

定位系统	E 分量	N 分量	U 分量
BDS	0.010	0.014	0.035
GPS	0.013	0.009	0.028
GPS/BDS	0.011	0.010	0.030

5 结 语

本文研究了一种基于长距离参考站网的 GPS/BDS 双系统网络 RTK 方法,并使用长距离 CORS 网观测数据对该方法进行了实验验证和结果分析。首先采用长距离参考站网 GPS/BDS 多频伪距和载波相位观测数据计算和确定双差宽巷整周模糊度,然后利用包含大气延迟误差参数的模糊度解算模型准确解算出 GPS/BDS 双系统的多频载波相位整周模糊度。使用参考站网观测误差分类内插法,按照观测误差特性不同分别计算出流动站的色散性误差和以对流层延迟误差为主的非色散性误差。分类误差内插法更符合长距离参考站网误差改正的特点,能够恢复流动站 GPS/BDS 载波相位模糊度的整数特性,进而完成 GPS/BDS 双系统载波相位整周模糊度的准确解算,最终实现流动站位置的高精度解算。实验结果表明,长距离 GPS/BDS 双系统网络 RTK 定位方法可以实现 GPS/BDS 单系统、双系统的厘米级定位。本文在 GPS/BDS 双系统融合定位时,对 GPS、BDS 卫星都是按照高度角进行权值的确定,未考虑系统性能和各卫星观测数据质量等方面的差异,下一步将着重研究双系统网

络 RTK 定位中各类卫星权值的优化分配算法。

参 考 文 献

[1] Geng J, Guo J, Chang H, et al. Toward Global Instantaneous Decimeter-level Positioning Using Tightly Coupled Multi-constellation and Multi-frequency GNSS[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(7): 977-991

[2] Gao Xingwei, Chen Ruizhi, Zhao Chunmei. A Network RTK Algorithm and Its Test [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(11): 1 350-1 353(高星伟,陈锐志,赵春梅. 网络 RTK 算法研究与实验[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(11): 1 350-1 353)

[3] Zou X, Wang Y, Deng C, et al. Instantaneous BDS+GPS Undifferenced NRTK Positioning with Dynamic Atmospheric Constraints [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(1): 1-17

[4] Zhu Huizhong. The Study of GNSS Network RTK Algorithm Between Long Range at Single Epoch Using Un-difference Error Corrections[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012(祝会忠. 基于非差误差改正数的长距离单历元 GNSS 网络 RTK 算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012)

[5] An Xiangdong, Chen Hua, Jiang Weiping, et al. GLONASS Ambiguity Resolution Method Based on Long Baselines and Experimental Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(5): 690-698(安向东,陈华,姜卫平,等. 长基线 GLONASS 模糊度固定方法及实验分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(5): 690-698)

[6] Yi Zhonghai, Chen Yuanjun. An Improved GPS Fast Ambiguity Resolution Algorithm with Epoch-Differenced Coordinate Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 489-494(易重海,陈源军. 顾及历元间坐标差信息的 GPS 模糊度快速固定改进方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(4): 489-494)

[7] Zhu Huizhong, Liu Jingnan, Tang Weiming, et al. An Algorithm of Instantaneous Double Difference Ambiguity Resolution for Long-Range Reference Stations of Network RTK [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(6): 688-692(祝会忠,刘经南,唐卫明,等. 长距离网络 RTK 参考站间双差模糊度快速解算算法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(6): 688-692)

[8] Zhang Shaocheng. The GPS/GLONASS Integrated CORS Network Atmosphere Modeling and RTK Algorithm Implementation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010(张绍成. 基于 GPS/GLONASS 集成的

- CROS网络大气建模与RTK算法实现[D]. 武汉: 武汉大学, 2010)
- [9] Tang Weiming, Liu Jingnan, Shi Chuang, et al. Three Steps Method to Determine Double Difference Ambiguities Resolution of Network RTK Reference Station [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(4): 305-308(唐卫明, 刘经南, 施闯, 等. 三步法确定网络RTK基准站双差模糊度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(4): 305-308)
- [10] Zhang M, Liu H, Bai Z. Fast Ambiguity Resolution for Long-Range Reference Station Networks with Ionospheric Model Constraint Method [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(2): 617-626
- [11] Lou Y, Gong X, Gu S, et al. Assessment of Code Bias Variations of BDS Triple-Frequency Signals and Their Impacts on Ambiguity Resolution for Long Baselines [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(1): 177-186
- [12] Li B, Shen Y, Feng Y, et al. GNSS Ambiguity Resolution with Controllable Failure Rate for Long Baseline Network RTK [J]. *Journal of Geodesy*, 2014, 88(2): 99-112
- [13] Gao Wang, Gao Chengfa, Pan Shuguo, et al. Fast Ambiguity Resolution Between GPS/GLONASS/BDS Combined Long-Range Base Stations Based on Partial-Fixing Strategy [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(4): 558-562(高旺, 高成发, 潘树国, 等. 基于部分固定策略的多系统长距离基准站间模糊度快速解算[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(4): 558-562)
- [14] Yao Yibin, Hu Mingxian, Xu Chaoqian. Positioning Accuracy Analysis of GPS/BDS/GLONASS Network RTK Based on DREAMNET [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2016, 45(9): 1 009-1 018(姚宜斌, 胡明贤, 许超钤. 基于DREAMNET的GPS/BDS/GLONASS多系统网络RTK定位性能分析[J]. 测绘学报, 2016, 45(9): 1 009-1 018)
- [15] Gao Yangjun, Lü Zhiwei, Zhou Pengjin, et al. Adaptive Robust Filtering Algorithm for BDS Medium and Long Base Line Three Carrier Ambiguity Resolution [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2019, 48(3): 295-302(高扬俊, 吕志伟, 周朋进, 等. 北斗中长基线三频模糊度解算的自适应抗差滤波算法[J]. 测绘学报, 2019, 48(3): 295-302)
- [16] Gao Meng, Xu Aigong, Zhu Huizhong, et al. Ambiguity Resolution Method for Three-frequency Whole-Cycle of BDS Network RTK Reference Station [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2017, 46(4): 442-452(高猛, 徐爱功, 祝会忠, 等. BDS网络RTK参考站三频整周模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2017, 46(4): 442-452)
- [17] Zhu Huizhong, Li Jun, Yu Zeran, et al. The Algorithm of Multi-frequency Carrier Phase Integer Ambiguity Resolution with GPS/BDS Between Long Range Network RTK Reference Stations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2020, 49(3): 300-311(祝会忠, 李军, 蔚泽然, 等. 长距离GPS/BDS参考站网多频载波相位整周模糊度解算方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(3): 300-311)
- [18] Ge M, Gendt G, Rothacher M. Resolution of GPS Carrier-phase Ambiguities in Precise Point Positioning (PPP) with Daily Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(7): 389-399
- [19] Yao Y, Sun Z, Xu C, et al. Development and Assessment of the Atmospheric Pressure Vertical Correction Model with ERA-Interim and Radiosonde Data [J]. *Earth and Space Science*, 2018, 5(11): 777-789
- [20] Teunissen P J. A Canonical Theory for Short GPS Baselines Part II: The Ambiguity Precision and Correlation [J]. *Journal of Geodesy*, 1997, 71(7): 389-401

A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range

ZHU Huizhong¹ LU Yangyang¹ XU Aigong¹ LI Jun¹

¹ School of Geomatics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China

Abstract: The uncertainty of distance-related error of global navigation satellite system is gradually increasing with the increase of distance between the reference stations and the rover station. Therefore, the dual-systems of global positioning system (GPS) and BeiDou satellite navigation system (BDS) network real-time

kinematic (RTK) method was presented to meet the demand of high-precision long range positioning RTK. Firstly, the wide-lane ambiguities were fixed by the multi-frequency observation data of GPS and BDS between long-range reference stations. The satellite clock errors can be eliminated by the double-difference solution model, simultaneously the atmospheric error and satellite orbit errors can be weakened. Then the double-difference carrier phase integer ambiguities can be fixed by the resolution model including atmospheric error and carrier phase ambiguity. The method of classification error corrections between long-range reference stations network was used. The observation errors were classified, according to the characteristics of observation errors between long-range reference station network. The ionosphere errors and non-dispersive errors of the rover station were calculated by using the reference stations' error correction and regional error interpolation. The atmospheric errors and satellite orbit errors of the rover station can be weakened by the method of interpolation. Then the errors of GPS/BDS carrier phase observation of the rover station were removed by the calculation errors. The carrier phase integer ambiguities of the rover station can be fixed by the method of resolution integer ambiguity with multi-frequency carrier phase, and the position of the rover station was obtained by the fixed ambiguities. The algorithm validation was carried out by the data on long-range reference station network. Three long-range reference stations and one rover station were used to test in Central China. The positioning accuracy of centimeter can be obtained by the algorithm of dual-systems of GPS and BDS network RTK. At the same time, single system can also get the centimeter level of position and the GPS is better than BDS. The method of dual-systems of GPS and BDS network RTK can guarantee the positioning accuracy of the rover station. The results of experiment indicate that the GPS/BDS long-range network RTK can be realized and the centimeter level positioning accuracy can be achieved by this algorithm.

Key words: GPS; BDS; long-range network RTK; integer ambiguity; error correction

First author: ZHU Huizhong, PhD, associate professor, specializes in GNSS high-precision positioning. E-mail: zhuhuizhong@whu.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (42074012, 42030109); Liaoning Key Research and Development Program (2020JH2/10100044).

引文格式: ZHU Huizhong, LU Yangyang, XU Aigong, et al. A Network Real-Time Kinematic Method for GPS and BDS Double Systems Between Long Range[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2):252-261. DOI:10.13203/j.whugis20190352 (祝会忠, 路阳阳, 徐爱功, 等. 长距离 GPS/BDS 双系统网络 RTK 方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2):252-261. DOI:10.13203/j.whugis20190352)

.....
(上接第 251 页)

clock error is used to verify it. The results show that the proposed algorithm can accurately detect the AO of the clock error sequence, and has good effects in the short-term prediction of satellite clock errors.

Key words: ARMA model; outliers detection; short-term prediction; ridge estimator; satellite clock error prediction

First author: HAN Songhui, PhD, associate professor, specializes in processing of surveying and navigation data. E-mail: hansonghui@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China (41774038, 41474009); Information Engineering University Double Important Construction Project.

引文格式: HAN Songhui, GONG Yisong, LI Jianwen, et al. Outliers Detection in BDS Satellite Clock Errors by Using ARMA Model and Corresponding Short-Term Prediction[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(2): 244-251, 261. DOI:10.13203/j.whugis20190232 (韩松辉, 宫轶松, 李建文, 等. 基于 ARMA 模型的 BDS 卫星钟差异常值探测及其短期预报[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(2):244-251, 261. DOI:10.13203/j.whugis20190232)