

基于多接收机模糊度关联的动态 PPP 快速重新收敛方法

宋 超¹ 郝金明¹

1 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州,450001

摘 要:针对由于遮挡等原因造成卫星信号中断后精密单点定位(precise point positioning, PPP)需要重新收敛的问题,提出了一种基于多接收机模糊度关联的动态 PPP 快速重新收敛方法。以远海地区精密定位为背景,充分利用了远海地区实践中经常在不同位置上架设多台接收机的基本特点,建立不同接收机的模糊度之间的关系,获取发生数据中断的接收机的先验模糊度,进而完成动态 PPP 的快速重新收敛。实验结果表明,附加基线长度约束的两个接收机单历元固定双差模糊度的成功率在 99% 以上;在单历元固定双差模糊度的情况下,无论数据中断多长时间,所提算法都可以单历元完成动态 PPP 的重新收敛,并且收敛后的定位精度同数据中断前的定位精度相同。

关键词:动态 PPP;重新收敛;双差模糊度;基线长度约束;先验模糊度

中图法分类号:P228 **文献标志码:**A

随着人类活动范围的逐渐拓展,远海地区的精密定位越来越重要,在海洋资源勘探、航道测量等方面发挥着重要的作用。相对陆地和近海地区精密定位,远海地区精密定位最大的劣势是没有基准站可以使用。这就意味着经典的实时动态定位(real-time kinematic, RTK)、网络 RTK、参考站增强精密单点定位^[1](precise point positioning, PPP)等都将无法应用。目前在全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)领域,比较可靠的手段就是 PPP^[2]。

PPP 利用精密卫星轨道和精密卫星钟差,并使用单台 GNSS 接收机采集的载波相位和伪距观测值进行定位解算。PPP 利用单台双频接收机的观测数据在全球范围内的任意位置都可以实现厘米至分米的动态定位精度,是实现全球精密实时动态定位与导航的关键技术,具有广阔的应用前景。但是 PPP 有两个问题无法绕开,一是首次收敛的问题,二是重新收敛的问题。针对首次收敛的问题,可以采取提前开机的方法,比如在测量任务前 2 h 开机,利用前 2 h 的观测数据完成首次收敛。重新收敛问题,特别是频繁需要重新收敛的情况,目前依然是 PPP 研究中的热点。

针对 PPP 的重新收敛,众多学者进行了许多研究。文献[3-5]通过精化各项误差源,求解模糊度变化的浮点解并进一步固定为整数。文献[6-7]通过预报电离层延迟误差精确估计模糊度的变化。文献[8]利用多普勒观测值来辅助确定模糊度变化。文献[9]利用贝叶斯理论来确定模糊度变化大小。文献[10]利用惯性设备辅助确定模糊度变化。文献[11]利用多个参考站播发的增强信息加快 PPP 的收敛。文献[11-13]将自适应选权滤波应用到参数估计中,合理地选取未知参数及其方差协方差阵的初值来加快收敛。文献[14]通过改正电离层的高阶项来加快 PPP 的收敛速度。文献[15-16]使用多个卫星导航系统的数据加快 PPP 的收敛。

上述方法各有优点,在应用中取得了较好的效果。经过分析发现,这些方法均主要依托单个接收机的数据来完成重新收敛。

一般而言,PPP 需要重新收敛主要是因为发生了周跳或者发生了信号中断。无论是发生了周跳还是发生了信号中断,其本质上都是模糊度发生了变化。为表达方便,本文统一使用数据中断的表述。

为了防止单个接收机故障造成无法定位,在实践应用中测量工作者往往会在测量船的不同位

置上架设多台接收机,以便彼此作为备份。由于不同接收机的天线架设在测量船的不同位置,也就是说不同接收机的观测环境不完全一致,比如船体对天线的遮挡情况就不完全一致。船体的遮挡情况不一样不同接收机发生数据中断就不一定在同一时刻。分析测量船上的多个接收机的实测数据发现,经常会出现如图 1 所示的情况。

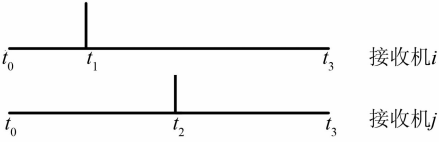


图 1 数据中断示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Data Interruption

如图 1 所示,两个接收机同时在 t_0 时刻开始采集数据,接收机 i 在 t_1 时刻发生数据中断,接收机 j 在 t_2 时刻发生数据中断。换句话说,两个接收机发生数据中断并不在同一时刻,本文正是利用这一特点来完成 PPP 的重新收敛。

1 PPP 快速重新收敛基本思路

GPS 测量的非差观测方程为^[17]:

$$\begin{aligned} \Phi_{g,i}^k &= \rho_i^k + c(\delta t_i - \delta t^k) - \frac{\mu_i^k}{f_g^2} + T_{\text{trop}} + \\ &\lambda_g N_{g,i}^k + \epsilon_{g,i}^k \end{aligned} \tag{1}$$

$$P_{g,i}^k = \rho_i^k + c(\delta t_i - \delta t^k) + \frac{\mu_i^k}{f_g^2} + T_{\text{trop}} + e_{g,i}^k \tag{2}$$

其中, $P_{g,i}^k$ 和 $\Phi_{g,i}^k$ 分别表示卫星 k 和接收机 i 之间的伪距观测量和载波相位观测量; g 表示频率, $g=1,2$; ρ_i^k 表示卫星天线相位中心和接收机天线相位中心之间的距离; δt_i 和 δt^k 分别表示接收机钟差和卫星钟差; $\frac{\mu_i^k}{f_g^2}$ 表示一阶电离层延迟; T_{trop} 表示对流层延迟; λ_g 表示波长; $N_{g,i}^k$ 表示模糊度; $e_{g,i}^k$ 和 $\epsilon_{g,i}^k$ 分别表示模型的残余误差。

PPP 快速重新收敛本质上是建立数据中断前后的模糊度之间的关系。如图 1 所示,从时间角度看, $t_0 < t_1 < t_2 < t_3$ 。假设接收机 i, j 在 t_0 时刻已完成首次收敛,接收机 i 在 t_1 时刻、接收机 j 在 t_2 时刻大多数卫星发生数据中断,所以接收机 i 在 t_1 时刻、接收机 j 在 t_2 时刻需要进行 PPP 的重新收敛。事实上,接收机 i 在 t_1 时刻需要进行 PPP 的重新收敛时,接收机 j 在 t_1 时刻的模糊度并没有发生变化。如果在 t_1 时刻可以建立接收机 i 和接收机 j 的模糊度之间的关系,那么可以将接收机 j 在 t_1 时刻的准确模糊度传递给接收

机 i , 这样,接收机 i 就可以在 t_1 时刻瞬间完成重新收敛。当接收机 i 接收传来的准确模糊度后,自己就可以瞬间完成收敛,所以在 t_1 时刻之后接收机 i 的模糊度是准确的。同理,当接收机 j 在 t_2 时刻需要进行 PPP 的重新收敛时,接收机 i 在 t_2 时刻的模糊度是准确的。如果在 t_2 时刻可以建立接收机 i 和接收机 j 的模糊度之间的关系,那么可以将接收机 i 在 t_2 时刻的准确模糊度传递给接收机 j , 这样,接收机 j 就可以在 t_2 时刻瞬间完成重新收敛。

2 快速重新收敛基本处理策略

本节首先建立不同接收机的模糊度之间的关系,然后获得数据中断的接收机的准确模糊度并完成 PPP 的重新收敛。

2.1 两个接收机的模糊度之间的关系

对于测量船上两个接收机的模糊度之间的关系,首先考虑的方法是传统的 RTK 方法。不同的是传统的 RTK 的基准站是固定的,而测量船上的两个接收机都在运动,无法选取基准站。但是,两个接收机都在运动并不影响获取两个接收机的模糊度之间的关系。参考传统的 RTK,以单点定位坐标作为基准站的坐标,双差模型为:

$$\begin{aligned} \nabla \Phi_{g,ij}^{kl} &= \nabla \rho_{ij}^{kl} - \frac{\nabla \mu_{ij}^{kl}}{f_g^2} + \nabla T_{\text{trop}} + \\ &\lambda_g \nabla N_{g,ij}^{kl} + \epsilon_{g,ij}^{kl} \end{aligned} \tag{3}$$

$$\nabla P_{g,ij}^{kl} = \nabla \rho_{ij}^{kl} + \frac{\nabla \mu_{ij}^{kl}}{f_g^2} + \nabla T_{\text{trop}} + e_{g,ij}^{kl} \tag{4}$$

式中, ∇ 表示双差算子; 其余符号参考式(1)、(2)。考虑到两个接收机距离较近,电离层和对流层误差可以忽略,双差模型可以简化为:

$$\nabla \Phi_{g,ij}^{kl} = \nabla \rho_{ij}^{kl} + \lambda_g \nabla N_{g,ij}^{kl} + \epsilon_{g,ij}^{kl} \tag{5}$$

$$\nabla P_{g,ij}^{kl} = \nabla \rho_{ij}^{kl} + e_{g,ij}^{kl} \tag{6}$$

此外,由于两个接收机是固定在船上的,所以两个接收机之间的距离是常数。可以将两者之间的距离作为一个约束条件进行联合解算:

$$\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2} = \text{const} \tag{7}$$

式中, (x_i, y_i, z_i) 、 (x_j, y_j, z_j) 分别表示两个接收机的坐标; const 表示两个接收机之间的距离,可以通过事先测量的方式获得,是已知参数。后文的实验会证明,该约束条件对固定双差模糊度非常有效。

参考传统的 RTK 方法,利用 LAMBDA 方法^[18]可以获取两个接收机之间的双差模糊度。

由于测量船上的船体长度有限,即两个接收机之间的距离比较短,利用 LAMBDA 方法并附加式(7)的外部约束,成功固定双差模糊度的概率非常高,这为模糊度的传递奠定了坚实的基础。

2.2 数据中断的接收机的先验模糊度获取

§ 2.1 建立了两个接收机的双差模糊度之间的关系,这个模糊度是整数模糊度,而 PPP 由于一般使用消电离层组合,其模糊度是消电离层组合模糊度。两者之间的关系是:

$$\nabla N_{nc,ij}^{kl} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \nabla N_{1,ij}^{kl} - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \nabla N_{2,ij}^{kl}$$
(8)

式中, $\nabla N_{nc,ij}^{kl}$ 表示接收机*i*和接收机*j*在卫星*k*和卫星*l*之间的双差消电离层组合模糊度,下标*nc*表示消电离层组合; $\nabla N_{1,ij}^{kl}$ 和 $\nabla N_{2,ij}^{kl}$ 分别表示在频率*L*₁和*L*₂上的双差整数模糊度,已经在§ 2.1 中求解出。

利用式(8)获得了两个接收机的双差消电离层组合模糊度。假设接收机*i*发生了数据中断,接收机*j*没有发生中断,即图 1 所示的*t*₁时刻的情况,这时接收机*j*的模糊度 $\Delta N_{nc,j}^{kl}$ 是准确的。接收机*i*的单差消电离层组合模糊度表示为:

$$\Delta N_{nc,i}^{kl} = \Delta N_{nc,j}^{kl} + \nabla N_{nc,ij}^{kl}$$
(9)

其中, Δ 表示单差算子; $\Delta N_{nc,i}^{kl}$ 表示接收机*i*在卫星*k*和卫星*l*之间的单差消电离层组合模糊度; $\Delta N_{nc,j}^{kl}$ 类似。

至此,发生数据中断的接收机*i*的单差消电离层组合模糊度 $\Delta N_{nc,i}^{kl}$ 已准确求出,可以作为先验值参与解算。

2.3 PPP 快速重新收敛

由于上文获取的是单差消电离层组合模糊度,所以 PPP 解算采用星间单差模型,观测方程为:

$$\Delta \Phi_{nc,i}^{kl} = \Delta \rho_i^{kl} - c \Delta \delta t^{kl} + \Delta T_{trop}^{kl} + \lambda \Delta N_{nc,i}^{kl} + \epsilon_i^{kl}$$
(10)

$$\Delta P_{nc,i}^{kl} = \Delta \rho_i^{kl} - c \Delta \delta t^{kl} + \Delta T_{trop}^{kl} + e_i^{kl}$$
(11)

由于单差消电离层组合模糊度已经事先获得,式(10)可以化为:

$$\Delta \Phi_{nc,i}^{kl} - \lambda \tilde{\Delta N}_{nc,i}^{kl} = \Delta \rho_i^{kl} - c \Delta \delta t^{kl} + \Delta T_{trop}^{kl} + \epsilon_i^{kl}$$
(12)

式中, $\tilde{\Delta N}_{nc,i}^{kl}$ 表示获取的先验单差消电离层组合模糊度。

在式(12)中,待估参数有 4 个,分别是 3 个位置参数和 1 个对流层延迟参数。也就是说,只要有 4 个或 4 个以上的方程就可以解算出待估参数,然后通过 Kalman 滤波就可以获得待估参数的值。

3 实验验证

为了验证本文的算法,拟采用船载数据,船上有两个接收机,两个天线相距约 12 m,数据采样间隔是 1 s。该数据在近海采集,利用岸边的基准站进行 RTK,作为比对标准来验证动态 PPP 重新收敛效果。

3.1 双差模糊度快速固定

两个接收机的双差模糊度的快速确定对于 PPP 快速重新收敛至关重要。根据 § 2 的方法,具体处理参数设置如表 1 所示。

表 1 双差模糊度固定参数设置
Tab. 1 Parameter Settings for Fixing Double-Differenced Ambiguity

参数	处理策略
对流层误差	忽略
电离层误差	忽略
卫星星历	广播星历
高度截止角	15°
固定模糊度策略	单历元固定
固定模糊度的 ratio 值	3

固定模糊度策略采用的单历元固定表示固定模糊度时仅采用了当前历元的观测量,与上一历元和下一历元的观测数据没有关系。固定模糊度时采用经典的 LAMBDA 方法,该方法主要参考指标是 ratio 值, ratio 值越大表明固定效果越可靠。

双差模糊度固定情况如图 2 所示,经统计双差模糊度固定成功率为 99.6 %。

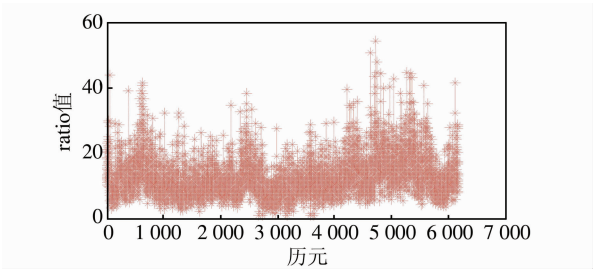


图 2 双差模糊度固定的 ratio 值
Fig. 2 Ratio Value of Fixing Double-Differenced Ambiguity

为了进一步验证单历元数据固定双差模糊度的效果,本文给出了固定双差模糊度后计算的基线长度(见图 3)。从图 3 中可以看出,绝大多数历元计算的基线长度都正确,仅有 1 个历元计算的基线长度有问题,这是因为对应的 ratio 值小于 3,模糊度没有固定,使用的是浮点解。

总而言之,附加基线长度约束的单历元数据

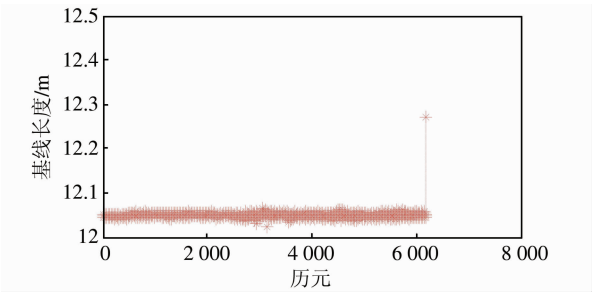


图 3 基线长度
Fig. 3 Length of Baseline

固定双差模糊度具有非常高的固定成功率,为 PPP 快速重新收敛打下了坚实的基础。

3.2 先验模糊度辅助 PPP 快速重新收敛实验

获取两个接收机的双差模糊度后,进而可以获得发生数据中断的接收机的先验单差消电离层组合模糊度,利用该先验模糊度可以完成 PPP 的快速重新收敛。

为了验证本文方法的有效性,假设从第 1 000 个历元开始每隔 20 min 所有卫星发生数据中断,即对所有卫星人为地添加周跳,模拟数据中断的情况。本文设计了两个方案:①方案 1。不利用先验模糊度辅助,PPP 按照传统方法进行收敛,此方案作为对照组;②方案 2。使用本文方法,即利用先验模糊度辅助 PPP 收敛。

方案 1 和方案 2 的定位误差结果分别如图 4、图 5 所示。从图 4 中可以看出,由于发生了数据中断,模糊度需要一定的时间重新收敛。在第一次数据中断(第 1 000 个历元处)时,方案 1 大约花了将近 600 个历元(将近 10 min)才将数据中断后的精度损失降低到较小的程度。此后,每次重新收敛都用去了十几分钟的时间。然而从图 5 中可以看出,方案 2 定位误差一直很稳定,平面误差保持在厘米至分米的水平上,高程误差在

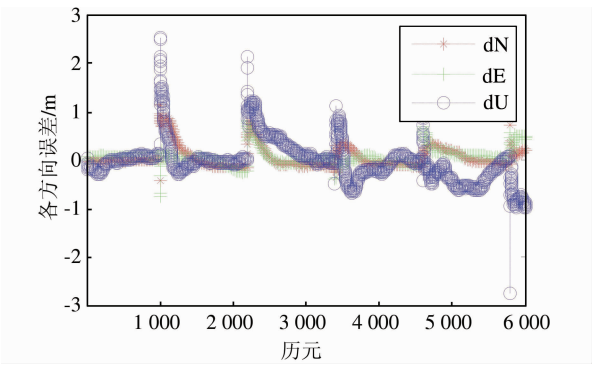


图 4 方案 1 的重新收敛效果
Fig. 4 Re-convergence Effect of Scheme 1

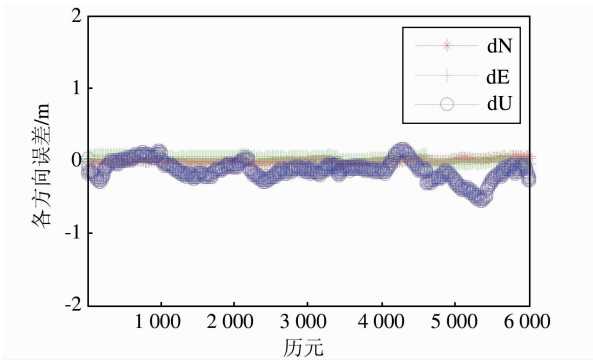


图 5 方案 2 的重新收敛效果
Fig. 5 Re-convergence Effect of Scheme 2

分米级别上,尤其在每次数据中断处没有发生剧烈的精度下降,整体上没有受到数据中断的影响,说明本文的重新收敛算法效果较好。

通过上文对比实验可以看出,只要双差模糊度成功固定,本文方法就可以瞬间完成动态 PPP 的重新收敛,而且收敛后的定位精度没有损失。而对于距离较近的两个接收机,单历元数据可以保持 99% 以上的固定成功率。综上,本文的方法可以瞬间完成动态 PPP 的重新收敛,而且定位精度不会损失。

4 结 语

本文提出了基于多接收机模糊度关联的实时动态 PPP 快速重新收敛方法。该方法从远海地区精密定位的实际情况出发,充分利用了测量船上有多个接收机的特点,建立了多个接收机的双差模糊度的关系。附加基线长度约束的单历元数据固定双差模糊度具有 99% 以上的成功率。在双差模糊度固定的条件下,本文方法可以单历元完成动态 PPP 的重新收敛,而且不会损失定位精度。本文方法在求解双差模糊度过程中仅仅利用了单历元数据,完全可以应用于实时动态 PPP 的重新收敛。而且无论数据中断多久,只要双差模糊度成功固定就可以单历元完成动态 PPP 的重新收敛。

本文的假设是不同的接收机不同时发生数据中断。一般来讲,对于架设在测量船不同位置的接收机而言,本文假设是成立的。但是,如果发生不同接收机同时中断的情况,本文方法就会失效。所以为了防止失效,在不同接收机架设时需要充分考虑船体的遮挡,避免发生同时被遮挡的情况。此外,增加接收机数目是一个改进措施,比如从 2 个接收机增加到 3 个,甚至 4 个。因为接收机数目越多,分布的位置越分散,所有接收机同时被遮挡的

概率就越低。只要有 1 个接收机没有被遮挡,本文方法就有效。

致谢:感谢中国科学院测量与地球物理研究所柴艳菊女士在船载数据方面给予的支持。

参 考 文 献

- [1] Li X, Zhang X, Ge M. Regional Reference Network Augmented Precise Point Positioning for Instantaneous Ambiguity Resolution[J]. *Journal of Geodesy*, 2011, 85(3): 151-158
- [2] Zumberge J F, Hefflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1997, 102(B3): 5 005-5 017
- [3] Banville S, Langley R B. Improving Real-Time Kinematic PPP with Instantaneous Cycle-Slip Correction [C]. ION GNSS, Savannah, Georgia, USA, 2009
- [4] Banville S, Langley R B. Mitigating the Impact of Ionospheric Cycle Slips in GNSS Observations [J]. *Journal of Geodesy*, 2013, 87(2): 179-193
- [5] Li X, Zhang X. Instantaneous Re-initialization in Real-Time Kinematic PPP With Cycle Slip Fixing [J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 315-327
- [6] Geng J, Meng X, Dodson A H, et al. Rapid Re-Convergences to Ambiguity-Fixed Solutions in Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 2010, 84(12): 705-714
- [7] Ding Wenwu, Ou Jikun, Li Zishen, et al. Instantaneous Re-initialization Method of Real Time Kinematic PPP by Adding Ionospheric Delay Constraints [J]. *Chinese J Geophys*, 2014, 57(6): 1 720-1 731 (丁文武, 欧吉坤, 李子申, 等. 附加电离层延迟约束的实时动态 PPP 快速重新初始化方法[J]. 地球物理学报, 2014, (6): 1 720-1 731)
- [8] Ding Wenwu, Ou Jikun. Instantaneous Re-initialization of Real Time Kinematic PPP by Adding Doppler Observation [J]. *Journal of Astronautics*, 2013, 34(6): 795-800 (丁文武, 欧吉坤. 增加 Doppler 观测值实现实时动态 PPP 快速重新初始化[J]. 宇航学报, 2013, 34(6): 795-800)
- [9] de Lacy M C, Reguzzoni M, Sansò F, et al. The Bayesian Detection of Discontinuities in a Polynomial Regression and Its Application to the Cycle-Slip Problem [J]. *Journal of Geodesy*, 2008, 82(9): 527-542
- [10] Du S, Gao Y. Inertial Aided Cycle Slip Detection and Identification for Integrated PPP GPS and INS [J]. *Sensors*, 2012, 12(11): 14 344-14 362
- [11] Zheng Yanli, Liu Jingnan, Song Weiwei, et al. PPP Rapid Convergence Algorithm Based on Regional Enhanced Information [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2012(4): 111-115 (郑艳丽, 刘经南, 宋伟伟, 等. 基于区域增强信息的 PPP 的快速收敛算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2012(4): 111-115)
- [12] Hao Ming, Ou Jikun, Guo Jianfeng, et al. A New Method for Improvement of Convergence in Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 902-905 (郝明, 欧吉坤, 郭建锋, 等. 一种加速精密单点定位收敛的新方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(10): 902-905)
- [13] Hao Ming, Wang Qingliang, Cui Duxin. Study on Fast Convergence Method in Precise Point Positioning [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009(2): 88-91 (郝明, 王庆良, 崔笃信. GPS 精密单点定位快速收敛方法研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2009(2): 88-91)
- [14] Kuang Cuilin, Jin Lei. High-Order Ionospheric Error Correction for Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(8): 888-891 (匡翠林, 金蕾. 精密单点定位的高阶电离层误差改正研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2013, 38(8): 888-891)
- [15] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Xingxing, et al. Study on Precise Point Positioning Based on Combined GPS and GLONASS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(1): 9-12 (张小红, 郭斐, 李星星, 等. GPS/GLONASS 组合精密单点定位研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2010, 35(1): 9-12)
- [16] Cai Changsheng, Zhu Jianjun, Dai Wujiao, et al. Modeling and Result Analysis of Combined GPS/GLONASS Precise Point Positioning [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 474-1 477 (蔡昌盛, 朱建军, 戴吾蛟, 等. GPS/GLONASS 组合精密单点定位模型及结果分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 474-1 477)
- [17] Geng J. Rapid Integer Ambiguity Resolution in GPS Precise Point Positioning [D]. Nottingham: University of Nottingham, 2010
- [18] Teunissen P J G. The Least-Squares Ambiguity Decorrelation Adjustment: A Method for Fast GPS Integer Ambiguity Estimation [J]. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(112): 65-82

experiments indicate that this method holds better stability and applicability, and acquires excellent effects as measured by quantitative indices.

Key words: broken contour lines; contour lines’ reconstruction; compound iterative strategy; end-points’ directional; constraint for directional difference

First author: WANG Feng, PhD candidate, specializes in digital cartography and GIS, image processing. E-mail:bjzxgsb@163.com
Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41271447.

.....
(上接第 599 页)

Instantaneous Re-convergence of Kinematic PPP by the Use of Relationship Between Multiple Receiver Ambiguity

SONG Chao¹ HAO Jinming¹
1 Institute of Navigation and Aerospace, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: This paper proposes a new method based on relationship of multiple receiver ambiguity to solve the re-convergence problem in kinematic PPP due to the satellite signals interruption. The method makes full use of multiple receivers located in different locations of the survey vessel. Because of the different locations, the signal interruption may be not simultaneous for different receivers. The method establishes the relationships of ambiguity between different receivers and then obtains the priori ambiguity of the receiver that need re-convergence, and then completes the re-convergence of kinematic PPP. Experiments show that the success rate when fixing double-differenced ambiguity with baseline length constraint is more than 99%; when fixing double-differenced ambiguity, no matter how long the satellite signal is interrupted, the proposed method can complete re-convergence of kinematic PPP in one epoch. Moreover, the positioning accuracy after re-convergence is as same as the before.

Key words: kinematic PPP; re-convergence; double-differenced ambiguity; baseline length constraint; priori ambiguity

First author: SONG Chao, PhD, specializes in processing of GNSS data. E-mail:songchao.china@foxmail.com