

柴艳菊, 阳仁贵, 张宝成. 2014. 动态 PPP 定位中周跳自动探测与处理策略. 地球物理学报, 57(5):1433-1439, doi:10. 6038/cjg20140508.

Chai Y J, Yang R G, Zhang B C. 2014. Cycle-slip automatic detection and processing strategy for dynamic PPP. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5):1433-1439, doi:10. 6038/cjg20140508.

# 动态 PPP 定位中周跳自动探测与处理策略

柴艳菊, 阳仁贵, 张宝成

中国科学院测量与地球物理研究所, 大地测量与地球动力学国家重点实验室, 武汉 430077

**摘要** 周跳的自动探测与有效处理是动态 PPP 定位中关键和棘手的问题. 本文提出利用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_4$ 、 $L_5$  历元间差分, 并联合 doppler 积分综合探测与定位周跳. 对准确判定发生周跳的卫星, 不进行周跳的固定和修复, 而是将其作为新升起的卫星重新估计模糊度. 这一处理策略避免了周跳修复不准对整个定位精度的影响, 当保证不少于 4 颗卫星连续跟踪时, PPP 动态定位的精度是稳定的. 实验结果表明: 在相对比较恶劣的动态环境下, 动态 PPP 定位精度可以达到 0.1~0.2 m 水平.

**关键词** 动态 PPP; 模糊度重新初始化; 周跳探测; doppler 观测

doi:10. 6038/cjg20140508

中图分类号 P228

收稿日期 2013-06-13, 2014-04-24 收修定稿

## Cycle-slip automatic detection and processing strategy for dynamic PPP

CHAI Yan-Ju, YANG Ren-Gui, ZHANG Bao-Cheng

State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Institute of Geodesy and Geophysics,  
Chinese Academy of Science, Wuhan 430077, China

**Abstract** Cycle-slip Automatic detection and accurate estimation is a key but difficult problem in dynamic PPP. A new method for detecting and locating the cycle-slip is presented by utilizing the  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_4$ ,  $L_5$  and Doppler observations. If the cycle slip is detected accurately, the corresponding satellite is treated as a new rising satellite, so its ambiguities must be re-initialized. The advantage of the processing strategy is that dynamic PPP precision is stable if the number of the satellites is no less than four, because integer slip cycles needn't be calculated and repaired which is very difficult in dynamic PPP. The shipborne experimental results show that dynamic PPP precision reaches 0.1~0.2 meters by taking the double difference baseline length as a reference on the heavy dynamic environment condition.

**Keywords** Dynamic PPP; Ambiguity re-initialization; Cycle-slip detection; Doppler observations

## 1 引言

精密动态 PPP 定位技术仅用一台 GPS 接收机就能提供精确的位置信息, 在精密卫星定轨、大地测量、航空摄影测量、海洋勘探、地球物理、军事等方面具有广阔的应用前景. 同时, 产生的电离层、对流层

等副产品信息为构建高精度高分辨率空间大气模型提供重要的数据源 (Zhang et al., 2010; 张宝成, 2012). 但是, 动态 PPP 精确定位的前提是模糊度准确初始化后必须保持连续, 即准确修复周跳, 否则严重影响 PPP 定位的精度, 甚至使 PPP 定位发散, 大大限制其应用. 由于动态环境下 GPS 信号失锁比较频繁, 周跳的处理相比静态 PPP 要困难和复杂得

多,探索更有效的周跳探测与处理方法是动态 PPP 的关键。

近年来,许多学者对动态 PPP 周跳探测问题进行了深入探讨,大致分为基于观测域的周跳探测法和基于估计域的周跳探测法。基于观测域的周跳探测法是利用原始载波相位、码、多普勒观测或由此形成的具有优良特性的组合观测来探测周跳,如被广泛采用的无几何距离组合(GF 组合或  $L_4$  组合)历元间差分法(Xu et al., 2008; 徐绍铨等, 2003; Zhen, 2013; Cai et al., 2013; 王敬和赵军祥, 2011; 朱绍攀等, 2013)。该组合消除了与频率无关的项,只与电离层延迟误差和模糊度有关,因此也称为电离层残差法。如果忽略历元间电离层延迟误差变化,  $L_4$  组合历元间差分仅与周跳有关。该方法只利用相位观测组合,精度比较高,对小周跳比较敏感。但是该方法也存在不足:不能探测特殊的周跳,如  $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{77}{60}$  及满足某些条件的周跳(易重海等, 2011);仅利用该组合只能判断观测值中是否存在周跳,但是不能定位哪个频率的观测发生了周跳;对残余电离层误差比较敏感,适合电离层平静状态下周跳探测(朱绍攀等, 2012)。Blewitt 提出的利用 Melbourne-Wubbena (MW)组合和电离层残差(GF)法相结合的周跳探测法(王敬和赵军祥, 2011)。MW 组合需要利用码观测,因为我们所用的接收机一般不能获取高精度 P 码信息,因此受 C/A 码观测噪声、残余电离层误差、多路径误差影响,该方法探测小周跳比较困难;MW 组合不能探测  $\Delta N_1 = \Delta N_2$  的周跳。赖育网提出将 CUSUM 算法引入到星载 GPS 小周跳探测中,思想是将检测历元及以前历元的 MW 组合量相加,以放大小周跳的影响。该方法只能把周跳发生位置定位在一个区间内,不能准确定位哪个历元的观测发生了周跳(赖育网等, 2011)。刘志赵提出利用电离层 TEC 变化率及 MW 组合来探测周跳,即 TECR 法(Liu, 2011)。该方法与其他方法不同之处在于恰恰利用电离层延迟误差在历元间变化比较平稳的特点来探测周跳,而不是忽略电离层变化。实际上,该方法的思想和电离层残差法是一致的。张小红提出利用  $L_5 - L_3 - L_X$  分级周跳探测法(Zhang and Li, 2012),其步骤为:首先利用 LAMBDA 和 TRIM 电离层模型得到的电离层信息固定宽巷周跳;再利用 LAMBDA 方法和解算的宽巷模糊度及  $L_3$  组合固定窄巷周跳;最后利用  $L_5$  组合和  $L_1, L_2$  或  $L_4$  任一观测来解算  $L_1$  和  $L_2$  周跳,直至周跳被完全修复。

由于 doppler 观测精度比较高,且不存在模糊度问题,在周跳探测中一般用 doppler 积分代替伪距观测历元间求差(Zhen, 2012; 丁文武, 2012),但是 doppler 观测噪声一般在 cm/s 到 dm/s 量级,因此 doppler 辅助适合探测采样率比较高且大于 3 周的周跳。随着 GPS 现代化及北斗、Galileo 等导航系统的建设和逐步完善,一些学者研究了基于多频数据的周跳探测方法,但是目前普通用户获取第三频数据还比较困难,双频 GNSS 数据质量控制仍是主要任务(Maria, 2012)。

基于估计域的周跳探测法是利用线性化观测模型,在定位解算中利用残差信息对周跳进行探测并修复,比较有代表性的有 DIA 法、拟准检定法、假设检验法等(Teunissen, 1998; 2012; Chai et al., 2005; 孔巧丽等, 2005)。这类方法是基于统计检验量来探测周跳,而统计检验量的可靠性是建立在大样本基础上的,这类方法比较适合静态 GPS 数据的质量控制。

以往周跳定位后多采用 LAMBDA 搜索法或直接归整确定其整数值大小并进行修复(Zhen, 2012; Cai et al., 2013; 王敬和赵军祥, 2011; Zhu et al., 2012; Zhang and Li, 2012; 张小红等, 2012; 郭金运等, 2009),但是确定整周数需要充分的信息(张玉册和梁开龙, 2002),由于受多种残余误差的影响及动态观测条件下多余观测信息比较少的限制,周跳的固定比较困难。由于动态 PPP 定位中没有参考基准来评定定位精度,因此周跳修复错误会直接影响动态定位的精度。

基于以上对多种动态 PPP 周跳探测与修复方法的分析,本文提出采用 doppler 观测联合  $L_1, L_2, L_4$  和  $L_5$  观测对周跳进行自动探测,然后对判断发生周跳的卫星作为新升起的卫星进行模糊度的重新解算,对没有发生周跳的卫星,直接采用前一历元解算的模糊度及其协方差阵进行预报和滤波的处理策略。

## 2 联合 $L_1, L_2, L_4, L_5$ 历元间差分 and doppler 积分进行动态 GPS 周跳探测

动态 GPS 周跳探测常用的检验量主要有  $L_1, L_2$  和由此形成的  $L_4, L_5$  组合观测历元间差分。下面基于 GPS 载波相位,伪距和 doppler 原始观测方程,对这几种重要的检验量及能探测的最小周跳进行分析。

## 2.1 GPS 基本观测模型

载波相位、伪距和 doppler 观测方程:

$$\phi_j = (\rho - uI_1 + M + c(dt - dt^s))/\lambda_j + (b - b^s) + N_j + \epsilon_j, \quad (1)$$

$$P_j = \rho + uI_1 + M + c(dt - dt^s) + c(d - d^s) + e_j, \quad (2)$$

$$D_1 = \dot{\rho} - \dot{I}_1 + \dot{M} + c(\dot{d}t - \dot{d}t^s) + \delta_1, \quad (3)$$

其中,  $j = 1, 2$  和  $s$  分别表示频率和卫星.  $\phi_j$ 、 $P_j$  和  $D_1$  分别为第  $j$  频率的相位、伪距和第 1 频率的 doppler 观测值,  $\epsilon_j$ 、 $e_j$  和  $\delta_1$  为对应的观测噪声.  $\rho$  为接收机与卫星的几何距离,  $I_1$  为频率 1 观测的电离层延迟误差,  $M$  为天顶对流层延迟误差,  $dt$ 、 $dt^s$  分别为接收机钟差和卫星钟差.  $b$ 、 $b^s$  为接收机和卫星的相位偏差,  $d$ 、 $d^s$  为接收机和卫星的伪距偏差, 这些量在短时间内是比较稳定的.  $N_j$  为非差整周模糊度,  $u = f_j^2/f_1^2$ ,  $c$ 、 $\lambda_j$  为光速和波长, 符号上的点表示变化率.

## 2.2 $L_4$ 组合检验量

$L_4$  组合模型为

$$L_4 = \lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2 = -\frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2} I_1 + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + \lambda_1 \epsilon_1 - \lambda_2 \epsilon_2. \quad (4)$$

从式(4)可知,  $L_4$  组合消除了与频率无关的项, 如站星几何距离, 钟差等, 仅保留与频率相关的项, 即电离层延迟误差和模糊度项. 由于大气误差在短时间内具有较强的相关性, 对  $L_4$  观测历元间差分得

$$\Delta L_4 = L_4(i+1) - L_4(i) = \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 + \epsilon_{\Delta L_4}. \quad (5)$$

如果采样间隔  $\Delta t$  足够小, 如小于 5 s, 残余电离层延迟误差可以忽略(在电离层平静状态下). 如果卫星连续跟踪, 假设  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  均服从  $N(0, \sigma^2)$ ,  $\sigma = 0.01(\text{cycle})$ , 则  $\epsilon_{\Delta L_4} \sim N(0, \sigma_{\Delta L_4}^2)$ . 由误差传播律可得:  $\sigma_{\Delta L_4} = \sqrt{2} \sqrt{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} \sigma = 0.005 \text{ m}$ . 但是受组合观测残余电离层延迟误差和多路径误差等的影响, 一般取  $\sigma_{\Delta L_4} = 0.02 \text{ m}$ .

周跳判断准则为

$$|\Delta L_4| > 3\sigma_{L_4} = 0.06 \text{ m}. \quad (6)$$

如果  $L_1$  或  $L_2$  发生 1 周的周跳, 将引起(6)式检验量 0.19 m 或 0.24 m 的变化, 因此利用该条件可以探测观测中发生 1 周的小周跳. 但是不满足式(6)也可能发生周跳, 如  $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{77}{60}$  或同时发生相同的小周跳(小于 2 周)(Yi et al., 2011), 因此仅利用该条件

探测周跳存在周跳漏检的风险.

## 2.3 $L_5$ 组合检验量

$L_5$  组合表示形式为

$$L_5 = \frac{1}{f_1 - f_2} (f_1 \lambda_1 \phi_1 - f_2 \lambda_2 \phi_2), \quad (7)$$

将模型(1)代入并进行整理得:

$$L_5 = \rho - \frac{f_1^2 + f_1 f_2 + f_2^2}{f_1^2} I_1 + M + c(dt - dt^s) + \lambda_5 (b - b^s) + \lambda_5 (N_1 - N_2) + \lambda_5 \epsilon_5. \quad (8)$$

其中,  $\lambda_5 = \frac{c}{f_1 - f_2} \approx 0.86 \text{ m}$ ,  $\epsilon_5 = \epsilon_1 - \epsilon_2$ . 由式(8)可知, 相位宽巷组合与单个频率的相位观测方程类似, 只是波长变长, 电离层延迟参数的系数发生了变化, 因此  $L_5$  比较适合周跳探测. 忽略历元间残余大气延迟误差, 并顾及相位偏差的稳定性, 对  $L_5$  进行历元间差分得

$$\Delta L_5 = L_5(i+1) - L_5(i) = \Delta \rho + c \Delta dt + \lambda_5 (\Delta N_1 - \Delta N_2) + \lambda_5 \Delta \epsilon_5. \quad (9)$$

由式(9)可知,  $\Delta L_5$  与历元间距离变化  $\Delta \rho$  有关, 以往是通过引入伪距形成 MW 组合来消除这一项. 由于伪距观测噪声比较大, 对小周跳探测比较困难. 本文采用 doppler 积分代替伪距历元差分, 形成检验量为

$$\Delta L_5 - \int_0^{\Delta t} D_1 dt = \lambda_5 (\Delta N_1 - \Delta N_2) + \lambda_5 \Delta \epsilon_5 - \Delta \delta_1 \Delta t. \quad (10)$$

从(10)式可知, 当没有周跳发生时, 即  $\Delta N_1 = 0$ ,  $\Delta N_2 = 0$ , (10)式右边仅剩宽巷组合观测噪声和 doppler 观测噪声. 假设  $\epsilon_1$  和  $\epsilon_2$  服从  $N(0, \sigma^2)$ ,  $\delta_1$  服从  $N(0, \sigma_{D_1}^2)$ , 一般取  $\sigma_{D_1} = 0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 则  $\Delta L_5 - \int_0^{\Delta t} D_1 dt \sim N(0, \sigma_{\Delta L_5 - D_1 \Delta t}^2)$ . 由误差传播律得:  $\sigma_{\Delta L_5 - D_1 \Delta t} = \sqrt{2 \times \lambda_5^2 \times 2 \times \sigma^2 + 2 \times \sigma_{D_1}^2 \times \Delta t^2}$ . 如果采样间隔为 1 s,  $\sigma_{\Delta L_5 - D_1 \Delta t} \approx 0.2 \text{ m}$ , 当采样间隔达到 5 s 时,  $\sigma_{\Delta L_5 - D_1 \Delta t} \approx 0.7 \text{ m}$ , 因此 doppler 辅助一般适合采样间隔小于 5 s 的周跳探测. 当采样间隔为 1 s 时, 周跳判断准则为

$$\left| \Delta L_5 - \int_0^{\Delta t} D_1 dt \right| > 3\sigma_{\Delta L_5 - D_1 \Delta t} = 0.6 \text{ m}. \quad (11)$$

如果  $L_1$  或  $L_2$  发生 1 周的周跳, 将引起检验量 0.86 m 的变化, 因此满足(11)式可以判定观测中存在周跳. 但是该组合不能探测  $\Delta N_1 = \Delta N_2$  的情况; 不能确定周跳发生在哪个频率的观测中.

综合以上分析可知, 如果检验量符合条件(6)式

或(11)式,可以判定相位观测中发生了周跳,但是需要进一步确定周跳发生在哪个频率的观测上.反之,需要检验两个频率的相位观测是否同时发生相同的小周跳(小于2周),本文提出再结合 $L_1$ 、 $L_2$ 观测信息来定位和探测小周跳.

## 2.4 联合 $L_1$ 、 $L_2$ 历元间差分 and doppler 积分定位周跳

$L_1$ 、 $L_2$ 观测历元间差分 and doppler 积分求差形成检验量为

$$\Delta L_1 - \int_0^{\Delta t} D_1 dt = \lambda_1 \Delta N_1 + \lambda_1 \Delta \epsilon_1 - \Delta \delta_1 \Delta t, \quad (12)$$

$$\Delta L_2 - \int_0^{\Delta t} D_2 dt = \lambda_2 \Delta N_2 + \lambda_2 \Delta \epsilon_2 - \Delta \delta_2 \Delta t. \quad (13)$$

分析式(12)和(13),当 $L_1$ 和 $L_2$ 未发生周跳, $\Delta N_1 = 0, \Delta N_2 = 0$ ,则

$$\Delta L_1 - \int_0^{\Delta t} D_1 dt \sim N(0, \sigma_{\Delta L_1 - D_1 \Delta t}^2),$$

$\Delta L_2 - \int_0^{\Delta t} D_2 dt \sim N(0, \sigma_{\Delta L_2 - D_2 \Delta t}^2)$ . 当采样间隔为1 s时,由误差传播律可得: $\sigma_{\Delta L_1 - D_1 \Delta t} = \sigma_{\Delta L_2 - D_2 \Delta t} \approx 0.1$  m.

判断准则:

$$\left| \Delta L_1 - \int_0^{\Delta t} D_1 dt \right| > 3\sigma_{\Delta L_1 - D_1 \Delta t} = 0.3 \text{ m}, \quad (14)$$

$$\left| \Delta L_2 - \int_0^{\Delta t} D_2 dt \right| > 3\sigma_{\Delta L_2 - D_2 \Delta t} = 0.3 \text{ m}. \quad (15)$$

分析式(14)和(15)可知,因为 $L_1$ 和 $L_2$ 波长约0.2 m,当两个频率同时发生1周的小周跳时,检验量淹没在噪声中不能探测.

## 3 动态 PPP 滤波中周跳自动探测步骤及处理策略

### 3.1 周跳自动探测步骤

通过分析周跳探测的检验量(6)、(11)、(14)式和(15)式,制定如下周跳自动探测和定位步骤:

(一)如果检验量满足条件(6)式(或(11)式)和(14)式,判定 $L_1$ 发生周跳;

(二)如果检验量满足条件(6)式(或(11)式)和(15)式,判定 $L_2$ 发生周跳;

(三)如果检验量满足条件(6)式(或(11)式)和(14)式、(15)式,判定 $L_1$ 和 $L_2$ 都发生周跳.

### 3.2 动态 PPP 定位模型

动态 PPP 定位采用扩展 Kalman 滤波模型为

(Zhang et al., 2010)

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_k &= \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \omega_{k-1} \\ L_k &= H_k \mathbf{X}_k + \tau_k \end{aligned} \quad (16)$$

其中, $\mathbf{X}_k = [\Delta r^T \ dt_r^T \ I_1^T \ N_1^T \ N_2^T \ M]^T$ 为状态参数,假设 $k$ 时刻观测到 $m$ 颗卫星,状态参数共有 $3m+5$ 个,则各分量为 $\Delta r$ 为接收机3维位置改正量、 $dt_r$ 为接收机钟差、 $I_1$ 为 $f_1$ 频率上 $m$ 维站星斜向电离层延迟误差、 $N_1, N_2$ 为 $L_1, L_2$ 的 $m$ 维模糊度、 $M$ 为1维天顶对流层延迟误差、 $\Phi_{k,k-1} =$

$\begin{bmatrix} \mathbf{O}_{3 \times 3} & & & & & \\ & \mathbf{I}_{(3m+2) \times (3m+2)} & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix}$ 为状态转移矩阵, $\mathbf{O}$ 为3阶零矩

阵, $\mathbf{I}_{(3m+2) \times (3m+2)}$ 为 $(3m+2)$ 阶单位阵, $L_k$ 为经过超过厘米量级的系统误差改正后的码和相位观测值减去由接收机近似坐标和卫星精密坐标计算的近似距离形成的观测量.动态PPP中,接收机近似坐标由伪距定位实时计算. $H_k$ 为线性化系数阵. $\omega_{k-1} \sim N(0, Q_{k-1}), \tau_k \sim N(0, R_k)$ 分别为服从正态分布的状态噪声和观测噪声.

### 3.3 动态 PPP 周跳处理策略

模糊度参数:如果根据3.1节判定某颗卫星发生了周跳,将该卫星作为新升起的卫星,在滤波模型中重新初始化该卫星的模糊度参数及其方差阵,即利用伪距减相位观测值重新计算该卫星的模糊度初值,方差重新配置为 $10^2 \text{ m}^2$ .对于连续跟踪的卫星,模糊度参数作为时不变参数,利用前一历元估计的模糊度参数及其方差协方差阵直接代入当前历元的滤波方程中.

其他参数的处理与常用的动态PPP处理一致:位置参数作为时变参数处理,每个历元利用码定位结果进行初始化,方差重新配置为 $100^2 \text{ m}^2$ ;接收机钟差参数由于稳定性比较差,用白噪声模型来描述,每个历元进行估计;斜向电离层延迟误差参数根据纬度不同采用不同的模型,对于中高纬地区,用高斯-马尔科夫模型或随机游走模型来描述,对于低纬地区,电离层变化比较剧烈,用白噪声模型来描述.本文数据采集于深圳,纬度比较低,因此本文采用白噪声模型描述电离层参数.天顶对流层参数采用分段线性模型描述,动态定位时采用每2 min进行一次更新,静态PPP一般15 min进行一次更新.

这一处理策略的优势是:只要有不少于4颗的卫星连续跟踪,就能保证动态PPP定位精度的稳定,同时,精确的位置信息也可使发生周跳的卫星的模糊度快速收敛,避免周跳修复不准影响整个动态

PPP 定位精度.

## 4 实验结果分析

### 4.1 实验数据

为了验证新方案周跳探测及处理的效果,利用一套船载双天线 GPS 实测数据进行检验,其中一台是 Trimble 接收机,另一台是 NovAtel 接收机,天线位置如图 1. 数据采集于深圳海域 2012-07-10 UTC 时间 1:53:50—7:15:10,采样率 1 Hz. 开始时,海面比较平静,3 h 后海面有 4~5 m 的海浪.

### 4.2 处理结果分析

首先利用本文提出的周跳探测及处理策略分别对两台 GPS 接收机数据进行动态 PPP 定位,然后将 PPP 定位结果做差求基线长度,并和双差基线结果进行比较,来验证新方案的效果. 船的运动轨迹及高程变化如图 2.

### 4.3 周跳探测实验结果及分析

利用新方案探测到 NovAtel 接收机 6、7、11、19、20 号和 30 号卫星发生周跳. 下面给出这些卫星周跳探测结果,如图 3,其中  $dL_1 - D_1$ 、 $dL_2 - D_1$ 、 $dL_5 - D_1$  分别表示  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_5$  历元间差分与 doppler 积分之差,  $dL_4$  表示  $L_4$  历元间差分.

从图 3 各卫星检验量随时间变化可知:6、7、19 号卫星周跳发生比较少,而 11、20 和 30 号卫星周跳发生比较频繁,尤其是 20 号卫星. 这主要是由于 NovAtel 天线安装的位置距离船甲板比较近,船上的栏杆等对其遮挡造成的. 以 6 号卫星发生周跳的 7860 时刻为例,分析如何根据各量的变化判定周跳. 首先根据该时刻检验量:



图 1 接收机天线位置图

Fig. 1 The locations of the GPS receivers on the ship

$$|\Delta L_4| = |-3.193 \text{ m}| > 0.06 \text{ m}, \text{ 或}$$

$$|\Delta L_5 - D_1 \Delta t| = |-1.377 \text{ m}| > 0.6 \text{ m},$$

判定该时刻观测中发生了周跳. 再根据条件:

$$|\Delta L_2 - D_1 \times \Delta t| = 3.362 \text{ m} > 0.3 \text{ m},$$

$$|\Delta L_1 - D_1 \times \Delta t| = 0.170 \text{ m} < 0.3 \text{ m},$$

满足周跳自动探测的条件二,可以判断  $L_2$  观测发生了周跳. 同样,可以探测其他卫星的周跳.

如果探测到卫星在某时刻发生周跳,将其在该时刻作为新升起的卫星,重新计算模糊度初值及方差. 但是,对于 20 号卫星,由于受干扰非常严重,如果在发生周跳的时刻将其做新星处理,需要不断重新计算模糊度,不仅大大增加了计算负担,而且 20 号卫星一直处于未收敛情况,对动态 PPP 定位贡献不大,因此在处理中直接将该卫星的观测删除. 为了检验新处理策略的效果,分别利用新方案和周跳探测与修复方案,对两台船载 GPS 接收机数据分别进行动态 PPP 定位结果再求差,计算两个接收机形成的基线长度,并以双差解算的基线长度为参考,计算

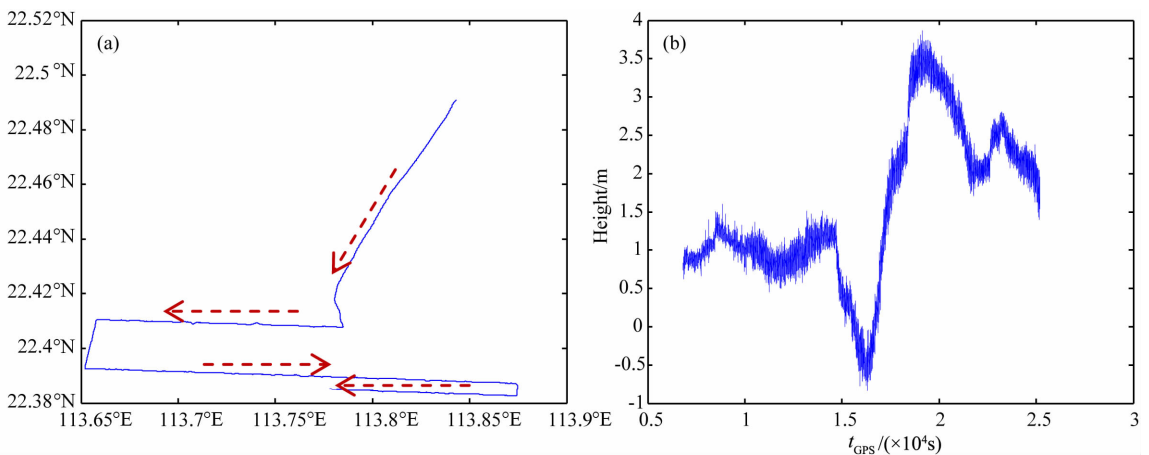


图 2 船运动轨迹及高程变化

Fig. 2 The trajectory and height of the ship

两种方案的基线误差,结果如图 4. 由于基线比较短且长度固定,双差计算结果为:基线均值 12.045 m,标准差 0.0066 m.

由图 4 可知,(1)对探测到发生周跳的观测采用周跳修复方案,由于某些历元模糊度固定错误,导致该历元 PPP 定位存在比较大的误差;(2)PPP 定位误差开始时约 0.5 m,收敛后平静状态下在 0.1 m 以内,2~3 m 海浪状况下,定位误差在 0.2 m 以内,这与目前动态 PPP 定位精度相当,说明本文提出的周跳探测及处理策略是可行的.

另外,利用该方案对 GPS/GLONASS/BD 多导航系统的观测数据进行了处理,周跳探测效果比较好,由于篇幅限制,将在另文中介绍.

### 5 讨论

本文提出的周跳探测与处理策略具有如下优点:

(1)利用  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_5$ 、 $L_4$  历元间差分,联合 doppler 积分综合探测动态 PPP 观测中的周跳不仅能探测特殊的周跳,而且能准确定位周跳;

(2)采用将发生周跳的卫星作为新星处理,不仅减少了周跳固定的计算负担,而且避免了由于观测信息不足导致周跳固定错误,影响动态 PPP 定位精度.

当然,动态 GNSS 数据受多种环境因素影响,预处理工作非常复杂和棘手,新算法还需要通过大

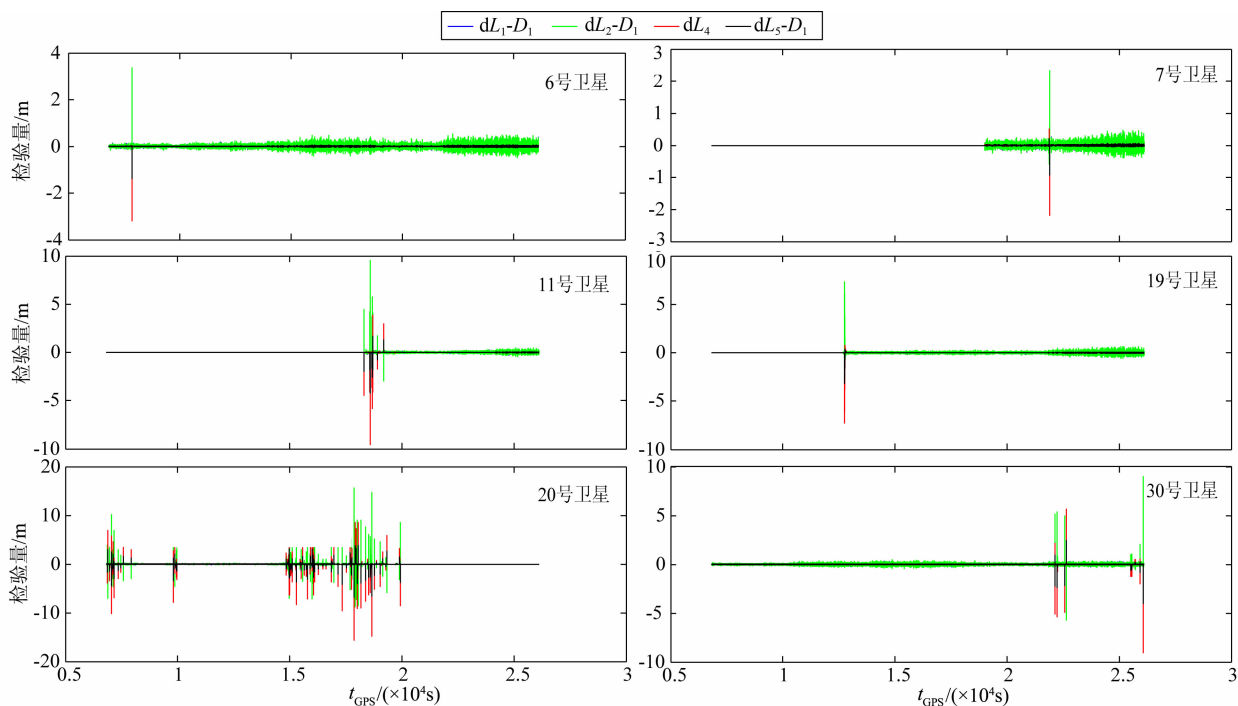


图 3 探测到发生周跳的卫星 4 种检测量变化序列  
Fig. 3 Time series of the satellites for cycle-slips detection

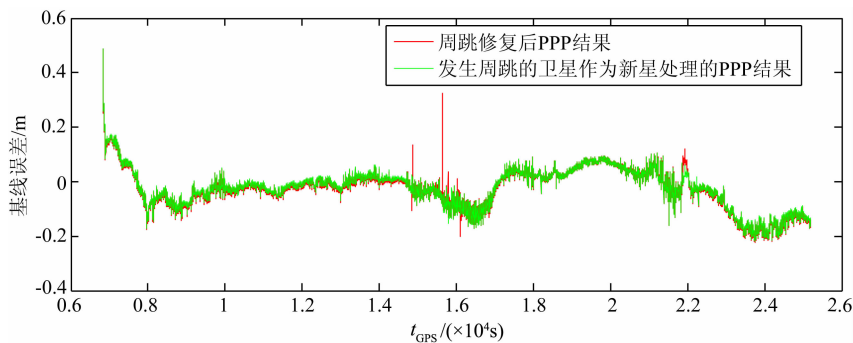


图 4 两种方案计算的基线误差  
Fig. 4 Baseline errors of the new program and the previous program

量的动态 GNSS 数据进行测试,以便进一步完善新方法。

**致谢** 本文车载多天线 GPS 数据采集得到国家海洋局第二海洋研究所罗孝文博士后的大力支持,在此表示感谢。

## References

- Cai C S, Liu Z Z, Xia P F, et al. 2013. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity. *GPS Solut.*, 17(2): 247-260.
- Chai Y J, Ou J K, Ren C. 2005. Method for detecting and repairing cycle slips in GPS navigation. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 22(2): 119-123.
- Ding W W. 2012. Research on key technologies of real time precise point positioning system [Doctor's thesis] (in Chinese). Beijing: University of Chinese Academy of Sciences.
- Guo J Y, Sun J L, Ju X L, et al. 2009. Solution of ambiguity and cycle slip for satellite-borne GPS phase data with wide-lane / narrow-lane method. *Science of Surveying and Mapping* (in Chinese), 34(6): 89-91.
- Kong Q L, Ou J K, Chai Y J. 2005. Detection and repair for gross errors and cycle slips in LEO based on GPS data on zero level. *Journal of Geodesy and Geodynamics* (in Chinese), 25(4): 105-109.
- Lai Y W, Zhang Y S, Cheng H W, et al. 2011. Satellite-borne dual frequency GPS cycle-slip detection based on CUSUM algorithm. *Science of Surveying and Mapping* (in Chinese), 36(1): 42-44.
- Liu Z Z. 2011. A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver. *J. Geod.*, 85(3): 171-183.
- Lacy M C D, Reguzzoni M, Sanso F. 2012. Real-time cycle slip detection in triple-frequency GNSS. *GPS Solut.*, 16(3): 353-362.
- Teunissen P J G, Bakker P F. 2012. Next Generation GNSS Single Receiver Cycle Slip Reliability. VII Hotine-Marussi Symposium on Mathematical Geodesy. Berlin Heidelberg; Springer-Verlag, 159-164.
- Teunissen P J G. 1998. Quality Control and GPS. GPS for Geodesy. Berlin Heidelberg; Springer-Verlag.
- Wang J, Zhao J X. 2011. An improvement of Blewitt cycle slip detection. *Journal of Spacecraft TT&C Technology* (in Chinese), 30(2): 80-83.
- Xu G C. 2003. GPS Theory, Algorithms and Applications. Berlin Heidelberg, New York: Springer-Verlag.
- Xu S Q, Zhang H H, Yang Z Q, et al. 2003. GPS Measurement Principle & Application (The second Edition) (in Chinese). Wuhan: Wuhan University Press.

- Yi C H, Zhu J J, Chen Y Q, et al. 2011. Cycle-Slip detection and correction algorithm for real-time PPP. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 36(11): 1314-1319.
- Zhang B C, Ou J K, Yuan Y B, et al. 2010. Yaw attitude of eclipsing GPS satellites and its impact on solutions from precise point positioning. *Chinese Science Bulletin*, 55(32): 3687-3693.
- Zhang B C, Teunissen J G P, Odijk D, et al. 2012. Rapid integer ambiguity-fixing in precise point positioning. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 55(7): 2203-2211.
- Zhang X H, Li X X. 2012. Instantaneous re-initialization in real-time kinematic PPP with cycle slip fixing. *GPS Solut.*, 16(3): 315-327.
- Zhang X H, Guo F, Li P, et al. 2012. Real-time quality control procedure for GNSS precise point positioning. *Geomatics and Information Science of Wuhan University* (in Chinese), 37(8): 940-944.
- Zhang Y C, Liang K L. 2002. Automated cycle-slip correction of dual-frequency kinematic GPS data. *Bulletin of Surveying and Mapping* (in Chinese), (7): 3-4.
- Zhen D. 2012. MATLAB software for GPS cycle-slip processing. *GPS Solut.*, 16(2): 267-272.
- Zhu S P, Sun X R, Zhang S B. 2012. Research on mixed-method algorithm for cycle slips detection and correction. *Geotechnical Investigation & Surveying* (in Chinese), 40(5): 68-72.

## 附中文参考文献

- 丁文武. 2012. 实时精密单点定位系统的若干关键技术研究[博士论文]. 北京: 中国科学院大学.
- 郭金运, 孙佳龙, 鞠晓蕾等. 2009. 基于宽巷/窄巷法的星载 GPS 相位数据的模糊度解算和周跳探测. *测绘科学*, 34(6): 89-91.
- 孔巧丽, 欧吉坤, 柴艳菊. 2005. 星载 GPS 相位非差观测粗差和周跳的探测与修复. *大地测量与地球动力学*, 25(4): 105-109.
- 赖育网, 张寅生, 程洪玮等. 2011. CUSUM 算法的星载双频 GPS 周跳探测研究. *测绘科学*, 36(1): 42-44.
- 王敬, 赵军祥. 2011. Blewitt 周跳探测方法的改进. *飞行器测控学报*, 30(2): 80-83.
- 徐绍铨, 张华海, 杨志强等. 2003. GPS 测量原理及应用(第二版). 武汉: 武汉大学出版社.
- 易重海, 朱建军, 陈永奇等. 2011. 实时精密单点定位中周跳探测与修复的算法研究. *武汉大学学报: 信息科学版*, 36(11): 1314-1319.
- 张宝成, Teunissen J G P, Odijk D 等. 2012. 精密单点定位整周模糊度快速固定. *地球物理学报*, 55(7): 2203-2211.
- 张小红, 郭斐, 李盼等. 2012. GNSS 精密单点定位中的实时质量控制. *武汉大学学报(信息科学版)*, 37(8): 940-944.
- 张玉册, 梁开龙. 2002. 双频动态 GPS 观测数据周跳的自动改正. *测绘通报*, (7): 3-4.
- 朱绍攀, 孙小荣, 张书毕. 2012. 多方法混合周跳探测与修复算法研究. *工程勘察*, 40(5): 68-72.

(本文编辑 汪海英)