

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2021.06.017

# 面向低成本 GNSS 接收机终端的周跳修复策略

戴振东<sup>1</sup>, 张凯渊<sup>1</sup>, 刘佩林<sup>1</sup>, 陈涤非<sup>2</sup>, 许幼成<sup>2</sup>

(1. 上海美迪索科电子科技有限公司, 上海 200241;

2. 上海埃威航空电子有限公司, 上海 200233)

**摘要:**载波相位周跳是影响低成本 GNSS 接收机观测质量的主要因素之一。提出了一种面向低成本 GNSS 接收机终端的周跳修复策略, 通过两种不同观测结果的联合检测以避免时钟和星历突变导致的误修复, 并利用载噪比和多项式拟合误差检测载波观测中的无效观测, 旨在提升低成本接收机在多径等复杂场景下载波相位观测的可用性。该策略仅使用了单频载波相位和载噪比信息, 适用于各类低成本的接收设备。分别在开阔场景和多径场景下使用小米 8 手机和 F9P 接收机进行观测试验, 结果表明, 所有的有效载波相位观测得到了正确修复, 仅约 0.7% 的无效观测被误修复, 验证了所提策略的有效性。

**关键词:**低成本; GNSS; 载波相位; 周跳修复

中图分类号: TP702

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2021)06-0125-06

## Cycle Slip Repair Strategy of Low-cost GNSS Receivers

DAI Zhen-dong<sup>1</sup>, ZHANG Kai-yuan<sup>1</sup>, LIU Pei-lin<sup>1</sup>, CHEN Di-fei<sup>2</sup>, XU You-cheng<sup>2</sup>

(1. Shanghai MediaSoC Technologies Corporation, Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Advanced Avionics Corporation, Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Carrier phase cycle slip is one of the main factors affecting the observation quality of low-cost receivers. A cycle slip repair strategy for low-cost GNSS receivers is proposed in this paper, which aims to improve the availability of carrier phase observations for low-cost receivers in complex environment, such as multipath environment. A combined test of two different observations is used in the proposed strategy to avoid the mistake repair caused by the sudden change of clock and ephemeris. Carrier-to-noise ratio and RMS polynomial fitting error are used to detect invalid observations in the carrier observation. Only single-frequency carrier phase and carrier-to-noise ratio are needed in this strategy, so it is suitable for all kinds of low-cost receivers. Observation experiments are carried out with Mi 8 mobile phones and F9P receivers in open sky environment and multipath environment respectively. The results show that the proposed repair strategy can effectively repair cycle slips and detect most of the invalid observations at the same time. Only about 0.7% of invalid observations are mistaken as cycle slip and are repaired by mistake, which verifies the effectiveness of the proposed strategy.

**Key words:** Low-cost; GNSS; Carrier phase; Cycle slip repair

收稿日期: 2021-05-15; 修订日期: 2021-06-01

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(18DZ1112005)

作者简介: 戴振东(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事卫星定位及导航方面的研究。

通信作者: 刘佩林(1964-), 女, 教授, 主要从事基于信号环境特性的智能信号处理、深度视觉、多媒体处理、类脑导航和低功耗 SoC 设计等方面的研究。

## 0 引言

随着定位技术和基础设施的不断发展,在高精度算法和地面基站网络的加持下,如今一台搭载着专业天线的测绘级接收机可以在开机后数十秒内达到厘米级的定位精度<sup>[1-3]</sup>。近年来,随着电子设备制造技术的不断提升,全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)设备朝着小型化和低成本化方向发展,更多的GNSS板卡以及芯片也在不断涌现。相较于测绘级接收机,低成本GNSS接收机终端拥有更加广阔的应用场景,例如智能手机平台、小型无人机和机器人平台等。在这类场景下,轻量化和低成本化几乎是必要条件。但是相较而言,低成本接收机的定位精度远比不上测绘级接收机,其根本原因在于硬件设备所导致的低质量观测。在没有多径的开阔环境下,低成本接收机的定位精度一般在5~10m;而在严重的多径环境下,其定位误差可能达到数十米<sup>[4]</sup>。

载波相位是卫星定位中十分重要的观测参数之一,具有噪声小、多径误差小等优秀特性,经过模糊度解算后,常用于高精度的定位算法中。但是由于低成本接收机跟踪环路的性能远不如测绘级接收机,因此增加了信号丢失的概率,从而导致频繁的载波相位周跳。载波相位周跳现象的存在影响了其观测的连续性,使得利用载波相位的算法应用更为困难,例如载波相位平滑伪距以及载波相位模糊度解算技术等<sup>[5]</sup>。利用实时动态定位(Real-Time Kinematic, RTK)或精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术,低成本接收机也可以达到分米级的定位精度,但前提是需要很长时间的收敛过程,使其应用场景受到了很大限制<sup>[6]</sup>。因此,低成本接收机的高精度定位仍然是一个待解决的问题,周跳修复是其中最为关键的技术难点之一。

目前,对于低成本接收机周跳修复算法的研究还不够完善。大多数基于测绘级接收机设计的传统周跳检测及修复算法都对接收机的伪距或多普勒观测质量有较高的要求,从而可以利用这些观测对载波相位存在的跳变进行检测<sup>[7-9]</sup>。在观测信号的频率方面,也有利用多频观测的周跳检测算法被提出,其性能明显优于单频的周跳检测策略<sup>[10-12]</sup>。这些算法仅适用于观测质量有保证且周跳发生不是很频繁的测绘级接收机。对于低成本接收机,伪距和多普勒观测的噪声及误差都很大,特别是在一

些复杂环境下,接收信号的载噪比更低,进一步降低了观测的质量。因此,研究适用于低成本接收机周跳修复的实际策略是必要的,并且该策略需要在复杂环境下仍具有一定的鲁棒性。

本文提出了一种适用于低成本接收机的双差载波相位周跳修复策略,并且利用载噪比对修复策略的有效性进行了评估。该策略的优势在于考虑了低成本GNSS接收机的观测特性,可以检测并移除无效载波相位观测,具有更强的鲁棒性。

## 1 双差载波相位周跳修复原理

### 1.1 双差载波相位观测

在短基线条件下,对载波相位进行双差处理后,可以消除接收机钟差、卫星钟差、电离层延时和对流层延时等观测误差,因此双差载波相位观测可以表示为<sup>[13]</sup>

$$\nabla\Delta\Phi(t) = \nabla\Delta\rho(t) + \lambda\nabla\Delta N(t) + \nabla\Delta M_{\Phi}(t) + \nabla\Delta\epsilon_{\Phi}(t) \quad (1)$$

其中, $\nabla\Delta$ 表示双差操作, $\Delta$ 表示站间差分, $\nabla$ 表示星间差分; $t$ 为观测时间; $\Phi$ 为载波相位观测; $\rho$ 为卫星天线和接收机天线间的几何距离; $\lambda$ 为载波波长; $N$ 为载波相位的整数模糊度; $M_{\Phi}$ 为多径误差; $\epsilon_{\Phi}$ 为噪声。由于载波相位多径误差和噪声一般为厘米级,相对于低成本接收机的米级定位精度,可以忽略,双差载波模糊度的估计值可以简化为

$$\nabla\Delta\hat{N}(t) = \frac{\nabla\Delta\Phi(t) - \nabla\Delta\rho(t)}{\lambda} \quad (2)$$

### 1.2 高阶多项式拟合的载波相位周跳修复方法

载波相位观测中造成周跳的主要原因包括信号跟踪丢失、信号中断以及低载噪比<sup>[14]</sup>。对于理想的无周跳载波相位观测,其双差模糊度 $\nabla\Delta N(t)$ 随时间变化应是一个常值。当在 $t$ 时刻发生周跳现象,跳变量 $\delta N(t)$ 可以定义为

$$\delta N(t) = \nabla\Delta N(t) - \nabla\Delta N(t-1) \quad (3)$$

在静止或低动态场景下,无周跳的载波相位观测可以由高阶多项式拟合的方法进行估计<sup>[15]</sup>。一段长为 $L$ 的双差载波相位观测一般利用二阶多项式就可以做到比较精准的拟合,如式(4)

$$\nabla\Delta\hat{\Phi}(t) = at^2 + bt + c \quad (4)$$

其中, $\nabla\Delta\hat{\Phi}(t)$ 为拟合得到的双差载波相位; $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为拟合系数,跳变量可以由式(5)估计得到

$$\delta\hat{N}(t) = \left[ \frac{\nabla\Delta\Phi(t) - \nabla\Delta\hat{\Phi}(t)}{\lambda} \right] \quad (5)$$

其中,  $[\cdot]$  表示取整操作。值得一提的是, 如果接收机本身存在半个波长的周跳现象, 则需要将  $\lambda$  替换成  $\lambda/2$  来计算存在多少个半波长周跳。

## 2 面向低成本接收机的载波周跳修复策略

对于低成本 GNSS 接收机, 传统基于测绘级 GNSS 接收机的载波相位周跳修复方法主要存在下述问题:

1) 观测时间不稳定。对于测绘级接收机而言, 观测量的观测时间间隔可以稳定为 1s; 但对于低成本接收机而言, 例如手机的观测, 在实际观测中发现存在观测时间间隔不稳定的现象, 例如两次观测间隔为 0.999s, 从而引入了 1ms 的观测时间跳变。观测时间的跳变将在实际载波相位中引入跳变, 而这种跳变会被多项式拟合法误检测和误修复。

2) 卫星坐标也被用于本文提出的周跳修复策略中以计算基站和卫星间的距离, 因此星历误差就需要被考虑在内。当星历更新时, 由于星历参数的突然变化, 引入一个微小的跳变, 从而引起误检测和误修复。

3) 由信号遮挡所导致的低载噪比会使得低成本接收机输出无效的载波相位观测。这类无效观测的主要特点是模糊度的估计值没有明显的跳变现象, 在时间上也不是常数, 从而无法在实际算法中得到应用。传统算法无法检测上述无效载波相位, 因此需要设计算法对其进行检测并去除, 否则会引入误修复。

4) 多径也可能引入低载噪比, 但这种情况下输出的仍为有效载波相位观测。为了充分在复杂环境下利用载波相位观测, 就需要有效识别多径导致的低载噪比。

如果考虑流动站存在观测时间的跳变并且忽视噪声和多径, 式(1)可以变化为式(6)

$$\nabla\Delta\Phi(t) = \nabla\rho(t_r) - \nabla\rho(t_b) + \lambda\nabla\Delta N(t_r) \quad (6)$$

其中,  $t_r$  为低成本接收机作为流动站的观测时间, 并且可能经历跳变; 而  $t_b$  为基站的观测时间。式(6)经过进一步变化可得

$$\nabla\Delta\Phi(t) + \nabla\rho(t_b) = \nabla\rho(t_r) + \lambda\nabla\Delta N(t_r) \quad (7)$$

其中,  $\nabla\rho(t_b)$  可以通过星历和基站坐标计算得到, 而  $\nabla\Delta\Phi(t)$  也为实际已知观测, 因此令  $\Phi_c = \nabla\Delta\Phi(t) + \nabla\rho(t_b)$ , 可以组合出新的观测, 并且有

$$\Phi_c(t_r) = \nabla\rho(t_r) + \lambda\nabla\Delta N(t_r) \quad (8)$$

即  $\Phi_c$  只与  $t_r$  有关。此时利用式(4), 以  $t_r$  作为

自变量对式(8)的观测进行多项式拟合,  $t_r$  的跳变就不会带来影响; 而如果直接对式(6)进行多项式拟合,  $t_r$  和  $t_b$  的变化不一致会恶化拟合结果。但是, 正如前面所提到的, 在引入  $\nabla\rho(t_b)$  后, 会带来星历误差, 从而引入跳变。因此, 在提出的周跳修复策略中使用了联合检测的方式, 即同时对  $\nabla\Delta\Phi$  和  $\Phi_c$  进行多项式拟合法的周跳检测, 当且仅当两类观测都检测出周跳, 才认为有跳变发生, 否则认为其中一种观测出现了误检测。通过这种方法能够大大降低周跳误检的概率, 唯一可能出现误检测和误修复的情况是在某个历元同时发生了由星历变化和观测时间不稳定造成的跳变, 但这种情况在实际中发生的概率极低, 可以忽略不计。

图 1 给出了所提出的周跳检测策略的流程, 包括: 1) 初始化拟合用的载波相位队列长度  $L=0$ 。当一个新的载波相位输入后, 至少需要  $L_{th}$  长度的载波相位队列拟合来进行周跳检测。当  $L < L_{th}$  时, 将载噪比  $C/N_0$  与阈值  $(C/N_0)_{th}$  进行比较, 以判断该观测是否可以加入载波相位队列; 当  $L = L_{th}$  时,  $\nabla\Delta\Phi$  和  $\Phi_c$  会轮流进行二阶多项式拟合。2) 将拟合

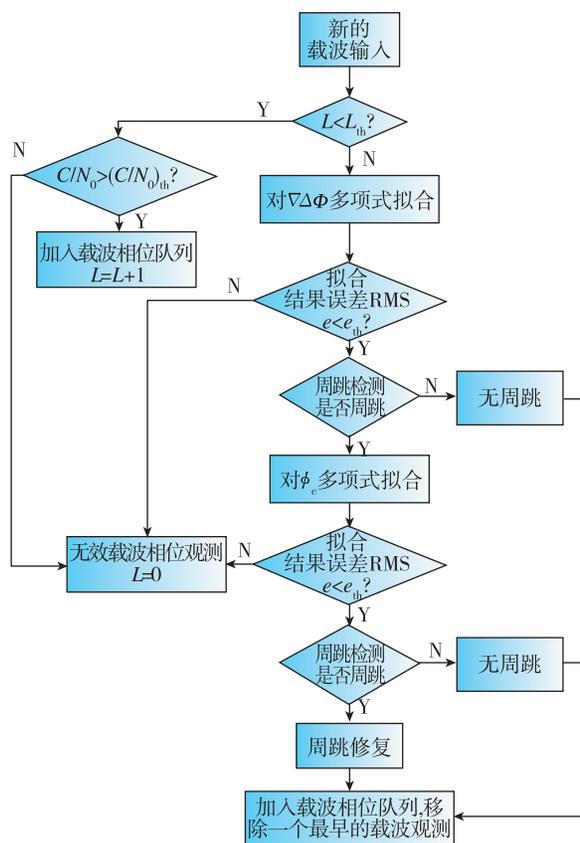


图 1 低成本 GNSS 接收机周跳修复策略

Fig. 1 Cycle-slip repair strategy for low-cost GNSS receivers

结果的均方根(Root Mean Square,RMS)误差  $e$  与阈值  $e_{th}$  进行比较,如果超过阈值,则认为队列中存在未被检测的无效观测,并将队列长度重置为 0;如果没有超过阈值,则对当前观测进行周跳检测,当两类观测的拟合结果都认为存在周跳时,则利用式(5)进行周跳修复。3)被判定为无周跳的观测以及被修复的观测会加入载波相位队列,并代替最早加入队列的观测,这样可以确保最新的观测被用于拟合,从而提升估计的准确性。

该周跳修复策略中的各阈值可以基于接收机的性能以及环境特性进行经验性的设定。一般而言,对于低成本接收机,  $L_{th}$  为 30,  $e_{th}$  为 0.3 周,  $(C/N_0)_{th}$  为 20dBHz,本文将使用以上参数进行试验。

值得一提的是,只有被判断为无周跳或周跳已被修复的观测才被认为是有效观测,而最初加入队列的观测不一定是有效观测,因此需要用拟合误差进行进一步的判断。只有有效观测才能用于后续的定位算法中。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验环境搭建

通过实际观测对本文提出的载波相位周跳修复算法进行验证。嵌有博通 BCM47755 芯片的小米 8 手机和 ublox ZED-F9P 板卡分别被作为超低成本和低成本接收机的代表进行试验测试,如图 2 所示。华测 B5 GNSS 接收机被用作基站提供高精度的多频观测,同时也用于提供厘米级的定位参考坐标,如图 3 所示。

试验分别在开阔场景和严重多径场景下进行,如图 4 所示,分析的数据包含全球定位系统(Global Positioning System,GPS)和北斗两种星座。开阔场景下周围数百米内无明显产生多径的建筑,观测时间为 7604s。在严重多径场景下,接收机北面及



图 2 ZED-F9P 接收机以及小米 8 手机  
Fig. 2 ZED-F9P receiver and MI 8 smart phone



图 3 华测 B5 GNSS 接收机  
Fig. 3 HUACE B5 GNSS receiver



(a) 开阔场景 (b) 多径场景

图 4 试验环境

Fig. 4 Experimental environment

西面有明显的建筑物遮挡,观测时间为 7400s。通过这种方式可以比较不同的多径环境对低成本 GNSS 接收设备的影响。

#### 3.2 试验结果

图 5 所示为小米 8 手机在开阔场景下的 G30 卫星周跳修复前后的双差模糊度估计值,该值由式(2)计算得到,可以反映模糊度随时间的变化情况。在 2809~2928s 以及 3165s 之后的时间段,模糊度表现为无规则的变化,表明此时为明显的无效观测,可以发现此时段内载噪比均低于 20dBHz,证明了载噪

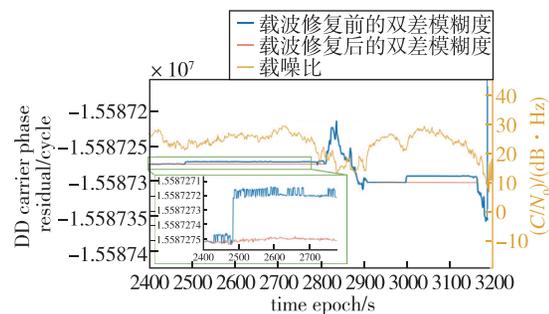


图 5 小米 8 在开阔场景下修复前后的双差载波相位模糊度  
Fig. 5 DD carrier phase ambiguity after and before cycle-slip repair of MI 8 in open sky environment

比阈值设定的合理性。在 2400~2686s 时间段内存在许多半周跳以及一个 3 周的整周跳现象(绿框内)。在 3000s 附近存在一个较大的整周数跳变而载噪比也处于局部最低点,表明载噪比较低时容易产生整周跳变。从整个 2400~3200s 时间段来看,所有的有效观测得到了正确修复,无效观测也被正确检测并移除,不存在误修复的现象。

图 6 所示为 F9P 在开阔场景下的周跳修复前后的双差模糊度估计值。与手机观测相比可以发现,F9P 的载波相位观测不存在半周跳的现象,且载噪比普遍较高,在 40dBHz 以上。此外,可以发现 F9P 的观测中也不存在无效观测,因此所有的周跳都可以被修复。从周跳修复结果来看,两处周跳都得到了较好的修复。

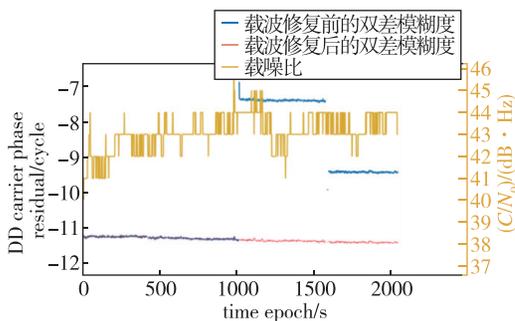


图 6 F9P 在开阔场景下修复前后的双差载波相位模糊度

Fig. 6 DD carrier phase ambiguity after and before cycle-slip repair of F9P in open sky environment

表 1 和表 2 分别对比了小米 8 手机和 F9P 在不同场景下的各类载波相位观测数量以及周跳修复情况,包含 GPS 和北斗的所有卫星。可以发现,在多径场景下发生周跳以及产生无效观测的概率比在开阔场景下要更高,这是由于多径场景下信号质量较差,载噪比较低,载波跟踪更为困难的缘故。不论是在哪种场景下,本文提出的算法都完全修复了小米 8 手机以及 F9P 载波观测中的周跳,但是对于存在的无效观测仍有一定的误修复率。对比表 1 和表 2 可以很明显地发现,小米 8 的观测比 F9P 观测有更多的周跳和无效观测,其中无效观测的增多尤为明显,这也是因为手机自身平面倒 F 天线(Planar Inverted-F Antenna, PIFA)抗多径能力差所导致,使得其在复杂场景下的载噪比容易低于 20dBHz。相比之下,F9P 的载噪比能够时常稳定在 40dBHz 以上,无效观测较少。但由于本文提出的算法专门基于载噪比和多项式拟合误差来鉴别无效观测,使得手机

无效观测的误修复概率明显降低,因此具有实际价值。

表 1 小米 8 载波相位各类观测数量

Tab. 1 Number of different carrier phase measurement of MI 8

	开阔场景		多径场景	
	GPS	北斗	GPS	北斗
周跳个数	239	106	324	174
修复周跳个数	239	106	324	174
有效观测个数	40170	50022	36113	44427
无效观测个数	9371	2766	9557	2916
无效观测误修复	76	10	57	23

表 2 F9P 载波相位各类观测数量

Tab. 2 Number of different carrier phase measurement of F9P

	开阔场景		多径场景	
	GPS	北斗	GPS	北斗
周跳个数	42	31	74	62
修复周跳个数	42	31	74	62
有效观测个数	34392	47263	33012	46587
无效观测个数	7	10	32	19
无效观测误修复	3	2	7	9

## 4 结论

本文提出了一种面向低成本接收机的周跳修复策略,能够在实际场景下提升低成本接收机载波相位观测的可用性。其主要贡献在于:1)提出了利用联合检测以避免时钟和星历突变造成的误修复;2)提出了利用载噪比和拟合误差检测无效载波观测。基于小米 8 和 F9P 接收机在两种场景下的试验结果表明,所提策略可以有效修复周跳并降低手机载波观测的误修复概率,同时也揭示了载噪比在载波质量分析中的重要作用,具有实际价值。在未来的研究中,需要对动态场景下的载波修复策略进行研究,并尝试加入诸如多普勒和伪距等观测辅助载波修复。

## 参考文献

- [1] Wubbena G, Schmitz M, Bagge A. PPP-RTK: precise point positioning using state-space representation in RTK networks[C]// Proceedings of ION GNSS, 2005: 13-16.
- [2] Zhao S, Cui X, Guan F, et al. A Kalman filter-based short baseline RTK algorithm for single-frequency

- combination of GPS and BDS[J]. *Sensors*, 2014, 14(8): 15415-15433.
- [3] Berntorp K, Weiss A, Di Cairano S. GNSS ambiguity resolution by adaptive mixture Kalman filter[C]// *Proceedings of 2018 21<sup>st</sup> International Conference on Information Fusion (FUSION)*. IEEE, 2018: 1-5.
- [4] Marais J, Berbineau M, Heddebaut M. Land mobile GNSS availability and multipath evaluation tool[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(5): 1697-1704.
- [5] Verhagen S, Teunissen P J G. The ratio test for future GNSS ambiguity resolution[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(4): 535-548.
- [6] Realini E, Reguzzoni M. GoGPS: open source software for enhancing the accuracy of low-cost receivers by single-frequency relative kinematic positioning[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(11): 115010.
- [7] Cai C, Liu Z, Xia P, et al. Cycle slip detection and repair for undifferenced GPS observations under high ionospheric activity[J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(2): 247-260.
- [8] Lacy M C D, Reguzzoni M, Sansò F. Real-time cycle slip detection in triple-frequency GNSS[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(3): 353-362.
- [9] Chen D, Ye S, Zhou W, et al. A double-differenced cycle slip detection and repair method for GNSS CORS network[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 439-450.
- [10] Zhao Q, Sun B, Dai Z, et al. Real-time detection and repair of cycle slips in triple-frequency GNSS measurements[J]. *GPS Solutions*, 2015, 19(3): 381-391.
- [11] Kirkko-Jaakkola M, Traugott J, Odijk D, et al. A RAIM approach to GNSS outlier and cycle slip detection using L1 carrier phase time-differences [C]// *Proceedings of 2009 IEEE Workshop on Signal Processing Systems*. IEEE, 2009: 273-278.
- [12] Li B, Liu T, Nie L, et al. Single-frequency GNSS cycle slip estimation with positional polynomial constraint[J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(9): 1781-1803.
- [13] Misra P, Enge P. *Global Positioning System: signals, measurements and performance(second edition)* [M]. Ganga-Jamuna Press, 2006: 206.
- [14] Lacy M C D, 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.
- [15] Dai Z. MATLAB software for GPS cycle-slip processing[J]. *GPS Solutions*, 2012, 16(2): 267-272.

(编辑:孟彬)