

实时精密单点定位中周跳探测与修复的算法研究

易重海¹ 朱建军¹ 陈永奇² 戴吾蛟¹

(1 中南大学测绘与国土信息工程系,长沙市麓山南路,410083)

(2 香港理工大学土地测量与地理资讯学系,香港九龙红磡)

摘要:提出了一种适用于实时 GPS 精密单点定位的周跳探测与修复的新算法。该算法步骤为:①利用 M-W 组合和电离层残差组合初步确定没有发生周跳和可能发生周跳的卫星;②利用当前历元与前一(或几个)历元的 L_1 、 L_2 和 L_w 观测值和第一步得出的没有发生周跳的卫星信息,采用基于历元间差分观测值的周跳处理模型对可能发生周跳的卫星进行周跳探测;③对第二步中周跳处理失败的卫星进行进一步的精化处理,以尽可能修复周跳。实验表明,新算法在实时 GPS 精密单点定位中可以准确地探测并修复周跳。

关键词:实时;精密单点定位;周跳探测与修复

中图分类号:P228.41

1997 年,Zumberge 提出精密单点定位技术(PPP)^[1]。该技术一经提出,便获得了广泛关注^[2-4]。在实时精密卫星轨道和钟差产品支持下,可以实现 PPP 定位实时数据处理,称为实时 PPP 技术。实时 PPP 技术与事后 PPP 技术相比有更大的难度,需要对非差载波相位观测值进行周跳的实时探测与修复。国内外众多学者对非差相位的周跳探测与修复进行了研究^[5-9]。但上述各周跳探测与修复方法均不是针对实时 PPP 定位设计的,且仅利用观测值信息,没有利用实时 PPP 定位中所需的高精度 GPS 卫星轨道和高采样率的卫星钟差信息。尽管目前已有实时 PPP 定位商业系统^[10],但算法并不公开。本文提出了一种适合于实时 PPP 定位的周跳探测与修复的新算法,并且通过算例验证了算法的效果。

1 实时 PPP 定位的周跳探测与修复新算法

双频 GPS 接收机有 L_1 、 L_2 相位观测值(以周为单位,则为 φ_1 、 φ_2)和 P_1 、 P_2 伪距观测值(若无 P_1 码,则采用 C_1 代替),而周跳处理中一般需用到一些组合观测值,如宽巷观测值 L_w 、M-W 组合观测值和电离层残差组合观测值 L_I 。

1.1 基于 M-W 组合和电离层残差组合进行卫星周跳情况分组

实时 PPP 定位一般具有两个特点:①观测值采样间隔一般较小,如 10 s、5 s、1 s 甚至小于 1 s,因此,相邻历元间的电离层延迟、对流层延迟等误差变化很小,可以充分利用该特性进行周跳的探测与修复;②一般采用双频 GPS 接收机,因此可以利用相邻历元间的 M-W 组合给出的宽巷模糊度 N_w 的变化 ΔN_w 确定宽巷相位是否发生周跳。

Han^[11]采用历元间电离层残差变化值的绝对值 $|\Delta L_I|$ 是否满足式(1)来判断当前历元相对定位中单历元双差模糊度求解成功与否,如果满足,则说明求解的模糊度正确,否则求解有误。

$$|\Delta L_I| < 5.0 \text{ cm} \quad (1)$$

Han 根据特点①, ΔI_{on} 在模糊度求解正确的情况下数值很小,如果当前历元模糊度求解错误,则在 ΔL_I 中引入一个跳跃 $|\lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2|$ (ΔN_1 和 ΔN_2 分别为当前历元求解的 L_1 与 L_2 模糊度值与其真值之间的整数偏差)。如果模糊度求解正确,则 ΔL_I 满足式(1);但 ΔL_I 满足式(1)也不能确定求解的模糊度正确。Han 给出了 20 周内满足式(1)的 L_1 与 L_2 模糊度偏差组合,见表 1。

收稿日期:2011-09-15。

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40704002);香港研究资助委员会基金资助项目(PolyU5132/05E)。

表 1 满足 $|\Delta L_I| < 5.0$ cm 的 ΔN_1 和 ΔN_2 组合
Tab. 1 ΔN_1 and ΔN_2 Combination ($|\Delta L_I| < 5.0$ cm)

ΔN_1 /周	ΔN_2 /周	ΔN_w /周	$\lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2$ /cm
±4	±3	±1	±2.85
±5	±4	±1	±2.54
±9	±7	±2	±0.31
±13	±10	±3	±3.17
±14	±11	±3	±2.23
±18	±14	±4	±0.63
±19	±15	±4	±4.76

本文借鉴 Han 的思想,将其引入非差相位观测值周跳探测,并将 Han 文中的 ΔN_1 和 ΔN_2 分别表示为当前历元 L_1 和 L_2 相位观测值的周跳。仔细分析表 1 中 ΔN_1 和 ΔN_2 的周跳组合,在满足式(1)条件时,各组合对应的宽巷周跳 $\Delta N_w = \Delta N_1 - \Delta N_2$ 均发生至少 1 周的跳变。如果能够判断表 1 中各周跳组合对应的宽巷是否发生周跳,则结合式(1)即可以处理表 1 中对式(1)不敏感的组合。因此,要以式(1)准确判断当前历元是否发生周跳,还需利用宽巷周跳 ΔN_w 信息进行辅助判断。本文利用实时 PPP 定位的特点②,引入 ΔN_w 进行周跳探测。

φ_1 和 φ_2 观测值的中误差为 0.01 周, P_1 和 P_2 码观测值的中误差为 0.5 m(对多种类型接收机观测数据进行大量实验,取 0.5 m 最优,故没有采用高精度 P 码对应的 0.3 m),则根据误差传播定律,有 N_w 的中误差为 $\delta_{N_w} = 0.41$ 周。顾及动态 PPP 定位采样间隔较小,假设前后历元 N_w 的中误差相同,取 3 倍中误差为 ΔN_w 的限值,则有:

$$|\Delta N_w| < 3\delta_{\Delta N_w} = 1.75 \text{ 周} \quad (2)$$

本文以式(2)判定宽巷观测值是否发生周跳。如果满足,则认为宽巷没有发生周跳,否则认为发生周跳。综上所述,本文以式(1)、式(2)两个条件同时满足,认为该卫星观测值没有发生周跳;只要有一个条件不满足,则认为可能发生周跳。

但是在实际数据处理中,由于存在诸如表 1 中 4、3 和 5、4 两个周跳组合对应的宽巷周跳只有 1 周的情况,笔者发现遗漏这两个周跳组合的可能性较大。针对此情况,参照表 1,笔者对周跳判断的条件进行了完善(如果 P 码的伪距精度为 0.25 m,则导出宽巷发生周跳的限值为 0.88 周,在此取更保守的值 0.8 周):

$$\begin{cases} 2.0 \text{ cm} < |\Delta L_I| < 5.0 \text{ cm} \\ 0.8 \text{ 周} < |\Delta N_w| < 1.75 \text{ 周} \end{cases} \quad (3)$$

如式(3)成立,则初步认为该卫星可能发生诸如 4、3 和 5、4 两组周跳,需进行周跳处理;如果没有发生周跳,则只增加了周跳虚警。

利用式(1)、式(2)和式(3)对当前历元各卫星进行初步的周跳分析,可将当前历元观测到的卫星分为两组:对于满足式(1)、式(2)且不满足式(3)的卫星,认为是没有发生周跳的卫星;而不满足式(1)、式(2)或者满足式(3)的卫星,则认为可能发生周跳的卫星。如果所有卫星均被认为是没有发生周跳的卫星,则该历元周跳处理完成,不需进行后续处理,否则需进行后续处理。

1.2 基于历元间差分观测值的周跳处理(第一次周跳处理)

根据 § 1.1 得到的没有发生周跳的卫星和可能发生周跳的卫星信息,本文采用历元间差分观测值进行可能发生周跳卫星的周跳探测与修复。2003 年, Bock^[12] 提出利用历元间差分观测值估计历元间的接收机坐标差,数学模型简述如下。

假设 i 与 $i-1$ 历元间共有 n 个共同观测卫星,对应的 L_m 相位观测值($m=1,2,\dots$)向量分别为 Φ_i 和 Φ_{i-1} ,历元间的差分观测值向量为 $\Delta\Phi_i = \Phi_i - \Phi_{i-1}$, V_i 为 $\Delta\Phi_i$ 的残差向量; i 与 $i-1$ 历元未知参数改正数向量分别为 dx_i 和 dx_{i-1} (包括 GPS 接收机的 3 个坐标分量和 1 个钟差参数),令 $d\Delta x_i = dx_i - dx_{i-1}$ 。设 A_i 为 i 历元绝对定位的设计矩阵, ω_i 为误差方程的常数项阵,则 Bock 提出的利用历元间差分观测值估计历元间坐标差的函数模型如下:

$$V_i = A_i \cdot d\Delta x_i - \omega_i \quad (4)$$

Bock 在此认为历元间没有发生周跳,或者周跳已成功修复,因此函数模型和随机模型中均没有考虑历元间可能发生周跳 ΔN 的影响。因此要利用式(4)进行周跳探测,必须在随机模型中考虑周跳 ΔN 的影响。本文采用以下模型进行考虑:对于一个高度角为 $elev_j$ 的卫星 j ,其权 p_j 为:

$$p_j = \begin{cases} 0 & (\text{卫星 } j \text{ 可能发生周跳}) \\ \sin^2(elev_j) & (\text{卫星 } j \text{ 没有发生周跳}) \end{cases} \quad (5)$$

根据 § 1.1 给出的没有发生周跳和可能发生周跳的卫星信息,对每一卫星利用式(5)组成与误差方程式(4)对应的观测值权阵 P_i ,然后对式(4)进行最小二乘平差,得到观测值残差 V_i ,再对可能发生周跳的卫星观测值残差(转换成以周为单位)进行分析,如果该残差值足够接近一个整数,则认为该卫星相位观测值发生周跳且能够成功修复,周跳大小为残差的四舍五入取整值(其中包括周跳值为 0 的情况),否则认为周跳处理失败,需要进一步分析。

图 1 为某一频率观测值情况的周跳处理。图 1 中, ϵ_{ps} 为一经验值,笔者取为 0.2 周。而实时

PPP 一般需同时进行 L_1 和 L_2 观测值的周跳处理。笔者发现,同时考虑组合观测值和 L_w 观测值,可以提高周跳探测与修复的成功率。在同时考虑 L_1 、 L_2 和 L_w 观测值时,理论上周跳处理结果(成功或失败)将出现如表 2 所示的 8 种情况。

表 2 周跳处理情况表

Tab. 2 Cycle Slip Detection Results

情况编号	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
L_1	成功	成功	成功	失败	失败	成功	失败	失败
L_2	成功	成功	失败	成功	失败	失败	成功	失败
L_w	成功	失败	成功	成功	成功	失败	失败	失败

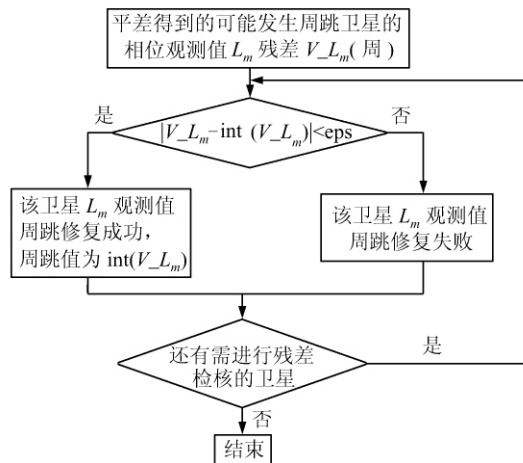


图 1 残差分析图

Fig. 1 Observation Residuals Analysis

L_1 、 L_2 和 L_w 三个观测值中只要有二个观测值周跳处理成功,即可完成该卫星观测值的周跳处理,即表 2 中①~④ 4 种情况属于周跳处理成功,而其他 4 种情况则认为处理失败。笔者经过大量实验发现,表 2 中周跳处理成功情况下①、③和④较多,②没有出现。③和④两组情况证实利用 L_w 观测值可以提高周跳探测与修复的成功率,故本文采取基于残差分析的周跳处理方法,同时对 L_1 、 L_2 和 L_w 三个观测值进行残差分析,如图 2 所示。

1.3 周跳精化处理(第二次周跳处理)

在 § 1.2 周跳处理中,周跳处理成功的卫星称之为第一次处理成功的卫星,而失败的卫星称之为第一次处理失败的卫星。只有当 § 1.2 中有周跳处理失败的卫星时,才需进行周跳精化处理。本文精化处理采取以下两个方法进行。

1) 利用 § 1.2 周跳处理成功的卫星辅助周跳处理。如果有第一次处理失败的卫星,且也有第一次处理成功的卫星,则再次进行基于历元间差分观测值的最小二乘平差,将第一次处理成功的卫星观测值的权恢复正常(参考式(5)),参与第

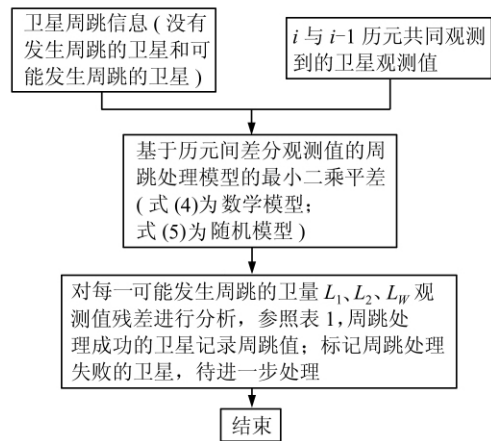


图 2 基于历元间差分观测值的周跳处理

Fig. 2 Cycle Slip Detection Based on Epoch-Differenced Observation

一次处理失败的卫星的周跳处理,如果此时所有的第一次处理失败的卫星均能周跳处理成功(称之为第二次处理成功的卫星),则周跳处理终止,如果仍有失败的卫星(称为第二次处理失败的卫星),则需引入周跳组合搜索方法。如果 § 1.2 有第一次处理失败的卫星,且无第一次处理成功的卫星,则直接引入周跳组合搜索方法进行处理。

2) 引入周跳备选组合搜索方法。对于需要进行此步周跳修复的卫星,将其周跳探测失败的频率对应的观测值的周跳估计值(即平差得到的观测值残差值)取整,获得该周跳值的初值,然后在该初值前后各 1 周构建周跳值搜索空间,最后通过平差得到的观测值残差平方和的次最小值 $V^T P V_s$ 与最小值 $V^T P V_m$ 的比值 Ratio 是否超过某一阈值 R_0 (本文选取最优阈值为 $R_0 = 1.5$)来确定正确的周跳组合,如果 $Ratio \geq R_0$,则认为 $V^T P V_m$ 对应的周跳组合是正确的周跳值,该卫星周跳修复成功,否则认为该卫星周跳处理失败。

$$Ratio = V^T P V_s / V^T P V_m \quad (6)$$

1.4 周跳的修复和周跳失败的处理

经过上述 3 个步骤的周跳处理,对于处理成功的卫星,将得到的周跳值统一转换为 L_1 和 L_2 频率周跳值(如需进行转换) ΔN_1 和 ΔN_2 。根据实时 PPP 定位的特点,本文以周跳值修正当前历元电离层组合中模糊度的参数值。一个不可避免的情况是周跳修复失败,对此,本文采取直接在此历元对周跳修复失败的卫星进行模糊度参数重置,即引入一个新的模糊度参数。

1.5 卫星跟踪中断情况的处理

上述周跳处理算法只涉及 i 与 $i-1$ 两个相邻历元的观测值,而实际 PPP 定位中会出现卫星

信号中断一个或者数个历元的情况,因此必须在算法中考虑。本文的处理方法是:设置一个进行周跳修复的最大时间间隔 ΔT ,如果卫星信号中断时间间隔超过 ΔT ,则不进行周跳的处理,而直接将其模糊度重置;如果没有超过 ΔT ,则按照上述 3 个步骤进行周跳处理,以尽可能修复周跳。故 ΔT 既不能设置得太小,也不能太大,具体 ΔT 的设置可以根据观测值采样间隔、载体动态情况等因素设定。笔者设置的 ΔT 值如下:对于采样间隔不大于 10 s 的情况,取 $\Delta T=60$ s;而对于采样间隔大于 10 s 的情况,则取 $\Delta T=90$ s。

2 实验及结果分析

为验证本文提出的方法进行 PPP 定位周跳处理的效果,笔者从底层开发了一个基于双频 GPS 观测值的 PPP 软件,该软件采用文献[13]所描述的算法,周跳探测与修复采用本文提出的方法进行,能够得出 cm 级的动态 PPP 定位结果[14]。由于不能获得实时 GPS 卫星轨道和钟差

产品,本文算例全部采用 IGS 发布的事后精密卫星轨道和钟差产品(卫星钟差为 30 s 间隔)模拟实时 PPP 的定位计算。周跳修复的最大时间间隔 ΔT 设置为 60 s。

2.1 实验 1: 船载动态 GPS 实验

实验数据为 2009 年 2 月 14 日在青岛海域的船载动态 GPS 数据,GPS 接收机和天线类型分别为 LEICA SR530 和 AT502 Pole,能够采集 C_1 、 L_1 、 P_2 和 L_2 共 4 种观测值,观测数据采样间隔为 10 s,观测时间区间为 06:53:00~08:03:40(GPS 时,下同),共计 425 个历元。笔者采用本文给出的算法进行周跳的探测与修复,发现整个观测时段内只有 Prn21 号卫星在第 60 历元发生周跳,周跳处理情况如表 3 所示,Prn21 号卫星周跳处理前后的电离层残差变化序列 d_{ion} 和宽巷模糊度变化序列 d_{N_w} 如图 3 所示。从图 3 可以清楚地看到 Prn21 号卫星发生周跳,其余没有发生周跳的卫星的 d_{ion} 和 d_{N_w} 序列图与 Prn21 号卫星周跳修复后的序列图类似,在此没有给出。

表 3 实验 1 周跳处理结果

Tab. 3 Cycle Slip Result for Test 1

卫星号	周跳历元	中断历元数	第一次周跳处理			周跳探测结果	第二次周跳处理		周跳处理成功与否
			L_1 周跳估值 /周	L_2 周跳估值 /周	L_w 周跳估值 /周		Ratio	L_1, L_2 周跳值/周	
21	60	6	32.248	54.048	-21.754	L_2 成功	3.681	32,54	成功

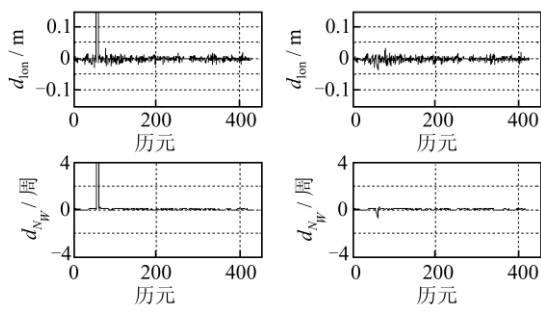


图 3 Prn21 号卫星周跳处理前后的 d_{ion} 和 d_{N_w} 序列图

Fig. 3 d_{ion} and d_{N_w} for Prn21 Before and After Cycle Slip Processed

PPP 定位软件计算得到的定位结果与 Trimble 相对定位软件 TTC 给出的相对定位结果(双差固定解)的坐标差值如图 4 所示,定位精度统计如表 4 所示。

图 4 和表 4 表明,本文提出的基于式(1)、式(2)和式(3)的周跳探测条件是合理的,没有遗漏周跳,并且能够精确修复周跳,可获得 cm 级 PPP 的定位结果。

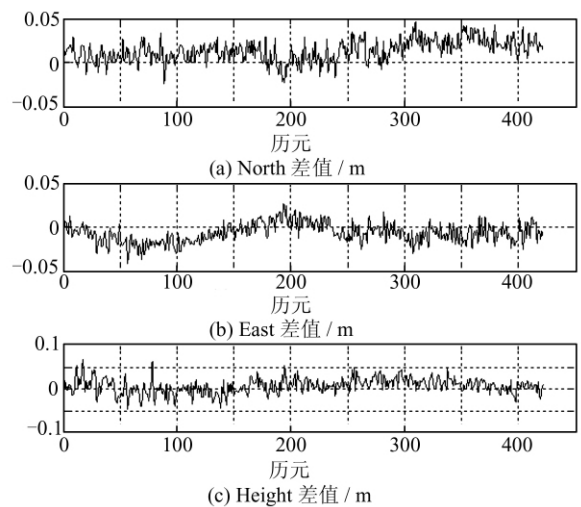


图 4 PPP 解与 TTC 相对定位结果差值

Fig. 4 Position Difference Between PPP and TTC Solution

鉴于实验 1 数据中仅发生一个周跳,笔者对 Prn10 号卫星人为地增加了一些难以探测的周跳值进行模拟周跳探测实验。模拟周跳值如表 5 所示。

表4 PPP解与TTC相对定位结果统计/m

Tab. 4 Coordinates Difference Statistics Between PPP and TTC

	North	East	Height
整体偏差	0.012 9	-0.007 2	0.006 2
中误差	0.012 8	0.011 5	0.018 1
标准差	0.018 2	0.013 6	0.019 1

表5 加入的待检测的周跳

Tab. 5 Added Cycle Slip to be Detected

历元位置	103	193	283	373
周跳值	1,1	4,3	5,4	9,7

对表5中人为引入的周跳进行探测,在第一次周跳处理中均能成功修复周跳,不需要进行第二次周跳处理,表明新算法可以探测出并修复较难处理的周跳组合。

2.2 实验2

本次实验选取香港地区GPS连续运行跟踪网络SatRef中的HKFN站在2008年10月7日24h的观测数据模拟动态定位周跳测试。HKFN站观测值的采样间隔为5s,共计17280个历元,GPS接收机和天线类型分别为LEICA GRX1200PRO和LEIAT504 LEIS,采集 C_1 、 L_1 、 P_2 和 L_2 共4种观测值。笔者采用GAMIT/GLOBK(V10.3)^[15,16]软件将香港参考站与其周边的IGS跟踪站进行网络解,获得HKFN站在ITRF2005坐标系中的精确坐标,将其作为评价模拟动态PPP定位精度的真值。实验2周跳处理情况如下:①累计发生周跳62个,其中第一次周跳处理成功修复60个,第二次周跳处理修复2个(均为第一次周跳处理中对 L_w 周跳能够成功修复,第二次周跳处理中对 L_1 周跳值进行搜索,Ratio值分别为3.863和4.794);②累计周跳虚警14个,其中由式(1)、式(2)中 $|\Delta N_w|$ 超限造成的虚警个数为11个,由 $|\Delta L_l|$ 超限造成的虚警个数为1个;由式(3)造成的虚警个数为2个。这些虚警经过本文方法的第一次周跳处理,均被成功判断为没有发生周跳;③模糊度重置个数为0;④卫星信号中断跟踪最长的时间间隔为30s(6个历元),以5~10s居多;⑤9780历元成功修复Prn17和Prn26两个卫星同时发生的周跳;9782历元成功修复Prn15、Prn26和Prn30三个卫星同时发生的周跳;⑥成功修复Prn3在4535和4536历元发生的连续周跳,Prn30在10314、10315、10317、10319和10320历元发生的连续周跳(10316和10318历元无观测值)和Prn31在2920、2921历元发生的连续周跳。

图5为PPP定位坐标值相对于GAMIT/GLOBK软件给出的HKFN站坐标值的差值序列图(30s间隔的定位结果),表6为定位结果精度统计。

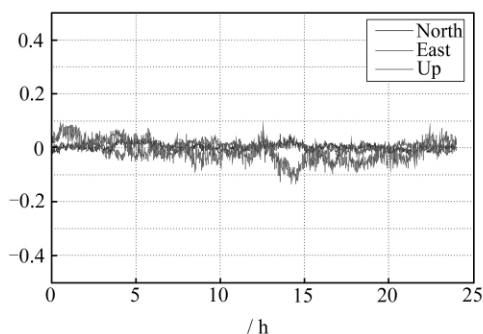


图5 PPP定位误差

Fig. 5 PPP Position Error

表6 PPP结果统计值/m

Tab. 6 Statistics for PPP Positioning/m

HKFN	North	East	Height
整体偏差	0.003 2	0.000 7	-0.012 0
中误差	0.012 3	0.015 9	0.040 3
标准差	0.012 7	0.015 9	0.042 1

由图5和表6可知,新算法能够处理连续周跳、同一历元多个卫星发生周跳等周跳处理中较为棘手的情况,能够准确地对周跳进行修复,获得cm级的PPP动态定位结果,因此该方法适合于实时PPP定位的周跳处理。

3 结语

本文提出的算法利用高精度GPS卫星轨道和高精度高采样率卫星钟差信息,仅利用当前历元与前一(或者几个)历元的观测值进行周跳探测与修复,因此特别适合高精度实时PPP定位中周跳的处理。另外,新算法不需要高精度P码观测值,能够处理众多类型GPS接收机的数据,应用范围较广。下一步需要采用实时卫星轨道、钟差产品和动态观测数据对该算法进行广泛的测试和完善。

参考文献

- [1] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise Point Positioning for the Efficient and Robust Analysis of GPS Data from Large Networks [J]. J Geophys Res, 1997, 102(B3): 5 005-5 017
- [2] 刘经南,叶世榕. GPS非差相位精密单点定位技术探讨[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(3): 234-240

- [3] 张小红,鄂栋臣. 用 PPP 技术确定南极 Amery 冰架的三维运动速度[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2005, 30(10):909-912
- [4] 张小红,刘经南,Forsberg R. 基于精密单点定位技术的航空测量应用实践[J]. 武汉大学学报·信息科学版,2006,31(1):19-22
- [5] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3):199-202
- [6] 郑作亚,程宗颐,黄斌,等. 对 Blewitt 周跳探测与修复方法的改进[J]. 天文学报,2005,46(2):216-224
- [7] 袁玉斌,党亚民,成英燕,等. 非差相位数据预处理的 TurboEdit 算法及其改进[J]. 大地测量与地球动力学,2009,29(3):109-113
- [8] Han S. Ambiguity Recovery for GPS Long Range Kinematic Positioning[J]. Journal of The Institute of Navigation, 1997,44(2):257-266
- [9] 徐锐,黄丁发,周乐韬,等. 一种改进的双频单 P 码周跳探测与修复方法[J]. 大地测量与地球动力学,2007,27(4):67-71
- [10] Dixon K. StarFire: A Global SBAS for Sub-Decimeter Precise Point Positioning [C]. ION GNSS, British National Space Centre, 2006
- [11] Han S. Quality Control Issues Relating to Ambiguity Resolution for Real-Time GPS Kinematic Positioning[J]. Journal of Geodesy, 1997, 71(6):351-361
- [12] Bock H. Efficient Methods for Determining Precise Orbits of Low Earth Orbiters Using the Global Positioning System[D]. Berne: University of Berne, 2003
- [13] Kouba J, Héroux P. Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products[J]. GPS Solutions, 2001,5(2):12-28
- [14] Chen Y Q, Yi Z H. Development of a Precise Point Positioning Software and Test Results[C]. GNSS 2008, Tokyo, 2008
- [15] Herring T A, King R W, McClusky S C. GAMIT Reference Manual: GPS Analysis at MIT Version 10. 3[R]. Cambridge: Mass Inst of Technol, 2006
- [16] Herring T A, King R W, McClusky S C. GLOBK Reference Manual: Global Kalman Filter VLBI and GPS Analysis Program Version 10. 3 [R]. Cambridge:Mass Inst of Technol, 2006

第一作者简介:易重海,博士生,主要从事 GNSS 数据处理及软件开发工作。

E-mail: yizhonghai@gmail.com

Cycle-Slip Detection and Correction Algorithm for Real-Time PPP

YI Zhonghai¹ ZHU Jianjun¹ CHEN Yongqi² DAI Wujiao¹

(1 Department of Survey Engineering and Geomatics, Central South University, South Lushan Road, Changsha 410083, China)

(2 Department of Land Surveying and Geoinformatics, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong, China)

Abstract: A cycle-slip detection and correction algorithm suitable for real-time precise point positioning (PPP) was proposed. There are three main steps in the algorithm: ① Possible cycle-slip affected satellites and cycle-slip free satellites were determined using M-W and ionosphere residual observation combination; ② Cycle slip detection and correction was conducted for possible cycle-slip affected satellites using cycle-slip free satellites information and observations of current epoch and previous one or several epoch(s), based on the new developed epoch-differenced cycle slip detection model; ③ Refinement process for cycle slip detection failed satellites to try to repair cycle slip. The experimental results show that the new algorithm can detect and repair cycle slip correctly and efficiently in real time PPP.

Key words: real time; precise point positioning; cycle slip detection and correction

About the first author: Yi Zhonghai, Ph. D candidate, majors in data processing and software developing of GNSS.

E-mail: yizhonghai@gmail.com