

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.02.011

GPS 非差数据周跳探测的 TECR-MW 综合法

邹正标, 何秀凤, 唐旭

(河海大学卫星及空间信息应用研究所, 江苏南京 210098)

摘要: 针对电离层总电子含量变化率(TECR)方法和双频码相组合(MW)方法探测周跳各自的局限性,综合利用TECR法和MW法进行周跳探测。首先采用TECR法探测周跳,然后用MW法进行第2次探测,最后综合电离层TECR法和MW法的宽巷模糊度探测 L_1 频率和 L_2 频率上发生的周跳。这种综合探测法不受接收机与卫星间的几何距离、接收机钟差和卫星钟差、电离层折射的影响。采用实测数据进行试验,结果表明,综合利用TECR法与MW法探测GPS周跳比采用单一方法探测周跳更加有效、可靠。

关键词: GPS;周跳探测;电子含量;宽巷模糊度

中图分类号:P228.4 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)02-0155-04

Cycle slip detection using TECR and MW combined method for un-differenced GPS data

ZOU Zhengbiao, HE Xiufeng, TANG Xu

(Institute of Satellite Navigation and Spatial Information System, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to overcome the shortcomings of the ionospheric total electron content rate (TECR) and dual-frequency code phase combination (MW) methods, a combination of the two methods was used for cycle slip detection. First, the TECR method was used to detect the cycle slip. Then, the MW method was used to detect the cycle slip for the second time. Finally, the ionospheric TECR and the wide lane ambiguity of MW were used together to detect the cycle slip on L_1 and L_2 frequencies. This combined method was not affected by the geometrical distance between the receiver and satellite, the receiver clock offset, the satellite clock offset, and ionospheric refraction. According to the test results of measured data, the TECR and MW combined method is more effective and reliable than a single method in detecting GPS cycle slip.

Key words: GPS; cycle slip detection; electron content; wide lane ambiguity

在GPS载波相位测量中,整周模糊度的解算^[1-3]和周跳的探测与修复是GPS数据处理的2个关键难题。在GPS变形监测中,基于双差观测值采用文献[4-5]中的方法可以避免整周模糊度的解算和周跳的探测与修复;而在精密单点定位中,由于采用的是非差数据,整周模糊度的确定和周跳的探测与修复比差分定位模式更加困难^[6],因此GPS非差数据的周跳探测是精密单点定位数据处理中的一个关键问题。

目前用于GPS非差数据的周跳探测方法较多^[7-13],如多项式拟合法、高次差法、双频码相组合法(MW法)、电离层残差法、TurboEdit法等,但这些方法都有一定的局限性,比如多项式拟合法无法探测小周跳,双频码相组合和电离层残差法无法确定周跳的发生频率^[8],TurboEdit法受电离层延迟变化的影响,并且当 L_1 和 L_2 上同时发生6周以内相同大小的周跳时,TurboEdit法将无法探测此类周跳^[11],不少学者对TurboEdit法进行了改进^[12-13]。电离层总电子含量变化率法(TECR法)^[14]能有效探测出6周以内相同大小的周跳且不受电离层变化的影响,但仍存在一些不足。针对TECR法和MW法各自的局限性,综合MW法和TECR法

收稿日期:2013-03-27

基金项目:国家自然科学基金(41274017);江苏省科技支撑计划(BE2010316)

作者简介:邹正标(1990—),男,江西抚州人,硕士,主要从事卫星大地测量研究。E-mail:986292418@qq.com

2种方法进行周跳探测,充分利用2种算法各自的优势有效地探测周跳。

1 TECR与MW周跳探测方法

1.1 TECR法探测周跳

将历元 k 的电离层总电子含量记为 $T_{\text{EC}}(k)$, $T_{\text{EC}}(k)$ 的计算式为^[14]

$$T_{\text{EC}}(k) = \frac{f_1^2}{40.3 \times 10^{16}(\gamma - 1)} (\lambda_1 \Phi_1^j(k) - \lambda_2 \Phi_2^j(k) + \lambda_2 N_2^j - \lambda_1 N_1^j - b_i + b^j) \quad (1)$$

其中 $\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2}$

式中: f_1, f_2 —— L_1, L_2 载波的频率; λ_1, λ_2 —— L_1, L_2 载波的波长; Φ_1^j, Φ_2^j —— L_1, L_2 载波的相位观测值; N_1^j, N_2^j —— L_1, L_2 相位观测值的整周模糊度; b_i, b^j ——接收机和卫星的频率间偏置。

对 $T_{\text{EC}}(k)$ 进行历元间差分可得到当前历元的电离层总电子含量变化率,记为 T_{ECR} :

$$T_{\text{ECR}}(k) = \frac{T_{\text{EC}}(k) - T_{\text{EC}}(k-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

当对历元 k 进行周跳探测时,假设历元 k 之前的所有历元的观测值没有周跳,或者周跳已被修复,利用历元 $k-1$ 和历元 $k-2$ 的 T_{ECR} 值来估计历元 k 的 T_{ECR} 值,计算方法如下:

$$T_{\text{ECR}}(k) = T_{\text{ECR}}(k-1) + \dot{T}_{\text{ECR}}(k-1)\Delta t \quad (3)$$

其中 $\dot{T}_{\text{ECR}}(k-1) = \frac{T_{\text{ECR}}(k-1) - T_{\text{ECR}}(k-2)}{\Delta t}$

将所计算的 T_{ECR} 与估计出的 T_{ECR} 的差值作为周跳检测量,当周跳检测量超过给定的阈值时,则认为历元 k 存在周跳。设 L_1 和 L_2 载波上发生的周跳分别为 $\Delta N_1^j(k)$ 和 $\Delta N_2^j(k)$,基于式(1)~(3)可以得出历元 k 的周跳计算式:

$$\lambda_1 \Delta N_1^j(k) - \lambda_2 \Delta N_2^j(k) = \frac{40.3 \times 10^{16}(\gamma - 1)\Delta t T_{\text{ECR}}(k)}{f_1^2} - (\lambda_1 \Phi_1^j(k) - \lambda_2 \Phi_2^j(k)) + (\lambda_1 \Phi_1^j(k-1) - \lambda_2 \Phi_2^j(k-1)) \quad (4)$$

式(4)中的 $T_{\text{ECR}}(k)$ 可通过式(3)计算。

TECR法不受接收机与卫星间的几何距离、接收机钟差和卫星钟差的影响,且仅使用了载波相位观测值进行周跳探测,因此精度较高,能有效探测小周跳。但是此方法无法确定周跳的位置和大小,且当发生的周跳为 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{77}{60}$ 时,此方法将无法探测出周跳。

1.2 MW法探测周跳

MW组合形式为

$$N_{\text{MW}}^j = \Phi_1^j - \Phi_2^j - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1^j}{\lambda_1} + \frac{P_2^j}{\lambda_2} \right) \quad (5)$$

式中: P_1^j, P_2^j ——伪距观测值; N_{MW}^j ——宽巷模糊度。

假设在历元 k 时刻, L_1 和 L_2 载波上发生的周跳分别为 $\Delta N_1^j(k)$ 和 $\Delta N_2^j(k)$,对式(5)进行历元间差分可得周跳计算式:

$$\Delta N_1^j(k) - \Delta N_2^j(k) = N_{\text{MW}}^j(k-1) - N_{\text{MW}}^j(k) \quad (6)$$

MW法不受接收机与卫星间的几何距离、电离层折射、接收机钟差和卫星钟差的影响。但对于 $\Delta N_1^j(k) = \Delta N_2^j(k)$ 的情况,MW法失效。当没有周跳发生时, $N_{\text{MW}}^j(k-1) - N_{\text{MW}}^j(k)$ 应表现为一组上下波动较稳定的值。

2 综合TECR法与MW法探测周跳

TECR法能有效探测出小周跳且不受电离层变化的影响,但无法探测 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{77}{60}$ 的周跳组合;MW法能有

效探测 TECR 法不能探测的周跳,但对于 $\Delta N_1^i(k) = \Delta N_2^i(k)$ 的周跳组合, MW 法失效。针对 TECR 法和 MW 法各自的局限性,本文将计算出的 T_{TECR} 与估计出的 T_{TECR} 的差值 (TECR 残差) 作为 TECR 法的周跳检测量,再将 $N_{\text{MW}}^i(k-1) - N_{\text{MW}}^i(k)$ 作为 MW 法的周跳检测量,使用 2 个周跳检测量进行周跳的探测。当 GPS 观测数据中没有周跳时,TECR 法的周跳检测量小于阈值 0.15TECU/s , MW 法的周跳检测量也不超过阈值 1 周。图 1 给出了综合这 2 种方法进行周跳探测的流程。

3 试验结果与分析

为验证综合 TECR 法和 MW 法探测周跳的有效性,采用 2012 年 10 月 8 日在河海大学科学馆楼顶观测墩采集的实测数据作为试验数据。观测数据类型包括 C_1 、 P_2 、 L_1 、 L_2 , 数据采样率为 1 s, 观测时长为 2 h, 经检验所采集的数据不含周跳。

首先,对实测数据不加任何周跳,给出 TECR 法和 MW 法的周跳检测量时间序列,见图 2(a) 和图 2(b)。然后,在 180 历元处加入周跳组合 ($\Delta N_1 = 77, \Delta N_2 = 60$), 在 320 历元处加入周跳组合 ($\Delta N_1 = 1, \Delta N_2 = 1$), 给出 TECR 法和 MW 法的周跳检测量时间序列,见图 2(c) 和图 2(d)。为使图像清楚显示,图 2 中各图均只截取了实测数据中的 500 历元进行显示。从图 2(a) 和图 2(b) 可以看出,当 GPS 观测数据中没有周跳时 TECR 法和 MW 法的周跳检测量均在给定的阈值范围之内。从图 2(c) 和图 2(d) 可以看出,TECR 法能有效探测出 320 历元处加入的周跳,但无法探测出 180 历元处加入的周跳; MW 法能有效探测出 180 历元处加入的周跳,但无法探测 320 历元处加入的周跳。当综合 2 种方法探测周跳时,可以有效探测出 180 历元和 320 历元处加入的周跳。

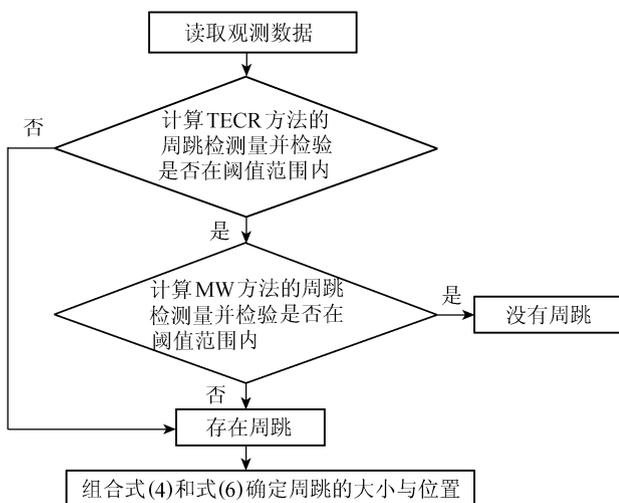


图 1 综合方法探测周跳流程

Fig. 1 Flow chart of cycle slip detection with combined method

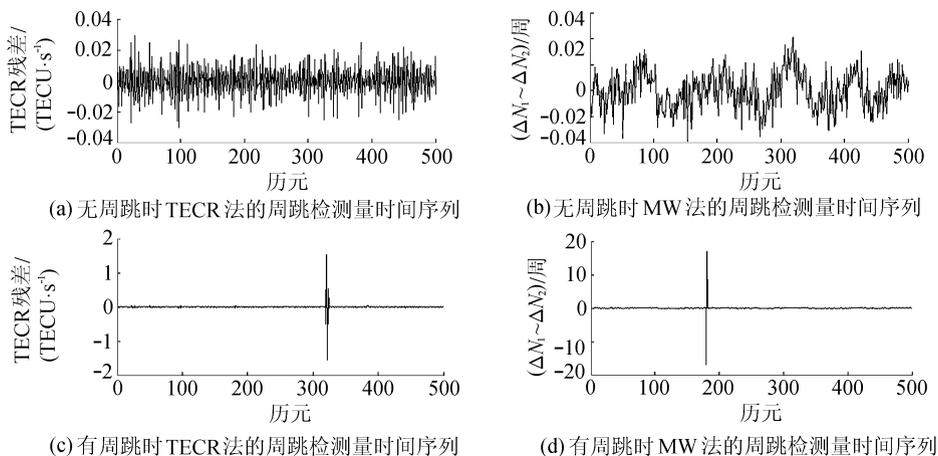


图 2 TECR 法和 MW 法探测周跳的周跳检测量时间序列

Fig. 2 Time series of cycle slip test quantity of TECR and MW methods for cycle slip detection

为了进一步验证综合 2 种方法探测周跳的有效性,分别在不同的历元和卫星的观测值上添加不同的周跳进行周跳探测试验,结果见表 1。从表 1 可以看出,综合 2 种方法能有效探测出所有加入的周跳。

4 结 论

TECR 残差是一个敏感的周跳检测量,即使在电离层活跃期亦能探测出小周跳,但却无法探测 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{77}{60}$ 的周跳。MW 法能有效探测出 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{77}{60}$ 的周跳,但无法探测 ΔN_1 等于 ΔN_2 的周跳。本文综合利用 2 种方法

进行周跳探测,充分发挥了2种方法的优势,弥补了TECR法和MW法各自的不足。改进方法不受接收机与卫星间的几何距离、接收机钟差和卫星钟差、电离层折射的影响,仅需要1台接收机和1颗卫星间的载波相位观测值和伪距观测值信息,便可有效探测出每一颗卫星的观测值上发生的任何周跳。此外,综合利用TECR法和MW法探测周跳使用2个周跳检测量进行周跳探测,比使用单一的方法探测周跳更为有效和可靠。

参考文献:

- [1] 刘志平,何秀凤.改进的GPS模糊度降相关LLL算法[J].测绘学报,2007,36(3):286-289. (LIU Zhiping, HE Xiufeng. An improved LLL algorithm for GPS ambiguity solution [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2007,36(3):286-289. (in Chinese))
- [2] 刘志平,何秀凤,郭广礼,等. GNSS模糊度降相关算法及其评价指标研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(3):257-261. (LIU Zhiping, HE Xiufeng, GUO Guangli, et al. Decorrelation algorithms and its evaluation indexes for GNSS ambiguity solution[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2011,36(3):257-261. (in Chinese))
- [3] 李征航,张小红. 卫星导航定位新技术及高精度数据处理方法[M]. 武汉:武汉大学出版社,2009.
- [4] 刘志平,何秀凤,张书毕,等. 结构变形监测的单频GPS动态三差法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2011,39(7):1075-1078. (LIU Zhiping, HE Xiufeng, ZHANG Shubi, et al. Dynamic triple-difference method for single frequency GPS deformation monitoring[J]. Journal of Tongji University:Natural Science, 2011,39(7):1075-1078. (in Chinese))
- [5] 何秀凤. 变形监测新方法及其应用[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [6] 叶世榕. GPS非差相位精密单点定位理论与实现[D]. 武汉:武汉大学,2002.
- [7] BLEWITT G. An automated editing algorithm for GPS data[J]. Geophysical Research Letters,1990,17(3):199-202.
- [8] 陈品馨,章传银,黄昆学. 用相位减伪距法和电离层残差法探测和修复周跳[J]. 大地测量与地球动力学,2010,30(2):120-124. (CHEN Pinxin, ZHANG Chuanyin, HUANG Kunxue. Cycle slip detecting and repairing by use of phase reduce pseudorange law and ionized layer remnant method of difference[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2010,30(2):120-124. (in Chinese))
- [9] 王维,王解先,高俊强. GPS周跳探测的方法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2010,35(6):687-690. (WANG Wei, WANG Jiexian, GAO Junqiang. Cycle slip detection of GPS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2010,35(6):687-690. (in Chinese))
- [10] 易重海,朱建军,陈永奇,等. 实时精密单点定位中周跳探测与修复的算法研究[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(11):1314-1319. (YI Zhonghai, ZHU Jianjun, CHEN Yongqi, et al. Cycle-slip detection and correction algorithm for real-time PPP[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2011,36(11):1314-1319. (in Chinese))
- [11] 张顺,姚宜斌,陈鹏,等. GPS非差数据周跳探测方法研究[J]. 大地测量与地球动力学,2012,32(1):102-104. (ZHANG Shun, YAO Yibin, CHEN Peng, et al. Research on cycle slip detecting methods for un-differenced GPS data[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics,2012,32(1):102-104. (in Chinese))
- [12] 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. (ZHENG Zuoya, CHENG Zongyi, HUANG Cheng, et al. Improving of cycle-slip detection and correction of Blewitt method[J]. Acta Astronomica Sinica,2005,46(2):216-224. (in Chinese))
- [13] 吴继忠,施闯,方荣新. TurboEdit单站GPS数据周跳探测方法的改进[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2011,36(1):29-33. (WU Jizhong, SHI Chuang, FANG Rongxin. Improving the single station data cycle slip detection approach TurboEdit[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University,2011,36(1):29-33. (in Chinese))
- [14] LIU Zhizhao. A new automated cycle slip detection and repair method for a single dual-frequency GPS receiver[J]. Journal of Geodesy,2010,85(3):171-183.

表1 周跳探测试验结果

Table 1 Results of cycle slip detection

L_1 上 加入的 周跳/周	L_2 上 加入的 周跳/周	TECR 残差/ (TECU · s ⁻¹)	TECR法 探测的周跳/周		综合方法 探测的周跳/周	
			L_1	L_2	L_1	L_2
77	60	-0.0014			77	60
-77	-60	0.0078			-77	-60
68	53	-0.0278			68	53
-68	-53	0.0248			-68	-53
59	46	-0.0526			59	46
-59	-46	0.0517			-59	-46
18	14	0.0672			18	14
-18	-14	-0.0702			-18	-14
9	7	0.0214			9	7
-9	-7	-0.0265			-9	-7
6	6	-3.0791	6	6	6	6
-6	-6	3.0719	-6	-6	-6	-6
1	1	-0.5111	1	1	1	1
-1	-1	0.5140	-1	-1	-1	-1
1	0	1.8050	1	0	1	0
-1	0	-1.8054	-1	0	-1	0
0	1	-2.3274	0	1	0	1
0	-1	2.3298	0	-1	0	-1