

基于 MW 与 STPIR 组合的周跳探测与修复方法研究

范丽红^{1,2} 王利^{1,2} 张明^{1,2} 郑增记³

¹ 长安大学地质工程与测绘学院,陕西 西安,710054

² 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西 西安,710054

³ 陕西省地震局,陕西 西安,710068

摘要:针对载波相位观测值中出现周跳的问题,将 TurboEdit 算法中的 LG 组合进行二次历元间差分(STPIR),差分结果可以很好地消除电离层延迟的趋势项影响,而且差分后的组合观测值不受观测数据采样间隔的影响,从而有利于周跳的探测。同时,利用 MW 组合与 STPIR 组合实现了周跳的探测与修复。对静态和动态观测数据进行处理的结果表明,将 MW 与 STPIR 组合可以更准确地探测与修复周跳。

关键词:周跳;MW;STPIR;探测与修复

中图分类号:P228.41

文献标志码:A

利用载波相位观测值在准确固定模糊度和探测与修复周跳的情况下可以得到更高精度的导航和定位结果,因此,准确地探测和修复周跳对高精度导航定位是非常必要的。目前常用的周跳处理方法有高次差法^[1]、相位减伪距法^[2]、多普勒观测值法^[3]、TurboEdit^[4-10]、小波分析法^[11]等,但高次差法无法准确探测非独立周跳;相位减伪距法受到伪距观测值精度的影响,无法探测出小周跳;多普勒观测值受到观测数据采样间隔的影响,探测效果不佳;TurboEdit 中的电离层残差组合受电离层误差的影响较大,且存在探测的不敏感性^[5]。本文针对电离层残差法受电离层影响较大的问题,用相位电离层残差组合二次历元间差分(second-order time-difference phase ionospheric residual, STPIR)进行周跳探测,联合 MW (Melbourne-Wbbena)组合进行周跳的探测与修复,并通过实例验证了该方法的可靠性和有效性。

1 周跳探测的基本理论

去除对流层、多路径及观测噪声后的相位和

伪距观测方程为:

$$\varphi_1 = \frac{\rho}{\lambda_1} - \frac{I}{cf_1} + N_1, \varphi_2 = \frac{\rho}{\lambda_2} - \frac{I}{cf_2} + N_2 \quad (1)$$

$$P_1 = \rho + \frac{I}{f_1^2}, P_2 = \rho + \frac{I}{f_2^2} \quad (2)$$

式中, φ 表示载波相位观测值; P 表示伪距观测值; λ 表示载波波长; I 表示电离层参数; ρ 表示卫星至接收机的几何距离; c 表示光速; N 表示载波相位模糊度; f 表示载波的频率。

1.1 MW 组合

$$N_{\sigma} = N_1 - N_2 = (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{(f_1 P_1 + f_2 P_2)}{(f_1 + f_2)\lambda_{WL}} \quad (3)$$

对于 MW 组合,对 N_{σ} 值从第 1 个历元至第 i 个历元的 i 个 N_{σ} 的均值 $\langle N_{\sigma} \rangle_i$ 及方差 σ_i^2 可采用下列递推公式^[4,6,7,9]:

$$\langle N_{\sigma} \rangle_i = \langle N_{\sigma} \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (N_{\sigma}^i - \langle N_{\sigma} \rangle_{i-1}) \quad (4)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(N_{\sigma}^i - \langle N_{\sigma} \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2] \quad (5)$$

式中, $\langle N_{\sigma} \rangle_i$ 为 i 个历元的模糊度互差 N_{σ} 的平

收稿日期:2013-09-23

项目来源:国家自然科学基金资助项目(40902081,41072266,41104019,41274005,41202189,41304033);国土资源大调查资助项目(1212010914015,1212011220186,1212011220142);中央高校基本科研业务费专项资助项目(2013G2263003,2013G3264003,2013G3264004);二代导航重大专项课题资助项目(GFZX0301040308)。

第一作者:范丽红,硕士生,主要从事 GNSS 数据预处理的理论与方法研究。E-mail:fanlihong321@163.com

通讯作者:王利,副教授。E-mail:wangli@chd.edu.cn

均值; N_{σ}^i 为第 i 个历元的模糊度互差; σ_i^2 为 i 个历元的模糊度互差 N_{σ} 的方差。

如果要探测第 $i+1$ 个历元,先计算前面 i 个历元宽巷模糊度的平均值 $\langle N_{\sigma} \rangle_i$,并求得第 $i+1$ 个历元的宽巷模糊度 N_{σ}^{i+1} ,将其与预测值 $\langle N_{\sigma} \rangle_i$ 进行比较。对式(3)进行历元间差分,有 $\Delta N_{\sigma} = \Delta N_1 - \Delta N_2$ 。若满足方程(6):

$$\begin{cases} |N_{\sigma}^{i+1} - \langle N_{\sigma} \rangle_i| > 4\sigma_i \\ \Delta N_{\sigma} = \text{round}(\Delta N_1 - \Delta N_2) \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

就认为第 $i+1$ 个历元的载波相位观测值中存在周跳;若不满足,则认为没有周跳。当出现周跳时,标记出该颗卫星出现周跳的历元,重新进行初始化,重复上述过程。但是当两个频率上出现等周跳即 $N_{\sigma} = 0$ 时,该方法无法探测出周跳^[6,7,9]。

1.2 相位电离层残差组合二次历元间差分 (STPIR)

相位电离层残差组合也可表示为:

$$\varphi_{\text{PIR}} = \varphi_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \varphi_2 = N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_2 + I_{\text{res}} \quad (7)$$

其中, $I_{\text{res}} = -\frac{I}{\lambda_1 f_1^2} (1 - \frac{f_1^2}{f_2^2}) = 1.3698I$ 为以周为单位的电离层残差项。

从式(7)可以看出,该组合包含频率间电离层影响之差、频率间模糊度之差、频率间多路径效应之差和接收机噪声。对式(7)进行历元间求差,则有:

$$\begin{aligned} D_1 &= [\Delta N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Delta N_2] = \\ &[\varphi_{\text{PIR}}(k) - \varphi_{\text{PIR}}(k-1)] + [I_{\text{res}}(k) - I_{\text{res}}(k-1)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中,周跳检验量 $[\Delta N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Delta N_2]$ 受电离层残差的影响可达到 $1.3698[I(k) - I(k-1)]$,且当采样间隔增大时,相邻历元间的电离层变化增大。为了减小电离层扰动的影响,对电离层残差组合进行二阶历元间差分^[5]:

$$\begin{aligned} \varphi_{\text{STPIR}}(k) &= [\Delta N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Delta N_2](k) = \\ &[\varphi_{\text{PIR}}(k) - 2\varphi_{\text{PIR}}(k-1) + \varphi_{\text{PIR}}(k-2)] + \\ &[I_{\text{res}}(k) - 2I_{\text{res}}(k-1) + I_{\text{res}}(k-2)] \end{aligned} \quad (9)$$

在二阶历元间差分中,电离层残差明显小于二阶历元间差分,始终在 0 附近波动,从而有利于周跳探测^[5]。

假设 L_1 和 L_2 的测量中误差均为 $m_{\varphi} = \pm 0.01$ 周,根据式(9),由误差传播率知:

$$m_{D_2} = \sqrt{2[m_{\varphi}^2 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 m_{\varphi}^2 + m_{\varphi}^2 + (\frac{\lambda_2}{\lambda_1})^2 m_{\varphi}^2]} =$$

$$2\sqrt{(1 + \frac{\lambda_2^2}{\lambda_1^2})} m_{\varphi} = 3.25 m_{\varphi} \quad (10)$$

则有 $m_{D_2} = 0.0325$ 周。以 4 倍检测量中误差为限差,可知限差为 ± 0.13 周。也就是当两个载波上的周跳引起的历元间电离层残差检验量 D_2 变化值大于 0.13 周时,就能探测出周跳。但该组合无法探测出 $\Delta N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Delta N_2 = 0$ 的周跳^[6,7]。

1.3 联合探测与修复周跳

由于 MW 组合与 STPIR 组合均存在探测的不敏感性,且两种方法只能探测出周跳的位置却不能分离出周跳,因此将两种方法探测的结果结合起来,对于探测到同一历元的周跳只取其一,而各自探测的不敏感部分可相互补充,从而能更彻底地探测周跳。

将 MW 组合与 STPIR 组合联合如下:

$$\begin{cases} \Delta N_{\sigma} = \text{round}(\Delta N_1 - \Delta N_2) \\ \varphi_{\text{STPIR}} = \Delta N_1 - \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \Delta N_2 \end{cases} \quad (11)$$

通过式(11)便可分离出 L_1 、 L_2 的周跳。

2 实例与分析

本文选取了实际观测的 $dt=5$ s 静态 4 h 观测数据中的 G01 卫星和机载 $dt=5$ s 动态 2 h 观测数据中的 G09 卫星,并人工加入周跳,利用上述方法对加入周跳前后的数据进行处理分析。表 1 是对加入的待检验周跳的说明。这里所说的在某一历元加入周跳,是指从该时刻起之后的所有历元均加入相应值。

表 1 加入的待检周跳

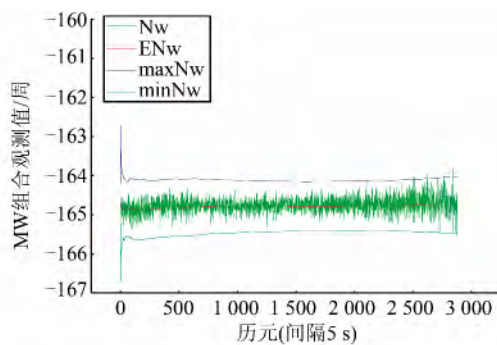
Tab. 1 Cycle Slip to be Detected

周跳		静态 ($dt=5$ s)		动态 ($dt=5$ s)	
L_1	L_2	时间	历元	时间	历元
1	1	13:30	361	0:15	181
4	3	14:00	721	0:30	361
5	4	14:30	1 081	0:45	541
6	7	15:00	1 441	1:00	721
9	7	15:30	1 801	1:15	901
1	0	16:00	2 161	1:30	1 081
0	-1	16:30	2 521	1:45	1 261

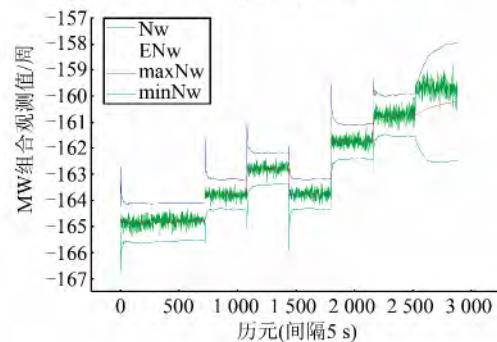
2.1 采样间隔 5 s 的地面静态观测数据

图 1 为 $dt=5$ s 的静态观测数据加入周跳前后的 MW 组合观测值及其历元间变化值的序列图。

图 2 为 $dt=5$ s 的静态观测数据加入周跳前后的 STPIR 组合观测值及其变化值的序列图。

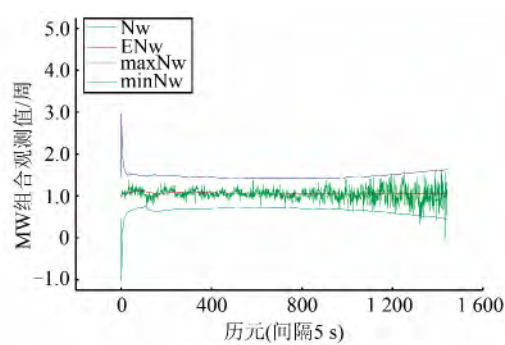


(a) 未加入周跳

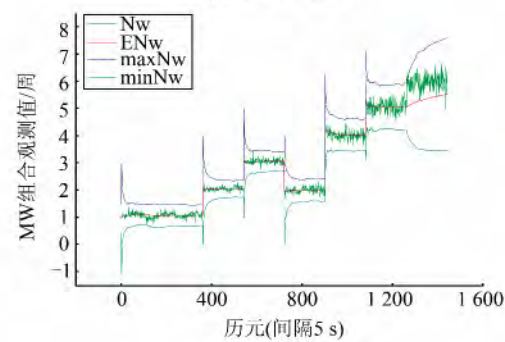


(b) 加入周跳后

图1 加入周跳前后 G01 卫星的 MW 组合序列
Fig. 1 Time Series of MW Combination for G01



(a) 未加入周跳



(b) 加入周跳后

图3 加入周跳前后 G09 卫星的 MW 组合序列
Fig. 3 Time Series of MW Combination for G09

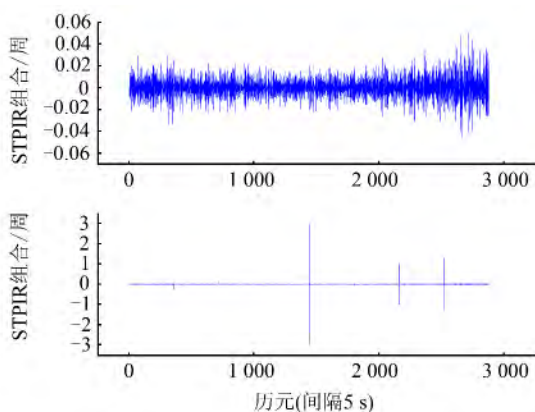


图2 加入周跳前后 G01 卫星的 STPIR 组合序列
Fig. 2 Time Series of STPIR Combination for G01

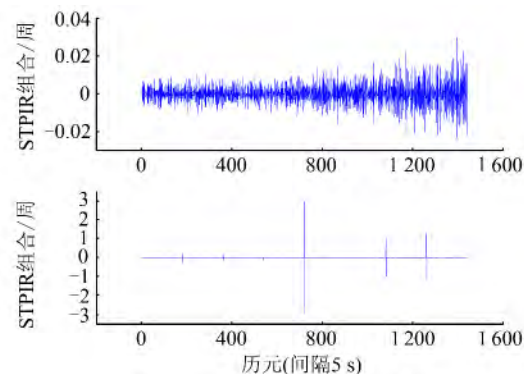


图4 加入周跳前后 G09 卫星的 STPIR 组合序列
Fig. 4 Time Series of STPIR Combination for G09

2.2 采样间隔 5 s 的机载动态观测数据

图3为 $dt=5$ s的动态观测数据加入周跳前后的MW组合观测值及其历元间变化值和中误差限差的序列图。图4为 $dt=5$ s的动态观测数据加入周跳前后的STPIR组合观测值及其变化值的序列图。

从图1(a)和图3(a)可以看出,对于没有加入周跳的观测数据,MW组合观测值在一常数附近波动。图1(b)和图3(b)则说明对于加入的(4,3)、(5,4)、(6,7)、(9,7)周的大周跳均有明显的变化;对于加入的(1,0)、(0,-1)周的小周跳也有明

显变化,但对于(1,1)周的相等周跳没有变化,无法探测。

从图2和图4可以看出,对于没有周跳的观测数据,STPIR检验量是很小的值,当数据中有周跳存在,检验量会有明显的变化,超过阈值。但对于(9,7)组合的周跳,周跳检验量的波形变化很小,无法探测出来。

表2和表3为联合MW组合与STPIR组合进行周跳探测与修复的结果。可以看出,在 $dt=5$ s的观测数据中,联合MW组合与STPIR组合相互补充了单个组合的不足,可以探测出所有组合的周跳。

表 2 G01 卫星周跳探测与修复结果

Tab. 2 Results of Cycle Slip Detection and Repairing for G01

历元	L_1 加入周跳	L_2 加入周跳	ΔN_{σ}	φ_{STPIR}	ΔN_1	ΔN_2	是否可探测周跳
361	1	1	0	-0.282 183	1	1	Yes
721	4	3	1	0.151 500	4	3	Yes
1 081	5	4	1	-0.132 716	5	4	Yes
1 441	6	7	-1	-2.976 033	6	7	Yes
1 801	9	7	2	0.035 050	9	7	Yes
2 161	1	0	1	0.999 983	1	0	Yes
2 521	0	-1	1	1.273 866	0	-1	Yes

表 3 G09 卫星周跳探测与修复结果

Tab. 3 Results of Cycle Slip Detection and Repairing for G09

历元	L_1 加入周跳	L_2 加入周跳	ΔN_{σ}	φ_{STPIR}	ΔN_1	ΔN_2	是否可探测周跳
181	1	1	0	-0.284 533	1	1	Yes
361	4	3	1	0.150 200	4	3	Yes
541	5	4	1	-0.131 966	5	4	Yes
721	6	7	-1	-2.989 766	6	7	Yes
901	9	7	2	0.015 400	9	7	Yes
1 081	1	0	1	0.994 783	1	0	Yes
1 261	0	-1	1	1.280 883	0	-1	Yes

3 结 语

在进行周跳探测时,相位电离层二阶差分组合消除了电离层高阶项的影响,更有利于进行周跳的探测。分别利用 MW 组合与 STPIR 组合探测周跳时均存在探测的不敏感性,将二者相结合可相互补充,能更彻底地探测与修复小周跳。下一步可以继续研究在该算法中区别周跳和粗差,并考虑将该算法应用到实时周跳的探测与修复中。

参 考 文 献

[1] Wang Aisheng, Ou Jikun. Sequential Characteristics and Accurate Estimation of Cycle Slips in High Order Differential[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008, 28(5): 59-64(王爱生, 欧吉坤. 周跳在高阶差分中的时序特征及精确估计[J]. 大地测量与地球动力学, 2008, 28(5): 59-64)

[2] Chen Pinxin, Zhang Chuanyin, Huang Kunxue. Cycle Slips Detecting and Repairing by Use of Phase Reduce Pseudorange Law and Ionized Layer Remnant Method of Difference[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 20(2): 120-124(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, 20(2): 120-124)

[3] Chang Zhiqiao, Hao Jinming, Li Junyi. Cycle Slips and Gross Error Checkout Using Doppler Observations[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2008(3): 28-30(常志巧, 郝金明, 李俊义. 利用多普

勒观测检测周跳的粗差[J]. 测绘通报, 2008(3): 28-30)

[4] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data[J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202

[5] Cai Changsheng, Liu Zhizhao, Xia Pengfei, et al. Cycle Slip Detection and Repair for Undifferenced GPS Observations Under High Ionospheric Activity [J]. *GPS Solution*, 2012, 17(2): 247-260

[6] Fang Rongxin, Shi Chuang, Wei Na, et al. Real-time Cycle-slip Detection for Quality Control of GPS Measurements[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(9): 1 094-1 097(方荣新, 施闯, 魏娜, 等. GPS 数据质量控制中实时周跳探测研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(9): 1 094-1 097)

[7] Cai Hua, Zhao Qile, Sun Hanrong, et al. GNSS Real-time Data Quality Control[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(7): 820-824(蔡华, 赵齐乐, 孙汉荣, 等. GNSS 实时数据质量控制[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(7): 820-824)

[8] Zhen Dai. Matlab Software for GPS Cycle-slip Processing[J]. *GPS Solution*, 2012, 16(2): 267-272

[9] 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(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)

[10] Li Zhenghang, Huang Jinsong. GPS Surveying and Data Processing[M]. Wuhan: Wuhan University

- Press, 2005(李征航, 黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2005)
- [11] Huang Dingfa, Zhuo Jiancheng. Wavelet Analysis for Cycle Slip Detection and Reconstruction of GPS Carrier Phase Measurement[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 1997, 26(4):352-357(黄丁发, 卓健成. GPS 相位观测值周跳检测的小波分析法[J]. 测绘学报, 1997, 26(4):352-357)

A Combination of MW and Second-order Time-difference Phase Ionospheric Residual for Cycle Slip Detection and Repair

FAN Lihong^{1,2} WANG Li^{1,2} ZHANG Ming^{1,2} ZHENG Zengji³

1 School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2 Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education, Xi'an 710054, China

3 Shaanxi Seismological Bureau, Xi'an 710068, China

Abstract: For problems of cycle slips occurred in phase observation, the second-order difference phase ionospheric residual (STPIR) algorithm is introduced. It can remove the trend component of ionospheric variations effectively. The algorithm is not affected by the observation interval, so it benefits cycle slip detection. At the same time, the use of MW in combination with STPIR for cycle slip detecting and repairing is realized. In static and dynamic data processing, experimental results show that the combination of MW and STPIR is accurate for cycle slips detection and repair.

Key words: cycle slips; MW; STPIR; detection and repair

First author: FAN Lihong, postgraduate, specializes in data preprocessing of GNSS. E-mail: fanlihong321@163.com

Corresponding author: WANG Li, associate professor. E-mail: wangli@chd.edu.cn

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 40902081, 41072266, 41104019, 41274005, 41202189, 41304033; the National Land & Resources Surveying Project, Nos. 1212010914015, 1212011220186, 1212011220142; the Fundamental Research Foundation for the Central University, Nos. 2013G2263003, 2013G3264003, 2013G3264004; BeiDou-2 Navigation Major Special Project, No. GFZX0301040308.

(上接第 789 页)

Truncation Ridge Estimation Based on the Biased-corrected Theory by Multicollinearity Diagnosis

GUO Jie¹ GUI Qingming¹ GUO Shumei¹ ZHANG Ning¹

1 Institute of Science, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

Abstract: In order to avoid the bad effect provided by the biases of the biased estimation, bias-corrected regularization is presented. But how to choose the bias-corrected term is a key link. In this paper, based on the key information from the multicollinearity diagnosis, measurement and test, parameters seriously harmed by the multicollinearity are estimated. Then based on the bias-corrected theory, the analytical condition of the bias-corrected regularization is derived. Truncation ridge estimation based on the bias-corrected theory by multicollinearity diagnosis is proposed. The numerical results demonstrate that the new method can improve the numerical stability and accuracy of parameter estimation.

Key words: ill-conditioned; multicollinearity; signal-to-noise ratio; mean squared error; biased-corrected regularization

First author: GUO Jie, master, specializes in the application of statistical and handling of geodetic data. E-mail: guojie10142008@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 41174005, 40974009; Research Fund Program of Young Excellent Paper of China Satellite.