

Improved TurboEdit Algorithm for Un-Differenced Phase Data Preprocessing

YUAN Yubin¹, DANG Yamin^{1,2}, Cheng Yingyan¹

¹Chinese Academy of Surveying and Mapping, Beijing 100039

²Geomatics College, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266510

e-mail: yyb_whu@163.com; dangym@casm.ac.cn; yycheng@casm.ac.cn

Abstract: Three improvements of TurboEdit algorithm are made in this paper. In the improved algorithm, the calculating of wide-line ambiguity and its variance takes into account different arc sections, the length of arc section and gross errors; Both combination observations determine whether the current epoch is a gross error or cycle slip by analyzing three successive epochs; A new fitting model based on sliding window is put forward, and the model is more suitable for the fact that Geometry-Free combination observations constitute a smooth time series; The secondary processing of divided G-F arc sections further rejects gross error. Experimental results show that the new algorithm can detect and fix cycle slips of equal-distance, equal-cycle or continuing happened conditions. The new algorithm can also reject successfully successive gross errors and those gross errors with less obvious performance.

Keywords: un-differenced; precise point positioning; data preprocessing; cycle slip, gross error; TurboEdit algorithm; Melbourne-Wübbena; Geometry-Free

一种改进的 TurboEdit 数据预处理算法

袁玉斌¹, 党亚民^{1,2}, 成英燕¹

¹中国测绘科学研究院, 北京 100039,

²山东科技大学测绘科学与工程学院, 青岛 266510

e-mail: yyb_whu@163.com; dangym@casm.ac.cn; yycheng@casm.ac.cn

摘要: 对 TurboEdit 算法三个关键环节进行了较大改进。改进后的算法, 宽巷模糊度和方差考虑了不同弧段、弧段长度、粗差影响等因素; 两类组合观测值均通过探测连续三个历元的状态来决定当前历元是否为周跳或粗差; 设计了一个基于滑动窗口的拟合模型, 该模型更符合无周跳的 Geometry-Free (G-F) 组合观测值的平滑时间序列特征; 同时对划分的 G-F 弧段, 可进行二次处理, 进一步剔除小粗差。实验表明, 该算法可探测并精确修复等周、等距、连续周跳, 对连续粗差和表现并不明显的粗差, 亦能有效将其剔除。

关键词: 非差; 精密单点定位; 数据预处理; 周跳; 粗差; TurboEdit 算法; Melbourne-Wübbena; 无电离层组合

1 引言

在 GPS 非差相位单点定位中, 由于只有一台接收机, 不能像相对定位那样可以消除大部分共同的误差项, 所以 GPS 观测值的周跳探测与修复, 粗差的剔除等数据预处理问题均较难解决。特别是对于低采样率的非差数据 (如 30s 采样间隔), 已有的高次差法、多项式拟合法、伪距 / 相位组合法, 甚至联合伪距约束的电离层残差法均不能提供有效解决方案, 因此一般选择性能较好的 TurboEdit 算法, 已有不少文献进行过此方面的探讨^[1-3]。本文从另外三个角度, 对 TurboEdit 算法进行了较大改进, 并提出了一个非差数据周跳探测与修复、粗差剔除的完整算法流程。

本文先简要介绍 TurboEdit 算法, 然后详细介绍本文的数据处理策略, 最后用 IGS 站数据 (北京房山站) 作实验, 以检验算法的性能。

2 TurboEdit 算法介绍

2.1 Melbourne-Wübbena(M-W)组合观测值

M-W 观测值及其整周模糊度可分别表示为公式 (1), (2) (其整周模糊度亦为宽巷模糊度)

$$L_{mw} = \frac{f_1 L_1 - f_2 L_2}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (1)$$

$$bw = L_{mw} / \lambda_w = L_{mw} (f_1 - f_2) / C \quad (2)$$

采用递推公式计算每一历元 i 的宽巷模糊度预测值 $<b_w>_{i-1}$ 及其方差 σ_i^2 :

$$\langle b_w \rangle_i = \frac{i-1}{i} \langle b_w \rangle_{i-1} + \frac{b_w(i)}{i} \quad (3)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{i-1}{i} \sigma_{i-1}^2 + \frac{(b_w(i) - \langle b_w \rangle_{i-1})^2}{i} \quad (4)$$

对于某一历元 i ，若 $|b_w(i) - \langle b_w \rangle_{i-1}| > 4\sigma_{i-1}$ ，则认为 i 历元可能发生周跳；继续判断 $i+1$ 历元的状态。若 $i+1$ 不超限，则判断 i 为粗差，否则继续判断两超限值之差；若两超限值之差亦超限 (≥ 1)，则判断 i 为粗差，否则 i 发生周跳。如此逐历元循环，直至无可历元。

2.2 G-F 组合观测值

G-F 观测值为 $\phi_{gf} = \lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2$

G-F 组合观测值消除了接收机钟差、卫星钟差以及对流层延迟等影响，仅包含电离层误差和与频率有关的测量噪声。一般情况下，电离层变化较缓慢，G-F 为较平滑的时间序列，因此适于周跳探测与修复、粗差剔除。文献[2]利用多项式 Q 进行拟合，根据拟合残差来判断是否发生周跳。若

$$|\phi_{gf}(i) - Q(i) - (\phi_{gf}(i-1) - Q(i-1))| > 6(\lambda_2 - \lambda_1) \quad (5)$$

$$|\phi_{gf}(i+1) - Q(i+1) - (\phi_{gf}(i) - Q(i))| < (\lambda_2 - \lambda_1) \quad (6)$$

则认为 i 历元发生周跳。然后进行周跳修复。

分别探测出 M-W 和 G-F 周跳后，联立方程求解 L_1, L_2 上的周跳值。

3 TurboEdit算法的改进

3.1 M-W 宽巷模糊度预测值及方差

M-W 组合观测值一个关键环节是计算宽巷模糊度预测值 $\langle b_w \rangle_i$ 及其方差。一般地对于一个无周跳的观测时段， b_w 应接近于常数，并且随机分布（图 1）。一旦发生宽巷周跳，则 b_w 随之出现跳变（图 2 为 L_1 发生 1 周周跳的情况）。

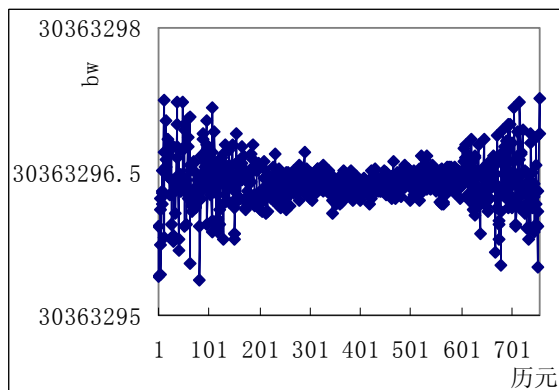


Figure 1. Wide-lane ambiguity b_w (no cycle slip)

图 1. 宽巷模糊度 b_w (未发生周跳)

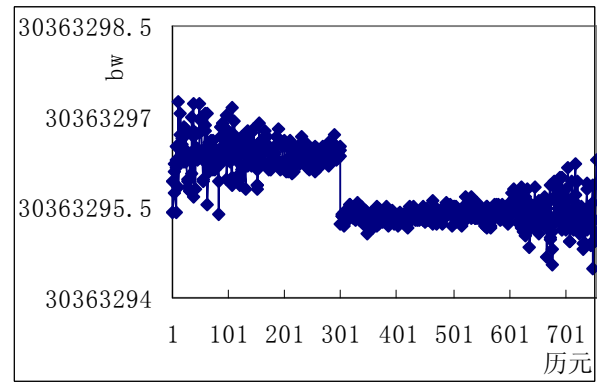


Figure 2. Wide-lane ambiguity b_w (one cycle slip)

图 2. 宽巷模糊度 b_w (1 周周跳)

因此预测当前历元宽巷模糊度时，只能利用当前弧段的观测值。另外，为方便讨论，我们按数据段长度把数据平均分成前、中、后三个部分。由图 1，当卫星刚进入接收机信号接收范围时，大气延迟、测量噪声等影响较大，如果把前部分数据用来计算中间部分历元的 $\langle b_w \rangle$ 值，将会产生过大的 σ^2 而判断不出本已发生的周跳，而中间部分数据质量较好，如果过多参与计算后部分数据的 $\langle b_w \rangle$ 与方差 σ^2 ，势必把某些正常观测值作为周跳来处理。因此，选择序列亦不能太长。本文的策略是选取一参考历元 $epoch_{ref}$ 。当从 $epoch_{ref}$ 至当前历元间历元数超过某一值（笔者的实验表明 50~100 取得的效果均较好）时，重新调整 $epoch_{ref}$ 。同时，探测周跳和粗差是同时进行的，计算 $\langle b_w \rangle_i$ 不能带入已作粗差标记历元的观测数据。

设从 $epoch_{ref}$ 至当前历元 i 的粗差数为 $e(i)$ ，则

$$\langle b_w \rangle_i = \frac{i-1-epoch_{ref}-e(i)}{i-epoch_{ref}-e(i)} \langle b_w \rangle_{i-1} + \frac{b_w(i)}{i-epoch_{ref}-e(i)} \quad (7)$$

$$\sigma_i^2 = \frac{i-1-epoch_{ref}-e(i)}{i-epoch_{ref}-e(i)} \sigma_{i-1}^2 + \frac{(b_w(i) - \langle b_w \rangle_{i-1})^2}{i-epoch_{ref}-e(i)} \quad (8)$$

3.2 G-F 组合的滑动窗口拟合模型

无周跳的 G-F 是一个平滑的时间序列（图 3），一旦周跳发生，这种平滑性将被破坏而产生跳变（图 4 为 L_1 发生 1 周周跳的情况）。

一般用 n 次多项式来拟合 ϕ_{gf} 。文献[2]取拟合的阶数为 $M = \min(n/100+1, 6)$ ，然后利用公式(5)、(6)来探测周跳。笔者认为，这种算法至少有以下两个缺陷：

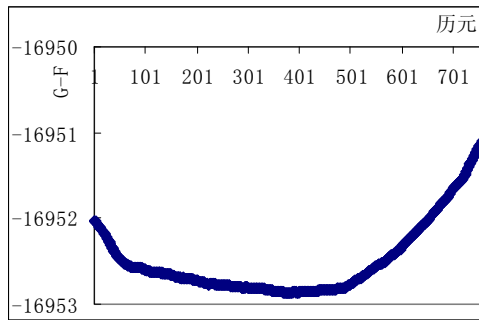


Figure 3. Geometry-free time series (no cycle slip)
图 3. G-F 序列 (未发生周跳)

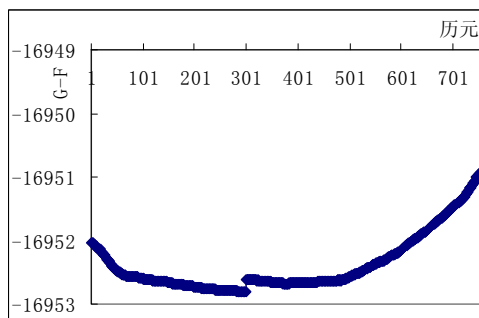


Figure 4. Geometry-free time series (one cycle slip)
图 4. G-F 序列 (1 周周跳)

1) 该方法只能探测大周跳, 文献[2]亦指出, 该算法只能探测出 6 周以上的窄巷周跳。G-F 序列对数据异常是非常敏感的。由图 4 知, 仅在 L_1 发生 1 周周跳的情况下, 曲线即发生如此明显的跳变。而这样的小周跳, 用该算法是无法探测出来的。

2) 拟合阶数的选择问题。选择阶数不能太高[4], 如果太低, 则不能正确反映待拟合曲线。此为该算法先天之不足。而根据经验设定的阶数, 又引入了人为误差。

本文提出一种基于滑动窗口的拟合模型。对当前历元 i , 仅选择前 n 个历元来求定拟合参数和中误差 $\sigma_{gf}(i)$, 然后作判断

$$|\phi_{gf}(i) - Q(i)| \geq 4\sigma_{gf}(i) \quad (9)$$

如果式 (9) 成立, 则当前历元 i 异常, 继续进行下一历元的判断。如果连续三个历元均超限, 则认为出现了周跳, 否则认为出现了粗差, 并在相应的历元作粗差标记。

本文对滑动窗口长度的大小及拟合阶数作了相关实验, 结果表明当窗口长度为 10~30, 拟合阶数为 3~4 时, 算法的探测性能较好, 并且解算的周跳浮点解取整带来的舍入误差较小。因此在下文的实验中, 选择窗口长度为 15, 窗口内历元拟合阶数为 3。

探测周跳和划分 G-F 弧段结束后, 可利用上述滑动窗口模型, 附加更强的约束条件, 重新遍历各 G-F 弧段的历元。此时不作周跳探测, 而是为了进一步剔除难以发现的小粗差。

4 实验检验

4.1 实验数据

本文以北京房山站 2008 年 6 月 23 日观测值 bjfs1750.08o 的 PRN02 数据作实验。选择含 L_1, L_2, P_1, P_2 四类数据, 并且卫星高度角为 15 度以上的数据, 共 756 历元。根据其 $L_1, L_2, M-W$ (图 1), $G-F$ (图 3) 序列可判断, 这批数据不存在周跳。本文通过在相应历元处加减周跳、粗差来评价改进后的 TurboEdit 算法的性能。

(1) 在第 100 历元 (历元序号从 0 开始计算) 处 (L_1, L_2) 分别加上 (1,1) 周跳, 此为等周周跳组合, 为 M-W 探测的盲点;

(2) 在第 200 历元处 (L_1, L_2) 分别加上 (77,60) 周跳, 此为等距周跳组合, 为 G-F 探测的盲点;

(3) 在第 300、301、302、303 历元处分别加上 (1,0)、(1,0)、(0,1)、(2,0) 周跳, 此为连续周跳 (或同时发生周跳和粗差);

(4) 在第 400、405 历元处分别加上 (-1,0)、(1,-1) 周跳。注意两周跳时间间隔较小, 并且施加的为小周跳。文献[3]认为, 对开始 16 历元内出现的周跳, TurboEdit 算法将无能为力。本文的改进算法期望可避免这一情况的发生。正常情况下 M-W 组合探测到 400 历元处的宽巷周跳后, 亦能探测 405 历元处的小周跳并准确修复。

(5) 在第 500、501 历元处分别加上 (0.1,0)、(-0.1,0) 的小粗差。

经过上述处理后, M-W 和 G-F 序列为图 5、图 6 所示:

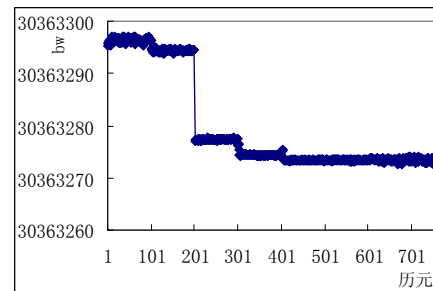


Figure 5. Wide-lane ambiguity bw of experiment data
图 5. 实验数据的宽巷模糊度 bw

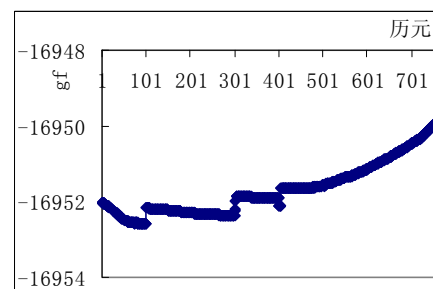


Figure 6. Geometry-free series of experiment data
图 6. 实验数据的 G-F 序列

4.2 实验结果分析

改进后的算法将先探测宽巷周跳，正如预期结果：M-W 探测到了三个周跳，但遗漏了 100 历元处

的等周周跳。而在划分的 M-W 弧段中，G-F 组合弥补了 M-W 组合的这一缺陷。弧段划分和周跳值求解情况如表 1:

Table 1. Divided arc sections
表 1. 弧段划分结果

弧段类型	弧段号	起止历元	M - W均值bw	Δ_{bw}	Δ_{gf}	Δ_{L_1}	Δ_{L_2}
M-W	0	0-199	30363296.3832	-17.0285	0.0051	77.0349	60.0064
	1	200-299	30363279.3547				
	2	303-399	30363276.3460				
	3	405-755	30363275.3897				
G-F	0	0-99	——	0	-0.0512	0.9490	0.9490
	1	100-199	——				

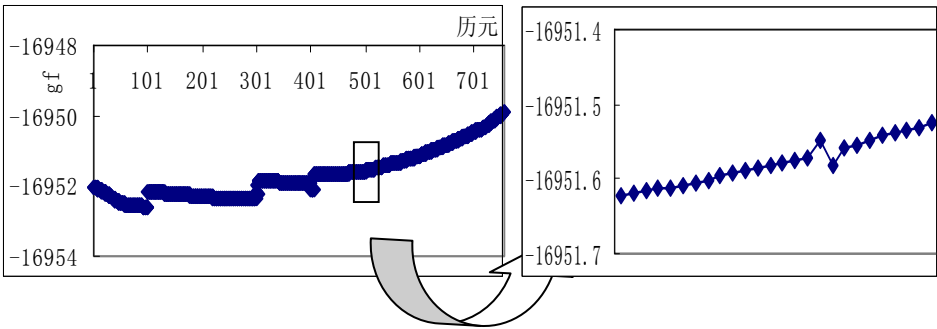


Figure 7. Magnifying of gross error
图 7. 粗差的放大

将 Δ_{L_1} 、 Δ_{L_2} 浮点解四舍五入取整即得整数解。表 1 的浮点解结果非常接近于整数值，取整带来的舍入误差较小。对 300-303 共四个历元的连续周跳，该算法只认为第四历元处发生周跳，而将前三个历元当作粗差剔除。另外 400 历元处的宽巷周跳被正确探测到，但由于 400-404 弧段太短，难以正确解算出两波段上的周跳值而被当作粗差剔除。

改进的算法对粗差有较强的探测能力。图 7 为 500 历元处左右的 G-F 序列放大效果。从图中可以看出，尽管 0.1 周的粗差较小，但一经滑动窗口放大，即明显表现出来。本实验探测到第 500 历元发生异常后，解算的连续三个历元拟合残差分别为 -0.0182、0.0205、0.0015，中误差均为 0.0012，根据 $|\phi_{gf}(i) - Q(i)| \geq 4\sigma_0$ 。

5 结语

TurboEdit 方法是当前非差相位数据预处理的一种常用且行之有效的算法。然而发挥该算法的优异性

能必须处理好以下三个方面的问题。本文即是在这三方面进行了较大改进，提出了一个非差数据周跳探测与修复、粗差剔除的完整方案。

1. M-W 组合中当前历元宽巷模糊度的预测值及方差计算问题。本文的计算方法考虑了不同弧段、弧段长短及粗差等因素影响。

2. 发生周跳后的处理策略问题。一般方法是探测到当前历元异常后，通过下一历元的状态来决定是否发生周跳或粗差。这在发生连续周跳或粗差的情况下会产生误判。本文通过探测连续三个（或三个以上）历元的状态来决定当前历元是否为周跳或粗差，改进了这一缺陷。

3. G-F 组合的拟合模型选择问题。G-F 组合是一个非常灵敏的探测量，可以探测到非常小的跳变。不少文献利用小波分析进行处理[5~6]。本文设计了一个基于滑动窗口的拟合模型，将发生的异常放大。实验结果表明，除了周跳，该模型对表现并不明显的粗差亦有强大的探测能力，而且相对于小波分析更直观，

更易实现，是一种理想的拟合模型。原则易将这两个连续粗差剔除。

References (参考文献)

- [1] Blewitt G. An automatic editing algorithm for GPS data [J]. Geophysical Research Letters, 1990, 17(3): 199-202.
- [2] Ye Shirong, Theory and its Realization of GPS Precise Point Positioning Using Un-differenced Phase Observation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002, 72-78. (in Chinese)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, 72-78.
- [3] Zheng Zuoya, Cheng Zongya, Huang Cheng, Lu Xiushan. Improving of cycle-slip detection and correction of blewitt method [J]. Nanjing: AcASn, 2005, 46(2): 216-224. (in Chinese). 郑作亚, 程宗颐, 黄城, 卢秀山. 对 Blewitt 周跳探测与修复方法的改进[J]. 南京: 天文学报, 2005, 46(2): 216-224.
- [4] Dang Yamin, Bei Jinzhong, Cheng Yingyan. Principles and applications of global navigation satellite system[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2007. (in Chinese). 党亚民, 秘金钟, 成英燕. 全球导航卫星系统原理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2007.
- [5] Huang Dingfa, Zhuo Jiancheng. Wavelet analysis for cycle slip detection and reconstruction of GPS carrier phase measurements [J]. Beijing: Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 1997, 26(4): 352-357. (in Chinese) 黄丁发, 卓健成. GPS 相位观测值周跳检测的小波分析法[J]. 北京: 测绘学报, 1997, 26(4): 352-357.
- [6] Huang Bingjie, Liu Lintao, Gao Guangxing, Zhou Jian. Detection of cycle-slip in the GPS precise point positioning based on wavelet transform [J]. Wuhan: Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(6): 512-515. (in Chinese) 黄兵杰, 柳林涛, 高光星, 周剑. 基于小波变换的 GPS 精密单点定位中的周跳探测[J]. 武汉: 武汉大学学报. 信息科学版, 2006, 31(6): 512-515.