

利用改进型 TurboEdit 算法进行 BDS 载波相位周跳检测与修复

蔡成林¹ 王亮亮¹ 刘昌盛¹ 李刚¹ 秦懿¹ 邓洪高¹

¹ 桂林电子科技大学广西省精密导航技术与应用重点实验室,广西 桂林,541004

摘要:针对北斗导航卫星系统(BDS)不同类型卫星观测数据的特点,对 TurboEdit 方法进行改进。在利用 M-W 组合观测值检测时,使用固定窗口的滑动求解方法代替其原有的递推求解方法。将原有的电离层残差组合检测方法改进为双频电离层残差的相邻历元求差法,并且可以根据不同类型的卫星选择不同的检测参数。改进后的算法对 GEO/IGSO/MEO 卫星均可达到良好的检测效果。算法验证表明,该算法可以有效检测并修复 1 周的小周跳,也可以检测修复双频点等周大小的小周跳,修复精度可达到 0.1 周以内。

关键词:北斗卫星;周跳检测与修复;导航定位;载波相位;TurboEdit

中图分类号:P228.41

文献标志码:A

周跳的检测与修复是载波相位数据处理的关键问题之一。目前已有一些相对有效的方法^[1,2],如相位减伪距法^[3]、电离层残差法^[4]、高次差法^[5]、多项式拟合法^[6]、双频载波相位观值测求差法^[7]等。这些方法单独使用时都会存在一定的缺陷,因此通常将两种或两种以上的方法组合使用。

虽然北斗卫星载波相位周跳的检测与修复类似于全球定位系统(Global Positioning System, GPS),但是北斗卫星导航系统(BDS)与 GPS 的星座以及卫星类型都有所差别,因此在 GPS 中获得良好周跳检测与修复的一些方法,在 BDS 数据处理中可能并不理想。

本文主要分析了 TurboEdit^[8-11]方法检测、修复周跳的原理,针对 BDS 的特点进行了改进,在利用 M-W 组合观测值检测时,使用固定窗口的滑动求解方法代替其原有的递推求解方法。将原有的电离层残差组合检测方法改进为双频电离层残差的相邻历元求差法,并在对 BDS 载波相位周跳的检测和修复中达到了较高的精度。在实际数据处理中,改进后的方法可以检测并修复 1 周的小周跳和双频等周大小的小周跳。

1 TurboEdit 原理及改进

1.1 M-W (Melbourne-Wubben) 组合观测值检测宽巷周跳和粗差

M-W 组合观测方程的推导过程可参看文献[9-12]。其组合观测值 L_w 为:

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

组合观测值的模糊度为:

$$N_w = L_w / \lambda_w = (\varphi_1 - \varphi_2) - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1}{\lambda_1} + \frac{P_2}{\lambda_2} \right) \quad (2)$$

式中, P_1 和 P_2 为分别为两个频点的伪距观测值; f_1 和 f_2 为北斗卫星的 B1 和 B2 频点,其中 $f_1 = 763 \times 2.046$ MHz, $f_2 = 590 \times 2.046$ MHz; $L_1 = \lambda_1 \varphi_1$; $L_2 = \lambda_2 \varphi_2$; λ_w 为宽巷的波长:

$$\lambda_w = c / (f_1 - f_2) \quad (3)$$

式中, c 为光速,代入数值可得 $\lambda_w \approx 84.7$ cm。实际上这里的 $N_w = N_1 - N_2$ 。如果把组合观测值 L_w 的方差记为 $\sigma_{L_w(i)}$,那么组合整周模糊度的方差为:

收稿日期:2015-06-02

项目资助:国家自然科学基金(61263028);中国科学院时间频率基准重点实验室重点基金(Y000YR1S01);广西自然科学基金(2012GXNSFDA053027,2014GXNSFBA118280);广西无线宽带通信与信号处理重点实验室开放基金(GXKL0614107, GXKL0614108);桂林电子科技大学研究生教育创新计划(GDYCSZ201452)。

第一作者:蔡成林,博士,教授,研究方向为卫星导航与无线通信。chengcailin@126.com

通讯作者:王亮亮,硕士生。liangliangwang_nx@163.com

$$\sigma_{N_w(i)}^2 = \sigma_{i_w(i)}^2 / \lambda_w^2 \quad (4)$$

由于 M-W 组合观测值中已经消除了电离层延迟、对流层延迟、接收机和卫星钟差的影响,仅受到观测噪声和多路径效应的影响,因此这种组合观测值很适合用来探测周跳。

对于 M-W 组合检测周跳, Blewitt 在 TurboEdit^[5-7]方法中推荐的递推公式为:

$$\langle N_w \rangle_i = \langle N_w \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (N_{w(i)} - \langle N_w \rangle_{i-1}) \quad (5)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(N_{w(i)} - \langle N_w \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2] \quad (6)$$

式中, $\langle \rangle$ 表示递推估计值; $N_{w(i)}$ 表示第 i 个历元 N_w 组合的整周模糊度。

其 M-W 组合检测周跳的条件为:

$$|N_{w(i)} - \langle N_w \rangle_{i-1}| \geq 4\sigma_i \quad (7)$$

$$|N_{w(i+1)} - N_{w(i)}| \leq 1 \quad (8)$$

$$|N_{w(i+1)} - N_{w(i)}| \geq 1 \quad (9)$$

在对组合观测值进行判断时,如果符合式(7),则该点为野值或周跳,如果同时满足式(7)和式(8),则为周跳,若同时满足式(7)和式(9),那么为野值。

从式(5)~(6)可以看出,对 $N_{w(i)}$ 的递推用到了前面所有历元的 N_w 值。如果前面的若干个历元的数据比较粗糙或者出现误判,就会影响到后续历元的检测,虽然这种递推求解实质上是对随机噪声误差的消除。但是,对于 IGSO (Inclined Geosynchronous Satellite Orbit) 和 MEO (Middle Earth Orbit) 卫星而言,在一个完整的弧段中,由于卫星初始进入观测视野和离开观测视野时高度角很低,故此时伪距观测质量较差,得到的组合观测值会出现明显的两头数据粗糙、中间数据较好的情况^[2]。当然,卫星长时间失锁后重捕,需要构建新的分段时,也会出现类似的情况。这种情况有可能导致相应组合观测值的均方根误差也较大。为了减少低质量数据对后续历元检测效果的影响,对式(5)和式(6)进行滑动递推的方法求解,即利用 i 时刻的前 m 个数据进行递推求解出 $\langle N_w \rangle_i$ 和 σ_i^2 的值。当然如果发生周跳的话,需要标记周跳点,然后再以该点为起点,继续滑动求解。

由文献[9]可知, m 的值不能小于 16,但滑动窗口的选取也不易过长,过长或太短都达不到预期的效果,根据试算分析,滑动窗口一般取 20~40 可以达到比较好的效果。

本文从国际 GNSS 监测评估系统(Interna-

tional GNSS monitoring & Assessment System, iGMAS) 网站上下载观测文件,选择 2014 年 7 月 1 日厦门站的观测数据进行处理。

图 1~2 选取 10 号星(C10)未发生周跳的一段数据,图中黑色线表示 $\langle N_w \rangle$,灰色线表示 N_w 的值。图 1 中的 $\langle N_w \rangle$ 是原递推公式求解的值,图 2 中的 $\langle N_w \rangle$ 是采用改进后滑动递推方法求得值。虽然它们的值都在 -19 上下波动,但是图 1 中的 $\langle N_w \rangle$ 明显像一条直线,反映不出局部的变化规律,而且中间位置的 $\langle N_w \rangle$ 受前面数据的影响较大,几乎与实际数据不相符,所以原方法不能有效地检测出小周跳,还可能发生误判。而图 2 中的 $\langle N_w \rangle$ 与原数据达到了很好的符合效果,能很好地反映出组合观测值的局部变化特点,且不受前面历元数据的影响。因此这种改进方法可以更有效地检测出大小周跳,减少误判的几率。为了更准确地判断第 i 历元是否发生周跳,本文对检测条件做如下改进:首先判断是否满足式(7),如果满足,则继续判断是否满足式(10),如果满足,则为周跳,如果不满足,那么为粗差,应予以剔除。

$$\begin{cases} |N_{w(i+1)} - N_{w(i)}| \leq 1 \\ |N_{w(i+1)} - N_{w(i-1)}| \geq 4\sigma_i \end{cases} \quad (10)$$

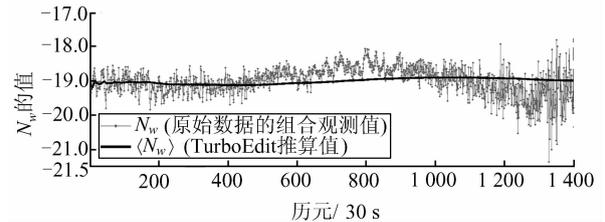


图 1 原 TurboEdit 求解的结果

Fig. 1 Original TurboEdit Algorithm Results

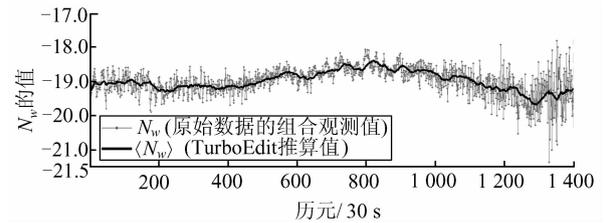


图 2 改进后滑动窗口求解的结果

Fig. 2 Results for Improved TurboEdit Algorithm

1.2 电离层残差组合检测周跳

载波相位电离层残差组合公式如下:

$$L_I = L_1 - L_2 = I + \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (11)$$

式中,各变量和前述公式一致,对应的伪距电离层残差组合为:

$$P_I = P_2 - P_1 = I \quad (12)$$

式中, I 为两个频点的电离层延迟之差,式(11)和

式(12)两式相减可得:

$$\Delta L_I = L_I - P_I = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (13)$$

由于伪距观测值包含了很大的观测噪声,所以公式中用拟合多项式 Q 代替伪距电离层残差组合,其阶数满足 $\text{order} = \min[(M/100+1), 6]$, M 为总的观测历元数。

TurboEdit 方法中电离层残差组合检测周跳的条件为:

$$(L_I(i) - Q(i)) - (L_I(i-1) - Q(i-1)) > k\lambda_I \quad (14)$$

$$(L_I(i+1) - Q(i+1)) - (L_I(i) - Q(i)) < \lambda_I \quad (15)$$

式中, λ_I 为 B1 和 B2 频点的窄巷波长, $\lambda_I = \lambda_2 - \lambda_1 = 5.63$ cm。考虑到 GEO (geosynchronous orbit satellite)、IGSO 和 MEO 卫星星座类型的不同,再根据笔者对不同卫星前后历元电离层变化特性的分析,对式(14)中的 k 作如下优化。对于 GEO 卫星,根据其在国内测站全天候可见、高度角大、前后历元电离层残差变化较小的特点, k 取 4 时可以获得良好的效果。对于 IGSO 和 MEO 卫星,在一个完整的数据段中,中间数据段 k 取 4,两头数据段 k 取 6。实际上 k 的取值大小也可以根据电离层的变化趋势选取^[8]。

然而,尽管 k 的取值得到了优化,但是受伪距观测噪声、拟合长度、拟合阶数的影响,检测精度依然受限。为此,本文直接利用双频电离层残差的相邻历元求差法^[13]对数据进行处理,对式(11)进行历元间求差可得:

$$\Delta L_I = L_I(i) - L_I(i-1) = \Delta I + \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 \quad (16)$$

式中, $\Delta I = I(i) - I(i-1)$; $\Delta N_1 = N_1(i) - N_1(i-1)$; $\Delta N_2 = N_2(i) - N_2(i-1)$ 。由式(16)可以看出,如果前后历元之间没有出现周跳,即 $\Delta N_1 = 0, \Delta N_2 = 0$,那么 $\Delta L_I = \Delta I$,即 ΔL_I 理论上会在 0 附近波动,如果前后历元发生周跳,那么 ΔL_I 会出现相对明显的跳变。用该方法对 2014 年 7 月 1 日 1 号星进行处理,结果如图 3 所示。可以看出,在没有发生周跳的情况下, ΔL_I 的值都在 2 cm 内波动。可知,使用这种方法也可以有效地检测出小周跳。

在利用这种方法进行周跳检测时,对于不同类型的卫星取不同的阈值判断。对于 GEO 卫星,考虑到其高度角较大且前后历元电离层变化较小的特点,参考 Han^[14]判断模糊度是否求解成功的思想,直接把 ΔL_I 的周跳判断阈值设置为 5 cm。对于 IGSO 卫星和 MEO 卫星,在每个数据

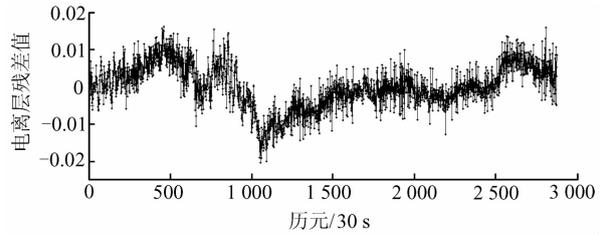


图3 无周跳情况下的 ΔL_I

Fig. 3 Results of No Cycle Slip(ΔL_I)

弧段中,把中间数据段的判断阈值设置为 5 cm,两头数据段的阈值可以根据电离层的变化特性设置为比较合适的值,如 8 cm、10 cm 等。

2 周跳探测方法的分析及周跳修复

2.1 两种周跳检测方法的缺陷分析

对于 M-W 组合观测值,如果检测到周跳,需要先求出前后两弧段的宽巷模糊度之差 ΔN_w ,它与两个频点的周跳 ΔN_1 和 ΔN_2 的关系为:

$$\Delta N_w = \Delta N_1 - \Delta N_2 \quad (17)$$

由式(17)可以看出,如果 L_1 和 L_2 出现相同的周跳,那么 N_w 的前后变化依然为 0,因此该方法的单独使用检测不出等周大小的周跳。

对于改进后的电离层残差检测方法,由式(16)可以看出,如果出现 $\lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 = 0$ 的情况,同样无法检测出周跳,代入北斗卫星信号的频率,可得 $\Delta N_1 = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \Delta N_2 = \frac{f_1}{f_2} \Delta N_2 = \frac{763}{590} \Delta N_2$,即当

两个频点的周跳 ΔN_1 和 ΔN_2 符合 $\frac{\Delta N_1}{\Delta N_2} = \frac{763k}{590k}$ (k

为整数)或者接近该比值时,该方法是检测不出周跳的,例如周跳对为(763,590)、(9,7)、(5,4)等。但在对这两种改进型的方法进行组合后,就可以有效地检测出小周跳。

2.2 周跳的修复

当检测到周跳时,先对周跳前后两个弧段的宽巷模糊度取平均^[1],然后求出子弧段之间的宽巷整周模糊度之差 ΔN_w (式(17))。再利用周跳前后的若干历元拟合多项式,求出 $\lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2$ 的值,组成方程组如式(18)。由于星地距离对时间的 4 阶导数或者 5 阶导数一般已经趋近于零,因此拟合阶数^[14]直接取 3。拟合长度取 10~30 都可以达到比较好的效果。

$$\begin{cases} \Delta N_w = \Delta N_1 - \Delta N_2 \\ \Delta N = \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 \end{cases} \quad (18)$$

通过求解方程组(18)就可以解算出 ΔN_1 、 ΔN_2 的值,从周跳历元开始后的每个历元减去周

跳值,就实现了对周跳的修复。

3 算法的有效性验证

本文选取北斗卫星的实际观测数据,在原始数据中模拟加入周跳,再进行检测与修复。为了更直观地看出改进后算法的优势,笔者将改进算法的检测效果与原始算法的检测效果做了对比,列于表 1。同时为了便于表述,将 M-W 组合观测值检测周跳方法称为 A 方法,将电离层残差方法称为 B 方法。

采用厦门站 2014 年 7 月 1 日 7 号星的数据,在原始数据的前 300 个历元内模拟加入 9 组周跳,然后检测并修复。由于 ΔN_w 的值理论上应该是个整数,在计算的过程中为了减小观测噪声的影响,需要对 ΔN_w 进行取整。除此之外,受电离层残差以及拟合噪声的影响,对最终的解算结果还要再次取整,这两次取整实际上都是对误差的消除。加入的周跳对和最终检测修复结果见表 1。在模拟加入的周跳对中包含了等周大小的周跳、特殊比例的周跳、小周跳和随机周跳。表 1 中加的周跳表示从该历元起,后续所有历元都加相应的值。由图 4 和图 5 可以看出,A 方法只探测出了第 18、26、40、52、200、260、280 历元的周跳,探测不出第 88 和第 120 历元的周跳。B 方法只探测出了第 26、40、52、88、120、200 历元的周跳,探测不出第 18、260 和 280 历元的周跳。由此可以看出,A 方法确实探测不出相同大小的周跳,B 方法确实探测不出特殊比例的周跳。而 A 方法和 B 方法的组合就有效弥补了各自的缺陷,检测出了所有周跳。同时,原始算法只检测出了第 26、200、260 和 280 历元的周跳,并没有检测出小周跳、等周大小的小周跳以及特殊比例的小周跳。可知改进后的算法检测效果明显优于原始算法。

表 1 中的修复结果是基于 A、B 方法组合后

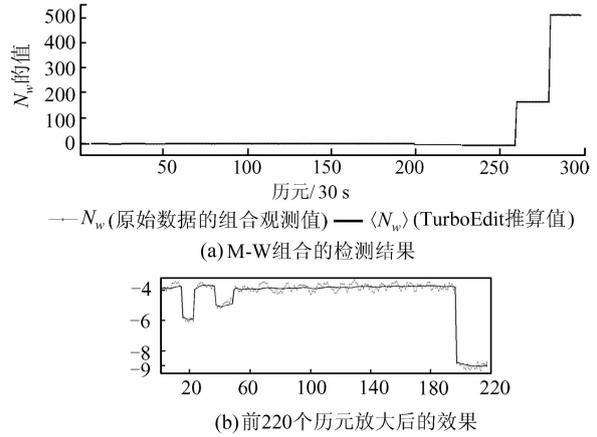


图 4 M-W 组合观测值检测结果

Fig. 4 Results of M-W Combination Detection

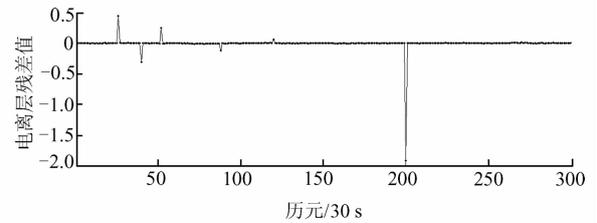


图 5 改进电离层残差组合检测结果(ΔL_I)

Fig. 5 Results of Improved Ionospheric Residuals Combination(ΔL_I)

的方法(A-B 组合法)检测到周跳后的修复结果。其修复结果是只对 ΔN_w 取整后得出的浮点解。由表 1 可以看出,该改进方法对周跳的修复已经达到了比较高的精度。需要指出的是,这是由于数据比较稳定,因此观测质量较好,精度较高。笔者曾遇到在观测数据质量较差的弧段中加入周跳的情况,其修复结果会出现一周的偏差。出现这种情况的主要原因是在修复的过程中误把观测噪声当做周跳的一部分来处理。虽然在解算过程中也对相应的数据做了平均、拟合等操作,但是这种偏差不能完全被消除,不过这种偏差主要出现在观测数据质量较差的数据中,对正常数据影响不大。

表 1 周跳检测与修复结果

Tab. 1 Results of Cycle Slip Detection and Repair

加入周跳的历元	加入的周跳数对 /周	是否可以检测到(Y 代表是,N 代表否)				周跳修复的浮点解/周	
		A 方法	B 方法	A-B 组合	原算法	ΔN_1	ΔN_2
18	(-9, -7)	Y	N	Y	N	-8.931 8	-6.931 8
26	(1, -1)	Y	Y	Y	Y	0.963 8	-1.036 2
40	(1, 2)	Y	Y	Y	N	1.010 3	2.010 3
52	(0, -1)	Y	Y	Y	N	0.043 7	-0.956 3
88	(2, 2)	N	Y	Y	N	2.084 2	2.084 2
120	(-1, -1)	N	Y	Y	N	-1.089 7	-1.089 7
200	(12, 17)	Y	Y	Y	Y	11.998 4	16.998 4
260	(-763, -590)	Y	N	Y	Y	762.984 3	589.984 3
280	(1 526, 1 180)	Y	N	Y	Y	1 525.989 1	1 179.989 1

4 结 语

本文主要对 TurboEdit 方法进行了改进。在算法改进中着重考虑了 BDS 卫星与 GPS 卫星的不同之处,在分析理论公式的时候专门针对 BDS 卫星进行了分析。

实验证明,改进后的算法可以有效检测到 1 周的小周跳,以及双频等周 1 周的小周跳,检测效果明显优于原算法。在观测数据质量较好时,周跳的修复精度可达到 0.1 周以内。

改进后的算法可以根据不同类型的卫星选择不同的参数检测周跳,以提高原算法的实用性。

改进后的算法在对 BDS 三种类型卫星载波相位的周跳检测与修复中均可达到良好的效果,对 GEO 星的检测修复效果略优于 IGSO 和 MEO。本改进算法是基于 BDS/GNSS 静态定位数据得出的,对动态实时数据的适用性亟待进一步验证,这将在后续工作中重点研究。

参 考 文 献

- [1] Hofmann W, Lichtenegger W. GNSS-Global Navigation Satellite Systems, GPS, GLONASS, Galileo&More [M]. Cheng Pengfe. Beijing: The Publishing House of Surveying and Mapping, 2009:146-162(霍夫曼-韦伦霍夫,利希特内格尔,瓦斯勒,著.全球卫星导航系统 GPS, GLONASS, Galileo 及其它系统[M].程鹏飞,译.北京:测绘出版社,2009:146-162)
- [2] Liu Jingnan, Ye Shirong. GPS Precise Point Positioning Using Undifferenced Phase Observation [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 27(3): 234-240(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, 2012, 27(3): 234-240)
- [3] Zhang Chenjun, Xu Qifeng, Li Zuohu. Improving Method of Cycle Slip Detection and Correction Based on Combination of GPS Pseudo Range and Carrier Phase Observations [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2009, 38(5): 402-407(张成军,许其凤,李作虎.对伪距/相位组合量探测与修复周跳算法的改进[J].测绘学报, 2009, 38(5): 402-407)
- [4] Chen Pinxin, Zhang Chuanyin, Huang Kunxue. Cycle Slips Detection and Repairing by Use of Phase Reduce Pseudo Range Law and Ionized Layer Remnant Method of Difference [J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2010, 30(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, 30(2): 120-124)
- [5] Yan Xinsheng, Wang Yiqiang, Bai Zhengdong, et al. Automatically Detect and Repair Cycle Slips Using Alliance of High Difference and TurboEdit [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2007, 5(9): 5-16(严新生,王一强,白征东,等.联合使用高次差法和 TurboEdit 法自动探测、修复周跳[J].测绘通报, 2007, 5(9): 5-16)
- [6] Liu Ning, Xiong Yongliang, Xu Shaoguang. Detection and Repair of Cycle Slips Using Improved TurboEdit Algorithm and Chebyshev Polynomial Method [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(12): 1 500-1 503(刘宁,熊永良,徐韶光.利用改进的 TurboEdit 算法与 Chebyshev 多项式探测与修复周跳[J].武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(12): 1 500-1 503)
- [7] Wang Renqian, Zhu Jianjun. Detection and Reparation for Cycle Slips Using Dual Frequency Differenced Carrier-phase [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2004, 6: 9-11(王仁谦,朱建军.利用双频载波相位观测值求差的方法探测与修复周跳[J].测绘通报, 2004, 6: 9-11)
- [8] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data [J]. *Geophysical Research Letters*, 1990, 17(3): 199-202
- [9] 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(郑作亚,程宗颐,黄城,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)
- [10] Wang Zhenjie, Nie Zhixi, Ou Jikun. An Improved Cycle Slip Detection Based on TurboEdit Method for Dual-frequency GPS Receiver [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2014, 39(9): 1 017-1 021(王振杰,聂志喜,欧吉坤.一种基于 TurboEdit 改进的 GPS 双频观测值周跳探测方法[J].武汉大学学报·信息科学版, 2014, 39(9): 1 017-1 021)
- [11] 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)
- [12] Zhang Xiaohong, Guo Fei, Li Pan, et al. Real-time Quality Control Procedure for GNSS Precise Point

- Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(8): 940-944(张小红, 郭斐, 李盼, 等. GNSS 精密单点定位中的实时质量控制[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(8): 940-944)
- [13] Han S. Quality Control Issues Relating to Ambiguity Resolution Real-time GPS Kinematic Positioning [J]. *Journal of Geodesy*, 1997, 71(6): 351-361
- [14] 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): 1 314-1 319(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): 1 314-1 319)

The Cycle-Slip Detection and Repair of BDS Based on Improved TurboEdit Algorithm

CAI Chenglin¹ WANG Liangliang¹ LIU Changsheng¹ LI Gang¹ QIN Yi¹ DENG Honggao¹

¹ Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract: An improved TurboEdit Algorithm for BDS is analyzed and validated based on the characteristics of BDS with three types of satellites. A fixed window sliding method is used instead of the original recursive method for detecting cycle slips with M-W combination observations. The original ionosphere residual combination detection method is improved by including the adjacent epoch differential method for double-frequency ionosphere residuals, the detection parameters can be selected for GEO/IGSO / MEO satellites. During actual data processing, the improved algorithm is more stable and yields more accurate detection results than the original algorithm, especially in detection of small cycle slips. Also, the improved algorithm can effectively compensate for the original algorithm that does not easily detect small cycle-slips. Experimental results show that the improved algorithm can effectively detect all kinds of cycle slips such as equal-cycle, small cycle slips and big cycle slips. The repair precision can reach the 0.1 cycle.

Key words: BeiDou satellites; cycle-slip detection and repair; navigation and positioning; carrier phase; TurboEdit

First author: CAI Chenglin, PhD, professor, specializes in satellite navigation and wireless communication. E-mail: chengcailin@126.com

Corresponding author: WANG Liangliang, postgraduate. E-mail: liangliangwang_nx@163.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 61263028; The Open Fund of Key Laboratory of Time & Frequency Primary Standards, CAS, No. Y000YR1S01; the Natural Science Foundation of Guangxi Province, Nos. 2012GXNSFDA-053027, 2014GXNSFBA118280; the Open Fund Project of Guangxi Broadband Wireless Communication and Signal Processing Laboratory, Nos. GXKL0614107, GXKL0614108; Innovation Project of GUET Graduate Education, No. GDYCSZ201452.