

引用格式: 黄媛媛, 赵当丽, 赵淑洁, 等. MW 和 STPIR 组合联合探测修复 BDS-3 载波相位周跳研究[J]. 时间频率学报, 2023, 46(4): 333-340.

MW 和 STPIR 组合联合探测修复 BDS-3 载波相位周跳研究

黄媛媛^{1,2}, 赵当丽¹, 赵淑洁^{1,2}, 纪元法³

1. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 桂林电子科技大学 广西精密导航技术与应用重点实验室, 桂林 541004

摘要: 针对北斗三号载波相位观测值的周跳现象影响定时、定位精度的问题, 联合 MW (Melbourne-Wbbena) 和 STPIR (second-order time difference phase ionosphere residual) 组合提出了一种探测和修复北斗三号载波相位周跳的方法。该方法不受信号采样间隔影响, 且能够有效弥补单一组合具有的周跳探测盲区的缺陷, 解决单一组合的周跳修复多值性问题。基于本文方法, 对北斗三号五种民用信号 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 载波相位观测值进行了验证, 结果表明, 联合 MW 和 STPIR 组合可以准确探测和修复北斗三号五种信号载波相位周跳。

关键词: 北斗三号; 周跳探测和修复; MW 组合; STPIR 组合

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2023-04-0333-08

The study of detection and repair BDS-3 carrier phase cycle slips using MW and STPIR combination

HUANG Yuan-yuan^{1,2}, ZHAO Dang-li¹, ZHAO Shu-jie^{1,2}, JI Yuan-fa³

1. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Guangxi Key Laboratory of Precision Navigation Technology and Application of Guilin University of Electronic Science and Technology, Guilin 541004, China

Abstract: Aiming at the problem that the cycle slip of Beidou-3 carrier phase observation seriously affects the precision of timing and positioning, a method to detect and repair Beidou-3 cycle slip is proposed by combination of MW and STPIR. This method is not affected by the signal sampling interval, and can effectively make up for the defect of cycle slip detection blind area of a single combination, and solve the multivalued problem of cycle slip repair of a single combination. Based on this method, experiments are carried out with the Beidou-3's carrier phase observations of B1C, B1I, B2a, B2b and B3I civil signals. The experimental results show that the combination of MW and STPIR can detect and repair the carrier phase cycle slip of Beidou-3 accurately.

Key words: Beidou-3; cycle slip detection and repair; MW combination; STPIR combination

收稿日期: 2022-04-15; 接受日期: 2022-05-23

基金项目: 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2019399)

0 引言

北斗三号卫星导航系统 (Beidou-3 Navigation Satellite System, BDS-3) 是由我国自主研发的全球卫星导航系统, 它为全球用户提供高精度、全天时、全天候的导航、定位和授时服务^[1]。目前, 北斗三号卫星导航系统为民用应用在三个频点 B1、B2、B3 播发共五个类型的信号 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I。

通常采用 BDS-3 的载波相位观测值来实现接收机的高精度定时和定位功能, 但是, 在接收机天线被遮挡时, 由于信号无法到达接收机, 载波相位观测值的整周计数会出现跳跃现象, 致使降低载波相位观测值的定时、定位精度^[2-3]。

常用于周跳探测的方法主要有多项式拟合法、相位减伪距法、MW (Melbourne-Wbbena) 组合和电离层残差组合等。多项式拟合法适用于单频或多频观测值, 需要进行双差组合^[4-6]; 相位减伪距法利用同一历元伪距和载波相位观测值具有相同传播特性优势, 进行相位减伪距组合, 但受伪距噪声影响, 仅可以探测出大周跳^[7]; MW 组合通过建立其观测值模糊度的测量模型来探测周跳, 不受采样间隔影响, 但存在探测盲区, 不能探测出等值周跳^[8-11]; 电离层残差组合利用无几何的观测值组合方法, 消去卫星与接收机的几何距离和与信号频率无关的误差, 再对相邻历元的无几何观测值作差, 得到数值较小的电离层残差, 由此可以探测出载波相位观测值中的小周跳, 但准确度受到信号采样间隔的影响, 并且电离层残差组合也存在探测盲区^[12-15]; 历元间差分的电离层残差 (STPIR) 组合是对电离层残差组合的改进, STPIR 组合使用电离层残差的二阶差分, 降低了 STPIR 组合受电离层残差的干扰度, 能有效探测小周跳, 且不受数据采样间隔影响, 但同样存在周跳探测盲区。目前广泛使用的 TurboEdit 方法就是采用 MW 和电离层残差组合探测周跳^[16-18]。通过对以上周跳探测方法的分析, 本文提出 MW 和 STPIR 两种组合的联合处理方法, 来探测修复北斗三号载波相位观测值的周跳, 这样, 既不受信号采样间隔的影响, 也弥补了周跳探测盲区的缺陷, 解决了周跳修复的多值性问题。

本文对北斗三号卫星导航系统五种民用信号 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 载波相位观测值的周跳现象, 提出使用 MW 和 STPIR 组合联合探测和修复北斗三号周跳, MW 和 STPIR 组合的探测均不受信号采样间隔影响, 且联合 MW 和 STPIR 组合可以探测出单一方法无法探测的盲区周跳, 解决周跳修复多值性问题。文中对北斗三号卫星导航系统共五个类型的民用信号 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 载波相位观测值进行了周跳探测和修复实验, 验证了 MW 和 STPIR 组合联合探测和修复北斗三号载波相位观测值周跳的可行性。

1 周跳探测原理

1.1 伪距和载波相位观测方程

BDS-3 任意两个频点信号的伪距和载波相位观测方程式 (1) 至 (4):

$$P_1 = \rho + \frac{A}{f_1^2} + \varepsilon, \quad (1)$$

$$P_2 = \rho + \frac{A}{f_2^2} + \varepsilon, \quad (2)$$

$$\varphi_1 = \frac{\rho}{\lambda_1} - \frac{A}{\lambda_1 f_1} - N_1 + \frac{\varepsilon}{\lambda_1}, \quad (3)$$

$$\varphi_2 = \frac{\rho}{\lambda_2} - \frac{A}{\lambda_2 f_2} - N_2 + \frac{\varepsilon}{\lambda_2}. \quad (4)$$

式(1)至(4)中: P_1 、 P_2 是伪距观测值, ρ 是接收机到卫星之间不含有误差的真距, f_1 、 f_2 是两个频点上的两种信号的频率, λ_1 、 λ_2 是两个频点上的两种信号的波长, A 是电离层误差常数, ε 代表其余误差项, 如对流层误差、卫星钟误差、接收机钟误差、硬件误差等。 φ_1 、 φ_2 是载波相位观测值, N_1 、 N_2 是载波相位模糊度。

1.2 MW 组合探测周跳原理

载波相位的 MW 组合为

$$\varphi_w = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1}{\lambda_1} + \frac{P_2}{\lambda_2} \right) + N_2 - N_1 \quad (5)$$

将 $\lambda_w = \frac{c}{f_w} = \frac{c}{f_1 - f_2}$ 代入式(5), 可得 MW 组合观测值的整周模糊度

$$N_w = N_2 - N_1 = \varphi_w - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{(f_1 + f_2) \lambda_w} \quad (6)$$

探测周跳时模糊度均值的递推公式为:

$$\langle N_w \rangle_i = \langle N_w \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} [N_{w,i} - \langle N_w \rangle_{i-1}], \quad (7)$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(N_{w,i} - \langle N_w \rangle_{i-1}) - \sigma_{i-1}^2] \quad (8)$$

式(7)和(8)中: $\langle N_w \rangle$ 为 MW 组合观测值模糊度 N_w 的平均值, $N_{w,i}$ 为第 i 个历元的 MW 组合观测值模糊度, σ_i 为第 i 个历元的模糊度标准差。

以 $|N_{w,i+1} - \langle N_w \rangle_i|$ 作为周跳探测量来进行周跳探测, 具体方法为:

① 当 $|N_{w,i+1} - \langle N_w \rangle_i| > 4\sigma_i$ 时, 第 $i+1$ 历元可能存在周跳。

② 继续计算第 $i+2$ 历元的 MW 组合观测值模糊度, 如果 $i+1$ 、 $i+2$ 两个历元上的 $|N_{w,i+1} - \langle N_w \rangle_i|$ 值相差不大, 判断发生了周跳。

③ 当周跳发生时, 以发生周跳的下一历元为新起点, 重新开始初始化。

但 MW 组合存在周跳探测盲区。当两个频点上信号发生数值相同的周跳时, MW 组合的周跳探测量将不变, 导致该方法失效。

1.3 STPIR 组合探测周跳原理

载波相位的电离层残差组合为

$$\varphi_{\text{PIR}} = \varphi_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \varphi_2 \quad (9)$$

式(9)中: φ_{PIR} 是电离层残差, φ_1 、 φ_2 是载波相位观测值, λ_1 、 λ_2 是两个频点信号的波长。

对电离层残差历元间求差, 可得一阶电离层残差为

$$\Delta_{\text{PIR}}(t) = \Delta\varphi_{\text{PIR}}(t) - \Delta\varphi_{\text{PIR}}(t-1) = \varphi_1(t) - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \varphi_2(t) - \varphi_1(t-1) + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \varphi_2(t-1) \quad (10)$$

再对一阶电离层残差历元间求差, 可得历元间差分的二阶电离层残差

$$\Delta_{\text{STPIR}}(t) = \Delta\varphi_{\text{PIR}}(t) - \Delta\varphi_{\text{PIR}}(t-1) \quad (11)$$

由传播误差理论可知, 二阶电离层残差的中误差

$$m_{\text{STPIR}} = \sqrt{2m_{\text{PIR}}^2} = \sqrt{2[m_{\varphi}^2 + 2\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^2 m_{\varphi}^2]} \quad (12)$$

式(12)中: $m_{\varphi} = 0.01$, 故 $m_{\text{STPIR}} \approx 0.0325$ 。取3倍中误差, 即 ± 0.13 周作为 STPIR 组合周跳的判定阈

值。可知, STPIR 组合可以探测出 ± 0.13 周以上的小周跳。STPIR 组合也存在周跳盲区, 用 $\Delta\varphi_1(t)$ 、 $\Delta\varphi_2(t)$ 表示两个频点载波相位周跳量, 当 $\Delta\varphi_1(t)/\Delta\varphi_2(t)$ 比值接近两个信号的波长之反比 λ_2/λ_1 时, STPIR 组合无法正常探测。STPIR 组合抑制了电离层残差, 因此不受采样间隔影响, 可以避免因电离层残差偏高引起的误判。

2 联合探测修复周跳

MW 和 STPIR 组合探测周跳均存在盲区, MW 组合的探测盲区是两个频点上等值的周跳, STPIR 组合的探测盲区是两个频点上周跳值接近 λ_2/λ_1 的周跳, 且单一方法的周跳修复存在多值性问题, 所以需要联合两种方法探测和修复 BDS-3 载波相位周跳。

对于联合的周跳探测, 当两种组合都探测出周跳, 说明有周跳; 当两种组合都未探测出周跳时, 说明无周跳; 当只有一种组合探测出周跳, 说明有周跳, 且周跳处于另一种组合的探测盲区。

对于联合的周跳修复, MW 和 STPIR 组合各自的双频周跳表达式为:

$$\Delta\varphi_{\text{MW}} = \text{round}(\Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2), \quad (13)$$

$$\Delta\varphi_{\text{STPIR}} = \Delta\varphi_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \Delta\varphi_2. \quad (14)$$

式(13)和(14)中: $\Delta\varphi_{\text{MW}}$ 代表 MW 宽巷模糊度的周跳探测量, $\Delta\varphi_{\text{STPIR}}$ 代表 STPIR 组合的周跳探测量。round() 表示四舍五入取整, $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 表示两个频点的周跳量。

联立(13)、(14)两式解二元一次方程, 可得两个频点的信号的周跳 $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 。

3 实验分析

本文针对北斗三号卫星导航系统的周跳进行实验, 采用 MW 组合和 STPIR 组合探测和修复 B1、B2、B3 三个频点上 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 共五种民用信号的载波相位观测值。

北斗三号卫星导航系统由 3 颗倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星、3 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星和 24 颗中圆地球轨道卫星 (MEO) 组成。MEO 卫星是北斗三号卫星导航系统数量最多的卫星, 为其他两类卫星的 8 倍; 而且 MEO 卫星的运动速度相对较快, 受电离层折射影响较大, 更符合本文对 MW 和 STRIP 组合联合探测和修复周跳的验证。

实验选取北斗三号 MEO 卫星 C20, 使用 Abpo 观测站 2022 年 2 月 2 日 11 时到 16 时的观测数据, 采样间隔为 30 s, 总计 600 个历元。

3.1 实验数据处理

MW 和 STPIR 组合均存在探测盲区, 联合探测需要两种组合的探测盲区不一致, 因此两种信号频率之比 $f_1/f_2 \neq 1$, B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 五种信号的频率比如表 1 所示。

表 1 五种信号的频率

信号	B1C	B1I	B2a	B2b	B3I
频率/MHz	1 575.420	1 561.098	1 176.450	1 207.140	1 268.520

根据探测盲区不一致的需要, 实验对 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 五种信号的载波相位观测值两两组合, 然后选出符合要求的组合 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b), 以这 3 组信号为例进行联合 MW 和 STPIR 组合的周跳探测, 并以 (B1I, B3I) 为例进行联合 MW 和 STPIR 组合的周跳修复。

MW 和 STPIR 组合对 3 组信号 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b) 的周跳探测盲区分析如表 2 所示, 默认 $\Delta\varphi_2 \neq 0$ 。用 $\Delta\varphi_1/\Delta\varphi_2$ 表示周跳盲区, 由表 2 可知, MW 组合对 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b) 的周跳盲区 $\Delta\varphi_1/\Delta\varphi_2$ 均为 1; STPIR 组合对 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b) 的周跳盲区 $\Delta\varphi_1/\Delta\varphi_2$ 分别为 1.230 6, 1.399 1, 1.350 1, 符合 MW 和 STPIR 周跳盲区不一致的要求。

表 2 探测盲区

信号组合		(B1I, B3I)	(B1C, B2a)	(B1C, B2b)
探测盲区	MW 组合	1	1	1
$\Delta\varphi_1/\Delta\varphi_2$	STPIR 组合	1.230 6	1.399 1	1.305 1

表 3 是 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b) 3 种组合人工添加的周跳。实验分别在 100 历元、200 历元、300 历元、400 历元、500 历元处人工添加了一共 5 组周跳。其中, 300 历元处的 (5, 4) 处于 3 组信号的 STRIP 组合周跳探测盲区, 400 历元处的 (4, 4) 处于 MW 组合的周跳探测盲区, 100 历元处的 (3, 6)、200 历元处的 (2, 0)、500 历元处的 (5, -3) 不处于两种组合的周跳探测盲区。

表 3 添加的周跳 ($\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2$)

历元	100	200	300	400	500
(B1I, B3I)	(3, 6)	(2, 0)	(5, 4)	(4, 4)	(5, -3)
(B1C, B2a)	(3, 6)	(2, 0)	(5, 4)	(4, 4)	(5, -3)
(B1C, B2b)	(3, 6)	(2, 0)	(5, 4)	(4, 4)	(5, -3)

为了验证联合 MW 和 STPIR 组合盲区周跳的探测能力, 添加了 300 历元处的 (5, 4) 和 400 历元处的 (4, 4), 其中 300 历元处的 (5, 4) 不能被 STPIR 组合检测, 400 历元处的 (4, 4) 不能被 MW 组合检测; 为了验证该方法非盲区的周跳检测能力, 添加了 100 历元处的 (3, 6), 200 历元处的 (2, 0) 和 500 历元处的 (5, -3), 其中既有 6 周的大周跳 (3, 6), 也有小周跳 (2, 0), 此外还有负数周跳 (5, -3)。

3.2 结果分析

用 MW 和 STPIR 组合对未添加周跳和添加周跳后的北斗三号五种信号的 3 组信号组合 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b) 的载波相位观测值进行周跳探测和修复, 对得到的探测和修复结果进行分析。

未添加周跳的 (B1I, B3I)、(B1C, B2a)、(B1C, B2b) 载波相位观测值的 MW 和 STPIR 组合周跳探测量如图 1 所示。图 1 (a)、(c)、(e) 是 (B1I, B3I)(B1C, B2a)(B1C, B2b) 3 组信号的 MW 组合周跳探测量, 3 种 MW 组合 600 个历元内的 MW 周跳探测量在 0 附近波动, 说明没有除 MW 组合盲区以外的周跳。图 1 (b)、(d)、(f) 是 (B1I, B3I)(B1C, B2a)(B1C, B2b) 3 组信号的 STPIR 组合周跳探测量, 3 种 STPIR 组合 600 个历元内 STPIR 组合周跳探测量在 0 附近波动, 说明没有除 STPIR 组合盲区以外的周跳。

图 1 中 MW 组合周跳检测测量噪声比 STPIR 组合大, 这是因为 STPIR 组合仅使用载波相位观测值, 而 MW 组合同时使用载波相位观测值和伪距观测值, MW 组合受伪距观测值噪声影响, 周跳检测噪声相对大。

综合图 1 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f), (B1I, B3I)(B1C, B2a)(B1C, B2b) 3 组信号的 MW 和 STPIR 组合周跳探测量可知, 3 种组合 600 个历元内 MW 和 STPIR 组合周跳探测量均在 0 附近波动, 说明这 3 种组合中的 5 种信号 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 的载波相位没有周跳, 载波相位观测值是“干净”的。

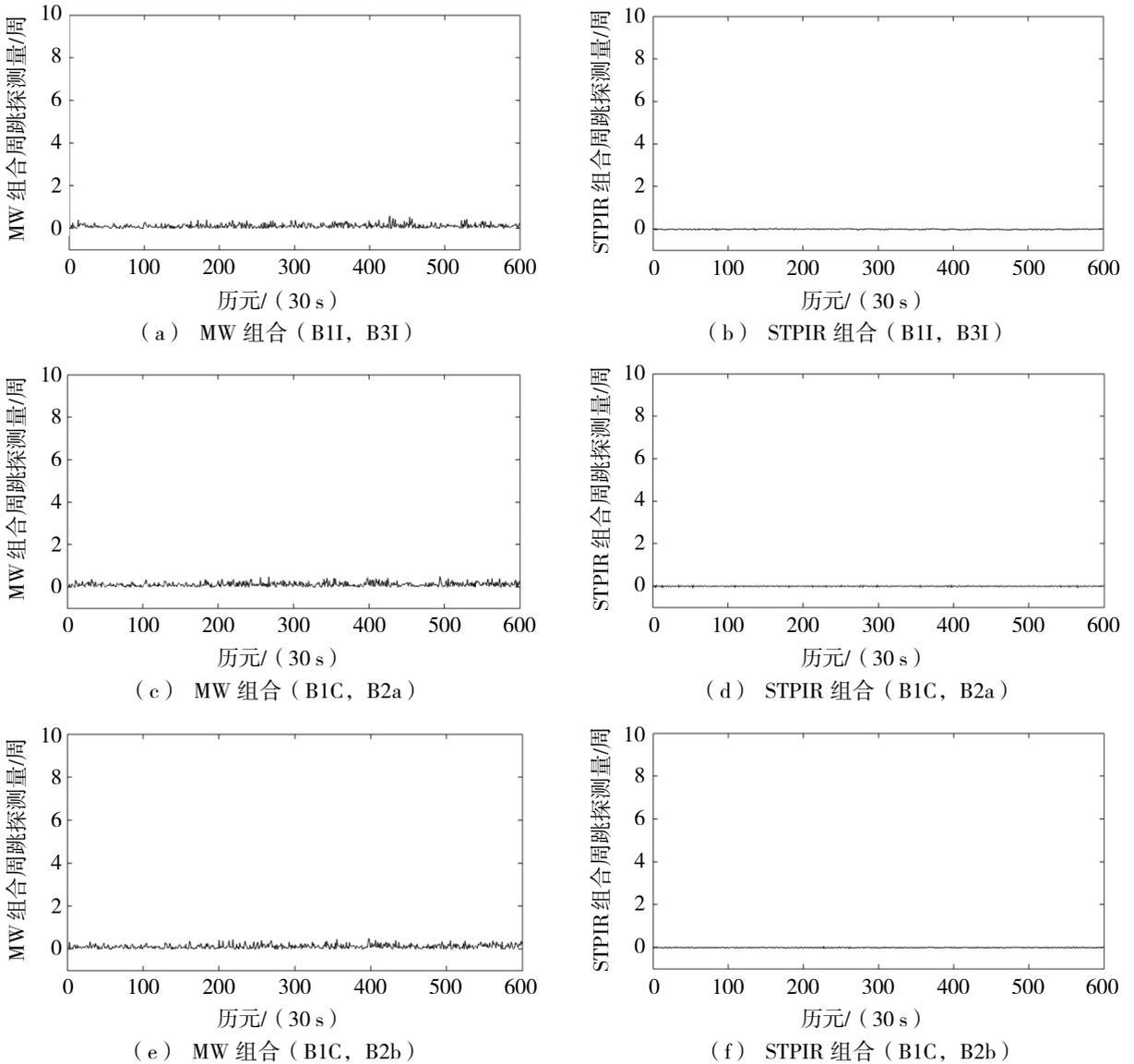


图 1 未添加周跳的 MW 和 STPIR 组合中周跳探测量

图 2 是添加周跳后的 MW 和 STPIR 组合周跳探测量。

如图 2 (a)、(c)、(e) 所示, (B1I, B3I) (B1C, B2a) (B1C, B2b) 3 组信号的 MW 组合周跳探测量在人工添加过周跳的 100 历元、200 历元、300 历元、500 历元有“突刺”, 说明 MW 组合检测出了 100 历元、200 历元、300 历元、500 历元的 4 组周跳。

如图 2 (b)、(d)、(f) 所示, (B1I, B3I) (B1C, B2a) (B1C, B2b) 3 组信号的 STPIR 组合周跳探测量在人工添加过周跳的 100 历元、200 历元、400 历元、500 历元有“突刺”, 说明 STPIR 组合检测出了 100 历元、200 历元、400 历元、500 历元的 4 组周跳。

综合图 2 (a)、(b)、(c)、(d)、(e)、(f), (B1I, B3I) (B1C, B2a) (B1C, B2b) 3 组信号的 MW 和 STPIR 组合周跳探测量可知, MW 组合检测出了 100 历元、200 历元、300 历元、500 历元的 4 组周跳, 而 STPIR 组合检测出了 100 历元、200 历元、400 历元、500 历元处的 4 组周跳。

而人工添加的周跳在 100 历元、200 历元、300 历元、400 历元、500 历元一共有 5 组, MW 组合没有检测出 400 历元处的等值周跳 (4, 4), STPIR 组合没有检测出 300 历元的 $\Delta\varphi_1/\Delta\varphi_2$ 比值接近 λ_2/λ_1 的周跳 (5, 4)。这验证了 MW 和 STPIR 组合对盲区周跳的不敏感。

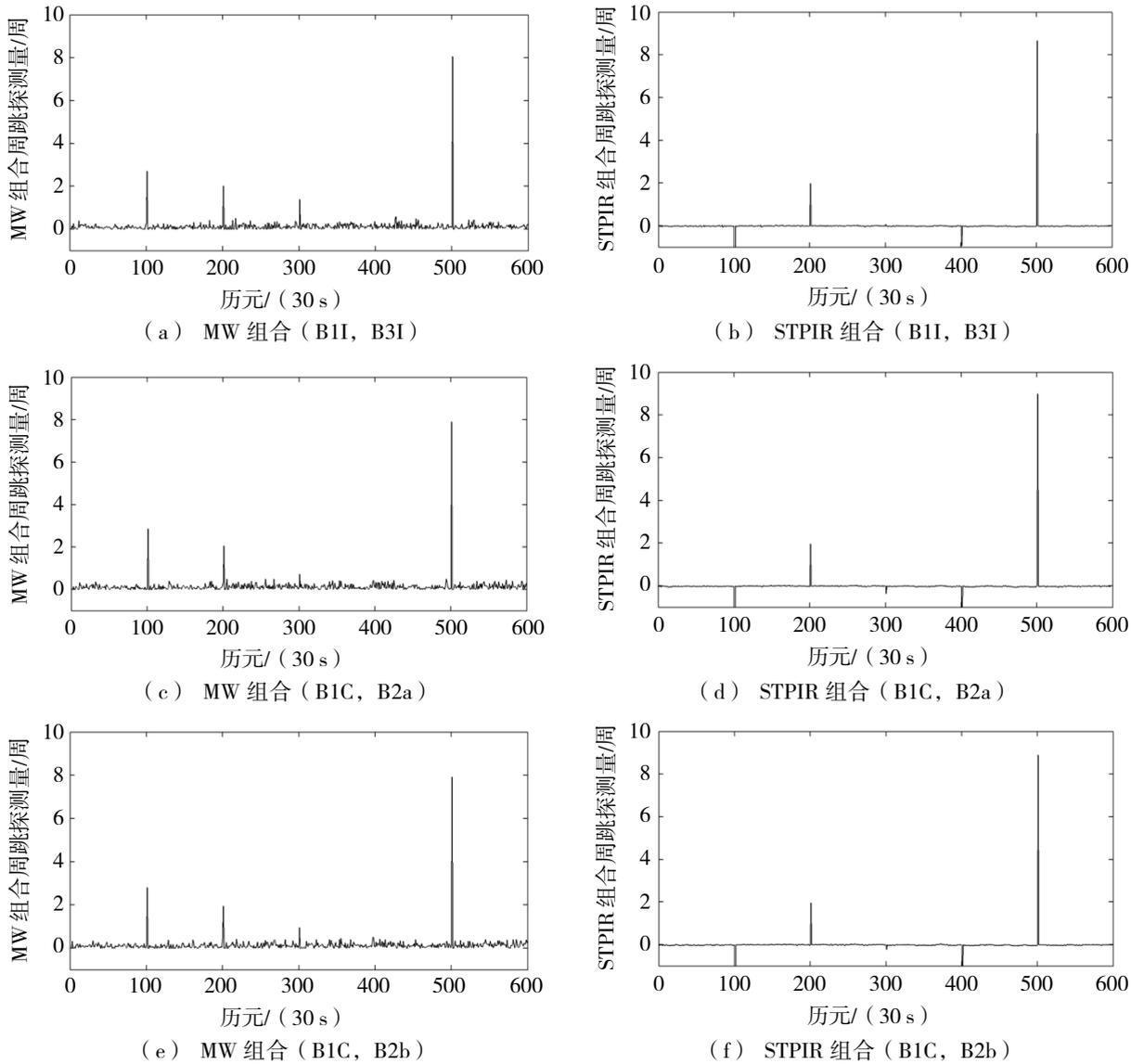


图 2 添加周跳后的 MW 和 STPIR 组合中周跳探测量

MW 组合能正常探测 STPIR 组合探测失败的 300 历元处周跳 (5, 4), 而 STPIR 组合能正常探测 MW 组合探测失败的 400 历元处周跳 (4, 4), 这一结果验证了 MW 和 STPIR 组合的周跳探测盲区与正常探测区互补, 联合使用 MW 和 STPIR 组合能够探测出单一方法不能探测的周跳。

MW 和 STPIR 联合修复周跳计算简便, 本文以 (B1I, B3I) 信号组合的周跳修复结果为例, 如表 4 所示。

表 4 (B1I, B3I) 周跳修复结果

历元	周跳	$\Delta\varphi_{MW}$	$\Delta\varphi_{STPIR}$	$\Delta\varphi_1$	$\Delta\varphi_2$	是否正常探测
100	(3, 6)	-3	-4.415 4	3.137 7	6.137 7	是
200	(2, 0)	2	1.984 8	2.066 1	0.066 1	是
300	(5, 4)	1	0.070 7	5.030 0	4.030 0	是
400	(4, 4)	0	-0.941 1	4.081 1	4.081 1	是
500	(5, -3)	8	8.667 8	5.103 9	-2.896 1	是

由表 4 可知, B1I, B3I 信号修复后的各个周跳与原周跳差值均在 0.1 左右, 差值最大的为 0.137 7, 在 100 历元处的 (3, 6); 差值最小的为 0.030 0, 在 300 历元处的 (5, 4)。由于周跳是整周跳变, 且修复后的周跳值与原周跳的差值均在 0.1 周左右, 四舍五入即可得到整周跳变前的周跳值。

对北斗三号 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 五种信号周跳的探测和修复实验结果说明, 联合使用 MW 和 STPIR 组合可以使 MW 和 STPIR 两种组合的盲区互补, 从而使用 MW 和 STPIR 组合能很好地探测北斗三号卫星导航系统发射的 B1C、B1I、B2a、B2b、B3I 五种信号的周跳。

4 结语

本文针对北斗三号卫星导航系统的周跳现象, 提出了一种联合 MW 和 STPIR 组合的方法, 该方法可以弥补单一组合的周跳探测盲区缺陷, 解决单一组合的周跳修复多值性问题, 对于采样间隔为 30 s 的数据也适用。然后, 基于这一方法, 设计并进行了北斗卫星导航系统五种民用信号的载波相位观测值探测与修复周跳的实验。结果表明, 联合 MW 和 STPIR 组合的方法能弥补单一组合的探测盲区缺陷, 解决单一组合的周跳修复多值性问题, 很好地探测和修复北斗三号的载波相位观测值周跳。

参考文献:

- [1] 杨子辉, 薛彬. 北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势[J]. 导航定位学报, 2022, 10(1): 1-14.
- [2] 张涛. GNSS 载波相位远程时间比对技术研究[D]. 西安: 中国科学院大学/国家授时中心, 2016.
- [3] 赵兴旺, 王胜利, 刘超. GNSS 精密单点定位理论与方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2015.
- [4] TIAN F, XU B, WANG C Y. Cycle slips detection and correction of GPS based on carrier phase differences and polynomial fitting[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2013, 5(3): 316-323.
- [5] 李明, 高星伟, 徐爱功. 一种改进的周跳多项式拟合方法[J]. 测绘科学, 2008, 33(4): 82-83+99.
- [6] WANG Y K, LI K Z, ZHAO L J, et al. A new modified method for cycle-slips detection based on polynomial fitting method[J]. Springer Singapore, 2016, 1(2): 10-24.
- [7] 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.
- [8] 范龙, 吴韩柱, 务宇宽. 联合 MW 组合和电离层残差组合的周跳探测与修复方法[J]. 海洋测绘, 2011, 31(2): 13-16+20.
- [9] 沈朋礼, 成芳, 肖厦, 等. 北斗三号卫星的周跳探测与修复算法[J]. 测绘科学, 2019, 44(11): 7-14.
- [10] 李星星. GNSS 精密单点定位及非差模糊度快速确定方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2013.
- [11] 王思凡, 李建章, 隋哲民. 电离层残差法组合与相位减伪距法联合探测与修复 BDS 观测值中的周跳[J]. 导航定位学报, 2021, 9(5): 89-95+120.
- [12] HU C, WANG Q X, WANG Z Y, et al. New-generation Beidou(BDS-3) experimental satellite precise orbit determination with an improved cycle-slip detection and repair algorithm[J]. Sensors, 2018, 18(5): 1402.
- [13] 姚一飞, 高井祥, 王坚, 等. 北斗三频载波观测值的周跳实时探测与修复[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(6): 1140-1148.
- [14] 黄令勇, 翟国君, 欧阳永忠, 等. 三频 GNSS 电离层周跳处理[J]. 测绘学报, 2015, 44(7): 717-725.
- [15] 范丽红, 王利, 张明, 等. 基于 MW 与 STPIR 组合的周跳探测与修复方法研究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(6): 790-794.
- [16] 李慧茹, 黄观文, 赵敏宁, 等. TurboEdit 方法中周跳探测算法的改进[J]. 时间频率学报, 2012, 35(1): 43-49.
- [17] 范丽红. GPS/BDS 数据质量评估及完好性监测研究[D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [18] 蔡成林, 沈文波, 曾武陵, 等. 多普勒积分重构与 STPIR 联合周跳探测与修复[J]. 测绘学报, 2021, 50(2): 160-168.