

相位绕转误差对实时动态 PPP 数据预处理的影响分析

易文婷¹ 宋伟伟¹ 施 闯¹ 税 敏²

(1 武汉大学 GNSS 研究中心,武汉市珞喻路 129 号,430079)

(2 科技部国家遥感中心,北京市海淀区柳林馆南里甲 8 号楼西侧,100036)

摘 要:分析了相位绕转误差对 Melbourne-Wubben (MW) 和 Geometry-Free (GF) 组合观测值的影响。结果表明,相位绕转误差对 MW 组合观测值没有影响,但会影响 GF 组合观测值,可能会导致 GF 组合周跳探测发生误判。因此提出在实时动态 PPP 数据预处理时,采用星间单差 GF 组合来辅助非差 GF 组合探测周跳。实验结果表明,该方法可以消除相位绕转误差对周跳探测的影响。

关键词:相位绕转;周跳;Melbourne-Wubben;Geometry-Free

中图法分类号:P228.41

GPS 精密定位必须保证观测数据中无周跳观测值,因此,正确检测与修复周跳是 GPS 精密数据处理中的一个关键问题^[1]。周跳探测与修复的基本思路是从一组能够精确反映周跳变化的检测量序列中探测出周跳发生的位置和大小,并修复周跳观测值^[2]。Melbourne-Wubben (MW) 与 Geometry-Free (GF) 组合观测值^[3]具有与几何距离无关的特性,其时间序列能够较好地反映模糊度的变化,因此常被作为检测量来探测周跳^[4]。在动态测量中,接收机天线可能会随着运动载体发生旋转,产生相位绕转误差^[5],一般情况下,载体的姿态难以准确确定,因此难以通过模型来改正该误差,在 MW 和 GF 组合观测值中实际上存在该误差的影响。本文讨论了相位绕转误差对 MW 及 GF 组合观测值探测周跳的影响,并提出了一种顾及相位绕转误差的实时动态 PPP 数据预处理方法。

1 相位绕转误差

GPS 载波相位是一种右旋极化电磁波信号,卫星天线和接收机天线绕极化轴向的相对旋转会影响载波相位测量,产生相位绕转误差^[5],其中,

GPS 卫星姿态调整所产生的相位绕转误差可通过下列公式加以改正:

$$\Delta\varphi = \text{sign}(\zeta) \arccos(\vec{D}' \cdot \vec{D} / |\vec{D}'| |\vec{D}|) \quad (1)$$

其中, $\zeta = \hat{k} \cdot (\vec{D}' \times \vec{D})$, \hat{k} 是卫星到接收机的单位向量; \vec{D}' 、 \vec{D} 分别是卫星和接收机天线的有效偶极矢量。而接收机天线旋转所产生的相位绕转误差难以通过公式加以改正,本文主要讨论其对 PPP 数据预处理的影响。为叙述方便,下文中的相位绕转误差均特指由接收机天线旋转所产生的相位绕转误差。接收机天线绕极化轴旋转一周, L_1 、 L_2 载波相位观测值都将产生一周的相位绕转误差^[5]。考虑相位绕转误差时,伪距和相位观测值可表示为:

$$\lambda_i \Phi_i^j = \rho^j - cdt + cdt^j - N_i^j \lambda_i - dI^j - dT^j - \lambda_i dW + \epsilon_{i,\varphi}^j \quad (2)$$

式中, i 表示载波频率; j 表示卫星编号; Φ 为伪距和载波相位观测值; ρ 、 c 为站星距离和光速; dt 、 dt^j 为接收机和卫星钟差; λ 、 N 为波长和模糊度参数; dI 、 dT 为电离层和对流层延迟; dW 为相位绕转误差。

2 相位绕转对非差 GF 组合的影响

GF 组合观测值探测周跳是基于电离层变化

平缓的思想,当没有周跳发生时,认为 GF 组合观测值是连续且平滑的,其突变是由周跳造成的^[6]。在不考虑相位绕转误差时,GF 组合观测值仅受到电离层残差和模糊度参数的影响,因此也被称为电离层残差组合。而当考虑相位绕转误差时,由于相位绕转误差对 L_1 、 L_2 载波测距产生的影响不同^[7],GF 组合观测值实际受电离层残差、相位绕转误差以及模糊度参数的共同影响:

$$L_{GF}(\lambda_1\Phi_1 - \lambda_2\Phi_2) = (\lambda_1 - \lambda_2)dW + \Delta dI + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \quad (3)$$

式中, ΔdI 为电离层残差。

由式(3)可知,只有当接收机天线静止,即 $dW=0$ 时,GF 组合才是真正意义上的电离层残差组合,而当接收机天线发生旋转时,GF 组合会受到相位绕转误差的影响。

假设 t 时刻的 GF 组合观测值为:

$$L_{GF}(t) = \Delta dI(t) + (\lambda_1 - \lambda_2)dW(t) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \quad (4)$$

在 $t+1$ 时刻的 GF 组合观测值为:

$$L_{GF}(t+1) = \Delta dI(t+1) + (\lambda_1 - \lambda_2)dW(t+1) + (\lambda_1 N'_1 - \lambda_2 N'_2) \quad (5)$$

由式(5)-式(4)得:

$$\Delta L_{GF} = \nabla \Delta dI + (\lambda_1 - \lambda_2)\Delta dW + \lambda_1(N'_1 - N_1) - \lambda_2(N'_2 - N_2) \quad (6)$$

式中, ΔL_{GF} 、 $\nabla \Delta dI$ 、 ΔdW 分别表示历元间的差分 GF 组合、电离层延迟及相位绕转误差。

GF 组合观测值探测周跳的前提条件是认为除周跳外的其他误差对 ΔL_{GF} 的影响可以忽略不计,但是从式(6)可以发现,当 ΔdW 变化较大时,也可能引起 ΔL_{GF} 发生突变,导致利用传统的 GF 组合周跳探测方法发生误判。假设 GF 组合探测周跳条件为 $\Delta L_{GF} > \delta$,将其代入式(6),若认为电离层残差在相邻历元间不变,且没有周跳发生,则有:

$$(\lambda_1 - \lambda_2)\Delta dW > \delta \quad (7)$$

即当式(7)满足下列条件时:

$$|\Delta dW| > \frac{\delta}{|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (8)$$

利用 GF 组合观测值探测周跳会判断该历元发生了周跳。根据误差传播定律知, ΔL_{GF} 的噪声为:

$$\delta_{\Delta L_{GF}} = \sqrt{\delta_{L_1}^2 + 1.28^2 \delta_{L_2}^2 + \delta_{L_1}^2 + 1.28^2 \delta_{L_2}^2} \approx 2.3\delta_{L_1} \quad (9)$$

取相位观测值的精度为 $2 \text{ mm}^{[8]}$,按照 3 倍中误差原则, δ 可取为 1.4 cm ,则 ΔdW 约为 0.3 周,即当接收机天线旋转速度达到每历元 0.3 周时,将会影响 GF 组合观测值周跳探测的结果。

3 相位绕转对非差 MW 组合的影响

考虑相位绕转误差时,MW 组合观测值可写为:

$$l_{MW} = \frac{c(\Phi_1 + dW_1 - \Phi_2 - dW_2)}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (10)$$

相位绕转误差对 L_1 和 L_2 载波相位观测值产生等周的影响^[7],即 $dW_1 - dW_2 = 0$,因此式(10)又可写为:

$$l_{MW} = \frac{c(\Phi_1 - \Phi_2)}{f_1 - f_2} - \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} \quad (11)$$

式(11)与不考虑相位绕转误差时的 MW 组合观测值相同,可见相位绕转误差不影响 MW 组合观测值。

4 星间单差 GF 组合辅助探测周跳

相位绕转误差可能导致 GF 组合探测周跳时发生误判,出现所有卫星都发生了周跳的假象,因此在 GF 组合探测周跳时,必须排除相位绕转误差的干扰。由于相位绕转误差对各卫星的影响相同^[7],可通过星间求差消除相位绕转误差的影响。卫星 i 相对参考卫星 j 的星间单差 GF 组合观测值为:

$$l_{GF}^{i,j} = \nabla \Delta dI^{i,j} + \lambda_1(N_1^i - N_1^j) - \lambda_2(N_2^i - N_2^j) \quad (12)$$

式(12)表明,星间单差 GF 组合观测值仅含有残余电离层误差和星间单差模糊度的影响,消除了相位绕转误差的影响,避免了周跳探测的误判。但是星间单差 GF 组合在探测周跳时也存在如下缺点:① 当发生周跳时,无法区分是参考星还是非参考星发生了周跳;② 当非参考星和参考星发生了相同的周跳时,星间单差也无法探测出来,因此实时动态 PPP 数据预处理时,须采用星间单差 GF 组合来辅助非差 GF 组合探测周跳。首先采用非差 GF 组合探测周跳,若判断所有卫星都发生了周跳,则采用星间单差 GF 组合进一步探测。

5 实验分析

5.1 实验 1

实验时,将能够匀速旋转的平台安置在武汉

大学信息学部教学实验大楼楼顶,其净空条件良好。将一体式接收机放置在能匀速旋转的平台上,开机后,先静止观测一段时间,然后顺时针旋转 3 周(转速约为 $120^\circ/\text{s}$),静止几分钟后又逆时针旋转 3 周,得到 GF 组合观测值及其历元间变化(为方便表示文中 GF 组合观测值,均减去了一个常数)的时间序列图如图 1 所示。

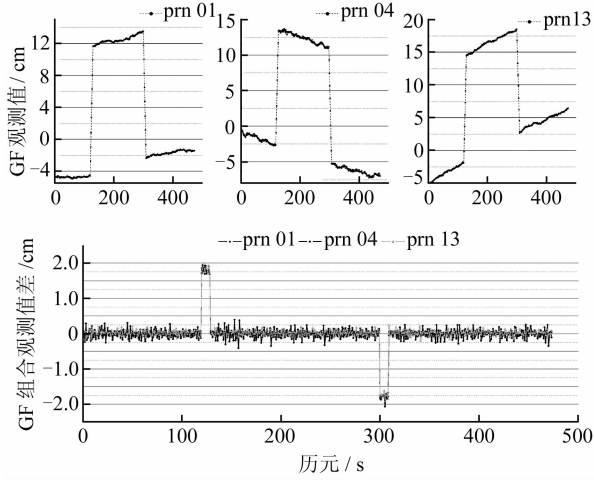


图 1 实验 1 GF 组合观测值及其历元间的变化
Fig. 1 GF Observation and Its Difference Between Epoch

从图 1 可以看出,当接收机天线旋转时,载波相位观测值受相位绕转误差的影响,在 L_1 和 L_2 上产生的距离影响不同,非差 GF 组合观测值包含相位绕转误差的影响。当天线顺时针旋转 3 周时,非差 GF 组合观测值也变大了 16.2 cm;逆时针旋转 3 周时,非差 GF 组合观测值减小了 16.2 cm。非差 GF 组合观测值及其历元间的变化受相位绕转误差的影响发生了明显突变,若仍按照非差 GF 组合观测值周跳探测的思想,认为突变是由周跳引起的,则会判断此处发生了周跳,导致误判。因此,动态 GPS 数据探测周跳时,应采用星间单差辅助进行周跳探测,将上述非差 GF 组合观测值作星间单差,得到星间单差 GF 组合及其历元间变化的时间序列图如图 2 所示(以 prn 01 号卫星为参考星)。

图 2 中,星间单差 GF 组合观测值恢复了连续平滑的特性,说明星间单差 GF 组合观测值消除了相位绕转误差的影响,可以作为周跳探测的检测量。

模拟 prn 04 号卫星在天线旋转的同时, L_1 载波相位观测值发生了 1 周的周跳,即在 prn04 号卫星 L_1 载波相位观测值第 123 历元人为添加 1 周的周跳,得到其星间单差 GF 组合观测值及其

历元间变化的时间序列如图 3 所示。由图 3 可知,当仅发生相位绕转误差时,星间单差 GF 组合观测值及其历元间变化是连续且平滑的,而在同时发生相位绕转误差和周跳时,均出现突变,可见通过星间单差 GF 组合观测值辅助非差 GF 组合观测值的方法来探测动态 GPS 观测数据时,能够准确地区分相位绕转误差的影响,探测出观测值中的周跳值。

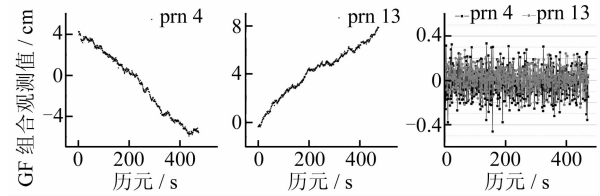


图 2 星间单差 GF 组合观测值及其历元间的变化
Fig. 2 Single Difference GF Observation and Its Difference Between Epoch

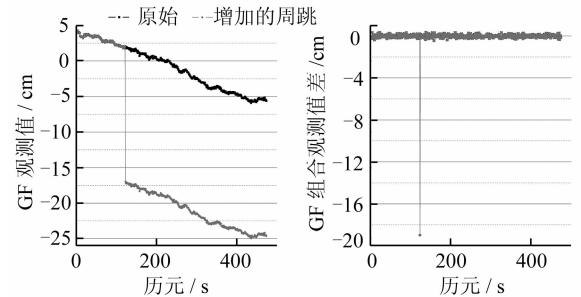


图 3 prn 04 卫星含周跳和相位绕转误差影响的星间单差 GF 组合

Fig. 3 Single Difference GF Observation with Wind-up and Cycle-slip of prn04

5.2 实验 2

实验 1 结果表明,相位绕转误差在观测历元间产生较大影响时,会影响非差 GF 组合观测值周跳探测的结果。下面分析当接收机天线缓慢旋转时,相位绕转误差对 GF 组合观测值周跳探测的影响。实验时,将平台速度降低到约 $3.6^\circ/\text{s}$,其他操作与实验 1 相同,得到的 GF 组合观测值及其历元间变化的时间序列图如图 4 所示。

实验 1 中,接收机天线旋转速度较快,相位绕转误差历元间的变化明显大于电离层残差,图 1 中的 GF 组合观测值发生突变,且短期变化大小与相位绕转误差大小相符,而实验 2 中接收机天线的转速较慢,只有实验 1 转速的 $1/30$,相位绕转误差在历元间的影响较小,与电离层残差的影响量级相当,对于电离层延迟变化较大的卫星,难以区分相位绕转误差和电离层残差变化的影响。相对图 1 而言,图 4 中的 GF 组合观测值仍是连续的,且其历元间的变化没有发生突变,此时将不

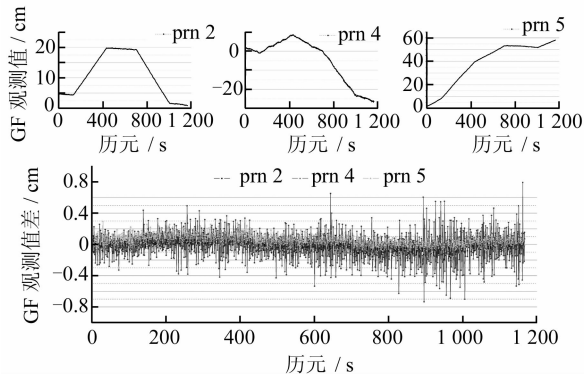


图4 实验 2GF 组合观测值及其历元间的变化

Fig. 4 GF Observation and Its Difference Between Epoch

会产生周跳探测的误判。

参 考 文 献

- [1] 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
- [2] 宋伟伟,姚宜斌,罗峰. 精密单点定位中周跳探测与修复方法研究[J]. 测绘信息与工程,2007,32(3):

34-35

- [3] Blewitt G. An Automatic Editing Algorithm for GPS Data [J]. Geophysical Research Letters, 1990,17(3):199-202
- [4] 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, 2002,27(3): 234-240
- [5] Wu J T, Wu S C, Hajj G A, et al. Effects of Antenna Orientation on GPS Carrier Phase[J]. Man Geodetica, 1993,18:91-98
- [6] 宋伟伟,姚宜斌. 复杂运动状态下的单频数据预处理方法研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009,34(11): 1 305-1 308
- [7] Garcia-Fernandez M, Markgraf M, Montenbruck O. Spin Rate Estimation of Sounding Rockets Using GPS Wind-up[J]. GPS Solut,2008,12:155-161
- [8] 刘基余,李征航,王跃虎,等. 全球定位系统原理及其应用[M]. 北京:测绘出版社,1993

第一作者简介:易文婷,博士生,研究方向为 GNSS 精密定位。
E-mail: ywtsky1985@163.com

Influences of Wind-up on Data Preprocessing in Real-time Dynamic PPP

YI Wenting¹ SONG Weiwei¹ SHI Chuang^{1,2} SHUI Min²

(1 Research Center of GNSS, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

(2 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University,129 Luoyu Road, Wuhan 430079,China)

Abstract: Melbourne-Wubbena(MW) and Geometry-Free(GF) combinations are usually used for cycleslip detection in real-time dynamic PPP, but wind-up error caused by the rotating of receiver's antenna, is usually ignored. We discuss the influences of wind-up error on MW and GF combinations. The analysis and experimental results show that wind-up error has no influence on MW combinations while it will affect GF combinations. Sometimes it may even cause a false cycle-slip detection by using GF combinations. Considering the influences of wind-up error on GF combinations, this essay proposes that with both undifferenced GF combinations and the differenced combinations between satellites a new method can be used to detect the cycle-slip in real-time dynamic PPP and it shows the new method can successfully eliminate the effect of wind-up error.

Key words: wind-up; cycle-slip; Melbourne-Wubbena; Geometry-Free

About the first author: YI Wenting, Ph.D candidate, majors in GNSS precise positioning.

E-mail: ywtsky1985@163.com