

GPS 周跳探测的方法研究

王 维^{1,2} 王解先^{1,3} 高俊强²

(1 同济大学测量与国土信息工程系,上海市四平路 1239 号,200092)
(2 南京工业大学土木工程学院,南京市中山北路 200 号,210009)
(3 现代工程测量国家测绘局重点实验室,上海市四平路 1239 号,200092)

摘 要:在分析 Blewitt 方法的基础上,加入一种新的方法共同探测周跳。新方法将无电离层组合作为基本观测值,对其进行星间差分,差分结果消除了电离层延迟和接收机钟差的影响,而且差分后的组合观测值具有良好的光滑性,有利于周跳的探测。实验证明,3 种方法共同使用可以更准确地探测出周跳发生的位置。

关键词:周跳探测;无电离层组合;星间差分

中图法分类号:P228.41

数据预处理的主要作用是为定轨和定位数据处理作准备。通过预处理对原始观测数据进行编辑、整理,探测载波相位存在的周跳和粗差,同时也对伪距作一些基本的检查,为后续的定轨和定位提供干净可靠的观测数据。

周跳的探测和修复是数据预处理的重要内容。Blewitt 在 1990 年提出的方法中将观测值进行组合,组合后的观测值在某一方面呈现出良好性质,如宽带组合波长较长(约为 86 cm)、电离层残差组合仅包含电离层的变化。利用这些性质可以进行周跳的探测和计算^[1,2]。

1 组合观测值^[3,4]

不考虑对流层和多路径效应、电离层高阶项噪声的影响,相位和伪距的基本观测方程为:

$$L_1 = \rho + \lambda_1 N_1 - \frac{I}{f_1^2} \quad (1)$$

$$L_2 = \rho + \lambda_1 N_2 - \frac{I}{f_2^2} \quad (2)$$

$$P_1 = \rho + \frac{I}{f_1^2} \quad (3)$$

$$P_2 = \rho + \frac{I}{f_2^2} \quad (4)$$

由上述基本观测方程,可得到本文主要采用的组合观测值。

1) 电离层残差组合:

$$L_I = \lambda_1 \varphi_1 - \lambda_2 \varphi_2 = \left(\frac{I}{f_2^2} - \frac{I}{f_1^2} \right) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) \quad (5)$$

$$P_I = \frac{I}{f_2^2} - \frac{I}{f_1^2} \quad (6)$$

2) 宽带组合:

$$L_w = \frac{f_1 \varphi_1 - f_2 \varphi_2}{f_1 - f_2} = \rho + \frac{I f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} + \lambda_w N_w \quad (7)$$

$$P_w = \frac{f_1 P_1 + f_2 P_2}{f_1 + f_2} = \rho + \frac{I f_1 f_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (8)$$

联立式(7)和式(8),可得:

$$N_w = \frac{1}{\lambda_w} (L_w - P_w) \quad (9)$$

所以,可得到:

$$N_\delta = N_1 - N_2 = \varphi_1 - \varphi_2 - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{P_1}{\lambda_1} + \frac{P_2}{\lambda_2} \right) \quad (10)$$

3) 无电离层组合:

$$L_c = \frac{f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (11)$$

2 周跳的探测

2.1 宽带组合

每个历元都可以用式(9)独立计算宽带模糊

度 N_w , Blewitt 给出一种递归算法可以不断更新宽带模糊度及其中误差。 i 个历元的模糊度差的平均值 $\langle N_\delta \rangle$ 及其中误差 σ_i 为:

$$\langle N_\delta \rangle_i = \langle N_\delta \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} (N_{\delta i} - \langle N_\delta \rangle_{i-1}) \tag{12}$$

$$\sigma_i^2 = \sigma_{i-1}^2 + \frac{1}{i} [(N_{\delta i} - \langle N_\delta \rangle_{i-1})^2 - \sigma_{i-1}^2] \tag{13}$$

式中, $\langle N_\delta \rangle_i$ 为前 i 个历元的平均值; $N_{\delta i}$ 表示第 i 个历元的模糊度差; σ_i^2 表示前 i 个历元的方差。

根据 $\langle N_\delta \rangle_i$ 和 σ_i , 如果:

1) $|N_{\delta(i+1)} - \langle N_\delta \rangle_i| \geq 4\sigma_i$, 且 $|N_{\delta(i+2)} - N_{\delta(i+1)}| < 1$, 则认为 i 与 $i+1$ 历元之间不存在周跳;

2) $|N_{\delta(i+1)} - \langle N_\delta \rangle_i| \geq 4\sigma_i$, 且 $|N_{\delta(i+2)} - N_{\delta(i+1)}| \geq 1$, 则认为 $i+1$ 历元为野值;

3) $|N_{\delta(i+1)} - \langle N_\delta \rangle_i| < 4\sigma_i$, 则认为 i 与 $i+1$ 历元之间没有周跳。

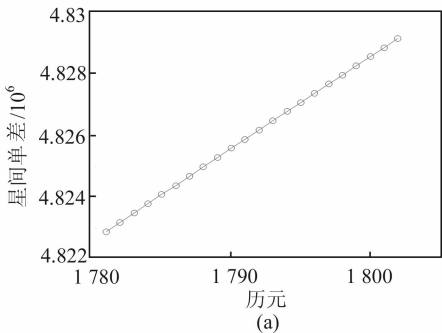
但是, 当两个频率上出现相同周跳时, 即对于 $N_\delta = 0$ 的情况, 用上述 3 个条件不易探测出周跳^[1,5], 还需要借助其他探测方法进一步确定是否存在周跳。

2.2 电离层残差组合

当某一时刻 L_1 上的周跳与 L_2 相等的时候, 宽带组合无法探测到。在这种情况下, 可以用电离层残差组合进行检查。

对 $\{P_I(i)\} (1 \leq i \leq N)$ 进行多项式拟合成 Q , 多项式的阶数满足条件 $m = \min\left[\left(\frac{N}{100} + 1\right), 6\right]$, N 为历元个数, 用 $(L_I - Q)$ 的残差的不连续性探测周跳。

$$|(L_{Ii} - Q_i) - (L_{I(i-1)} - Q_{i-1})| > k(\lambda_2 - \lambda_1) \tag{14}$$



$$|(L_{Ii} - Q_i) - (L_{I(i-1)} - Q_{i-1})| < (\lambda_2 - \lambda_1) \tag{15}$$

式中, k 的值默认为 6, 也可以在电离层异常的情况下取一个合适的值。

2.3 星间单差

在电离层活跃的地区, 使用无电离层组合探测周跳是非常合适的。但是, 由于无电离层组合观测值对接收机钟差的变化非常敏感, 所以, 需要通过星间差分来消除接收机钟差的影响^[1]。首先应选出一颗参考卫星, 在所有卫星中选取高度角最大、且在连续弧段内^[6]有效数据最多的卫星作为参考星, 其他卫星分别与参考星求一次差, 差分观测值为:

$$L_c^i = (\rho^r - \rho^i) + c(\delta t^r - \delta t^i) + (\Delta_{\text{trop}}^r - \Delta_{\text{trop}}^i) - \lambda_c(N_c^r - N_c^i) \tag{16}$$

式中, ρ 表示卫星到测站的距离; δt 表示卫星钟差; Δ_{trop} 表示对流层延迟; N_c 表示无电离层组合模糊度。

由于卫星绕地球运动的速度很快, 无电离层组合相位观测值变化量非常大, 拟合函数很难发现小周跳。若从组合观测值中减去站星距离, 则小周跳比较容易显现出来。

因此, 式(16)可以变为:

$$I_c^i = c(\delta t^r - \delta t^i) + (\Delta_{\text{trop}}^r - \Delta_{\text{trop}}^i) - \lambda_c(N_c^r - N_c^i) \tag{17}$$

通过图 1(a)可以看出, 卫星相对于参考星的相位变化是均匀的。又由于星间差分后的相位观测值包括卫星钟差、对流层延迟, 所以可以认为卫星钟差和对流层延迟的变化也是均匀的。当星间差分观测值出现突变, 则认为是发生了周跳, 如图 1(b)。

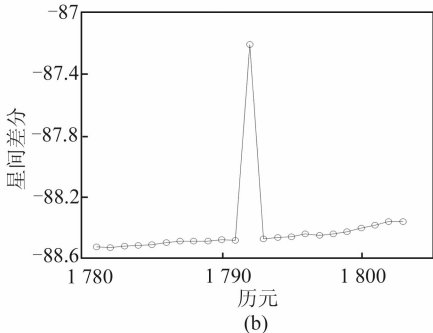


图 1 星间单差
Fig. 1 Satellite Difference

3 实验与分析

本实验使用 2004 年 12 月 8 日 base 站的观测数据。观测采用 LEICA GX1230 型接收机,采样间隔为 1 s,取观测开始 2 h 后的 120 个历元的观测数据进行实验,在该时间段观测到的数据没有周跳发生。以 PRN28 作为研究对象分析 3 种方法的周跳检测能力,人为添加周跳(见表 1)。

由图 2 可以看出,当两个频率发生相同周跳

的时候,宽带组合不能探测出来。从图 3 和图 4 中都能看到周跳发生的位置。对于图 4,无论周跳大小,星间单差的结果都能均匀地反映出来,这比电离层组合探测结果要好。另外,无电离层组合比电离层残差组合观测值更加光滑,用拟合残差的不连续性判断周跳效果更明显。

表 1 加入的待检测的周跳数

Tab. 1 Added Cycle Slip to be Detected			
历元位置	1 691	1 741	1 791
周跳数	24.19	2.2	0.5.0

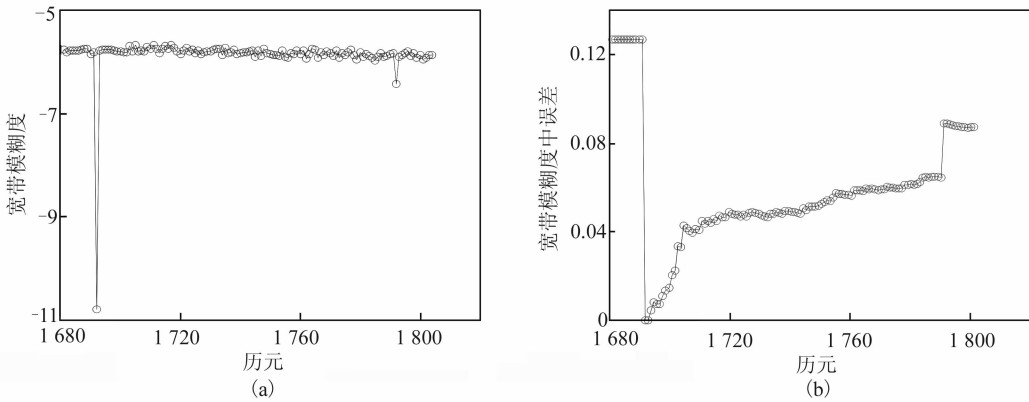


图 2 宽带模糊度探测周跳
Fig. 2 Cycle Slip Detection by Wide-Lane Ambiguity

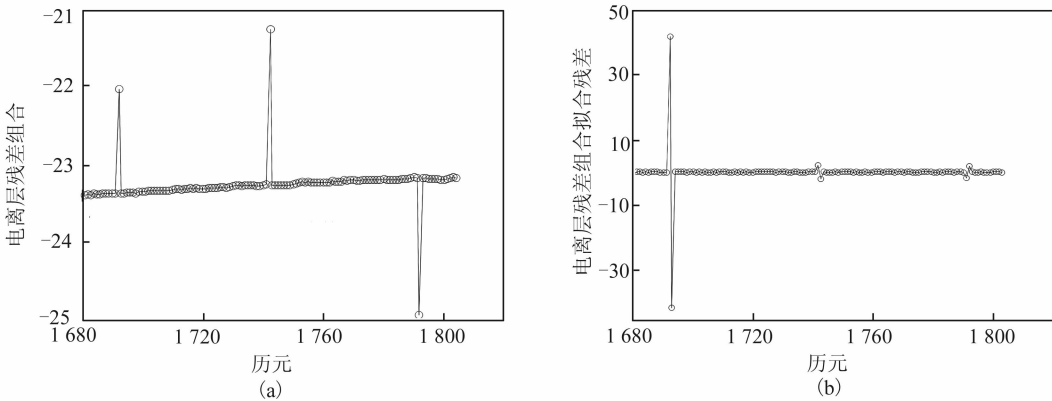


图 3 电离层残差组合探测周跳
Fig. 3 Cycle Slip Detection by Ionospheric Combination

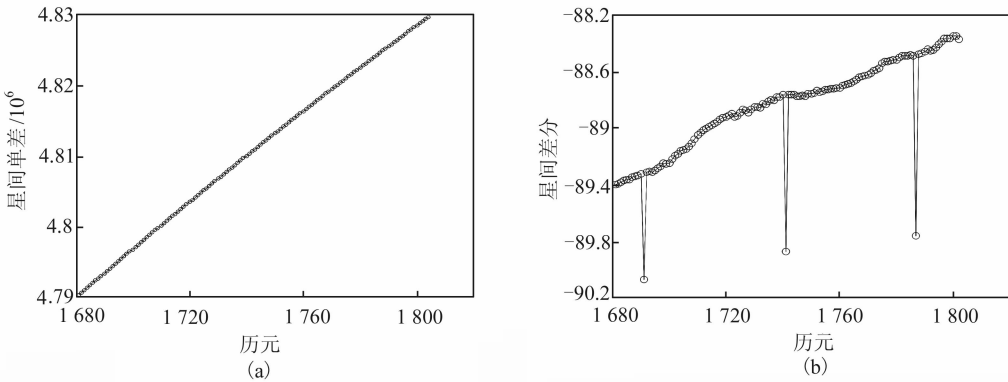


图 4 星间单差探测周跳
Fig. 4 Cycle Slip Detection by Satellite Difference

用 3 种方法分别探测周跳以后,采用以下标准最终确定发生周跳的位置:在某一时刻,宽带组合与无电离层组合都出现周跳;或者电离层组合与无电离层组合都出现周跳。以上条件满足其一,则认为该历元发生了周跳。在图 2~4 中,用上面的原则可以准确判断发生周跳的 3 个历元。

参 考 文 献

[1] Blewitt G. An Automated Editing Algorithm for GPS Data[J]. Geophysic Research Letters,1990,17 (3):199-202

[2] 黄兵杰,柳林涛,高光星,等. 基于小波变换的 GPS 精密单点定位中的周跳探测[J]. 武汉大学学报·

信息科学版,2006,6(6):512-515

[3] 魏子卿,葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京:测绘出版社,1992

[4] 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

[5] 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

[6] 郑作亚,程宗颐. 差分法周跳探测与修复方法改进[J]. 中国科学院上海天文台刊,2004,24: 13-21

第一作者简介:王维,博士生,主要从事卫星大地测量的研究。
E-mail:wangwei_nj@126.com

Cycle Slip Detection of GPS Data

WANG Wei^{1,2} WANG Jiexian^{1,3} GAO Junqiang²

(1 Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

(2 College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, 200 North Zhongshan Road, Nanjing 210009, China)

(3 Key Laboratory of Advanced Engineering Survey of SBSM, 1239 Siping Road, Shanghai 200092, China)

Abstract: On the basis of the theory of Blewitt, a new method is introduced. The new method uses the ionosphere-free combination L_C . Differencing L_C data between pairs of satellites is not effective to the ionospheric delay and receiver clock variations. Therefore it is useful for cycle slip detection. The wide-lane combination, the ionospheric combination and satellite difference of the ionosphere-free combination are all used to detected cycle slip. The results show that the combination of the three methods can accurately detect cycle slip.

Key words: cycle slip; ionosphere-free combination; satellite difference

About the first author: WANG Wei, Ph.D candidate, majors in satellite geodesy.
E-mail: wangwei_nj@126.com

武汉大学数字制图与国土信息应用工程国家
测绘局重点实验室获评优秀

近日,国家测绘局公布了 2008~2009 年度国家测绘局重点实验室评估结果,武汉大学数字制图与国土信息应用工程国家测绘局重点实验室被评为优秀实验室,是此次评出的两个优秀实验室之一。该实验室主要依托武汉大学资源与环境科学学院,近两年来,实验室在地理信息可视化、地理信息综合与更新、地理信息服务平台、地理信息空间分析与空间数据挖掘以及国土信息应用及其服务等方面承担了多项国家和省部级科研项目,获得了多项省部级奖励,为数字制图与国土信息的基础理论研究和国土信息产业的科技进步作出了一定贡献。