

强电离层影响下 GPS 精密单点定位的周跳实时探测与修复

陆晨曦 谭云华* 朱柏承 周乐柱
(北京大学信息科学技术学院 北京 100871)

摘要: 该文提出了一种应用于 GPS 精密单点定位的周跳实时探测与修复的方法。该方法基于双频 P 码, 可在受到强电离层影响的情况下应用于静态定位与动态导航。为了保证周跳探测与修复的实时性与准确性, 采用信号处理与数据处理相结合的方式并通过合理性检验降低误判概率。通过实际数据的处理验证了该方法在强电离层影响情况下的有效性。

关键词: 全球定位导航系统; 精密单点定位; 载波相位; 周跳

中图分类号: TN961

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2011)01-0073-04

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01516

A Real-time Algorithm for Cycle Slips Detection and Correction of Precise Point Positioning in Strong Ionospheric Influence

Lu Chen-xi Tan Yun-hua Zhu Bo-cheng Zhou Le-zhu

(School of Electronics Engineering and Computer Science, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: An algorithm of real-time detecting and correcting cycle slips for Precise Point Positioning (PPP) is presented. Based on dual-frequency pseudorange and carrier-phase observations, the algorithm can be used for static positioning and dynamic navigation under vigorous ionosphere activity. In order to ensure real-time capability and veracity, data processing and signal processing are combined and a method of reasonableness verification is presented to lower the probability of misjudge. A practical application is also presented to prove the applicability of the algorithm in strong ionospheric influence.

Key words: Global Positioning System (GPS); Precise Point Positioning (PPP); Carrier phase; Cycle slip

1 引言

利用载波相位进行实时动态的精密单点定位是现代 GPS 导航定位的研究热点和难点, 而周跳的实时探测与精确修复对保证定位精度有着至关重要的作用^[1]。随着卫星定位导航系统的不断发展, 基于双频数据的处理方法有着越来越重要的意义, 国内外学者对其进行了广泛的研究^[2-7]。其中, 文献[2,3]中提出的基于卡尔曼滤波的方法可以实时探测周跳, 但不能有效地对其进行修复; 文献[4]中基于小波变换的方法针对相对定位, 不适用于单点定位; 文献[6]中基于伪距多项式拟合的方法要求伪距变化的平滑特性, 不能有效应用于动态导航; 文献[7]中通过递推计算检测量的方差作为周跳的判定阈值, 但兼顾噪声水平与不平滑的伪距变化会导致电离层对检测量的影响不能有效消除, 从而影响方差计算的准确度。综上, 在已有的研究成果当中, 针对强电离层影响情况下的动态单点定位的周跳实时探测

与修复尚没有十分有效的方法。

为此, 本文通过低通滤波估计出检测量中的电离层影响, 将原检测量与滤波结果实时相减以消除其影响, 并在降低判定阈值的同时将小周跳的计算结果重新代入到检测量中进行合理性检验, 在保证对小周跳的探测灵敏度的同时减小错误判定的可能性。本文最后通过实际数据的处理验证了该方法在强电离层影响情况下的有效性。

2 基于双频数据的组合检测方法

考虑电离层影响精确到二阶分量, 在精密单点定位中对指定卫星的双频数据的观测方程可简写为

$$\left. \begin{aligned} \Phi_1 &= \frac{\rho}{\lambda_1} - \frac{I}{\lambda_1} + N_1 + \varepsilon_{\Phi_1} \\ \Phi_2 &= \frac{\rho}{\lambda_2} - \frac{f_1^2}{f_2^2} \cdot \frac{I}{\lambda_2} + N_2 + \varepsilon_{\Phi_2} \\ P_1 &= \rho + I + \varepsilon_{P_1} \\ P_2 &= \rho + \frac{f_1^2}{f_2^2} I + \varepsilon_{P_2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中 f_1, f_2 分别为 L_1 与 L_2 频点的载波频率; Φ_1, Φ_2

为两个频点上的载波相位观测量,单位为周; P_1 , P_2 分别为两个频点上的伪距观测量; ρ 为包含了卫星钟差、相对论效应、接收机钟差、地球自转等可模型化误差的伪距; λ_1 , λ_2 分别为两个频点上的载波波长; N_1 , N_2 为两个频点上的相位模糊度; I 为 L_1 频点上的电离层影响, ε 为不可模型化的测量误差。

为了能在动态应用中探测并修复周跳,需要对以上观测方程进行线性组合以消除式(1)中 ρ 的小噪声检测量。本文中选取噪声较小的 Melbourne-Wübbena 组合与电离层残差组合作为检测量进行周跳探测^[8],在探测到周跳之后利用检测量的跳变值计算出周跳大小并进行合理性检验,通过检验之后即可修复周跳。各检测量的表达式如下:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \left[\frac{c}{f_1 - f_2} (\Phi_1 - \Phi_2) - \frac{1}{f_1 + f_2} (f_1 P_1 + f_2 P_2) \right] \cdot \frac{f_1 - f_2}{c} \\ C_2 &= \lambda_1 \Phi_1 - \lambda_2 \Phi_2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

其中 c 为光速, C_1 为 Melbourne-Wübbena 组合, C_2 为电离层残差组合。可以看出: C_1 消除了几何距离与电离层影响,但代价是引入了伪距观测量从而增大了噪声; C_2 消除了几何距离影响,噪声水平低,但是不能消除电离层的影响,因此受到电离层的影响较大。如果不发生周跳, C_1 应是一个常量与伪码/载波组合噪声的叠加;而 C_2 为一常量,是电离层影响与相位观测噪声的叠加。如果发生周跳,则会导致上述观测量中常量的跳变。基此原理,下面展开了详细研究。

3 周跳的实时探测与修复

3.1 周跳的探测

因为周跳的探测是基于式(2)中检测量的跳变,所以本文通过对检测量做差分以突出跳变值,如式(3)所示。

$$\left. \begin{aligned} DC_1(i) &= C_1(i+1) - C_1(i) \\ DC_2(i) &= C_2(i+1) - C_2(i) \end{aligned} \right\} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

在电离层影响强烈的情况下,由于 C_2 检测量中的电离层影响不满足一些随机特性,直接通过计算 DC_2 的方差作为判定阈值会因为数据的不稳定导致误判与漏判。考虑到电离层影响主要集中在低频带,本文采用低通滤波的方法对 DC_2 中电离层影响进行实时估计,对剩余残差再进行阈值判定,以确定是否发生周跳。将 DC_2 通过低通滤波之后的信号记为 $L[DC_2]$, 定义检测量 SC_2 :

$$SC_2 = DC_2 - L[DC_2] \quad (4)$$

对 DC_1 与 SC_2 分别采用递推的方法逐历元计算其均值 $E[DC_1]$, $E[SC_2]$ 与标准差 $\sigma[DC_1]$, $\sigma[SC_2]$, 如式(5)所示:

$$\left. \begin{aligned} E[DC_1]_i &= \frac{i-1}{i} \cdot E[DC_1]_{i-1} + \frac{1}{i} \cdot DC_1(i) \\ \sigma[DC_1]_i &= \sqrt{\frac{i-1}{i} \cdot \sigma^2[DC_1]_{i-1} + \frac{1}{i} (DC_1(i) - E[DC_1]_{i-1})^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 i 代表采样点,即观测历元, $E[SC_2]$ 与 $\sigma[SC_2]$ 的计算与式(5)类似。在递推过程中,为了避免大的周跳本身对方差计算的影响,对于每个到来的历元,先基于当前得到的递推均值与方差进行探测并修复,然后将再代入递推公式进行下一步递推,探测与修复的方法在下文中详细阐述。

将上文中得到的检测量标准差乘以一个系数作为判定阈值,通过系数的调整可对误判概率进行有效的控制^[9]。为了在保持低误判概率的同时提高对小周跳的检测敏感度,本文对大周跳与小周跳进行分开处理并设定 5 倍方差的高阈值为分类界线。在这样的阈值条件下,大周跳的判定可认为不存在误判,而对小周跳则通过合理性检验来降低误判概率。

具体判定规则如下:

(1)如果在第 i 个历元, $|DC_1(i) - E[DC_1]_{i-1}| \geq 5\sigma[DC_1]_{i-1}$ 或者 $|SC_2(i) - E[SC_2]_{i-1}| \geq 5\sigma[SC_2]_{i-1}$, 则认为发生了大周跳。在这种情况下,因为阈值较高,误判概率很低,所以判定必然发生了周跳。但是,大周跳会冲击低通滤波器,从而影响其后一段时间内的周跳判定(如图 1 所示),因为本文中的探测与修复处理都是通过编程实时进行的,所以可利用滤波器的延时对大周跳进行过滤。在发生大跳变的历元,当前的滤波输出仍然没有受到影响,可据此判定大周跳。然后记录此时的原始值,并将该历元的数据置为与前一历元相同的值再进入滤波,修复的时候依据原始值与滤波结果来修复。在后面的实例计算中可以看到,这样的处理可以有效消除大的跳变对滤波器的冲击。

(2)如果在第 i 个历元, $1.5\sigma[DC_1]_{i-1} < DC_1(i) - E[DC_1]_{i-1} < 5\sigma[DC_1]_{i-1}$ 且 $|SC_2(i) - E[SC_2]_{i-1}| < 5\sigma[SC_2]_{i-1}$, 或者, $1.5\sigma[SC_2]_{i-1} < SC_2(i) - E[SC_2]_{i-1} < 5\sigma[SC_2]_{i-1}$ 且 $|DC_1(i) - E[DC_1]_{i-1}| < 5\sigma[DC_1]_{i-1}$, 则认为发生了小周跳。因为阈值的降低,可能存在误判,因此在利用检测量计算出跳变值之后还需要进行合理性检验才能确认修复,以减少误判的可能性。

3.2 周跳的修复与合理性检验

若在第 i 个观测历元通过上文的周跳探测方法探测到发生了周跳, 设 L_1, L_2 频点上发生的周跳大小分别为 $\Delta N_1, \Delta N_2$, 则由式(1)-式(4), 得

$$\left. \begin{aligned} x &= \Delta N_1 - \Delta N_2 = DC_1(i) - E[DC_1]_{i-1} \\ y &= \lambda_1 \cdot \Delta N_1 - \lambda_2 \cdot \Delta N_2 = SC_2(i) - E[SC_2]_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

为简化表达式, 式(6)以及下文中将两个检测量的跳变值分别用 x 与 y 表示。根据周跳值 $\Delta N_1, \Delta N_2$ 的整数特性, 可以先将 x 取为离其值最近的整数, 然后对式(6)求解方程组, 再对结果取相距最近的整数即得到周跳值。若用 $\langle \rangle$ 表示取其最近的整数, 可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta N_1 &= \left\langle \frac{y - \lambda_2 \cdot \langle x \rangle}{\lambda_1 - \lambda_2} \right\rangle \\ \Delta N_2 &= \left\langle \frac{y - \lambda_1 \cdot \langle x \rangle}{\lambda_1 - \lambda_2} \right\rangle \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

若探测到大周跳, 则根据式(7)进行计算得到周跳值之后, 在相应的频点上减去周跳的影响即完成了修复。若探测到小周跳, 因为阈值的降低, 可能发生误判, 需要进行合理性检验, 检验的方法是: 将取整得到的 ΔN_1 与 ΔN_2 代入式(6)中, 计算得到新的 x, y 的值记为 x', y' 。若 $x' = \langle x \rangle$ 且 $|y - y'| < \sigma [SC_2]$, 则认为通过了合理性检验, 在相应的频点上减去周跳值即完成修复; 否则, 认为发生了误判, 并中止修复。通过这样的检验机制, 并结合前文中的滤波方法, 就可以在保证周跳探测敏感度的同时降低误判概率。

4 实例计算与分析

由于动态的双频 P 码数据难以获得, 并考虑到本文中采用的组合检测量已经消除了几何距离的影响, 因此可采用 IGS 提供的 RINEX 格式静态观测数据来验证此方法的正确性。已知 2000 年 9 月 18

日的太阳活动接近峰值, 因而 IGS Pigeon Point 站当天的观测数据受到强烈的电离层影响, 可验证本文算法在强电离层影响下的适用性。

对上述观测数据中第 13 号卫星的一段无周跳观测数据进行处理, 在第 75 历元与 80 历元分别插入 $\Delta N_1=9, \Delta N_2=7$ 与 $\Delta N_1=4, \Delta N_2=3$ 的周跳。其中(9,7)周跳对电离层残差组合的影响很小, 但通过 Melbourne-Wübbena 组合可以有效探测, 而(4,3)周跳是一组典型的难以探测的小周跳, 因为其对 Melbourne-Wübbena 组合与电离层残差组合的影响都较小, 很容易淹没在噪声或电离层的影响之中, 所以对这两组周跳的探测与修复可以较好地对本算法进行验证。

首先计算 DC_2 检测量, 并对其进行滤波处理。根据电离层影响的频谱分布与观测数据的采样频率, 本文采用数字域截止频率为 0.11π 的 butterworth 二阶低通数字滤波器。因为本组数据的采样间隔是 30 s, 而在实际的实时应用中采样间隔一般为 1 s, 电离层影响在 1 s 内的变化很小, 因而二阶滤波器造成的 2 s 延时相对于 30 s 采样间隔的数据来说可以忽略, 为了更加符合真实情况, 将滤波输出前移了两个采样点, 结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出, 低通滤波的方法可以有效拟合电离层变化, 将影响方差阈值判定的缓变量滤出从而去除, 增加判定的准确度。将图 2 中的两量相减得到 SC_2 并结合 DC_1 检测量, 得到如图 3 所示的检测量波形。

根据计算所得的 DC_1 与 SC_2 检测量采用本文提出的周跳探测方法, 从第 15 个历元开始递推方差计算趋于稳定, 会得到在数据的第 31, 80, 120 历元发生了小周跳, 在第 75 历元发生了大周跳。对上述历元数据进行计算并对小周跳进行合理性检验, 最后得到表 1 中的结果。

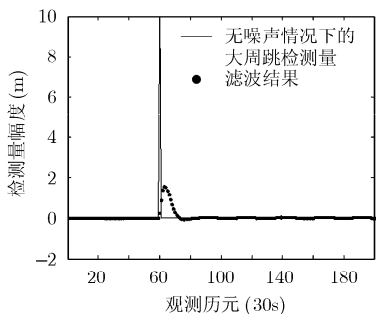


图 1 大周跳对滤波器产生冲击的示意图

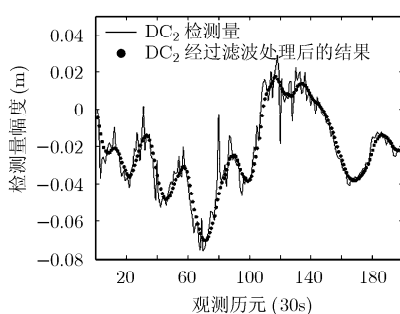


图 2 DC_2 检测量与低通滤波的结果

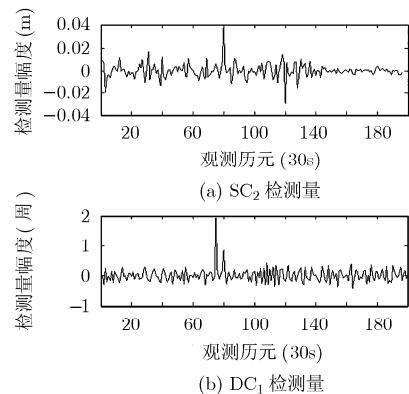


图 3 SC_2 检测量与 DC_1 检测量

表 1 探测到的各历元数据计算结果

历元	x	y	ΔN_1	ΔN_2	x'	y'	是否通过检验
31	-0.1632	0.0163	0	0	—	—	—
75	1.9440	0.0059	9	7	—	—	—
80	0.8623	0.0392	4	3	1	0.0285	是
120	-0.1784	-0.0299	1	1	0	-0.0539	否

表 1 中, 第 31 历元虽然被探测出周跳, 但经过求解取整后计算出的周跳为 0, 因而被排除。第 120 历元的误判周跳因为该点的 $|y - y'| = 0.024$ 大于其递推标准差 0.0062, 因此也被排除。第 75 历元与 80 历元的真正周跳被正确探测并准确计算出其周跳值, 同时说明了本文提出的方法可成功消除大跳变对于滤波器的冲击, 从而可对相距较近的周跳进行探测与修复。

5 结论

本文根据 GPS 实时应用的特点, 提出了一种应用于精密单点定位的周跳实时探测与修复的方法, 给出了基于实际数据的仿真结果。结果表明, 该方法可以有效地运用于实时精密单点定位, 并且在强电离层影响的情况下仍然可以保持较高的准确度。由于在检测量中消除了几何距离的影响, 该方法可运用于动态用户。但是, 因为组合检测量受到伪距观测噪声的影响, 因此随着观测噪声的增大(如高动态应用), 其对双检测量影响都较微弱的周跳组合, 探测能力会有所下降, 对此类应用还需展开更进一步的研究。

参考文献

- [1] Pratap Misra and Per Enge. Global Positioning System—Signals, Measurements, and Performance[M]. Second Edition, Ganga-Jamuna Press, 2006: 233-251.
- [2] 白伟桦, 孙越强, 朱光武等. 星载双频 GPS 载波相位周跳的实时探测与修复[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(5): 593-599. Bai Wei-hua, Sun Yue-qiang, and Zhu Guang-wu, *et al.* Real-time method for detecting and repairing satellite-borne dual-frequency GPS cycle slips[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 2008, 23(5): 593-599.
- [3] Li Gun, Hu Yong-hui, and Zhou Wei. A new algorithm of detecting and correction cycle slips in dual-frequency GPS[C]. International Frequency Control Symposium and Exposition, Miami, Florida, 2006: 622-627.
- [4] Yi Ting-hua, Li Hong-nan, and Wang Guo-xing. Cycle slip detection and correction of GPS carrier phase based on wavelet transform and neural network[C]. Proceedings of the Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, Jinan, 2006: 46-50.
- [5] 常青, 张伯川, 陈向东等. 高动态 GPS 模拟器信号强度问题研究[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(4): 998-1001. Chang Qing, Zhang Bo-chuan, and Chen Xiang-dong, *et al.* Study on the signal intensity of high dynamic GPS signal simulator[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2007, 29(4): 998-1001.
- [6] 彭秀英. GPS 周跳探测与修复的算法研究与实现[D]. [硕士论文], 中国石油大学, 2007. Peng Xiu-ying. Algorithm research and realization of GPS cycle-slip detection and repair[D]. [MA. dissertation], China University of Petroleum, 2007.
- [7] 李凯锋, 韩建国, 欧阳永忠等. 精密单点定位中双频 GPS 数据的周跳探测与修复[J]. 海洋测绘, 2008, 28(3): 27-30. Li Kai-feng, Han Jian-guo, and Ouyang Yong-zhong, *et al.* Detection and reparation for cycle slips with dual frequency GPS data in precise point positioning[J]. *Hydrographic Surveying and Charting*, 2008, 28(3): 27-30.
- [8] 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): 34-36. Song Wei-wei, Yao Yi-bing, and Luo Feng. Method for cycle-slip detection and reparation in precise point position[J]. *Journal of Geomatics*, 2007, 32(3): 34-36.
- [9] 叶世榕. GPS 非差相位精密单点定位理论与实现[D]. [博士论文], 武汉大学, 2002: 74. Ye Shi-rong. Theory and its realization of GPS precise point positioning using un-differenced phase observation[D]. [Ph. D. dissertation], Wuhan University, 2002: 74.

陆晨曦: 男, 1986 年生, 博士生, 研究方向为卫星导航与信号处理。
谭云华: 男, 1973 年生, 讲师, 博士, 研究方向为卫星导航。
朱柏承: 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信与卫星导航。