

载波相位平滑伪距及其在差分定位中的应用

常志巧, 郝金明, 李军正

(解放军信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052)

摘要: 推导了单频和双频载波相位平滑伪距的 Hatch 滤波公式, 利用两组实测数据进行了载波相位平滑伪距, 然后将平滑后的不同观测类型的伪距用于实时差分定位。定位结果表明, C/A 码 Hatch 滤波的差分定位精度高于 P 码; 无电离层组合的 Hatch 滤波差分定位精度低于 C/A 码。

关键词: 全球定位系统; 相位平滑伪距; Hatch 滤波; DGPS; P 码; C/A 码

中图分类号: P228.1 **文献标识码:** B **文章编号:** 1671-3044(2009)03-0021-03

1 引言

相位平滑伪距的研究始于 20 世纪 80 年代, 它可以有效提高测码伪距的精度和测相伪距的准确度^[1]。由于相位平滑伪距具有原理简单, 可以有效抑制多路径和噪声的影响, 不存在模糊度, 易于实现的特点, 应用越来越广泛, 包括事后处理和实时处理, 静态定位和动态定位, 单点定位和差分定位。提出最早应用最广的相位平滑伪距方法是 Hatch 滤波方法^[2], 文献[3]在 Hatch 滤波的基础上考虑不同伪距观测值对相位平滑伪距的影响不同, 提出了加权 Hatch 滤波。文献[4]对加权 Hatch 滤波和等权 Hatch 滤波作了比较, 并推荐使用加权 Hatch 滤波。但文献[5]指出加权 Hatch 滤波需要可靠的观测值方差, 否则平滑效果不理想。文献[1]提出了一种全局最优滤波, 这种方法与原始观测数据包含的信息相同, 没有精度损失, 但必须给出相位和码之间的合理权比, 给实现带来一定困难。

一般而言, 相位的观测精度比较稳定, 而伪距的精度随接收机和观测环境的不同差异很大。因此本文直接采用等权 Hatch 滤波公式, 从一个新的视角出发, 讨论影响载波相位平滑伪距差分定位精度的因素——采用哪一种相位平滑伪距观测量(C/A 码, P1, P2 码或无电离层组合)进行差分定位, 通过实际计算得出对于非特许用户 C/A 码 Hatch 滤波的差分定位精度高于 P 码; 无电离层组合的 Hatch 滤波差分定位精度也低于 C/A 码。

2 载波相位平滑伪距的基本原理

2.1 单频载波相位平滑伪距

GPS 载波相位和伪距观测方程可表示为:

$$P = R + I + e_p \quad (1)$$

$$L = \lambda\varphi = R - I + \lambda N + e_\varphi \quad (2)$$

式中, R 为卫星与接收机天线之间的几何距离 ρ 加与频率无关的偏差项; I 为测码伪距的电离层延迟 (而测相伪距的电离层延迟为 $-I$); N 为整周模糊度; e_p 和 e_φ 分别为测码伪距和测相伪距的测量噪声。多路径效应和仪器偏差的存在会造成观测精度的损失, 它们是与频率有关的, 因此将它们与观测噪声耦合在一起进行处理。

在保持对 GPS 卫星连续跟踪且没有周跳发生的情况下, 在相邻两个历元 t_{k-1} 、 t_k 之间对相位观测值求差, 可以消除整周模糊度的影响。

$$\Delta L_{t_k, t_{k-1}} = \Delta R_{t_k, t_{k-1}} - \Delta I_{t_k, t_{k-1}} + \Delta e_\varphi(t_{k-1}, t_k) \quad (3)$$

在相邻两个历元 t_{k-1} 、 t_k 之间对测码伪距观测值求差, 可得到:

$$\Delta P_{t_k, t_{k-1}} = \Delta R_{t_k, t_{k-1}} + \Delta I_{t_k, t_{k-1}} + \Delta e_p(t_{k-1}, t_k) \quad (4)$$

忽略噪声的影响, 将式(3)代入式(4)可得相位平滑伪距的公式为:

$$\bar{P}(t_k) = P(t_{k-1}) + \Delta L_{t_k, t_{k-1}} + 2\Delta I_{t_k, t_{k-1}} \quad (5)$$

式中, $\Delta I_{t_k, t_{k-1}}$ 为相邻历元的伪距电离层延迟之差, 在只有单频观测量的情况下, $\Delta I_{t_k, t_{k-1}}$ 不易计算, 因此在单频相位平滑伪距中, 认为 $\Delta I_{t_k, t_{k-1}}$ 为 0, 即认为前后两个历元的电离层延迟相同。

在处理多个历元时, 可采用 Hatch 滤波公式:

$$\begin{cases} \bar{P}(n) = \frac{P(n)}{n} + \frac{n-1}{n}(\bar{P}(n-1) + \Delta L_{n,n-1}) \\ \bar{P}(1) = P(1) \end{cases} \quad (6)$$

式(6)为多历元单频相位平滑伪距的公式,由于忽略了第 n 个历元的电离层折射误差相对于前 n 个历元平均值的差异^[6],式(6)是一种发散的滤波,特别是在电离层变化剧烈时,误差较大。

2.2 双频载波相位平滑伪距

双频载波相位可以克服由于电离层延迟造成的滤波发散问题,在没有周跳的情况下式(5)中的 $\Delta I_{t_k, t_{k-1}}$ 可以利用双频相位观测值计算出来:

$$\Delta I_{t_k, t_{k-1}} = -\frac{\Delta(dL_k)}{\gamma - 1} \quad (7)$$

式中, $dL_k = L2_k - L1_k$; $\Delta(dL_k) = dL_k - dL_{k-1}$; $\gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2}$ 。

将式(7)代入式(5)可得:

$$\bar{P}(t_k) = P(t_{k-1}) + \Delta L_{t_k, t_{k-1}} - 2 \frac{\Delta(dL_k)}{\gamma - 1} \quad (8)$$

将式(8)代入 Hatch 滤波公式(6)可得非发散的 Hatch 滤波公式:

$$\begin{cases} \bar{P}(n) = \frac{P(n)}{n} + \frac{n-1}{n}(\bar{P}(n-1) + \Delta L_{n,n-1} - 2 \frac{\Delta(dL_n)}{\gamma - 1}) \\ \bar{P}(1) = P(1) \end{cases} \quad (9)$$

除了利用式(9)进行相位平滑伪距以外,还可以利用双频无电离层组合相位观测 φ_{LC} 平滑伪距 P_{LC} ,采用 Hatch 滤波方法,无电离层组合的相位平滑伪距逐历元递推公式为:

$$\begin{cases} \bar{P}_{LC}(n) = \frac{P_{LC}(n)}{n} + \frac{n-1}{n}(\bar{P}_{LC}(n-1) + \Delta L_{LCn,n-1}) \\ \bar{P}_{LC}(1) = P_{LC}(1) \\ P_{LC}(1) = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2}(f_1^2 P_1(1) - f_2^2 P_2(1)) \end{cases} \quad (10)$$

3 相位平滑伪距差分定位结果分析

实验数据一:采用 GPS 检定场的微边网中 RW (人卫站)和 G5 (5 号基柱)数据,基线长为 8.486 6m,采样率为 15s,接收机类型为 Legacy-E GD,天线类型为 REGANT_SD_E,观测数据类型有:L1、L2、C1、P1、P2、D1、D2。将 RW 站作为基准站,G5 站作为流动站进行伪距差分定位,采用的观测量是伪距双差观测量,观测量经过双差后认为消除了与空间相关的系统误差,双差观测量中只含随机误差,基线向量的真值预先通过其他软件静态相对定位获得,可以作为计算差分定位误差的基准。

实验数据二:采用天津地区的某个网络 RTK 的基准站数据 KC 站和 TJ 站,基线长度为 26.476km,采样间隔为 1s,接收机类型为 TRIMBLE 5700,天线类型为 TRM29659.00,观测数据类型有:C1、P2、L1、L2、S1、S2、D1、D2。将 KC 站作为基准站,TJ 站作为流动站进行伪距差分定位,伪距差分定位的方法以及定位误差的计算与实验一相同。

3.1 单频相位平滑伪距差分定位结果分析

(1) 实验一的单频差分定位结果

图 2 中采用的观测量是利用公式(6)所获得的相位平滑伪距(时间窗口为 268 个历元,即 67min),为了更直观的评价定位误差的大小,将图 1 和图 2 中的差分定位误差的平均值用表 1 表示出来。

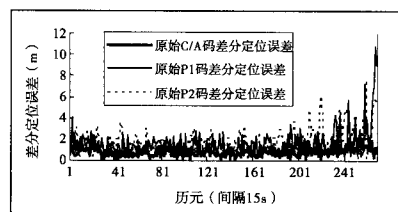


图 1 原始伪距的差分定位结果(RW-G5)

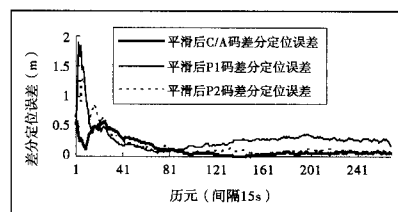


图 2 平滑伪距的差分定位结果(RW-G5)

表 1 单频相位平滑前后伪距差分定位结果比较(RW-G5) 单位:m

观测类型	C1 码	P1 码	P2 码
平滑前	0.827 836	1.585 703	1.578 37
平滑后	0.130 054	0.294 103	0.174 075

从图形和统计结果可以看出在原始伪距的差分定位结果中 C/A 码定位精度高于 P1 码和 P2 码;在经过单频相位平滑后的伪距差分定位结果中,C/A 码定位精度高于 P1 码和 P2 码;利用相位平滑后的伪距差分定位较利用原始伪距差分定位的精度高。

(2) 实验二的单频差分定位结果

这里所采用的相位平滑伪距观测量是利用公式(7)所获得的相位平滑伪距(时间窗口为 2700 个历元,即 45min)。从表 2 可以看出在原始伪距的差分定位结果中 C/A 码定位精度高于 P2 码;在经过单频相位平滑后的伪距差分定位结果中,C/A 码定位精度高于 P2 码;利用相位平滑后的伪距差分定位较

利用原始伪距差分定位的精度高。

表2 单频相位平滑前后伪距差分定位
结果比较(RW-G5)

观测类型	C1 码	P2 码
平滑前	0.759 151	1.082 819
平滑后	0.202 765	0.293 93

3.2 双频相位平滑伪距定位结果分析

(1) 实验一的双频差分定位结果

图3中C/A码、P1、P2、P3码(P3码是由P1码和P2码形成的无电离层组合)定位误差的平均值分别为:0.15243、0.309421、0.179608、0.795497m,从图形和统计结果可以看出在经过双频相位平滑后的伪距的差分定位结果中,C/A码精度高于P1码、P2和P3码。

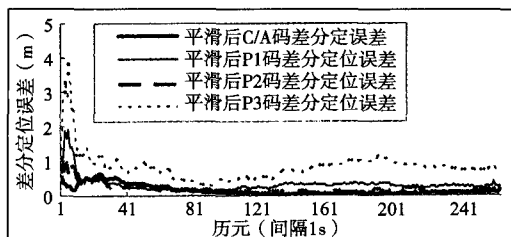


图3 双频相位平滑伪距差分定位结果(RW-G5)

(2) 实验二的双频差分定位结果

这里C/A码、P2、P3码(P3码是由C/A码和P2码形成的无电离层组合)的定位误差的平均值分别为:0.195912、0.277941、0.333982m。可得在经过双频相位平滑后的伪距的差分定位结果中,C/A码精度高于P2和P3码。

4 结束语

影响载波相位平滑伪距精度的因素除了与采用的滤波方法相关以外,采用的观测量本身的精度也是一个重要的因素。因GPS受美国军方的控制,只有

特许用户才可以获得真正独立的P1、P2伪距,一般用户只能获得C/A码伪距,而接收机上标称的P码伪距是通过Z跟踪技术获得的,精度并不像真正的P码那么高^[7]。本文通过C/A码和P码相位平滑伪距差分定位的比较,得出:C/A码的相位平滑伪距差分定位精度高于P码相位平滑伪距差分定位精度;C/A码的相位平滑伪距差分定位精度高于无电离层组合相位平滑伪距的差分定位精度。

参考文献:

- [1] 郭建锋,欧吉坤,袁运斌,等. 双频GPS数据的最优相位平滑伪距算法研究[J]. 自然科学进展,2008,(2): 221~224.
- [2] Hatch R R. The synergism of GPS code and carrier measurements [A]. Proceedings of the Third International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning[C]. New Mexico. [s. n.], 1982. 1213~1232.
- [3] Hwang P Y C, Mcgraw G A, Bader J R. Enhanced differential GPS carrier smoothed code processing using dual frequency measurements[J]. Navigation: Journal of The Institute of Navigation, 1999, 46(2): 127~137.
- [4] Kee C, Walter T, Enge P, et al. Quality control algorithms on WAAS Wide-Area Reference Stations [J]. Navigation: Journal of The Institute of Navigation, 1997, 44(1): 53~62.
- [5] 何海波,郭海荣,李保利. 广域差分参考站两种伪距平滑算法的再评估[J]. 测绘学院学报, 2005, (9): 157~159.
- [6] 范士杰,孔祥元. 基于Hatch滤波的GPS伪距相位平滑及其在单点定位中的应用[J]. 勘察科学技术, 2007, (4): 40~42.
- [7] 范士杰,郭际明,彭秀英,等. GPS双频接收机C/A码与P码伪距精度的分析和比较[J]. 测绘科学, 2005, (8): 100~102.

Carrier Phase Smoothed Pseudorange and Its Application in DGPS

CHANG Zhi-qiao, HAO Jin-ming, LI Jun-zheng

(Institute of Surveying and Mapping, University of Information Engineering, Zhengzhou, Henan, 450052)

Abstract: The formulae of single-frequency and dual-frequency carrier phase smoothed pseudorange Hatch filter are induced firstly. Then two groups real data are processed with the formulae. At last, DGPS is carried through using the different kinds of carrier phase smoothed pseudorange. The positioning results show that the positioning precision of smoothed C/A code is higher than smoothed P-code, and the positioning precision of smoothed C/A code is also higher than smoothed free-ionosphere combination.

Key words: GPS; carrier phase smoothed pseudorange; hatch filter; DGPS; P-code; C/A-code