

# 精密单点定位中伪距观测值的选择

江 卉, 杨 振

(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

**摘要:** 本文研究了提高伪距观测值精度的三种方法, 即: 相位平滑伪距、Hatch 滤波和卡尔曼滤波, 并探讨了它们的异同, 且将双频相位平滑伪距观测值、Hatch 平滑值、卡尔曼滤波值与原始观测值进行了比较。在此基础上, 利用编写的程序, 分别用三种方法平滑后的伪距观测值进行单点定位计算, 并与 IGS 跟踪站的已知坐标进行对比。用图像表示出双频相位平滑伪距观测值、Hatch 平滑值、卡尔曼滤波值在 N、E、H 方向的真误差随历元的变化趋势, 得出结论: Hatch 滤波法最稳定, 精度最高, 但其会受周跳的影响。由此, 在伪距平滑数据处理中, 应首选 Hatch 滤波。

**关键词:** 大地测量学与测量工程; 精密单点定位; 相位平滑伪距; Hatch 滤波; 卡尔曼滤波

**中图分类号:** P228      **文献标识码:** B      **文章编号:** 1674-2850(2008)00-0665-6

## Selection of pseudo-range on GPS precise point positioning

JIANG Hui, YANG Zhen

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098)

**Abstract:** Three methods of improving the precision of pseudo-range and their contrasts are discussed firstly. The dual frequency phase-smoothed pseudo-range observations, Hatch smoothed value and Kalman filter value are compared with raw observations. Based on this, the software of GPS point positioning is compiled by the author, and the accuracy of GPS dual frequency phase-smoothed pseudo-range and its point positioning is researched. The results calculated are compared with the known value of IGS station. The error changes in N, E, H direction of dual frequency phase-smoothed pseudorange observations, Hatch smoothed value and Kalman filter value are showed by chart. Conclusions are given in the end; Hatch filter is the most stable accurate method, but is influenced by cycle slip. Therefore Hatch smoothed value is preferred.

**Key words:** geodesy and surveying; precise point positioning; carrier-smoothed code; Hatch-type filter; Kalman filter

## 0 引言

从发射第一颗全球定位系统 (global position system, GPS) 试验卫星以来, GPS 技术得到了全面的发展。随着 GPS 技术的不断成熟, IGS 产品的不断完善, GPS 已经不再局限于简单的定位和导航。近年发展起来的 GPS 精密单点定位技术, 就是用一台 GPS 双频接收机, 读取 IGS 事后的精密星历和精密钟差文件, 利用相位、伪距观测值和数学模型, 达到厘米甚至毫米级的定位精度。但在计算过程中, 相位观测值有周跳和整周模糊度问题, 并且当整周模糊度与其它参数一起通过平差求解时, 如果出现周跳, 还需要引进新的模糊度参数。这样, 过多的参数不仅增加了计算的负担, 而且会影响解的稳定性<sup>[1]</sup>。因此, 利用高精度的伪距观测值进行定位是非常必要的。

目前, 提高伪距观测值精度的方法主要有: 载波相位平滑伪距、卡尔曼滤波法降噪等。在 GPS 精密单点定位中, 一般都是用无电离层组合值来消除电离层的影响, 但组合值增加了观测值的噪声。本文将用以上方法对组合观测值进行降噪处理, 以提高伪距观测值的精度, 并利用自己编写的 GPS 单点定位程序对其进行精度对比评定。

**作者简介:** 江卉 (1982—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: GPS 数据处理, E-mail: jianghui20080808@hhu.edu.cn

## 1 双频相位平滑伪距观测值

在 GPS 定位中, 利用伪距观测值只能得到 ±10 m 的定位精度。载波相位测量的精度比伪距观测值的测量精度高两个数量级, 虽然载波相位的初始整周模糊度较难得到, 但可以利用载波相位两历元间的差值来平滑伪距, 提高伪距观测值的精度。

GPS 的伪距和载波相位观测值可分别表示为

$$P_i = \rho + c(\delta t_i - \delta t^j) + \Delta_I + \Delta_T + \epsilon \quad (1)$$

$$L_i = \lambda_i \varphi_i = \rho + c(\delta t_i - \delta t^j) - \lambda_i N_i - \Delta_I + \Delta_T + \epsilon \quad (2)$$

式中,  $P_i$  为伪距观测值;  $L_i$  为载波相位观测值;  $\rho$  为卫星到接收机的几何距离;  $\delta t_i$  和  $\delta t^j$  为接收机和卫星钟差;  $\Delta_I$  和  $\Delta_T$  为电离层和对流层延迟改正;  $\epsilon$  为观测噪声。

无电离层组合观测值为

$$P_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2) = \rho + c(\delta t_i - \delta t^j) + \Delta_T + \epsilon \quad (3)$$

$$L_3 = \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 L_1 - f_2^2 L_2) = \rho + c(\delta t_i - \delta t^j) - \lambda_3 N + \Delta_T + \epsilon \quad (4)$$

相减后可得:  $Amb = \lambda_3 N = P_3 - L_3 \quad (5)$

由上式可知,  $P_3$  和  $L_3$  之间仅相差一个模糊度常数  $Amb$ 。因此, 可以根据前段时间的观测值求解出  $Amb$  值, 即

$$\overline{Amb} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_3 - L_3) \quad (6)$$

在具体计算中, 可以采用两种方法对伪距进行平滑。

1) 利用 Hatch 滤波平滑伪距<sup>[2]</sup>

$$\overline{Amb}_{(i)} = \frac{i-1}{i} \overline{Amb}_{(i-1)} + \frac{1}{i} [P_3(i) - L_3(i)] \quad (7)$$

$$\tilde{P}_3(i) = L_3(i) + \overline{Amb}_{(i)} \quad (8)$$

当  $i=1$  时,  $\overline{Amb}_{(i)} = P_3(i) - L_3(i) \quad (9)$

式中,  $\overline{Amb}_{(i)}$  为前  $i$  个历元的平均模糊度常数;  $\tilde{P}_3(i)$  为平滑后第  $i$  个历元的伪距组合观测值。

2) 利用  $L_3$  相位组合观测值平滑伪距

第  $i$  个历元伪距的预报值为

$$\bar{P}_3(i) = \tilde{P}_3(i-1) + [L_3(i) - L_3(i-1)] \quad (10)$$

第  $i$  个历元平滑后的平滑值为

$$\tilde{P}_3(i) = \omega_i P_3(i) + (1 - \omega_i) \bar{P}_3(i) \quad (11)$$

当  $i=1$  时,  $\tilde{P}_3(i) = P_3(i)$ ,  $\omega_i = 1.0 \quad (12)$

式中,  $\omega_i$  是与历元  $i$  相对应的权重因子, 它随着平滑时间的延续而递减, 其平滑率需按经验调整。例如, 每个历元减少 0.01, 当  $i > 100$  时, 固定  $\omega_i$  为 0.01 不变。

上面两种平滑方法在理论上是一致的, 当历元数较多时, 其实质就是利用载波相位相邻历元之间的差值来代替伪距值的变化。两种平滑方法的不同之处在于, Hatch 滤波在平滑时用到了前面所有的历元信息, 而  $L_3$  组合观测值平滑伪距方法, 是在一个历元内对预报值和伪距观测值取加权平均值。当历元较少时, 由于预报值的权较小,  $L_3$  组合观测值平滑伪距方法并不能有效地提高伪距观测值的精

度。

用以上两种方法分别对 IGS 中 BJFS 站 2006 年 1 月 1 日的观测数据进行处理。两种方法对某一卫星平滑后的伪距组合值与未平滑的伪距组合值差值的观测分别如图 1、图 2 所示。

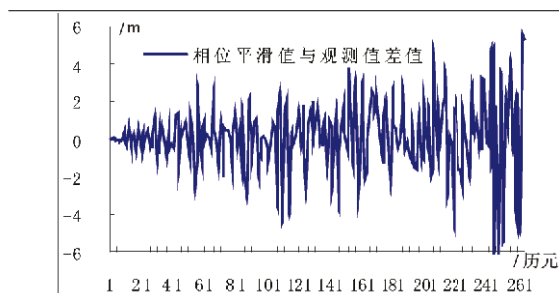


图 1 相位平滑值与原始观测值差值时序图  
Fig.1 Difference timing sequence diagram of carrier-smoothed code value and raw observations

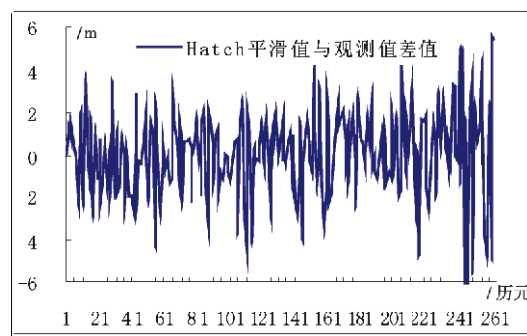


图 2 Hatch 平滑值与原始观测值差值时序图  
Fig.2 Difference timing sequence diagram of Hatch smoothed value and raw observations

从上组图可以看出：1) 如图 1 所示，最初的历元差值较小；2) 从历元 61 开始，两个图的差值图基本上一样，即两种方法的平滑效果在历元较多时基本相同。

## 2 卡尔曼滤波法降噪

对于组合值  $P_3$ ，可以利用式 (5)， $L=P_3-L_3$ ， $X=Amb$  构造如下的标量系统<sup>[3]</sup>

$$\begin{cases} X_{k+1} = X_k + \Omega_k \\ L_{k+1} = X_{k+1} + \Delta_{k+1} \end{cases} \quad (13)$$

式中， $\Omega_k$  和  $\Delta_{k+1}$  为零均值的白噪声序列，且相互独立，与  $X_0$  也不相关。取前 5 个历元的数据进行动态平差，并令  $X_k=Amb_{(k)}$ ， $L_{(k)}=P_{3(k)}-L_{3(k)}$ 。当已知  $D_\Omega$ 、 $D_\Delta$ 、 $D_{x(0)}$  和  $E(X_0)$  时，卡尔曼滤波方程的解为

$$\begin{cases} \tilde{X}(k/k) = \tilde{X}[(k-1)/(k-1)] + J_k[L_k - \tilde{X}(k-1)/(k-1)] \\ D_X(k/k) = (1 - J_k)D_X[k/(k-1)] \\ J_k = D_X[k/(k-1)]\{D_X[k/(k-1)] + D_\Delta(k)\}^{-1} \\ D_X[k/(k-1)] = D_X[(k-1)/(k-1)] + D_\Omega(k) \end{cases} \quad (14)$$

卡尔曼滤波法是根据观测数据的先验信息，以及状态方程和观测方程来估计除去噪声后观测值的真值。因此，先验信息是卡尔曼滤波法的关键。卡尔曼滤波法除噪后数据与原观测值差值的时序图如图 3 所示。

## 3 三种模型的单点定位计算及其精度分析

本文编制了基于双频伪距和双频相位平滑伪距的单点定位软件，其数据处理方案如下：采用 JPL 提供的间隔为 30 s 的 SP3 事后精密星历和精密卫星钟差，利用 10 阶切米雪夫多项式内插每 3 h 的观测数据，计算出信号发射时刻的卫星三维坐标和精密卫星钟差；观测值采用无电离层组合观测值及其三种平滑观测值；对流层延迟采

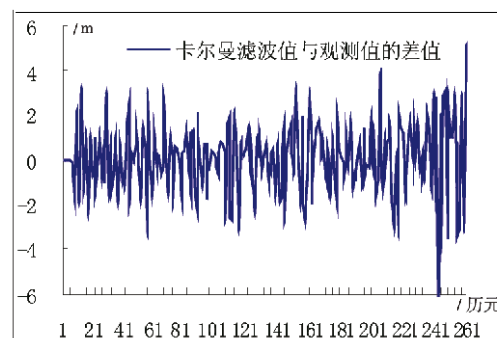


图 3 卡尔曼滤波值与原始观测值差值的时序图  
Fig.3 Difference timing sequence diagram of Kalman filter value and raw observations

用 Neil 模型进行改正；同时考虑其它误差，如地球自转影响、相对论效应。采用最小二乘法逐历元计算接收机坐标和钟差<sup>[4]</sup>。

为了便于研究，把 IGS 跟踪站 ITRF 坐标作为已知值，将原始观测值和三种平滑观测值单点定位结果与已知值进行比较，并把比较结果由 ITRF 参考框架转化到跟踪站的站心坐标系 (N, E, H) 中，更加直观地反映定位结果的平面和高程精度。其中，N 为北向，E 为东向，H 为测站法线方向。

图 4~图 6 为观测值在 N、E、H 方向的真误差随历元的变化。而图中的 (a)、(b)、(c)、(d) 分别代表未平滑观测值、相位平滑观测值、Hatch 滤波观测值、卡尔曼滤波观测值。

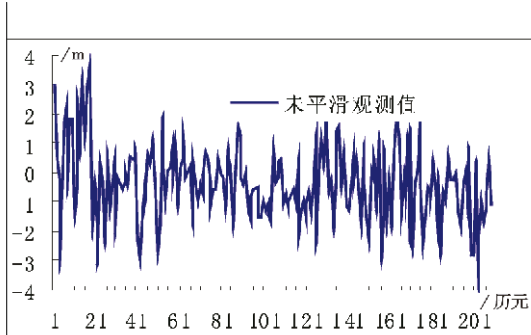


图 4 (a) 未平滑观测值 N 方向误差变化图  
Fig. 4 (a) N direction error change chart of no smoothed value

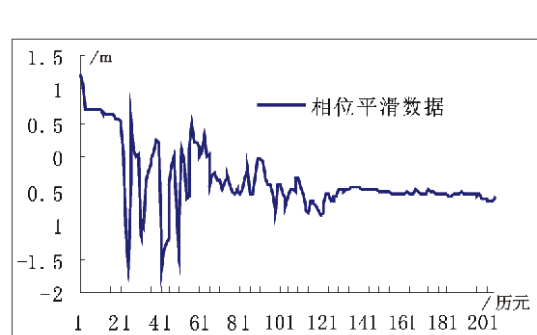


图 4 (b) 相位平滑观测值 N 方向误差变化图  
Fig. 4 (b) N direction error change chart of carrier-smoothed code value

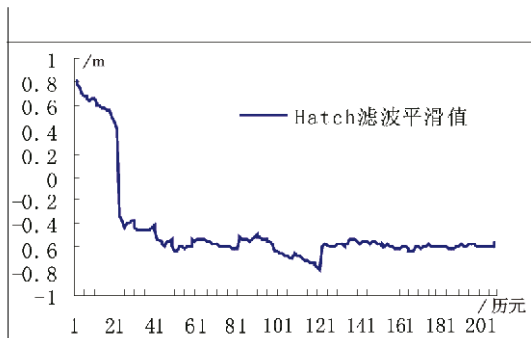


图 4 (c) Hatch 滤波平滑值 N 方向误差变化图  
Fig. 4 (c) N direction error change chart of Hatch filter smoothed value

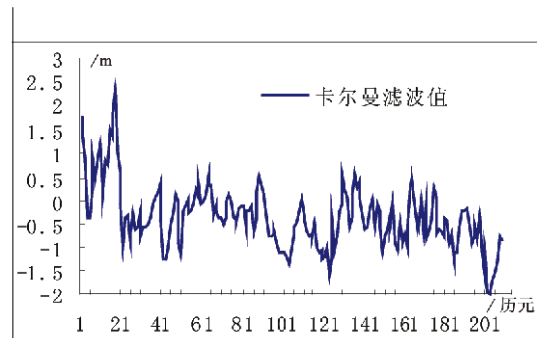


图 4 (d) 卡尔曼滤波值 N 方向误差变化图  
Fig. 4 (d) N direction error change chart of Kalman filter value

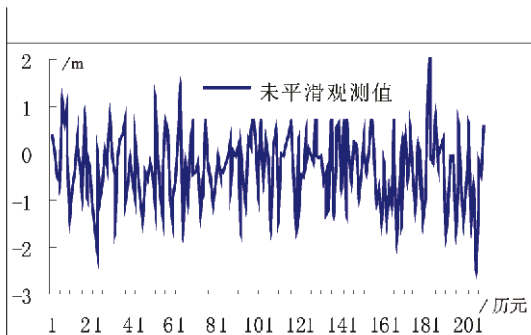


图 5 (a) 未平滑观测值 E 方向误差变化图  
Fig. 5 (a) E direction error change chart of no smoothed value

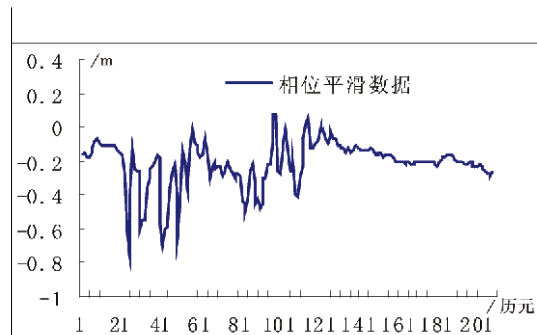


图 5 (b) 相位平滑观测值 E 方向误差变化图  
Fig. 5 (b) E direction error change chart of carrier-smoothed code value

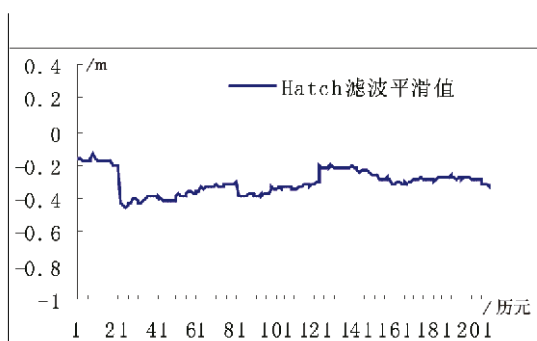


图 5 (c) Hatch 滤波平滑值 E 方向误差变化图  
Fig. 5 (c) E direction error change chart of Hatch filter smoothed value

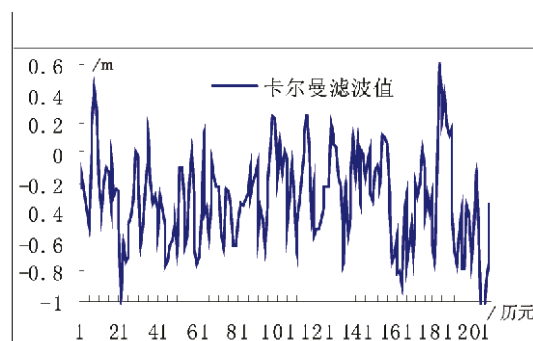


图 5 (d) 卡尔曼滤波值 E 方向误差变化图  
Fig. 5 (d) E direction error change chart of Kalman filter value

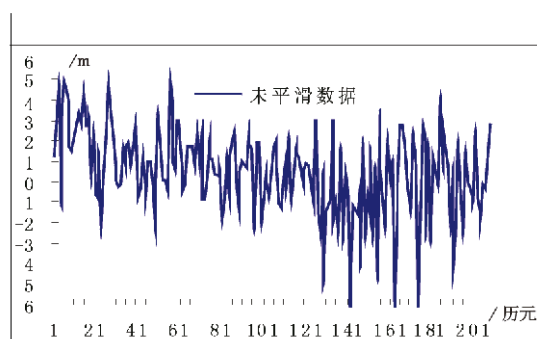


图 6 (a) 未平滑观测值 H 方向误差变化图  
Fig. 6 (a) H direction error change chart of no smoothed value

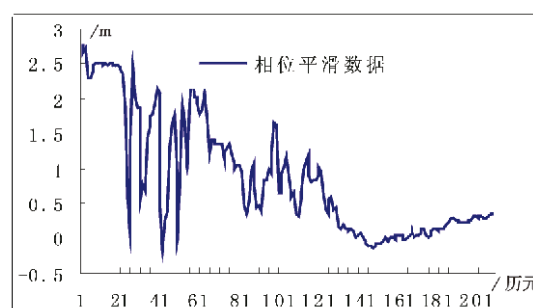


图 6 (b) 相位平滑观测值 H 方向误差变化图  
Fig. 6 (b) H direction error change chart of carrier smoothed code value

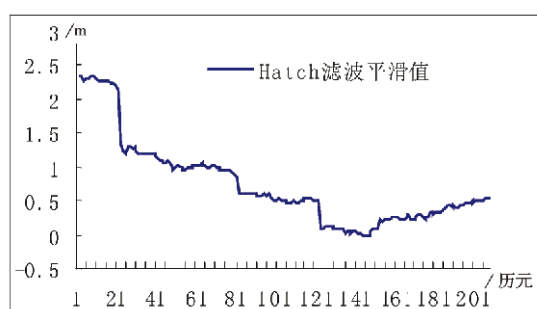


图 6 (c) Hatch 滤波平滑值 H 方向误差变化图  
Fig. 6 (c) H direction error change chart of Hatch filter smoothed value

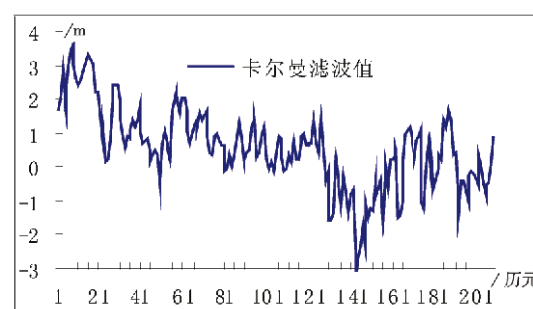


图 6 (d) 卡尔曼滤波值 H 方向误差变化图  
Fig. 6 (d) H direction error change chart of Kalman filter value

分析图 4~图 6 可知，平滑后的伪距观测值的单点定位单历元解的精度在 N、E、H 方向明显得到提高。N 方向的真误差大部分在 1 m 以内；E 方向的真误差大部分在 0.6 m 以内；H 方向的真误差大部分在 2 m 以内。把图分为四组分析可知：相位平滑伪距单点定位结果在最初的一段历元会发生一些抖动，随历元的增加，观测值趋于平稳；Hatch 滤波处理后的数据单点定位结果比较平稳，图中出现的一些细微抖动，可能是相位观测值中出现了小的周跳；卡尔曼滤波法是对观测值进行去噪处理，卡尔曼滤波处理后的数据精度比原始观测值有一定的提高，但仍有较大的抖动且精度比其它两种方法低。这可能是因为卡尔曼滤波模型不够完善，先验信息不够准确。

## 4 结论

综合本文对比分析的试验结果,得出以下结论:

1) 采用精密星历和卫星钟差,并对对流层延迟、地球自转影响、相对论效应进行模型改正,利用平滑后的组合伪距观测值进行单点定位计算,其单历元解在 N 方向的真误差大部分在 1 m 以内; E 方向的真误差大部分在 0.6 m 以内; H 方向的真误差大部分在 2 m 以内。

2) 三种平滑方法中, Hatch 滤波法最稳定,精度最高,但其受到周跳的影响;相位平滑在最初的历元精度不高,但经过一段时间后,其精度与 Hatch 滤波法相当;卡尔曼滤波是根据噪声的信息来对观测值进行去噪处理的,它的精度受模型和先验信息的影响比较大。由此,在伪距平滑数据处理中,应以 Hatch 滤波为首选。

### [参考文献] (References)

- [1] 李征航,赵晓峰,蔡昌盛. 全球定位系统(GPS)技术的最新进展(第五讲):利用双频GPS观测值建立电离层延迟模型[J]. 测绘信息与工程,2003,28(1):41~44.  
LI Z H, ZHAO X F, CAI C S. The latest progress in GPS technology (part five): establishing the ionospheric delay models with GPS dual frequency measurements[J]. Journal of Geomatics, 2003, 28(1): 41~44. (in Chinese)
- [2] 范士杰,郭际明,彭秀英. GPS双频相位平滑伪距及其单点定位的精度研究[J]. 测绘工程,2005,14(4):39~42.  
FAN S J, GUO J M, PENG X Y. Accuracy research on GPS dual frequency phase-smoothed pseudorange and its point positioning[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(4): 39~42. (in Chinese)
- [3] 朱文耀,章红平,黄城,等. 利用GPS监测电离层不均匀结构探讨[J]. 地球物理学报,2004,47(6):941~948.  
ZHU W Y, ZHANG H P, HUANG C, et al. Monitoring of small-scale ionospheric heterogeneities using local GPS network[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(6): 941~948. (in Chinese)
- [4] 刘根友,朱才连,任超. GPS相位与伪距联合实时定位算法[J]. 测绘通报,2001(10):10~11.  
LIU G Y, ZHU C L, REN C. Real-time positioning algorithm with GPS phase and pseudo-range[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2001(10): 10~11. (in Chinese)