

基于历元间差分技术的精密单点定位研究

李浩军¹, 王解先^{1,2}, 胡丛玮^{1,2}, 陈俊平³

(1. 同济大学测量与国土信息工程系, 上海 200092; 2 现代工程测量国家测绘局重点实验室, 上海 200092;
3. 德国地球科学研究中心, 波茨坦 14473)

摘要: 无模糊度模型的精密单点定位, 通过历元间相位差分, 消除初始相位模糊度来求取历元间位置差。本文基于抗差估计, 讨论了历元间伪距、相位差分技术以及参数的估计方法。赋予伪距、相位观测值不同的初始权, 然后采用抗差估计原理进行位置差参数估计。分析了不同采样率对位置差结果的影响, 采用小波分析理论对位置差误差的特性进行了研究。探讨了采用历元间差分获得的位置差进行单点定位时存在的一些问题。

关键词: 历元间差分; 精密单点定位; 抗差估计; 采样率

中图分类号: V417.9 文献标识码: A 文章编号: 1000-1328(2010)03-0748-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.03.020

0 引言

精密单点定位(Precise Point Positioning, 简称 PPP)是利用高精度的 GPS 卫星星历和卫星钟差以及单台接收机的双频载波相位观测值进行定位, 这一概念最初是在 1997 年由 JPL 的 Zumberge 等人^[1]提出并在其开发的数据处理软件 GIPSY 上实现。经过几年的发展, PPP 技术在模型构造和科学应用方面已取得很大进步。精密单点定位模型中, 常用的主要有三种, 即传统模型^[1-2]、Uofc 模型^[3]和无模糊度模型^[4-5]。三种模型中, 无模糊度模型通过对相邻两历元的差分消除初始相位模糊度, 求解相邻历元间的位置差。这样明显地降低了对计算机资源的要求, 也避免了整周模糊度的求解。相位差观测值只能求解位置差, 而不能得到用户的绝对位置解。由相位差观测值确定位置差, 可以由码观测值确定位置, 将逐历元的位置和位置差组合起来, 得到接收机的运动学轨迹^[4-7]。瑞士 AIUB (Astronomical Institute, University of Berne) 的 Bernese 软件和 UNB (The University of New Brunswick) 的 DIPOP 软件也是采用历元间的相位差分模型实现单点定位的。本文基于抗差估计理论, 研究了历元间伪距、相位差分技术以及参数的估计方法。赋予伪距、相位观测值不同的初始权, 采用抗差估计原理来进行位置差参数的估计。

1 历元间差分

GPS 无电离层组合观测方程可以写为

$$L_3^j = \rho^j + c \delta - c \delta + \frac{1}{f_1^2 - f_2^2} (f_1^2 \lambda_1 n_1^j - f_2^2 \lambda_2 n_2^j) + \Delta L_3^j \quad (1)$$

$$P_3^j = F(x) = \rho^j + c \delta - c \delta + \Delta P_3^j \quad (2)$$

式(1)中, L_3^j 代表接收机对第 j 颗 GPS 卫星的无电离层相位观测值; f_1, f_2 分别为相位观测值 L_1, L_2 的频率; λ_1, λ_2 为波长; n_1^j, n_2^j 为对第 j 颗 GPS 卫星 L_1, L_2 观测的整周模糊度, ΔL_3^j 为误差项, 主要包括对流层延迟, 多路径效应, 固体潮等误差; 式(2)中, P_3^j 代表接收机对第 j 颗 GPS 卫星的无电离层伪距观测值; ρ^j 为接收机与 GPS 卫星之间的几何距离; δ, δ 分别为接收机以及 GPS 卫星的钟差, ΔP_3^j 为误差项, 主要包括对流层延迟, 多路径效应, 固体潮等误差。从(1)式中可以看到, 每颗卫星的相位观测都存在整周模糊度参数, 在不发生周跳的情况下, 对历元间的相位观测值差分能消除模糊度参数。对历元 i 以及 $i-1 (i=2, \dots, n, n$ 为历元个数)的 L_3 相位观测值组成历元间差分, 得到

$$\Delta L_i^j = G(x) = \Delta \rho_i^j + c \cdot \Delta \delta - c \cdot \Delta \delta + \Delta L_i^j \quad (3)$$

式中 $c \cdot \Delta \delta, c \cdot \Delta \delta$ 分别为接收机、卫星历元间钟

差之差, ΔL_i^j 为相邻历元间误差之差。对(3)式线性化, 得到

$$(\Delta L_i - G(x_0)) + v_i = B_i \cdot dx_i - B_{i-1} \cdot dx_{i-1} - c \cdot \Delta \delta \quad (4)$$

式中 B_i, B_{i-1} 分别为历元 i 以及历元 $i-1$ 的系数矩阵, dx_i, dx_{i-1} 为参数的改正数, 参数包括位置参数和接收机钟差, $c \cdot \Delta \delta$ 为历元间卫星钟差之差。定义 $d\Delta x_i = dx_i - dx_{i-1}, l_i = \Delta L_i - G(x_0)$, (4)式可以重新写为:

$$B_i \cdot d\Delta x_i - \mathfrak{B}_i \cdot dx_{i-1} - l_i = v_i \quad (5)$$

式中, $\mathfrak{B}_i = B_i - B_{i-1}$, 若忽略此项^[9], 公式(5)可以简化为:

$$B_i \cdot d\Delta x_i - l_i = v_i \quad (6)$$

由(6)式, 得到法方程为:

$$B_i^T \cdot B_i \cdot d\Delta x_i = B_i^T \cdot l_i \quad (7)$$

同理, 进行伪距历元间差分, 得到:

$$B_i'^T \cdot B_i' \cdot d\Delta x_i = B_i'^T \cdot l_i' \quad (8)$$

公式(7)、(8)叠加, 得到:

$$B_i''^T \cdot B_i'' \cdot d\Delta x_i = B_i''^T \cdot l_i'' \quad (9)$$

当相邻历元观测到的公共卫星个数大于 4 颗, 则能够通过该模型进行参数的求解, 参数为历元间位置差以及钟差之差 $d\Delta x_i$ 。

2 基于抗差估计求解位置差

GPS 观测值随机噪声包含观测噪声和多路径噪

$$P_{ii} = \begin{cases} p_{ii} & |V_i| < k_0 \\ p_{ii} \cdot \frac{k_0}{|V_i|} \cdot \frac{(k_1 - |V_i|)^2}{(k_1 - k_0)^2} & k_0 \leq |V_i| < k_1 \\ 0 & k_1 \leq |V_i| \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中 v_i 为观测值相应的残差 σ 为方差因子。

求解各观测值对应的新权, 由式(13)进行参数求解。

$$B_i''^T \cdot \bar{p} \cdot B_i'' \cdot d\Delta x_i = B_i''^T \cdot \bar{p} \cdot l_i \quad (13)$$

3 数据分析

3.1 采样率对位置差结果的影响

本文以不同的采样率的观测值进行了参数解算, 在进行历元间差分计算时, 对周跳进行了探

声, 其他未被模型化的系统噪声, 以及数据预处理中未被探测到的小周跳和残余误差。为减少这些误差对估计结果的影响^[8-9], 本文采用抗差估计的方法进行参数的求解, 抗差估计能在拒绝或者接受一个观测值间起一种平滑作用, 不是断然地拒绝或者接受一个观测值, 这样就保留了一些不是很好但仍然可利用的观测值^[10]。本文在差分技术基础上, 基于抗差估计理论进行历元间的位置差的求解。差分过程中, 伪距和相位都参与了差分计算, 由于 GPS 观测中, 伪距和相位的观测噪声相差两个量级, 如果将两种观测资料等权联合解算参数, 必然降低相位观测值参数解算的精度, 失去了利用高精度的相位观测值估计参数的意义, 为了提高计算结果的可靠性和充分利用伪距观测有利信息, 赋予相位与伪距观测值不同的初始权, 初始权阵为:

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \frac{1}{100} & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{100} \end{pmatrix} \quad (10)$$

则公式(9)可以写为:

$$B_i''^T \cdot P \cdot B_i'' \cdot d\Delta x_i = B_i''^T \cdot P \cdot l_i \quad (11)$$

由式(11)、式(6)计算 v_i , 基于残差 v_i , 采用抗差估计权函数^[10]:

$$\begin{cases} |V_i| < k_0 \\ k_0 \leq |V_i| < k_1, & |V_i| = |v_i / \sigma| \\ k_1 \leq |V_i| \end{cases} \quad (12)$$

测^[11]。由于静态观斥中, 历元间的位置差为零, 所以静态历元间位置差可以看作解算的误差。30 秒采样率的数据为 IGS 上海站 2007 年第 297 天的部分观测数据, 位置差结果如图 1、图 2 所示。

从图 1、图 2 可以看出, 追加粗差的历元(200—400, 800—1000), 抗差估计结果比最小二乘结果精度约能提高 2 cm ~ 3 cm。各估计方法相应的 Rms (均方根)如表 1 所示。

1 秒采样率数据为同济大学 GPS 站 2007 年第

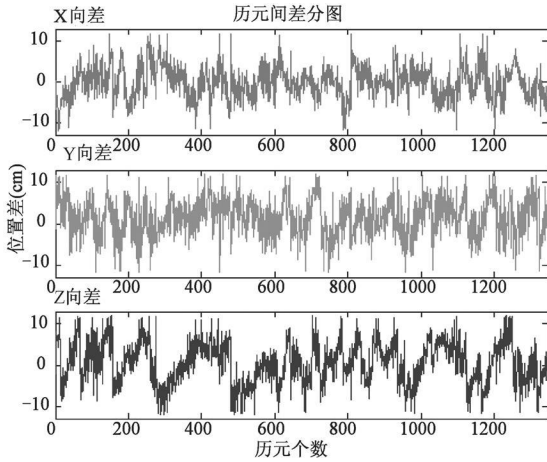


图 1 最小二乘解

Fig. 1 Results of the least square

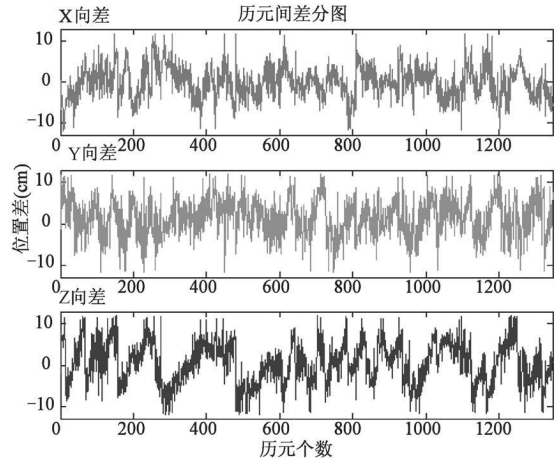


图 2 抗差估计解

Fig. 2 Results of robust estimation

299 天的部分观测数据, 其抗差估计解(位置差)如下图 3, X 、 Y 、 Z 向 RMS 值分别为 0.345、0.451、0.484 cm。

表 1 Rms 比较

Table 1 Compare of Rms

方 法	x	y	z
最小二乘(cm)	4.293	4.936	5.427
抗差估计(cm)	3.802	4.574	5.009

采样率为 0.1 秒的数据为同济大学 GPS 基准站的部分数据, 其位置差结果如下图 4, X 、 Y 、 Z 向 RMS 值分别为 0.276、0.177、0.255 cm。

从图 2、3、4 可以看出, 随着采样率的变化, 位置差精度会发生变化, 当采样率增大时, 精度会逐渐提高, 各采样率相应的 RMS 值如表 2 所示。

表 2 各采样率 RMS

Table 2 Rms of some sample interval

采样率	30 秒			1 秒			0.1 秒		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
RMS(cm)	3.802	4.574	5.009	0.345	0.451	0.484	0.276	0.177	0.255

3.2 位置差误差分析及单点定位的实现

无模糊度模型的精密单点定位是在求得历元间的位置差, 然后进行位置与位置差的组合, 求得每个历元的坐标。本文通过已知点坐标与历元间位置差的组合求得接收机的轨迹, 以此来验证基于历元间位置差的精密单点定位的精度, 以及位置差误差的特性。在 0.1 秒采样率解算结果基础上, 把位置(基准站坐标)与位置差组合起来, 得到相应历元的坐标, 实现静态精密单点定位, 得到的结果转换到以基准站为

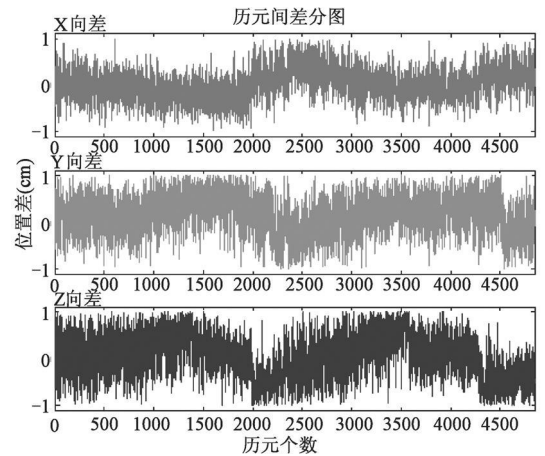


图 3 1 秒采样率位置差

Fig. 3 Position-difference of 1 s sample interval

原点的站心坐标系 UEN 下, 其结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出, 位置差结果中存在系统误差, 由于误差对定位结果产生了线性的影响。为了研究位置差误差的特性以及存在方式, 对位置差进行小波分析, 其 X 向结果(cm)如图 6。

从图 6 可以看出, 位置差在 X 方向存在 -0.15 cm 的系统误差。同理得到 Y 、 Z 方向也分别存在 -0.10 、 0.070 cm 的系统误差, 这一结论与图 5 表示的现象是相符的。由于系统误差的累积性, 误

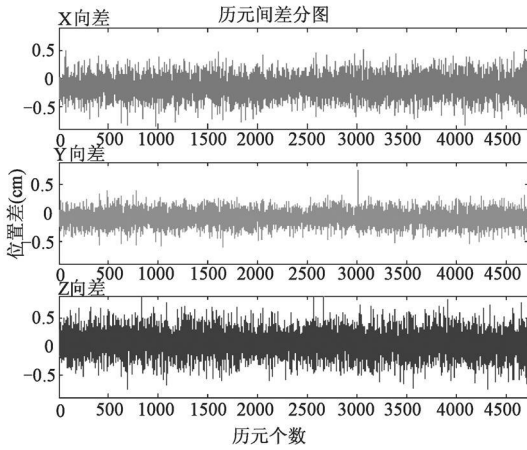


图 4 0.1 秒静态位置差

Fig. 4 Static position-difference of 0.1 s epoch interval

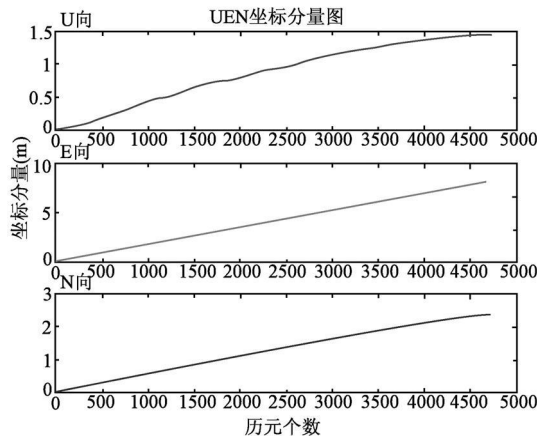


图 5 UEN 坐标分量

Fig. 5 3D of UEN

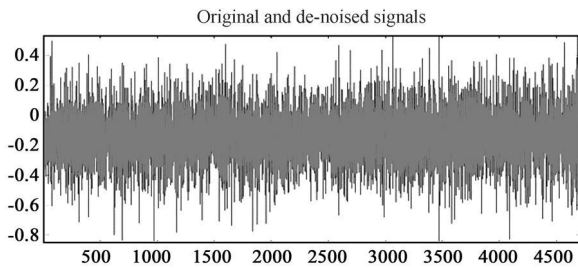


图 6 X 向原始信号和去噪信号

Fig. 6 Original and de-noised signal of X

差以历元个数倍数的系统误差增加, 从而造成站心坐标系中表现的定位结果在 U、E、N 方向以一定斜率的直线增长。对位置差也进行了最小二乘多项式曲线拟合, 得到了与小波分析理论同样的结果。也就是说, 位置差总是在直线 $X = -0.15 \text{ cm}$, $Y = -0.10 \text{ cm}$, $Z = 0.070 \text{ cm}$ 上下摆动。基于小波分析, 在进行位置差与位置组合时, 扣除系统误差, 得

到的轨迹转换到以基准站为原点的站心坐标系 UEN 下, 其结果如图 7 所示。

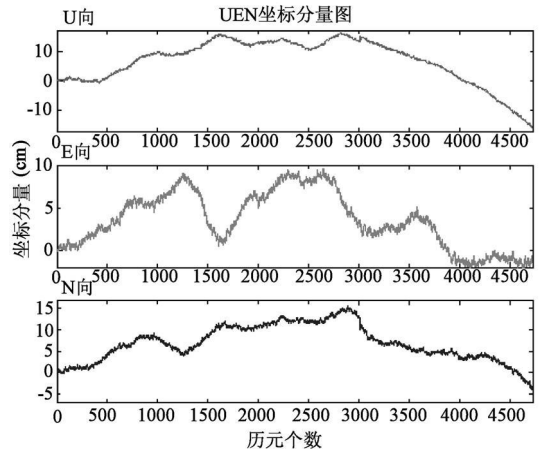


图 7 UEN 坐标分量

Fig. 7 3D of UEN

对比图 5、图 7 可得: 改正系统误差之后的结果比之前的结果精度提高了一个量级, 由于在位置差和位置的组合过程中, 历元间相关性比较弱的误差没有削弱, 从而使 UEN 坐标分量的分布没有呈现出偶然误差的特性。在进行历元间差分解算时, 没有进行对流层改正, 这是系统误差出现的一个主要原因, 还有其他一些无法模型化的误差、接收机噪声等, 共同作用引起了系统误差。

4 结论

抗差估计理论上, 赋以伪距和相位历元差观测值不同的初始权, 求解历元间位置差, 从理论以及计算结果可以得到, 基于抗差估计的历元间差分结果相比最小二乘结果精度有了较大的提高。对不同采样率的观测数据进行了解算, 从计算结果看出, 随着采样率的提高, 位置差精度也随着提高。在解算得到位置差之后, 利用小波分析理论分析了位置差误差的特性。通过位置差与位置组合实现单点定位时, 位置差误差的特性尤为重要, 当位置差误差呈现系统误差特性时, 会对单点定位结果产生累积影响。因此, 在利用历元间差分求取的位置差与位置组合进行单点定位时, 不仅要考虑位置差的精度, 还要考虑位置差误差的特性。

参考文献:

[1] Zumberge J.F. Precise point positioning for the efficient and robust

- analysis of GPS data from large network[J]. J. Res. 1997, 102; 5005—5017.
- [2] Kouba J, Heroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products[J]. GPS Solution, 2002, 5(2): 12—28.
- [3] Gao Y, Shen X. Improving ambiguity convergence in carrier phase-based precise point positioning[C]//ION GPS 2001. Salt Lake City, USA, 2001; 1532—1539.
- [4] Bock H. Efficient methods for determining precise orbits of low earth orbiters using the global positioning system[D]. Astronomical Institute University of Berne, Switzerland, 2003.
- [5] Bisnath S, Langley R. High-precision platform-independent positioning with a single GPS receiver[J]. Journal of Navigation, 2001, 29(3): 161—169.
- [6] 陈俊平, 王解先. 基于历元间差分的低轨卫星运动学精密定轨[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(4): 57—61. [CHEN Jun-ping WANG Jie-xian. Kinematic precise orbit determination of low earth orbiter based on epoch-difference strategy[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(4): 57—61.]
- [7] 郑作亚, 卢秀山. 基于加权的伪距和历元间相位差分模型 GPS 单点定位方法[J]. 测绘科学, 2007, 32(5): 47—49. [ZHEN Zuo-ya, LU Xiur-shan. GPS point positioning based on weighted between pseudo-range and time-differenced carrier phase model[J]. Science of Surveying and Mapping 2007, 32(5): 47—49.]
- [8] 吴连大, 贾沛璋. 人卫光学观测中大异常值的剔除方法[J]. 天文学报, 1994, 35(2): 113—119. [WU Lian-da, JIA Pei-zhang. A method of deleting the outliers in optical observations of artificial satellites[J]. ACTA Astronomica Sinica, 1994, 35(2): 113—119.]
- [9] 吴江飞, 黄城. 抗差估计在星载 GPS 卫星非差运动学定轨中的应用[J]. 天文学报, 2006, 47(3): 320—326. [WU Jiang-fei, HUANG Cheng. Application of robust estimation in GPS-based satellite zero-difference kinematic orbit determination[J]. ACTA Astronomica Sinica, 2006 47(3): 320—326.]
- [10] Yang Y. Robust estimation of systematic errors of satellite laser range [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73: 245—349.
- [11] 蔡昌盛, 高井祥. GPS 周跳探测及修复的小波变换法[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2007, 32(1): 39—42. [CAI Chang-sheng, CAO Jing-xiang. Cycle-slip detection of GPS data by Wavelet transform[J]. Geomatic and information Science of Wuhan University, 2007, 32(1): 39—42.]

作者简介: 李浩军(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事 GPS 理论以及精密单点定位研究。

通信地址: 同济大学测量与国土信息工程系(200092)

电话: 13671657322

E-mail: yanlhjeh@126.com

The Research on Precise Point Positioning Based on the Epoch-difference

LI Hao-jun¹, WANG Jie-xian^{1,2}, HU Cong-wei¹, CHEN Jun ping³

(1. Department of Surveying and Geo-informatics Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092, China;

3. GFZ Potsdam, TelegrafenbergA17, Potsdam 14473, Germany)

Abstract: The ambiguity free model of precise pointing can eliminate the ambiguity parameter, because the method of Epoch-difference of phase is used. The estimation parameters of this model are the position difference. Based on the robust estimation, this paper discusses the analyses the effects of the sample interval on the results of position-difference. The characterization of position-difference error is studied using wavelet analysis. According to the characterization of errors, some key problems that happen using the method of Epoch-difference to position are also studied.

Key words: Epoch-difference; PPP; Robust estimation; Sample interval