

基于卡尔曼滤波方法的 BDS/GPS 动态 伪距单点定位算法研究

孙良宇¹, 蔡伟¹, 朱祎鹏²

(1.黑龙江第一测绘工程院,黑龙江 哈尔滨 150025; 2.黑龙江第三测绘工程院,黑龙江 哈尔滨 150025)

摘要:为了解决在单系统动态过程中伪距单点定位精度不足的问题,提出了一种基于卡尔曼滤波并顾及多普勒频移的双系统伪距单点定位算法。通过实测数据的处理发现,在静态和慢动态两种测试环境下,基于卡尔曼滤波方法并顾及多普勒频移算法定位精度要优于最小二乘算法。

关键词:卡尔曼滤波; 多普勒频移; BDS; GPS; 单点定位

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1672-5867(2020)01-0032-03

Research on BDS / GPS Dynamic Pseudo-range Single-point Positioning Algorithm Based on Kalman Filtering Method

SUN Liangyu¹, CAI Wei¹, ZHU Yipeng²

(1. The First Surveying and Mapping Engineering Institute of Heilongjiang, Harbin 150025, China;

2. The Second Surveying and Mapping Engineering Institute of Heilongjiang, Harbin 150025, China)

Abstract: In order to solve the problem of insufficient precision of pseudo-single point positioning in single-system dynamic process, a dual-system pseudo-range single-point localization algorithm based on Kalman filtering and considering Doppler frequency shift is proposed. Through the processing of measured data, it is found that the Kalman filtering method and the Doppler shift algorithm are better than the least squares algorithm in both static and slow dynamic test environments.

Key words: Kalman filter; Doppler shift; BDS; GPS; single point positioning

0 引言

我国北斗卫星导航系统发展已日臻成熟,截至2018年8月2日,北斗卫星导航系统已成功发射34颗卫星,不久后将完成35颗卫星的全球组网,届时北斗卫星导航系统可以实现向全球提供高精度的位置服务。在数据解算过程中通过加入北斗系统可以增加天空中卫星可视数目,改善卫星几何结构,提高定位的精确性、稳定性。目前,伪距单点定位普遍采用最小二乘算法,其具有解算速度快、数学模型简单等特点,但最小二乘在动态定位中历元间的信息不发生关联,导致在动态定位过程中定位结果不准确^[1]。

卡尔曼滤波理论由 R.E.Kalman 在 1960 年首先提出,

作为一种重要的最优估计理论广泛应用于 GNSS 导航定位数学模型中^[2]。卡尔曼滤波可以利用合理的参数估计方法过滤掉信号中无用的成分,并且将相邻历元间的位置信息相联系,所以卡尔曼滤波方法相较于最小二乘方法得到的结果更平滑、精确,而且卡尔曼滤波作为一种递推模型非常适合在计算机上实现。

接收机在动态过程中沿某一方向移动时,与卫星之间的传播路程差会造成频率的变化,这种变化被称为多普勒频移,通过对多普勒频移的计算可以测定接收机的速度^[3]。

1 BDS/GPS 时空基准统一

BDS、GPS 系统分别采用 BDT 与 GPST,如果融合两系统进行定位就必须将两者时间系统进行统一,BDT、GPST

收稿日期: 2018-08-27

基金项目: 黑龙江省应用技术与开发计划(GA17A301)资助

作者简介: 孙良宇(1983-),男,黑龙江肇源人,高级工程师,测绘工程专业硕士研究生,主要从事大地测量和精密工程测量等测绘生产工作。

统一方法如下^[4]:

$$BDT = GPST - 14s \quad (1)$$

BDS/GPS 分别采用 CGCS2000 与 WGS-84 坐标系, 两者椭球相近, 仅在扁率上有所差异, 所以两者的差异对于伪距单点定位的精度可以不予考虑。

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\rho}_i^C &= \rho_i^{C,0} - \frac{(X^i - X^0)}{\rho_i^{C,0}} V_X - \frac{(Y^i - Y^0)}{\rho_i^{C,0}} V_Y - \frac{(Z^i - Z^0)}{\rho_i^{C,0}} V_Z - cV_{t_R}^C + cV_{t_i}^C - (V_{ion} - V_{trop}) \\ \tilde{\rho}_i^G &= \rho_i^{G,0} - \frac{(X^i - X^0)}{\rho_i^{G,0}} V_X - \frac{(Y^i - Y^0)}{\rho_i^{G,0}} V_Y - \frac{(Z^i - Z^0)}{\rho_i^{G,0}} V_Z - cV_{t_R}^G + cV_{t_i}^G - (V_{ion} - V_{trop}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中 C、G 分别表示 BDS、GPS 卫星, i 表示卫星号, $\tilde{\rho}_i$ 为测站到卫星的伪距观测值, ρ_i^0 为站星之间的近似距离, $X^i, Y^i, Z^i, X^0, Y^0, Z^0$ 分别表示卫星坐标与测站近似坐标。 c 表示光速, $V_{t_R}, V_{t_i}, (V_{ion})_i, (V_{trop})_i$ 分别表示接收机钟

$$\left. \begin{aligned} \lambda B &= \frac{(X^i - X^0)}{\rho_i^{C,0}} (v_X - v^X) + \frac{(Y^i - Y^0)}{\rho_i^{C,0}} (v_Y - v^Y) + \frac{(Z^i - Z^0)}{\rho_i^{C,0}} (v_Z - v^Z) - cdV_{t_R}^C + cdV_{t_i}^C \\ \lambda B &= \frac{(X^i - X^0)}{\rho_i^{G,0}} (v_X - v^X) + \frac{(Y^i - Y^0)}{\rho_i^{G,0}} (v_Y - v^Y) + \frac{(Z^i - Z^0)}{\rho_i^{G,0}} (v_Z - v^Z) - cdV_{t_R}^G + cdV_{t_i}^G \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 $(v_X, v_Y, v_Z), (v^X, v^Y, v^Z)$ 分别表示卫星与接收机运动速度, λ 为载波相位波长, B 表示多普勒观测值, cdV_{t_R}, cdV_{t_i} 分别表示钟差变化率, 采用最小二乘方法即可求出接收机运动速度、加速度最优解。

2.2 卡尔曼滤波数学模型

令状态向量 $X_k = [x, y, z, V_x, v^x, v^y, v^z, dV_{t_R}]^T$, (x, y, z) 表示接收机的三维位置, V_x 表示钟差, dV_{t_R} 表示接收机钟差速率, 卡尔曼滤波预测模型可表示为:

$$\begin{aligned} X_k &= \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + W_{k-1} \\ W_{k-1} &= \begin{bmatrix} \Delta T 1 \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{xk} \\ a_{yk} \\ a_{zk} \\ aV_t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

W 表示过程噪声向量, 1 表示四维单位矩阵, a 表示加速度。

在某历元 k 中, 误差方程可表示为:

$$V_k = B\delta r_k - l \quad (5)$$

V_k 表示误差改正数, $\delta r_k = [\delta V_{t_R} \ \delta x_k \ \delta y_k \ \delta z_k]$ 表示接收机钟差与坐标近似值改正数。

$$B = \left[c, \frac{(X^i - X^0)}{\rho_i^0}, \frac{(Y^i - Y^0)}{\rho_i^0}, \frac{(Z^i - Z^0)}{\rho_i^0} \right] \quad (6)$$

$$l = \tilde{\rho}_i - \rho_i^0 - V_{t_R} + C \quad (7)$$

C 表示地球自转等改正量。

2.3 误差改正

本文主要对对流层延迟、电离层延迟、地球自转效应等误差进行处理, 对流层延迟改正采用 Saastamoinen 模型, 根据气体定律对对流层指数进行推导, 对流层延迟模型可表示为^[6]:

2 数学模型

2.1 BDS/GPS 伪距观测方程

线性化后的 BDS/GPS 伪距观测方程可表示为^[5]:

差、卫星钟差、电离层改正、对流层改正。

多普勒观测方程可由线性化后的伪距观测方程得出, 对式 (2) 进行微分:

$$V_{trop} = \frac{0.002 \ 277}{\cos z} \left[p + \left(\frac{1 \ 225}{T} + 0.05 \right) e - \tan^2 z \right] \quad (8)$$

得到的结果单位为 m; p 表示标准大气压, 单位为 hPa; T 表示绝对温度; e 表示标准气象条件下的水气压; z 表示天顶角。

电离层延迟模型采用 Klobu-char 模型改正:

$$T_g = 5 \times 10^{-9} + A \cos \frac{2\pi}{P} (t - 14(h)) \quad (9)$$

式中, A 表示振幅, P 表示周期。

在地固坐标系中要进行地球自转改正。设测站 (X_R, Y_R, Z_R) , 卫星坐标为 (X_S, Y_S, Z_S) , 地球自转角为 ω , 卫星信号传播时间 τ , 卫星坐标变化为 (X_R^0, Y_R^0, Z_R^0) 。

$$\begin{bmatrix} X_R^0 \\ Y_R^0 \\ Z_R^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega \tau & \sin \omega \tau & 0 \\ -\sin \omega \tau & \cos \omega \tau & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \quad (10)$$

3 实测数据分析

3.1 静态数据测试

采用某连续运行参考站 1 h 的观测数据, 观测时段为 2018 年 8 月 5 日 9:00—10:00, 采样间隔为 1 s, 分别利用同一组数据进行两种算法解算, 卡尔曼滤波与最小二乘法测试结果如图 1、图 2 所示。

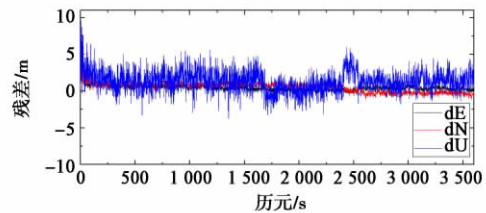


图 1 卡尔曼滤波法静态残差序列图

Fig.1 Kalman filter static residual sequence diagram

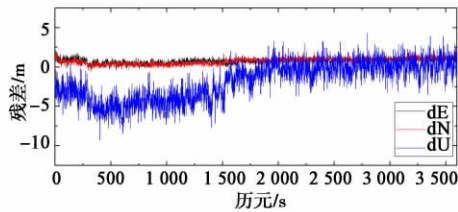


图 2 最小二乘法静态残差序列图

Fig.2 Least squares static residual sequence diagram

两种方式处理结果在平面上精度较高,定位误差基本上小于 2 m,但在高程方向上由于滤波初始值不确定,卡尔曼滤波算法结果在前十余个历元震荡较大,最大误差达到了 8 m,但在数据收敛之后,定位误差基本保持在 5 m 以内。利用卡尔曼滤波方法处理得到的结果相对于最小二乘法更平滑,精度更高。最小二乘法 2 000 s 之前震荡强烈,而且明显存在系统性偏差,在之后通过迭代的方式才使得结果收敛。将两种结果与真实坐标进行对比,计算出 RMS 值,结果见表 1。

表 1 静态数据 RMS 值精度对比

Tab.1 Accuracy comparison of static data RMS values

数据处理方法	E/m	N/m	U/m
卡尔曼滤波	1.02	0.95	2.42
最小二乘	1.84	1.65	3.84

通过对 RMS 值对比分析发现,卡尔曼滤波方法处理数据结果在东、北、高 3 个方向上精度均优于最小二乘法。

3.2 动态数据测试

动态数据采用天宝 R8 多系统接收机,围绕足球场中半场规则图形进行慢动态测试,采样间隔 1 s,并采用实时解算的网络 RTK 结果作为真值进行比较。图 3、图 4 分别为两种方法动态数据进行后处理得到的慢动态运动轨迹图。由图 3、图 4 可以明显看出利用卡尔曼滤波方法相对于最小二乘法得到的慢动态轨迹更规则,原因在于卡尔曼滤波方法顾及了慢动态过程中的人行速度因素,起到了对伪距单点定位平滑的作用,并合理地滤除了信号中无用的部分。图 5、图 6 分别为两种方法与真值坐标对比得到的残差序列图,最小二乘法平面精度优于 5 m,高程精度较差最大误差达到了 17 m,卡尔曼滤波方法平面精度优于 4 m,高程方向精度基本在 10 m 以内。表 2 列出了慢动态状态下两种方法的 RMS 值,通过对比分析发现,基于卡尔曼滤波方法的伪距单点定位方法得到的精度要优于最小二乘法。



图 3 最小二乘法单点定位运动轨迹图

Fig.3 Least squares single point positioning motion trajectory

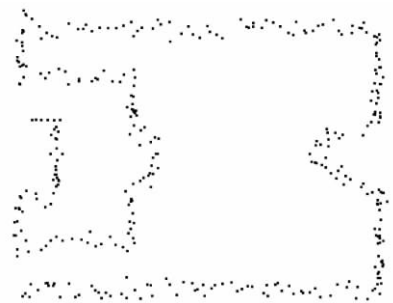


图 4 卡尔曼滤波法单点定位运动轨迹图

Fig.4 Kalman filter method single point positioning motion trajectory

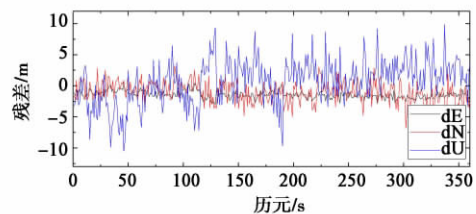


图 5 卡尔曼滤波方法慢动态残差序列图

Fig.5 Kalman filter method slow dynamic residual sequence diagram

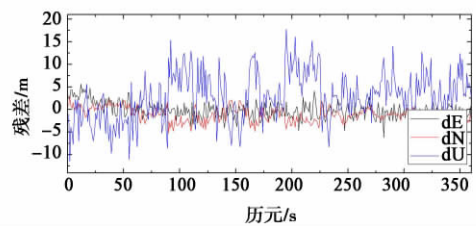


图 6 最小二乘法慢动态残差序列图

Fig.6 Least squares method slow dynamic residual sequence diagram

表 2 慢动态数据 RMS 值精度对比

Tab.2 Accuracy comparison of RMS values of slow dynamic data

数据处理方法	E/m	N/m	U/m
卡尔曼滤波	1.5	1.9	3.59
最小二乘	2.3	2.4	5.98

3.2 实现结果

登录系统,加入协同标绘小组。不同领域的参会专家,在同一底图进行标绘工作,地理要素编辑过程中,如每次都只有一个人在编辑,则不会触发并发控制机制。但是当一个人在对某要素编辑的过程中,另一人也需要对该要素进行编辑,存在并发操作的问题,此时并发控制策略机制启用。

当多人编辑同一个地理要素时,如果该要素正在被编辑,则是最先编辑该要素的人拥有编辑权限,其他人如编辑该要素,则会提示当前要素不可操作。同时,在编辑要素前,为了避免编辑到他人正在编辑的要素,减少并发冲突的可能性,可以直接打开要素属性表,观察“Enable”属性字段内容,优先选择可编辑的要素编辑,这样既可以减少并发操作的可能性,也能提高协同标绘的工作效率。

4 结束语

基于 ArcEngine 组件开发的协同减灾系统,针对其编辑过程中的并发控制问题,结合 GIS 中每类要素都具有属性表和可赋予多个属性的特点,探索提出了一种使用加锁法与要素属性表增添一个统一字段相结合的并发控制策略。这种策略较好地解决了在协同标绘过程中,多专家在线协同编辑地理要素时产生的并发冲突问题。通过编辑要素的属性信息,可以及时直观地了解其是否处于加锁的状态,极大地提高了协同标绘的效率。但是解决策略局限于地理信息系统,多用于对地理要素编辑的情况下,对于并发控制策略的选择,还要取决于其操作对象和应用领域。

参考文献:

- [1] 冯晨华,徐捷. CSCW 系统中的并发控制机制的研究[J]. 计算机工程与应用, 1999(4): 21-23.
- [2] 吴燕萍,施润身,袁向阳. 一种用于分布式数据库系统的并发控制新算法[J]. 计算机工程与应用, 1998(9): 9-10.
- [3] 战治国,金海,袁平鹏. 实时协同标绘系统中的即时锁共享机制研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),

2005, 33(S1): 379-382.

- [4] 肖波,张东,诸鸿文. 计算机支持的协同工作并发控制策略[J]. 上海交通大学学报, 1999(1): 101-103.
- [5] 邱鲤鲤,姚术林,刘子立,等. 基于共享内存的路径规划负载均衡算法[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(9): 64-67.
- [6] Bernstein, Philip A, Goodman, etc. Concurrency Control in Distributed Database Systems[J]. Acm Computing Surveys, 1988, 13(2): 185-221.
- [7] Papadimitriou C H, Kanellakis P C. On Concurrency Control by Multiple Versions[J]. Acm Transactions on Database Systems, 1984, 9(1): 89-99.
- [8] Xu J. On-line multiversion database concurrency control[J]. Acta Informatica, 1992, 29(2): 121-160.
- [9] 夏宇,朱欣焰,吕维. 基于 ArcSDE 的空间数据版本管理问题研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(14): 14-16.
- [10] 何保国,朱国宾. 基于版本管理的多用户并发编辑控制策略研究[J]. 地理空间信息, 2007, 5(4): 1-4.
- [11] 李娟,欧阳元新,陈真勇,等. 集成用户可定制锁和操作转换的并发控制方法[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(10): 54-58.
- [12] 李风光,王永生,祝若鑫,等. 多版本并发控制的 WFS 要素更新方法[J]. 测绘科学技术学报, 2014(2): 212-215.
- [13] 古明家. 分布式数据库系统的并发控制算法综述[J]. 现代计算机, 2008(3): 147-149.
- [14] Lam K Y, Kuo T W, Kao B, et al. Evaluation of Concurrency Control Strategies for Mixed Soft Real-Time Database Systems[J]. Information Systems, 2002, 27(2): 123-149.
- [15] Greenberg S, Marwood D. Real time groupware as a distributed system: concurrency control and its effect on the interface[C]// Proceedings of the 1994 ACM conference on Computer supported cooperative work. ACM, 1994: 207-217.

[编辑: 张 曦]

(上接第 34 页)

4 结束语

本文介绍了基于卡尔曼滤波方法的 BDS/GPS 伪距单点定位数学模型,并分别进行了静态、慢动态实测数据结算分析,通过对比两种模式的实测数据结果发现基于卡尔曼滤波方法的伪距单点定位模型定位结果更平滑、可靠性更高。

参考文献:

- [1] 唐卫明,张先春,惠孟堂,等. 基于卡尔曼滤波的北斗伪距单点定位算法研究[J]. 测绘通报, 2016(10): 6-8.

- [2] 蔡艳辉,程鹏飞,李夕银. 用卡尔曼滤波进行 GPS 动态定位[J]. 测绘通报, 2006(7): 6-8.
- [3] 宋迎春. 动态定位中的卡尔曼滤波研究[D]. 长沙: 中南大学, 2002.
- [4] 高星伟,过静珩,程鹏飞,等. 基于时空系统统一的北斗与 GPS 融合定位[J]. 测绘学报, 2012, 41(5): 743-748.
- [5] 袁宏超,秘金钟,高猛,等. 双导航定位系统伪距单点定位方法与精度分析[J]. 导航定位学报, 2014(3): 38-43.
- [6] 王世进. BDS/GPS-RTK 算法研究及软件实现[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.

[编辑: 刘莉鑫]