

改进的渐消卡尔曼滤波在 GPS 动态定位中的应用

王 虎¹, 王解先^{1,2}, 白贵霞^{2,3}, 李浩军¹

(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. 陕西测绘局, 陕西 西安 710054)

摘要: 基于中长基线 GPS 动态定位模型和渐消卡尔曼滤波理论, 提出构建新的渐消因子向量, 通过对不同滑动窗口宽度设计一组平行滤波器, 利用加权获得优化之后的协方差阵来改善中长基线中动态定位的精度. 数据解算结果验证了该方法的正确性和可靠性.

关键词: GPS 动态定位; 渐消卡尔曼滤波; 渐消因子向量; 滑动窗口

中图分类号: P 228.4

文献标识码: A

An Improved Fading Kalman Filter and its Application to GPS Kinematic Positioning

WANG Hu¹, WANG Jiexian^{1,2}, BAI Guixia^{2,3}, LI Haojun¹

(1. Department of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Modern Engineering Surveying, State Bureau of Surveying and Mapping, Shanghai 200092, China; 3. Shaanxi Bureau of Surveying, Xi'an 710054, China)

Abstract: Based on medium-long baseline GPS kinematic positioning model and the theory of classic fading Kalman filter, a modified fading factor vector is proposed. Different widths of sliding windows are used to obtain a series of parallel filters. The weight factor of covariance is decided by the residuals of every filter. The modified fading Kalman filter is more effective and sensitive than classic Kalman filter. Various experiments are made to test the performance of this method. The results show the precision of long-baseline GPS kinematic positioning is improved.

Key words: GPS kinematic positioning; fading Kalman filter; fading factor vector; sliding window

踪站间相距较远, 因此, 对于提高中长基线 GPS 解算精度成为学者们探讨的热点. 高精度实时 GPS 动态定位有着广泛的应用前景, 例如在基础测绘、车辆精密导航、航空航海领域的确定姿态方位元素, 轮船的姿态、飞机的飞行及着陆导航等方面^[1].

卡尔曼滤波^[2-3]是一种对动态系统实时进行数据处理的有效方法, 利用观测向量估计随时间不断变化的状态向量进行估计时, 不需要存储大量的历史观测数据, 只需利用新的观测值, 通过不断地预测和更新, 即可估计出系统新的观测值. 由于卡尔曼滤波假设观测噪声为白噪声, 而很多误差模型不能简单地设为白噪声, 在特殊环境下, 这种假设将使定位结果不稳定, 定位精度不高. 常用的滤波方法还有平方根滤波、渐消滤波、自适应滤波以及非线性滤波等. 针对渐消卡尔曼滤波^[4]中预报参数自身的特点, 提出构建新的渐消因子向量, 更新预测方差矩阵, 最终改变增益矩阵, 达到控制动力学模型误差对滤波值影响的目的. 与此同时, 通过对不同滑动窗口宽度设计一组平行滤波器, 利用加权获得优化之后的协方差阵来改善中长基线中 GPS 动态定位的精度.

1 中长基线中 GPS 整周模糊度的确定

中长基线整周模糊度的快速解算是高精度动态 GPS 定位的关键, 随着 GPS 基线距离的增加, 与距离有关的误差也相应增加, 主要包括卫星轨道误差、电离层延迟误差、对流层延迟误差和观测噪声等. 随着 GPS 观测值中含有的各种误差的增大, 模糊度的整数特性会受到影响. 本文将根据宽巷组合和无几何距离组合, 运用快速模糊度解算 FRAR (fast ambiguity resolution approach) 的搜索方法, 搜索出

随着 GPS 连续运行跟踪站的不断建立, 中长基线的 GPS 高精度动态定位成为可能. 但由于 GPS 跟

收稿日期: 2009-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(40974018); 中国地震局陆态网络工程项目(CMONOC II - RJ - 2008 - 005)

第一作者: 王 虎(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为 GPS 理论及数据处理. E-mail: whxxf82@126.com

通讯作者: 王解先(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为卫星大地测量. E-mail: wangjiexian@tongji.edu.cn

正确的模糊度. 双频载波相位观测和 P 码伪距观测在中长基线下的双差观测方程^[3]为

$$\begin{aligned}\nabla\Delta L_i &= \nabla\Delta\Phi_i\lambda_i = \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta N_i\lambda_i - \\ &\quad \nabla\Delta D_{\text{ION}} + \nabla\Delta D_{\text{trop}} + \nabla\Delta\epsilon_i \\ \nabla\Delta P_i &= \nabla\Delta\rho + \nabla\Delta D_{\text{ION}} + \nabla\Delta D_{\text{trop}} + \nabla\Delta\epsilon_i\end{aligned}\quad (1)$$

宽巷组合模糊度的确定:

$$\begin{aligned}N_W &= \nabla\Delta N_1 - \nabla\Delta N_2 = \nabla\Delta\Phi_1 - \nabla\Delta\Phi_2 - \\ &\quad \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{\nabla\Delta P_1}{\lambda_1} + \frac{\nabla\Delta P_2}{\lambda_2} \right)\end{aligned}\quad (2)$$

无几何距离组合模糊度的确定:

$$N_I = \nabla\Delta N_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \nabla\Delta N_2 = \nabla\Delta\Phi_1 - \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \nabla\Delta\Phi_2\quad (3)$$

式(1)—(3)中: $i = 1, 2$; $\nabla\Delta L_i$ 和 $\nabla\Delta P_i$ 分别为 L_i , P_i 的双差观测值; λ_i 为波长; $\nabla\Delta\Phi_i$ 为双差相位观测值, 周; $\nabla\Delta\rho$ 为双差测站至卫星的距离, m; $\nabla\Delta N_i$ 为双差相位观测值的整周模糊度, 周; $\nabla\Delta D_{\text{ION}}$ 为双差电离层延迟, m; $\nabla\Delta D_{\text{trop}}$ 为双差对流层延迟, m; $\nabla\Delta\epsilon_i$ 为双差观测噪声, m; N_W 为宽巷模糊度, 周; N_I 为无几何距离组合模糊度, 周; f_i 为 L_i 的频率.

相位和伪距的这种线性组合, 消除了卫星、接收机钟差, 电离层影响也基本上消除, 仅受观测噪声和对流层残差的影响, 但是这些影响可以通过多历元平滑减弱或消除. $\nabla\Delta N_1$ 和 $\nabla\Delta N_2$ 的模糊度确定后, 可以进一步检验它的可靠性. 由于中长基线相对短基线, 主要是很多误差不能通过双差完全消除, 因此双差观测值的噪声较大, 进而导致双差模糊度的噪声较大, 为此本文根据伪距观测值的精度 (0.3 m) 和双差模糊度噪声较大的特点, 给予了较大的搜索空间, 以及双差模糊度 ± 6 周的搜索范围, 采用载波相位或者载波 LC (电感电容) 无电离层组合来进行定位计算, 运用 FRAR 模糊度搜索方法, 当 ratio 值大于所设定的阈值 3, 将搜索出正确的整周模糊度.

2 渐消卡尔曼滤波及改进的渐消卡尔曼滤波

标准卡尔曼滤波的线性离散系统的状态方程和观测方程为^[2]:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{B}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \end{cases}\quad (4)$$

式中: \mathbf{X}_k 为状态向量; $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵; \mathbf{W}_k 为系统噪声; \mathbf{Z}_k 为观测值; \mathbf{B}_k 为观测矩阵; \mathbf{V}_k 为观

测噪声. 则标准卡尔曼滤波的递推方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1/k-1} \\ \mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \mathbf{Q}_k \\ \mathbf{X}_{k/k} = \mathbf{X}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{X}_{k/k-1}) \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{B}_k^T (\mathbf{B}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{B}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \\ \mathbf{P}_{k/k} = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{B}_k) \mathbf{P}_{k/k-1} \end{cases}\quad (5)$$

式中: \mathbf{Q}_k 系统过程噪声协方差矩阵; \mathbf{K}_k 为增益矩阵; \mathbf{I} 为单位矩阵; \mathbf{R}_k 为观测噪声协方差矩阵. 渐消卡尔曼滤波与标准卡尔曼滤波的不同之处就在引入了渐消因子 λ_k , 根据最优化理论可构造渐消因子. 预测状态协方差则为^[4]

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \lambda_k \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \mathbf{Q}_k\quad (6)$$

式中:

$$\begin{aligned}\lambda_k &= \max\{1, \text{tr}[\mathbf{N}_k] / \text{tr}[\mathbf{T}_k]\} \\ \mathbf{T}_k &= \mathbf{B}_k \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \Phi_{k/k-1}^T \mathbf{B}_k^T \\ \mathbf{N}_k &= \sum \mathbf{V}_{k/k-1} - \mathbf{B}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{B}_k^T - \mathbf{R}_k\end{aligned}$$

由于在 GPS 高精度动态定位中, 状态向量为 XYZ 坐标、对流层、整周模糊度, 3 组状态向量之间互不相关, 在动态定位中, 对流层不会随着运动状态突变而有相应的变化, 双差对流层残差在中长基线中不能近似为零, 而应当作为一个未知量来估计; 整周模糊度只要不失锁, 没有周跳发生, 将保持不变. 针对不同状态向量和渐消因子 λ_k , 构建新的渐消因子向量 ω_k , $\omega_k = [\lambda_k \mathbf{I}_{3 \times 1} \quad \mathbf{I}_{1 \times 1} \quad \mathbf{I}_{n \times 1}]^T$, 其中各元素依次为坐标、对流层、整周模糊度的状态向量, n 为模糊度个数. 其相应的预测状态协方差为 $\mathbf{P}_{k/k-1} = \omega_k \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1/k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \mathbf{Q}_k \sum \mathbf{V}_{k/k-1} = \mathbf{E}(\mathbf{V}_{k/k-1} \mathbf{V}_{k/k-1}^T)$ 为预测残差 $\mathbf{V}_{k/k-1} = \mathbf{Z}_k - \mathbf{B}_k \mathbf{X}_{k/k-1}$ 的协方差矩阵. 一般的移动开窗估计为^[5-6]

$$\sum \mathbf{V}_{k/k-1} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (\mathbf{V}_{k-i/k-1-i} \mathbf{V}_{k-i/k-1-i}^T)\quad (7)$$

当运动状态发生异常变化, 引起预报残差 $\mathbf{V}_{k/k-1}$ 增大时, 由于 $\sum \mathbf{V}_{k/k-1}$ 是对前面历元的信息取平均, 所以并不能够非常敏感地反映出实时动态 GPS 的误差信息. 如何有效选取移动窗口宽度, 对准确确定渐消因子尤为重要, 偏小或者偏大都将不能有效估计新信息的方差, 进而不能准确反映实时动态 GPS 的运动状态. 根据文献^[7]中不同的窗口宽度, 设计 N 个滤波器, 滑动设计窗口宽度分别为 M_1, M_2, \dots ,

$$M_N, \text{ 对应 } \mathbf{Y}_{k/k}(M_j) = \frac{1}{M_j} \sum_{i=1}^{M_j} (\mathbf{V}_{k-i/k-1-i} \mathbf{V}_{k-i/k-1-i}^T),$$

最终协方差矩阵的计算将利用加权系数进行优化组合

$$\sum V_{k/k-1} = \alpha_1 Y_{k/k}(M_1) + \alpha_2 Y_{k/k}(M_2) + \dots + \alpha_N Y_{k/k}(M_N) \quad (8)$$

根据 $Y_{k/k}(M_j)$ 协方差的迹来选定权值 α_k

$$\alpha_k = \text{tr}(\sum Y_{k/k}(M_k)) / [\text{tr}(\sum Y_{k/k}(M_1)) + \text{tr}(\sum Y_{k/k}(M_2)) + \dots + \text{tr}(\sum Y_{k/k}(M_N))] \quad (9)$$

当运动状态发生变化时,改进的渐消卡尔曼滤波通过多组并行的滤波器,增大当前历元的权重,使其能够敏感地反映出当前动态模型的状态,并对增益矩阵 K_k 进行修正,使得此次观测值在滤波值中具有较大的加权系数,减小了状态模型误差对滤波值的影响,从而提高了滤波器的跟踪能力,使得滤波效果更优。

3 实验结果及分析

利用两个实验来验证上述原理与算法,实验一采用加拿大两个已知 IGS 测站 ALGO 站和 CAGS 站,基线长约 181 km,将 ALGO 作为参考站,CAGS 作为流动站,将已知的基线长度作为真值(静态模拟动态);实验二采用一组机载 GPS 动态观测数据,一台固定于参考站,一台安置于飞机上,数据采样间隔为 1 s. 滤波模型采用常速度模型^[8],位置状态初始方差为 0.2 m^2 ,速度初始方差为 $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$,对流层初始方差为 10^{-3} m^2 ,模糊度初始方差为 10^{-2} m^2 . 其对应的噪声协方差阵,将直接采用文献[9-10]中的模型. 模糊度固定方法采用载波伪距组合,根据 P 码精度和双差模糊度的噪声,给予 ± 6 周的搜索范围,通过 FRAR 方法搜索固定模糊度. 利用 GPS 数据处理软件 GAMIT 中的运动定位模块 TRACK^[11],可以得到测站的每个历元的三维坐标差和单位权中误差,平面精度在 2 cm 以内. 将 TRACK 解算得到的定位结果作为“真值”. 在此进行 3 种方案的解算:第 1 种为标准的卡尔曼滤波,采用 LC 无电离层组合双差观测值;第 2 种为渐消卡尔曼滤波,采用 LC 无电离层组合双差观测值;第 3 种为改进渐消卡尔曼滤波,计算新的渐消因子向量 ω_k ,本文计算中取滤波器的个数 $N=6$,其中相应的滑动窗口的宽度分别为 2,3,4,5,6,7,采用 LC 无电离层组合双差观测值。

3.1 实验一

将已知的 ALGO 站和 CAGS 站的基线长作为真值,与后面 3 种方法计算所得的各个历元坐标求差

进行比较,X 轴方向误差见图 1—3.

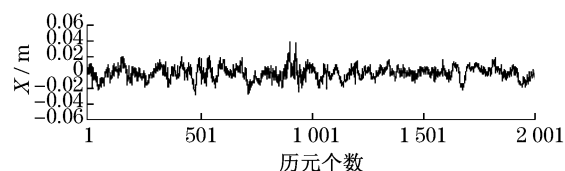


图 1 经典卡尔曼滤波误差图(实验一)

Fig.1 Errors of classical Kalman filtering

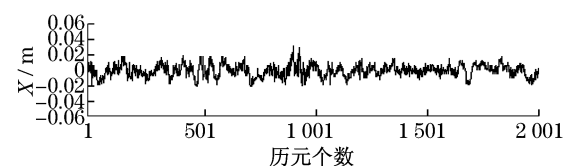


图 2 渐消卡尔曼滤波误差图(实验一)

Fig.2 Errors of fading Kalman filtering

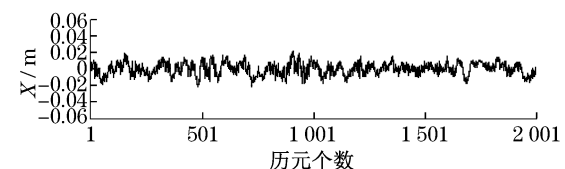


图 3 改进渐消卡尔曼滤波误差图(实验一)

Fig.3 Errors of improved fading Kalman filtering

在实验一中,采用 ALGO 和 CAGS 站的观测数据,并通过上述 3 种方法分别进行了相应的参数估计,结果验证了本文提出的改进的渐消卡尔曼滤波算法的正确性和可靠性. 相对于经典卡尔曼滤波和渐消卡尔曼滤波,改进的渐消卡尔曼滤波算法能够有效消除观测粗差,克服卡尔曼滤波的发散现象,使得滤波效果更佳。

3.2 实验二

通过第 3 种方法解出的大地坐标,得出飞机的平面运行轨迹见图 4.

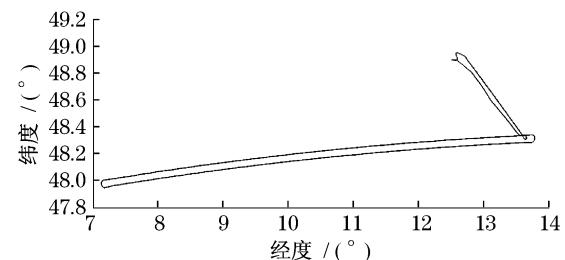


图 4 飞机的平面运行轨迹图

Fig.4 Tracking floor plan of airplane

剔除掉周跳的前 200 个历元的观测数据,计算宽项和无几何距离双差模糊度. 26 号卫星-22 号卫星的双差模糊度实数变化如图 5—6 所示。

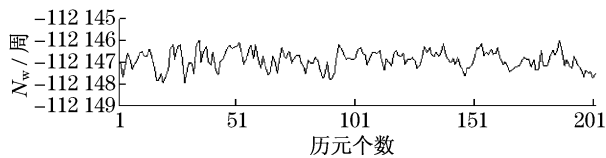


图 5 宽巷双差模糊度

Fig.5 Wide lane double difference ambiguity

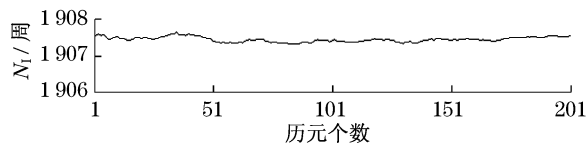


图 6 无几何距离双差模糊度

Fig.6 Non-geometric distance double difference ambiguity

以 TRACK 解算得到的各历元坐标作为真值,与后面 3 种方法计算所得的各个历元坐标求差进行比较, X 轴方向误差见图 7—9.

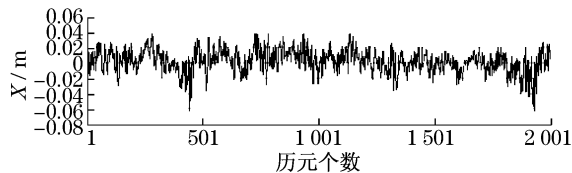


图 7 经典卡尔曼滤波误差图(实验二)

Fig.7 Errors of classical Kalman filtering

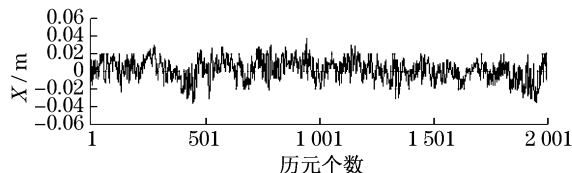


图 8 渐消卡尔曼滤波误差图(实验二)

Fig.8 Errors of fading Kalman filtering

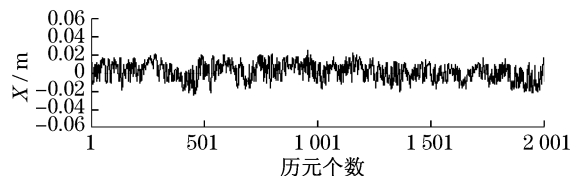


图 9 改进渐消卡尔曼滤波误差图(实验二)

Fig.9 Errors of improved fading Kalman filtering

表 1 3 种算法精度比较

Tab.1 Comparison of RMS root mean square

算法	X/m	Y/m	Z/m
标准卡尔曼滤波	0.052	0.057	0.071
渐消卡尔曼滤波	0.033	0.039	0.052
改进渐消卡尔曼滤波	0.029	0.032	0.045

实验二中,飞机在飞行过程中运动状态发生变化的时候,改进的渐消卡尔曼滤波的渐消因子向量 ω_k 能够敏感地反映飞机的运行状态,当预报残差 $V_{k/k-1}$ 增大,则协方差矩阵相应变大,最佳渐消因子 ω_k 也相应增大,通过有效增大前一个历元状态参数估计向量的协方差矩阵,减小状态模型误差对当前历元状态参数的影响,从而使动态跟踪能力增强,滤波效果达到最佳.从图 1—3 和图 7—9 以及表 1 可以看出,改进的渐消卡尔曼滤波方法能很好地克服卡尔曼滤波的发散现象,提高滤波的精度和可靠性,使定位结果得到提高;渐消卡尔曼滤波的滤波精度和跟踪能力则相比次之,而经典卡尔曼滤波的滤波精度和跟踪能力则更次之,特别在运动状态突变时,显的尤为明显,不能够较好地抑制状态异常的影响.

4 结语

改进的渐消卡尔曼滤波方法相对于渐消卡尔曼滤波方法和经典卡尔曼滤波方法在定位精度和动态性方面有着明显的提高.改进的渐消卡尔曼滤波方法由于利用了新的渐消因子向量,并且通过对不同滑动窗口宽度设计一组平行滤波器,加权获得了优化之后的协方差阵,能较好地抑制状态异常的影响,从而获得较好的滤波效果,更能符合动态定位的实际,提高了定位精度,在中长基线中动态定位中具有一定的适用性.

参考文献:

- [1] 胡丛玮,刘大杰.单历元确定 GPS 整周模糊度的分析[J].南京航空航天大学学报,2001,33(3):267.
HU Congwei, LIU Dajie. Preliminary analysis on single epoch GPS ambiguity resolution[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001, 33(3): 267.
- [2] 崔希璋,陶本藻.广义测量平差[M].北京:测绘出版社,1992.
CUI Xizhang, TAO Benzao. General survey adjustment[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1992.
- [3] 魏子卿,葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M].北京:测绘出版社,1998.
WEI Ziqing, GE Maorong. The mathematical model of GPS relative positioning[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1998.
- [4] 杨元喜,高为广.两种渐消滤波与自适应抗差滤波的综合比较分析[J].武汉大学学报:信息科学版,2006,31(11):980.
YANG Yuanxi, GAO Weiguang. Comparison of two fading filters and adaptively robust filter[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(11): 980.
- [5] YANG Yuanxi, XU Tianhe. An adaptive Kalman filter based on

- sage windowing weights and variance components [J]. The Journal of Navigation, 2003, 56(2): 231.
- [6] 杨元喜, 何海波. 论动态自适应滤波[J]. 测绘学报, 2001, 30(4): 293.
- YANG Yuanxi, HE Haibo. On adaptively kinematic filtering[J]. Acta Geodetica et Cartographica Sinica, 2001, 30(4): 293.
- [7] 覃方君, 许江宁. 基于信息自适应卡尔曼滤波的加速度计信号降噪[J]. 数据采集与处理, 2009, 24(2): 227.
- QIN Fangjun, XU Jiangning. Innovation-based adaptive kalman filter for accelerometer signal de-noising[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2009, 24(2): 227.
- [8] Schwarz K P. A comparison of GPS kinematic models for the determination of position and velocity along a trajectory[J]. Manuscr Geod, 1989, 14: 345.
- [9] XIA Qijun, SUN Youxian, ZHOU Chunhui. An optimal adaptive algorithm for fading kalman filter and its application [J]. Acta Automatic Sinica, 1990, 16(3): 210.
- [10] FANG Jiancheng. The study and application of the optional estimation theories and method in integrated navigation system [D]. Nanjing: Southeast University, 1998.
- [11] King R W, Bock Y. Documentation for the GAMIT GPS analysis software [M]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Press, 2000.

(上接第 123 页)

在 GPS-RTK(实时动态定位)及网络 RTK 中采用此转换参数,可免去在 GPS 网平差后仍需随时随地进行两种坐标系之间转换的繁琐工作.

参考文献:

- [1] 王解先, 邱杨媛. 高程误差对七参数转换的影响[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(2): 25.
- WANG Jiexian, QIU Yangyuan. Influence of ellipsoidal height error on seven-parameter transformation [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2007, 27(2): 25.
- [2] 刘根友, 朱耀仲, 朱才连. 一种 GPS 网与经典地面网坐标转换的新方法[J]. 工程勘察, 2003(1): 42.
- LIU Genyou, ZHU Yaozhong, ZHU Cailian. A new way of coordinates transform between GPS network and classical terrestrial network [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2003(1): 42.
- [3] 王解先, 王军, 陆彩萍. WGS84 与北京 54 坐标的转换问题[J]. 大地测量与地球动力学, 2003, 23(3): 70.
- WANG Jiexian, WANG Jun, LU Caiping. Problem of coordinate transformation between WGS 84 and Beijing 54 [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2003, 23(3): 70.
- [4] 施一民, 周拥军, 张文卿. 用定向定位调整法确定区域性椭球面[J]. 测绘学报, 2002, 31(2): 118.
- SHI Yimin, ZHOU Yongjun, ZHANG Wenqin. The determination of the regional ellipsoidal surface by the method of readjusting its orientation and positioning [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2002, 31(2): 118.
- [5] 施一民, 陈伟, 施宝湘. 区域性独立坐标系与三维地心坐标系之间的转换[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2009, 37(8): 1104.
- SHI Yimin, CHEN Wei, SHI Baoxiang. Coordinate transformation between the three-dimension geocentric coordinate system and the independent coordinate system [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(8): 1104.
- [6] 施一民. 现代大地控制测量[M]. 第 2 版. 北京: 测绘出版社, 2008.
- SHI Yimin. Contemporary geodetic control survey [M]. 2nd ed. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2008.