

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2008.05.024

GPS 监测地壳形变漂移速度的计算

兰孝奇¹,葛恒年²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098 ;2.中国水电顾问集团昆明勘测设计研究院,云南 昆明 650051)

摘要 :根据动态卡尔曼滤波理论,结合 GPS 监测地壳形变数据处理的特点,构建了动态卡尔曼滤波计算地壳运动漂移速度的数学模型.结合 IGS 的 GPS 连续观测网络部分站点的多期数据,使用精密定位定轨软件 GAMIT 进行定位计算,获得高精度的站点坐标.将坐标作为具有先验方差信息的准观测值,设置站点漂移速度为未知数,进行卡尔曼滤波漂移速度的估计.计算结果与已有结果的比较表明,卡尔曼滤波漂移速度估计可以达到 mm 级的精度,可用于 GPS 监测地壳形变进行漂移速度的估计.

关键词 :GPS ;地壳形变 ;卡尔曼滤波 ;漂移速度

中图分类号 :TV698.11 ;P228.4 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2008)05-0693-04

自 20 世纪 90 年代起, GPS 定位在 10³km 以上大尺度范围内定位精度达到 10⁻⁸ ~ 10⁻⁹ (全球范围内达到 cm 至 mm 级),这一突破性的定位精度使得 GPS 测量足以直接检测出地壳运动和构造变形的细微变化,特别适用于沿着板块边界和形变模式复杂的区域形变监测^[1].而 GPS 观测所获得的高分辨率结果是现今地壳运动和反演地球内部的构造变形、物质运移、边界力的可靠数据^[2].

进行 GPS 地壳形变监测的一个主要任务就是求出连续观测站点的漂移速度.传统的测站漂移速度的估计方法^[3-4]是利用不同测段的结果,将参考时刻的站坐标和漂移速度作为未知数建立误差方程求解.但这种方法的缺点是当有很多期的数据需要处理时,法方程会变得很复杂.基于此,本文提出了动态卡尔曼滤波估计测站漂移速度的方法,该方法相对简单于传统的漂移速度估计方法.

1 动态卡尔曼滤波

卡尔曼滤波^[5]是一种基于动态参数的估计方法,前提是观测方程中某些参数满足某一状态方程.测量学中的序贯平差方法是卡尔曼滤波的一种特例,参数在每一观测历元保持常数,即 $X_k = X_{k-1}$.卡尔曼滤波的数学模型主要包含观测方程和状态方程^[6]:

$$\begin{cases} L_k = A_k X_k + \varepsilon_k \\ X_k = \Phi_k X_{k-1} + F \omega_{k-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε_k ——观测噪声向量; ω_{k-1} ——动态噪声向量; A_k, Φ_k, F ——系数阵.卡尔曼滤波的随机模型为

$$\begin{cases} E(\varepsilon_k) = 0 \\ E(\omega_k) = 0 \\ \text{Cov}(\varepsilon_k, \varepsilon_j) = P_k \delta_{kj} \\ \text{Cov}(\omega_k, \omega_j) = Q_k \delta_{kj} \\ \text{Cov}(\omega_k, \varepsilon_j) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_k, Q_k ——动态噪声和观测噪声的方差矩阵; δ_{kj} ——克罗内克(Kronecker)函数, $k = j$ 时为 1, $k \neq j$ 时为 0.系统的初始状态 X_0 是具有正态分布或其他分布的随机向量,其均值和方差阵为

收稿日期 :2008-05-18

基金项目 :现代工程测量国家测绘局重点实验室开放基金(ES-SBSM(06)01)

作者简介 :兰孝奇(1962 —)男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,博士,主要从事变形监测数据处理及 GPS 技术应用研究.

$$\begin{cases} E(X_0) = \hat{X}_{0,0} \\ \text{Var}(X_0) = C_{0,0} \end{cases} \tag{3}$$

综合式(1)~(3)可得到卡尔曼滤波递推公式为

$$\begin{cases} \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k-1} X_{k-1}^0 \\ C_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} C_{k-1,k-1} \Phi^T + F Q_{k-1} F^T \\ \hat{X}_{k,k} = \hat{X}_{k,k-1} + J_k (L_k - A_k \hat{X}_{k,k-1}) \\ C_{k,k} = C_{k,k-1} - J_k A_k C_{k,k-1} \end{cases} \tag{4}$$

式中 J_k 为增益矩阵：

$$J_k = C_{k,k-1} A_k^T (P_k + A_k C_{k,k-1} A_k^T)^{-1} \tag{5}$$

2 动态卡尔曼滤波漂移速度估计的数学模型

使用 GAMIT^[7]软件处理 GPS 数据得到的松弛解 相当于自由网平差结果. 如果只观测了 2 期, 经过相似变换便可得到 2 期的 ITRF 坐标. 2 期坐标相减就可以得到 ITRF 框架下形变点的位移, 除以时间可以得到速度. 实际情况是地壳形变监测网往往经过很多期的观测, 这时一般将参考时刻的坐标和速度作为未知数建立方程联立求解, 但是这样将使数据处理变得非常复杂. 于是本文在动态卡尔曼滤波的基础上, 将 GAMIT 获得的站坐标作为具有方差信息的准观测值(quasi-observations), 建立动态卡尔曼滤波漂移速度估计的数学模型, 使用卡尔曼滤波进行漂移速度的估计.

为了估计某一测站点的漂移速度, 把未知站点的坐标及漂移速度作为状态向量, 把瞬时的加速度看作是一种随机干扰. 这样, 可以得到未知测站点漂移速度估计的状态方程：

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \\ Vx_{k+1} \\ Vy_{k+1} \\ Vz_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \Delta t_{k+1,k} & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t_{k+1,k} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \Delta t_{k+1,k} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \\ Vx_k \\ Vy_k \\ Vz_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \Delta t_{k+1,k}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \Delta t_{k+1,k}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \Delta t_{k+1,k}^2 \\ \Delta t_{k+1,k} & 0 & 0 \\ 0 & \Delta t_{k+1,k} & 0 \\ 0 & 0 & \Delta t_{k+1,k} \end{bmatrix} \Omega_k \tag{6}$$

式中 $(x_k, y_k, z_k, Vx_k, Vy_k, Vz_k)^T$ ——状态向量; $\Delta t_{k+1,k}$ ——相邻 2 期数据的时间间隔; Ω_k ——随机噪声矩阵. 可以把第 1 期数据的站点坐标设为坐标初值, 把漂移速度初值设为零, 然后将其作为未知参数用卡尔曼滤波估计.

把每一期的站坐标作为观测值, 可以得到如下观测方程：

$$L_{k+1} = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ y_{k+1} \\ z_{k+1} \\ Vx_{k+1} \\ Vy_{k+1} \\ Vz_{k+1} \end{bmatrix} + \Delta_{k+1} \tag{7}$$

式中 Δ_{k+1} 为观测噪声矩阵.

综合式(6)和式(7)就可以进行卡尔曼滤波漂移速度估计了.

3 卡尔曼滤波漂移速度估计的实现

3.1 数据准备

为了获得期数足够多的单天解算数据, 从全球 IGS 站点的 FTP 网站^①下载了需要的 GPS 观测数据 d 文

① <http://loox.ucsd.edu>.

件(压缩 o 文件),先利用 GAMIT 进行单天解算,为接着要进行的卡尔曼滤波漂移速度估计做准备.

根据本文建立的动态卡尔曼滤波漂移速度估计的数学模型,算例选用了 BJFS ,LHAS ,SHAO ,URUM , WUHN ,GUAM ,JISC 和 IRKT 8 个 IGS 站点 1997 ~ 2004 年共 16 期 GPS 观测数据,时间间隔约为半年.关于 GAMIT 设置,进行漂移速度估计的站点不约束,其他站点采用强约束 0.003 m 0.003 m 0.01 m.根据参数约束平差原理,这样解算得到的单天解 o 文件中每个站点的坐标可认为是 ITRF2000 框架下的坐标.

16 期单天解算得到的 q 文件中的 Nrms(标准化均方根差)值均小于 0.4(GAMIT 评定解算结果质量好坏的一个标准),详见表 1.

3.2 卡尔曼漂移速度估计的具体实现

由 16 期的 GAMIT 单天解结果得到 16 期 ITRF2000 框架下的空间直角坐标,并把第 1 期单天解算的坐标方差阵及坐标结果作为方差阵初值和坐标初值,设置漂移速度的初值为零,然后进行卡尔曼滤波漂移速度的估计.限于篇幅,表 2 仅列出了 IGS 站点 IRKT 的年漂移速度.

表 1 基线单天解的 Nrms 统计

Table 1 Nrms of single-day baseline solutions		
年份	年积日	Nrms 值
1997	001	0.19
	182	0.23
1998	001	0.21
	183	0.27
1999	001	0.20
	181	0.22
2000	001	0.25
	182	0.32
2001	001	0.24
	182	0.28
2002	001	0.22
	182	0.25
2003	002	0.28
	182	0.27
2004	001	0.27
	182	0.31

表 2 IRKT 站漂移速度估计结果

Table 2 Estimates of floating velocity at IRKT station			
滤波次数	X/(mm·a ⁻¹)	Y/(mm·a ⁻¹)	Z/(mm·a ⁻¹)
1	- 28.44	- 5.03	- 2.70
2	- 23.33	3.81	- 6.45
3	- 25.04	0.35	- 4.70
4	- 28.77	1.05	- 9.11
5	- 23.89	- 0.42	- 2.77
6	- 31.31	- 8.49	- 2.12
7	- 22.35	4.49	- 6.15
8	- 23.93	2.79	- 6.02
9	- 19.53	4.37	- 3.20
10	- 31.61	- 3.29	- 7.63
11	- 26.63	- 3.19	- 2.74
12	- 19.82	9.38	- 8.50
13	- 31.52	- 8.96	- 1.85
14	- 25.94	0.82	- 6.06
15	- 21.77	3.72	- 4.79
平均值	- 25.59	0.09	- 4.99

IGS 公布的 IRKT 站在 1997.0 历元时刻的漂移速度值为 :X = - 25.6mm/a ,Y = 0.5mm/a Z = - 5.4mm/a.本文利用动态卡尔曼滤波漂移速度估计的数学模型计算得到的 IRKT 站漂移速度平均值与 IGS 公布的漂移速度差值均小于 1 mm/a ,证明了该模型的可行性和可靠性,同时该模型的计算结果还能反映出漂移速度的动态变化.

4 结 论

- a. 动态卡尔曼滤波估计测站漂移速度的方法与传统的估计方法^[8-10]相比,动态卡尔曼滤波估计测站漂移速度的方法要相对简单一些,精度能够满足漂移速度估计的要求,且能反映出漂移速度的动态变化情况.
- b. 卡尔曼滤波为 GPS 监测地壳形变的研究提供了一个更好、更有效的方法.

参考文献:

[1] 顾国华,申旭辉,王敏,等.中国大陆现今地壳水平运动基本特征[J].地震学报, 2001, 23(4) 362-369.
[2] 牛之俊,游新兆.中国地壳运动速度场——GAMIT 和 GISPY 解算结果对比[J].大地测量学与地球动力学, 2003, 23(3) 4-8.
[3] 王解先.GPS 精密定轨定位[M].上海:同济大学出版社,1998.
[4] 兰孝奇.GPS 精密变形监测数据处理方法及其应用研究[D].南京:河海大学, 2005.
[5] 崔希璋,於宗涛,陶本藻,等.广义测量平差[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社, 2000.
[6] 刘大杰,陶本藻.实用测量数据处理方法[M].北京:测绘出版社, 2000.
[7] Department of Earth ,Atmospheric ,and Planetary Sciences. Documentation for the GAMIT GPS analysis software[R]. Cambridge : Massachusetts Institute of Technology ,1999.

[8] 孟国杰,赵承坤,顾国华,等.中国地壳运动观测网络首期观测数据处理[J].地震,2001,21(1):63-68.
[9] 葛恒年.GPS 地壳形变监测数据处理及大气水汽含量反演计算的研究[D].南京:河海大学,2006.
[10] 陆彩平,王解先.GPS 监测地壳数据处理[J].大地测量学与地球动力学,2002,22(4):56-60.

Floating velocity calculation in GPS crustal deformation monitoring

LAN Xiao-qi¹, GE Heng-nian²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Kunming Investigation, Design and Research Institute, Kunming 650051, China)

Abstract: Based on the dynamic Kalman Filter theory and the characteristics of data processing of GPS crustal deformation monitoring, a calculation model of floating velocity with a dynamic Kalman Filter was established. At first, the highly precise coordinates were calculated using many periods of data from some IGS stations and GAMIT software. Then, the obtained coordinates were considered as quasi-observations, and the velocities were considered as unknown variations and were computed with a Kalman Filter. A comparison of calculated and measured data shows that the presented model has a precision of several millimeters. So the model can be used for floating velocity estimation in GPS crustal deformation monitoring.

Key words: GPS; crustal deformation; Kalman Filter; floating velocity

《河海大学学报(自然科学版)》征订启事

(邮发代号 28-63, CN32-1117/TV, ISSN1000-1980, 双月刊)

《河海大学学报(自然科学版)》是以水资源开发、利用与保护为重点的综合性学术期刊,主要刊登河海大学在水资源、水文、地质、测量、水利工程、水电工程、水运工程、海洋及海岸工程、水工结构、工程力学、水力学及河流动力学、岩土工程、计算机科学、电力工程、电子技术及自动化工程、工业与民用建筑、管理工程、水利经济、环境工程、机械工程等学科方面的科研成果、学术论文、学术讨论、研究动态等学术性文章,可供上述有关专业的科技工作者及大专院校师生阅读和参考。

《河海大学学报(自然科学版)》创办于 1957 年,是全国中文核心期刊、中国科技核心期刊,在国内工程技术界和学术界有较大影响。刊载的文章中,有不少国家科技攻关(重点)项目和各种科学基金资助项目的研究成果,部分达到了国内领先和国际先进水平,为我国水利、水电、水运工程及其他有关工程建设的规划、设计、施工和管理提供了科学理论、方法和具体建议,发挥了较大的社会效益和经济效益,深受工程界和科技界赞许,并获得首届中国高校优秀科技期刊奖以及中国期刊方阵“双效期刊”、江苏省优秀期刊、全国水利系统优秀期刊称号。

《河海大学学报(自然科学版)》每逢单月出版,国内外公开发行,每期定价 12.00 元,全年 6 期共 72.00 元。欢迎广大读者通过全国各地邮政局订阅或直接与编辑部联系。编辑部地址:210098 南京市西康路 1 号《河海大学学报(自然科学版)》编辑部;联系电话:025-83786343;E-mail:xb@hhu.edu.cn。