

# 自适应选权滤波法在 GPS 高精度动态定位中的应用\*

任超<sup>1,2</sup> 欧吉坤<sup>1</sup> 袁运斌<sup>1</sup>

1. 中国科学院测量与地球物理研究所, 武汉 430077; 2. 桂林工学院, 桂林 541004

**摘要** 介绍了一种新的滤波算法: 自适应选权滤波法. 在进一步理论分析和研究的基础上, 将其拓展用于单频载波相位双差观测值的 GPS 高精度动态定位中. 文中给出两个算例来验证方法的可用性和有效性. 初步结果表明, 对于短基线, 新方法采用 GPS 单频载波相位双差观测值可得到高精度的动态定位结果.

**关键词** 自适应滤波 参数权因子 GPS 高精度动态定位

Kalman 滤波已广泛用于大地测量动态定位领域<sup>[1,2]</sup>. 但是当观测值受到污染或动态模型不够准确时, 滤波结果的可靠性和精度将被削弱. 为此, 国内外学者提出了多种改进 Kalman 滤波算法<sup>[3-6]</sup>. 然而, 这些方法仍在某些方面有待完善. 如自适应滤波<sup>[3,4]</sup>由于在一个选定的时间窗口内对协方差矩阵进行了平滑, 它不能控制载体运动异常的影响, 任何观测异常或状态异常都将影响状态参数的估计结果; 当动态模型和观测值都受到粗差污染时, 抗差滤波<sup>[5]</sup>无法将其区分, 因此也无法同时确定观测值和参数的等价权; 自适应抗差滤波<sup>[6]</sup>没有考虑不同参数的不同特性, 对某些参数的自适应会影响其他参数的解算. 另外, 目前研究 Kalman 滤波的大量文献中, 所用的观测值或是 GPS 和其他系统数据的融合<sup>[3,4]</sup>, 或是 GPS 测码伪距<sup>[6]</sup>, 仅采用载波相位观测值的文献仍不多, 尤其是对单频情形. 但是多系统数据融合对硬件具有较高的要求, 只使用伪距观测值又难以满足高精度动态定位的要求, 这些都限制了 GPS 高精度动态定位应用.

本文介绍了自适应选权滤波方法<sup>[7]</sup>, 并将这种方法应用于使用单频接收机的 GPS 高精度动态定位中. 结果表明: 在短基线条件下, 只用 GPS 单频载波相位双差观测值可得到 GPS 高精度动态定位结

果, 而且新方法只在发生周跳时才重新解算整周模糊度, 极大减轻了计算负担. 新方法在动态定位领域具有使用和参考价值.

## 1 自适应选权滤波

针对现有方法存在的不足, 欧吉坤提出了自适应选权滤波法<sup>[7]</sup>. 新方法将状态参数按一定指标分成两类: 正常参数和异常参数. 正常参数指的是状态参数与载体实际运动信息吻合较好, 异常参数则指状态参数和实际信息有较大差异. 对每个预报参数, 给定一自适应因子  $w_i$ ,  $w_i$  可用下式确定

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{正常} \\ 0, & \text{异常} \end{cases} \quad (1)$$

对应全部状态参数, 构成等价权因子阵  $W$

$$W = \text{diag}(w_i), i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$\text{diag}(\cdot)$  指对角阵.

将  $W$  作用于状态参数原权阵  $P_{X,k+1}$  两边, 可得状态参数的等价权阵  $\bar{P}_{X,k+1}$

$$\bar{P}_{X,k+1} = W P_{X,k+1} W. \quad (3)$$

2004-09-17 收稿, 2005-01-06 收修稿

\* 国家自然科学基金(批准号: 40204001)和中国科学院知识创新工程领域前沿项目(批准号: 030185)资助

\*\* E-mail: renchao74@hotmail.com

用这种方式构造的等价权阵有明显的特点：异常参数所对应的等价权阵的行和列都是零。利用这种方法可以消除状态参数异常的影响。以下是自适应滤波的数学模型。

设 Kalman 滤波线性方程为

$$X_{k+1} = \Phi_{k+1} X_k + \Gamma_{k+1,k} \varepsilon_k, \quad (4)$$

$$l_{k+1} = A_{k+1} X_{k+1} + e_{k+1}, \quad (5)$$

式中  $\Phi_{k+1,k}$  为已知的状态转移矩阵； $X_k$  为  $n$  维状态向量， $X_k = [X_c^T \ X_s^T \ N^T]^T$ ，包含位置、速度、模糊度等参数； $\Gamma_{k+1,k}$  为动态噪声的干扰系数矩阵； $\varepsilon_k$  为动态噪声； $l$  为载波相位双差观测值向量； $A_{k+1}$  为设计矩阵， $A_{k+1} = [A_{c,k+1}, 0, B_{k+1}]$ ， $A_{c,k+1}, 0, B_{k+1}$  分别为对应于位置、速度、整周模糊度的设计矩阵； $k+1$  和  $k$  表示观测历元；随机误差向量  $\varepsilon_{k+1}$ ， $e_{k+1}$  期望均为零，彼此互不相关，其协方差矩阵分别为  $\Sigma_{\varepsilon_{k+1}}$  和  $R_{k+1}$ 。

记第  $k+1$  历元滤波值与其预测值之差为  $\delta X$ ，即

$$\delta X_{k+1} = \hat{X}_{k+1} - \hat{X}_{k+1,k}, \quad (6)$$

又记新息向量为  $\bar{V}$ ，它是观测值与其预测值之差，即

$$\bar{V}_{k+1} = l_{k+1} - A_{k+1} \hat{X}_{k+1,k}, \quad (7)$$

则自适应选权滤波解为

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k+1} &= \hat{X}_{k+1,k} + \delta X_{k+1} = \hat{X}_{k+1,k} + \tilde{K}_{k+1} \bar{V}_{k+1} \\ \tilde{K}_{k+1} &= (A_{k+1}^T \bar{P}_{k+1} A_{k+1} + \bar{P}_{X,k+1})^{-1} A_{k+1}^T \bar{P}_{k+1}, \end{aligned} \quad (8)$$

且  $\Sigma_{k+1} = (A_{k+1}^T \bar{P}_{k+1} A_{k+1} + \bar{P}_{X,k+1})$ ， $\Sigma_{k+1}$  为参数向量在  $k+1$  历元的协方差阵。

新方法的特点是对状态参数的个体选权，最后给出的等价权是对称的，能削弱或消除异常状态对滤波结果的影响。

## 2 GPS 高精度动态定位中应用的自适应选权滤波

自适应选权滤波的关键是如何判断状态参数是否异常。这要求对滤波的动态模型和状态参数进行分析。

以往文献中讨论的多是 Kalman 滤波的动态模型<sup>[8,9]</sup>，没有对预报参数自身进行分析。对于高精度

GPS 动态定位，一般情况下，载体的运动不稳定，会有突然加速或减速的现象，位置和速度预报信息一般难以准确反映载体的实际运行状况。

本文对预报参数自身进行了分析，将其分为时变参数和非时变参数两类。由于位置和速度预报信息各时刻不同，它们为时变参数；整周模糊度不受载体机动和观测时间的影响，如果没有周跳或信号失锁，其值可以准确预报，故整周模糊度为非时变参数。由于动态模型不能准确获得，故时变参数的噪声方差大，预报权小，其对滤波的最终结果影响也较小，本文基本保留其预报信息，取其自适应因子为 1。而非时变参数噪声方差小，权大，且整周模糊度一旦确定，就可得到一个高精度的 GPS 动态定位结果。因此本文着重讨论整周模糊度自适应因子的选取。

判断整周模糊度的预报参数是否异常即是要判断是否有周跳发生。当周跳未能探测或修复时，定位结果错误，观测值残差也会出现偏差<sup>[10,11]</sup>，且偏差呈现系统性。令：

$$dV_{t+1} = V_{t+1} - V_t, \quad (9)$$

未发生周跳时，对于短基线， $dV$  主要由观测误差决定，有周跳时，历元对应的残差受到周跳影响，会出现比较大的波动。故可定义一条件式来判断是否发生周跳。

$$|dV_t| < \alpha \quad (10)$$

式中， $dV$  为两相邻历元的残差之差， $\alpha$  为一给定的常数，可取 0.012—0.02 m。当上式满足时，可以确定没有周跳发生；否则，认为有周跳发生，需要重新进行整周模糊度的解算。

当判断出有周跳发生时，可利用 QUAD 法来判断那些卫星发生周跳<sup>[11]</sup>，则对应的整周模糊度的自适应因子  $w_i$  可由下式确定

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{不存在周跳} \\ 0, & \text{存在周跳} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad (11)$$

等价权因子阵  $W = \text{diag}(I_3 I_3 w_1 \dots w_m)$ ， $m$  为待定的整周模糊度个数。

### 3 算例分析和讨论

下面列举两个算例来说明自适应选权滤波法在动态定位中的作用. 其中一例用模拟数据来检验算法, 另一例用实测数据来验证效果.

#### 3.1 先验信息

数据处理时应用 Kalman 滤波的常速度模型<sup>[2]</sup>. 取位置初始方差为  $0.2 \text{ m}^2$ , 速度初始方差为  $9 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ , 模糊度初始化后方差取  $10^{-4} \text{ m}^2$ . 时变参数的动态模型的噪声协方差阵为

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{3} Q_x \Delta t^3 & \frac{1}{2} Q_x \Delta t^2 \\ \frac{1}{2} Q_x \Delta t^2 & Q_x \Delta t \end{bmatrix}, \text{ 式中 } Q_x \text{ 为速度的谱密度,}$$

取为  $0.2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ , 整周模糊度的动态噪声方差取为  $0 \text{ m}^2$ . 载波相位观测值的方差取为  $4 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ .

#### 3.2 处理方案

采用以下 3 种方案进行数据处理, 方案中模糊度均采用 LAMBDA 方法<sup>[12]</sup>固定.

方案 1: 最小二乘法; 采用双频载波相位和 P 码伪距观测值联合解算, 此方法定位结果作为“真值”;

方案 2: 经典 Kalman 滤波, 只采用 L1 单频载波相位双差观测值;

方案 3: 自适应选权滤波; 只采用 L1 单频载波相位双差观测值.

#### 3.3 算例 1 模拟数据

取一段 80 历元的动态观测数据进行处理. 数据中共有 4 个双差卫星对, 依次是 10—8, 24—8, 4—8, 6—8. 根据双频载波相位和 P 码联合解算结果, 这段时间内没有周跳发生. 为了验证自适应选权滤波法的效果, 在第 21 历元对 24—8 卫星对加正一周的周跳, 对第 50 历元的 10—8, 6—8 卫星对分别加负两周和正三周的周跳. 以下是得到的部分结果:

利用方案 3, 在第 20, 21 历元解  $dv$  得分别为:  $(0.0005, -0.0017, -0.0007, -0.0009)^T$ ,  $(0.0365, -0.1222, -0.0535, -0.0679)^T$ . 明显地, 在第 21 历元有周跳发生, 利用 QUAD 法<sup>[11]</sup>可判断出发生周跳的卫星对为 24—8. 相对应地, 在第 21 历元此卫星对的模糊度参数自适应因子取 0,  $W = \text{diag}(I_6 \quad 1 \quad 0 \quad 1 \quad 1)$ , 此时, 对应于模糊

度参数等价权矩阵为

$$\begin{bmatrix} 10000.1448 & 0.0000 & -0.0227 & -0.0190 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0277 & 0.0000 & 10000.0036 & 0.0077 \\ 0.0490 & 0.0000 & 0.0077 & 10000.0166 \end{bmatrix},$$

卫星对 24—8 模糊度参数对应的权为 0, 预报信息不起作用. 与模糊度有关的等价权增益矩阵  $\tilde{K}_N$  为

$$\begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ -5.0683 & 5.2550 & 0.7848 & 1.7237 \\ -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}.$$

可以看出, 除了卫星对 24—8 外, 其余卫星对对应的行都接近于零, 说明只有发生周跳的卫星对才能通过增益矩阵从观测信息中获得增益信息. 整周模糊度的浮动解为  $[0.0000 \quad 0.9604 \quad -0.0000 \quad -0.0000]$ , 与真值  $[0 \quad 1 \quad 0 \quad 0]$  非常接近. 模糊度的协方差阵为

$$\Sigma_N = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0001 & 128.3312 & -0.0000 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & 0.0001 & -0.0000 \\ 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0001 \end{bmatrix},$$

很明显该矩阵近似为对角阵, 可用直接取整法来固定模糊度. 由于第 50 历元的结果与此历元结果的类似, 这里没有列出.

方案 2 和 3 的定位结果与“真值”之差如图 1 所示. 图 1 中的  $Dx$  为  $X$  分量的定位结果之差. 图 2 和图 3 分别给出了 Kalman 滤波和自适应选权滤波解算的卫星对 24—8 的残差及相邻历元的残差之差. 由于其他卫星对的情形与卫星对 24—8 类似, 这里没有给出.

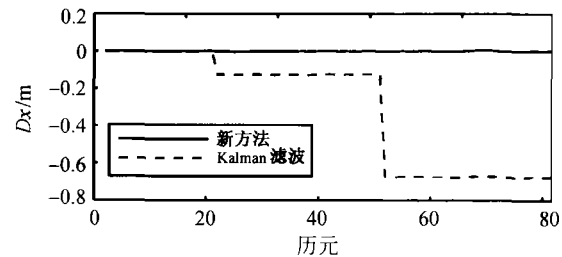


图 1 Kalman 滤波和自适应选权滤波法定位结果与真值之差的比较

从图 1 可以看出在发生周跳的历元(21 和

50), Kalman 滤波定位结果出现跳跃, 明显偏离真值, 说明 Kalman 滤波无法克服周跳的影响. 而自适应选取滤波法定位结果则和真值吻合较好, 说明自适应选权滤波能对周跳进行有效的探测和修复.

从图 2 可以看出, 由于 Kalman 滤波未能探测

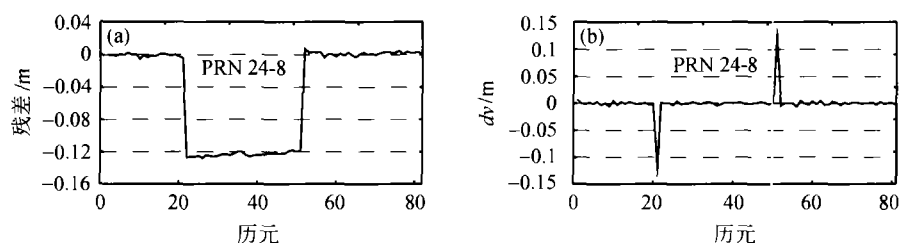


图 2 Kalman 滤波解算的残差及相邻历元的残差之差

(a) 观测值残差; (b) 残差之差

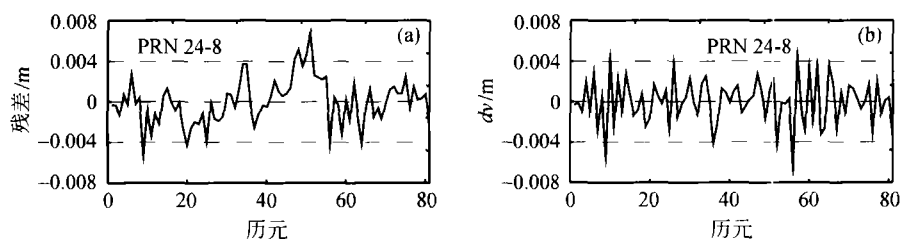


图 3 自适应选权滤波解算的残差及相邻历元的残差之差

(a) 观测值残差; (b) 残差之差

### 3.4 算例 2 实测动态数据

我们在中国科学院测量与地球物理研究所主楼楼顶建立了一个环形轨道系统, 这是一个由直轨和环形轨道组成的双轨系统, 直轨长 10 m, 环轨直径为 6.5 m, 两内轨间距为 5.5 m, 内轨与外轨间距为 0.8 m. 可在一沿轨道运行的小车上安置一台接收机来测试其在外轨运行的轨迹, 用于动态定位的试验. 2002 年 3 月 31 日, 利用两台 JAVAD Legacy 双频接收机在此系统上进行了动态实验. 流动站接收机被安置在小车上, 基准站距静态初始点大约 100 m, 小车先在轨道上一已知点进行一段时间的静止观测, 进行整周模糊度的初始化, 先沿轨道的

到周跳, 在周跳出现的历元残差明显增大, 这两次周跳可通过计算的相邻历元残差之差探测出, 因此利用残差之差来探测周跳是合理的. 而图 3 中周跳修复后的残差及残差之差都呈期望为 0 的随机分布特征, 这可作为周跳修复是否成功的标志之一.

直线部分往复运动, 而后沿整个环形轨道进行运动. 共观测了 20 min, 选取了其中 1000 个历元进行数据处理. 采样间隔为 1 s, 截止高度角为  $10^\circ$ , 共观测到 5 颗卫星. 在观测过程中卫星数没有发生变化, 取 4 号星为基准星, 组成 4 个观测卫星对: 10—4, 24—4, 26—4, 6—4.

同样利用以上 3 种方案进行处理, 方案 3 确定的小车运行轨迹如图 4 所示, 运行过程中观测值的周跳如图 5 所示. 表 1, 2 分别列出了利用方案 2, 3 的定位结果与真值之差的统计和不同方案解算模糊度结果.

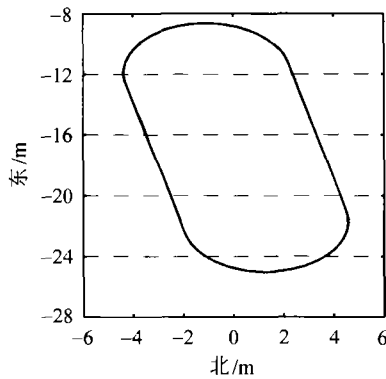


图4 相对于基站的流动站运行轨迹

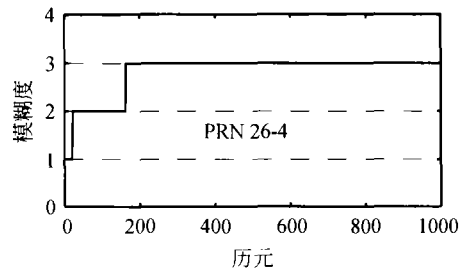


图5 观测时段内整周模糊度的跳变

表1 方案2,3定位结果与真值之差的统计

(单位: mm)

	最小差值 (绝对值)			最小差值 (绝对值)			平均差值			外符合精度 $\sigma'$		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$
方案2	0	0	0	23	390	253	4	295	-195	11	84	46
方案3	0	0	0	6	47	33	1	3	-1	2	6	3

a) 以X方向为例,  $\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^s (x_{e,i} - x_{t,i})^2 / s}$ , 式中  $x_{e,i}$  为第  $i$  历元利用方案2或3得到的X估值,  $x_{t,i}$  为此历元的位置“真值”,  $s$  为处理的总历元数.

表2 不同方案模糊度解算成功率的比较

总历元数	所要重解模糊度 的历元数	模糊度解算正确 的历元数	模糊度解算错误 的历元数	模糊度不能固定 的历元数
方案1	1000	948	0	52
方案2	1000	21	979	0
方案3	1000	1000	0	0

小车在整个闭合轨道上运动,运动速度一直在变化,从图4可以看出,解算出的小车运行轨迹和实际轨道吻合较好.这说明新方法可以有效克服动态模型误差的影响.除周跳以外,观测值粗差也会使观测值残差发生大的变化,同样需要整周模糊度的重新固定.采用方案3时,在此1000个历元的数据中,共有9个历元需要重新解算整周模糊度(表2).总的来说,利用自适应选权滤波使动态过程中需要解算整周模糊度的历元大大减少,极大减轻了计算负担,而且具有最高的模糊度解算成功率(表2).

#### 4 讨论和建议

经典 Kalman 滤波无法克服周跳的影响.当有周跳发生时,定位结果出现比较大的偏差;笔者分析了

GPS 高精度动态定位的特性,将自适应选权滤波拓展性地用于 GPS 高精度动态定位,根据预报参数自身的不同特性选择不同的自适应因子,可以消除或降低预报误差的影响,更符合动态定位的实际;自适应选权滤波只对不满足条件的历元进行整周模糊度搜索,而且此时模糊度协方差矩阵近似为对角阵,给模糊度的搜索带来了很大方便,极大减轻了计算负担;对于短基线,新方法用单频载波相位双差观测值可得到较高精度的定位结果,在动态定位中具有一定的适用性.然而,本文所做的只是低动态情况下载体的运动,周跳也只是发生在一颗卫星上,对于高动态,多卫星同时发生周跳的情况需要进一步的理论分析和应用研究.

参 考 文 献

- 1 Brown R G, et al. Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering. New York: John Wiley Sons Inc, 1992, 372
- 2 Schwarz K P, et al. A comparison of GPS kinematic models for the determination of position and velocity along a trajectory. *Mauscr Geod*, 1989, 14, 345
- 3 Mohamed, A H, et al. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS. *Journal of Geodesy*, 1999, 73(4): 193
- 4 Wang J, et al. Adaptive Kalman filtering for integration of GPS with GLONASS and INS. In: *Proceeding of the XXIIth International Union for Geodesy and Geophysics (IUGG)*, Birmingham, 1999
- 5 Koch K R, et al. Robust Kalman filter for rank deficient observation models. *Journal of Geodesy*, 1998, 72(8): 436
- 6 Yang Y, et al. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning. *Journal of Geodesy*, 2001, 75(2—3): 109
- 7 欧吉坤,等. 自适应选权滤波. 见:朱耀仲等编,大地测量与地球动力学进展,武汉:湖北科学技术出版社,2004,816
- 8 Chie U, et al. Dynamic models for carrier-phase kinematic GPS positioning. In: *Proceedings of ION GPS/GNSS 2003*, Portland, 2003, 809
- 9 David F H, et al. New Kalman filter formulation for GPS delta pseudo range processing. In: *Proceedings of ION GPS/GNSS 1998*, Nashville, 1998, 1395
- 10 He H B, et al. Detection of successive cycle slips for Kinematic GPS Positioning. *Acta Geodætica et Cartographica Sinca* (in Chinese), 1999, 28(3): 195
- 11 Han B M. Detection and repair of continuous cycle slips in GPS carrier-phase data using QUAD method. In: *Proceeding of ION GPS/GNSS 2002*, Portland, 2002, 1353
- 12 Teunissen P J G. The least-squares ambiguity decorrelation adjustment: A method for fast GPS integer ambiguity estimation. *Journal of Geodesy*, 1995, 70(1—2): 65