

基于自适应衰减因子 Kalman 滤波的 GPS 相位平滑伪距算法

崔法毅, 解文肖

(燕山大学 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 载波相位平滑伪距的主要目的是通过高精度的载波相位测量值作为辅助量, 使伪距测量值中、大随机误差得以消减。针对 GPS 伪距测量中未知时变的噪声, 提出基于极大后验时变噪声统计估计器的自适应衰减因子 Kalman 滤波算法(AFKF), 采用衰减的加权因子, 使估计器逐渐忘记陈旧数据的作用, 同时增加新数据的比重, 避免滤波过程的发散。结合载波相位平滑伪距原理, 利用 AFKF 算法对全球导航卫星系统(GNSS)的国际 GNSS 服务组织(IGS)的跟踪站实测数据进行仿真分析, 并提出利用伪距双差值及伪距三差值来直观体现不同算法的效果比较, 结果表明: 与标准 Kalman 滤波相比, AFKF 算法在伪距平滑应用中取得很好的效果。

关键词: 全球定位系统; 相位平滑伪距; 极大后验估计; 自适应衰减因子卡尔曼滤波

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)01-0377-07

Algorithm of GPS phase smoothing pseudo-range based on adaptive attenuation factor Kalman filtering

Cui Fayi, Xie Wenxiao

(Measurement Technology and Instrumentation Key Lab of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The main purpose of carrier phase smoothing pseudo-range is to reduce large random error of pseudo-range measurement values, by using high-precision carrier phase measurement values as the supplementary information. In view of the unknown time-varying noise in GPS pseudo-range measurement, an algorithm of adaptive attenuation factor kalman filter (AFKF) was put forward, which was based on maximum a posteriori (MAP) time-varying noise statistical estimator. In order to avoid the divergence of filtering process, the effect of old data could be gradually forgotten by using estimator with attenuation weighted factors, while the proportion of new data could be increased. Simulation analysis was carried out on the measured data of tracking station of a International Global Navigation Satellite System Service (IGS), by using the AFKF algorithm combining with carrier phase smoothing pseudo-range principle. And the double differential and the three differential pseudo-ranges were proposed to intuitively reflect the effects of different algorithms. Experimental results show that the AFKF algorithm can obtain better effect in application of pseudo-range smoothing, compared with the standard KF algorithm.

Key words: GPS; phase smoothing pseudo-range; maximum a posteriori estimation; AFKF

收稿日期: 2014-05-08; 修订日期: 2014-06-10

基金项目: 秦皇岛市科学技术研究与发展计划(2012021A004)

作者简介: 崔法毅(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事计算机视觉、模式识别、嵌入式系统设计方面的研究。Email: fayi2001@sina.com

0 引言

GPS 定位测量分为码测量和载波相位测量,两种测量方法都能计算出用户到卫星的距离,从而解算出用户的三维位置。但是两种测量都存在一定的误差,都会受到卫星时钟误差、电离层和对流层折射以及接收机钟偏误差的影响。载波相位测量的精度为毫米级,码测量的精度为米级,但载波相位测量引入了整周模糊度,而码测量不存在这个问题^[1-2]。若将无噪但有整周模糊度的载波相位测量与有噪但无整周模糊度的码测量融合起来,可以大大减少数据处理的时间、提高测码伪距的精度,从而提高定位解算精度。基于这种思想的方法就是载波相位平滑伪距测量法。

标准 Kalman 滤波器(KF)是通过预测估计对观测测量进行修正来得到最优状态估计的,是 GPS 定位过程中常用的经典方法,它要求已知系统的状态方程和观测方程、量测噪声的先验统计特性及状态初始条件^[3],但是在 GPS 定位中,测量噪声的统计特性未知,而且系统模型也不是精确已知的,这种条件下应用标准 KF 将会产生较大估计误差,甚至滤波发散,滤波后的伪距值误差可能比原观测值还大^[4]。为了得到更好的滤波效果,防止滤波器发散,结合相位平滑伪距原理对标准 KF 进行改进,利用极大后验(MAP)原理对状态向量估计的同时对系统噪声和观测噪声的统计特性进行估计,并取随时间逐步衰减的变化权重,形成自适应衰减因子 Kalman 滤波器(AFKF)。

文中介绍了载波相位平滑伪距算法的原理,提出用 AFKF 对伪距值进行滤波平滑,并下载 IGS 跟踪站实测数据,自编程序实现算法的验证。

1 载波相位平滑伪距原理

当载波连续跟踪时,可以由载波相位测量得到两个历元间的伪距变化量,这个变化量精度很高,而且没有模糊度问题。载波相位平滑伪距就利用这些高精度的伪距变化量来修正伪距观测值,并用适当方法确定平滑权因子,得到精度较高的伪距值。

载波相位测量用长度单位表示,测码伪距观测方程和载波相位观测方程表示为^[1]:

$$\rho(t)=r(t)+c[\delta t_u(t)-\delta t^s(t-\tau)]+I(t)+T(t)+Dpmp(t)+\varepsilon_p(t) \quad (1)$$

$$\lambda(\phi(t)+N)=r(t)+c[\delta t_u(t)-\delta t^s(t-\tau)]-I(t)+T(t)+D\phi mp(t)+\varepsilon_\phi(t) \quad (2)$$

$$r(t)=\sqrt{[X_u(t)-X^s(t)]^T[X_u(t)-X^s(t)]} \quad (3)$$

式中: $\rho(t)$ 、 $\phi(t)$ 分别为伪距和载波相位的观测值; $r(t)$ 为用户接收机到卫星的几何距离; $X_u(t)$ 、 $X^s(t)$ 分别为用户和卫星的三维坐标向量; $\delta t_u(t)$ 、 $\delta t^s(t-\tau)$ 分别为用户接收机和卫星的时钟偏差,其中, τ 为信号的传输时间; $I(t)$ 、 $T(t)$ 分别为电离层和对流层的延迟误差; $Dpmp(t)$ 、 $D\phi mp(t)$ 分别为伪距和载波相位的多径效应误差; $\varepsilon_p(t)$ 、 $\varepsilon_\phi(t)$ 分别为测码伪距和载波相位的观测噪声; N 为未知整周模糊度; c 为光速; λ 为载波波长。

公式(2)中存在整周模糊度 N ,在连续跟踪测量过程中,整周模糊度保持不变,所以采用历元间的载波相位变化量来消去 N ,用于平滑测码伪距观测值。则相邻历元的载波相位变化量为公式(4)。对相邻两个历元的测码伪距值求差,得到伪距变化量为公式(5)。

$$\lambda(\phi(t_i)+N)-\lambda(\phi(t_{i-1})+N)=\lambda(\phi(t_i)-\phi(t_{i-1}))=r(t_i)-r(t_{i-1})-[I(t_i)-I(t_{i-1})]+\varepsilon_\phi(t_i)-\varepsilon_\phi(t_{i-1}) \quad (4)$$

$$\Delta\rho(t_i)=\rho(t_i)-\rho(t_{i-1})=r(t_i)-r(t_{i-1})+[I(t_i)-I(t_{i-1})]+\varepsilon_p(t_i)-\varepsilon_p(t_{i-1}) \quad (5)$$

公式(4)和公式(5)中存在电离层延迟变化的影响,可利用不同频率上的伪距观测值,求得电离层的延迟量如公式(6)。

$$I=(P_1-P_2)\frac{f_2^2}{f_2^2-f_1^2}=\frac{P_1-P_2}{1-\eta} \quad (6)$$

式中: $\eta=f_1^2/f_2^2$, f_1 、 f_2 为载波频率, P_1 、 P_2 为调制在载波 L_1 、 L_2 上的伪距观测值。

由于伪距观测值的精度较低,考虑用载波相位观测值计算电离层延迟,如公式(7),则相邻历元的电离层延迟变化量会消去模糊度的影响,如公式(8)。故用载波相位测量的变化量来表示伪距变化量的精确估算值,将公式(4)、(8)代入公式(5),由 t_{i-1} 历元的伪距观测值递推到 t_i 历元,得到 t_i 历元的伪距观测值,如公式(9)。

$$I=\frac{(\phi_1-\lambda_1N_1)-(\phi_2-\lambda_2N_2)}{\eta-1}=\frac{(\phi_1-\phi_2)-(\lambda_1N_1-\lambda_2N_2)}{\eta-1} \quad (7)$$

$$\Delta I=I(t_i)-I(t_{i-1})=\frac{\Delta\phi_1-\Delta\phi_2}{\eta-1} \quad (8)$$

$$\hat{\rho}(t_i)=\rho(t_{i-1})+\Delta\hat{\rho}(t_i)=\rho(t_{i-1})+\lambda[\phi(t_i)-\phi(t_{i-1})]+2\Delta I \quad (9)$$

某一历元的伪距实际观测值和预测值经过适当的权相加,得到该历元的伪距估计值,这一估计值就是经过载波相位平滑的伪距值,其递归计算公式为公式(10)。

$$\hat{\rho}(t_i) = k \cdot \rho(t_i) + (1-k)[\hat{\rho}(t_{i-1}) + \lambda(\phi(t_i) - \phi(t_{i-1})) + 2\Delta I] \quad (10)$$

式中: k 为平滑权因子,初始值 $\hat{\rho}(t_1) = \rho(t_1)$ 。

2 标准 Kalman 滤波

设离散时间系统的模型如下:

$$\begin{aligned} X(k) &= \Phi(k, k-1)X(k-1) + \omega(k-1) \\ y(k) &= H(k)X(k) + v(k) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $X(k)$ 、 $y(k)$ 分别为 k 时刻的状态变量和观测值; $\Phi(k, k-1)$ 为一步状态转移矩阵; $H(k)$ 为观测矩阵; $\omega(k)$ 为过程噪声阵,其均值和方差分别为 q 和 $Q(k)$, $v(k)$ 为测量噪声阵,其均值和方差分别为 q 和 $R(k)$ 。

在标准 Kalman 滤波器中, $\omega(k)$ 和 $v(k)$ 为零均值白噪声,其统计特性已知,滤波过程如图 1 所示。通过给定初始条件并输入 $k(k=1, 2, 3, \dots)$ 时刻的观测值 $y(k)$,不断地通过反馈校正,逐步递推估计出每个 k 时刻的状态值 $\hat{X}(k, k)$ ^[5]。

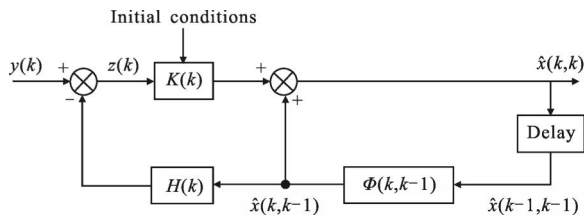


图 1 卡尔曼滤波器框图

Fig.1 Kalman filter block diagram

递推方程如公式(12)~(19)^[6]。

状态预测:

$$\hat{X}(k, k-1) = \Phi(k, k-1)\hat{X}(k-1, k-1) \quad (12)$$

误差协方差预测:

$$P(k, k-1) = \Phi(k, k-1)P(k-1, k-1)\Phi^T(k, k-1) + Q(k-1) \quad (13)$$

状态估计校正:

$$\hat{X}(k, k) = \hat{X}(k, k-1) + K(k)z(k) \quad (14)$$

新息(残差)序列:

$$z(k) = y(k) - H(k)\hat{X}(k, k-1) \quad (15)$$

Kalman 滤波增益:

$$K(k) = P(k, k-1)H^T(k)[H(k)P(k, k-1)H^T(k) + R(k)]^{-1} \quad (16)$$

误差协方差估计校正:

$$P(k, k) = [I - K(k)H(k)]P(k, k-1) \quad (17)$$

初始条件:

$$\hat{X}(0, 0) = E[X(0)] \quad (18)$$

$$P(0, 0) = \text{Var}[X(0)] = E[(X(0) - \hat{X}(0, 0))(X(0) - \hat{X}(0, 0))^T] \quad (19)$$

将公式(10)变形为公式(20),与 Kalman 滤波器的状态估计方程式(14)相对比,并简化为一维形式,可以得到对应的变量参数如公式(21)。

$$\begin{aligned} \hat{\rho}(t_i) &= [\hat{\rho}(t_{i-1}) + \lambda(\phi(t_i) - \phi(t_{i-1})) + 2\Delta I] + k \cdot \\ & \{ \rho(t_i) - [\hat{\rho}(t_{i-1}) + \lambda(\phi(t_i) - \phi(t_{i-1})) + 2\Delta I] \} \quad (20) \\ \hat{X}(k, k-1) &= \hat{\rho}(t_{k-1}) + \lambda(\varphi(t_k) - \varphi(t_{k-1})) + 2\Delta I \\ \hat{X}(k, k) &= \hat{\rho}(t_k) \\ y(k) &= \rho(t_k) \\ K(k) &= k \\ H(k) &= 1 \\ \Phi(k, k-1) &= \hat{X}(k, k-1)\hat{X}(k-1, k-1)^{-1} = \\ & 1 + \frac{\lambda(\varphi(t_k) - \varphi(t_{k-1})) + 2\Delta I}{\hat{\rho}(t_{k-1})} \end{aligned} \quad (21)$$

式中: $\hat{X}(k, k)$ 为伪距估算值; $\hat{X}(k, k-1)$ 为由载波相位变化量估算的一步预测伪距值; $y(k)$ 为伪距实时观测值; $K(k)$ 为滤波权因子,即滤波增益,观测矩阵 H 为 1,状态转移矩阵 Φ 约等于 1,为避免取近似带来的误差,故保留其原值。

3 基于自适应衰减因子 Kalman 滤波(AFKF)的伪距平滑算法

标准卡尔曼滤波算法要求已知噪声方差,而在 GPS 定位中,噪声的统计特性一般都未知且时变,此时就无法正确建立系统数学模型,很有可能导致滤波发散。即使建立了正确的模型,但是在实际运行过程中会存在一些不确定因素导致数学模型摄动, Q 、 R 在此过程中有所改变^[7]。为了保证滤波效果不变,就要控制增益矩阵 K 的变化,所以要率先对 Q 和 R 进行估计,然后反馈给增益 K 。

3.1 极大后验(MAP)噪声估计器

基于极大后验(Maximum A Posteriori, MAP)估计原理和观测值,在标准 Kalman 滤波的基本条件下,对系统噪声和观测噪声的统计特性进行实时修

正和估计,得到 Q 和 R 的次优无偏MAP 常值噪声统计估计器为公式(22)~(23)。

$$R(k)=\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [z(k)z^T(k)-H(k)P(k,k-1)H^T(k)] \quad (22)$$

$$Q(k)=\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k [K(k)z(k)z^T(k)K^T(k)+P(k,k)-\Phi(k,k-1)P(k-1,k-1)\Phi^T(k,k-1)] \quad (23)$$

则可以得到 Q 和 R 的次优无偏 MAP 估计器的递推方程为公式(24)~(25)。

$$R(k)=\frac{1}{k} [(k-1)R(k)+z(k)z^T(k)-H(k)P(k,k-1)H^T(k)] \quad (24)$$

$$Q(k)=\frac{1}{k} [(k-1)Q(k-1)+K(k)z(k)z^T(k)-K^T(k)+P(k,k)-\Phi(k,k-1)P(k-1,k-1)\Phi^T(k,k-1)] \quad (25)$$

上述常值噪声统计估计器都是算术平均,公式(22)和公式(23)中每项加权系数都为 $1/k$,对于时变的噪声统计,主要看新近数据的影响,估计器应该逐渐忘记陈旧数据的作用,所以需要和式中每项乘以不同比重的加权系数,久远的的数据项乘以较小的加权系数,而新近数据项乘以较大的加权系数,可以采用指数加权衰减因子的方法实现。加权系数的选取原则为:

$$\beta_i=\beta_{i-1}b, 0<b<1, \sum_{i=1}^k \beta_i=1 \quad (26)$$

式中: b 为衰减因子,其递降分布律为:

$$\begin{cases} \beta_i=d_k b^i, i=0, 1, \dots, k \\ d_k=(1-b)/(1-b^{k+1}) \end{cases} \quad (27)$$

通常 b 的取值范围为 $0.95 \leq b \leq 0.995^{[9]}$ 。在公式(22)、公式(23)的和式中以 β_{k-i} 代替原来的 $1/k$,并以标量形式表示,取 $H(k)$ 为 1,利用指数加权的方法求得 MAP 时变噪声统计估计器为公式(28)、(29)。

$$\hat{R}(k)=d_k \sum_{i=1}^k b^{k-i} [z(k)^2-P(k,k-1)] \quad (28)$$

$$\hat{Q}(k)=d_k \sum_{i=1}^k b^{k-i} [z(k)^2 K(k)^2+P(k,k)-\Phi^2(k,k-1)P(k-1,k-1)] \quad (29)$$

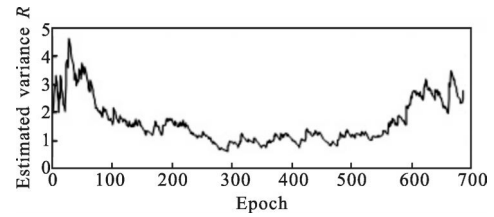
进一步,可得其递推方程为:

$$\hat{R}(k)=(1-d_k)\hat{R}(k-1)+d_k[z(k)^2-P(k,k-1)] \quad (30)$$

$$\hat{Q}(k)=(1-d_k)\hat{Q}(k-1)+d_k[z(k)^2 K(k)^2+P(k,k)-\Phi^2(k,k-1)P(k-1,k-1)] \quad (31)$$

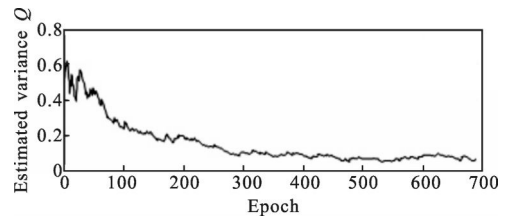
利用上述估计器,对某卫星的伪距平滑进行噪

声统计特性估计,得到的测量噪声估计方差曲线和过程噪声估计方差曲线如图 2 所示,该系统测量噪声变化呈凹形,表明该卫星在刚升起和即将降落的一段时间,高度角较低,其伪距观测值受大气电离层、对流层以及多径效应等的影响较大,导致伪距误差很大,这时应加重原有估计的权重,即减小滤波增益。过程噪声逐步趋于较小的稳定值,表明该系统模型是稳定的,滤波效果逐步变好^[9]。



(a) 测量噪声方差

(a) Measurement noise variance



(b) 过程噪声方差

(b) Process noise variance

图 2 噪声统计估计曲线

Fig.2 Curve of noise statistical estimation

3.2 AFKF 伪距平滑算法

将极大后验时变噪声估计器公式(30)、(31)与标准卡尔曼滤波器公式(12)~(17)相结合,并以标量形式表示,得到应用于伪距平滑的 AFKF,计算公式如公式(32)~(38)。

$$P(k,k-1)=\Phi^2(k,k-1)P(k-1,k-1)+\hat{Q}(k-1) \quad (32)$$

$$\hat{X}(k,k-1)=\hat{X}(k-1,k-1)+\Delta\rho(k) \quad (33)$$

$$\hat{R}(k)=(1-d_k)\hat{R}(k-1)+d_k[z(k)^2-P(k,k-1)] \quad (34)$$

$$K(k)=P(k,k-1)[P(k,k)+\hat{R}(k)]^{-1} \quad (35)$$

$$P(k,k)=[1-K(k)]P(k,k-1) \quad (36)$$

$$\hat{X}(k,k)=\hat{X}(k,k-1)+K(k)(\rho(k)-\hat{X}(k,k-1)) \quad (37)$$

$$\hat{Q}(k)=(1-d_k)\hat{Q}(k-1)+d_k[z(k)^2 K(k)^2+P(k,k)-\Phi^2(k,k-1)P(k-1,k-1)] \quad (38)$$

公式(33)中, $\Delta\hat{\rho}(k)$ 是由载波相位得到的伪距变化量。AFKF 递推过程如图 3 所示。

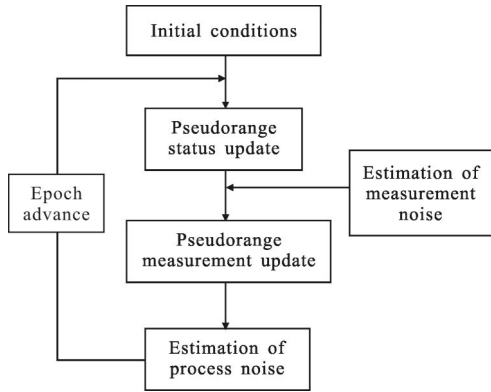


图 3 AFKF 递推示意图

Fig.3 Recursive schematic diagram of AFKF

由计算公式(32)~(38)可知,若已知 $k-1$ 步估计伪距值,就可以递推出第 k 步状态伪距的最优线性滤波值,因此,在滤波之前需要确定初始估计值。选取初始条件为: $\hat{X}(1,1)$ 为首历元伪距观测值, $P(1,1)$ 、 $\hat{R}(1)$ 、 $\hat{Q}(1)$ 可由经验值选取,文中仿真初值选取 $P(1,1)=1$, $\hat{R}(1)=2$, $\hat{Q}(1)=0.5$ 。

在滤波方程式(37)中,表示第 k 次伪距测量值与其预测值之差,称为第 k 次伪距测量后的新息^[10],记为 $z(k)$,最优线性滤波就是不断地通过反馈校正而形成的^[11], $K(k)z(k)$ 是与第 k 次测量新息成比例的校正项,比例因子就是滤波增益 $K(k)$ 。

由公式(35)可知,滤波增益 $K(k)$ 与 $P(k,k-1)$ 成正比,而与 $\hat{R}(k)$ 成反比,如果一步预测伪距值 $\hat{X}(k,k-1)$ 很准确,而测量误差较大,则预测误差方差 $P(k,k-1)$ 就很小,测量误差方差 $\hat{R}(k)$ 就较大,用伪距新息修正的意义就不大,新息的加权即增益 $K(k)$ 就很小;反之,如果伪距观测值 $y(k)$ 很准确,即测量误差方差 $\hat{R}(k)$ 很小,则伪距新息很重要,增益 $K(k)$ 就应该大些。

上述滤波过程是针对某一颗卫星的伪距进行的平滑,式中都采用标量形式,因此计算量不大,并且可以同时多颗卫星进行伪距的平滑。

4 仿真实验及数据分析

为了分析 AFKF 算法在载波相位平滑伪距中的应用效果,采用 IGS 跟踪站(IRKJ)2013 年 4 月 10 日的一段观测数据,选取 PRN18 卫星的 700 个历元数

据(如图 4 所示)进行计算,用 MATLAB 7.0 编写 AFKF 平滑伪距算法程序。

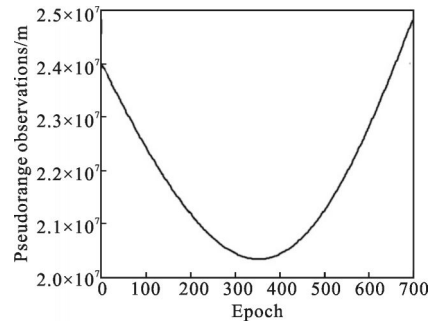
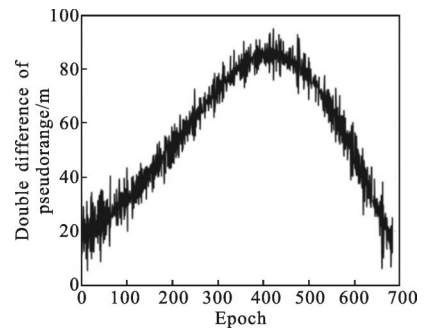


图 4 原始伪距观测值曲线

Fig.4 Curve of raw pseudo range observations

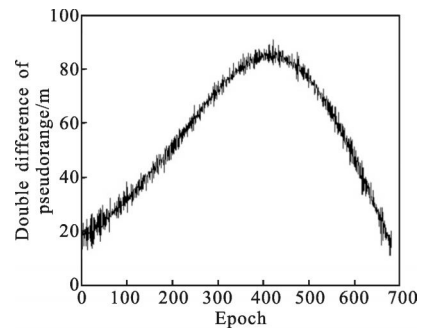
历元间的伪距双差值体现的是伪距变化的加速度,相邻历元的加速度变化相对较小^[12],用它来说明平滑效果是较准确的,图 5(a)为滤波前原始伪距双差值,图 5(b)为 KF 滤波后的伪距双差值,图 5(c)为 AFKF 滤波后的伪距双差值。

从仿真结果可以看出, KF 滤波对伪距平滑有一定作用,但误差仍然较大,而自适应 AFKF 滤波算法在滤波器初始平滑效果不是很好,需要一定的稳定



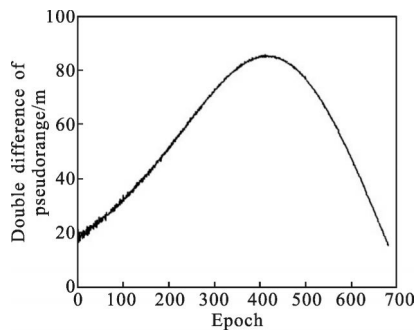
(a) 滤波前原伪距双差值

(a) Double difference of original pseudo range before filtering



(b) 标准 Kalman 滤波后伪距双差值

(b) Double difference of pseudo range after standard KF



(c) AFKF 滤波后伪距双差值

(c) Double difference of the pseudo range after AFKF

图 5 各伪距双差值曲线

Fig.5 Curves of pseudo range double difference

时间, 稳定之后得到的伪距双差较之前两者得到了很好的平滑, 而且衰减因子的应用, 使得动态滤波过程没有误差的累积。

伪距三差值反应了伪距变化加速度的变化率, 是比加速度更小的数据, 用三差值也能很好地反应伪距的平滑效果。图 6 是原始伪距三差值、标准 Kalman 滤波后伪距三差值和 AFKA 算法滤波平滑后的伪距三差值的比较结果, 可以看出, 伪距三差的效果比双差更明显, 自适应衰减因子 Kalman 滤波对伪距的平滑有很好的效果, 可以用文中提出的伪距平滑算法得到较高精度的伪距值, 用以后续的定位解算。

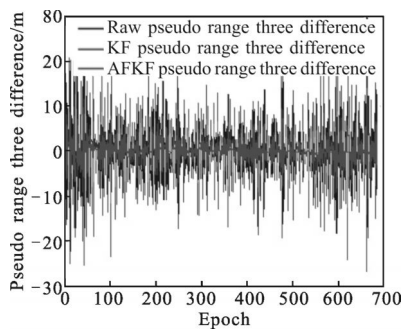


图 6 各伪距三差值曲线

Fig.6 Curves of pseudo range three difference

在 AFKF 滤波过程中得到预测伪距的误差方差曲线如图 7 所示, $P(k, k-1)$ 逐渐减小并趋于较小的稳定值, 表明一步预测伪距值 $\hat{X}(k, k-1)$ 越来越准确, 并且滤波系统是稳定收敛的。由公式(33)可知, 载波相位表示的伪距变化率 $\Delta\hat{\rho}(k)$ 能很好地预测下一历元的伪距值, 从而对噪声较大的伪距观测值起到很好的平滑作用。由 3.2 节对滤波增益的分析可知, 增益

$K(k)$ 与预测误差方差 $P(k, k-1)$ 成正比, 如图 8 所示, 增益曲线也呈现逐步减小的趋势, 但没有跟随预测误差方差趋于一个稳定值, 因为滤波增益还同时受到测量误差方差 $\hat{R}(k)$ 的影响, $\hat{R}(k)$ 在后一段历元又逐步增大(如图 2 所示), 使得滤波增益要继续减小, 以保证最优伪距估计值。

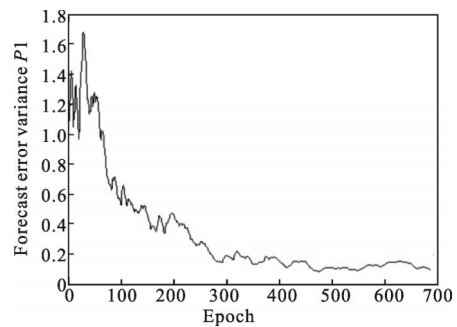


图 7 预测误差方差曲线

Fig.7 Curve of forecast error variance

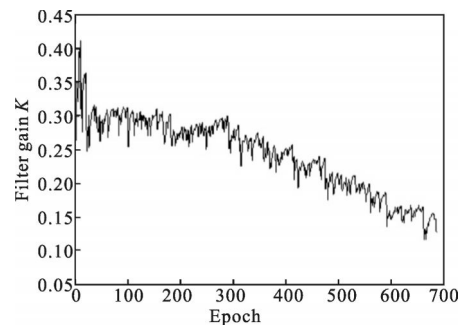


图 8 滤波增益曲线

Fig.8 Curve of filter gain

5 结论

利用载波相位观测值平滑伪距值, 不仅能消除整周模糊度的影响, 减少计算量, 而且可以明显减小伪距观测值的误差, 从而改善用户解算精度。一方面, 采用指数加权衰减因子的 MAP 时变噪声统计估计器可以很好地实时估计噪声统计特性, 进而实现伪距观测值的自适应滤波, 另一方面, 噪声统计估计与标准 KF 结合, 形成自适应衰减因子 Kalman 滤波, 由滤波前后的双差及三差值比较可知, 该算法对伪距平滑起到了很好的效果, 由此得到的伪距值可以用于后续的 GPS 定位解算。另外, 在实际定位解算中, 可以结合适当的选星算法, 去除卫星位置较差的时间段, 有效避免滤波趋于稳定过程中, 较大残余误差对定位精度的影响。

参考文献:

- [1] Pratap Misra, Per Enge, Luo Ming. Global Positioning System: Signals, Measurements and Performance [M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 133-147. (in Chinese)
Pratap Misra, Per Enge, 罗鸣. 全球定位系统: 信号、测量与性能[M]. 第二版. 北京: 电子工业出版社, 2008: 133-147.
- [2] Zhao Sheng, Wei Liang, Duan Zhaoliang. Research on pseudo-range smoothing technology of GNSS receiver [J]. *Radio Engineering*, 2010, 40(4): 32-34. (in Chinese)
赵胜, 魏亮, 段召亮. GNSS 接收机的伪距平滑技术研究 [J]. 无线电工程, 2010, 40(4): 32-34.
- [3] Hao Ming, Ding Xijie. Study of data processing methods for GPS precise point positioning [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2008, 17(4): 60-62. (in Chinese)
郝明, 丁希杰. GPS 精密单点定位的数据处理方法综述 [J]. 测绘工程, 2008, 17(4): 60-62.
- [4] Li Dan, Qin Yongyuan, Mei Chunbo. An improved adaptive Kalman filter algorithm for SINS/GPS integrated navigation system[J]. *Measurement & Control Technology*, 2011, 30(3): 114-116. (in Chinese)
李旦, 秦永元, 梅春波. 组合导航自适应卡尔曼滤波改进算法研究[J]. 测控技术, 2011, 30(3): 114-116.
- [5] Shi Yong, Han Chongzhao. Adaptive UKF method with applications to target tracking [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(6): 755-757. (in Chinese)
石勇, 韩崇昭. 自适应 UKF 算法在目标跟踪中的应用[J]. 自动化学报, 2011, 37(6): 755-757.
- [6] Liu Sheng, Zhang Hongmei. The Optimal Estimation Theory [M]. Beijing: Science Press, 2011: 1009-1016. (in Chinese)
刘胜, 张红梅. 最优估计理论 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 1009-1016.
- [7] Luo Yi, Yang Kaiwei. The analysis of performance for differential GPS positioning based on Carrier phase smoothing pseudo range[C]//The Electronic Collected Works of the Third China Satellite Navigation Conference, 2012. (in Chinese)
罗益, 杨开伟. 基于载波相位平滑的 GPS 伪距差分定位性能分析[C]//第三届中国卫星导航学术年会电子文集, 2012.
- [8] The International GNSS Service. IGS FTP-products, nav and rinex data [DB/OL]. (2013-04-10) [2013-04-20]. <http://garner.ucsd.edu/pub/>.
- [9] Bahrami M, Ziebart M. A Kalman filter based doppler-smoothing of code pseudoranges in GNSS challenged environments [C]//Proceedings of the ION GNSS, 2011: 1-11.
- [10] Park B, Sohna K, Kee C. Optimal Hatch filter with an adaptive smoothing window width [J]. *Journal of the Institute Navigation*, 2008, 61(3): 435-454.
- [11] Wang Lu, Li Guangchun, Qiao Xiangwei, et al. An adaptive UKF algorithm based on maximum likelihood principle and expectation maximization algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(7): 1203-1208. (in Chinese)
王璐, 李光春, 乔相伟, 等. 基于极大似然准则和最大期望算法的自适应 UKF 算法 [J]. 自动化学报, 2012, 38(7): 1203-1208.
- [12] Zhang Chengjun, Yang Li, Chen Jun. Improving point positioning accuracy using GPS carrier smoothed pseudo-range[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2009, 29(4): 106-110. (in Chinese)
张成军, 杨力, 陈军. 提高 GPS 载波相位平滑伪距定位精度的算法研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 2009, 29(4): 106-110.