



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 102968552 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 13

(21) 申请号 201210414013. 4

(22) 申请日 2012. 10. 26

(73) 专利权人 郑州威科姆科技股份有限公司

地址 450001 河南省郑州市高新技术产业开发区莲花街5号

(72) 发明人 贾小波 杜云峰 吴淑琴 邹世合 张筱南

(74) 专利代理机构 郑州大通专利商标代理有限公司 41111

代理人 陈大通

(51) Int. Cl.

G06F 19/00(2011. 01)

(56) 对比文件

Toma Miyata 等. A Design Method of FIR Digital Filters with Variable Stop Bands Using Iterative WLS. 《Information, Communications and Signal Processing,

2009》. 2009, 第 2009 年卷第 1-5 页.

张少军等. MIMU/GPS 组合导航模糊自适应卡尔曼滤波研究. 《电光与控制》. 2008, 第 15 卷 (第 8 期), 第 84-86、96 页.

李海生. 基于星间测距及方向约束的导航星座自主定轨技术研究. 《中国优秀硕士学位论文全文数据库 工程科技 II 辑》. 2011, 第 2011 年卷 (第 6 期), 第 C031-170 页.

审查员 张博

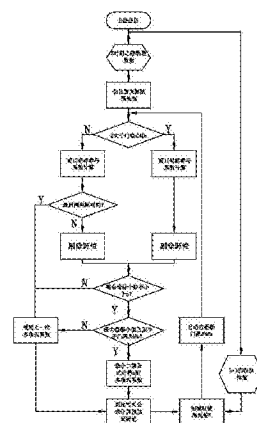
权利要求书3页 说明书7页 附图4页

(54) 发明名称

一种卫星轨道数据预估与修正方法

(57) 摘要

本发明涉及卫星授时与卫星导航领域, 具体的说是一种对卫星用户设备接收的轨道数据进行预估与修正的方法, 首先用改进的切比雪夫预估法对轨道数据进行预估; 根据最小二乘法原理, 用已接收的轨道数据计算 n 阶切比雪夫多项式的系数; 再利用得到的 n 阶切比雪夫多项式的系数通过切比雪夫拟合公式计算得到待预估时刻的轨道坐标估计值, 用改进的模糊自适应卡尔曼滤波法对得到的轨道坐标估计值进行滤波; 本发明提供了一种鲁棒性好、抗野值干扰能力强、预估误差小且连续性好、适合实时运算的卫星轨道数据预估与修正方法, 以解决卫星授时和卫星导航系统实际应用中由于数据轨道不连续且预估不准确而造成的定时及定位错误问题。



1. 一种卫星轨道数据预估与修正方法,其特征在于:含有下列步骤:

步骤 1.1:首先用改进的切比雪夫预估法对轨道数据进行预估;

根据最小二乘法原理,用已接收的轨道数据计算 n 阶切比雪夫多项式的系数;再利用得到的 n 阶切比雪夫多项式的系数通过切比雪夫拟合公式计算得到待预估时刻的轨道坐标估计值;所述改进的切比雪夫预估法的具体步骤如下:

步骤 1.1.1:根据公式 $\tau = \frac{2}{t_2 - t_1}(t - t_1) - 1$ 将某一时间段的时间变量 $t \in [t_1, t_2]$ 归一化

到区间 $t \in [-1, 1]$ 上并且离散化;

步骤 1.1.2:根据最小二乘法原理用待预估数据时刻之前的十二个已收轨道数据计算 n 阶多项式系数,前十二个已收轨道数据中若出现零值即剔除,其中 n 为正整数,且 $n \leq 5$,

如果待预估时刻的预估坐标与实收坐标之差 H 大于自适应更新的门限 $BARa$,则该时刻坐标不参与后一时刻最小二乘递推多项式系数的计算,其中 $BARa$ 取待预估时刻之前的三个 H 的升序中值做自适应实时更新;

如果用于计算某一个时刻最小二乘系数的坐标中最大值与最小值之差大于设定的门限值 $BARb$,或者如果此时刻坐标与前一时刻坐标相同,则本次预估不重新计算多项式系数而使用前一时刻的系数;

用得到的 n 阶多项式系数代入切比雪夫多项式,通过所述的切比雪夫拟合公式进行计算得出待预估时刻的轨道坐标估计值;

其中切比雪夫拟合公式为: $X = \sum_{i=0}^n C_i T_i(\tau)$

其中 n 为多项式阶数, C_i 为多项式系数,变量 $T_i(\tau)$ 由如下递推公式确定:

$$\begin{cases} T_0(\tau) = 1 \\ T_1(\tau) = \tau \\ \dots\dots\dots \\ T_n(\tau) = 2\tau T_{n-1}(\tau) - T_{n-2}(\tau) \end{cases}$$

步骤 1.2:用改进的模糊自适应卡尔曼滤波法对得到的轨道坐标估计值进行滤波;

首先根据构造的模糊函数 $D(k)$ 自适应调整过程噪声协方差 $Q(k)$ 与测量噪声协方差 $R(k)$,然后根据卡尔曼滤波原理,将步骤 1.1 得到轨道坐标估计值作为观测量 $Z(k)$,代入无控制的离散卡尔曼滤波基本公式进行计算,然后通过测量噪声协方差 $R(k)$ 与过程噪声协方差 $Q(k)$ 的计算公式得到的 k 时刻的最优估计值 $X(k/k)$;最后通过修正函数 $\phi(k)$ 对最优估计值 $X(k/k)$ 进行分段修正。

2. 根据权利要求 1 所述的卫星轨道数据预估与修正方法,其特征在于:所述改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的计算公式为:

$$(1) X(k|k-1) = A(k) * X(k-1|k-1)$$

$$(2) P(k|k-1) = A(k) * P(k-1|k-1) * A'(k) + Q(k-1)$$

$$(3) X(k|k) = X(k|k-1) + KG(k) * (Z(k) - H(k) * X(k|k-1))$$

$$(4) \quad KG(k) = \frac{P(k|k-1) * H'(k)}{H(k) * P(k|k-1) * H'(k) + R(k)}$$

$$(5) \quad P(k|k) = P(k|k-1) - KG(k) * H(k) * P(k|k-1)$$

其中 $X(k-1/k-1)$ 为 $k-1$ 时刻坐标的最优估计值, $X(k/k-1)$ 为 k 时刻坐标的预测值, $P(k/k-1)$ 是 k 时刻预测误差协方差的预测值, $P(k-1/k-1)$ 是 $k-1$ 时刻预测误差协方差的最优估计值, $Q(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $A(k)$ 为 k 时刻的系统参数, $Z(k)$ 是 k 时刻的观测值, $H(k)$ 是 k 时刻的测量参数, $KG(k)$ 是 k 时刻的卡尔曼增益。

3. 根据权利要求 2 所述的卫星轨道数据预估与修正方法, 其特征在于: 所述改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的具体步骤为:

步骤 3.1: 构造模糊函数 $D(k)$

$$D(k) = (H(k) * P(k|k-1) * H'(k) + R(k)) - \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^k (Z(k) - H(k) * X(k|k-1))}{3}}$$

其中 $H(k)$ 是 k 时刻的测量参数, $P(k/k-1)$ 是 k 时刻的预测误差协方差的预测值, $Z(k)$ 是 k 时刻的观测值, $R(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $X(k/k-1)$ 是 k 时刻坐标的预测值; 测量噪声协方差 $R(k)$ 与过程噪声协方差 $Q(k)$ 的计算公式为:

$$\begin{cases} R(k) = R(k) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_c}}\right) * \left(1 - \frac{R(k)}{|D(k)|}\right) * R(k) & D(k) > BAR_c > 0 \\ R(k) = R(k) - m * |D(k)| & BAR_c > D(k) > -BAR_c \\ R(k) = R(k) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_c}}\right) * \left(1 - \frac{R(k)}{|D(k)|}\right) * R(k) & D(k) < -BAR_c < 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q(k) = \left(Q(k) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_c}}\right) * \left(1 - \frac{Q(k)}{|D(k)|}\right) * Q(k)\right) * I & D(k) > BAR_c > 0 \\ Q(k) = Q(k) - m * |D(k)| & BAR_c > D(k) > -BAR_c \\ Q(k) = \left(Q(k) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_c}}\right) * \left(1 - \frac{Q(k)}{|D(k)|}\right) * Q(k)\right) * I & D(k) < -BAR_c < 0 \end{cases}$$

其中 $R(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $Q(k)$ 是 k 时刻的过程噪声协方差, $D(k)$ 是 k 时刻的模糊函数, m 为权系数, I 为单位矩阵, BAR_c 为针对构造的模糊函数 $D(k)$ 所设定的门限;

其中选取初始最优坐标值 $X(0/0) = [0 \ 0 \ 0]'$, 测量参数 $H = [1 \ 0 \ 0]$, 系统参数 $A = [1 \ 1 \ 0.5; 0 \ 1 \ 1; 0 \ 0 \ 1]$, 然后利用所述的改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的计算公式 (1) ~ (5) 将待预估时刻的轨道坐标估计值代入观测值 $Z(k)$ 进行迭代运算, 得到 k 时刻坐标的最优估计值 $X(k/k)$;

步骤 3.2: 构造修正函数

$$\phi(k) = \begin{cases} 1 & |r(k)| \leq \text{BAR}_d \\ m * \left(\frac{\text{BAR}_d}{|r(k)|} \right)^{\frac{1}{2}} & |r(k)| > \text{BAR}_d \end{cases}$$

其中 BAR_d 为针对构造的修正函数 $\phi(k)$ 所设定的门限, m 为权系数, $r(k)$ 为新息, 且 $r(k) = Z(k) - H(k) * X(k|k-1)$; 当 $|r(k)|$ 大于门限 BAR_d 时, 使最优估计值 $X(k/k)$ 乘以修正函数 $\phi(k)$, 以减小超过门限 BAR_d 以外的新息给预估值带来的影响; 而当 $|r(k)|$ 小于门限 BAR_d 时, 不做任何处理。

一种卫星轨道数据预估与修正方法

技术领域

[0001] 本发明涉及卫星授时与卫星导航领域,具体的说是一种对卫星用户设备接收的轨道数据进行预估与修正的方法。

背景技术

[0002] 通过对 GPS 卫星星历与北斗卫星星历的接收和解析,可以得到卫星轨道数据,就可以通过一系列计算得到卫星与用户之间的伪距,再进而通过一系列算法运算得到定时信息与定位信息,如果卫星轨道数据由于各种误差和干扰而不连续、不完整,就会影响到伪距的准确性从而影响到定时的精度与定位的精度。

[0003] 目前,最小二乘递推算法与卡尔曼预测算法都是对卫星轨道数据进行预估常采用的算法,最小二乘递推算法的运算量大,受野值影响小,预测误差均值小,但预测误差连续性差;卡尔曼预测算法的运算量小,受野值影响大,预测误差均值大,但预测误差连续性好,这两种算法都有不足之处,尤其在卫星调轨期间轨道数据波动较大时,预估精度都不高。

发明内容

[0004] 本发明为了克服上述常用算法的不足,用改进的切比雪夫预估算法做预估,再用改进的模糊自适应卡尔曼滤波算法对预估值做滤波与修正,提供了一种鲁棒性好、抗野值干扰能力强、预估误差小且连续性好、适合实时运算的卫星轨道数据预估与修正方法,以解决卫星授时和卫星导航系统实际应用中由于数据轨道不连续且预估不准确而造成的定时及定位错误问题。

[0005] 本发明的技术方案是:

[0006] 1. 一种卫星轨道数据预估与修正方法,含有下列步骤:

[0007] 步骤 1.1:首先用改进的切比雪夫预估法对轨道数据进行预估;

[0008] 根据最小二乘法原理,用已接收的轨道数据计算 n 阶切比雪夫多项式的系数;再利用得到的 n 阶切比雪夫多项式的系数通过切比雪夫拟合公式计算得到待预估时刻的轨道坐标估计值。

[0009] 所述改进的切比雪夫预估法的具体步骤如下:

[0010] 步骤 1.1.1:根据公式 $\tau = \frac{2}{t_2 - t_1}(t - t_1) - 1$ 将某一时间段的时间变量 $\tau \in [t_1, t_2]$

归一化到区间 $\tau \in [-1, 1]$ 上并且离散化;

[0011] 步骤 1.1.2:根据最小二乘法原理用待预估数据之前的十二个已收轨道数据计算 n 阶多项式系数,其中,前十二个已收轨道数据中若出现零值即剔除,只要确保参与系数求解的轨道数据不小于 n 个就能求得系数,其中 n 为正整数,且 $n \leq 5$ 。

[0012] 如果待预估时刻的预估坐标与实收坐标之差 H 大于自适应更新的门限 $BARa$,则该时刻坐标不参与后一时刻最小二乘递推多项式系数的计算,其中 $BARa$ 取待预估时刻之前三个 H 的升序中值做自适应实时更新;

[0013] 如果用于计算某一个时刻最小二乘系数的坐标中最大值与最小值之差大于设定的门限值 BARb, 或者如果此时刻坐标与前一时刻坐标相同, 则本次预估不重新计算多项式系数而使用前一时刻的系数;

[0014] 用得到的 n 阶多项式系数代入切比雪夫多项式, 通过切比雪夫拟合公式进行计算得出待预估时刻的轨道坐标估计值;

[0015] 切比雪夫拟合公式为: $X = \sum_{i=0}^n C_i T_i(\tau)$

[0016] 其中 n 为多项式阶数, C_i 为多项式系数, 变量 $T_i(\tau)$ 由如下递推公式确定:

[0017]
$$\begin{cases} T_0(\tau) = 1 \\ T_1(\tau) = \tau \\ \dots\dots\dots \\ T_s(\tau) = 2\tau T_{s-1}(\tau) - T_{s-2}(\tau) \end{cases}$$

[0018] 步骤 1.2: 用改进的模糊自适应卡尔曼滤波法对得到的轨道坐标估计值进行滤波;

[0019] 首先根据构造的模糊函数 D(k) 自适应调整过程噪声协方差 Q(k) 与测量噪声协方差 R(k), 然后根据卡尔曼滤波原理, 将步骤 1.1 得到轨道坐标估计值作为观测量 Z(k), 代入无控制的离散卡尔曼滤波基本公式进行计算, 然后通过测量噪声协方差 R(k) 与过程噪声协方差 Q(k) 的计算公式得到的 K 时刻的最优估计值 X(k/k); 最后通过修正函数 $\Phi(k)$ 对最优估计值 X(k/k) 进行分段修正。

[0020] 2. 所述改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的计算公式为:

[0021] 1) $X(k|k-1) = A(k) * X(k-1|k-1)$

[0022] 2) $P(k|k-1) = A(k) * P(k-1|k-1) * A'(k) + Q(k-1)$

[0023] 3) $X(k|k) = X(k|k-1) + KG(k) * (Z(k) - H(k) * X(k|k-1))$

[0024] 4) $KG(k) = \frac{P(k|k-1) * H'(k)}{H(k) * P(k|k-1) * H'(k) + R(k)}$

[0025] 5) $P(k|k) = P(k|k-1) - KG(k) * H(k) * P(k|k-1)$

[0026] 其中 $X(k-1/k-1)$ 为 k-1 时刻坐标的最优估计值, $X(k/k-1)$ 为 k 时刻坐标的预测值, $P(k/k-1)$ 是 k 时刻预测误差协方差的预测值, $P(k-1/k-1)$ 是 k-1 时刻预测误差协方差的最优估计值, Q(k) 是 k 时刻的测量噪声协方差, A(k) 为 k 时刻的系统参数, Z(k) 是 k 时刻的观测值, H(k) 是 k 时刻的测量参数, KG(k) 是 k 时刻的卡尔曼增益。

[0027] 3. 所述改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的具体步骤为:

[0028] 步骤 3.1: 构造模糊函数 D(k)

[0029]
$$D(k) = (H(k) * P(k|k-1) * H'(k) + R(k)) - \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^k (Z(k) - H(k) * X(k|k-1))}{3}}$$

[0030] 其中 H(k) 是 k 时刻的测量参数, $P(k/k-1)$ 是 k 时刻的预测误差协方差的预测值,

$Z(k)$ 是 k 时刻的观测值, $R(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $X(k/k-1)$ 是 k 时刻坐标的预测值。

[0031] 测量噪声协方差 R 与过程噪声协方差 Q 的计算公式为:

$$[0032] \quad \begin{cases} R(k) = R(k) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{BAR}_r}}\right) * \left(1 - \frac{R(k)}{|D(k)|}\right) * R(k) & D(k) > \text{BAR}_r > 0 \\ R(k) = R(k) - m * |D(k)| & \text{BAR}_r > D(k) > -\text{BAR}_r \\ R(k) = R(k) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{BAR}_r}}\right) * \left(1 - \frac{R(k)}{|D(k)|}\right) * R(k) & D(k) < -\text{BAR}_r < 0 \end{cases}$$

$$[0033] \quad \begin{cases} Q(k) = \left(Q(k) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{BAR}_r}}\right) * \left(1 - \frac{Q(k)}{|D(k)|}\right) * Q(k)\right) * I & D(k) > \text{BAR}_r > 0 \\ Q(k) = Q(k) - m * |D(k)| & \text{BAR}_r > D(k) > -\text{BAR}_r \\ Q(k) = \left(Q(k) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \text{BAR}_r}}\right) * \left(1 - \frac{Q(k)}{|D(k)|}\right) * Q(k)\right) * I & D(k) < -\text{BAR}_r < 0 \end{cases}$$

[0034] 其中 $R(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $Q(k)$ 是 k 时刻的过程噪声协方差, $D(k)$ 是 k 时刻的模糊函数, m 为权系数, I 为单位矩阵, BAR_r 为针对构造的模糊函数 $D(k)$ 所设定的门限。

[0035] 其中选取初始最优坐标值 $X(0/0) = [000]'$, 测量参数 $H = [100]$, 系统参数 $A = [1 \ 1 \ 0.5; 0 \ 1 \ 1; 0 \ 0 \ 1]$;

[0036] 然后利用改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的计算公式 (1) ~ (5) 将待预估时刻的轨道坐标估计值代入观测值 $Z(k)$ 进行迭代运算, 得到 k 时刻坐标的最优估计值 $X(k/k)$ 。

[0037] 步骤 3.2: 构造修正函数

$$[0038] \quad \phi(k) = \begin{cases} 1 & |r(k)| \leq \text{BAR}_d \\ m * \left(\frac{\text{BAR}_d}{|r(k)|}\right)^{\frac{1}{2}} & |r(k)| > \text{BAR}_d \end{cases}$$

[0039] 其中 BAR_d 为针对构造的修正函数 $\phi(k)$ 所设定的门限, m 为权系数, $r(k)$ 为新息, 且 $r(k) = Z(k) - H(k) * X(k/k-1)$; 当 $|r(k)|$ 大于门限 BAR_d 时, 使最优估计值 $X(k/k)$ 乘以修正函数 $\phi(k)$, 以减小超过门限 BAR_d 以外的新息给预估值带来的影响; 而当 $|r(k)|$ 小于门限 BAR_d 时, 不做任何处理。

[0040] 本发明的有益积极效果:

[0041] 1. 本发明的卫星轨道数据预估与修正方法, 可以应用在 GPS/ 北斗接收设备中, 在计算时延及伪距之前, 对解析出的卫星轨道数据进行预估与滤波修正。

[0042] 2. 本发明的卫星轨道数据预估与修正方法用改进的切比雪夫算法做预估, 再用改进的模糊自适应卡尔曼滤波算法对预估值做滤波与修正, 鲁棒性好、抗野值能力强, 预估误差小且连续性好, 适合实时运算的卫星轨道数据预估与修正方法, 能够有效的解决卫星授时和卫星导航实际使用中由于轨道数据不连续且预估不准确而造成的定时及定位错误的

问题。

附图说明

- [0043] 图 1 为本发明中改进的切比雪夫预估算法的流程示意图；
 [0044] 图 2 为本发明中改进的模糊自适应卡尔曼滤波算法的流程示意图；
 [0045] 图 3 为本发明对轨道实例数据处理的仿真示意图；
 [0046] 图 4 为本发明对轨道实例数据工程化处理的定时结果对比图。

具体实施方式

[0047] 参见图 1, 图 2 所示：

[0048] 1. 一种卫星轨道数据预估与修正方法, 含有下列步骤：

[0049] 步骤 1.1 : 首先用改进的切比雪夫预估法对轨道数据进行预估；

[0050] 根据最小二乘法原理, 用已接收的轨道数据计算 n 阶切比雪夫多项式的系数；再利用得到的 n 阶切比雪夫多项式的系数通过切比雪夫拟合公式计算得到待预估时刻的轨道坐标估计值；

[0051] 所述改进的切比雪夫预估法的具体步骤如下：

[0052] 步骤 1.1.1 : 根据公式 $\tau = \frac{2}{t_2 - t_1}(t - t_1) - 1$ 将某一时间段的时间变量 $\tau \in [t_1, t_2]$

归一化到区间 $\tau \in [-1, 1]$ 上并且离散化；

[0053] 步骤 1.1.2 : 根据最小二乘法原理用待预估数据之前的十二个已收轨道数据计算 n 阶多项式系数, 其中, 前十二个已收轨道数据中若出现零值即剔除, 只要确保参与系数求解的轨道数据不小于 n 个就能求得系数, 其中 n 为正整数, 且 $n \leq 5$ 。

[0054] 如果待预估时刻的预估坐标与实收坐标之差 H 大于自适应更新的门限 $BARa$, 则该时刻坐标不参与后一时刻最小二乘递推多项式系数的计算, 其中 $BARa$ 取待预估时刻之前三个 H 的升序中值做自适应实时更新；

[0055] 如果用于计算某一个时刻最小二乘系数的坐标中最大值与最小值之差大于设定的门限值 $BARb$, 或者如果此时刻坐标与前一时刻坐标相同, 则本次预估不重新计算多项式系数而使用前一时刻的系数；

[0056] 用得到的 n 阶多项式系数代入切比雪夫多项式, 通过切比雪夫拟合公式进行计算得出待预估时刻的轨道坐标估计值；

[0057] 切比雪夫拟合公式为：
$$X = \sum_{i=0}^n C_i T_i(\tau)$$

[0058] 其中 n 为多项式阶数, C_i 为多项式系数, 变量 $T_i(\tau)$ 由如下递推公式确定：

[0059]
$$\begin{cases} T_0(\tau) = 1 \\ T_1(\tau) = \tau \\ \dots\dots\dots \\ T_n(\tau) = 2\tau T_{n-1}(\tau) - T_{n-2}(\tau) \end{cases}。$$

[0060] 步骤 1.2 :用改进的模糊自适应卡尔曼滤波法对得到的轨道坐标估计值进行滤波 ;

[0061] 首先根据构造的模糊函数 $D(k)$ 自适应调整过程噪声协方差 $Q(k)$ 与测量噪声协方差 $R(k)$, 然后根据卡尔曼滤波原理, 将步骤 1.1 得到轨道坐标估计值作为观测量 $Z(k)$, 代入无控制的离散卡尔曼滤波基本公式进行计算, 然后通过测量噪声协方差 $R(k)$ 与过程噪声协方差 $Q(k)$ 的计算公式得到的 K 时刻的最优估计值 $X(k/k)$; 最后通过修正函数 $\Phi(k)$ 对最优估计值 $X(k/k)$ 进行分段修正。

[0062] 2. 所述改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的计算公式为 :

[0063] 1) $X(k|k-1) = A(k) * X(k-1|k-1)$

[0064] 2) $P(k|k-1) = A(k) * P(k-1|k-1) * A'(k) + Q(k-1)$

[0065] 3) $X(k|k) = X(k|k-1) + KG(k) * (Z(k) - H(k) * X(k|k-1))$

[0066] 4) $KG(k) = \frac{P(k|k-1) * H'(k)}{H(k) * P(k|k-1) * H'(k) + R(k)}$

[0067] 5) $P(k|k) = P(k|k-1) - KG(k) * H(k) * P(k|k-1)$

[0068] 其中 $X(k-1/k-1)$ 为 $k-1$ 时刻坐标的最优估计值, $X(k/k-1)$ 为 k 时刻坐标的预测值, $P(k/k-1)$ 是 k 时刻预测误差协方差的预测值, $P(k-1/k-1)$ 是 $k-1$ 时刻预测误差协方差的最优估计值, $Q(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $A(k)$ 为 k 时刻的系统参数, $Z(k)$ 是 k 时刻的观测值, $H(k)$ 是 k 时刻的测量参数, $KG(k)$ 是 k 时刻的卡尔曼增益。

[0069] 3. 所述改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的具体步骤为 :

[0070] 步骤 3.1 :构造模糊函数 $D(k)$

[0071]
$$D(k) = (H(k) * P(k|k-1) * H'(k) + R(k)) - \sqrt{\frac{\sum_{i=2}^k (Z(i) - H(i) * X(i|k-1))}{3}}$$

[0072] 其中 $H(k)$ 是 k 时刻的测量参数, $P(k/k-1)$ 是 k 时刻的预测误差协方差的预测值, $Z(k)$ 是 k 时刻的观测值, $R(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $X(k/k-1)$ 是 k 时刻坐标的预测值。

[0073] 测量噪声协方差 R 与过程噪声协方差 Q 的计算公式为 :

[0074]
$$\begin{cases} R(k) = R(k) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_k}}\right) * \left(1 - \frac{R(k)}{|D(k)|}\right) * R(k) & D(k) > BAR_k > 0 \\ R(k) = R(k) - m * |D(k)| & BAR_k > D(k) > -BAR_k \\ R(k) = R(k) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_k}}\right) * \left(1 - \frac{R(k)}{|D(k)|}\right) * R(k) & D(k) < -BAR_k < 0 \end{cases}$$

$$[0075] \quad \begin{cases} Q(k) = \left(Q(k) - \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_c}} \right) * \left(1 - \frac{Q(k)}{|D(k)|} \right) * Q(k) \right) * I & D(k) > BAR_c > 0 \\ Q(k) = Q(k) - m * |D(k)| & BAR_c > D(k) > -BAR_c \\ Q(k) = \left(Q(k) + \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + BAR_c}} \right) * \left(1 - \frac{Q(k)}{|D(k)|} \right) * Q(k) \right) * I & D(k) < -BAR_c < 0 \end{cases}$$

[0076] 其中 $R(k)$ 是 k 时刻的测量噪声协方差, $Q(k)$ 是 k 时刻的过程噪声协方差, $D(k)$ 是 k 时刻的模糊函数, m 为权系数, I 为单位矩阵, BAR_c 为针对构造的模糊函数 $D(k)$ 所设定的门限。

[0077] 其中选取初始最优坐标值 $X(0/0) = [000]'$, 测量参数 $H = [100]$, 系统参数 $A = [1 \ 1 \ 0.5; 0 \ 1 \ 1; 0 \ 0 \ 1]$;

[0078] 然后利用改进的模糊自适应卡尔曼滤波法的计算公式 (1) ~ (5) 将待预估时刻的轨道坐标估计值代入观测值 $Z(k)$ 进行迭代运算, 得到 k 时刻坐标的最优估计值 $X(k/k)$ 。

[0079] 步骤 3.2 : 构造修正函数

$$[0080] \quad \phi(k) = \begin{cases} 1 & |r(k)| \leq BAR_d \\ m * \left(\frac{BAR_d}{|r(k)|} \right)^{\frac{1}{2}} & |r(k)| > BAR_d \end{cases}$$

[0081] 其中 BAR_d 为针对构造的修正函数 $\phi(k)$ 所设定的门限, m 为权系数, $r(k)$ 为新息, 且 $r(k) = Z(k) - H(k) * X(k|k-1)$; 当 $|r(k)|$ 大于门限 BAR_d 时, 使最优估计值 $X(k/k)$ 乘以修正函数 $\phi(k)$, 以减小超过门限 BAR_d 以外的新息给预估值带来的影响; 而当 $|r(k)|$ 小于门限 BAR_d 时, 不做任何处理。

[0082] 本发明使用北斗一代卫星某日期某星某波真实的广播电文信息, 在计算机上对轨道数据进行了本发明所述方法的模拟仿真, 得到了每一步骤处理之后的卫星三维轨道, 参见图 3 所示, 图 3 中左边的部分表示的是用接收机接收到的未经滤波的原始轨道数据仿真的三维轨道, 由图可见, 由于数据接收误差太大, 无法仿真出连续的轨道; 图 3 中间的部分是原始轨道数据在经过本发明的方法步骤 1.1 的运算之后得到的数据仿真出的三维轨道, 由图可见已经可以仿真出轨道, 但是轨道并不平滑, 有毛刺, 说明此时的轨道数据还不连续与稳定; 图 3 右边的部分是再经过本发明步骤 1.2 的运算之后得到的数据仿真出的三维轨道, 与图 3 中间的部分相比, 右边的部分中轨道更加连续与稳定, 毛刺已被消除。

[0083] 本发明同样使用北斗一代卫星某日期某波真实的广播电文信息在工程上进行了数据处理, 得到了接收机输出的用于授时的 1PPS, 如图 4 所示, 图 4 中的横坐标表示一天中的秒数, 纵坐标表示接收机输出的 1PPS 与标准 1PPS 之差, 正值表示“延后”, 负值表示“提前”, 单位为纳秒, 如果纵坐标为 0, 表示输出 1PPS 与标准 1PPS 无误差。

[0084] 不论“延后”还是“提前”, 与标准 1PPS 的差越小, 则定时性能越好。

[0085] 由于原始轨道数据无法构建出真实轨道, 亦无法算得到准确的 1PPS, 所以图 4 中没有表示出经原始轨道数据解算出的 1PPS 偏差。

[0086] 图 4 中上面的曲线是经本发明步骤 1.1 之后的轨道数据运算得到的 1PPS 偏差, 下

面的曲线是再经本发明步骤 1.2 之后的轨道数据运算得到的 1PPS 偏差, 卫星轨道坐标预估与修正越精确, 计算得到的 1PPS 就与标准 1PPS 越接近。

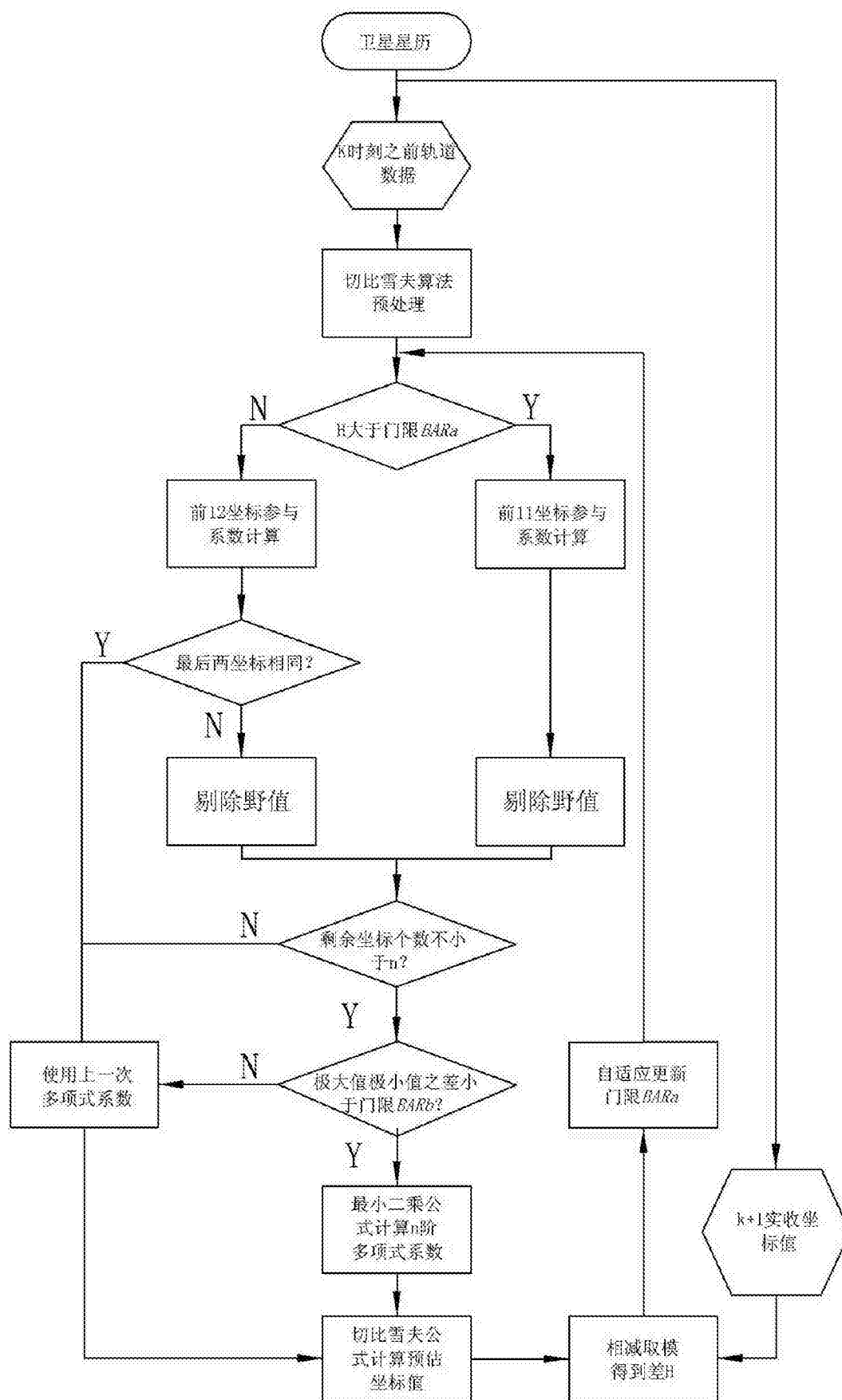


图 1

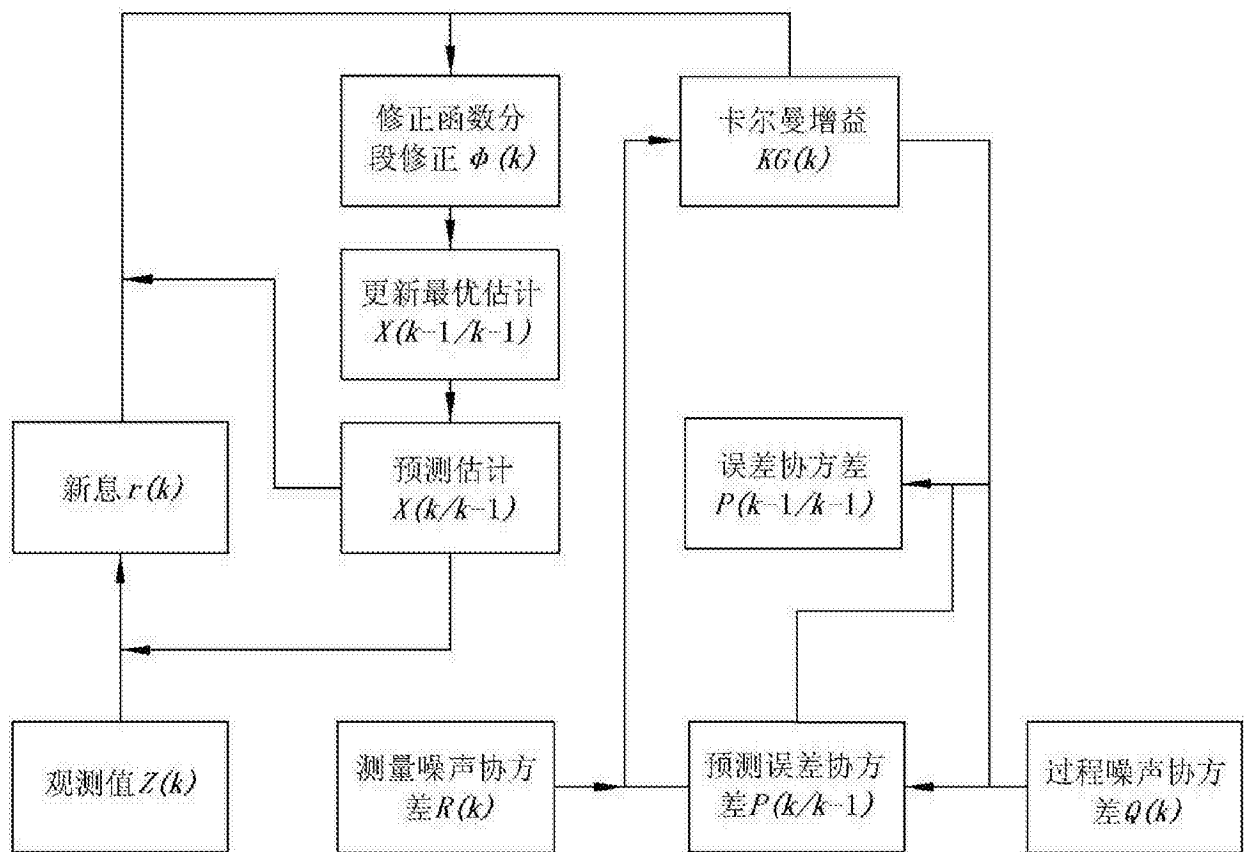


图 2

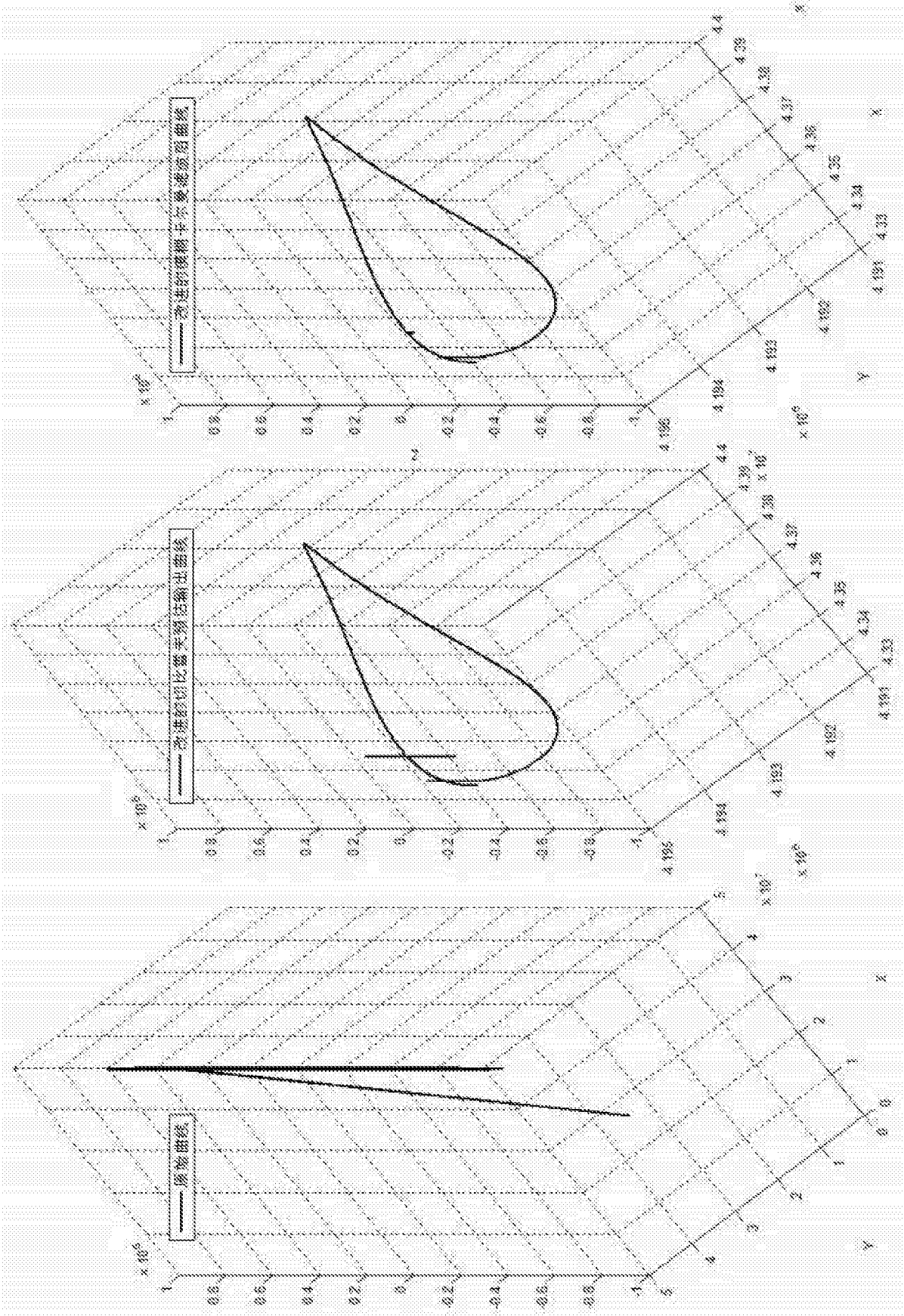


图 3

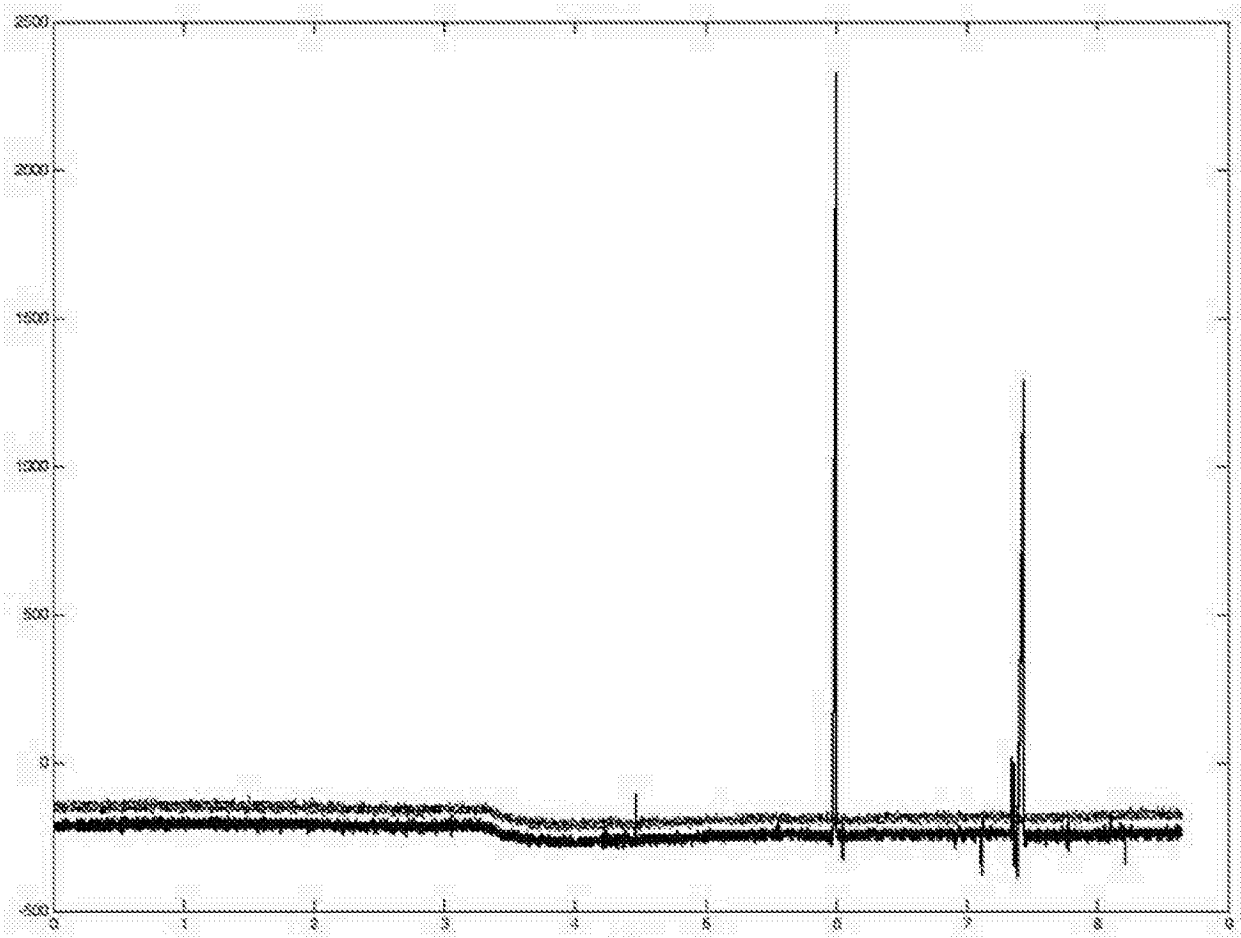


图 4