



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 119511682 B

(45) 授权公告日 2025.03.25

(21) 申请号 202510087218.3

(22) 申请日 2025.01.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 119511682 A

(43) 申请公布日 2025.02.25

(73) 专利权人 中国人民解放军国防科技大学

地址 410073 湖南省长沙市开福区德雅路
109号

(72) 发明人 龚航 王金玉 李宗楠 彭竞

马明 臧文驰 郭宇 陈曦 付栋

于水 苟飞瀚 孔崇宇

(74) 专利代理机构 长沙国科天河知识产权代理

有限公司 43225

专利代理师 唐品利

(51) Int.Cl.

G05B 11/42 (2006.01)

G06F 1/04 (2006.01)

G06F 17/10 (2006.01)

H04B 7/185 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 114966766 A, 2022.08.30

US 2023113888 A1, 2023.04.13

审查员 张珊珊

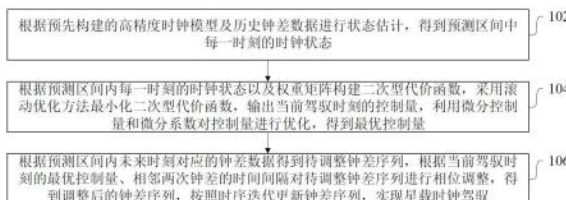
权利要求书3页 说明书10页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法、装置及系统

(57) 摘要

本申请涉及一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法、装置及系统。所述方法包括：根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计，得到预测区间内每一时刻的时钟状态；根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数，采用滚动优化方法最小化二次型代价函数，输出当前驾驭时刻的控制量，利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化，得到最优控制量；根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列，根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整，得到调整后的钟差序列，按照时序迭代更新钟差序列，实现星载时钟驾驭。采用本方法能够增强星载二级频标的性能。



1. 一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法,其特征在于,所述方法包括:

根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态;所述预测区间的下界为当前驾驭时刻,上界为滚动长度;

根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数,利用数值求解最小化二次型代价函数,输出当前驾驭时刻的初步控制量,利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化,得到最优控制量,基于滚动优化逐步计算每个时刻的最优控制量;

根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列,根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列,按照时序迭代更新钟差序列,实现星载时钟驾驭。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,构建高精度时钟模型的步骤包括:

根据上一时刻的钟差数据构建趋势项模型;

获取历史钟差数据,根据所述趋势项模型从历史钟差数据中去除趋势项,得到去趋势后的历史钟差数据;

对去趋势后的历史钟差数据进行频谱分析,采用快速傅里叶变换方法提取频率,使用最小二乘拟合估计频率的幅度和相位,构建周期项模型;

根据所述周期项模型从去趋势后的历史钟差数据中去除周期项,得到对应的历史残差数据;

获取预训练的残差预测模型,将历史残差数据和历史驾驭调整量输入所述预训练的残差预测模型,得到未来时刻的残差数据,根据预测得到的残差数据构建不确定项模型;

根据所述趋势项模型、周期项模型和不确定项模型构建高精度时钟模型。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述高精度时钟模型为:

$$x(t) = a_0 + a_1 t + \frac{1}{2} a_2 t^2 + \sum_{m=1}^M (b_m \sin 2\pi f_m + \varphi_m) + \phi(t) + \varepsilon(t)$$

其中, $x(t)$ 代表当前钟差, a_0 代表上一时刻的已有钟差, a_1 代表频率偏差, a_2 代表频率漂移, $\sum_{m=1}^M (b_m \sin 2\pi f_m + \varphi_m)$ 代表周期项, $\phi(t)$ 代表不确定项, $\varepsilon(t)$ 代表五种随着时间变化的幂律谱噪声的叠加。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态包括:

遍历预测区间,利用卡尔曼滤波算法对当前遍历时刻的上一时刻的钟差数据进行处理,基于高精度时钟模型得到当前遍历时刻的时钟状态,直至预测区间内每一时刻遍历完成时,停止遍历,输出预测区间内每一时刻的时钟状态。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数包括:

根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数为:

$$J = h\left(x_{[k+N|k]}\right) + \sum_{i=0}^{N-1} g\left(x_{[k+i|k]}, u_{[k+i|k]}\right) ;$$

$$h(x_{[k+N|k]}) = \frac{1}{2} x_{[k+N|k]}^T S_{[k]} x_{[k+N|k]} ;$$

$$\sum_{i=0}^{N-1} g(x_{[k+i|k]}, u_{[k+i|k]}) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [x_{[k+i|k]}^T Q_{[k]} x_{[k+i|k]} + u_{[k+i|k]}^T R_{[k]} u_{[k+i|k]}] ;$$

其中, J 为二次型代价函数, $x_{[k+i|k]}$ 为 k 时刻预测区间中第 i 个时刻的时钟状态, $S_{[k]}$ 为末端状态权重矩阵, $Q_{[k]}$ 为 k 时刻的状态误差权重矩阵, $R_{[k]}$ 为 k 时刻的控制量权重矩阵, $u_{[k+i|k]}$ 为 k 时刻预测区间中第 i 个时刻的控制量, $i \in [0, N-1]$, N 为预测区间长度, 预测区间为 $[1, N]$, $[\cdot]^T$ 表示转置运算。

6. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化, 得到最优控制量包括:

根据时钟状态变化率得到微分控制量, 利用微分系数对微分控制量进行加权再与控制量融合, 并利用二分法对微分系数进行寻优, 根据寻优结果得到最优控制量为:

$$u_{[k]_{new}} = u_{[k]} + \rho^* \Delta x_{[k]}$$

其中, $u_{[k]_{new}}$ 为最优控制量, $u_{[k]}$ 为控制量, ρ 为微分系数, $\Delta x_{[k]}$ 为微分控制量。

7. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 根据当前驾驭时刻的新的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整, 得到调整后的钟差序列包括:

根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整, 得到调整后的钟差序列为:

$$\begin{bmatrix} x_{[k+1]_{new}} \\ x_{[k+2]_{new}} \\ \vdots \\ x_{[k+N]_{new}} \\ \vdots \end{bmatrix} = u_{[k]_{new}} \times \begin{bmatrix} \Delta t \\ 2 \times \Delta t \\ \vdots \\ N \times \Delta t \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{[k+1]} \\ x_{[k+2]} \\ \vdots \\ x_{[k+N]} \\ \vdots \end{bmatrix} ;$$

其中, $\begin{bmatrix} x_{[k+1]new} \\ x_{[k+2]new} \\ \vdots \\ x_{[k+N]new} \\ \vdots \end{bmatrix}$ 为调整后的钟差序列, $\begin{bmatrix} x_{[k+1]} \\ x_{[k+2]} \\ \vdots \\ x_{[k+N]} \\ \vdots \end{bmatrix}$ 为待调整钟差序列, $u_{[k]new}$ 为

k 时刻的最优控制量, Δt 为相邻两次钟差的时间间隔, N 为预测区间长度。

8. 一种基于模型预测的星载时钟驾驭装置, 其特征在于, 所述装置包括:

状态估计模块, 用于根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计, 得到预测区间内每一时刻的时钟状态; 所述预测区间的下界为当前驾驭时刻, 上界为滚动长度;

控制量优化模块, 用于根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数, 采用数值求解方法最小化二次型代价函数, 输出当前驾驭时刻的控制量, 利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化, 得到最优控制量;

时钟驾驭模块, 用于根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列, 根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整, 得到调整后的钟差序列, 按照时序迭代更新钟差序列, 实现星载时钟驾驭。

9. 一种应用于权利要求1-7任一项所述的基于模型预测的星载时钟驾驭方法的系统, 其特征在于, 所述系统包括上位机、星载时钟、数模转换器和压控晶振;

所述上位机根据所述钟差数据和高精度时钟模型进行状态估计, 得到预测区间内每一时刻的时钟状态, 根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数, 采用数值求解方法最小化二次型代价函数, 输出当前驾驭时刻的控制量, 利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化, 得到最优控制量; 所述预测区间的下界为当前驾驭时刻, 上界为滚动长度;

所述数模转换器用于将上位机输出的最优控制量转换为模拟电压信号, 并输出至所述压控晶振;

所述压控晶振用于根据所述模拟电压信号生成相应的最优频率调整量;

所述星载时钟用于对所述最优频率调整量进行时间累积, 转换为钟差调整量, 根据所述钟差调整量进行时钟驾驭。

一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法、装置及系统

技术领域

[0001] 本申请涉及星载时钟驾驭技术领域,特别是涉及一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法、装置及系统。

背景技术

[0002] 随着综合 PNT(定位、导航与授时)体系的建立和完善,导航增强系统作为未来综合 PNT 体系的重要一部分也在飞速发展。随着产业链各环节技术成熟及成本下降,技术突破对降低卫星建设成本的效果是极为显著的,当前考虑降低成本主要涉及三个方面:卫星发射技术,卫星回收技术,以及卫星载荷。从卫星载荷角度考虑,若是能够采用二级频标作为星载时钟,则载荷成本将会显著降低。但若搭载二级频标,一方面自主守时的重要性开始凸显出来,另一方面产业应用对时间同步精度有较高要求,意味着其自身搭载的钟的性能较好,能满足较高的精度需求,而单纯依赖二级频标,无法满足这些需求。如高稳定性晶振和芯片原子钟,其短稳都较好,但是长稳表现较差。因此如何利用星钟驾驭技术实现低成本钟满足较高精度要求是急需解决的技术问题。

[0003] 现有时钟驾驭算法,如PID法(Proportional-Integral-Derivative Controller,比例-积分-微分控制器)和乒乓法常用于铷钟晶振驾驭,并且十分成熟。基于PID控制算法的GPS驯服时钟,其参数调节十分复杂,原因在于PID三个参数相互关联,调节后无法确定其一定为最优驾驭结果。使用乒乓法利用GPS对铷钟进行驾驭,其优点是相比于PID算法,驾驭量计算过程相对简单,设计复杂度低,缺点在于其本质仍然是比例控制算法,系统一方面会较长时间难以达到稳态,另一方面也会存在稳定驾驭后仍存在较大波动情况,无法满足更高性能需求。

发明内容

[0004] 基于此,有必要针对上述技术问题,提供一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法、装置及系统。

[0005] 一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法,所述方法包括:

[0006] 根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态;所述预测区间的下界为当前驾驭时刻,上界为滚动长度;

[0007] 根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数,采用滚动优化方法最小化二次型代价函数,输出当前驾驭时刻的控制量,利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化,得到最优控制量;

[0008] 根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列,根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列,按照时序迭代更新钟差序列,实现星载时钟驾驭。

[0009] 在其中一个实施例中,还包括:根据上一时刻的钟差数据构建趋势项模型;获取历史钟差数据,根据所述趋势项模型从历史钟差数据中去除趋势项,得到去趋势后的历史钟

差数据;对去趋势后的历史钟差数据进行频谱分析,采用快速傅里叶变换方法提取频率,使用最小二乘拟合估计频率的幅度和相位,构建周期项模型;根据所述周期项模型从去趋势后的历史钟差数据中去除周期项,得到对应的历史残差数据;获取预训练的残差预测模型,将历史残差数据和历史驾驭调整量输入所述预训练的残差预测模型,得到未来时刻的残差数据,根据预测得到的残差数据构建不确定项模型;

[0010] 根据所述趋势项模型、周期项模型和不确定项模型构建高精度时钟模型。

[0011] 在其中一个实施例中,还包括:所述高精度时钟模型为:

$$[0012] \quad x(t) = a_0 + a_1 t + \frac{1}{2} a_2 t^2 + \sum_{m=1}^M (b_m \sin 2\pi f_m + \varphi_m) + \phi(t) + \varepsilon(t);$$

[0013] 其中, $x(t)$ 代表当前钟差, a_0 代表上一时刻的已有钟差, a_1 代表频率偏差, a_2 代表频率漂移, $\sum_{m=1}^M (b_m \sin 2\pi f_m + \varphi_m)$ 代表周期项, $\phi(t)$ 代表不确定项, $\varepsilon(t)$ 代表五种随着时间变化的幂律谱噪声的叠加。

[0014] 在其中一个实施例中,还包括:遍历预测区间,利用卡尔曼滤波算法对当前遍历时刻的上一时刻的钟差数据进行处理,基于高精度时钟模型得到当前遍历时刻的时钟状态,直至预测区间内每一时刻遍历完成时,停止遍历,输出预测区间内每一时刻的时钟状态。

[0015] 在其中一个实施例中,还包括:根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数为:

$$[0016] \quad J = h(x_{[k+N|k]}) + \sum_{i=0}^{N-1} g(x_{[k+i|k]}, u_{[k+i|k]});$$

$$[0017] \quad h(x_{[k+N|k]}) = \frac{1}{2} x_{[k+N|k]}^T S_{[k]} x_{[k+N|k]};$$

$$[0018] \quad \sum_{i=0}^{N-1} g(x_{[k+i|k]}, u_{[k+i|k]}) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} [x_{[k+i|k]}^T Q_{[k]} x_{[k+i|k]} + u_{[k+i|k]}^T R_{[k]} u_{[k+i|k]}];$$

[0019] 其中, J 为二次型代价函数, $x_{[k+i|k]}$ 为 k 时刻预测区间中第 i 个时刻的时钟状态, $S_{[k]}$ 为末端状态权重矩阵, $Q_{[k]}$ 为 k 时刻的状态误差权重矩阵, $R_{[k]}$ 为 k 时刻的控制量权重矩阵, $u_{[k+i|k]}$ 为 k 时刻预测区间中第 i 个时刻的控制量, $i \in [0, N-1]$, N 为预测区间长度,预测区间为 $[1, N]$, $[\cdot]^T$ 表示转置运算。

[0020] 在其中一个实施例中,还包括:根据时钟状态变化率得到微分控制量,利用微分系数对微分控制量进行加权再与控制量融合,并利用二分法对微分系数进行寻优,根据寻优结果得到最优控制量为:

$$[0021] \quad u_{[k]_{new}} = u_{[k]} + \rho * \Delta x_{[k]};$$

[0022] 其中, $u_{[k]_{new}}$ 为最优控制量, $u_{[k]}$ 为控制量, ρ 为微分系数, $\Delta x_{[k]}$ 为微分控制量。

[0023] 在其中一个实施例中,还包括:根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列为:

$$[0024] \quad \begin{bmatrix} x_{[\tilde{k}+1]new} \\ x_{[\tilde{k}+2]new} \\ \vdots \\ x_{[\tilde{k}+N]new} \\ \vdots \end{bmatrix} = u_{[\tilde{k}]new} \times \begin{bmatrix} \Delta t \\ 2 \times \Delta t \\ \vdots \\ N \times \Delta t \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{[\tilde{k}+1]} \\ x_{[\tilde{k}+2]} \\ \vdots \\ x_{[\tilde{k}+N]} \\ \vdots \end{bmatrix};$$

$$[0025] \quad \text{其中,} \quad \begin{bmatrix} x_{[\tilde{k}+1]new} \\ x_{[\tilde{k}+2]new} \\ \vdots \\ x_{[\tilde{k}+N]new} \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ 为调整后的钟差序列,} \quad \begin{bmatrix} x_{[\tilde{k}+1]} \\ x_{[\tilde{k}+2]} \\ \vdots \\ x_{[\tilde{k}+N]} \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ 为待调整钟差序列, } u_{[\tilde{k}]new} \text{ 为 } k \text{ 时刻}$$

的最优控制量, Δt 为相邻两次钟差的时间间隔, N 为预测区间长度。

[0026] 一种基于模型预测的星载时钟驾驭装置, 所述装置包括:

[0027] 状态估计模块, 用于根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计, 得到预测区间内每一时刻的时钟状态; 所述预测区间的下界为当前驾驭时刻, 上界为滚动长度;

[0028] 控制量优化模块, 用于根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数, 采用滚动优化方法最小化二次型代价函数, 输出当前驾驭时刻的控制量, 利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化, 得到最优控制量;

[0029] 时钟驾驭模块, 用于根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列, 根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整, 得到调整后的钟差序列, 按照时序迭代更新钟差序列, 实现星载时钟驾驭。

[0030] 一种基于模型预测的星载时钟驾驭系统, 所述系统包括:

[0031] 上位机、星载时钟、数模转换器和压控晶振;

[0032] 所述上位机根据所述历史钟差数据和高精度时钟模型进行状态估计, 得到预测区间内每一时刻的时钟状态, 根据所述预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数, 采用滚动优化方法最小化二次型代价函数, 输出当前驾驭时刻的控制量, 利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化, 得到最优控制量; 所述预测区间的下界为当前驾驭时刻, 上界为滚动长度;

[0033] 所述数模转换器用于将上位机输出的最优控制量转换为模拟电压信号, 并输出至所述压控晶振;

[0034] 所述压控晶振用于根据所述模拟电压信号生成相应的最优频率调整量;

[0035] 所述星载时钟用于对所述最优频率调整量进行时间累积, 转换为钟差调整量, 根据所述钟差调整量进行时钟驾驭。

[0036] 上述基于模型预测的星载时钟驾驭方法、装置及系统, 通过高精度时钟模型计算预测区间的钟差数据, 根据钟差数据进行状态估计, 得到预测区间内每一时刻的时钟状态; 根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数, 采用滚动优化方法最小化二次型代价函数, 输出当前驾驭时刻的控制量, 利用微分控制量和微分系数对控

制量进行优化,得到最优控制量;根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列,根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列,按照时序迭代更新钟差序列,实现星载时钟驾驭。本发明实施例,计算简单,成本低,能够降低钟差波动,提高频率准确度和频率稳定度,增强复杂环境下星载二级频标的性能,能够实现低轨卫星时间同步的实时、高精度及低成本的需求。

附图说明

[0037] 图1为一个实施例中基于模型预测的星载时钟驾驭方法的流程示意图;

[0038] 图2为一个实施例中时钟驾驭流程示意图;

[0039] 图3为一个实施例中基于MPC (Model Predictive Controller,模型预测控制器)的时钟驾驭算法的流程示意图;

[0040] 图4为一个实施例中钟差仿真结果图,其中,图4(a)为铷钟应用于本发明方法时的理论和仿真艾伦偏差曲线对比示意图,图4(b)为晶振应用于本发明方法时的理论和仿真艾伦偏差曲线对比示意图;

[0041] 图5为一个实施例中不同算法下的时钟驾驭频率稳定度结果示意图,其中,图5(a)为不同算法下晶振驾驭频率稳定度结果示意图,图5(b)为不同算法下铷钟驾驭频率稳定度结果示意图;

[0042] 图6为一个实施例中基于模型预测的星载时钟驾驭装置的结构框图;

[0043] 图7为一个实施例中基于模型预测的星载时钟驾驭系统的结构框图。

具体实施方式

[0044] 为了使本申请的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本申请进行进一步详细说明。应当理解,此处描述的具体实施例仅仅用以解释本申请,并不用于限定本申请。

[0045] 在一个实施例中,如图1所示,提供了一种基于模型预测的星载时钟驾驭方法,包括以下步骤:

[0046] 步骤102,根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态。

[0047] 其中,预测区间的下界为当前驾驭时刻,上界为滚动长度。

[0048] 星载时钟存在不同类型,一般分为两类:一级频率标准,包括氢钟、铯钟和高性能铷钟,二级频率标准,包括性能略差的铷钟、芯片原子钟和高性能晶振。对于这两类时钟,均符合原子钟的多项式模型,不同在于模型中频漂、五种幂律谱噪声系数,可以根据不同各自的特征,分别模拟不同的时钟信号。

[0049] 对于星载时钟,在其原本物理特性的基础上,利用参考的时钟信号,解算出钟差,并基于钟差短期预测的方式提高驾驭方法的实时性和正确性,再通过模型预测算法,计算最优调整量,实现对星载时钟与参考时钟的准确同步,提高星载时钟的性能。需要注意的是,虽然MPC在许多系统中是一种强有力的控制方法,但在应用于复杂环境下的时钟系统时,由于时钟误差的复杂性和不确定性,模型的准确性难以得到保障,预测结果就会出现偏

差,从而导致控制效果不理想,为解决模型不清晰和不确定性带来的挑战,本发明方法设计了高精度时钟模型,利用本发明方法,可以实现在复杂环境下星载时钟搭载二级频率标准的同时,确保性能满足要求。

[0050] 步骤104,根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数,采用滚动优化方法最小化二次型代价函数,输出当前驾驭时刻的控制量,利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化,得到最优控制量。

[0051] 通过代价函数来对时钟驾驭时的控制量进行优化,具有明确的寻优策略和调参规律,利用滚动优化策略,使得在时钟驾驭时更能平衡时钟性能中短稳和长稳的关系,引入微分项,综合计算驾驭调整量,降低了时钟相位的波动,同时由于微分的引入,使得驯服系统能够更快收敛。

[0052] 步骤106,根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列,根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列,按照时序迭代更新钟差序列,实现星载时钟驾驭。

[0053] 如图2所示的时钟驾驭流程示意图,本发明方法包括如下步骤:钟差产生;时钟状态估计:利用建立的高精度时钟模型和历史钟差数据进行钟差数据状态估计;算法的代价函数设计;利用滚动优化计算当前时刻最优控制;微分项引入及微分系数,并对上一步所得最优控制量进行优化更新;计算得到最优控制量并将其转化为相位变化;按照时序重复上述步骤。本发明方法能够充分提升复杂环境下星载二级频率标准时钟的性能,同时保持星载二级频率标准时钟低成本的优势,在实际应用中可对铷钟及晶振进行驾驭,使其与GNSS系统时间保持同步。

[0054] 上述基于模型预测的星载时钟驾驭方法中,通过高精度时钟模型计算预测区间的钟差数据,根据钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态;根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数,采用滚动优化方法最小化二次型代价函数,输出当前驾驭时刻的控制量,利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化,得到最优控制量;根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列,根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列,按照时序迭代更新钟差序列,实现星载时钟驾驭。本发明实施例,计算简单,成本低,能够降低钟差波动,提高频率准确度和频率稳定度,增强复杂环境下星载二级频标的性能。实现低轨卫星时间同步的实时、高精度及低成本的需求。

[0055] 在一个实施例中,构建高精度时钟模型的步骤包括:根据上一时刻的钟差数据构建趋势项模型;获取历史钟差数据,根据趋势项模型从历史钟差数据中去除趋势项,得到去趋势后的历史钟差数据;对去趋势后的历史钟差数据进行频谱分析,采用快速傅里叶变换方法提取频率,使用最小二乘拟合估计频率的幅度和相位,构建周期项模型;根据周期项模型从去趋势后的历史钟差数据中去除周期项,得到对应的历史残差数据;获取预训练的残差预测模型,将历史残差数据和历史驾驭调整量输入预训练的残差预测模型,得到未来时刻的残差数据,根据预测得到的残差数据构建不确定项模型;根据趋势项模型、周期项模型和不确定项模型构建高精度时钟模型。

[0056] 在本实施例中,模型预测算法在进行控制时,其对模型是十分敏感的,受复杂环境的影响,其钟差模型复杂且不确定,直接将模型控制算法应用于时钟驾驭,会遇到模型建模

不清晰以及驾驭出错的问题。本发明基于时钟钟差数据,对钟差重新进行建模,将钟差分离为三部分:趋势项、周期项、以及卫星所处复杂环境引起的不确定项,不确定项包括噪声、干扰、温度、电离层等。

[0057] 具体的,根据初始钟差、频率偏差、频率漂移、幂律谱噪声函数以及上一时刻的钟差数据构建时钟趋势项模型,基于历史数据,去除趋势项,对钟差数据做FFT谱分析,再基于最小二乘估计,对其幅度、相位进行估计,与残差数据对齐。在此基础上,进一步去除周期项,获取去除趋势项和周期项后仅包含不确定项的残差数据,利用预先训练的残差预测模型对无法用状态空间描述的残差数据进行预测,残差预测模型可以采用LSTM或者Trasformer等模型架构,其输入为历史残差数据以及历史驾驭调整量,输出为预测的未来一段时间的不确定项造成的钟差残差。

[0058] 高精度时钟模型为:

$$[0059] \quad x(t) = a_0 + a_1 t + \frac{1}{2} a_2 t^2 + \sum_{m=1}^M (b_m \sin 2\pi f_m + \varphi_m) + \phi(t) + \varepsilon(t);$$

[0060] 其中, $x(t)$ 代表当前钟差, a_0 代表上一时刻的已有钟差, a_1 代表频率偏差, a_2 代

表频率漂移, $\sum_{m=1}^M (b_m \sin 2\pi f_m + \varphi_m)$ 代表周期项,不同轨道下其周期项的状态是不

同的, $\phi(t)$ 代表不确定项, $\varepsilon(t)$ 代表五种随着时间变化的幂律谱噪声的叠加,包括相位白噪声、相位闪烁噪声、频率白噪声、频率闪烁噪声、随机游走噪声,根据不同钟类型可以确定其噪声影响的大小以及 a_0 、 a_1 和 a_2 ,从而根据这些参数,对时钟完成建模,生成符合实际的钟差数据。本发明方法以生成的铷钟晶振两类时钟钟差为输入,利用算法进行驾驭调整。

[0061] 在一个实施例中,根据钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态包括:遍历预测区间,利用卡尔曼滤波算法对当前遍历时刻的上一时刻的钟差数据进行处理,得到当前遍历时刻的时钟状态,直至预测区间内每一时刻遍历完成时,停止遍历,输出预测区间内每一时刻的时钟状态。

[0062] 在本实施例中,星载时钟驾驭对算法的实时性要求较高,本发明方法为满足时钟驾驭实时性要求,预先基于历史时钟信号比对后得到的钟差,利用卡尔曼(kalman)算法进行短期钟差预测。对上述生成的不同类型的时钟进行驾驭,卡尔曼算法可以根据时钟理论,对 $x(t)$ 进行实时估计处理,如下式:

$$[0063] \quad T(k+1) = A \times T(k) + B \times U(k) + w(k);$$

[0064] 其中, $T(k) = [a_0 \quad a_1 \quad a_2]^T$, $U(k) = u_{[k]_{new}}$, A 为状态转移矩阵, $B = [1 \quad 0 \quad 0]^T$, $w(k)$ 为钟差噪声,利用上式,估计出每个时刻的时钟状态。

[0065] 在一个实施例中,根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型

代价函数包括：根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数为：

$$[0066] \quad J = h\left(x_{[k+N|k]}\right) + \sum_{i=0}^{N-1} g\left(x_{[k+i|k]}, u_{[k+i|k]}\right);$$

$$[0067] \quad h\left(x_{[k+N|k]}\right) = \frac{1}{2} x_{[k+N|k]}^T S_{[k]} x_{[k+N|k]};$$

$$[0068] \quad \sum_{i=0}^{N-1} g\left(x_{[k+i|k]}, u_{[k+i|k]}\right) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \left[x_{[k+i|k]}^T Q_{[k]} x_{[k+i|k]} + u_{[k+i|k]}^T R_{[k]} u_{[k+i|k]} \right];$$

[0069] 其中， J 为二次型代价函数， $x_{[k+i|k]}$ 为 k 时刻预测区间中第 i 个时刻的时钟状态， $S_{[k]}$ 为末端状态权重矩阵， $Q_{[k]}$ 为 k 时刻的状态误差权重矩阵， $R_{[k]}$ 为 k 时刻的控制量权重矩阵， $u_{[k+i|k]}$ 为 k 时刻预测区间中第 i 个时刻的控制量， $i \in [0, N-1]$ ， N 为预测区间长度，预测区间为 $[0, N]$ ， $[\cdot]^T$ 表示转置运算。

[0070] 在本实施例中，在利用模型预测算法进行控制量求解时，其通过最小化二次损失函数来寻找最优控制量。接着，利用滚动优化计算当前时刻最优控制。设某 k 时刻开始驾驭，初始状态为 $x_{[k]}$ ，在该预测区间内，基于代价函数，计算出最优控制序列 $\begin{bmatrix} u_{[k|k]} & u_{[k+1|k]} & \cdots & u_{[k+N-1|k]} \end{bmatrix}$ ，之后舍掉除 $u_{[k|k]}$ 以外的其它时刻的控制量。在 $k+1$ 时刻，重复 k 时刻操作，将经过上一时刻 $u_{[k]}$ 作用后的 $x_{[k+1|k+1]}$ 作为 $k+1$ 时刻的初始状态，预测区间从 $k+1$ 开始，再次计算出新一组 $\begin{bmatrix} u_{[k+1|k+1]} & u_{[k+2|k+1]} & \cdots & u_{[k+N|k+1]} \end{bmatrix}$ ，同样舍弃除 $u_{[k+1|k+1]}$ 以外其余控制量。随着时间前进不断重复此操作计算出每一个时刻的最优控制量。

[0071] 星载时钟驾驭对方法的抗差性也有要求，模型预测算法采用基于预测区间进行滚动优化的方式，同时可以直接在计算调整量前，添加约束，然后计算驾驭调整量，由于滚动优化的存在，算法会在出现异常跳变等问题时，计算出接下来一段时间基于这个较大输入值的调整量，相当于错误影响平均到接下来一段时间进行调整，但是当进行到下一时刻时，会重新计算调整量，而非用上一时刻的，起到抗差效果，从而保证驾驭的正确性。

[0072] 如图3所示的基于MPC的时钟驾驭算法的流程示意图，在图3中，计算控制矩阵基于系统矩阵和权重矩阵转换成标准的二次型求解的模式。通过采用最小化二次型损失函数的方式实现时钟最优调整量的计算，每次调整量的计算都是基于解算出的钟差信号，实时计算出满足综合考虑期望驾驭到的目标值、驾驭量的大小、过程中钟差波动大小的最优调整量。

[0073] 在一个实施例中，利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化，得到最优控制量包括：根据时钟状态变化率得到微分控制量，利用微分系数对微分控制量进行加权再与

控制量融合,并利用二分法对微分系数进行寻优,根据寻优结果得到最优控制量为:

$$[0074] \quad u_{[k]new} = u_{[k]} + \rho^* \Delta x_{[k]};$$

[0075] 其中, $u_{[k]new}$ 为最优控制量, $u_{[k]}$ 为控制量, ρ 为微分系数, $\Delta x_{[k]}$ 为微分控制量。

[0076] 在本实施例中,引入微分项,并对上一步所得最优控制量进行优化更新。由于在时钟驾驭过程中,时钟本身存在较大变化的问题,在原本MPC控制理论的基础上,增加微分控制,并设置权重系数,与经典模型预测算法计算出的控制量加权,最终得出一个更优的控制值。具体是在确定好Q、R、S矩阵以及MPC驾驭中其它参数后,再对该参数从0开始调整,将该参数调大至劣于未加微分项时,作为最大值,基于二分法,对微分项系数 ρ 进行寻优。

[0077] 在一个实施例中,根据当前驾驭时刻的新的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列包括:根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列为:

$$[0078] \quad \begin{bmatrix} x_{[k+1]new} \\ x_{[k+2]new} \\ \vdots \\ x_{[k+N]new} \\ \vdots \end{bmatrix} = u_{[k]new} \times \begin{bmatrix} \Delta t \\ 2 \times \Delta t \\ \vdots \\ N \times \Delta t \\ \vdots \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_{[k+1]} \\ x_{[k+2]} \\ \vdots \\ x_{[k+N]} \\ \vdots \end{bmatrix};$$

$$[0079] \quad \text{其中,} \quad \begin{bmatrix} x_{[k+1]new} \\ x_{[k+2]new} \\ \vdots \\ x_{[k+N]new} \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ 为调整后的钟差序列,} \quad \begin{bmatrix} x_{[k+1]} \\ x_{[k+2]} \\ \vdots \\ x_{[k+N]} \\ \vdots \end{bmatrix} \text{ 为待调整钟差序列,}$$

$u_{[k]new}$ 为 k 时刻的最优控制量, Δt 为相邻两个钟差数据采样时刻的时间间隔, N 为预测区间长度。

[0080] 在本实施例中,上述步骤求出的最优控制量为频率控制量,仿真实验验证时,需要将其转换为相位控制量,对当前钟差及后续钟差作调整。具体是将对应的频率调整量,按照时间进行累积求和,计算得到的对应的相位调整量加到对应的钟差数据上。从而实现将频率调整量作用到仿真的相位数据上。

[0081] 在一个具体实施例中,从理论上对关键问题进行建模分析,然后通过搭建仿真环境进行分析验证,最后通过实测数据验证理论分析和仿真结果,根据实测数据分析与验证结果来调整模型和算法。整体上用理论分析和仿真验证,并结合实际系统验证的技术路线。通过比对中高轨道与低轨的不同,如高轨道卫星相对论效应小,以及低轨和地面的不同,如所处位置会导致电离层影响不同,这两个角度入手,对比分析由于这两类的不同而导致时间上受到了何种影响,再基于这些低轨实测数据,对其进行时间序列分析,对照数据分析的特征和理论影响因素的特征,从而逐一确定低轨环境下的时间同步的影响因素。对于时钟驾驭算法,尤其是针对二级频标的时钟驾驭算法,通过对国内外关于二级频标驾驭算法及低轨时钟驾驭方法较为全面的了解,结合最优控制理论内容,分析基于模型预测算法在时钟领域对时钟模型的适用性,通过仿真实验验证低轨情况下考虑各种低轨影响因素下该算法的适用性。如图4所示的钟差仿真结果图,其中,图4(a)为铷钟应用于本发明方法时的理论和仿真艾伦偏差曲线对比示意图,图4(b)为晶振应用于本发明方法时的理论和仿真艾伦偏差曲线对比示意图,其中,理论阿伦方法表示理论阿伦方差计算曲线,重叠阿伦方法表示对仿真生成的钟差序列用重叠阿伦方差计算的结果曲线,修正阿伦方法对仿真生成的钟差序列用修正阿伦方差计算的结果曲线。如图5所示的不同算法下的时钟驾驭频率稳定度结果示意图,其中,图5(a)为不同算法下晶振驾驭频率稳定度结果示意图,图5(b)为不同算法下铷钟驾驭频率稳定度结果示意图,I、J、K、L和M分别表示未驾驭时的晶振驾驭频率稳定度结果以及采用PID、PP(Proportional-Plus-Controller,比例增强控制器)、LQR(Linear Quadratic Regulator,线性二次调节器)和本发明算法下的晶振驾驭频率稳定度结果,N、O、P、Q和R分别表示未驾驭时的铷钟驾驭频率稳定度结果采用PID、PP、LQR和本发明算法下的铷钟驾驭频率稳定度结果。上述仿真结果证明模拟的时钟驾驭符合实际控制流程,贴合驾驭的场景,从而使得驾驭方法得以准确验证。

[0082] 应该理解的是,虽然图1的流程图中的各个步骤按照箭头的指示依次显示,但是这些步骤并不是必然按照箭头指示的顺序依次执行。除非本文中有明确的说明,这些步骤的执行并没有严格的顺序限制,这些步骤可以以其它的顺序执行。而且,图1中的至少一部分步骤可以包括多个子步骤或者多个阶段,这些子步骤或者阶段并不必然是在同一时刻执行完成,而是可以在不同的时刻执行,这些子步骤或者阶段的执行顺序也不必然是依次进行,而是可以与其它步骤或者其它步骤的子步骤或者阶段的至少一部分轮流或者交替地执行。

[0083] 在一个实施例中,如图6所示,提供了一种基于模型预测的星载时钟驾驭装置,包括:

[0084] 状态估计模块602,用于根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态;预测区间的下界为当前驾驭时刻,上界为滚动长度;

[0085] 控制量优化模块604,用于根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数,采用滚动优化方法最小化二次型代价函数,输出当前驾驭时刻的控制量,利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化,得到最优控制量;

[0086] 时钟驾驭模块606,用于根据预测区间内未来时刻对应的钟差数据得到待调整钟差序列,根据当前驾驭时刻的最优控制量、相邻两次钟差的时间间隔对待调整钟差序列进行相位调整,得到调整后的钟差序列,按照时序迭代更新钟差序列,实现星载时钟驾驭。

[0087] 关于基于模型预测的星载时钟驾驭装置的具体限定可以参见上文中对于基于模型预测的星载时钟驾驭方法的限定,在此不再赘述。上述基于模型预测的星载时钟驾驭装置中的各个模块可全部或部分通过软件、硬件及其组合来实现。上述各模块可以硬件形式内嵌于或独立于计算机设备中的处理器中,也可以以软件形式存储于计算机设备中的存储器中,以便于处理器调用执行以上各个模块对应的操作。

[0088] 在一个实施例中,如图7所示,提供了一种基于模型预测的星载时钟驾驭系统,包括上位机、星载时钟、数模转换器和压控晶振;

[0089] 上位机用于根据预先构建的高精度时钟模型及历史钟差数据进行状态估计,得到预测区间内每一时刻的时钟状态,根据预测区间内每一时刻的时钟状态以及权重矩阵构建二次型代价函数,采用滚动优化方法最小化二次型代价函数,输出当前驾驭时刻的控制量,利用微分控制量和微分系数对控制量进行优化,得到最优控制量;预测区间的下界为当前驾驭时刻,上界为滚动长度;

[0090] 数模转换器用于将上位机输出的最优控制量转换为模拟电压信号,并输出至压控晶振;

[0091] 压控晶振用于根据模拟电压信号生成相应的最优频率调整量;

[0092] 星载时钟用于对最优频率调整量进行时间累积,转换为钟差调整量,根据钟差调整量进行时钟驾驭。

[0093] 星载时钟驾驭系统,是通过星载时钟驾驭算法计算出最优调整量后,利用DAC计算出对应的电压控制量,再通过压控晶振,产生对应的最优频率调整量,模拟实现时,则DAC和压控晶振均转换为系统传递函数,再通过时间累积,将最优频率调整量转换为最优钟差调整量,实现驾驭系统的建设,从而将算法实现与实际相贴合。

[0094] 以上实施例的各技术特征可以进行任意的组合,为使描述简洁,未对上述实施例中的各个技术特征所有可能的组合都进行描述,然而,只要这些技术特征的组合不存在矛盾,都应当认为是本说明书记载的范围。

[0095] 以上所述实施例仅表达了本申请的几种实施方式,其描述较为具体和详细,但并不能因此而理解为对发明范围的限制。应当指出的是,对于本领域的普通技术人员来说,在不脱离本申请构思的前提下,还可以做出若干变形和改进,这些都属于本申请的保护范围。因此,本申请专利的保护范围应以所附权利要求为准。

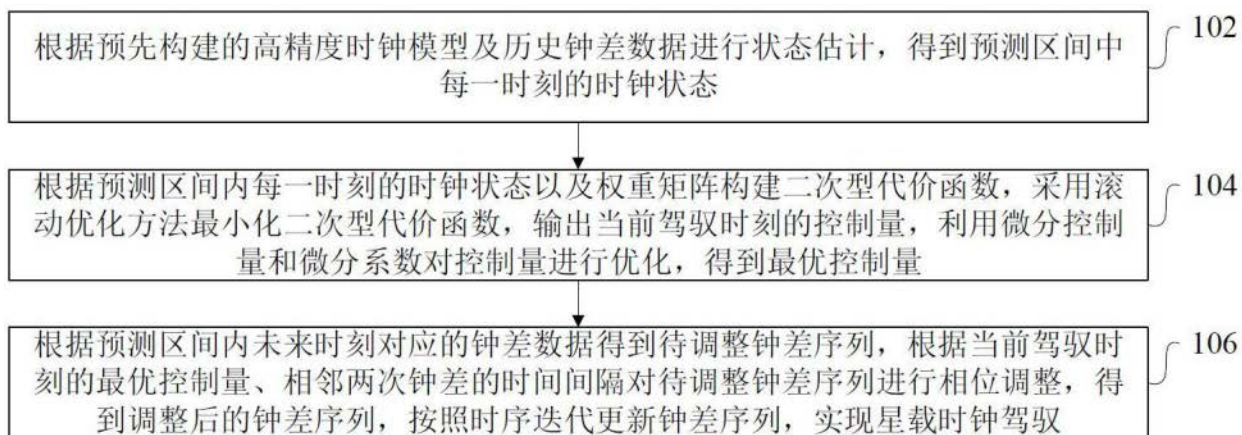


图 1



图 2

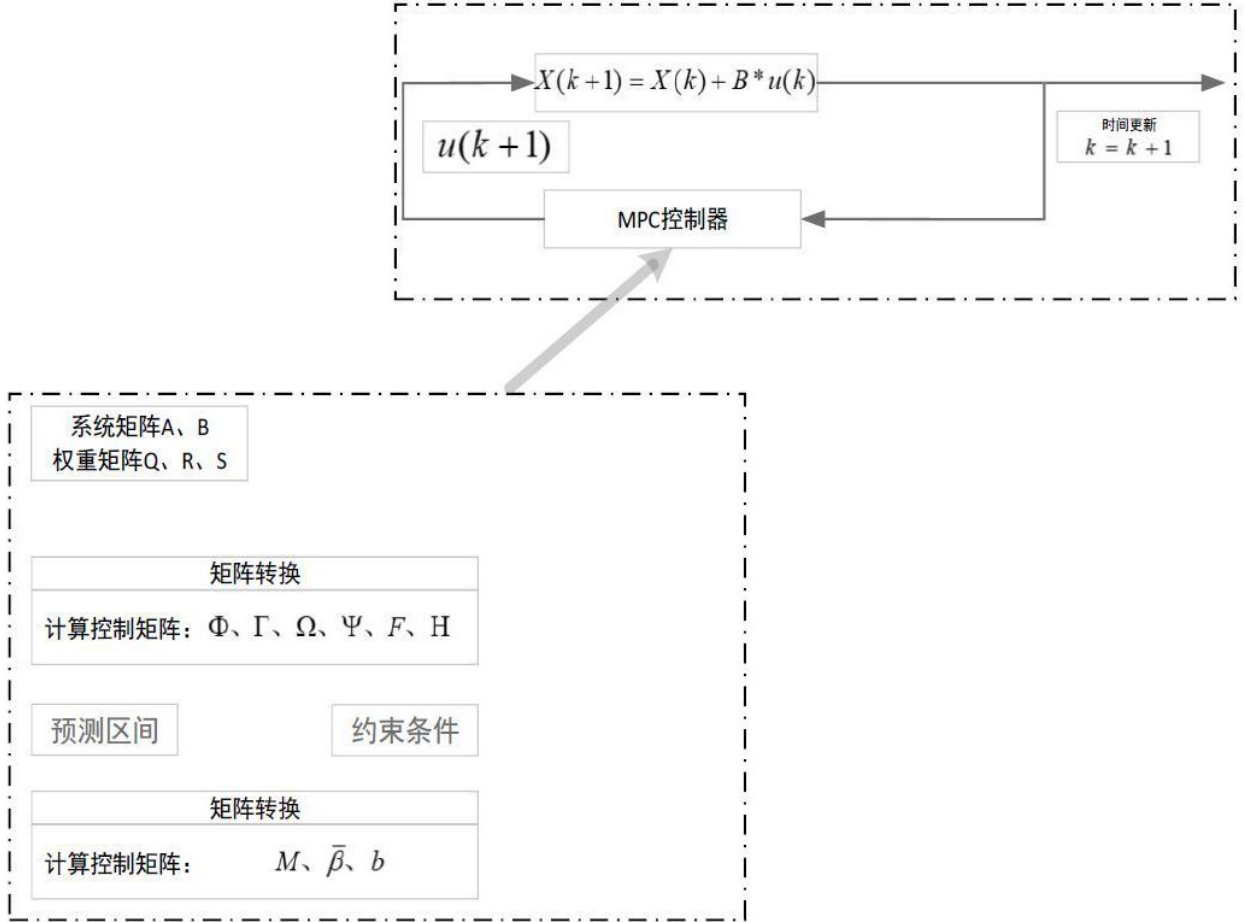
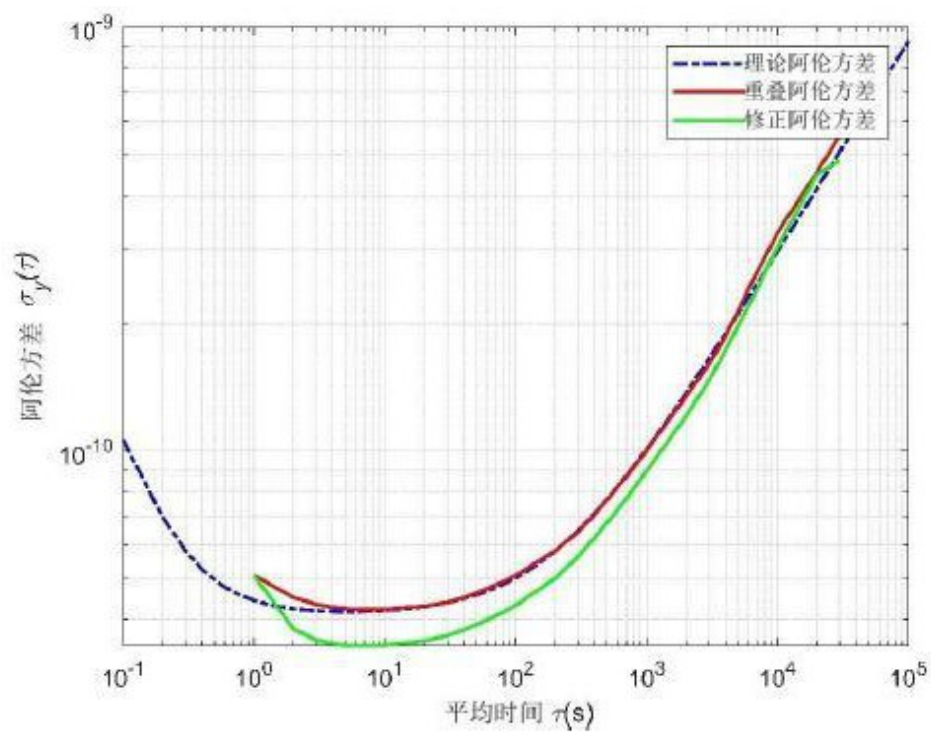
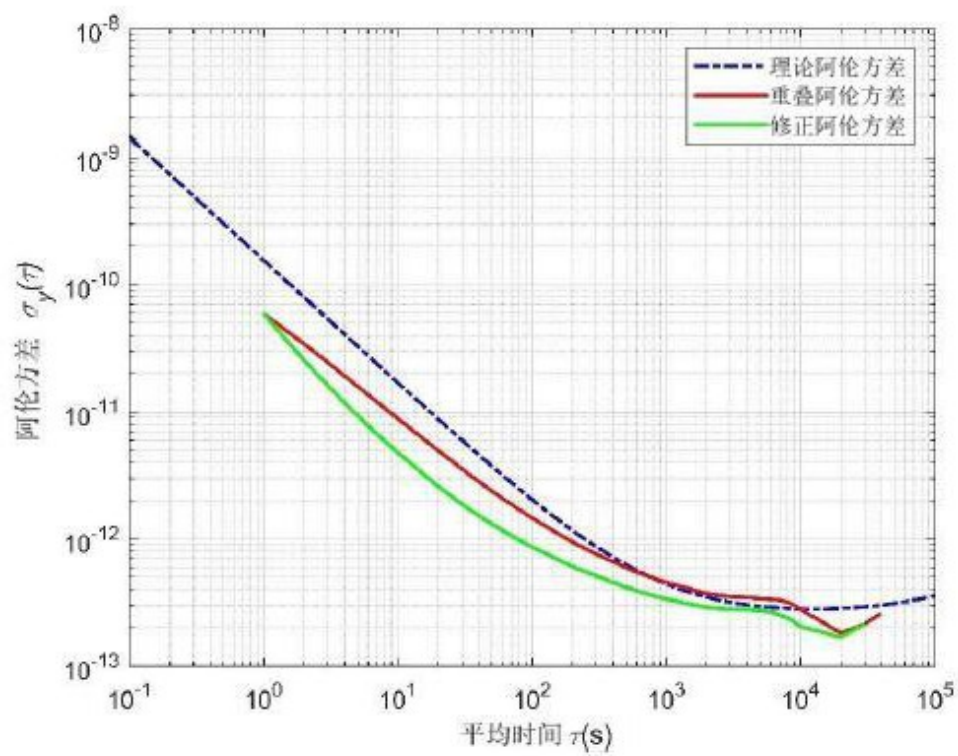


图 3



(a)



(b)

图 4

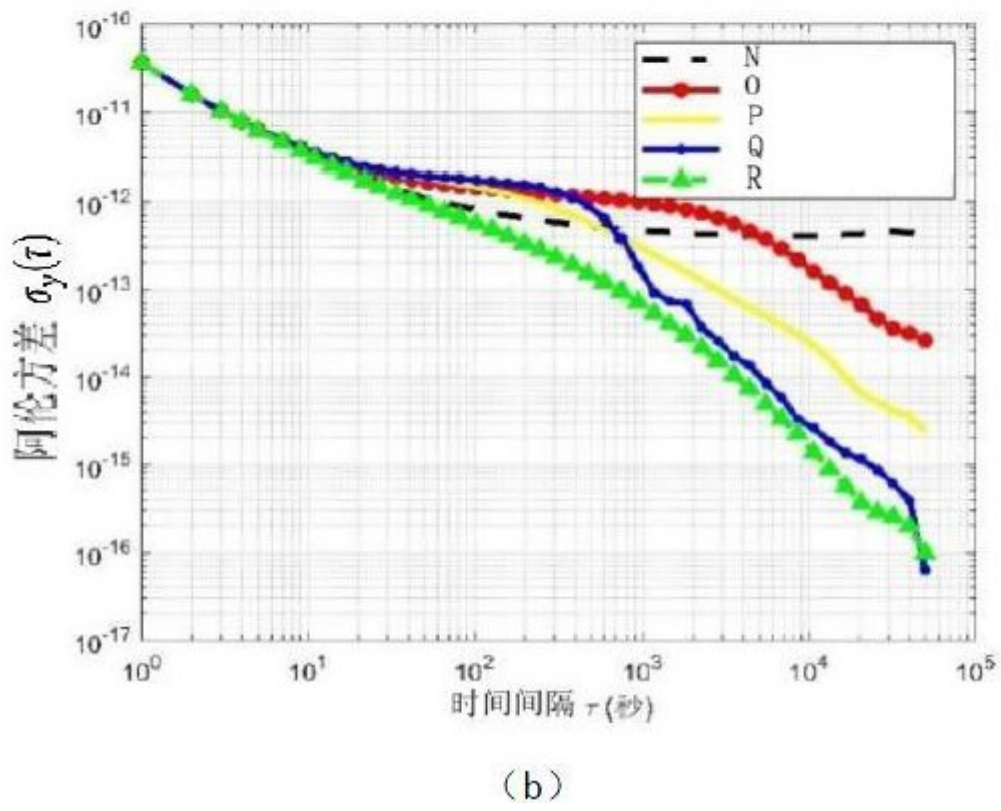
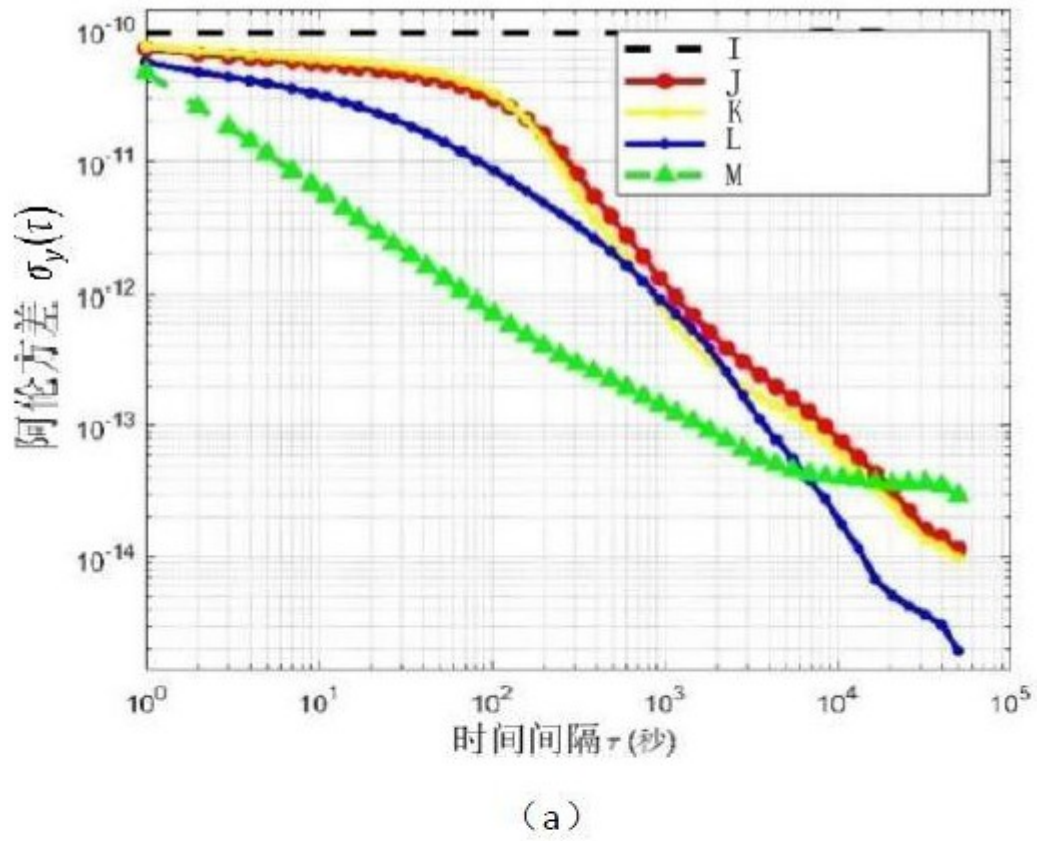


图 5



图 6



图 7