

浮空器光谱望远镜组合定姿算法研究

郭伟峰^{1,2},曹小涛¹,杨维帆¹,王瀚^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:光谱望远镜指向及稳像控制系统的控制精度要求高,对光谱望远镜的姿态信息测量精度提出了更高要求。首先,针对组合定姿过程中 $k-k_i$ 时刻仅有角速度信息输出而无法精确连续定姿的问题,提出一种平滑滤波算法,依据 $k-k_i$ 时刻角速度信息与期望值偏差的分布,自适应的调整角速度信息对测量系统输出结果影响的权重,以便在仅以角速度信息为输入的情况下,预测方程能够准确的输出姿态信息,进而保证姿态信息输出的连续性。其次,利用广义 kalman 滤波器对光谱望远镜的姿态信息进行校正,提高光谱望远镜的定姿精度。最终,仿真结果表明,角度信息输出速率为 100hz,满足控制系统对姿态信息连续性的要求;姿态估计误差优于 1.5° ,光谱望远镜姿态测量系统的数据输出误差达到控制系统对该信息的要求。

关键词:组合定姿;广义卡尔曼滤波;平滑滤波

中图分类号:TP301.6;TP391.9 **文献标识码:**B

Algorithm Research on Attitude Determination of Spectral Telescope Based on Aerostat

GUO Wei-feng^{1,2}, CAO Xiao-tao¹, YANG Wei-fan¹, WANG Han^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy Sciences, Changchun Jilin 130033, China;2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

ABSTRACT: The spectral telescope pointing and image stabilization control system has high control precision requirements, and puts higher requirements on the accuracy of attitude information measurement of the spectral telescope. Firstly, aiming at the problem that the angular velocity information output can only be accurately and continuously fixed at the $k-k_i$ moment in the combined attitude, a smoothing algorithm is proposed. According to the distribution of the angular velocity information and the expected value deviation at the $k-k_i$ moment, the adaptive adjustment was made. The angular velocity information affects the weight of the measurement system output, so that the prediction equation can accurately output the attitude information when the angular velocity information is only input, thereby ensuring the continuity of the attitude information output. Secondly, the generalized Kalman filter was used to correct the attitude information of the spectral telescope, and the accuracy of the spectacle telescope was improved. Finally, the simulation results show that the accurate Angle information output rate is 100hz, which meets the requirements of the control system for the continuity of attitude information. The error of attitude estimation is better than 1.5° , and the data output precision of the spectral telescope attitude measurement system meets the requirement of the control system.

KEYWORDS: Combined posture; Generalized Kalman filtering; Smoothing filtering

1 引言

对行星大气进行观测是深空探测的主要研究内容。基于浮空器利用光谱望远镜进行观测,相较于基于地基和卫星进行观测,具有成像质量高、使用成本低等优点。高空环境下受气流、温度等环境的影响,浮空器平台在观测时会出现旋转摆动等现象,需姿态测量系统高精度的测量浮空器光谱

望远镜的姿态变化。

姿态测量系统的测量精度主要受限于姿态敏感器的硬件精度和姿态确定算法的精度,姿态测量系统常采用几种姿态敏感器的组合方式,在各种组合方案中,星敏感器和陀螺仪的组合测量精度最高^[1,2],广泛应用于卫星和飞船的姿态测量中。星敏感器可提供精确的光谱望远镜的姿态信息,但不能连续输出^[3];陀螺仪可以连续输出卫星的角速度信息,但陀螺仪输出信息存在漂移,漂移误差会随着时间的变化累积,不能提供精确的姿态信息^[4]。针对上述问题,文献[5]研

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11703027)

收稿日期:2018-12-26 修回日期:2019-03-07

究了基于PI滤波算法的陀螺仪与星敏感器组合定姿算法。文献[6]研究了基于时变比例系数进行陀螺仪与星敏感器组合定姿的算法。

由于光谱望远镜精密指向及稳像控制系统对姿态信息输出的连续性和精度要求较高,且传感器的背景噪声较大,利用现有的方法估计卫星姿态,不能很好保证姿态信息输出的连续性及其精度。卡尔曼滤波算法及其扩展性可以有效减少噪声的影响,提高预测精度[7-9]。因此,本文从减少背景噪声、随机噪声等和保证姿态信息输出连续性的角度出发,采用广义卡尔曼滤波及平滑滤波算法,将陀螺仪与星敏感器二者组合以确定望远镜的姿态。广义卡尔曼滤波可有效抑制随机噪声,对传感器测量信息进行滤波,可输出高精度的姿态信息;平滑滤波算法对陀螺仪输出数据进行滤波处理,可减少噪声对角速度信息的影响,进而保证姿态信息的精度。平滑滤波算法和广义卡尔曼滤波算法的组合,可提供连续的高精度的光谱望远镜的姿态信息。

2 测量模型

2.1 星敏感器测量模型

星敏感器可以有效测量被测对象的姿态信息^[10],其误差模型较为简单,且测量精度可以达到角秒级,其误差可认为是白噪声。本文利用星敏感器的输出的数据作为研究对象描述星敏感器测量残差^[7]。

$$Z_{3 \times 1} = \begin{bmatrix} \delta\varphi \\ \delta\theta \\ \delta\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \Delta q_{13} + \begin{bmatrix} v_\varphi \\ v_\theta \\ v_\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, $\delta\varphi, \delta\theta, \delta\psi$ 为星敏感器的测量输出值与估计输出值之差, $v_\varphi, v_\theta, v_\psi$ 为测量白噪声, $\Delta q_{13} = [\Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3]^T$ 。

2.2 单轴陀螺仪测量模型

本平台配置的为单轴陀螺仪,陀螺仪测量过程中主要考虑的误差源为与时间相关的漂移量 d_i 、零偏 b_i 和测量噪声 η_g ,陀螺仪的测量模型为^[2,11]

$$\begin{cases} \dot{\tilde{w}}_i = w_i + b_i + d_i + \eta_g \\ \dot{d}_i = -\frac{1}{\tau_i} d_i + \eta_d \\ \dot{b}_i = \eta_b \end{cases} \quad (2)$$

式中 \tilde{w}_i 为陀螺的测量输出值; w_i 为光谱望远镜相对于惯性空间的真实角速度在本地坐标系上的坐标; τ_i 为相关时间常数; η_g, η_d, η_b 为高斯白噪声。

3 滤波器状态方程

3.1 姿态四元数误差模型

选用姿态误差四元数 Δq ,与时间相关的漂移误差 Δd ,零偏误差 Δb 作为系统的状态变量,即 $X_{9 \times 1} = [\Delta q_{13}^T \quad \Delta d^T$

$\Delta b^T]^T$,其中 $\Delta q = [\Delta q_0 \quad \Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3]^T, \Delta q_{13} = [\Delta q_1 \quad \Delta q_2 \quad \Delta q_3]^T$ 。据运动学方程 $\dot{q} = \frac{1}{2}q \otimes \omega$,带入 $q = \hat{q} \otimes \Delta q$,结果如式(3)所示^[2,5,11]

$$\Delta \dot{q} = \frac{1}{2} \Delta q \otimes \hat{\omega} - \frac{1}{2} \hat{\omega} \otimes \Delta q + \frac{1}{2} \Delta q \otimes \Delta \omega \quad (3)$$

其中

$$\frac{1}{2} \Delta q \otimes \omega = \frac{1}{2} \Delta \omega + O(\|\Delta q\| \|\Delta \omega\|) \quad (4)$$

化简,整理可得

$$\begin{cases} \Delta \dot{q}_{13} = \Delta q_{13} \times \hat{\omega} + \frac{1}{2} \Delta \omega \\ \quad = -[\omega \times] \Delta q_{13} + \frac{1}{2} \Delta \omega \\ \Delta \dot{q}_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

3.2 滤波器状态方程

根据上述推导,系统状态方程可记为

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + W(t) \quad (6)$$

其中

$$F(t) = \begin{bmatrix} -[\hat{\omega} \times] & -0.5I_{3 \times 3} & -0.5I_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & -\frac{1}{\tau_i} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix}_{9 \times 9} \quad (7)$$

$$W(t) = \begin{bmatrix} \eta_g \\ \eta_d \\ \eta_b \end{bmatrix}_{9 \times 1} \quad (8)$$

首先离散化系统的状态方程和量测方程。离散化式(6)系统状态方程可变为

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k,k-1} + W_{k-1} \quad (9)$$

其中, $\Phi_{k,k-1}$ 为 t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻的一步转移阵,可用下式表示

$$\Phi_{k,k-1} = I_{9 \times 9} + FT \quad (10)$$

式中 T 为滤波器周期。 W_{k-1} 为系统噪声序列, W_k 满足 $E(W_k) = 0, E(W_k W_j^T) = Q_k \delta_{kj}$,其中 $Q_k = \text{diag}(0.25 \sigma_g^2 I_{3 \times 3}, \sigma_d^2 I_{3 \times 3}, \sigma_b^2 I_{3 \times 3})$ 。

线性化并离散化式(1)量测方程

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (11)$$

其中观测矩阵 H_k 为

$$H_k = [2 I_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3} \quad 0_{3 \times 3}] \quad (12)$$

其中 V_k 为测量噪声,满足 $E(V_k) = 0, E(V_k V_j^T) = R_k \delta_{kj}, R_k$ 为测量噪声方差阵^[8-10]

4 平滑滤波算法及滤波器设计

组合定姿系统在 $k-k_i$ 时刻仅有陀螺仪输出值,为进一步减小光谱望远镜姿态信息输出误差,对陀螺仪的输出值进行平滑滤波处理,降低噪声的影响,再利用预测方程估计光谱望远镜的姿态信息;在星敏感器提供位姿信息的测量时

刻,利用广义卡尔曼滤波器对其进行处理,从而进一步校正平台的姿态信息。

4.1 平滑滤波算法

在 $k - k_i$ 时刻,对陀螺仪的输出值进行平滑滤波处理,再利用预测方程估计光谱望远镜的姿态信息。

平滑滤波处理后的角速度信息为

$$\hat{\omega} = \mu (w_m - \Delta b_k) + (1 - \mu) \bar{w} \quad (14)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=k-\lambda}^{k-1} w_i \quad (15)$$

$$\mu = \alpha e\left(-\frac{(w_m - \bar{w})^2}{\beta}\right) \quad (16)$$

预测方程

$$\hat{X}_k = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (17)$$

其中, α 为 $k - k_i$ 时刻测量值在平滑滤波处理后所占据的权重, β 为系数。 $\hat{\omega}$ 为估计值, w_m 为 $k - k_i$ 时刻测量值, λ 为 k 时刻前所需的 w 的数量。式(17)为预测方程,可较准确的预测光谱望远镜的姿态信息,其中 $\Phi_{k,k-1}$ 与角速度有关。当 $\alpha = 0.7979$ $\beta = 40$ 时,误差在 $-30'' \sim 30''$ 范围内变化时与系数 μ 的关系示意图如图 1 所示。

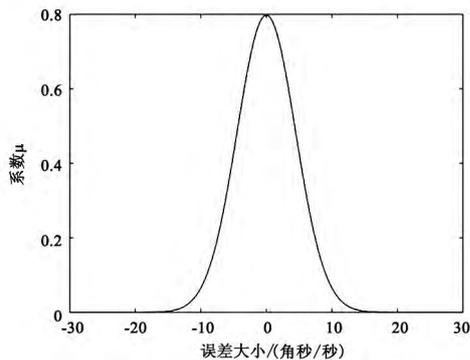


图 1 μ 与误差大小的关系示意图

利用提出的平滑滤波算法对加入白噪声的正弦信号进行滤波处理,可得结果如图 2 ~ 3 所示。

图 2 为采用平滑滤波算法处理前后的曲线,图 3 为采用平滑滤波算法处理前后的误差曲线。由图 2 ~ 3 可得,平滑滤波前误差为 $0.0384''(3\sigma)$,平滑滤波后误差为 $0.0232''(3\sigma)$ 。滤波后误差较滤波前误差减小 39.58%,进一步减少了噪声的扰动。

4.2 滤波器设计

在 k 时刻,取得星敏感器的测量值时,利用广义 kalman 对获得的光谱望远镜的姿态信息进行精确校正。在获得星敏感器的测量值后,可按以下式^[12,13]进行精确校正:

状态矢量的更新值为

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}] \quad (18)$$

卡尔曼增益更新值为

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (19)$$

先验误差协方差阵的预测方程为

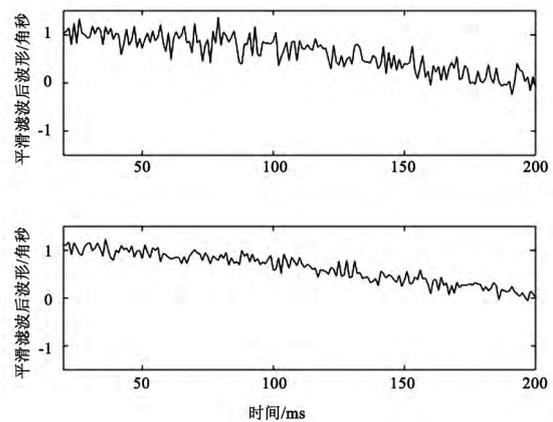


图 2 平滑滤波前后波形

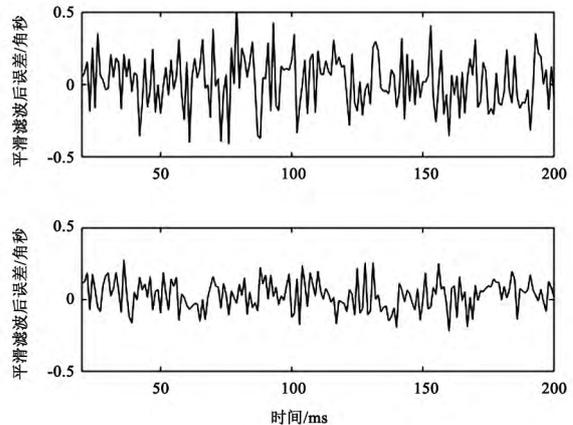


图 3 平滑滤波前后误差曲线

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + Q_k \quad (20)$$

预测方程

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (21)$$

后验误差协方差阵的更新方程为

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k-1} (I - K_k H_k)^T + K_k R_k K_k^T \quad (22)$$

5 仿真验证及结果分析

利用 MATLAB 对上述算法进行仿真分析验证。设陀螺仪的测量噪声 $0.1''/h$, 随机漂移白噪声 $0.01''/h$, 常值漂移白噪声 $3''/h$, 采样频率 $100Hz$; 星敏感器的测量噪声 $5''$, 采样频率为 $10Hz$; 相关时间常数 τ 取 $3600s$, 滤波初值为 $X = [0]_{1 \times 9}$ 。

将加噪声的不同曲线作为滤波对象,采用平滑滤波与广义卡尔曼滤波算法结合处理上述曲线。模拟仿真结果可见图 4~7;其中,图 4 为采用广义卡尔曼滤波算法与平滑滤波算法处理前的姿态信息曲线,图 5 为滤波处理后的姿态信息曲线,图 6 为滤波处理前的姿态角与真实姿态角的误差曲线,图 7 为滤波处理后的姿态角与真实姿态角的误差曲线。表 1 为采用广义卡尔曼滤波及平滑滤波前后误差对比。

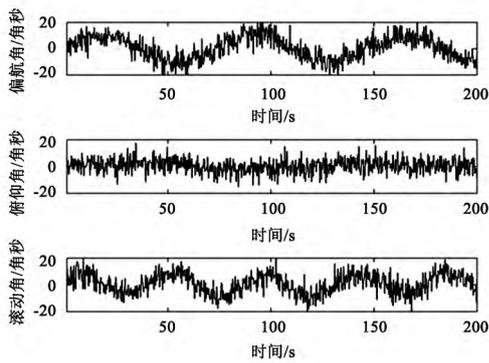


图4 处理前姿态信息曲线

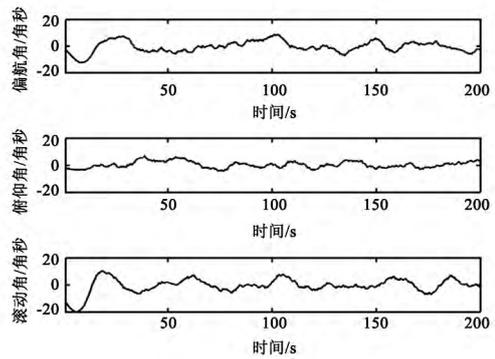


图7 处理后的姿态角估计误差曲线

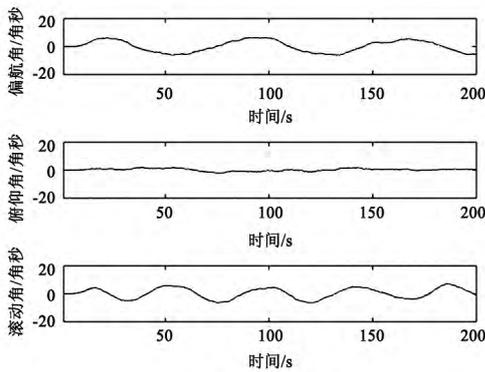


图5 处理后的姿态信息曲线

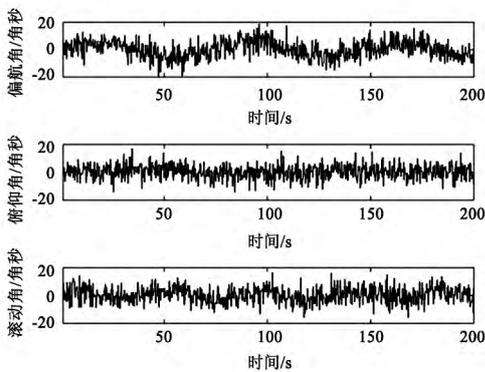


图6 处理前姿态角的误差曲线

表1 滤波处理前后误差对比

	滤波前误差 (3σ)	滤波后误差 (3σ)
偏航角	$5.6742''$	$0.9673''$
俯仰角	$4.5672''$	$0.6547''$
滚动角	$5.2343''$	$1.2012''$

由仿真结果(见图4~7及表1)可知:当时间达到30s后,姿态角的误差优于 $1.5''$,误差减小为原来的1/4倍,测量系统的数据输出速率为100Hz;根据工程要求,当误差优于 $2''$,即可视为到达精度要求,输出速率为80Hz以上,满足对

数据输出连续性的要求。仿真结果证明将本文提出的平滑滤波算法与广义卡尔曼滤波算法组合可以有效减少噪声的影响。

6 结论

光谱望远镜指向及稳像控制精度取决于测量系统的姿态信息输出精度和连续性。本文首先建立了星敏感器和陀螺仪的测量模型及滤波器的状态方程;其次,为提高输出姿态信息的精度和保证姿态信息输出的连续性,提出一种平滑滤波与广义卡尔曼滤波相结合的算法;最后,对光谱望远镜姿态信息进行滤波实验,实验结果表明,数据输出速率为100Hz,姿态估计误差优于 $1.5''$,证明本文所设计的滤波器算法具有可行性,该算法是提高光谱望远镜定姿精度和保证姿态信息输出连续性的有效途径,可为光谱望远镜的姿态定位测量系统的进一步研究与应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] Mohinder S Grewal, Angus P Andrews. Kalman Filtering Theory and Practice Using MATLAB[M]. Publishing House of Electronics Industry, 2017.
- [2] 边志强,程卫强,薛孝补,等. 基于陀螺和星敏感器的卫星姿态确定算法[J]. 航天工程, 2011,(2):29-34.
- [3] 唐君,苏轼鹏. 船用星敏感器天体的跟踪辨识[J]. 光学精密工程, 2017,25(7):1949-1953.
- [4] 张永祥,孙辉,马天伟,等. 抑制压电陀螺仪噪声方法的研究[J]. 光学精密工程, 2004,12(3):230-234.
- [5] 王献忠,张肖. 陀螺与星敏感器组合定姿及陀螺漂移估计[J]. 航天控制, 2018,36(4):7-10.
- [6] 张和芬,姜洋,余婧,等. 基于时变比例系数的陀螺仪/星敏感器组合定姿方法研究[J]. 上海航天, 2017,(6):42-49.
- [7] 王明礼,马建珍,薛申芳. 广义卡尔曼滤波中状态预报值算法[J]. 计算机仿真, 2007,24(6):96-98.
- [8] 刘南南,徐抒岩,曹小涛,等. Kalman滤波算法在高精度星点定位中的应用[J]. 光学学报, 2013,33(11):133-138.

(下转第286页)

Third International Conference on Advances in Control and Optimization of Dynamical Systems, 2014:13-15.

- [2] 王耀威, 纪志坚, 翟海川. 仿生机器鱼运动控制方法综述[J]. 智能系统学报, 2014, 9(3): 276-284.
- [3] 杜如虚, 钟勇, 陈贤帅, 李峥. 基于拉线机构的机器鱼运动控制仿真研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2014, 57(1): 409-414.
- [4] 任光. 机器海豚推进系统运动学与控制方法研究[D]. 北京理工大学, 2015.
- [5] 汪明, 喻俊志, 谭民, 王会东, 李成栋. 机器海豚多模态游动CPG控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1933-1941.
- [6] 张磊, 孟中杰. 基于尾鳍推进模型的三关节仿生机器海豚系统[J]. 兵工自动化, 2016, 35(12): 72-77.
- [7] 曹渝华. 机器海豚出水运动模拟及其换能机制研究[D]. 东南大学, 2015.
- [8] Yu Junzhi, Hu Yonghui, Fan Ruifeng et al. Mechanical design and motion control of a biomimetic robotic dolphin[J]. Advanced Robotics, 2007, 21(3): 499-513.

- [9] 蔡自兴, 谢斌. 机器人学(第三版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 54-56.
- [10] 马兆伟. 仿生机器鱼推进波形调节控制及实验研究[D]. 国防科学技术大学, 2013.
- [11] 冯畅. 仿鲸科三关节可升潜机器鱼设计与研制[D]. 南京理工大学, 2016.
- [12] 余胜威. MATLAB 优化算法案例分析与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2014: 124-129.

[作者简介]



李亮亮(1990-), 男(汉族), 河南省濮阳市人, 硕士研究生, 主要研究领域为机电控制技术;

薛志斌(1970-), 男(汉族), 陕西省清涧县人, 教授, 博士, 硕士研究生导师, 主要研究领域为智能控制、机电控制技术(通信作者)。

(上接第 179 页)

- [4] 黄智瀚, 周锋, 马华东, 等. 自适应访问模式的缓存替换策略[J]. 北京邮电大学学报, 2016, 39(3): 44-48.
- [5] 张建伟, 王旭辉, 蔡增玉, 等. 基于势能冷却的内容中心网络缓存替换算法[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(09): 1612-1617.
- [6] 陆悠, 杜鹏程, 吴帅, 等. 面向多用户环境的弹性云缓存系统研究与实现[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(6): 883-891.
- [7] 王磊, 李金城, 康彬, 等. 多主从 Stackelberg 博弈下的边缘缓存资源分配算法[J]. 信号处理, 2019, 35(4): 574-581.
- [8] 侯春雨, 张震, 王睿. 基于 CCN 节点内容流行规律的缓存路由策略[J]. 数学的实践与认识, 2019, 49(5): 225-238.
- [9] 王兴伟, 王子健, 李福亮, 等. 信息中心网络缓存节点位置选择算法[J]. 国防科技大学学报, 2019, 41(1): 152-160.

- [10] 李楚, 冯丹, 王芳. 一种高性能高可靠的混合客户端缓存系统[J]. 计算机研究与发展, 2017, 54(11): 2497-2507.

[作者简介]



冯芝丽(1986-), 女(汉族), 湖南永州人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 大数据/图像处理;

周南(1986-), 男(汉族), 湖南衡阳人, 硕士研究生, 讲师, 研究方向: 大数据算法研究;

胡涛(1990-), 女(汉族), 湖南衡阳人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 大数据算法研究;

叶伦强(1981-), 男(汉族), 四川成都人, 硕士, 实验师, 研究方向: 计算机科学技术。

(上接第 183 页)

- [9] 张焕鑫, 李学锋. 卡尔曼滤波在捷联惯组误差系数预测中的应用[J]. 计算机仿真, 2013, 30(5): 46-49.
- [10] 唐君, 苏轼鹏. 船用星敏传感器天体的跟踪辨识[J]. 光学精密工程, 2017, 25(7): 1949-1953.
- [11] 马松, 李堃, 刘凌居, 等. 基于光纤陀螺-星敏传感器联合定姿的 Kalman 滤波方法研究[J]. 飞机设计, 2015, (4): 56-60.
- [12] A J E Riggs, N J Kasdin, T D Groff. Recursive Starlight and Bias Estimation for High-Contrast Imaging with an Extended Kalman Filter[J]. Journal of Astronomical Telescopes Instruments and System, 2016, 2(1): 011017.
- [13] 秦永元, 张洪斌, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015.

[作者简介]



郭伟峰(1994-), 男(汉族), 山东滨州人, 硕士研究生, 主要研究领域为浮空器光谱望远镜精密指向及稳像控制;

曹小涛(1980-), 男(汉族), 河南巩义人, 博士, 副研究员, 主要研究领域为空间相机电子学及控制系统技术;

杨维帆(1987-), 男(蒙古族), 黑龙江大庆人, 博士, 助理研究员, 主要从事空间光学传感器电子学及控制方面的研究;

王瀚(1993-), 男(汉族), 河北唐山人, 硕士, 主要从事光电望远镜控制系统及嵌入式方面的研究。