

一种基于 Kalman 滤波的双电机消隙天线跟踪控制系统

马纪军¹, 高 歌², 陈 东¹, 王宇宁¹, 贾 军¹

(1 北京遥测技术研究所 北京 100076;

2 中国人民解放军 95875 部队 酒泉 735018)

摘要: 首先本文给出了天线跟踪控制系统组成及原理框图, 阐述了系统闭环工作流程; 其次, 针对天线跟踪目标过程中, 跟踪接收机输出的目标与天线波束中心角误差受随机误差分量的影响, 采用 Kalman 滤波算法对获得的实时角位置数据进行滤波处理; 然后, 对天线跟踪控制系统进行了建模, 给出了系统动力学模型, 对采用的双电机消隙设计方案进行了仿真; 最后, 通过挂飞试验验证了系统工作的可靠性。

关键词: 天线跟踪控制系统; 角误差; Kalman 滤波; 双电机消隙

中图分类号: TP275 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-1000(2023)06-0035-08

DOI: 10.12347/j.ycyk.20230621002

引用格式: 马纪军, 高歌, 陈东, 等. 一种基于 Kalman 滤波的双电机消隙天线跟踪控制系统[J]. 遥测遥控, 2023, 44(6): 35-42.

A dual-motor anti-backlash antenna tracking control system based on Kalman filter

MA Jijun¹, GAO Ge², CHEN Dong¹, WANG Yuning¹, JIA Jun¹

(1. Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China;

2. People's Liberation Army 95875, Jiuquan 735018, China)

Abstract: The article firstly provides the composition and principle diagram of the antenna tracking control system, and the closed-loop workflow of the system is described. Secondly, in the process of antenna tracking target, the error between the target output by the tracking receiver and the center angle of the antenna beam is affected by the random error component. The Kalman filtering algorithm is used to filter the real-time angle position data obtained. Thirdly, the antenna tracking control system is modeled, the system dynamics model is given, and the dual motor anti-backlash design scheme is simulated. Finally, the reliability of the system is verified by the flight test.

Keywords: Antenna tracking control system; Angle error; Kalman filtering; Double motor anti-backlash

Citation: MA Jijun, GAO Ge, CHEN Dong, et al. A dual-motor anti-backlash antenna tracking control system based on Kalman filter [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2023, 44(6): 35-42.

引 言

伺服随动系统是一种能够按照给定的轨迹或控制指令, 在一定的误差范围内实现精确跟踪的控制系统^[1], 天线跟踪控制系统属于伺服随动系统。在测控系统中, 天线跟踪控制系统对目标实时跟踪是测控设备实现对目标遥测数据接收和对目标发送上行控制指令的前提^[2-4]。抛物面天线安装固定在方位俯仰型天线座转台上, 通过控制天

线座方位俯仰运转实现对目标跟踪, 天线跟踪控制系统的跟踪精度和稳定跟踪性能决定了测控设备与目标之间通信成功率及通信效果^[5-7]。天线跟踪控制系统的天线座转台采用行星减速器加末级齿轮的传动方式, 分别绕方位轴和俯仰轴完成两个自由度的角度旋转运动, 可在方位和俯仰两个转轴自由度上完成独立的角度旋转运动。大型天线跟踪控制系统中, 通常在方位传动链和俯仰传动链上分别采用双电机消隙驱动的方式, 双电机

消除驱动不仅能增加天线跟踪控制系统的负载驱动能力, 还能增加整个天线跟踪控制系统的刚度^[8]。在天线跟踪目标的过程中, 天线跟踪控制系统的跟踪接收机热噪声、杂波干扰等引起的误差使天线电波束中心轴偏离目标, 将导致系统跟踪精度降低, 上述误差项定义为随机误差分量。为了降低其影响, 提高系统跟踪精度, 需要在控制器中依据目标的运动模型, 对由角误差数据构造的实时角位置信息进行滤波处理。通常使用的滤波算法有最小二乘法、 α - β 滤波^[9]、 α - β - γ 滤波、维纳滤波及 Kalman 滤波^[10,11], 上述滤波算法中 Kalman 滤波效果较好。

本文以方位为例, 首先, 给出了天线跟踪控制系统工作原理框图; 其次, 采用 Kalman 滤波算法对由角误差数据构造的实时角位置信息进行滤波处理, 并利用历史测量数据进行了滤波效果仿真; 然后, 对天线跟踪控制系统进行了建模, 给出了双电机消除动力学模型, 对采用的双电机消除设计方案进行了仿真; 最后, 通过挂飞试验验

证了系统工作的可靠性。

1 系统设计

1.1 系统组成

天线跟踪控制系统主要包括天线控制单元(ACU)、天线驱动单元(ADU)、方位俯仰型天线座、天线、跟踪接收机等。天线跟踪控制系统采用经典的位置环、速度环、电流环三闭环控制方式, 控制电机驱动传动机构带动天线负载运转。天线跟踪控制系统框图如图 1 所示, 位置环作为天线跟踪控制系统的最外环, 在引导模式下, 误差开关指向“1”处, 位置环控制命令为目标引导角位置信息。将该信息与系统中实时测量的天线角位置信息之差, 作为位置环 PID 控制器输入, 控制天线指向目标运动轨迹。在跟踪模式下, 误差开关指向“2”处, 天线接收目标发出的射频信号, 经过跟踪接收机解算出目标发射信号相对于天线波束中心的角误差, 作为位置环 PID 控制器输入, 控制天线跟踪目标运动轨迹, 实现空间闭环控制。

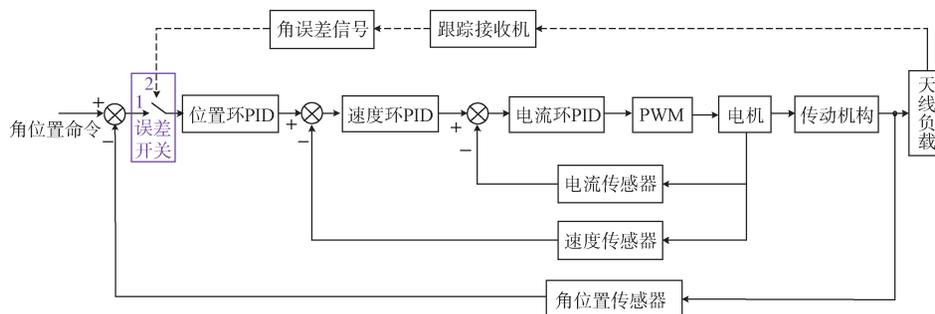


图 1 天线跟踪控制系统框图

Fig. 1 Block diagram of antenna tracking control system

1.2 滤波器设计

采用 Kalman 滤波算法在控制器中依据目标的运动模型对由角误差数据构造的实时角位置信息进行滤波处理。目标运动模型通常有常速模型、常加速模型、“当前”统计模型等^[12-15], 本文采用“当前”统计模型描述目标的运动过程。“当前”统计模型采用修正瑞利分布描述目标运动过程中加速度的概率密度, 认为在采样时刻范围内目标运动的加速度变化是有限的, 并且在当前加速度数值的邻域范围内, 因此采用一阶时间相关模型来描述加速度函数^[16,17]。

$$\begin{cases} \ddot{x}(t) = \bar{a} + a(t) \\ \dot{a}(t) = -\alpha a(t) + \omega(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x(t)$ 为角位置, 反映目标运动的实时角位置信息, 在滤波算法中由天线跟踪控制系统实时测量的角位置与接收机输出的角误差组合构成, $\ddot{x}(t)$ 为加速度, 反映目标运动的实时角加速度信息, $a(t)$ 定义为零均值的有色噪声; \bar{a} 定义为机动目标运动过程中加速度的均值, 每一个采样周期内认为加速度均值不变, 即 \bar{a} 为常数; α 为机动目标加速度时间常数的倒数, 即目标机动频率; $\omega(t)$ 是均值为 0、方差为 $\delta_\omega^2 = 2\alpha\delta_a^2$ (δ_a^2 为目标加速度的方差) 的白噪声^[18,19]。

假设目标在运动过程中作一维运动, 则系统的状态方程和量测方程可以分别描述为

$$\mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k+1|k} \mathbf{X}_k + \mathbf{U}_k \bar{a} + \mathbf{W}_k \quad (2)$$

$$Y_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + V_k \quad (3)$$

式中,

$$\Phi_{k+1|k} = \begin{pmatrix} 1 & T & \frac{1}{\alpha^2}(-1 + \alpha T + e^{-\alpha T}) \\ 0 & 1 & \frac{1}{\alpha}(1 - e^{-\alpha T}) \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{U}_k = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\alpha} \left(-T + \frac{1}{2} \alpha T^2 + (1 - e^{-\alpha T}) \right) \\ T - \frac{1}{\alpha} (1 - e^{-\alpha T}) \\ 1 - e^{-\alpha T} \end{bmatrix}$$

T 为采样时间间隔, 测量矩阵 $\mathbf{H}_k = [1 \ 0 \ 0]$, 状态向量 $\mathbf{X}_k = [x_k \ \dot{x}_k \ \ddot{x}_k]^\top$, x_k 、 \dot{x}_k 、 \ddot{x}_k 分别为目标的位置、速度和加速度状态变量, 系统噪声 \mathbf{W}_k 是均值为0、方差为 \mathbf{Q}_k 的高斯白噪声序列, 量测噪声 V_k 是均值为0、方差为 R_k 的高斯白噪声序列, 且 \mathbf{W}_k 与 V_k 互不相关。

由当前统计模型的加速度分布曲线可知, 系统噪声方差 $\mathbf{Q}_k = \mathbf{E}(\omega_k \omega_k^\top) = 2\alpha \cdot \delta_\alpha^2 \mathbf{q}$, 3×3 阶矩阵

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{12} & q_{22} & q_{23} \\ q_{13} & q_{23} & q_{33} \end{bmatrix}$$

$$q_{11} = \frac{1}{2\alpha^5} \left[1 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T + \frac{2\alpha^3 T^3}{3} - 2\alpha^2 T^2 - 4\alpha T e^{-\alpha T} \right]$$

$$q_{12} = \frac{1}{2\alpha^4} [e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T} + 2\alpha T e^{-\alpha T} - 2\alpha T + \alpha^2 T^2]$$

$$q_{13} = \frac{1}{2\alpha^3} [1 - e^{-2\alpha T} - 2\alpha T e^{-\alpha T}]$$

$$q_{22} = \frac{1}{2\alpha^2} [4e^{-\alpha T} - 3 - e^{-2\alpha T} + 2\alpha T]$$

$$q_{23} = \frac{1}{2\alpha^2} [e^{-2\alpha T} + 1 - 2e^{-\alpha T}]$$

$$q_{33} = \frac{1}{2\alpha} [1 - e^{-2\alpha T}] \quad (4)$$

δ_α^2 的计算公式为

$$\delta_\alpha^2 = \begin{cases} \frac{4-\pi}{\pi} (a_{+\max} - \bar{a}), & 0 < \bar{a} \leq a_{+\max} \\ \frac{4-\pi}{\pi} (\bar{a} - a_{-\max}), & a_{-\max} < \bar{a} \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中, $a_{+\max}$ 、 $a_{-\max}$ 是加速度极值。

基于“当前”统计模型的系统状态方程和量测方程的Kalman滤波算法迭代过程如下

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1}^1 \hat{\mathbf{X}}_{k-1|k-1} \quad (6)$$

$$\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k|k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k|k-1}^\top + \mathbf{Q}_k \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^\top (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^\top + R_k)^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1} \quad (9)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{k|k} = \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (Y_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k|k-1}) \quad (10)$$

$$\bar{a} = \hat{x}_{k|k-1} \quad (11)$$

$$\text{式中, } \Phi_{k|k-1}^1 = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

基于“当前”统计模型的Kalman滤波算法具备自适应调节能力, 表现在算法能够根据当前时刻目标运动的加速度对其方差 δ_α^2 进行调整, 调节系统噪声协方差矩阵 \mathbf{Q}_k , 进而实现滤波过程的参数调整。

1.3 双电机消隙控制

天线跟踪控制系统的天线座转台作为方位俯仰支撑转动机构, 对天线座的控制采用经典的位置环、速度环、电流环三闭环控制方式^[20], 位置闭环控制在天线控制单元中采用嵌入式平台实现^[21,22]。

采用双电机消隙驱动方法实现天线座方位轴的运转, 双电机消隙驱动是由两个具有相同指标参数的电机分别各自带动一个相同模数的小齿轮, 两个小齿轮同时与末级大齿轮啮合, 两个小齿轮按对称式结构分布, 同时运动来共同驱动大齿轮转动, 大齿轮转动带动负载运转。双电机消隙驱动方法不仅能为系统提供足够的驱动能力, 消除传动链上齿轮之间啮合的齿隙, 还能增加整个天线伺服系统的刚度, 使得方位轴的动态响应能力获得明显提升。本文中的双电机消隙驱动结构简图如图2所示, 在电机与小齿轮之间增加了一个行星减速器, 电机1通过行星减速器1带动小齿轮1转动, 电机2通过行星减速器2带动小齿轮2转动, 通过提高减速比及末级齿轮强度提升带负载能力。其中, ω_{R1} 是小齿轮1的转动角速度、 ω_{R2} 是小齿轮2的转动角速度, ω_{m1} 是电机1的转动角速度、 ω_{m2} 是电机2的转动角速度, ω_1 是末级大齿轮的角速度, i_{11} 是行星减速器1的减速比、 i_{12} 是行星减速器2的减速比, i_2 是末级齿轮和小齿轮之间的减速比。

双电机消隙驱动控制要求电机1和电机2的运转速度必须保持同步, 才能防止运转过程中的干涉现象。在实际的驱动控制系统中, 电机1和电机

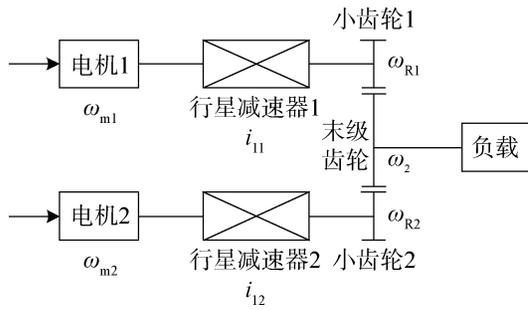


图 2 双电机消隙驱动结构简图

Fig. 2 Structure diagram of dual-motor anti-backlash drive system

2 速度控制却因受到来自各种因素的干扰，如电器 1 驱动器和电机 2 驱动器中模拟器件引起的参数漂移、两台电机本身参数非线性且特性不能完全一致等，而难以保持两台电机转动速度完全一致，因此需要进行双电机同步驱动控制。双电机同步驱动系统按照速度环路控制器的个数，其常用的布置形式可以分为两类：一种是对电机 1 和电机 2 的控制各自具备独立速度环控制的结构形式；另一种是对电机 1 和电机 2 的控制共用一个速度环控制的结构形式。本文采用一个速度环的控制结构。

在双电机同步控制速度均值负反馈控制法中，速度环控制采用一个速度控制器，将两台电机的速度求和取均值并调理后作为速度环负反馈

量与速度环控制命令作差，然后输入到速度环 PID 控制器中运算，实现对双电机的控制，所采用的电机参数如表 1 所示，电机 1 和电机 2 的线电阻和线电感有细微差别，参数偏差在数值的 0.5% 以内。

表 1 电机参数

Table 1 Motor parameter

参数	电机 1	电机 2
额定电压	380 VAC	380 VAC
额定转速	1 500 rpm	1 500 rpm
额定功率	4.7 kW	4.7 kW
额定转矩	30 Nm	30 Nm
线电阻	1.736 Ω	1.731 Ω
线电感	20.199 mH	20.149 mH

系统跟踪过程中，天线控制单元接收跟踪接收机输出的角误差信号，经过 Kalman 滤波后作为位置环 PID 控制器输入，位置环调节后的输出作为速度环输入，经过单速度环同步控制，通过电流环 1 控制电机 1 运转，通过电流环 2 控制电机 2 运转，利用两个电流环的控制，通过电机带动其各自传动链驱动天线负载运转，图 3 给出了基于 Kalman 滤波的双电机消隙跟踪控制系统框图。

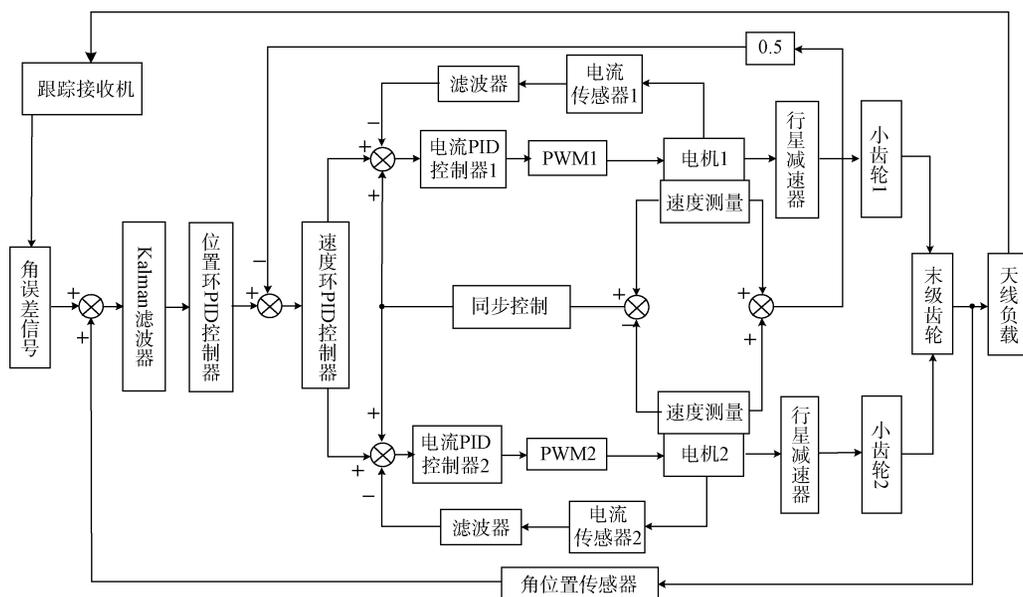


图 3 基于 Kalman 滤波的双电机消隙跟踪控制系统框图

Fig. 3 The block diagram of dual-motor anti-backlash tracking control system based on Kalman filter

2 仿真

参考图 3 中双电机消除跟踪控制系统框图，基于电机参数、电流传感器参数及电流环控制器等建立了双电流环闭环控制模型，基于传动链参数、

电机参数、速度环传感器、速度同步控制策略、速度环控制器等建立了双电机速度同步闭环控制模型，基于位置环传感器、位置环控制器等建立了位置环闭环控制仿真模型，在 MATLAB 中搭建仿真模型，仿真模型如图 4 所示。

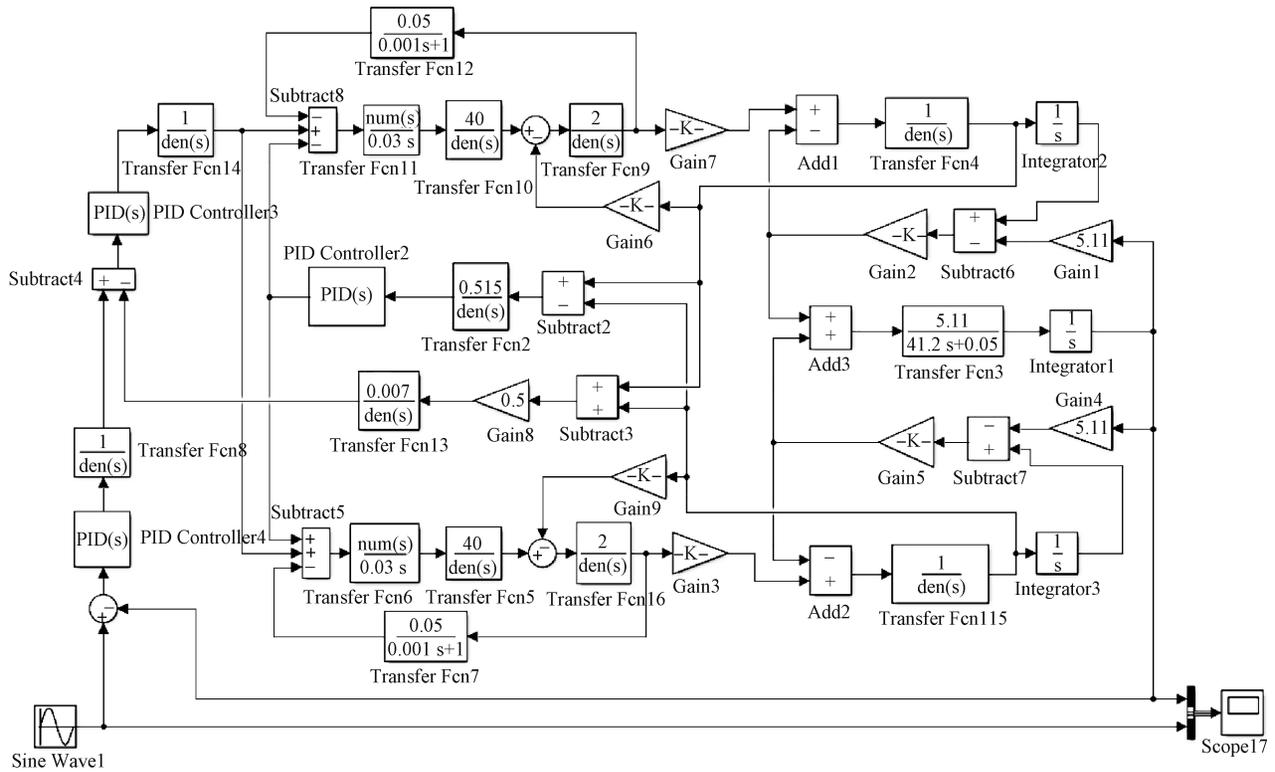


图 4 双电机驱动系统仿真模型

Fig. 4 Simulation model of dual-motor drive system

受限于空间闭环链路模型，仿真模型采用给定位置环控制命令作为输入，分别设计位置环的阶跃输入和正弦输入，通过对比输入角位置控制命令和输出角位置来近似空间闭环控制。

如图 5 所示，阶跃输入为 0.174 rad 时，输出响应超调量为阶跃幅值的 12%，调节时间为 0.2 s，系统只经过一次振荡就能够快速调节进入稳定状态。如图 6 所示，正弦输入信号为幅值 0.87 rad，周期为 0.4 rad/s 时，系统能够快速响应输入，输出响应幅值为 0.869 rad，正弦输入响应峰值误差小于 0.12%，输出响应周期为 0.4 rad/s 与输入信号周期一致，最大跟踪误差为 0.04 rad，正弦输入响应的最大误差小于 4.6%，输出正弦响应与输入信号之间的均方误差小于 2.81%。依据上述仿真结果，所设计的双电机消除驱动控制系统能够实现对阶跃输入信号和正弦输入信号的快速稳定跟踪。

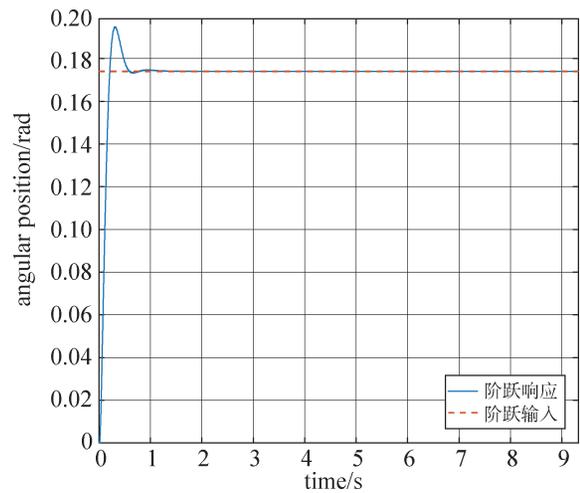


图 5 系统阶跃输入响应曲线

Fig. 5 Step-input response curve of the system

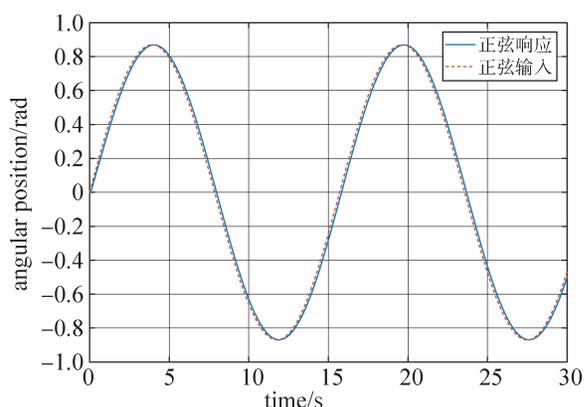


图 6 系统正弦输入响应曲线

Fig. 6 Sinusoidal input response curve of the system

3 试验

为验证系统工作可靠性，将信标机安装在一台大疆无人机上进行挂飞试验，无人机起飞后，通过天线跟踪控制系统对无人机上的信标进行跟踪，利用天线控制单元对滤波前方位角位置、Kalman 滤波后获得的方位角位置、跟踪接收机输出的方位角误差、Kalman 滤波后的角误差、天线运转方位实时角进行数据存盘。

图 7 给出了跟踪接收机输出的角误差和 Kalman 滤波后的角误差曲线，图 8 中是角误差曲线局部时间段显示，接收机输出的角误差当前时刻数值和上一时刻数值变化较大，采用 Kalman 滤波后角误差曲线变得平稳连续。上述试验结果表明：采用 Kalman 滤波能够有效抑制跟踪接收机输出的角误差上的扰动，获得平稳的角误差信号。图 9 给出了 Kalman 滤波前后角位置曲线，图 10 为 Kalman 滤波前后角位置曲线局部时间段放大显示，图 11 给出了无人机挂飞跟踪方位实时角轨迹。显然，采用 Kalman 滤波角位置命令变得更加平稳抖动较少，试验结果表明：所设计的基于 Kalman 滤波的双电机消隙天线控制系统能够实现对信标目标的稳定跟踪。

4 结束语

本文设计了一种天线跟踪控制系统，针对天线跟踪目标过程中随机误差分量的影响，提高系统跟踪精度，设计 Kalman 滤波器对跟踪接收机输出的角误差信号进行滤波。为提高这一类型大惯量系统驱动能力，增加系统的刚度，采用双电机

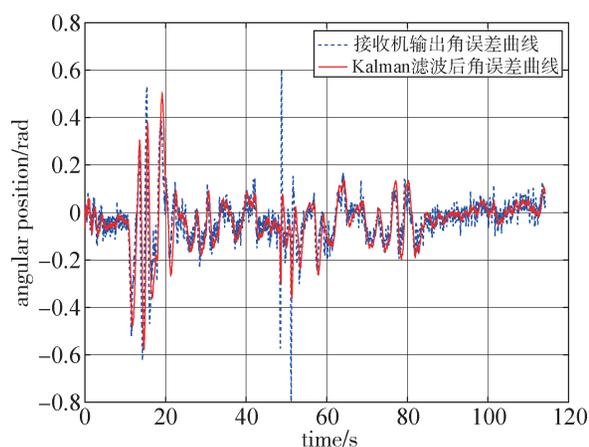


图 7 Kalman 滤波前后角误差曲线

Fig. 7 Angle error curves before and after Kalman filtering

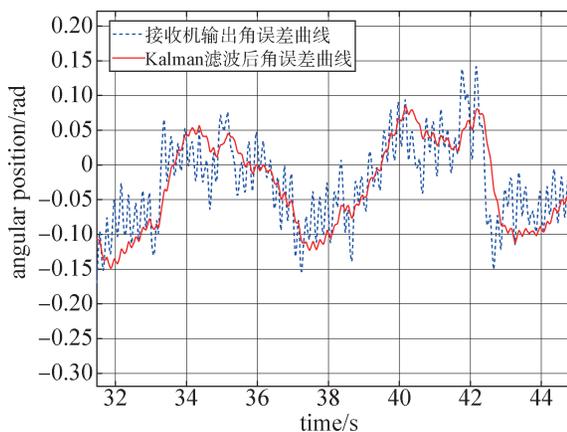


图 8 角误差曲线局部放大

Fig. 8 Partial magnification of the angular error curve

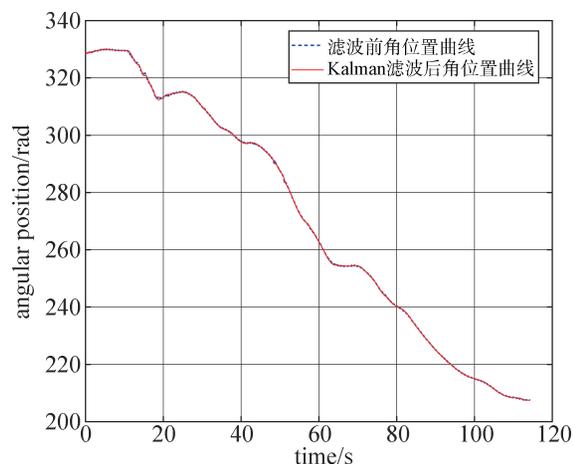


图 9 Kalman 滤波前后角位置曲线

Fig. 9 Angle position curves before and after Kalman filtering

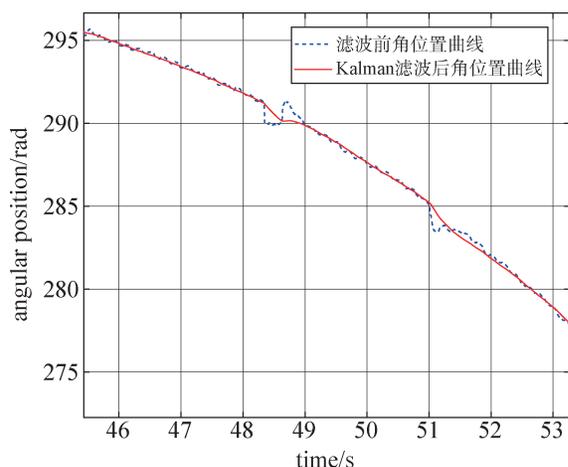


图10 角位置曲线局部放大

Fig. 10 Partial magnification of the angular position curve

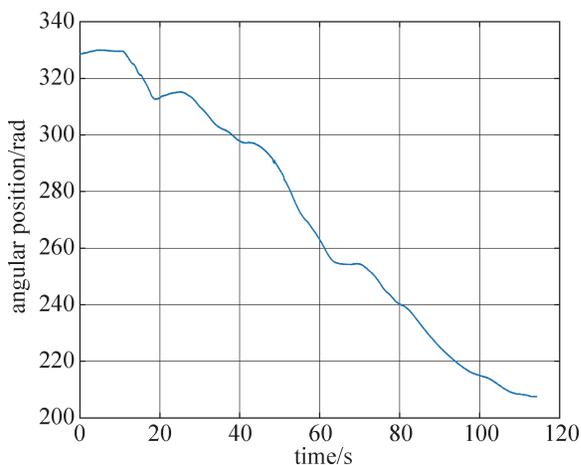


图11 无人机挂飞跟踪方位实时角轨迹

Fig. 11 Real time azimuth angle trajectory in the UAV hanging flight experiment

消除控制方案并进行了仿真, 仿真结果表明: 采用双电机消除控制能够获得较好的闭环特性。最后利用无人机进行了挂飞试验, 试验结果表明: 采用Kalman滤波能够获得平稳的角误差信息, 本文设计的基于Kalman滤波的双电机消除控制系统能够稳定实现对目标的跟踪, 这对天线跟踪控制系统工程应用具有重要的指导价值。

参考文献

[1] 刘增辉. 大惯量随动系统双电机同步消除控制方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
[2] 周庭伊, 王玮, 李海鹏. 一种应用于地面遥测站的红外跟踪标校系统设计[J]. 舰船电子工程, 2021, 41(12): 191-195.

ZHOU Tingyi, WANG Wei, LI Haipeng. Design of an infrared tracking calibration system applied on ground telemetry station[J]. Ship Electronic Engineering, 2021, 41(12): 191-195.
[3] 张跃飞, 翔宇, 苏坦. 信号饱和对遥测设备自跟踪影响的研究及应用[J]. 无线电工程, 2020, 50(1): 57-60.
ZHANG Yuefei, ZHAO Xiangyu, SU Tan. Research and application of signal saturation on tracking performance of telemetry equipment[J]. Radio Engineering, 2020, 50(1): 57-60.
[4] 陈建友, 庞岳峰, 刘津津, 等. 基于变差的遥测天线跟踪稳定度研究[J]. 遥测遥控, 2020, 41(1): 59-65.
CHEN Jianyou, PANG Yuefeng, LIU Jinjin, et al. Research on tracking stability of telemetry antenna based on variation[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2020, 41(1): 59-65.
[5] SHREE K, RAO V. Telecommunication system architecture for low earth orbit nano satellites mission support[C]// 2019 IEEE Aerospace Conference, 2019: 1-11.
[6] ZHANG Peng, HU Jinhui, XU Can, et al. Optimal design of tracking channel switching for S-band unified TT&C system of space tracking ship[C]// 2022 IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC), 2022: 852-855.
[7] WANG Xiaoliang, WU Shufan, GONG Deren, et al. Evaluation of precise microwave ranging technology for low earth orbit formation missions with Beidou time-synchronize receiver[J]. Sensors, 2021, 21(14): 1-24.
[8] 王轩, 张翔, 刘艳行. 双电机消除技术在武器伺服系统中的应用[J]. 火控雷达技术, 2020, 49(1): 78-83.
WANG Xuan, ZHANG Xiang, LIU Yanxing. Application of dual-motor anti-backlash technique in weapon servo systems[J]. Fire Control Radar Technology, 2020, 49(1): 78-83.
[9] ALRIKABI A, GRACHEV A. Adaptive α - β -filter for target tracking using real time genetic algorithm[J]. Journal of Electrical & Control Engineering, 2013, 3(4): 32-38.
[10] WELCH G, BISHOP G. An introduction to the Kalman filter[M]. University of North Carolina at Chapel Hill, 1995.
[11] 赵天东. 基于卡尔曼滤波器残差的矢量跟踪完好性研究[J]. 遥测遥控, 2021, 42(3): 14-18.
ZHAO Tiandong. Research on integrity technology of vector tracking using Kalman filter residual[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2021, 42(3): 14-18.
[12] OGATA K. Modern control engineering[M]. 4th ed.

- Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1997: 544-545.
- [13] DENG M, LI S, JIANG X, et al. Vehicle trajectory prediction method based on "Current" statistical model and cubature Kalman filter[J]. Electronics, 2023, 12(11): 2464.
- [14] 付梦印, 邓志红, 张继伟. Kalman 滤波理论及其在导航系统中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [16] 谢瑞宏. 机载光电平台伺服系统稳定与跟踪控制技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2017.
- [17] 丛志军. 雷达多机动目标的自适应跟踪算法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [18] 马纪军, 李铁, 贾军, 等. 一种基于 Kalman 滤波的跟踪控制方法[J]. 遥测遥控, 2016, 37(1): 31-37.
MA Jijun, LI Tie, JIA Jun, et al. A tracking control method based on Kalman filter[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2016, 37(1): 31-37.
- [19] 管欣, 洪峰, 贾鑫, 等. 汽车驾驶模拟器视觉系统传输延迟补偿[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1): 28-34.
GUAN Xin, HONG Feng, JIA Xin, et al. Compensation for transport delay of vision system in driving simulator[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2017, 47(1): 28-34.
- [20] 卢洁莹, 苏为洲. 天线伺服系统的快速辨识算法[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1329-1335.
LU Jieying, SU Weizhou. A fast algorithm of system identification for antenna servo systems[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(8): 1329-1335.
- [21] 李岷钊. 变结构天线伺服跟踪控制技术[J]. 电声技术, 2021, 45(4): 45-47.
LI Minzhao. Servo tracking technology based on variable structure PID control[J]. Audio Engineering, 2021, 45(4): 45-47.
- [22] 晏小庆, 阮云兰. 基于 FPGA 的天线伺服控制系统开发[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(16): 214-216.
YAN Xiaoqing, RUAN Yunlan. Development of antenna servo control system based on FPGA[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(16): 214-216.
- [作者简介]
马纪军 1986年生, 硕士, 高级工程师。
高歌 1993年生, 硕士, 工程师。
陈东 1978年生, 本科, 高级工程师。
王宇宁 1975年生, 硕士, 研究员。
贾军 1983年生, 硕士, 高级工程师。
- (本文编辑: 傅杰)