

1. 实验名称及目的

滤波器设计实验 (基础实验): 在包含控制器的多旋翼仿真模型中, 将控制器中的速度反馈信号用卡尔曼滤波估计替代。给定期望输入信号为正弦波信号, 周期为 10s, 幅值为 1。

(1) 学习并掌握卡尔曼滤波器算法的原理及应用。

(2) 在仿真 1.0 中, 将输入的真实信号与卡尔曼滤波后的信号进行对比, 比较卡尔曼滤波器在不同参数下的效果。

(3) 在仿真 2.0 中, 加入卡尔曼滤波器, 同时对比仿真 1.0 与仿真 2.0 的滤波效果。

(4) 为了简便, 本书的输入信号没有引入噪声。

2. 实验原理

针对设计所需要的仿真实验平台, 如下图所示, 详细内容请参考第 2 章 2.2.1 节。

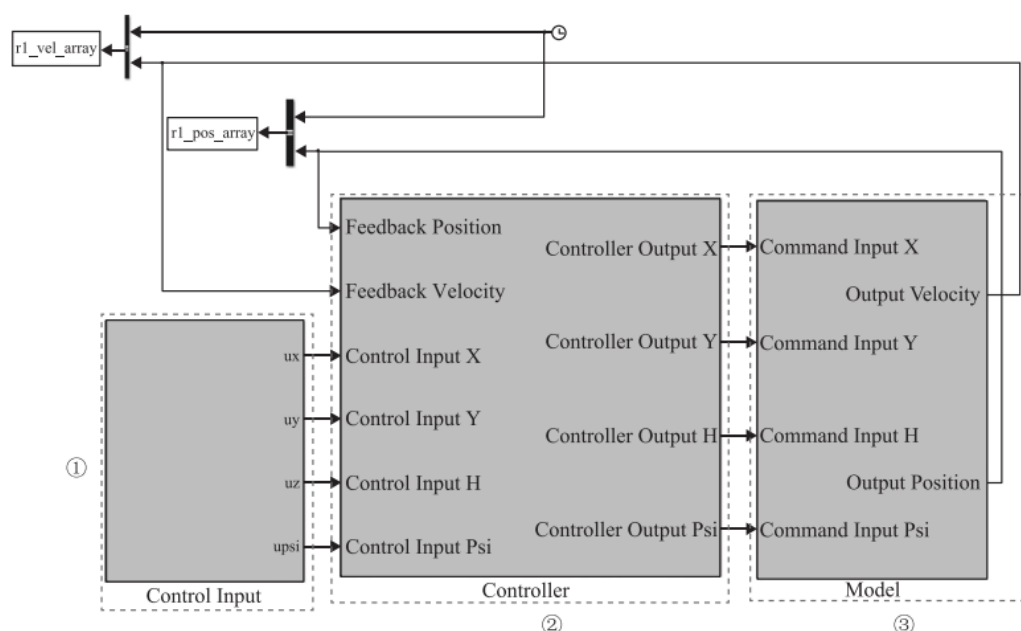


图 5.2 多旋翼 Simulink 仿真平台, Simulink 模型详见 “e2_1_TF_KalmanFilter.slx”

该实验模型控制器已经调好。这里, “Model” 模块与第 2 章 2.2.1 节不同, 该模块内部如图 5.3 所示。图 5.3 中的虚线框部分为速度获取的模块, 采取卡尔曼滤波的方法进行速度和偏航角速率的实时获取。打开任意一个模块, 例如水平前向通道模块, 其内部如图 5.4 所示。

在图 5.4 虚线框①中, “卡尔曼滤波过程函数” 模块包含卡尔曼滤波的更新过程, 可以进行相应算法更新; 在图 5.4 虚线框②中, 开关决定了是否将卡尔曼滤波的结果加入反馈闭环中; 如果需要, 则要将开关拨到下面, 否则将开关拨到上面; 图 5.4 表示引入卡尔曼滤波水平前向通道速度估计。

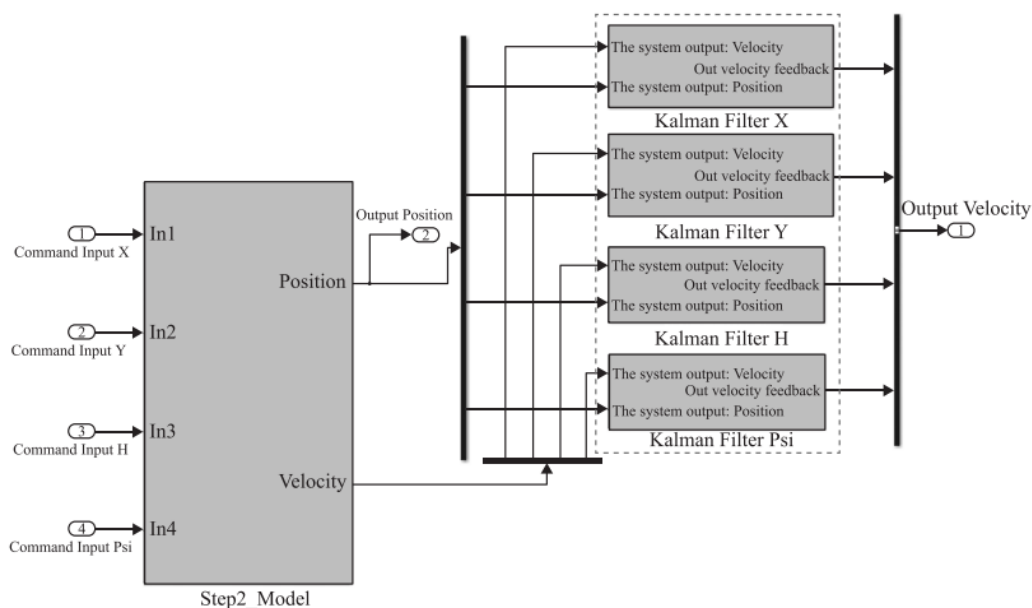


图 5.3 修改后 “Model” 模块，Simulink 模型详见 “e2_1_Model_KalmanFilter.slx”

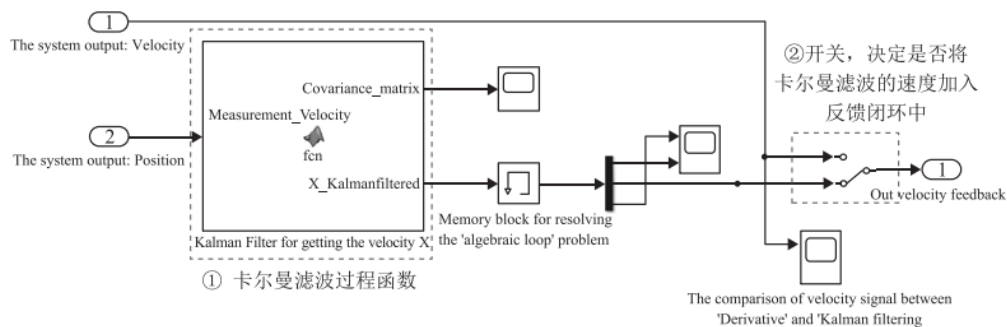


图 5.4 水平前向通道卡尔曼滤波器模块，Simulink 模型详见 “e2_1_TF_KalmanFilter.slx”

3. 实验效果

通过示波器显示出高度通道真实速度与滤波速度、高度通道位置期望与真实位置输出以及高度通道滤波速度输出对比图。

4. 文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	sim1_0.mat	卡尔曼滤波融合数据文件
	savedata_comparaison.m	Simulink 仿真数据传输及存储区域文件
	e2_1_TF_KalmanFiltre_2017b.slx	多旋翼 simulink 仿真 1.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
sim2.0	Sim2_0.mat	卡尔曼滤波融合数据文件
	savedata_comparaison.m	Simulink 仿真数据传输及存储区域文件
	e2_1_Model_KalmanFiltre_2017b.slx	多旋翼 simulink 仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件

comparaison	sim1_0.mat	卡尔曼滤波融合数据文件
	Sim2_0.mat	卡尔曼滤波融合数据文件
	plot_comparaison.m	图像绘制文件

5. 运行环境

序号	软件要求	硬件要求	
		名称	数量
1	Windows 10 及以上版本	笔记本/台式电脑 ^①	1
2	RflySim 平台免费版		
3	MATLAB 2017B 及以上版本		

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

6. 仿真 1.0(sim1.0)实验步骤

Step 1:

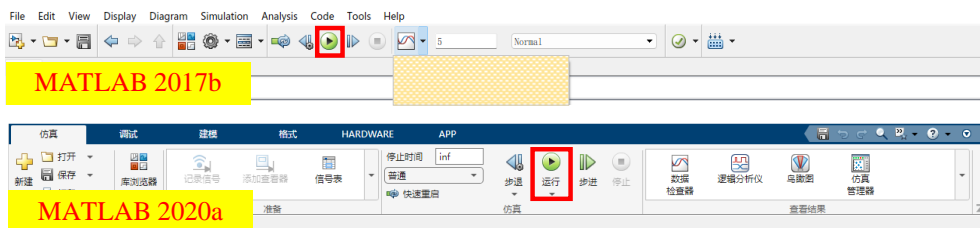
学习本书第 2 章的内容，对于 simulink 模型有一个初步的了解。

Step 2:

打开本章所附带文件夹中的“e2\2.1\sim1.0”文件夹，打开“e2\2.1\sim1.0\startSimulation.m”文件，并单击“运行”按钮，初始化参数。

Step 3:

打开“e2\2.1\sim1.0\2_1_TF_KalmanFilter.slx”模型文件，将看到多旋翼 Simulink 仿真平台，详细内容请参考第 2 章 2.2.1 节，如图 5.2 所示。



(1)卡尔曼滤波器的过程函数模块如图 5.4 所示。该模块是一个 MATLAB Function 函数，通过它实现了卡尔曼滤波的更新过程。其内部代码主要如表 5.1 所示：第 2 行表示状态预测，如式 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \hat{\mathbf{x}}_{k-1|k-1} + \mathbf{u}_{k-1}$ 所示；第 3 行表示误差协方差预测，如式 $\mathbf{P}_{k|k-1} = \Phi_{k-1} \mathbf{P}_{k-1|k-1} \Phi_{k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T$ 所示；第 4 行表示卡尔曼滤波增益计算，如式 $\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k|k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}$ 所示；第 5 行和第 6 行分别表示状态更新和误差协方差更新，如式 $\hat{\mathbf{x}}_{k|k} = \hat{\mathbf{x}}_{k|k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{z}_k - \hat{\mathbf{z}}_{k|k-1})$ 和式 $\mathbf{P}_{k|k} = (\mathbf{I}_n - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k|k-1}$ 所示。这部分是卡尔曼滤波的更新过程，也是最核心的步骤。此外，可通过表 5.2 中的代码修改各个通道的滤波器参数。第 2 行和第 7

行是卡尔曼滤波中的过程噪声的标准差以及测量噪声的标准差，对应式 $\mathbf{Q}_k \geq \mathbf{0}_{n \times n}, \mathbf{R}_k > \mathbf{0}_{m \times m}$ 。修改这两个参数可以改变卡尔曼滤波器的滤波效果。

(2) 为了使期望输入符合实验目标的要求，还需要为每个通道输入期望的正弦波信号，其周期为 10s，幅值为 1，如图 5.5 所示。

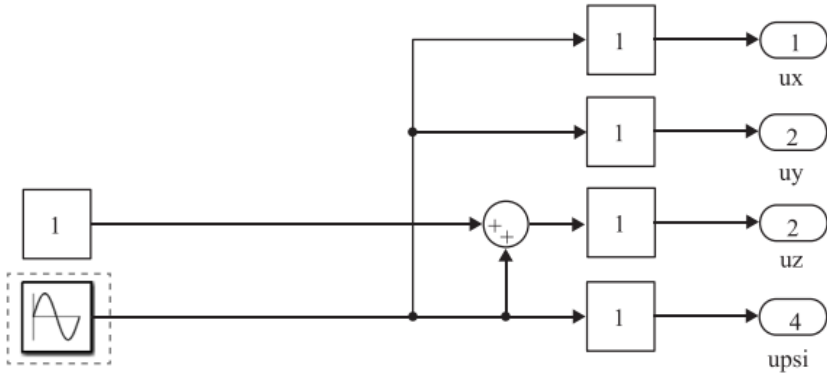


图 5.5 输入信号图，Simulink 模型详见“e2_1_TF_KalmanFilter.slx”

Step 4:

在完成了相应的修改后，可以进行实验。开始时已经运行过“startSimulation.m”文件，如果改动该文件中的参数，则需要在 MATLAB 中重新运行该文件。接下来，只需在 Simulink 中运行模型文件“e2\2.1\sim1.0\2_1_TF_KalmanFilter.slx”即可。

表 5.1 卡尔曼滤波更新过程

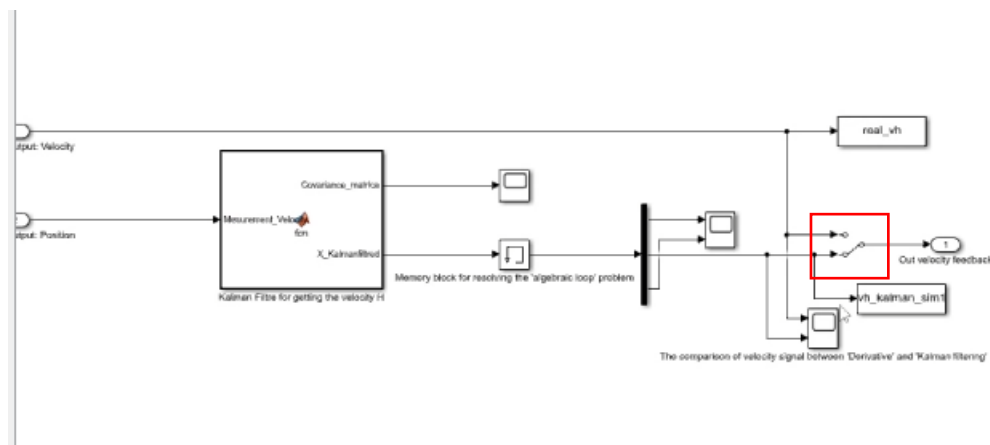
```
1 % 卡尔曼滤波更新过程
2 X_pre=A*Xkf_static; % 状态估计
3 P_pre=A*P0_static*A'+Q; % 误差协方差估计
4 Kg=P_pre*H'*inv(H*P_pre*H'+R); % 卡尔曼滤波增益计算
5 X_Kalmanfiltered=X_pre+Kg*(Measurement_Velocity-H*X_pre); % 状态估计更新
6 Covariance_matrix=(I-Kg*H)*P_pre; % 误差协方差估计更新
```

表 5.2 卡尔曼滤波参数设置

```
1 % 过程噪声
2 p_var =0.05; % sigma
3 Q = eye(3)*p_var^2; % 噪声协方差矩阵
4 W = Q*randn(3,1); %过程噪声
5
6 %测量噪声
7 m_var = 0.01; % sigma
8 R = [m_var^2 ]; % 测量噪声协方差矩阵
9 V=R*randn; % 测量噪声
```

Step 5:

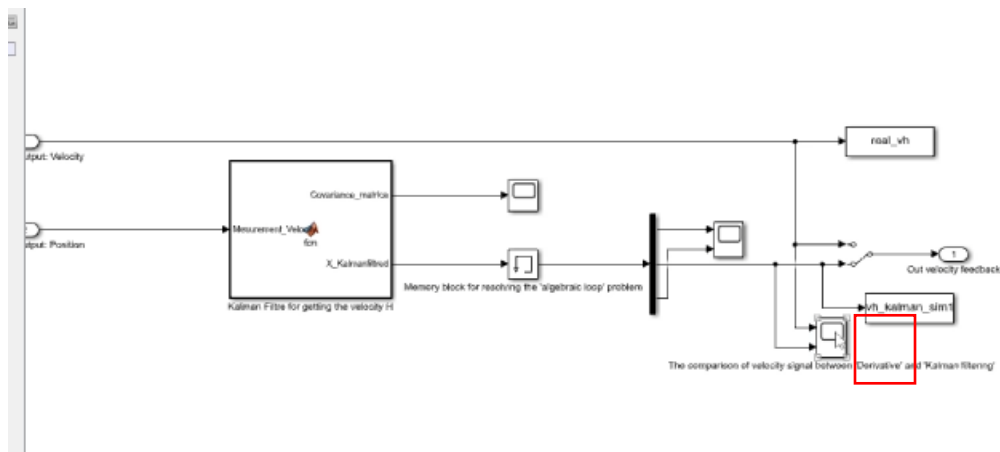
观察卡尔曼滤波的效果，将每个通道的速度获取模块中的开关拨至下部，使得闭环反馈中采用通过卡尔曼滤波器的反馈值，如图 5.4 所示。同时，将过程噪声的标准差定为 0.05，测量噪声的标准差定为 0.01。测量噪声部分如图 5.5 所示，虚线框处为正弦信号(实验的目标信号)。在 Simulink 中运行“e2_1_Model_KalmanFilter.slx”模型文件。



Step 6:

将通过卡尔曼滤波后的速度信号与真实速度值进行对比,以便获得一个更直观的对比效果。此处需要注意,在进行信号输入时,应该对每个通道分别进行激励,同时在每次信号输入完成后,应该再次运行仿真模型“e2\2.1\sim1.0\2_1_TF_KalmanFilter.slx”。然后,将期望值设为 0,使得多旋翼仿真模型回到初始位置,再重新进行下一通道的信号激励。

在设定完滤波器参数之后,分别对各通道输入实验目标中的信号。接下来,以高度通道进行举例,读者可以自行分析其他通道。获得的速度滤波对比结果和位置通道对比结果分别如图 5.6 和图 5.7 所示。通过上述对比可以发现,经过滤波之后,速度信号也较为平缓,无较大波动。同时,多旋翼的位置输出与位置期望非常吻合,也表明了使用卡尔曼滤波后的速度信号作为反馈加入闭环也可以非常好地控制多旋翼。综上所述,可以将卡尔曼滤波器处理过的速度信号作为多旋翼的速度反馈加入控制器闭环中。



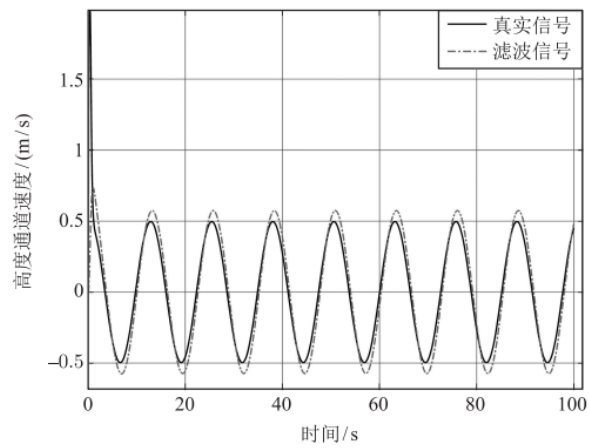
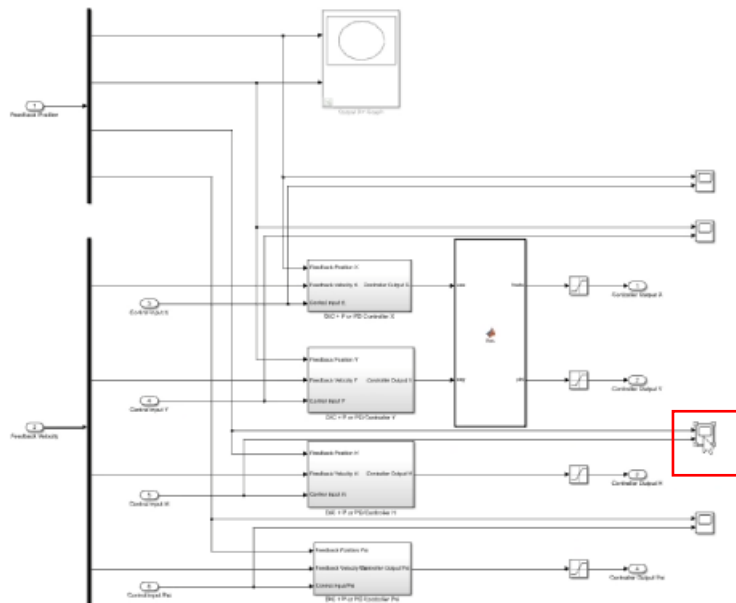


图 5.6 基础实验仿真 1.0 高度通道真实速度与滤波速度对比图

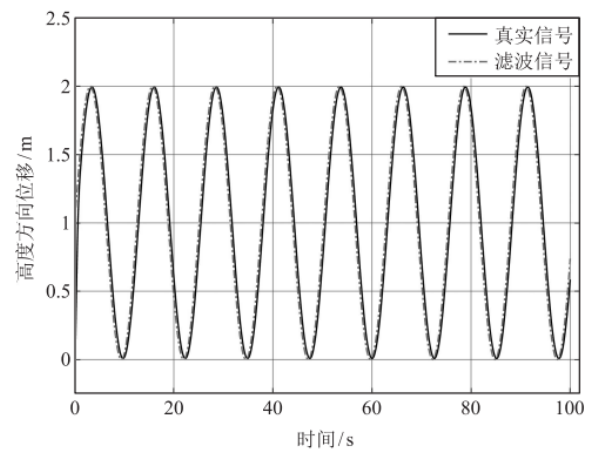


图 5.7 基础实验仿真 1.0 高度通道位置期望与真实位置输出对比图

Step 7:

双击打开 [sim1.0\savedata_comparaison.m](#) 文件，进行修改。点击运行之后，可以进行数据保存。

7. 仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

接下来，我们将进行仿真 1.0 和仿真 2.0 的对比。对于在传递函数模型中已经完成的实验过程，在这里需要进一步在非线性模型上进行验证，即在仿真 2.0 上验证卡尔曼滤波的效果。

Step 1:

打开命名为“e2\c2.1\sim2.0”的文件夹，其中的文件与上面的“e2\c2.1\sim1.0”文件夹相同，而区别在于文件“e2\c2.1\sim2.0”中的模型为非线性模型。

Step 2:

采用与传递函数模型实验中完全相同的实验步骤，观察获得结果，并将两种模型的关键结果进行对比。

此处对水平前向通道的滤波速度结果进行对比，结果如图 5.8 所示。从图中可以看出，传递函数模型的滤波速度与多旋翼非线性模型的滤波速度几乎一致，可以认为在采用系统辨识获得的模型进行实验时，卡尔曼滤波在仿真 1.0 中和仿真 2.0 中效果几乎是一样的。

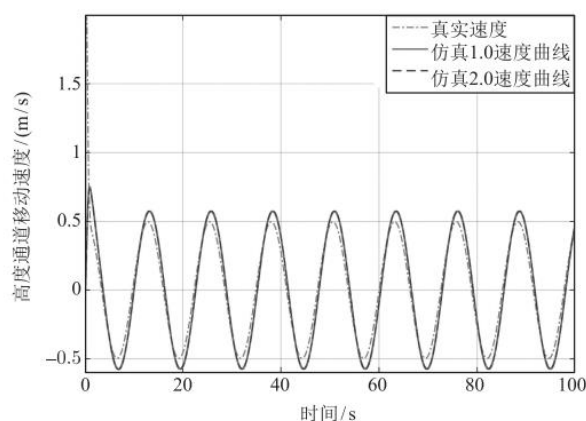


图 5.8 基础实验仿真 2.0 高度通道滤波速度输出对比图

8. 参考资料

- [1]. Quan Quan. Introduction to Multicopter Design and Control. Springer, Singapore, 2017
- [2]. 全权 杜光勋 赵峙尧 戴训华 任锦瑞 邓恒译 多旋翼飞行器设计与控制 [M] 电子工业出版社 2018.
- [3]. 全权 戴训华 王帅 多旋翼飞行器设计与控制 实践 [M] 电子工业出版社 2020.
- [4]. 全权 等.多旋翼无人机远程控制实践[M].电子工业出版社,2022.

9. 常见问题

Q1: ****

A1: ****
