

滤波器设计实验 (分析实验)

1. 实验目的

(1) 在仿真1.0中，调整卡尔曼滤波器中输入信号中测量噪声的大小，重复实验过程。对比卡尔曼滤波器参数与测量噪声协方差之间的关系，最后分析原因。

(2) 在仿真1.0中，调整卡尔曼滤波函数模块中的噪声协方差参数大小，观察获得的速度反馈信号的变化。接下来，反复调整参数，使得每个通道的滤波效果达到最佳。

(3) 在仿真2.0中，分别调整卡尔曼滤波中噪声协方差的大小和输入信号中测量噪声大小，对比仿真1.0与仿真2.0的滤波效果。

2. 实验要求

- 软件要求：Windows 10及以上版本；RflySim工具链；MATLAB 2022b及以上版本。
- 硬件要求：笔记本/台式电脑1台^[1]。

3. 实验地址

例程目录：[\[安装目录\]\RflySimAPIs\6.RflySimExtCtrl\1.BasicExps\e8_KalmanFiltre\e2.2](#)

[sim1.0/savedata_comparaison.m](#)：Simulink仿真数据传输及存储区域文件

[sim1.0/plot_comparaison.m](#)：图像绘制文件

[sim1.0/e2_2_TF_KalmanFiltre_Noise_2017b.slx](#)：多旋翼simulink仿真文件

[sim1.0/startSimulation.m](#)：初始化参数文件

[sim1.0/A组](#)：噪声注入融合文件

[sim1.0/B组](#)：噪声注入融合文件

[sim1.0/C组](#)：噪声注入融合文件

[sim2.0/Sim2_0.mat](#)：卡尔曼滤波融合数据文件

[sim2.0/savedata_comparaison.m](#)：Simulink仿真数据传输及存储区域文件

[sim2.0/e2_2_Model_KalmanFiltre_Noise_2017b.slx](#)：多旋翼simulink仿真2.0文件

[sim2.0/startSimulation.m](#)：初始化参数文件

[sim2.0/sim2_gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.6.mat](#)：噪声注入融合文件

sim2.0/plot_comparaison.m：图像绘制文件

sim2.0/gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.6.mat：噪声注入融合文件

4. 实验内容或步骤:

4.1 步骤1：仿真1.0(sim1.0)实验步骤

在位置信号测量的过程中加入噪声，观察滤波器对噪声的滤波效果，即在模型模块"e2_2_TF_KalmanFilter_Noise_2017b.slx\ModelKalman Filter*" ("*"为"X"、"Y"、"H"和"Psi"，可以代表四通道的卡尔曼滤波器) 内部中，加入Simulink自带的随机噪声模块，如图5.9中的虚线框所示。

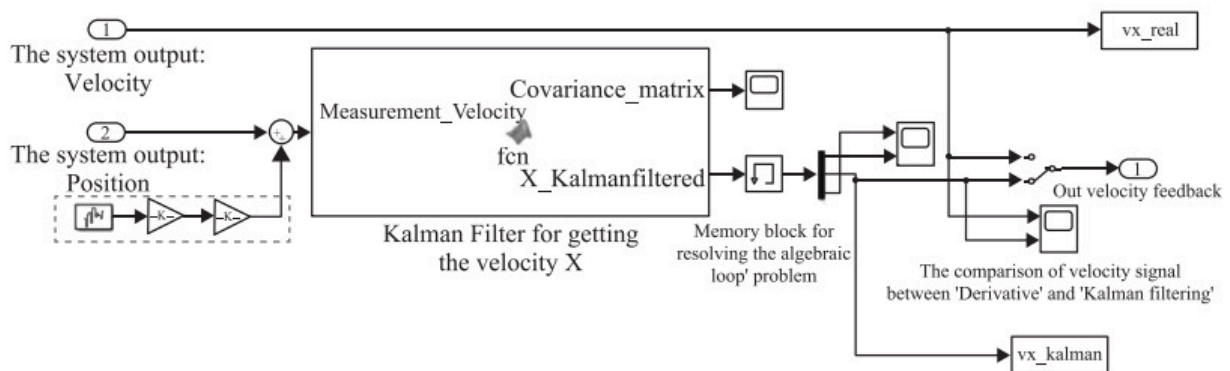


图 5.9 加入噪声模块示意图，Simulink 文件详见 “e2_2_TF_KalmanFilter_Noise.slx”

加入噪声之后，分别在多旋翼各通道进行控制，使其稳定运行，利用示波器观察噪声滤波效果。为了方便起见，本书将各通道的噪声进行统一设定，并进行量化。这里设定一个基准噪声，同时加入增益"gain_noise"，可以在"e2\sim1.0\startSimulation.m"文件中调节相应的增益值来改变噪声大小。具体代码如表5.3所示，第2行为噪声大小。

表 5.3 噪声增益修改位置

```
1 % 测量噪声增益
2 gain_noise=3;
```

双击打开 ./sim1.0/startSimulation.m，我们可以在初始化文件中进行噪声设置。

```

k_p_yaw =2;
k_d_yaw=0.05;
k_i_yaw=0.01;
% k_p_yaw =10;
% k_d_yaw=1.6;
% k_i_yaw=0.01;%真实速度PID

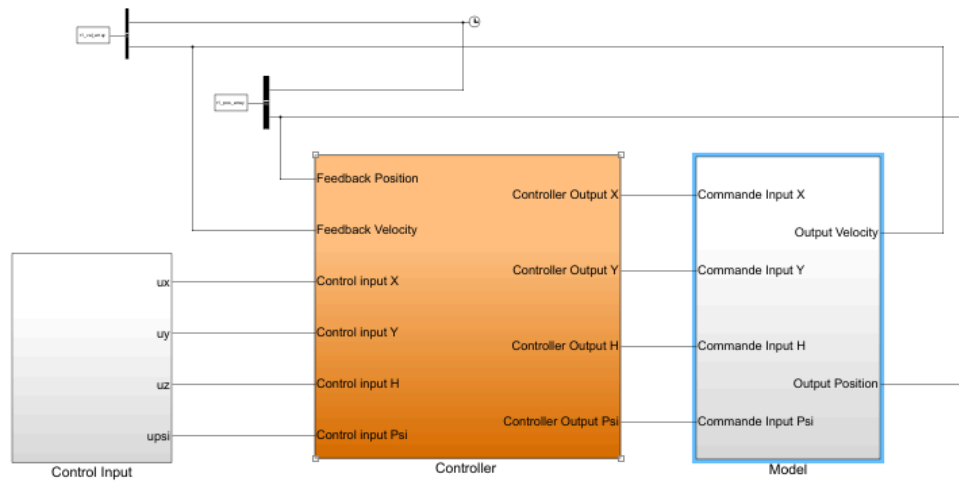
% X通道和Y通道的安全限幅
limit_cmd_xy = 10;
% 信号噪声
gain_noise=3;

```

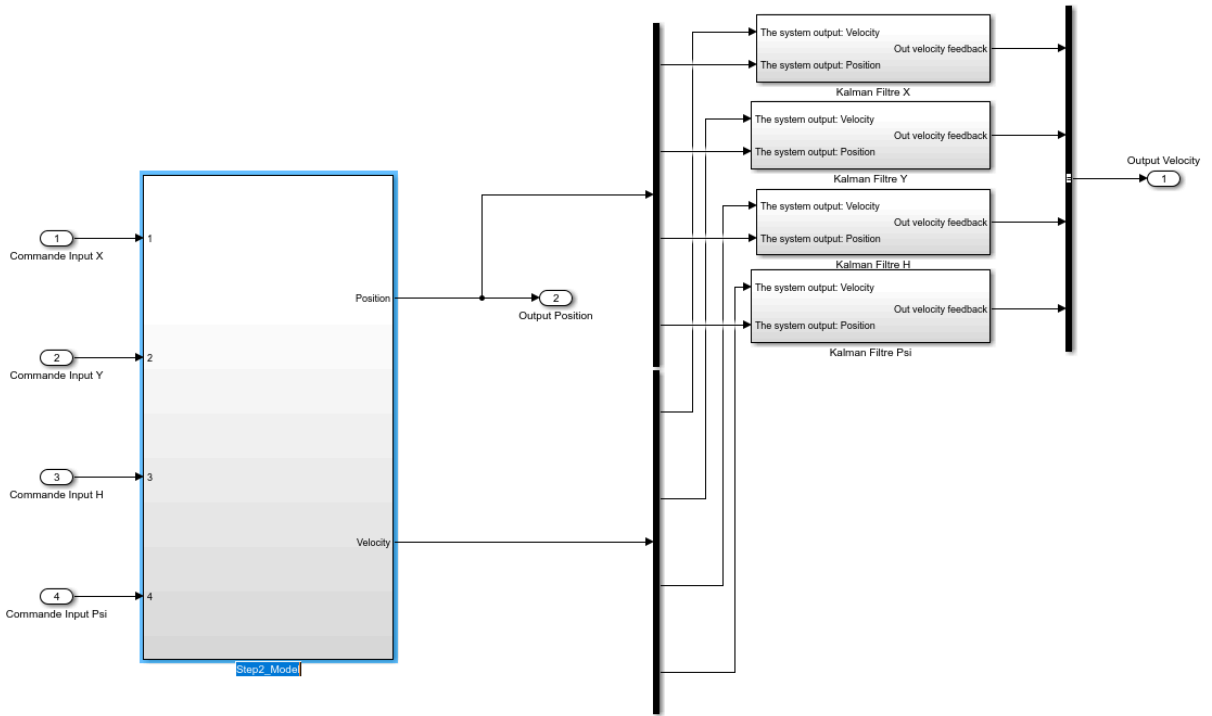
点击保存，单击运行"run"按钮，初始化参数。

双击打开simulink文件 [./sim1.0/e2_2_TF_KalmanFiltre_Noise_2017b.slx](#)。

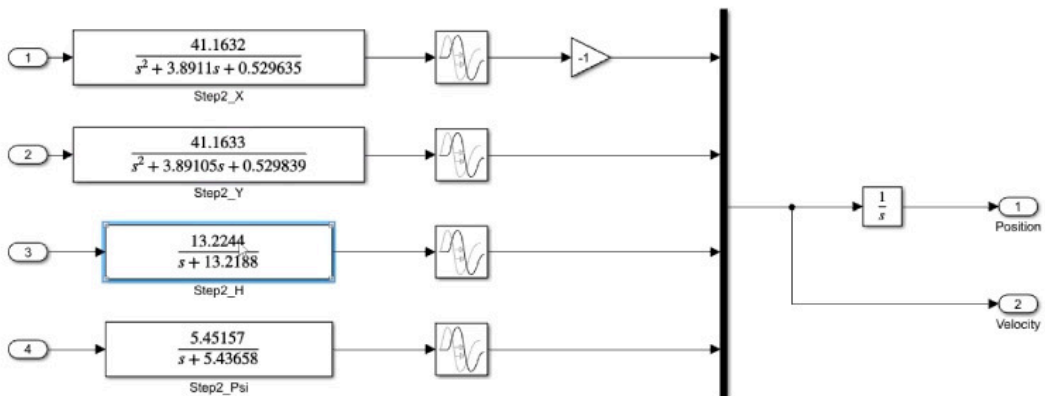
双击打开Model模块，



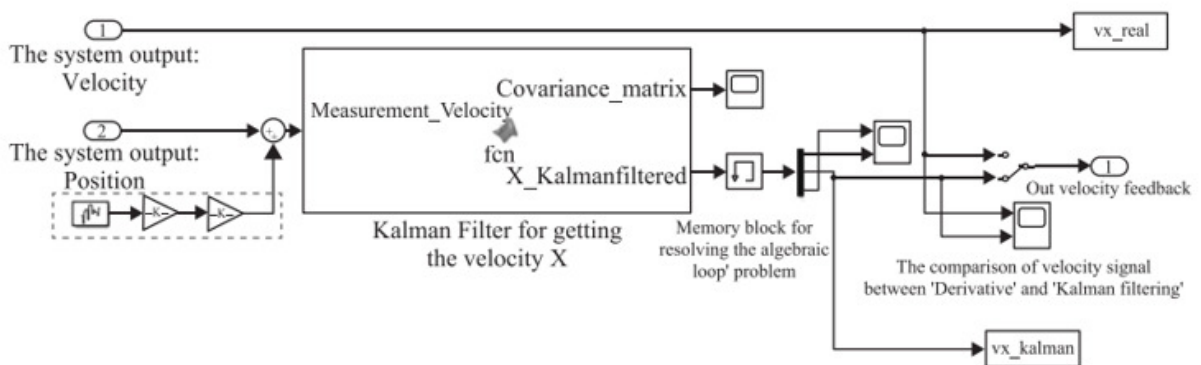
进入 Step2_Model



对多旋翼传递函数模型进行确认。



在Model模块中点击Kalman Filtre，



在图中所示位置打开滤波信号开关。

```

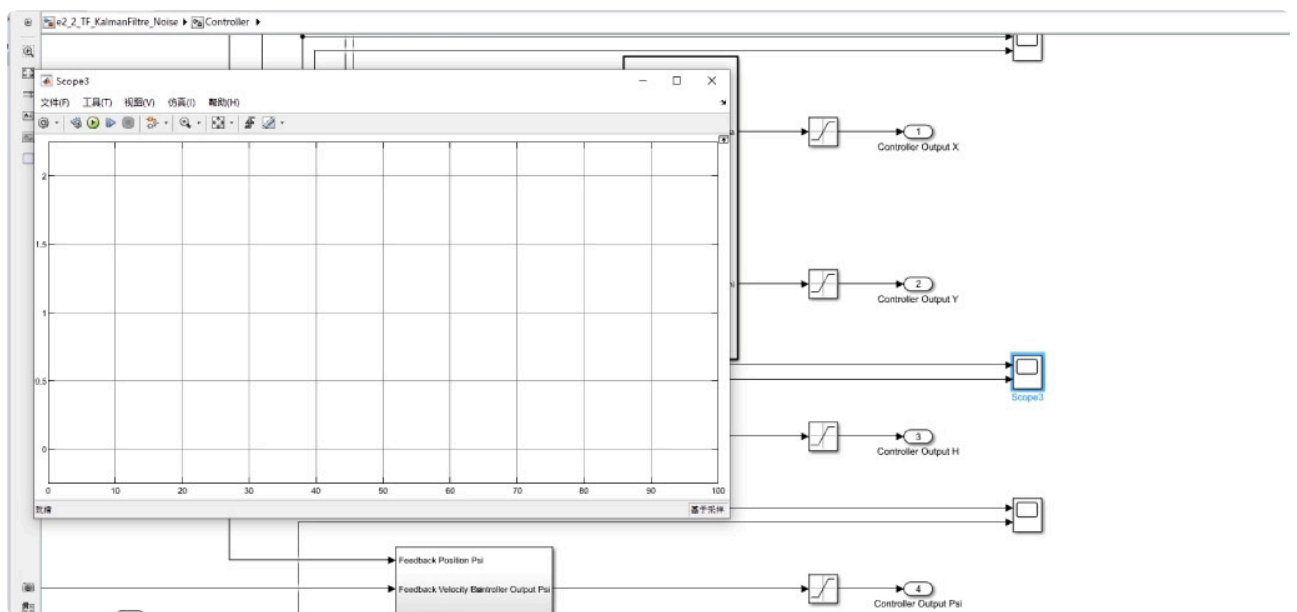
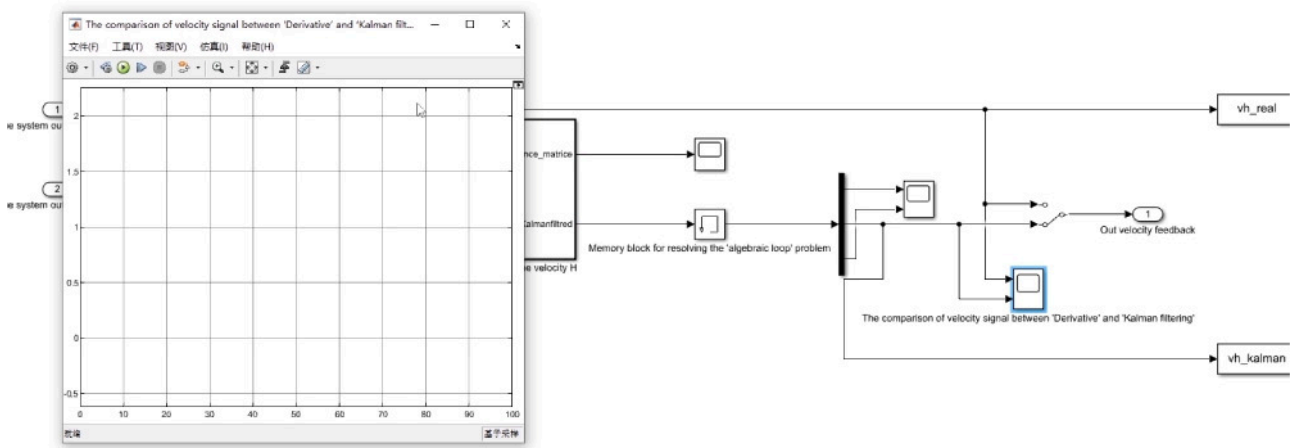
% 过程噪声
p_var = 0.3 % sigma
Q = eye(3)*p_var^2; % 过程噪声协方差矩阵
W=Q*randn(3,1); % 过程噪声

% 测量噪声
m_var = 0.03 % sigma
R = [m_var^2]; % 测量噪声协方差矩阵
Y=R*randn; % 测量噪声

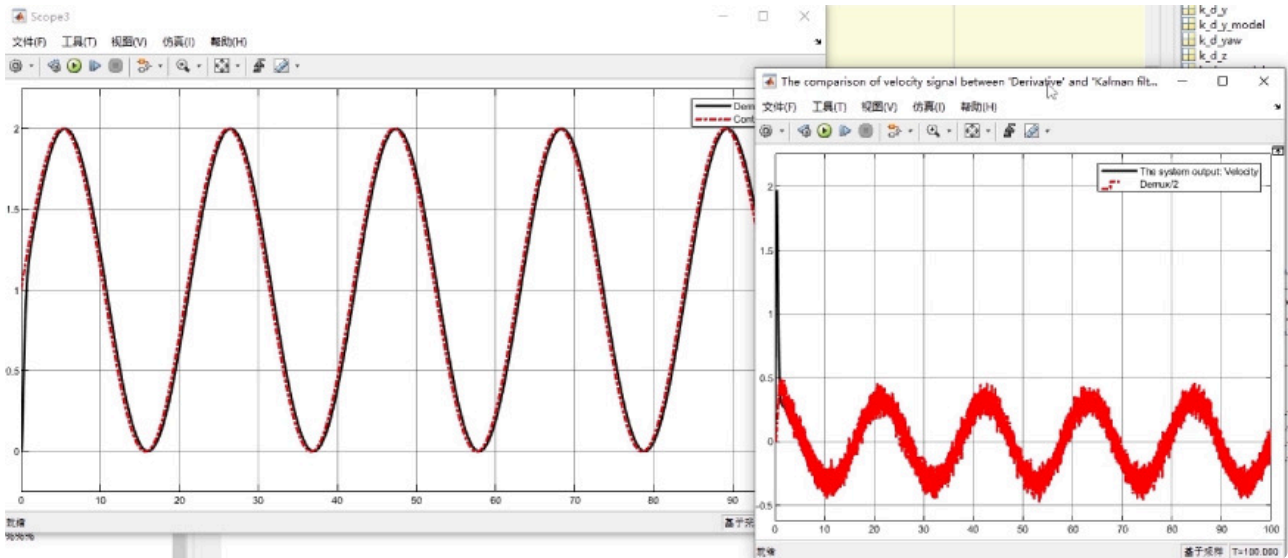
% 观测方程矩阵
H=[1 0 0];

```

在 ./sim1.0/startSimulation.m 中调整卡尔曼滤波器测量噪声方差阵和过程噪声方差阵。保存后重新运行初始化参数。



运行仿真程序。



双击打开 `./sim1.0/savedata_comparaison.m` 文件，对内容进行修改。

```

% save gain_noise_0.25_p_var_0.05_m_var_0.0025.mat vh_real_1 vh_kalman_1;
% save gain_noise_0.25_p_var_0.05_m_var_0.05.mat vh_real_2 vh_kalman_2;
% save gain_noise_0.25_p_var_0.25_m_var_0.25.mat vh_real_3 vh_kalman_3;

%% B组:gain_noise=1
% save gain_noise_1_p_var_0.1_m_var_0.01.mat vh_real_1 vh_kalman_1;
% save gain_noise_1_p_var_0.1_m_var_0.2.mat vh_real_2 vh_kalman_2;
% save gain_noise_1_p_var_0.1_m_var_0.1.mat vh_real_3 vh_kalman_3;

%% C组:gain_noise=3
save gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.03.mat vh_real_1 vh_kalman_1;
% save gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.6.mat vh_real_2 vh_kalman_2;
% save gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_3.mat vh_real_3 vh_kalman_3;

```

之后点击运行。

重复上述步骤，做完不同要求下的实验后。

双击打开 `./sim1.0/plot_comparaison.m` 文件，若运行失败，在命令行点击将文件夹加入 MATLAB 路径，将之前所做的实验数据加载。

```

%加载数据
%% A组:gain_noise=0.25
% load('gain_noise_0.25_p_var_0.05_m_var_0.0025.mat')
% load('gain_noise_0.25_p_var_0.05_m_var_0.05.mat')
% load('gain_noise_0.25_p_var_0.25_m_var_0.25.mat')

%% B组:gain_noise=1
% load('gain_noise_1_p_var_0.1_m_var_0.01.mat')
% load('gain_noise_1_p_var_0.1_m_var_0.2.mat')
% load('gain_noise_1_p_var_0.1_m_var_0.1.mat')

%% C组:gain_noise=3
load('gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.03.mat')
load('gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.6.mat')
load('gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_3.mat')

```

点击运行，对比不同参数下的仿真效果。

(1)噪声增益"gain_noise=0.25"。高度通道真实速度与滤波速度对比图以及在不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图分别如图5.10和图5.11所示，其中每组对应的参数如表5.5所示。

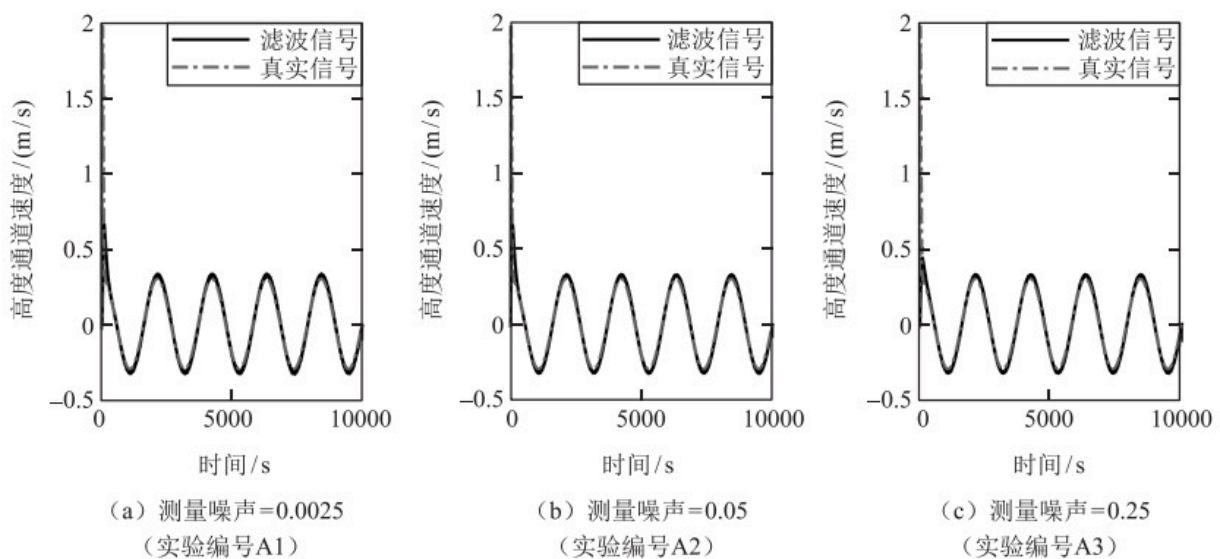


图 5.10 “gain_noise=0.25” 时，高度通道下真实速度与滤波速度对比图

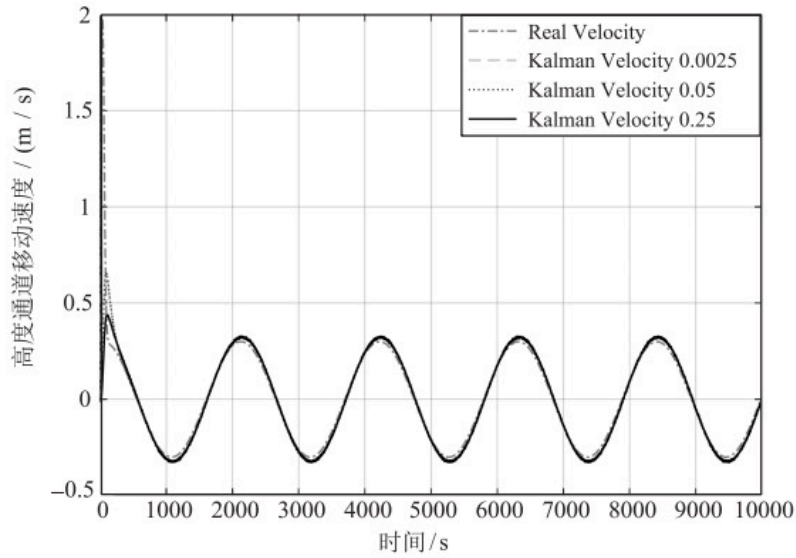


图 5.11 “gain_noise=0.25”时，高度通道下不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图

表 5.5 gain_noise=0.25

实验编号	A1	A2	A3
信号噪声增益	0.25	0.25	0.25
滤波器测量噪声标准差	0.0025	0.05	0.25
滤波器过程噪声标准差	0.05	0.05	0.25

(2)噪声增益"gain_noise=1"。高度通道真实速度与滤波速度对比图以及在不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图分别如图5.12和图5.13所示，其中每组对应的参数如表 5.6所示。

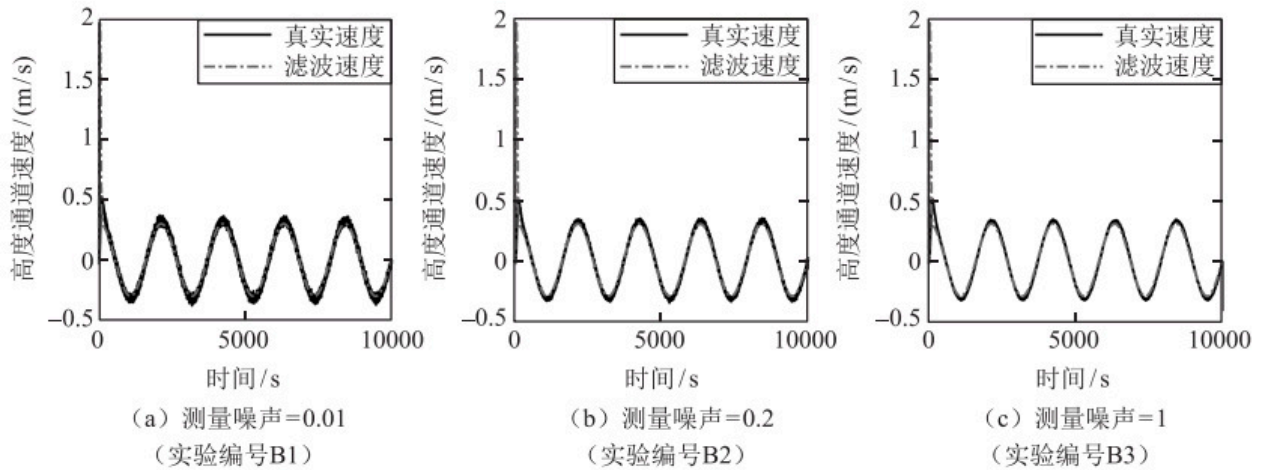


图 5.12 “gain_noise=1”时，高度通道下真实速度与滤波速度对比图

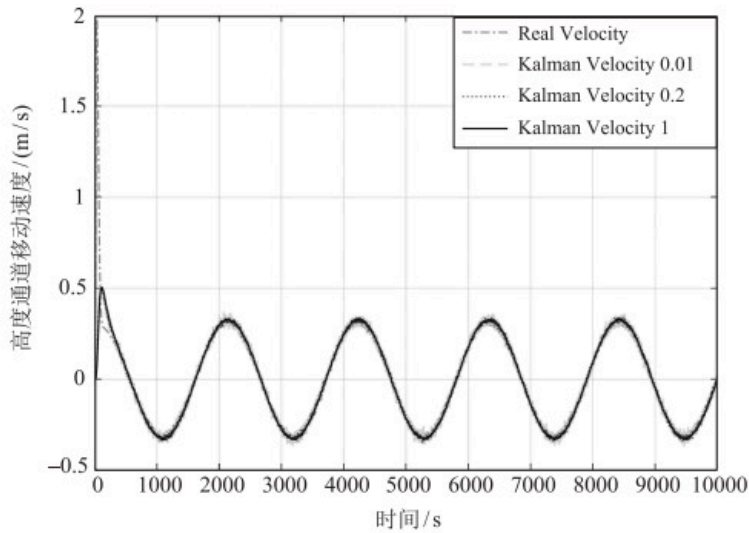


图 5.13 “gain_noise=1”时，高度通道下不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图

表 5.6 gain_noise=1

实验编号	B1	B2	B3
信号噪声增益	1	1	1
滤波器测量噪声标准差	0.01	0.2	1
滤波器过程噪声标准差	0.1	0.1	0.1

(3)噪声增益"gain_noise=3"。高度通道真实速度与滤波速度对比图以及在不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图分别如图5.14和图5.15所示，其中每组对应的参数如表 5.7所示。

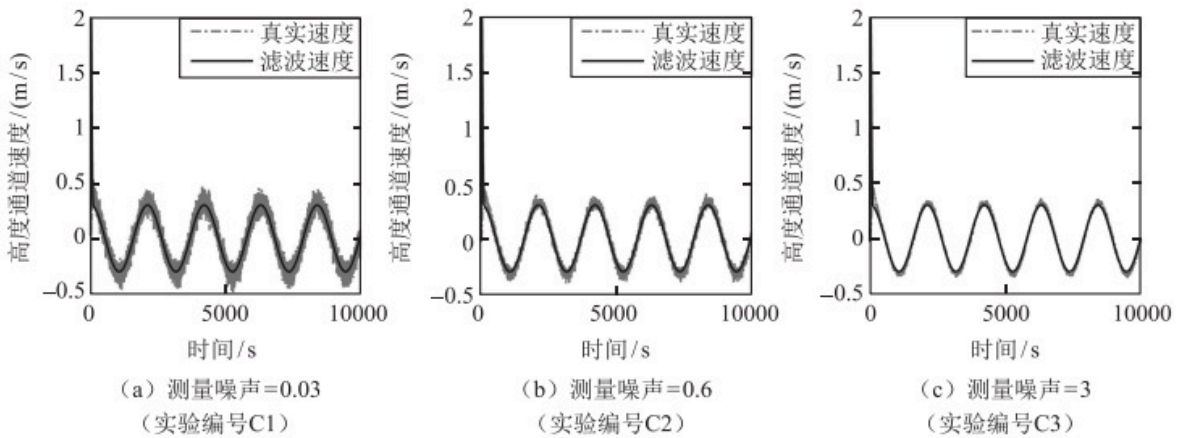


图 5.14 “gain_noise=3”时，高度通道真实速度与滤波速度对比图

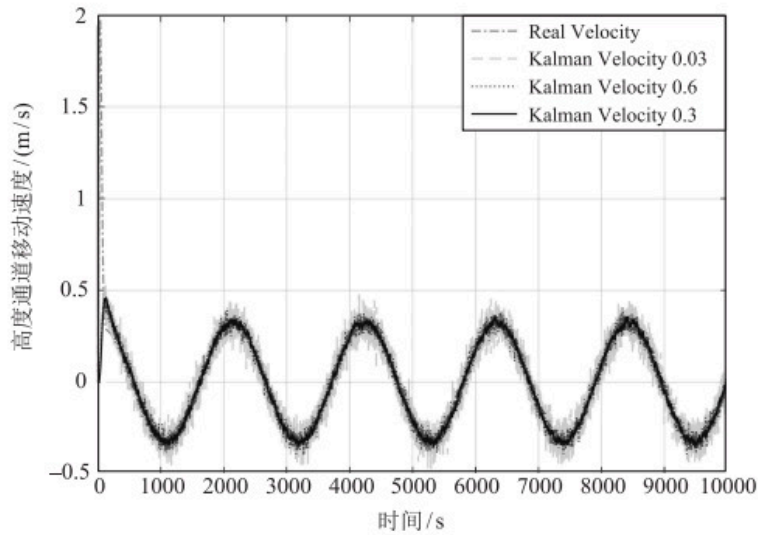


图 5.15 “gain_noise=3”时，高度通道不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图

表 5.7 gain_noise=3

实验编号	C1	C2	C3
信号噪声增益	3	3	3
滤波器测量噪声标准差	0.03	0.6	3
滤波器过程噪声标准差	0.3	0.3	0.3

(4)小结

从上面实验结果可以看出，在某一噪声值下，随着滤波器的测量噪声标准差的提高，系统中的测量噪声被逐渐滤掉，可以认为卡尔曼滤波器是非常有效的。在调整了噪声系数并获得最佳效果之后，滤波结果变得更平滑了，噪声几乎被消除。对比三种噪声下的最优参数，如表 5.8 所示。从表 5.8 中可以看出，信号噪声的大小和卡尔曼滤波器中的测量噪声标准差参数成正比，二者的值几乎是相同的。这与卡尔曼滤波理论是一致的。

表 5.8 实验结果表

实验编号	A3	B3	C3
信号噪声增益	0.25	1	3
滤波器测量噪声标准差	0.25	1	3
滤波器过程噪声标准差	0.25	0.1	0.3

4.2 步骤2：仿真2.0(sim2.0)实验步骤

对于在传递函数模型中已经完成的实验过程，需要在非线性模型上，即在仿真2.0中进行验证。

打开命名为"./sim2.0"的文件夹，其中的文件与上面的"./sim1.0"文件夹相同，而区别在于"./sim2.0"文件夹中的模型为非线性模型。

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。这里选取信号噪声增益为3，卡尔曼滤波器测量噪声标准差参数为0.6时的数据进行对比。

此处对高度通道的滤波速度结果进行对比，结果如图5.16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，可以认为卡尔曼滤波在仿真1.0中和仿真2.0中的效果几乎是一样的。

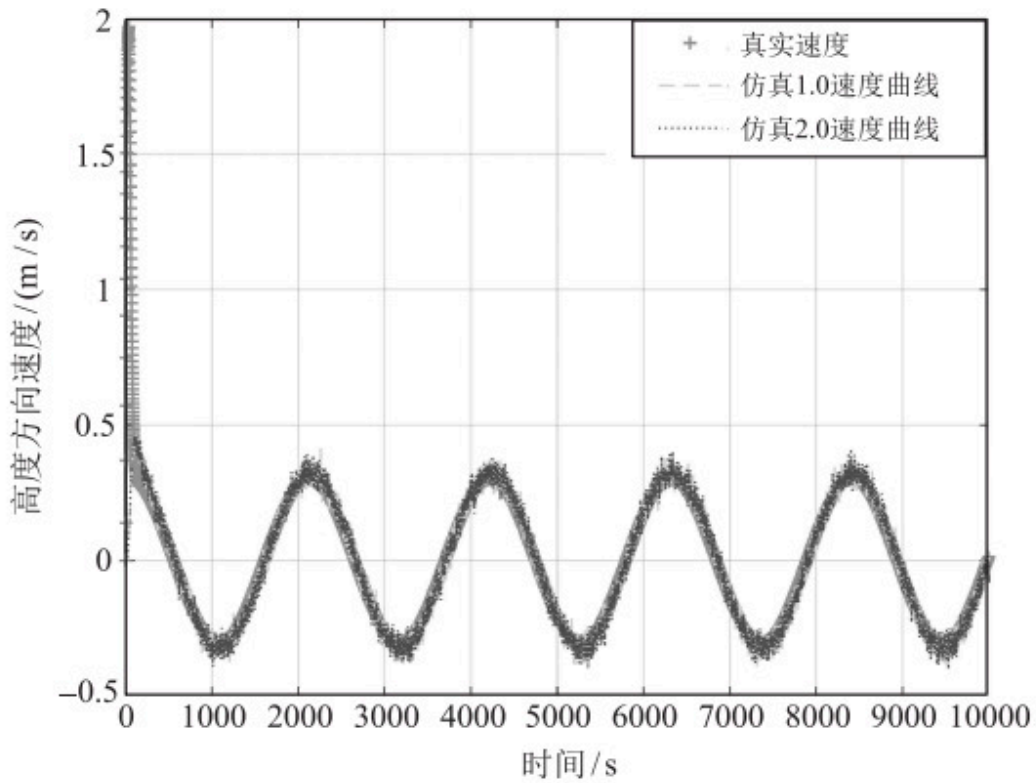
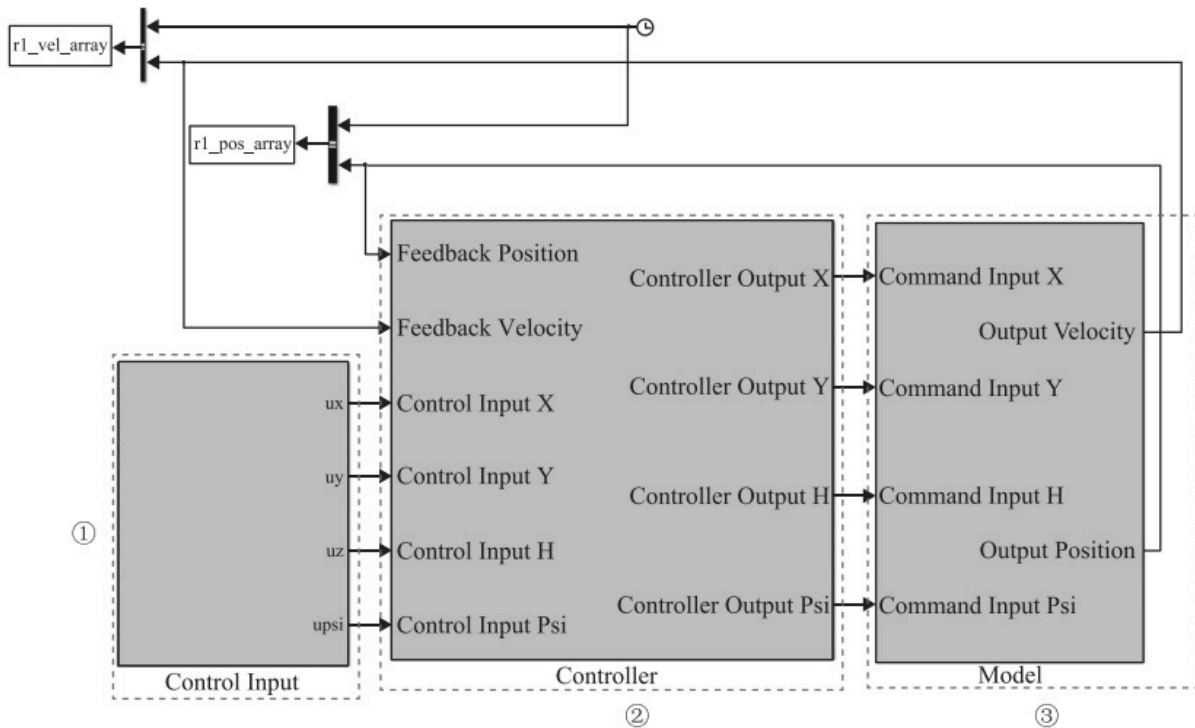


图 5.16 分析实验仿真 2.0 中，高度通道滤波速度输出对比图

5. 关键知识点



在位置信号测量的过程中加入噪声，观察滤波器对噪声的滤波效果，即在模型模块"e2_2_TF_KalmanFilter_Noise.slxModelKalman Filter*" ("*"为"X"、"Y"、"H"和"Psi"，可以代表四通道的卡尔曼滤波器) 内部中，加入Simulink自带的随机噪声模块，如图5.9中的虚线框所示。

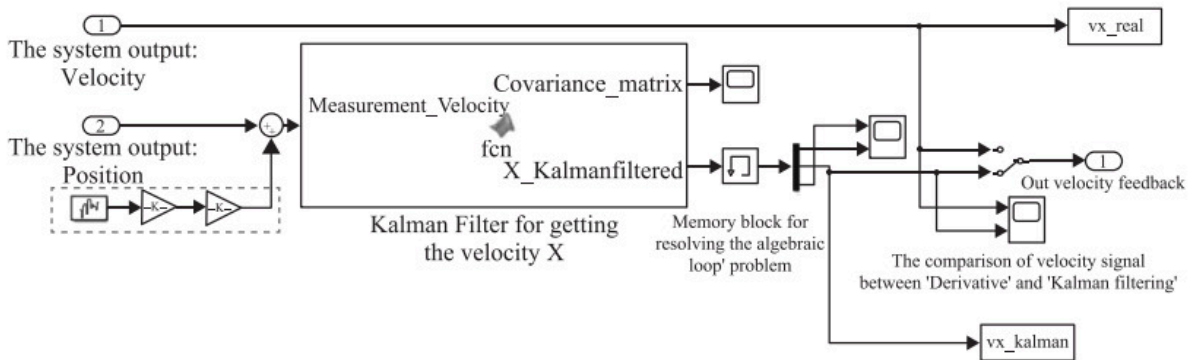


图 5.9 加入噪声模块示意图，Simulink 文件详见 “e2_2_TF_KalmanFilter_Noise.slx”

在加入噪声时,为了更好地体现卡尔曼滤波的效果,经过测试,选定增益"gain_noise"分别为 0.25、1和3进行相应的实验。在进行参数调整时，基本原则是随着信号噪声增益的提高，卡尔曼滤波器中测量噪声的标准差也相应提高。为了简单起见，在设置每种噪声增益进行实验时，每个通道的过程噪声标准差需要保持在合适的数值，只调整测量噪声标准差使得卡尔曼滤波的效果达到最优即可。

6.参考资料

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.
5. [RflySim官方文档](#)

7.常见问题

Q1: 如何正确设置卡尔曼滤波器的噪声参数?

A1: 在设置卡尔曼滤波器参数时,基本原则是随着信号噪声增益的提高,卡尔曼滤波器中测量噪声的标准差也相应提高。为了简单起见,在设置每种噪声增益进行实验时,每个通道的过程噪声标准差需要保持在合适的数值,只调整测量噪声标准差使得卡尔曼滤波的效果达到最优即可。

Q2: 为什么需要在仿真1.0和仿真2.0中分别进行实验?

A2: 仿真1.0基于传递函数模型,而仿真2.0基于非线性模型。通过在两种不同的模型上进行实验,可以验证卡尔曼滤波算法在不同模型复杂度下的有效性。实验结果显示,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,说明卡尔曼滤波在不同仿真环境中的效果基本相同。

Q3: 如何判断卡尔曼滤波器的滤波效果是否达到最佳?

A3: 可以通过观察示波器显示的真实速度与滤波速度的对比图来判断滤波效果。当滤波后的曲线能够很好地跟踪真实信号,同时去除大部分噪声波动时,可以认为滤波效果较好。另外,当信号噪声的大小和卡尔曼滤波器中的测量噪声标准差参数接近时,通常能获得较好的滤波效果。

1. 推荐配置请见：<https://rflysim.com/doc/zh/HowToInstall.pdf> ↩