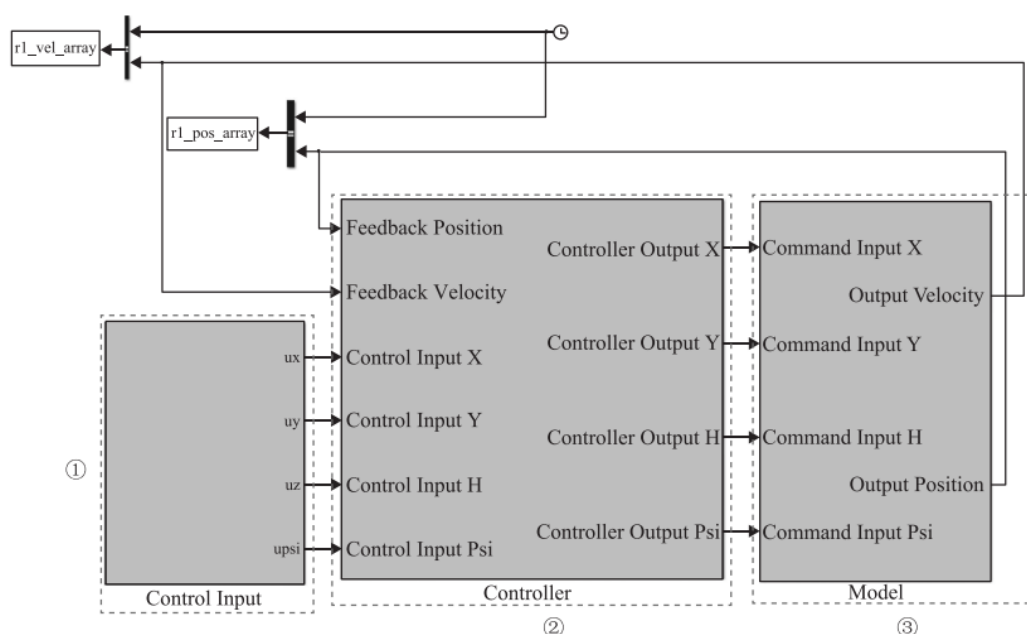


## 1. 实验名称及目的

**滤波器设计实验 (分析实验):** (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. 实验原理



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。

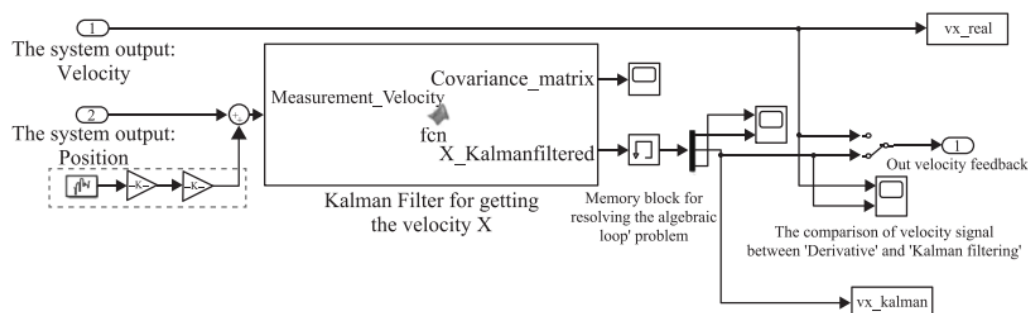


图 5.9 加入噪声模块示意图, Simulink 文件详见 “e2\_2\_TF\_KalmanFilter\_Noise.slx”

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。

### 3.实验效果

通过示波器显示出噪声影响下高度通道真实速度与滤波速度对比图。

### 4.文件目录

文件夹/文件名称		说明
Sim1.0	savedata_comparaison.m	Simulink 仿真数据传输及存储区域文件
	plot_comparaison.m	图像绘制文件
	e2_2_TF_KalmanFiltre_Noise_2017b.slx	多旋翼 simulink 仿真文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
	A 组	噪声注入融合文件
	B 组	噪声注入融合文件
	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
	savedata_comparaison.m	Simulink 仿真数据传输及存储区域文件
	e2_2_Model_KalmanFiltre_Noise_2017b.slx	多旋翼 simulink 仿真 2.0 文件
	startSimulation.m	初始化参数文件
	sim2_gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.6.mat	噪声注入融合文件
	plot_comparaison.m	图像绘制文件
	gain_noise_3_p_var_0.3_m_var_0.6.mat	噪声注入融合文件

### 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 <sup>①</sup>	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

这里的具体操作步骤和基础实验的步骤一至步骤六类似，详细步骤请参考 5.2.2.1 节。

不同的是，这里有两个部分需要改进。

### Step 1:

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.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。

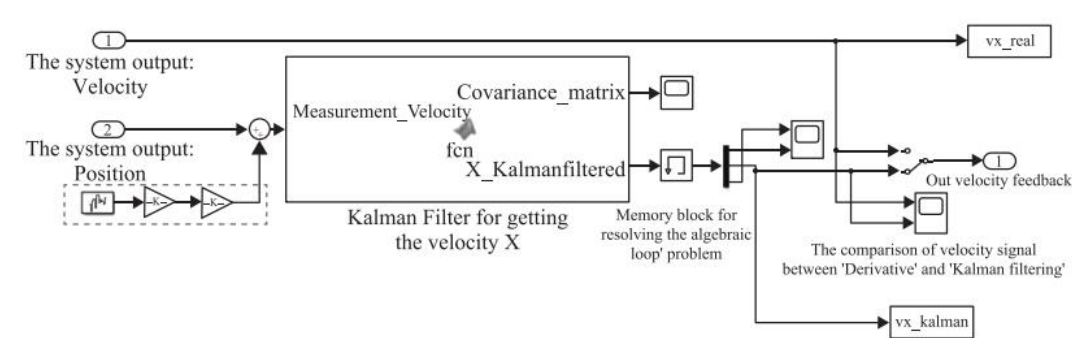


图 5.9 加入噪声模块示意图，Simulink 文件详见“e2\_2\_TF\_KalmanFilter\_Noise.slx”

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\2.2\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

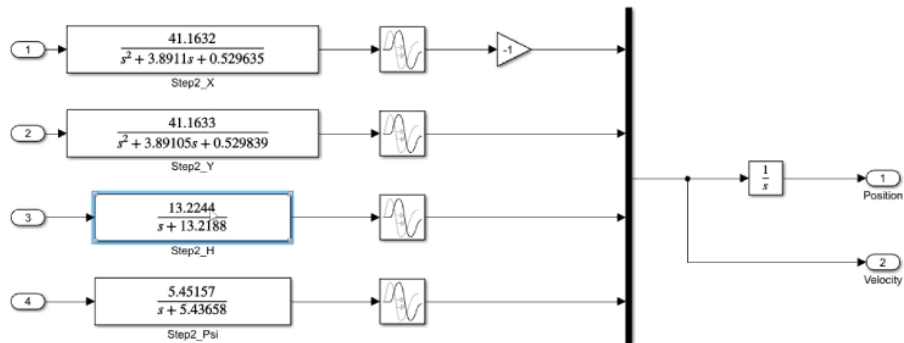
% X通道和Y通道的安全限幅
limit_cmd_xy = 10;
% 信号噪声
gain_noise=3;
```

点击保存，单击运行“run”按钮，初始化参数。

### Step 2:

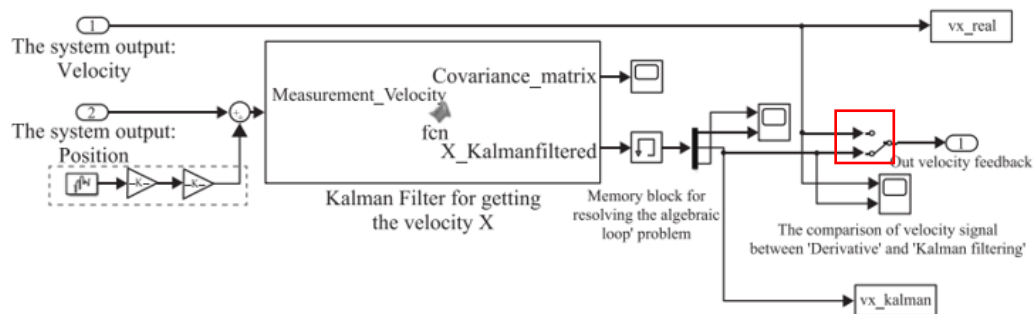
双击打开 simulink 文件 [sim1.0\2\\_2\\_TF\\_KalmanFiltre\\_Noise\\_2017b.slx](#)。

### Step 3:



对多旋翼传递函数模型进行确认。

### Step 4:



在图中所示位置打开滤波信号开关。

### Step 5:

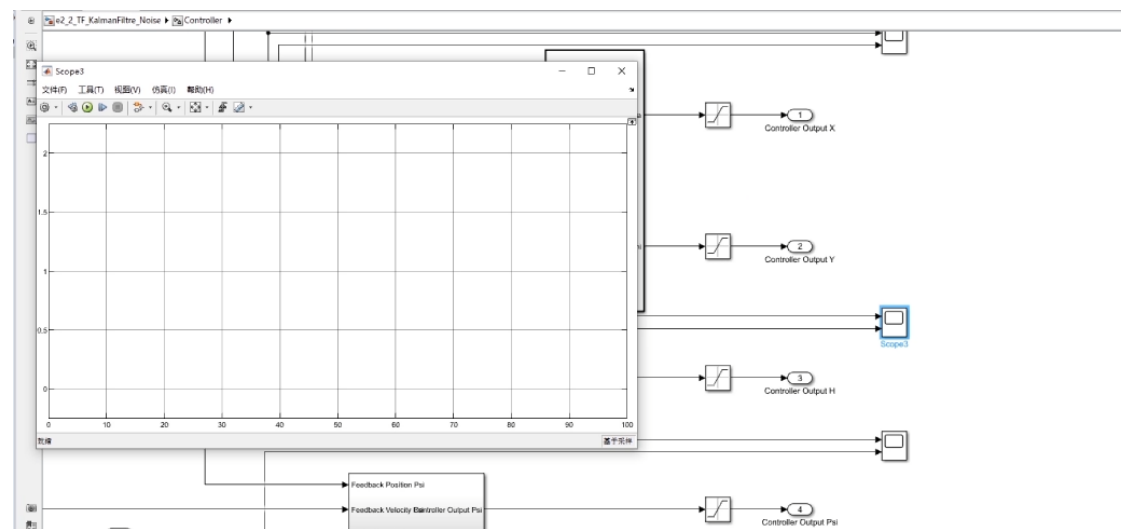
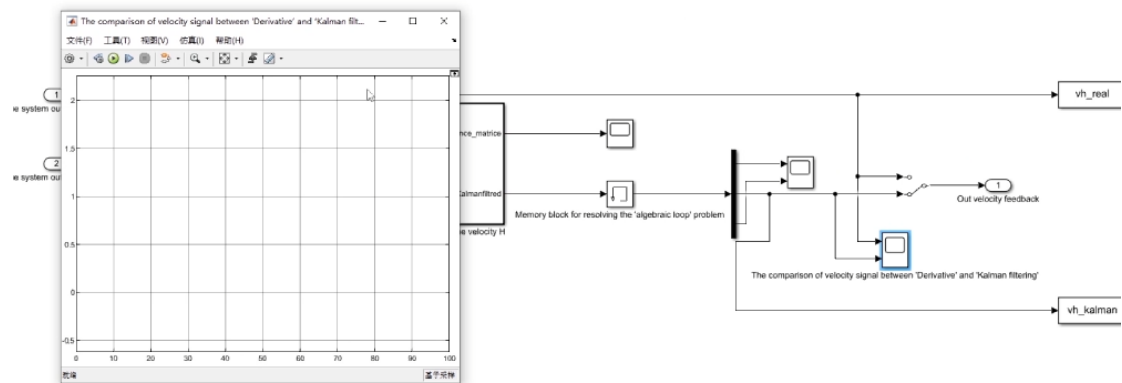
```
% 过程噪声
p_var = 0.3 % sigma
Q = eye(3)*p_var^2; % 过程噪声协方差矩阵
W=Q*randn(3,1); % 过程噪声

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

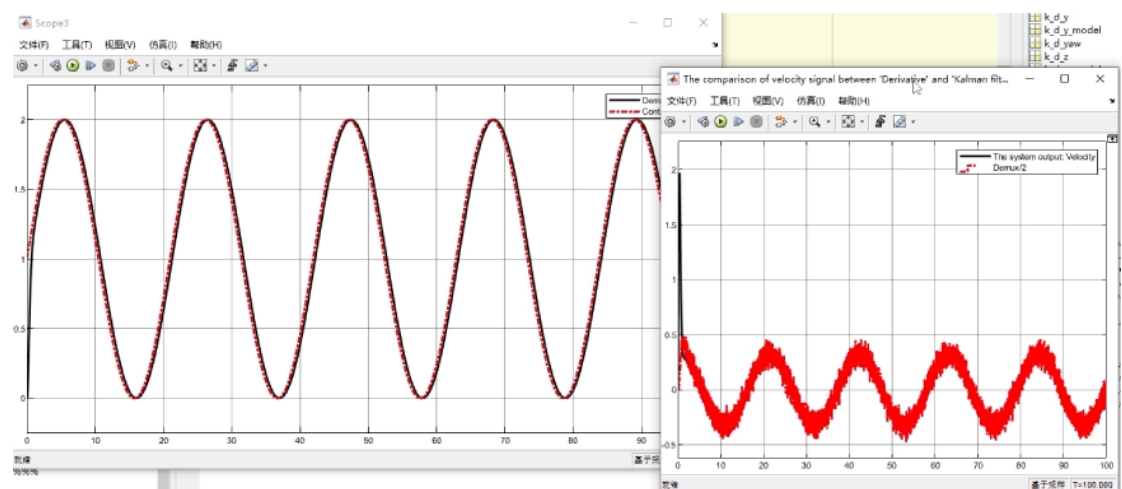
% 观测方程矩阵
H=[1 0 0];
```

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。

## Step 6:



运行仿真程序。



## Step 7:

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。

## Step 8:

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，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。

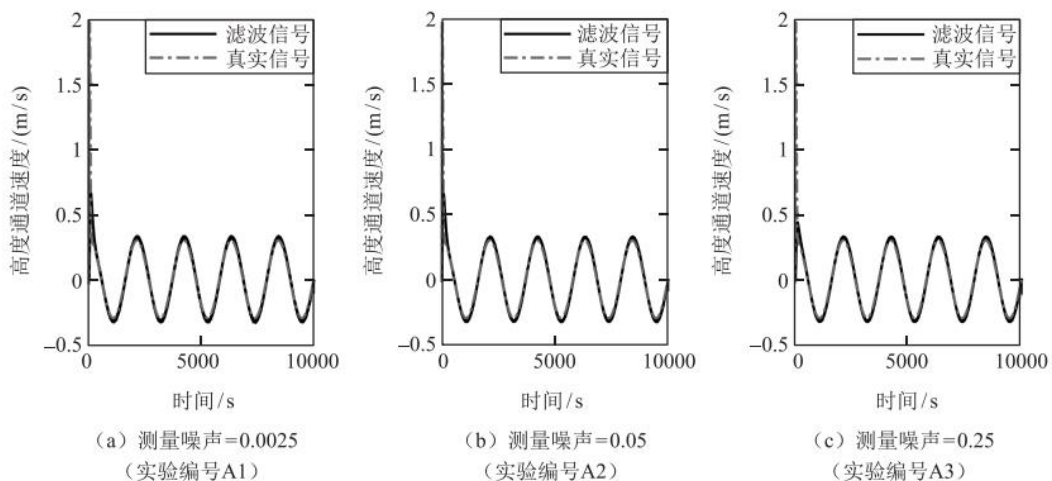


图 5.10 “gain\_noise=0.25” 时，高度通道下真实速度与滤波速度对比图

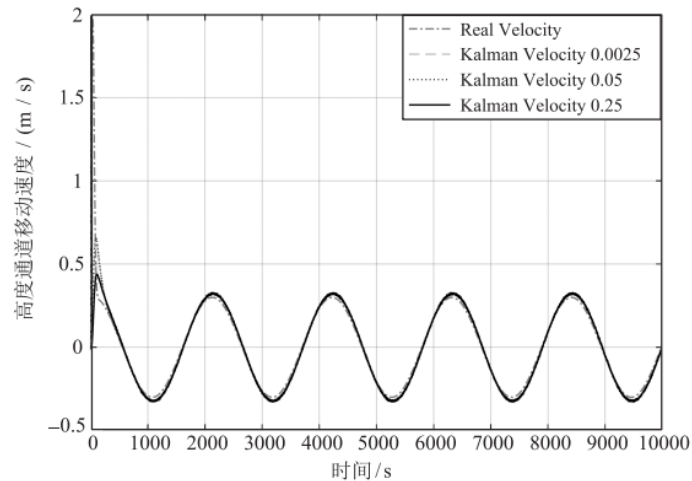


图 5.11 “gain\_noise=0.25” 时，高度通道下不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图

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。

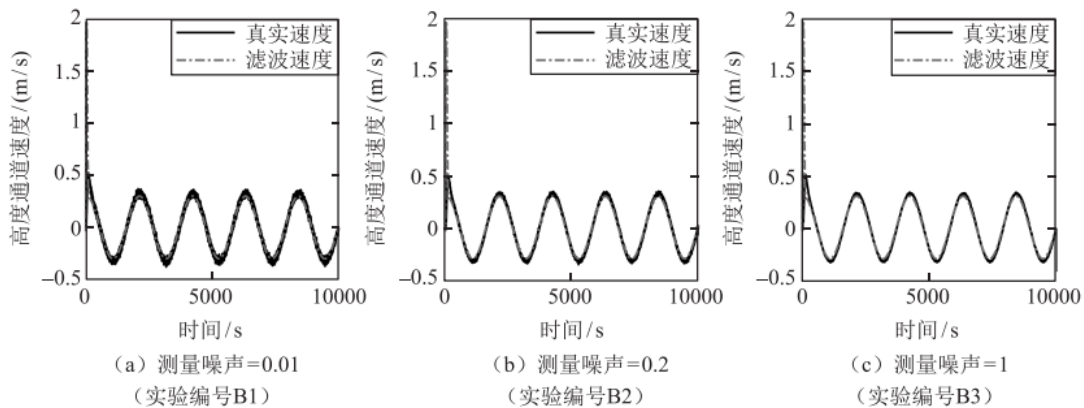


图 5.12 “gain\_noise=1” 时，高度通道下真实速度与滤波速度对比图



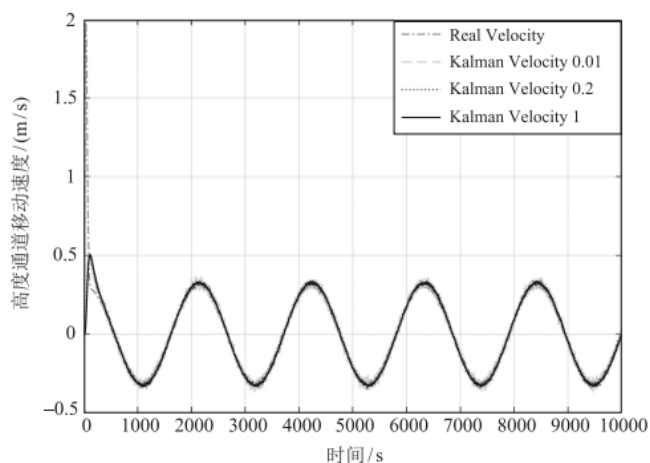


图 5.13 “gain\_noise=1”时，高度通道下不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图

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。

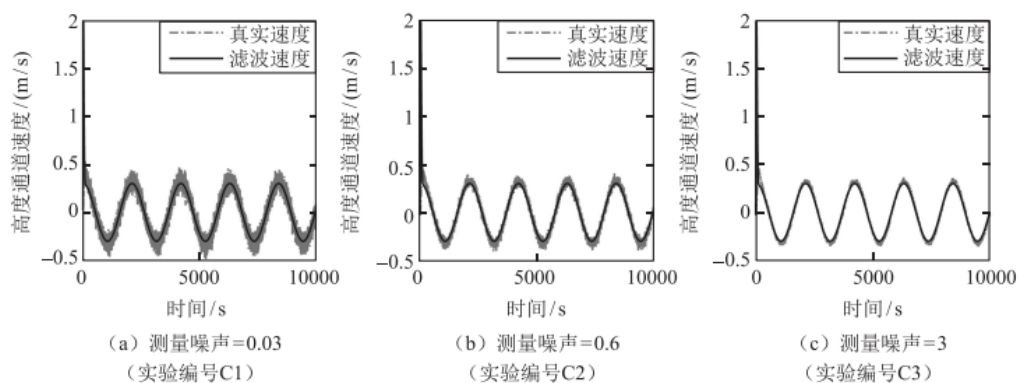


图 5.14 “gain\_noise=3”时，高度通道真实速度与滤波速度对比图



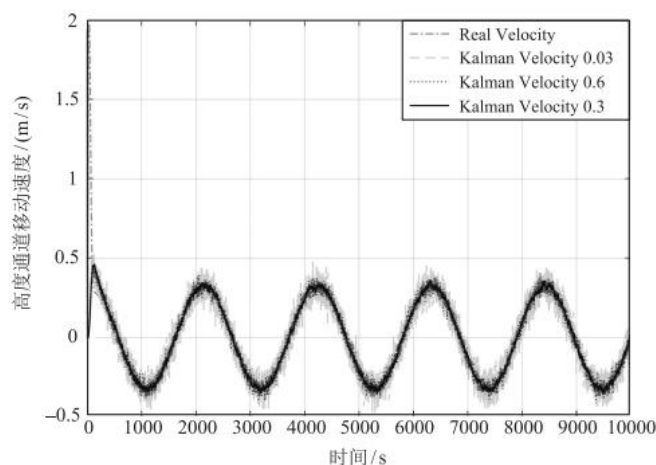


图 5.15 “gain\_noise=3” 时，高度通道不同卡尔曼滤波器测量噪声标准差下滤波速度对比图

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

## 7.仿真 2.0(sim2.0)实验步骤

### Step 1:

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。

### Step 2:

打开命名为“e2\2.2\sim2.0”的文件夹，其中的文件与上面的“e2\2.2\sim1.0”文件夹相同，而区别在于“e2\2.2\sim2.0”文件夹中的模型为非线性模型。

### Step 3:

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。

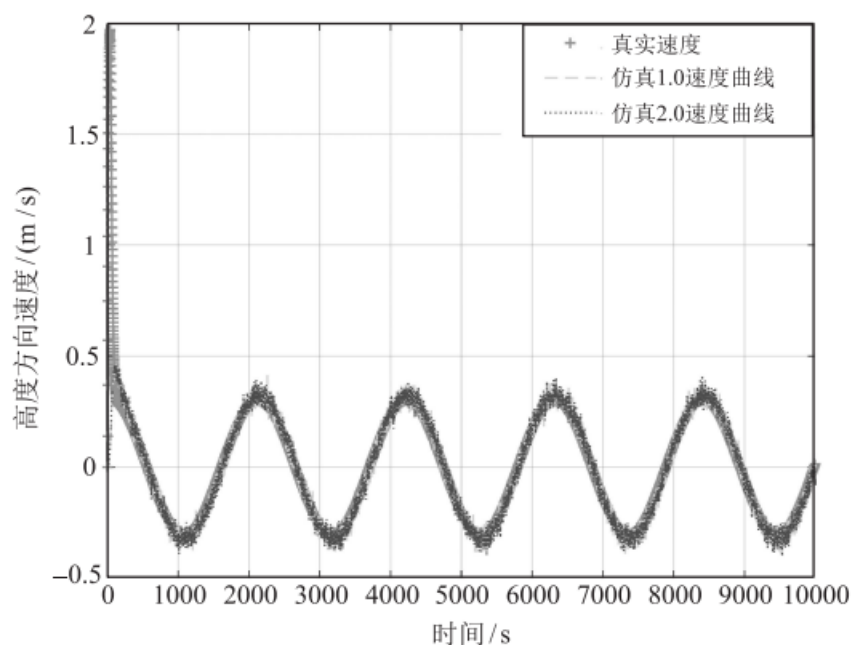


图 5.16 分析实验仿真 2.0 中，高度通道滤波速度输出对比图

## 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: \*\*\*\*