

---

# 1. 实验名称及目的

## 1.1. 实验名称

底层飞控开发互补滤波器和卡尔曼滤波器设计实验

## 1.2. 实验目的

1. 利用数据采集模型和飞控采集加速度计和陀螺仪数据，按步骤完成互补滤波，处理所得数据并绘制相关姿态角数据图；基于 4.1 基础实验，改变滤波器参数，分析滤波器参数对滤波效果的影响；理解卡尔曼滤波原理，并设计卡尔曼滤波器实现滤波器功能。
2. 利用数据采集模型和 Pixhawk 采集加速度计和陀螺仪数据，按步骤完成互补滤波，处理所得数据并绘制相关姿态角数据图；与原数据解算的姿态角和 PX4 自带姿态角解算出的数据作比较，以理解互补滤波器的优点。
3. 基于基础实验，将互补滤波器

$$\hat{\theta}(k) = \frac{\tau}{\tau + T_s} (\hat{\theta}(k-1) + T_s \omega_{y_b m}(k)) + \frac{T_s}{\tau + T_s} \theta_m(k)$$

的参数  $\tau$  值进行改变，对所给数据进行滤波，分析滤波器系数对滤波效果的影响。

4. 解卡尔曼滤波原理，设计卡尔曼滤波器，设计算法实现滤波器功能。进一步，处理加速度和角速度数据，并绘制出相关姿态角数据图，与原数据解算的姿态角和 Pixhawk 自带姿态角解算出的数据作比较，以加深对卡尔曼滤波器的理解。

## 1.3. 关键知识点

- 陀螺仪、磁力计和加速度计的工作原理。
- 互补滤波器和卡尔曼滤波器的区别及其优缺点。
- 互补滤波器和卡尔曼滤波器的工作原理。

# 2. 实验效果

1. 为得到准确的姿态角数据，使用互补滤波算法对陀螺仪和加速度计的数据进行融合。
2. 互补滤波算法中对陀螺仪和加速度计数据的使用是通过参数  $\tau$  来控制的，改变  $\tau$  值大小会影响互补滤波效果。
3. 设计出卡尔曼滤波器，建立过程模型和观测模型，滤波效果优于互补滤波。
4. 为得到准确的姿态角数据，使用互补滤波算法对陀螺仪和加速度计的数据进行融合。这种算法相当于对陀螺仪数据做高通滤波，而对加速度计数据做低通滤波。这样可以有效消除陀螺仪和加速度计的测量噪声，将两者数据进行互补。

5. 互补滤波算法中对陀螺仪和加速度计数据的使用是通过参数 $\tau$ 来控制的，改变 $\tau$ 值大小会影响互补滤波效果。当 $\tau$ 值很大时，加速度计所起的作用很小，主要使用陀螺仪的值，而当 $\tau$ 值很小时，陀螺仪所起的作用很小，主要使用加速度计的值。
6. 设计出卡尔曼滤波器，建立过程模型和观测模型。实验结果表明，卡尔曼滤波器的滤波效果要比互补滤波好，另一方面与 PX4 中自带的滤波算法比较接近。

### 3. 文件目录

文件夹/文件名称	说明	
第 08 讲_实验四_滤波器设计实验.pdf	实验配套课件。	
e4.1	互补滤波器基础实验资料	
e4.2	互补滤波器参数设计实验资料	
e4.3	卡尔曼滤波器设计实验资料	
Attitude_cf.m	互补滤波器实现	
Attitude_estimator0.m	用于解算传感器数据（手摇飞控硬件在环）	
Attitude_estimator0_fly.m	用于解算传感器数据（实飞）	
e4_A.bin	传感器数据（手摇飞控）	
log_data.slx	代码生成模板文件。	
log_data_sfun.mexw64	用于在 Simulink 模型中记录数据并将其写入到 MATLAB 工作区	
logdata.mat	传感器数据（实飞）	
px4_read_binary_file.m	用于读取 PX4 飞控系统生成的二进制日志文件的 MATLAB 函数	
Attitude_cf_tao.m	互补滤波器	
logdata.mat	传感器数据	
HardInloop	e4_ekf_A.bin	滤波器数据
	ekf_cf.slx	数据采集模型文件
	plot_filter.m	作图程序
	px4_read_binary_file.m	Bin 文件读取程序
Attitude_cf.m	互补滤波器实现	
Attitude_ekf.m	卡尔曼滤波器实现	
Attitude_estimator.m	用于解算传感器数据（实飞）	
ekf_cf_sfun.mexw64	用于在 Simulink 模型中记录数据并将其写入到 MATLAB 工作区	
logdata.mat	传感器数据（实飞）	

### 4. 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 工具链	Pixhawk 6x 飞控 <sup>②</sup>	1
	MATLAB 2022b 及以上	遥控器 <sup>③</sup>	1
		遥控器接收器	1
		数据线、杜邦线等	若干
		SD 卡及读卡器	1

①：推荐配置请见：<https://doc.rflysim.com>

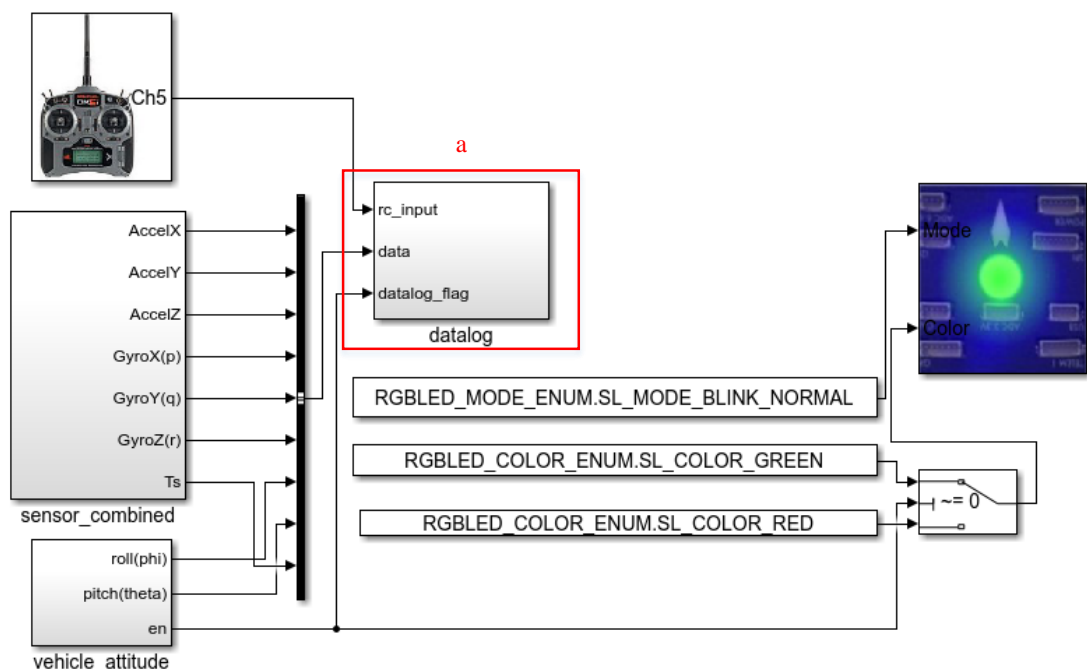
②：须保证平台安装时的编译命令为：`px4_fmuv6x_default`，固件版本为：1.12.3。其他配套飞控请见：<http://rflysim.com/hardware.html>

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 WFLY-ET10、配套接收器为：WFLY-RF20 9S。遥控器相关配置见：<https://rflysim.com/doc/zh/B/3.1ET10.html>

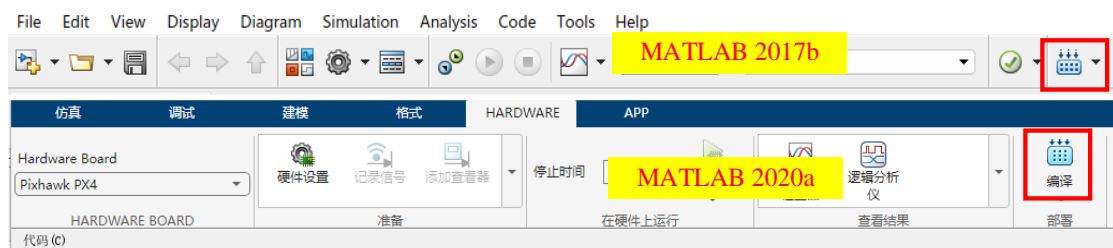
## 5. 实验步骤

### 5.1. 基础实验

打开“log\_data.slx”文件。该文件使用 PSP 工具箱的模块搭建，可以读取加速度、角速度、时间戳和飞控自带算法解算出的姿态角数据。我们可以使用遥控器控制开始写入数据以及停止写入数据，最终将数据存储到飞控的 SD 中。

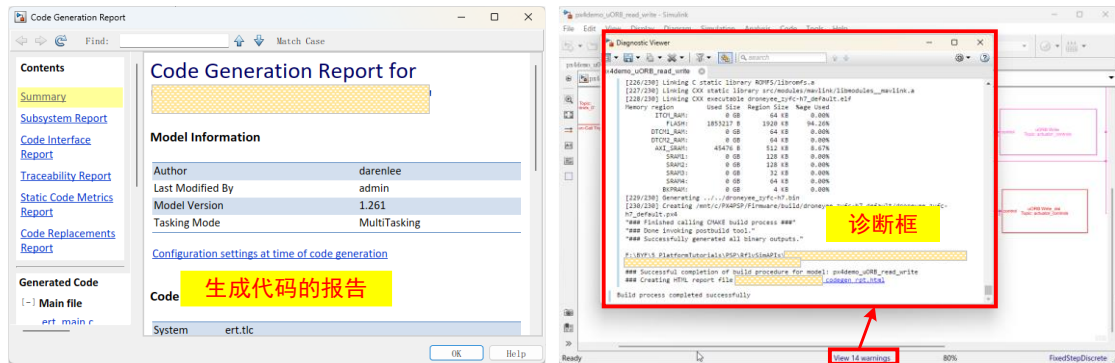


编译并下载文件“log\_data.slx”到 Pixhawk 中。

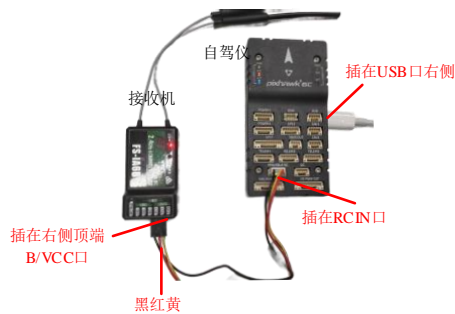


在 Simulink 的下方点击 View diagnostics 指令，即可弹出诊断对话框，可查看编译过程。

在诊断框中弹出 Build process completed successfully, 即可表示编译成功, 左图为生成的编译报告。



用 USB 数据线链接飞控与电脑。在 MATLAB 命令行窗口输入: PX4Upload 并运行或点击 PX4 PSP: Upload code to Px4FMU, 弹出 CMD 对话框, 显示正在上传固件至飞控中, 等待上传成功。



飞控的 LED 指示灯变红意味着 PX4 软件没有正常工作。因此, 在连接好遥控器接收机和飞控后, 等待 10s 以上, 直到飞控的指示灯变绿 (如果飞控的指示灯没有变绿, 请重新拔插飞控)。准备就绪后, 将遥控器 CH5 拨到最顶部, 开始采集数据。手动转动飞控, 在数据采集完成后将遥控器 CH5 拨到最底部停止写数据到 SD 卡。**注: 手动控制应该注意什么时候开始写入数据, 什么时候停止写入数据, 避免写入很多无用的数据。**

将 SD 卡取出, 使用读卡器将文件 “e4\_A.bin” 复制到实验代码目录 “e4\4.1” 下。使用函数

```
[datapoints, numpoints] = px4_read_binary_file('e4_A.bin')
```

解码数据, 数据保存在 “datapoints” 中, 数据个数保存在 “numpoints” 中。

互补滤波器可参考 “Attitude\_cf.m” 文件。其中, “theta\_am” 和 “phi\_am” 分别代表由加速度计计算出的俯仰角和滚转角; theta\_cf” 和 “phi\_cf” 分别代表由互补滤波计算出来的俯仰角和滚转角。

```
function [ phi_cf, theta_cf ] = Attitude_cf(dt, z, phi_cf_k, theta_cf_k, tao)
```

%函数描述:

% 互补滤波姿态结算。

%输入:

% dt: 时间间隔, 单位: s

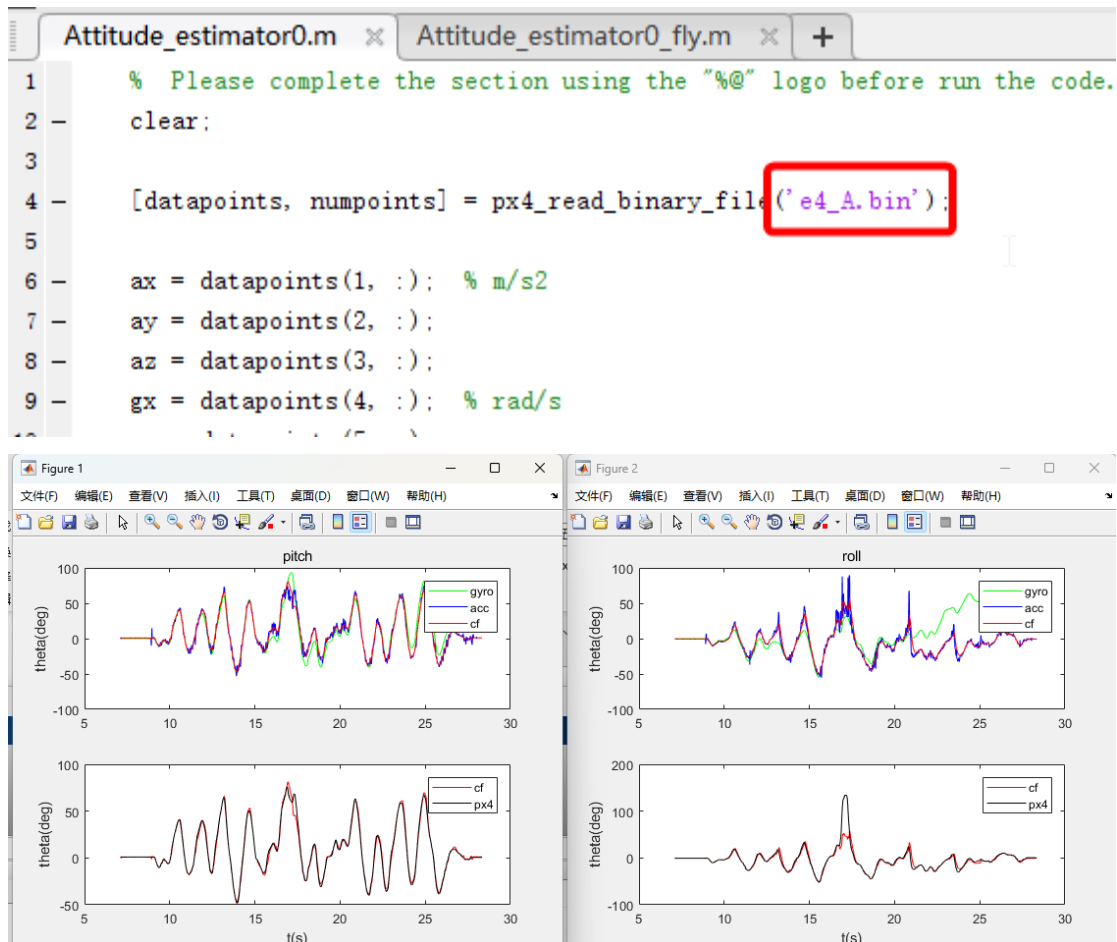
% z: 三轴角陀螺仪和三轴加速度计测量值, [gx, gy, gz, ax, ay, az]',

```

% 单位: rad/s, m/s2
% phi_cf_k, theta_cf_k: 上一时刻的角度值, 单位: rad
% tao: 滤波器系数
%输出:
% phi_cf, theta_cf: 解算的姿态角, 单位: rad
gx = z(1); gy = z(2);
ax = z(4); ay = z(5); az = z(6);
%使用加速度计测量值计算姿态角
g = sqrt(ax*ax + ay*ay + az*az);
theta_am = asin(ax/g);
phi_am = -asin(ay/(g*cos(theta_am)));
%互补滤波
theta_cf = tao/(tao + dt)*(theta_cf_k + gy*dt) + dt/(tao +
dt)*theta_am;
phi_cf = tao/(tao + dt)*(phi_cf_k + gx*dt) + dt/(tao +
dt)*phi_am;
end

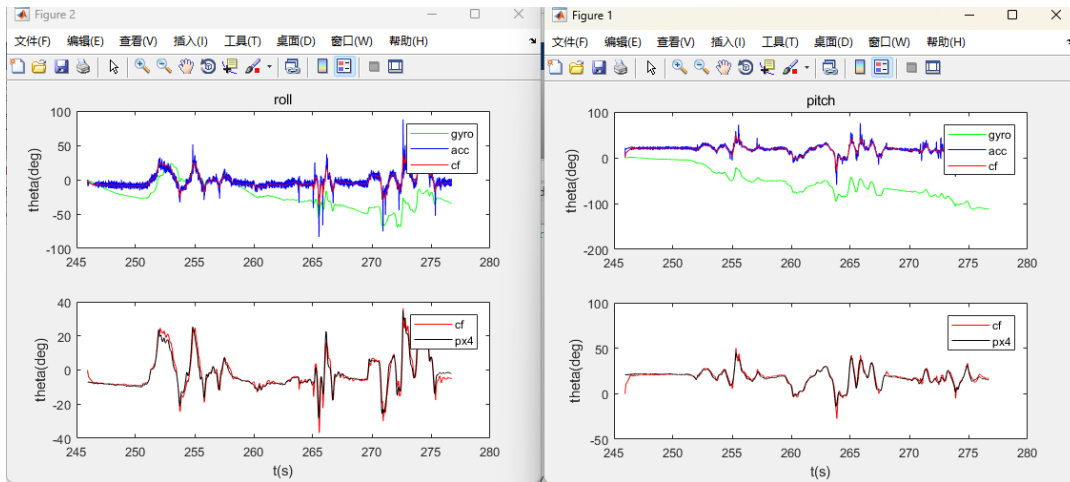
```

运行“Attitude\_estimator0.m”文件，即可看到硬件在环仿真时，生成的陀螺仪数据，得到的姿态角对应“gyro”、直接使用加速度计数据计算的姿态角对应“acc”、使用互补滤波解算的姿态角对应“cf”和 PX4 自带算法解算的姿态角对应“px4”。注：运行时请注意下图文件名与自主采集的数据文件名相同。



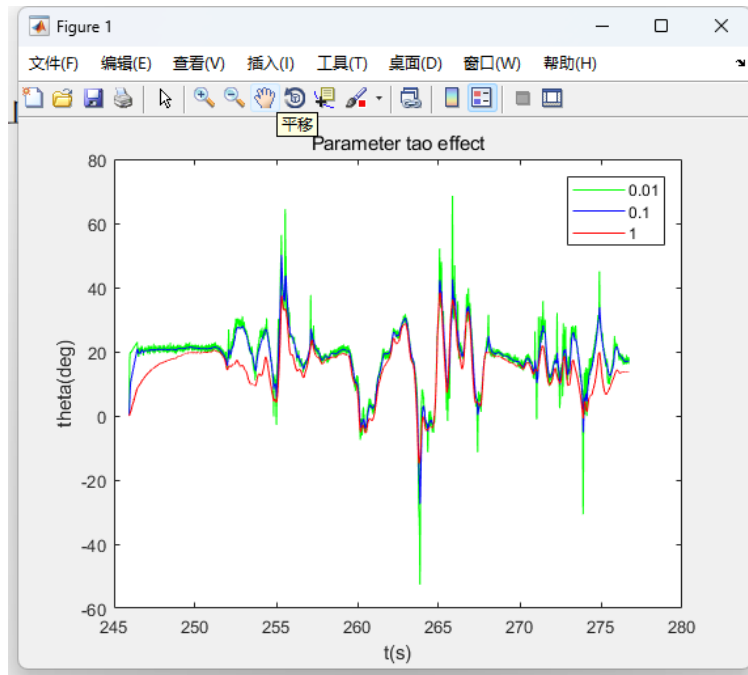
运行“Attitude\_estimator0\_fly.m”文件，即可看到实飞时，生成的陀螺仪数据，得到的姿态角对应“gyro”、直接使用加速度计数据计算的姿态角对应“acc”、使用互补滤波解

算的姿态角对应“cf”和PX4自带算法解算的姿态角对应“px4”。



## 5.2. 分析实验

在MATLAB中运行文件“Attitude\_cf\_tau.m”，得到 $\tau$ 分别为0.01, 0.1, 1时的滤波效果，如图所示。



## 5.3. 设计实验

卡尔曼滤波器实现见文件“Attitude\_ekf.m”，其主要部分如下。

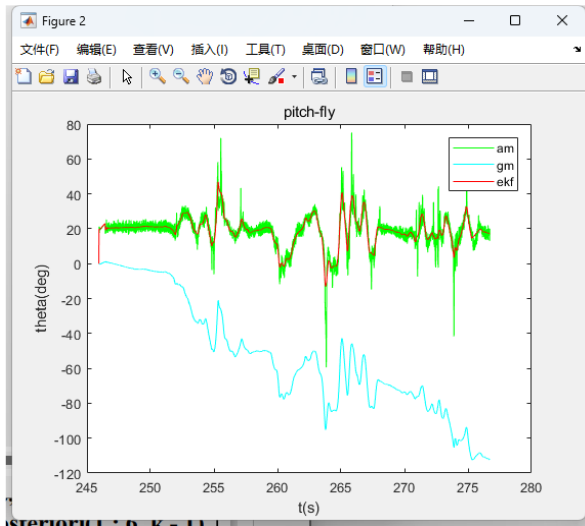
```
function [ x_aposteriori, P_aposteriori, roll, pitch] =  
Attitude_ekf( dt, z, q, r, x_aposteriori_k, P_aposteriori_k)  
%函数描述：  
% 状态估计的拓展卡尔曼滤波方法  
%输入：  
% dt: 更新周期  
% z: 测量值  
% q: 系统噪声, r: 测量噪声
```

```

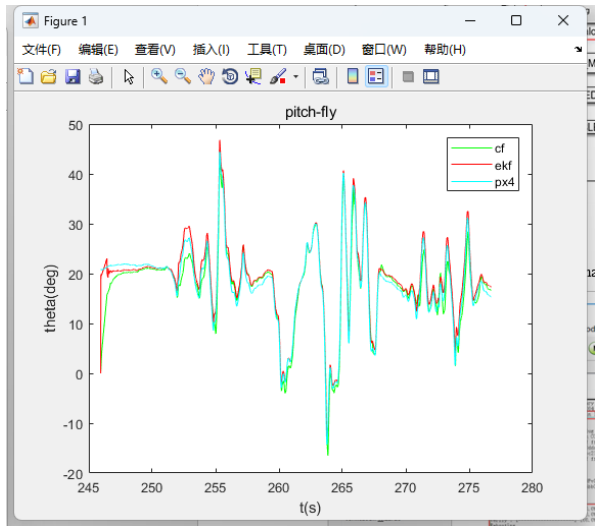
% x_aposteriori_k: 上一时刻的状态估计
% P_aposteriori_k: 上一时刻估计协方差
%输出:
% x_aposteriori: 当前时刻的状态估计
% P_aposteriori: 当前时刻的估计协方差
% roll,pitch: 欧拉角, 单位: rad
w_m = z(1:3); %角速度测量值
a_m = z(4:6); %加速度测量值
g = norm(a_m,2); %重力加速度
% w_x_=[ 0,-(wz-bzg, wy-byg;
% wz-bzg, 0 ,-(wx-bxg);
% -(wy-byg), wx-bxg, 0];
w_x_ = [0, -(w_m(3) - x_aposteriori_k(3)), w_m(2) -x_aposteriori_k(2);
w_m(3) - x_aposteriori_k(3), 0, -(w_m(1) - x_aposteriori_k(1));
-(w_m(2) - x_aposteriori_k(2)), w_m(1) - x_aposteriori_k(1), 0];
bCn = eye(3, 3) - w_x_*dt;
% 预测
% 更新先验状态矩阵
x_apriori = zeros(1, 6);
x_apriori(1: 3) = x_aposteriori_k(1 : 3); %角速度漂移
x_apriori(4 : 6) = bCn*x_aposteriori_k(4 : 6); %加速度归一化值
%[x]x
x_aposteriori_k_x = [0, -x_aposteriori_k(6), x_aposteriori_k(5);
x_aposteriori_k(6), 0, -x_aposteriori_k(4);
-x_aposteriori_k(5), x_aposteriori_k(4), 0];
% 更新状态转移矩阵
PHI = [eye(3, 3), zeros(3, 3);
-x_aposteriori_k_x*dt, bCn];
GAMMA = [eye(3, 3)*dt, zeros(3, 3); % 噪声驱动阵
zeros(3, 3), -x_aposteriori_k_x*dt];
Q = [eye(3, 3)*q(1), zeros(3, 3);
zeros(3, 3), eye(3, 3)*q(2)];
% 预测误差协方差矩阵
P_apriori = PHI*P_aposteriori_k*PHI' + GAMMA*Q*GAMMA';
% 更新
R = eye(3, 3)*r(1);
H_k = [zeros(3, 3), -g*eye(3, 3)];
%卡尔曼增益
K_k = (P_apriori*H_k')/(H_k*P_apriori*H_k' + R);
% 状态估计矩阵
x_aposteriori = x_apriori' + K_k*(a_m - H_k*x_apriori');
% 估计误差协方差
P_aposteriori = (eye(6, 6) - K_k*H_k)*P_apriori;
% 计算滚转角和俯仰角, 分别对应 roll,pitch
k = x_aposteriori(4 : 6) /norm(x_aposteriori(4 : 6), 2);
roll = atan2(k(2), k(3)); % 滚转角
pitch = -asin(k(1)); %俯仰角
end

```

运行“e4.3”中文件“Attitude\_estimator.m”即可得到如下图所示的滤波结果及对比图。以实飞过程的俯仰角为例。

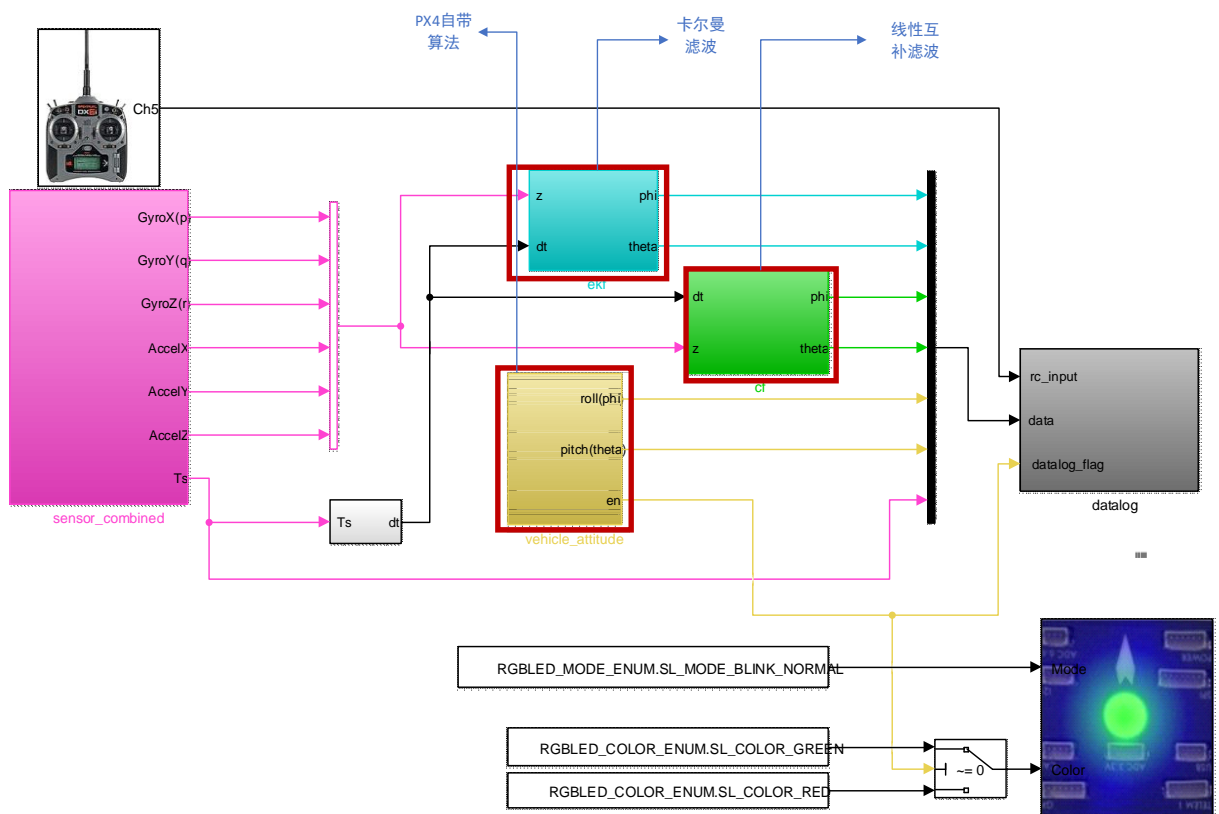


对陀螺仪与加速度计数据进行卡尔曼滤波

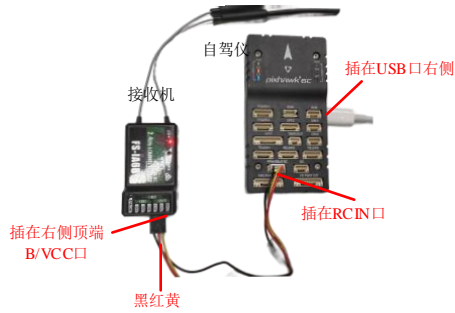


卡尔曼滤波对比线性互补滤波与PX4自带滤波算法

根据互补滤波和卡尔曼滤波算法，设计 Simuink 模型“ekf\_cf.slx”模型。该模型同时运行互补滤波算法和卡尔曼滤波算法，并将得到的结果存储在 SD 卡中。

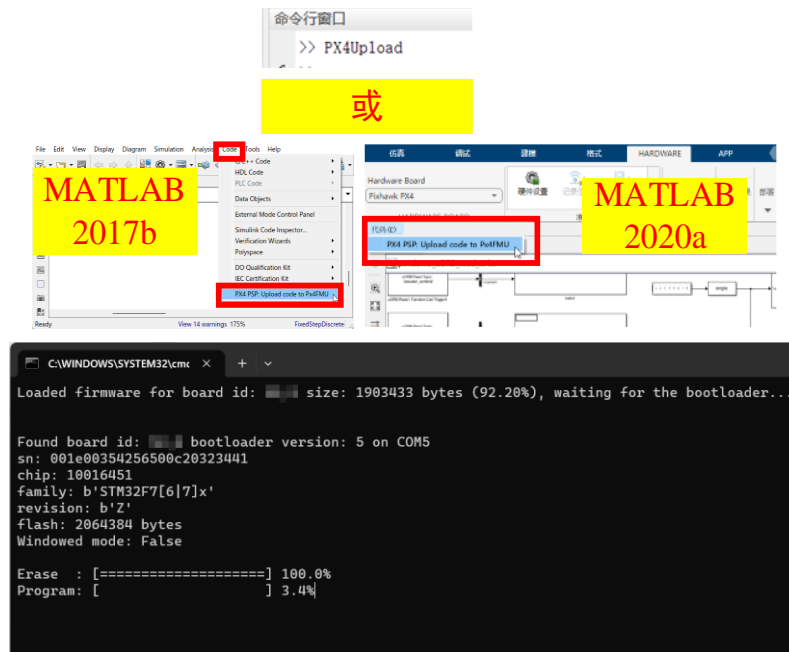


将遥控器与遥控器接收器对码完成并在飞控中插入 SD 卡后，如图将遥控器接收机和飞控连接好。



注意：电源线接线顺序从上到下依次为黑红黄

在 MATLAB 命令行窗口输入：PX4Upload 并运行，弹出 CMD 对话框，显示正在上传固件至飞控中，等待上传成功。

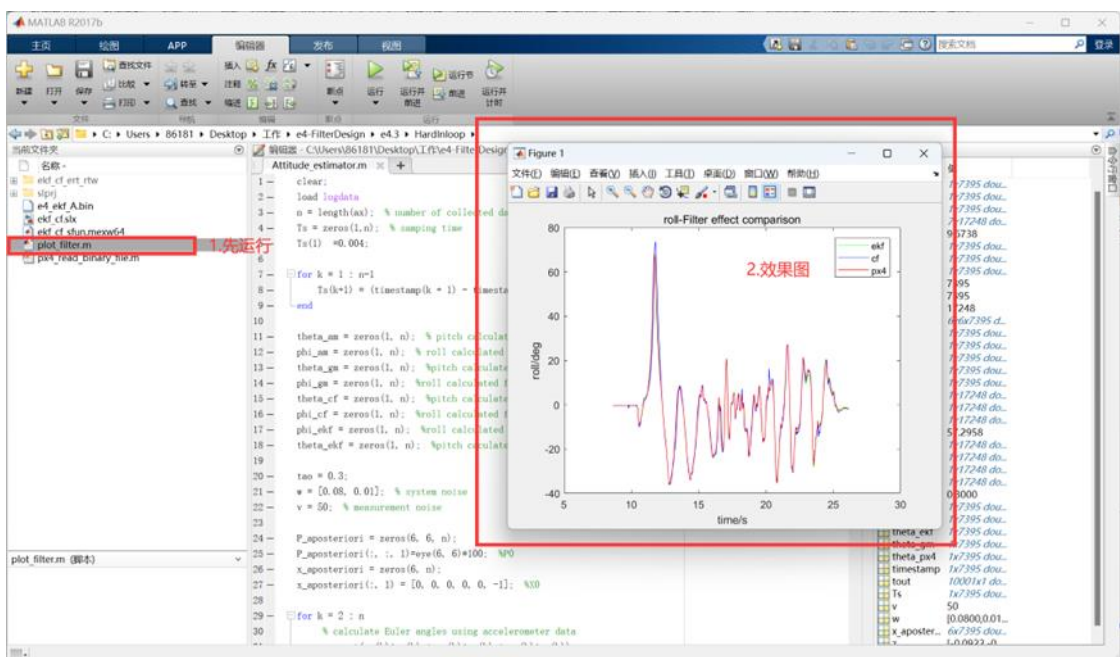


飞控的 LED 指示灯变红意味着 PX4 软件没有正常工作。因此，在连接好遥控器接收机和飞控后，等待 10s 以上直到飞控的指示灯变绿（如果飞控的指示灯没有变绿，请重新拔插飞控）。准备就绪后，将遥控器 CH5 拨到最顶部（程序变量  $ch5 > 1500$ ，最远离使用者的档位），手动晃动飞控，数据采集完成后将遥控器 CH5 拨到最底部（最靠近使用者的档位）停止写数据到 SD 卡。

将 SD 卡取出，使用读卡器读文件“ekf1\_A.bin”复制到实验代码目录“e4\e4.3”。

名称	修改日期	类型	大小
ekf_cf_ert_rt看	2023/1/10 17:40	文件夹	
slprj	2023/1/10 17:40	文件夹	
e4_ekf_A.bin	2020/8/19 12:58	BIN 文件	472 KB
ekf_cf.slx	2020/8/19 12:58	Simulink Model	42 KB
ekf_cf_sfun.mexw64	2023/1/5 16:49	MATLAB Mex	120 KB
plot_filter.m	2020/8/19 12:58	MATLAB Code	1 KB
px4_read_binary_file.m	2020/8/19 12:58	MATLAB Code	2 KB

运行“plot\_filter.m”文件。得到旋转飞控时互补滤波，卡尔曼滤波以及 PX4 自带的滤波算法效果对比图。



## 6. 参考资料

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. 第 08 讲\_实验四\_滤波器设计实验.pptx.
- [4]. 第 08 讲\_可观性和卡尔曼滤波器 V2.pptx.

## 7. 常见问题

Q1: \*\*\*

A1: \*\*\*