

1. 实验名称及目的

滤波器设计实验(实飞实验): (1) 由于在实飞实验中, 传感器信号反馈存在延时, 因此基于设计实验中的扩维法设计新卡尔曼滤波器算法进行速度反馈, 观察控制效果。(2) 将基于扩维法设计的新卡尔曼滤波器算法进行闭环控制, 对比控制效果。

2. 实验原理

在本实验附带的文件夹“e2\2.4”中, 找到“e2\2.4\2_3_kalman_filter.slx_2017b”模型文件, 打开该模型文件。在打开该模型文件后, 可以看到与给定多旋翼使用文档类似的模型。在该模型中可以看到与使用文档结构类似的各模块, 如图 5.27 所示。在图 5.27 中, “控制指令模块”用于生成位置指令, “控制器模块”用于实现给定多旋翼的控制, 卡尔曼滤波的相关设置均存在图 5.27 的“控制器模块”中。

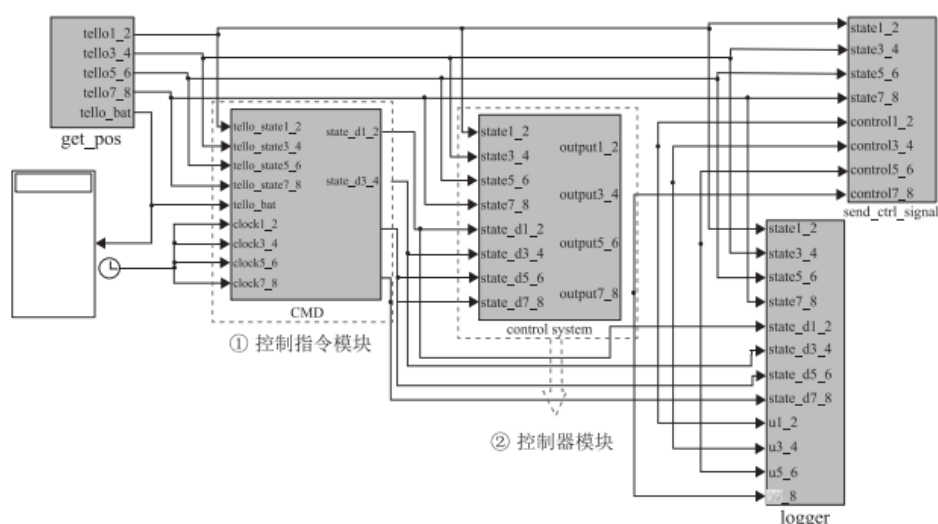


图 5.27 整体模块示意图, Simulink 文件详见“e2_4_kalman_filter.slx”

“控制器模块”内部如图 5.28 所示。本实验模型中的“控制器模块”已经调节好, 不同的是在“控制器模块”内加入了“卡尔曼滤波器模块”。该模块的作用是通过实时获取的位置信号, 通过带延时的卡尔曼滤波器估计得到速度信息。

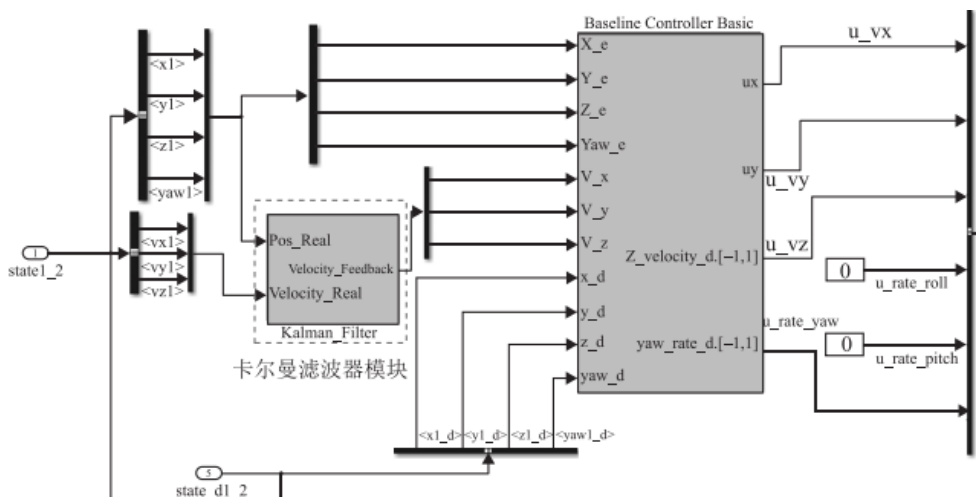


图 5.28 “控制器模块”示意图, Simulink 文件详见“e2_4_kalman_filter.slx”

图 5.28 中的虚线框部分为“卡尔曼滤波器模块”，其内部如图 5.29 所示。图 5.29 中虚线框内的模块分别采取卡尔曼滤波器算法，获取多旋翼三个方向的实时速度。打开任意一个模块，例如“水平前向通道”模块，其内部如图 5.30 所示。

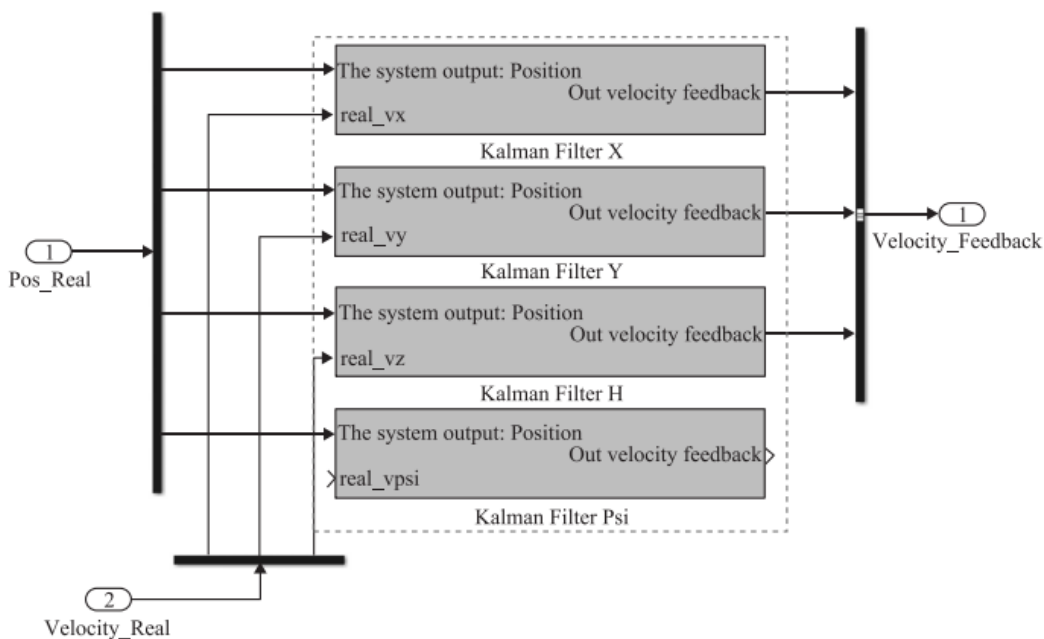


图 5.29 卡尔曼滤波器模块, Simulink 文件详见“e2_4_kalman_filter.slx”

在图 5.30 中，虚线框①处代表基于扩维法的卡尔曼滤波的更新过程，里面代码和设计实验类似，考虑了实际反馈中三个采样周期延时的影响，这里不做详细介绍，详细内容请参考 5.4.3.1 节内容；虚线框②代表定位系统的速度反馈信号，它是基于反馈的位置信号通过差分的方式获取到的；虚线框③代表开关，决定是否将卡尔曼滤波的结果加入反馈闭环之中，如果需要，则要将开关拨到上面，否则将开关拨到下面。图 5.30 表示将卡尔曼滤波的结果加入反馈闭环中。

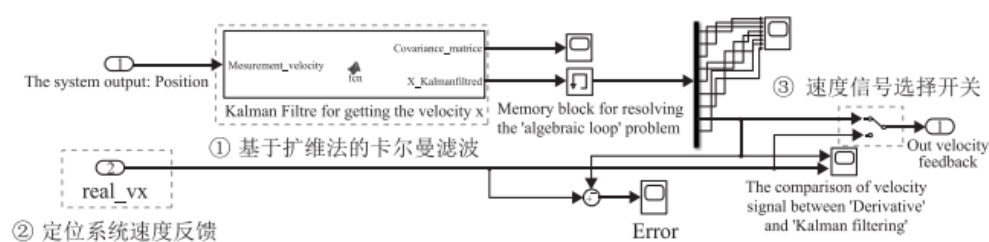


图 5.30 实飞实验卡尔曼滤波器内部示意图, Simulink 文件详见 “e2_4_kalman_filter.slx”

3. 实验效果

在 Simulink 中实现在实飞过程中呈现高度通道卡尔曼滤波器控制效果图。

4. 文件目录

文件\文件夹名称	说明
e2_3_kalman_filtre_2017.slx	卡尔曼滤波实飞实验文件
start_tello.m	初始化参数文件

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 平台个人版	Pixhawk 6C ^②	1
3	MATLAB2017B 及以上	遥控器 ^③	1
		遥控器接收器	1
		数据线、杜邦线等	若干

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_fmu-v6c_default，固件版本为：1.13.3。其他配套飞控请见：<http://doc.rflysim.com>

③：本实验演示所使用的遥控器为：天地飞 ET10、配套接收器为：WFLY RF209S。遥控器相关配置见：..\e11_RC-Config\Readme.pdf

6. 实飞(Rfly)实验步骤

Step 1:

首先阅读给定多旋翼使用文档（详细内容请参考第 3 章 3.2 节）的内容，对于 Simulink 模型有一个初步的了解。

Step 2:

打开本章所附带的文件夹“e2le2.4”，该文件夹内容如下。

(1) “start_tello.m”文件，用于初始化以及启动相应的 Simulink 程序。

在本实验附带的文件夹“e2\2.4”中，找到“e2\2.4\2_4_kalman_filter.slx”模型文件，打开该模型文件。在打开该模型文件后，可以看到与给定多旋翼使用文档类似的模型。在该模型中可以看到与使用文档结构类似的各模块，如图 5.27 所示。在图 5.27 中，“控制指令模块”用于生成位置指令，“控制器模块”用于实现给定多旋翼的控制，卡尔曼滤波的相关设置均存在图 5.27 的“控制器模块”中。

图 5.27 整体模块示意图, Simulink 文件详见“e2_4_kalman filter.slx”

修改了实验原理中所提到的相应模块之后,给每个通道输入实验目标要求的正弦波,即周期为 10s,幅值为 1 的正弦信号,如图 5.25 所示。

图 5.25 Control Input 模块

Step 4:

在完成了相应的修改后,可以进行实验。运行“e2\2.4\start_tello.m”初始化文件,运行后“e2_3_kalman_filter.slx”模型文件会自动打开。

Step 5: 实飞准备

(1) 启动 OptiTrack

打开一个新终端,运行命令“roslaunch mocap_optitrack multi_rigidbody8.launch”。

(2) 启动 tello_driver

打开一个新终端,运行命令“roslaunch tello_driver tello_node.launch”。

(3) 起飞 Tello

打开一个新终端,运行命令“roslaunch tello Tello_takeoff_all”,可以看到一架多旋翼起飞并保持悬停在正上方高度为 1m 的位置。

(4) 运行 MATLAB 控制程序

运行“e2_3_kalman_filtre.slx”模型文件,分别进行各通道的卡尔曼滤波实验。

(5) 降落 Tello

打开一个新终端,运行命令“roslaunch tello Tello_land_all”,在多旋翼降落后,结束所有终端。。

Step 6:

为了观察卡尔曼滤波的效果,需要把每个通道的速度信号选择开关拨至上部(如图 5.3 0①所示),将卡尔曼滤波的结果引入闭环系统。同时,对于卡尔曼滤波器的两个噪声参数,统一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。运行模型文档“e2_3_kalman_filter.slx”,分别对各通道给定实验目标中的特定信号,利用示波器显示其滤波效果。

Step 7:

在获得了卡尔曼滤波之后的速度信号后,可以与 OptiTrack 室内定位系统通过位置微分得到的速度(当成真实速度值)进行对比,以便获得一个更直观的滤波器效果。

Step 8:

因为偏航通道并不需要偏航角速率的反馈信息,因此这里只需要对三个方向的速度进行滤波实验即可。需要注意的是,本书将 OptiTrack 室内定位系统的反馈位置信号作为真实的姿态信号(该传感器信号反馈及时且较为精准);如果读者有合适的传感器,也可以将传感器反馈信号作为真实信号进行对比。而 OptiTrack 室内定位系统只能获取真实位置信息,真实速度信息为位置信息的微分替代。接下来,我们以高度通道的结果为例进行说明验证,其他通道请读者自行验证。

实飞实验高度通道真实速度与滤波速度对比图如图 5.31 所示,卡尔曼滤波器获取的速

度与真实速度值的误差结果图如图 5.32 所示。由图 5.31 可以看出，高度通道方向的速度滤波与真实的速度信号基本拟合，同时相应的延时也较小，并且真实速度由于微分的原因还会产生突变，而滤波速度更加平缓。因此可以使用卡尔曼滤波获得的速度来进行控制，取代原有 OptiTrack 室内定位系统的速度反馈。由图 5.32 可知，各通道误差都相对较小，除了真实速度突变部分，大部分时刻误差都在 0 附近。

我们可以做出如下分析和小结。在真实情况下，观测信息含有一定延时，因而需要考虑延时情况下的卡尔曼滤波，可以参考设计实验中的递推预测法和扩维法。从实飞实验对比的结果可以看出，即使是在有延时情况下，卡尔曼滤波仍能有效获得速度信号,并且结果与基础实验中的速度获取结果相似。综上所述，在有延时情况下卡尔曼滤波器仍然可以被使用。

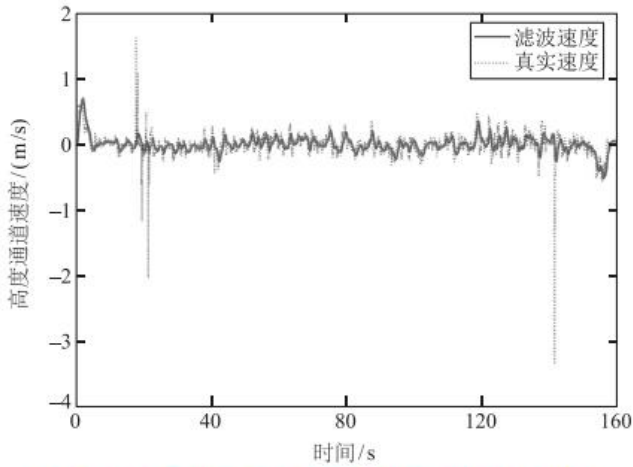


图 5.31 实飞实验高度通道真实速度与滤波速度对比图

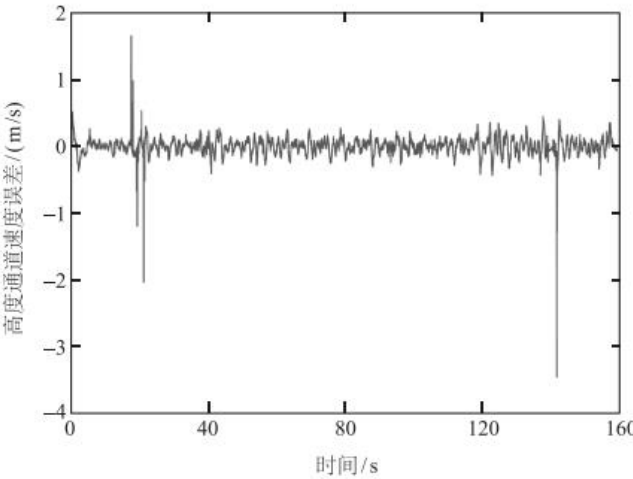


图 5.32 实飞实验高度通道速度误差

Step 9:

可以将卡尔曼滤波器获得的速度作为反馈加入控制器中，同样使用本节中的正弦信号，即周期 10s，幅值为 1 的正弦波信号作为参考跟踪信号。实飞实验高度通道卡尔曼滤波器控制效果图如图 5.33 所示，实飞效果图如图 5.34 所示。从图中可以看出，在高度通道中，滤

波后的期望位置与实飞过程位置反馈较为一致,在一定误差范围内可以认为将卡尔曼滤波后的速度引入闭环控制,给定多旋翼可以很好地跟随输入指令。由此可知,用卡尔曼滤波器获得的速度代替原有速度进行控制器设计,控制效果仍然很理想,可以达到预期效果。

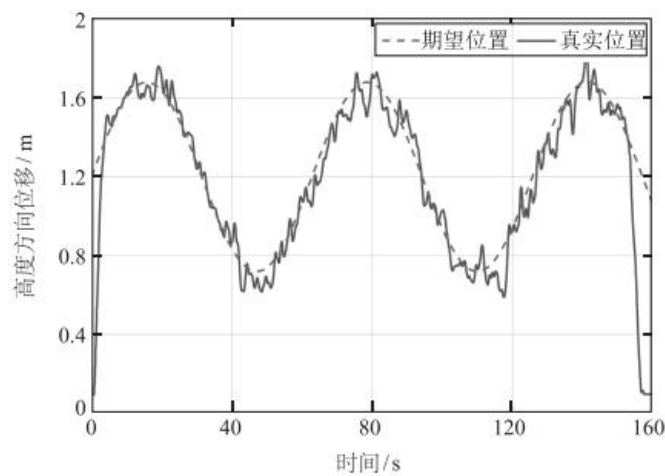


图 5.33 实飞实验高度通道卡尔曼滤波器控制效果图

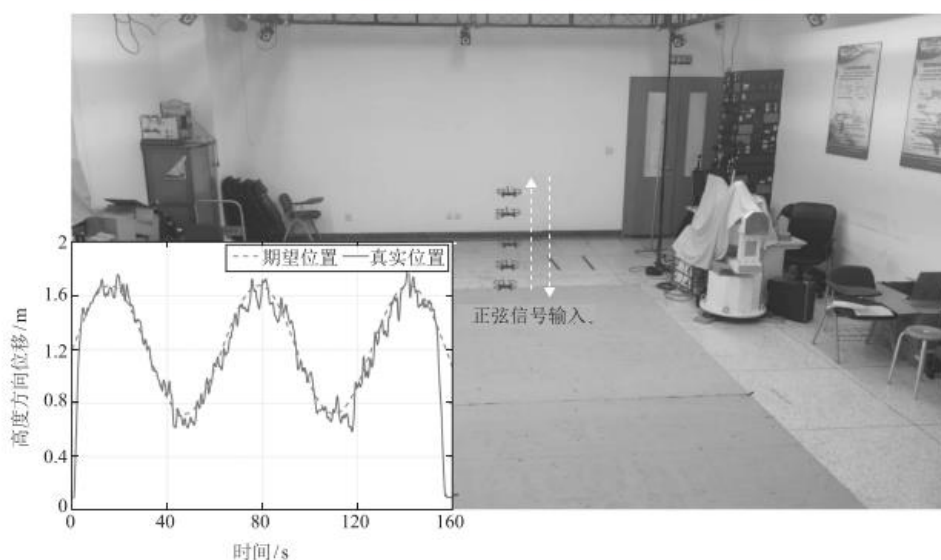


图 5.34 实飞实验高度通道卡尔曼滤波器实飞图（影像进行了叠加）

（具体操作步骤可以观看每章相对应的 PPT，其中由各个实验相对应的演示视频。）

7. 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.

8. 常见问题

Q1: ****

A1: ****