



# 基于 STM32F4 与 NRFx 芯片的四旋翼飞行器 协同控制设计与实现

## 第一部分 设计概述

### 1.1 设计目的

本项目旨在设计与实现基于 STM32F4 与 NRF51、NRF24L 系列芯片的四旋翼飞行器协同控制系统，通过无线通讯和信号拦截，实现微型四旋翼飞行器主机和四旋翼无人机从机之间的运动控制同步匹配。通过该系统，可以有效提升飞行器的整体性能和协同工作能力，为无人机应用领域带来更多创新和实用价值。

### 1.2 应用领域

该系统的应用领域广泛，包括但不限于以下方面：

1. 科研实验：为相关领域的研究人员提供一个灵活、高效的飞行器协同控制平台，用于开展飞行器协同控制算法和技术的研究。
2. 教育培训：作为教育机构或培训机构的教具，帮助学生和从业人员深入理解嵌入式系统的项目构成和飞行器控制技术，亦可用于学习经典控制理论中 PID 调参要领以提高对闭环系统处理的理解。
3. 农业和环境监测：用于无人机在农业作物喷洒、大气及地面环境监测等方面的协同工作，提高工作效率和准确性。

### 1.3 主要技术特点

1. 主机使用 STM32F411 作为四旋翼飞行器的控制核心，实现高性能、高稳定性的飞行控制。其中，使用 NRF 不同系列的芯片组合对于 2.4GHz 的主流通信方式来说是一种较新的尝试；

2. 另外采用 NRF51822 芯片进行编程，而非使用 NRF24L01+模块，更能满足实验需求；通过滤波、RFX2401C 实现的硬件处理，完成四旋翼飞行器与遥控器之间的无线远距离通讯，确保可靠而有效的信号传输。

3. 通过对接 NRF24L01+芯片实现流畅、高效率通信通过信号的截取转发，成功实现了主机与从四旋翼无人机之间的信道匹配与地址锁定，顺利沟通从机，完成双四旋翼飞行器的远程控制和协同工作。

### 1.4 关键性能指标

1. 通讯功能：通信距离经过收发器件功放以及发射天线和滤波处理，确保系统整体联动无线通讯距离达百米级别，能够覆盖转发实验所需范围，保证远程控制的有效性。

2. 控制精度：设置油门死区、欧拉三角数值可微调，主从机协同相关参数及 PID 闭环 Set Point 稳定调节参数反复试验，保证微型飞行器和较大从无人机之间的协同控制精度，确保运动控制的同步性和稳定性。

3. 鲁棒性与安全性：系统发射、转发及截取机制经过多层验证，保证系统鲁棒及安全性；通过丢失遥控信号急停、设置起飞电机使能限制与特

定解锁控制姿势信号，确保飞行器系统在不同环境下的稳定性和安全性，减少飞行事故的发生。

## 1.5 主要创新点

1. 无线远距离通讯：采用 NRF51822 芯片 RF 功放在硬件回路处理，通过二次滤波，实现无线远距离通讯；同时，拓展主从机通信，且实现以主机作为 STA + AP 形式执行任务且转发及发布指令的控制形式，为拓展复杂编队模式、满足多样化需求打下基础。

2. 信号拦截与控制：通过对控制器的信号拦截，并利用 NRF 链路协议从软件层转译为从机的通信控制，实现与微型飞行器的运动控制同步匹配，增强飞行器系统的协同工作能力。

3. 灵活性与扩展性：不同于主流的 STM32F103 飞控，使用 STM32F4 系列芯片作为控制核心，算力增强，提供灵活的系统设计和扩展能力，满足不同应用需求和创意实现。

## 第二部分 系统组成及功能说明

### 2.1 整体介绍

系统整体框图如下：

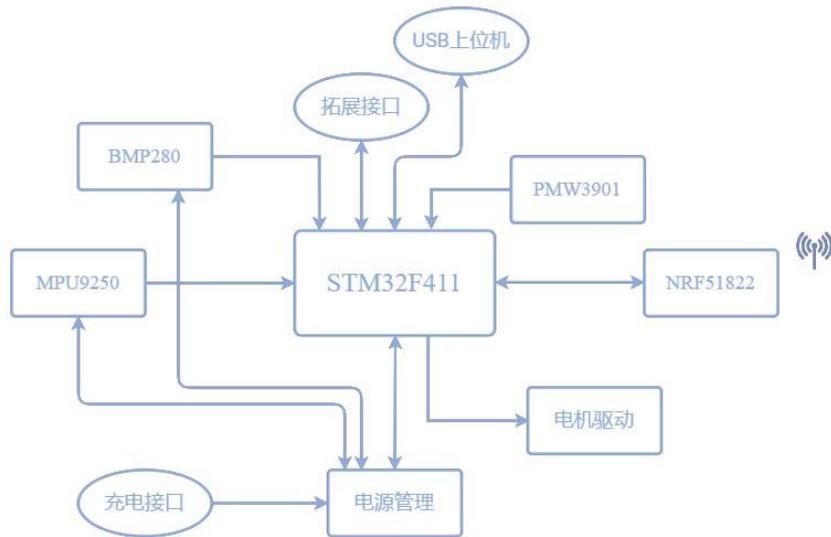


Figure 1 主飞行器系统框图

主飞行器系统框图如上所示，预留数个接口用于外部扩展通信，按键管理和电源管理由主芯片承担。传感器进行数据读取后，将数据打包传输给主控芯片；无线通信模块亦将接收到的控制信号传输入主芯片，经过多重数据融合后，改变后的参考点通过串联 PID 闭环算法进行解算并向电机输出应改变的 PWM 具体数值，其中电机对飞行姿态的影响由四旋翼无人机建模分析可得，其具体模型如下：

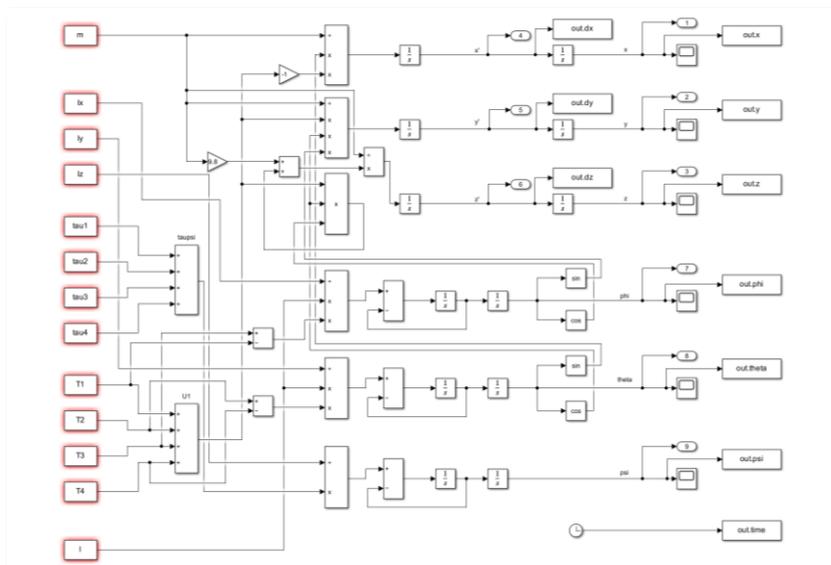


Figure 2 Matlab 仿真系统

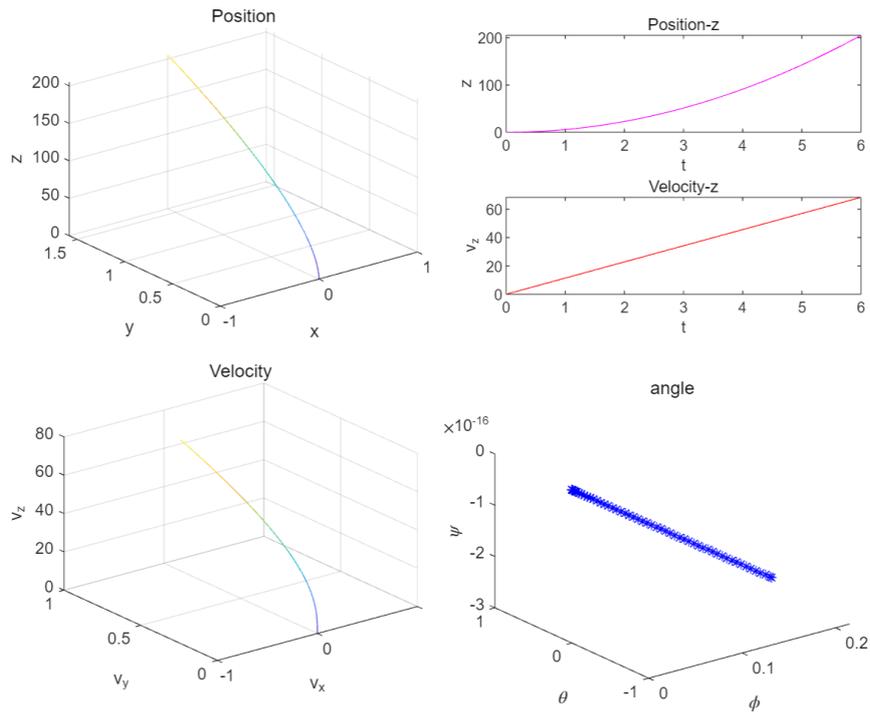


Figure 3 仿真结果一例

如图所示，由数字仿真可验证模型的准确性及稳定性。

与此同时，控制器的部分框架与主机相似，主要由电位器和按键等负责监听用户操作，由主控芯片使用 RTOS 进行任务管理，并将信息交换的包使用无线通讯发送，同时不断调用函数显示 OLED 屏幕。

## 2.2 各模块介绍

由上述说明我们可以得知，系统整体由传感器和控制器（无线通讯与按键检测）输入，主控芯片运算并进行任务管理，使用 UART 与 RADIO 进行信息包的输出，并同时管理信号灯指示与屏幕显示。

传感器模块的工作大致如下： MPU9250 陀螺仪负责测量飞行器的姿态信息，包括加速度、角速度和姿态角等，将这些数据传输给主控芯片。

BMP280 气压温度传感器用于测量飞行器的气压和温度信息，帮助实现高度控制和气压校准。无线通讯与地面遥控器进行数据传输，数据包中包括遥控指令和飞行状态等信息，并进行多次校验如手动封装位长、帧头和 CRC 校验等。通过系统滴答定时器计数并定时开启各检测和执行功能，如按键检测负责检测遥控器上的按键操作，如 Thrust、Yaw、Roll、Pitch 和模式切换等，并将指令写入缓存，传输给主控芯片。

主控芯片是飞控系统的核心，负责整体任务管理和控制算法的运算。它接收传感器模块采集的数据，并结合控制器模块的指令进行飞行状态判断和控制决策。在主控芯片上运行 FreeRTOS 系统，用于实现多任务管理和调度，确保系统稳定性和实时性。

主控芯片通过 UART 将数据传输给上位机、使用相关驱动进行信息包的输出，将飞行器的状态信息和姿态控制指令发送给无线通讯模块，然后传输给上行端口。这样，飞行器的状态可以及时反馈给操控者，同时遥控器发送的指令也能及时传输到飞行器进行响应控制。

传感器数据的获取与传输，数据融合、校准与解算，PID 计算与负反馈控制都属于飞行控制中较为基本的内容，这里主要介绍在尝试主从机协同的过程中，部分模块和功能的选择与设计的尝试，以及 NRF51822、NRF24L01+的使用与处理。

## NRF51822 与 NRF24L01+

在主控芯片上，额外搭载 NRF51822 进行二次编程。NRF51 与控制器的通讯具有一定的复杂性，但其优势更为明显。作为一款功能较强的 SoC，NRF51822 集成了 32 位 ARM Cortex-M0 处理器、多种通信协议支持以及低功耗特性；同时，其较大的内存和存储容量也为复杂应用程序和算法提供了更多空间。相较之下，NRF24L01 虽然功耗较低，但在处理能力、通信协议支持以及存储容量方面有所限制，更适用于简单的无线数据传输需求。因此，NRF51822 在物联网设备、智能家居和传感器网络等应用场景下表现通常更出色，也就是说，使用这款 SoC 可以为项目之后的进一步展开提供更加良好的能力基础，拓展应用场景。

对照 NRF24L01 的各项功能的具体实现以及 Register Map Table，针对 NRF51822 的相应配置基本如下图所示：

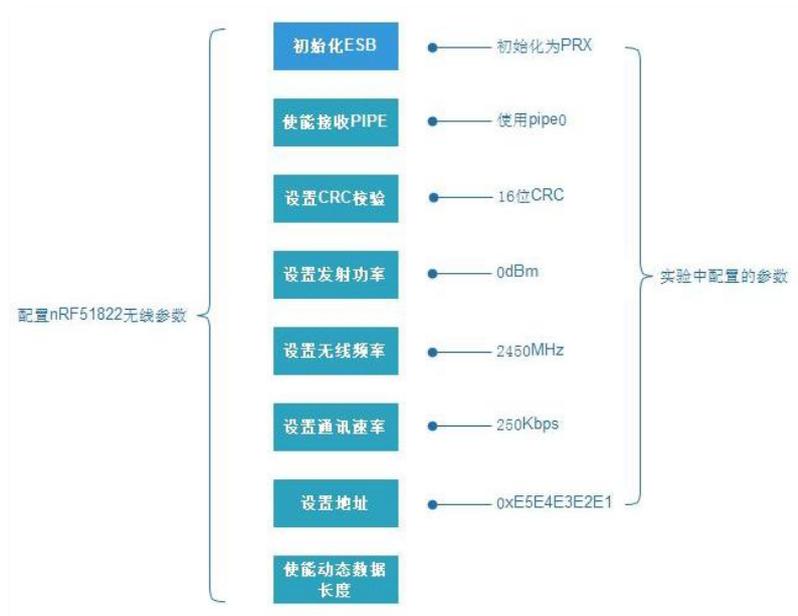


Figure 4 NRF51822 配置需求<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 图片引用自: cnblogs, @beautifulzzzz, Link: <https://www.cnblogs.com/zjutlitao/p/5760295.html>

其中需要注意的是，NRF51822 2.4G 通讯地址由两部分组成，配置地址时需要设置 BASEn 和 PREFIXn Register，同时要指定 BASEn Register 中地址长度。另，NRF51822 的地址每个字节内的位必须首位对调才能和 NRF24L 系列一致。

NRF51822 的 Enhanced ShockBurst（增强型突发模式）实现了数据低速从微控制器送入，但高速发射。数据在空中停留时间短，降低了碰撞几率，提供了抗干扰性能。

将项目测试的飞行器调整为更为稳定的其它开发者的飞控项目，给实现转接控制的挑战增加了许多难度，经过前期的代码研读，不断地使用硬件调试发送机与接收机使能第二通道进行注册、访问，学习并仿造数据包格式，手动调用寄存器及数据位来封包以通过校验位和检测，编辑程序进行实机对频和地址同步，最终成功实现了其他机型的双机通讯，能够较好地进行不同质量、不同密度、不同结构的无人机间运动控制同步匹配。

```
data_to_send[_cnt++]=BYTE1(AUX6);
data_to_send[_cnt++]=BYTE0(AUX6);

data_to_send[3] = _cnt-4;

u8 sum = 0;
for(u8 i=0;i<_cnt;i++)
    sum += data_to_send[i];

data_to_send[_cnt++]=sum;

int dataSize;
u8 cksum = 0;
u8 sendBuffer[36];

sendBuffer[0] = UP_BYTE1;
sendBuffer[1] = UP_BYTE2;
sendBuffer[2] = 0xAA; // not 0x40
sendBuffer[3] = 0x1A;

memcpy(&sendBuffer[4], data_to_send+2, 0x1A);
dataSize = 0x1A + 5;
```

Figure 5 封装转发包

### 第三部分 完成情况及性能参数

在无人机协同控制项目中，成功实现了基于STM32F4与NRFx系列芯片的四旋翼飞行器协同控制系统。

主机与控制器间能够实现无线远距离通讯，并以主机作为AP转发点将控制信号延申至从机，以拓展控制距离。系统通过信号与通信控制，基本实现主从机的运动控制同步匹配，并优化提高了飞行器运动控制的稳定性。

该项目完成也有一定的不足，比如因初期本身设计的飞控系统稳定性较差，引入了一定的开源飞控系统并进行改编，然而选取的协同控制对象自身具有较大的质量、密度、结构差异以及运动特性差别，导致参数调整困难重重，难以实现完美而精准的同步，具有较大的改进空间。

总体来说，该无人机协同控制项目基本实现了既定目标，能够完成通过主机原控制器对其它从机的协同控制，但仍有一定的不足，如果继续进行充足的理论研究和实验论证，则能够进一步优化实验条件并进行改进，具备了较好的潜在应用和再设计价值。

### 第四部分 总结

#### 4.1 可扩展之处

涉及到无人机协同控制项目，有许多可扩展的功能和应用场景可以探索。以下是一些可能的扩展功能和应用场景：

主从机编程巡航飞行：通过在主从机之间增加更复杂的通讯协议和算

法，可以实现编程巡航飞行。在主机和从机上分别配置不同的模组，就可以在轻量的情况下，动态配置巡视编队，目前计划在主机配备 Web Cam，通过判定派出跟随的从机搜索某片区并返回等待指令。

多飞行器协同工作编队飞行可以提高飞行效率，增强任务协同能力，可应用的任务如搜索救援任务、空中拍摄等，也可以扩展到农业领域，如多机植保系统，提高农业生产效率。

自主充电与续航优化：设计可在指定区域自主充电的无人机停机坪，并实现无人机自主返航充电，从而优化飞行器的续航能力，拓展飞行任务的范围。

人工智能与机器学习应用：将人工智能技术应用到飞控系统中，使无人机具备自主决策和学习能力，可以根据环境变化和任务需求调整飞行策略。已经完成的部分有，将主机无线广播对接至 PC 上位机，利用更高的算力实现调用 OpenCV 库进行物体识别。

网络互联：将多个无人机和地面控制站连接到一个网络中，实现实时数据共享和远程操作。这样的扩展可以用于大规模无人机协同工作，如灾害救援、物流配送等。

## 4.2 心得体会

在本项目中，我面对了不少挑战，将项目测试的飞行器调整为开源飞控项目，涉及到对大项目代码结构的整体研读和拆分、硬件调试、数据包格式学习和仿造等复杂步骤。在这个过程中，我学到了很多很多关于飞控系统和各类通

讯协议的知识，也锻炼了自己的解决问题的能力，尤其是开发必备的代码流跟踪和解析的能力。这个项目也让我收获许多经验，譬如更加注意烧录器的上电要求慎防烧板，出问题时注意硬件细节，使用 git 跟踪 diff 以更加便于调试等，

我的确花了很多时间进行硬件调试和发送机与接收机的通讯注册，以确保无线通讯的可靠性。每次更改都会及时调试确保稳定。封包和解析校对也耗费许久。在进行匹配时，虽然在主从机之间因质量、密度、结构和运动特性差异带来了一定困难，但我通过不断的参数调整和改进，最终实现了基本的运动控制同步匹配。

这个项目让我更深入了解了嵌入式系统和飞行控制技术。虽然项目还有一些不足之处，但或许这是一个很好的起点（：

## 第五部分 参考文献

- [1]张晓华. (2015). *系统建模与仿真* (2nd ed.). 清华大学出版社.
- [2]唐健杰,王鑫. 基于 PI-PD 控制器的四旋翼姿态控制[J]. *电子技术与软件工程*, 2014(16):175-176.
- [3]秦永元. (2006). *惯性导航*. 科学出版社.
- [4]CSDN Blog: NRF24L01 多对一、多通道通讯关键代码, Link: <https://blog.csdn.net/haha1fan/article/details/78843080>
- [5]cnblogs, @beautifulzzzz, Link: <https://www.cnblogs.com/zjutlitao/p/5760295>
- [6]胡寿松. (2019). *自动控制原理*. 科学出版社.

## 第六部分 附录

代码部分详见附件。