**1 总体设计**

本课题是针对无人机编队飞行所设计的多机通信系统，基于目前的无人机自组网技术、编队控制方式和网络通信技术，对本课题进行了总体框架设计、程序设计和通信设计。参考目前无人机编队研发技术，且本项目适用于无人机节点少、通信范围局域化和抗干扰能力强的场景，故自组网络选择星型拓扑网络；编队控制方式以领导跟随者策略为主，虚拟结构策略为辅进行多机控制；多机通信方式采用集中式控制方法，其系统框架如下图所示。



图1 系统框架

**1.1 无人机自组网**

无人机自组网以计算机网络结构为基础进行设计，分别有星型拓扑、总线拓扑、环形拓扑、树型拓扑和混合式拓扑网络等结构。星型结构一般以一个节点为中心，多个节点为分节点进行布置，具有网络结构简单、可扩展性强、通信延迟小等特点，由于该网络结构对关键节点性能要求较高，当关键节点出现问题时，其他从属节点会受到比较大的影响，进而损坏整个网络架构，因此这种网络结构并不适用节点设备过多的网络需求。相比而言，网型拓扑结构采用分布式结构通信，节点仅与附近节点通信，对节点要求低，灵活性和抗扰性都比较强，但是设计和实现较复杂。本课题主要用于少量无人机编队通信，采用一主机，多从机的通信控制模式，因此在自组网设计方面，以星型结构为主，在基于远端服务器上的地面基站进行模拟网型拓扑的通信控制方式，这样一来，即使关键节点出现问题，也让能够及时选择临近的节点作为主节点控制其他从属无人机。



图2 星型拓扑结构

**1.2 编队控制方式**

本课题的无人机编队控制方式是基于领导跟随者策略进行设计的。在本策略中，选择一个无人机作为领导节点，其他无人机作为跟随节，控制平台为地面基站，地面基站主要控制领导无人机的飞行姿态和位置，然后该领导无人机与跟随无人机形成单向树型拓扑结构，无人机在接收到地面基站的控制信息后，周期性地通过远端服务器向其他跟随节点传输广播信息，信息传输以洪泛法为原型，进行多跳传输，进而将信息散布至整个无人机网络编队，跟随无人机根据接收到的状态信息调整自己的位置。这样一来，整个编队的飞行路线便可以有领导节点单独决定，控制简便。



图3 领导跟随者策略

但是，单纯的领导跟随策略需要解决通信路径过长、节点时延不同和关键节点容错性等相关问题，因此，本课题在该策略上进行了改进，并引入了虚拟结构策略，可以实现从机之间的直接通信以及远程基站替换关键节点等功能，缩短了通信路径，增加了对无人机编队的可控性与稳定性，例如关键节点失效时，其他节点可以将信息发送至下一跳，也可在地面基站重新设置主从关系。同时加入阿里云服务器，实现节点之间的透明传输。



图4 优化方案

**1.3 多机通信策略**

无人机之间若想保持自身在整体编队中的相对位置不发生改变，就必须要和编队中其他无人机进行信息交互，在信息交互的控制策略方面，主要有集中式控制方法、分布式控制方法和分散式控制方法。本课题的多机通信策略采用集中式控制方法，每台无人机将自己的位置、速度、姿态和运动目标等信息发送至远程服务器实现自身状态的实时共享，初始布置队形时由领导无人机进行全局操控。在后期的队形调整中，每台无人机根据自己的位置和周围无人机的状态，通过服务器获取其他无人机相关信息或者将自己信息传输给需要自身信息的跟随无人机，然后再由领导节点或者地面基站统一操控，实现队形的保持和调整。虽然集中式控制方法对计算机计算量、数据通信量和无人机系统容错性要求较高，但是本课题是基于少量无人机编队控制所设计的多机通信系统，此项缺点在本题中并没有较大影响，可忽略不计。

**2 详细设计**

本课题是基于地面基站和无人机平台所开发设计的多机通信系统，主控模块采用STM32F103C8T6，本模块具有体积小、功耗低、外设多的特点，虽然体积很小，但是基本外设都具备，例如定时器、串口、CAN等关键模块，可以满足本课题的功能设计需求；通信模块采用NB-IOT数传模块EA01-D，该模块支持串口设备与远程服务器进行通信，支持B3、B4、B5频段，从而实现二者的双向数据透明传输，也就是说通过EA01-D模块，STM32F103C8T6可以通过USART与网络服务器（地面基站）进行透明数据传输；主控与飞控采用CAN通信，由于该芯片不适宜作为飞控芯片，因此本课题所设计的多机通信系统是独立于飞控的，主控通过CAN通信获取本机位置、速度、姿态等相关信息，由于本项目主要设计通信系统，因此CAN通信机制并没有进行设计；NB-IOT与地面基站通信以远程服务器为媒介，EA01-D模块支持TCP、UDP、MQTT、COAP、LwM2M等协议，这些协议在计算机网络体系的位置如下图所示，其中MQTT是基于TCP所开发设计协议，它的核心思想是简单并适应物联网环境，该协议具有可靠性强、通信速度快、低延迟、轻巧简单、支持双向通信和一对多消息分发的特点，因此非常适合本课题的应用场景，所以NB-IOT模块与远程服务器之间的通信协议采用MQTT协议；由于EA01-D模块可实现串口设备的透明传输，所以主控通过串口通信和AT指令，将自身信息发送到NB-IOT模块，然后NB-IOT再通过SD卡的上网功能将信息传输至远程服务器，服务器远程操控主控的通信原理同上。其系统框架图如下图所示。



图5 系统组成



图6 模块关系

**2.1 主控设计**



图7 主控流程图

主控设计程序流程图如上图所示。本课题主要有主控模块（STM32F103C8T6）、通信模块（USART、NB-IOT）、地面基站（远程服务器）和无人机主控。上电之后，多机通信系统首先进行相关外设的初始化操作，主要包括串口、CAN通信和EA01-D模块，其中串口模块用于主控和EA01-D模块的通信，CAN通信用于主控和飞控之间的通信。外设初始化完成之后，EA01-D需要通过MQTT协议与地面基站取得联系，若一直无法连接则重新上电，再次启动系统。连接成功则表示网络搭建成功，主机和从机，从机和从机，无人机和地面基站便可以互相通信，进而实现队伍编制和规定路线飞行。建立网络连接之后，地面基站将编队任务发送至主机，然后由主机指挥其他从机实现队伍编制，从机在接收到相关指令后，根据自身任务和周围从机取得联系，调整自身相对位置，多机之间协调行动。整个系统运行过程中，无论主机还是从机，都会间隔一段时间向地面基站发送心跳包，其目的在于可以通过地面基站实时监测无人机自组网中各个节点的相关信息，并且判断某些节点是否离线或者故障，当无法取得联系时，地面基站便根据网络形状选取损坏无人机周围节点设备进行替换，从而保证整体编队不会因为从属节点或者关键节点失联而混乱。另外，地面基站具有绝对领导权，可直接操控主机和从机状态，相应的，无人机之间的通信都是以远程服务器为媒介进行透明传输，实质上是将自身信息存放至地面基站实现信息共享，进而实现他们之间的相互通信。

**2.2 串口通信设计**



图8 串口通信流程图

主控模块采用串口1与EA01-D进行数据传输，波特率为115200bps，无奇偶校验位、数据长度为8位，1位停止位，具体数据帧如下图所示。无硬件数据流控制，模式为收发模式，接收采用中断接收，定时器中断周期内接收的数据为一个数据包，当定时器触发中断或者接收数据缓冲区已满时便将所接受数据打包进行分析处理并清空接收数据缓冲区，关闭定时器中断。当再次接收到第一帧数据时重新开启定时器中断进行数据接收，整个接受过程中使用USART\_RX\_STA表示数据接收状态。而串口发送采用相对简单的轮询发送方式，在while(1)中不断将数据发送至EA01-D模块，实现自身信息的实时更新。



图9 串口数据帧

**2.3 NB-IOT通信设计**



图10 NB-IOT通信流程图

本课题的NB-IOT通信由EA01-D模块实现，和服务器的通信协议采用基于TCP的MQTT协议。系统上之后，首先SD卡进行初始化，然后通过AT+MQTTMODE指令配置MOTT的工作模式为阿里云平台(mode=1)，之后再通过AT+PDUTYPE确认是否在数据帧类型是否为mqtt传输，接下来适用AT+MQTTCONN命令配置连接的三要素，连接至阿里云服务器，然后通过AT+MQTTSUBTOP和AT+MQTTPUBTOP指令配置订阅和发布的主题，考虑到传输时延和可靠性，服务质量qos选择级别1，最后ATD\*98进入传输模式进行业务交互。其中地面基站订阅无人机主题，当远程服务器端的无人机位置信息更新时便将数据传输至地面基站，主机订阅从机控制主题并发布控制主题，从机订阅控制主题，从而接收主机的指挥信号，并发布位置主题，将自身信息传输至地面基站，与此同时，通过该模块的保活功能，接入阿里云平台的串口设备按照保活周期发送心跳包，保证设备和服务器持续连接。这样一来，便实现了地面基站、主机和从机之间的数据透明传输和信息交互。

**2.4 多机交互设计**



图11 多机通信流程图

多机通信以远程服务器为媒介，采用MQTT协议来实现。MQTT具有以下三个优点：发布者与订阅者不比了解彼此，只要认识同一个消息代理即可；发布者和订阅者不需要交互，发布者无需等待订阅者确认而导致锁定；发布者和订阅者不需要同时在线，可以自由选择时间来消费消息。因此，主机、地面基站和从机的通信并不需要在每两者之间提前建立通信链路，而是通过订阅发布主题的方式来实现消息的传输。订阅主题，即当所订阅的数据在服务器中发生改变后，自动将信息发送至订阅设备；发布主题即将自身要广播或者传输的信息进行打包，以主题方式发送至远程服务器，进而更新服务器端的主题信息，此时，订阅该主题的串口设备便会接收到服务器发送的实时主题信息，再结合本项目，通信数据帧头加入无人机ID、订阅/发布主题名称，这样一来，便实现了星型无人机自组网的一对一、一对多的通信功能。