

基于 APM 的高级飞控系统设计

龚玉锋¹, 赵文杰², 何通能¹

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310023; 2. 浙江大学 航空航天学院, 杭州 310027)

摘要: 文章设计了一种基于开源飞控 APM 的高级飞控系统, 包含硬件电路模块和软件算法模块, 主控芯片 STM32H7 可高速运行至 400 MHz, 通过 MAVLink 协议控制 APM 无人机, 设计了以高级飞控系统控制无人机的一键起飞控制流程、遥控量的控制功能、上传飞行任务到 APM 飞控功能; 移植 UCOSIII 操作系统, 并结合 MAVLink 协议设计了编队组网架构, 精简协议数据流, 使之适应组网通信; 在高级飞控系统测试了智能粒子群算法的无人机集群搜索与航迹规划, 模拟 9 架无人机在 $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ 区域搜索 3 个目标, 仿真结果表明该算法 200 ms 的迭代更新速度满足实际要求; 高级飞控系统的控制功能同样适用于 MAVLink 协议的其他飞控, 如 PX4 飞控。

关键词: APM; MAVLink; 一键起飞; 无人机组网; 无人机仿真

Design of Advanced Flight Control System Based on APM

Gong Yufeng¹, Zhao Wenjie², He Tongneng¹

(1. School of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. School of Aeronautics and Astronautics, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This paper designs an advanced flight control system based on open source flight control APM, including hardware circuit modules and software algorithm modules. The main control chip STM32H7 can run at high speed to 400 MHz. The APM drone is controlled through the MAVLink protocol, and advanced flight control is designed. The system controls the one-button takeoff control flow of the UAV, the remote control volume control function, and uploads the flight task to the APM flight control function. The UCOSIII operating system was transplanted, and the formation network architecture was designed in conjunction with the MAVLink protocol to simplify the protocol data flow and make it suitable for network communication. In the advanced flight control system, the intelligent particle swarm algorithm's UAV cluster search and trajectory planning were tested, and 9 UAVs were simulated to search 3 targets in the $1 \times 10^5 \text{ m}^2$ area. The simulation results show that the algorithm's 200 ms iterative update speed meets the actual claim. The control functions of the advanced flight control system are also applicable to other flight controls of the MAVLink protocol such as PX4 flight control.

Keywords: APM; MAVLink; one-click take-off; UAV network; UAV simulation

0 引言

无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 是现代科技中集成了多方面高科技技术的一种无人驾驶飞行器的名称, 并且由于现代微电子技术的发展, 无人机的成本可控制到较低, 可以集群部署用于大规模任务。无人机的基本硬件组成包括传感器系统、处理器以及控制机构。无人机系统 (UAS, unmanned aerial system) 包括无人机以及相关配套设施, 由地面站模块、数据通信模块、命令指挥控制以及维护人员等部分组成, 采用算法和软件流程达到高度智能

化闭环反馈控制^[1]。APM (Ardupilot) 飞控是现有开源飞控中最为成熟稳定的开源飞控系统, 且和 PX4 飞控使用同一套底层 PIXHawk 硬件, 国际也有使用 PIXHawk 研究控制算法的研究者^[2], APM 拥有广大使用者和成熟的开发社区, 适用于多种无人驾驶系统, 如固定翼、无人车、无人潜航器等^[2], 其功能比较完善, APM 飞控基本具备现代无人机飞控技术的大多数控制功能, 飞控如果从头开发周期会非常漫长, 因为无人控制系统非常复杂, 因此在开源飞控上进行二次开发是一种优秀的选择, 但开源飞控软硬件偏于无人机爱好者和研究者^[3], 且操作复杂、人工参与量大, 需要有效发挥无人机的优势, 无法满足无人机在日益增长的多方面民用、工业、商业需求, 需要进一步提升飞控系统自动化、智能化、平台化、系统化。开源飞控的源代码已经非常完善, 对于修改其源代码复杂度很高且具有危险性, APM 飞控的代码 1.7 M 已经接近满负荷存储 2 M, 且其 RAM 空间必须预留 30%, 额外的修改代码会影响源飞控的代码执行效率, 将系统分层是一种工程上非常重要的做法, 通过使用 MAVLink 协议完成不同层次模块的通信, 且开发出的系统适用于同协议的其他飞控。

收稿日期: 2020-03-29; 修回日期: 2020-04-14。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61703366); 浙江省重点研发计划项目 (2020C05001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2019FZA4024, 2017QN81006)。

作者简介: 龚玉锋 (1994-), 男, 陕西汉中, 硕士, 主要从事嵌入式、控制工程、无人机方向的研究。

赵文杰 (1985-), 男, 浙江杭州, 博士后, 副研究员, 硕导, 主要从事无人机飞行控制、多机协同控制方向的研究。

何通能 (1962-), 男, 浙江义乌, 大学本科, 副教授, 硕导, 主要从事智能仪表与装置、模式识别和智能控制方向的研究。

1 基于高级飞控系统硬件系统设计

1.1 高级飞控系统硬件系统设计

本文所设计的高级飞控系统是一种独立的硬件模块，通过通信接口与其他模块进行通信。将设计的高级飞控系统搭载在无人机上，通过高级飞控系统上的通信接口完成对无人机的通信和无线数传的通信。本文采用的底层硬件为 PIXHawk2.4.8. 版本^[4]，经过运行相应的算法程序测试，证明了硬件设计方案的可行性，且运行带操作系统的程序经历长时间运行不会出现死机等情况，这套硬件系统在飞控领域具备相当的稳定性与可靠性^[5]。高级飞控系统与 APM 飞控、无线数传连接方案如图 1 所示。

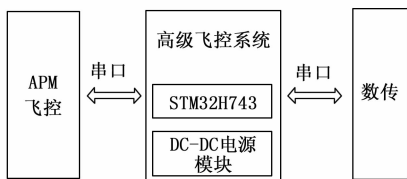


图 1 系统连接方案整体架构图

APM 飞控的底层硬件 PIXHawk 是基于 Cortex-M4 内核，工作频率为 168 MHz，本文设计的核心处理器选择了与之匹配的同系列 STM32H743 芯片，STM32 处理器在飞控领域拥有大量的使用者^[6]，改核心频率高达 400 MHz，可以高效处理飞控相关的复杂运算，依赖于 STM32H7 的硬件 FPU 浮点运算，以及 DSP 算法库，主流的算法函数都能以专有的加速模式运行，对于飞控领域的常用函数具有非常好的软硬件优化效果。控制系统在嵌入式平台高速完成各种程序和函数运算，再与 APM 通信时采用串口直连的方式通信，小型四旋翼的安装位置有限，高级飞控系统内部无惯导传感器可以捆绑固定在电池下方，在六轴及大四轴可以很方便地固定在底层飞控 APM 的旁边，无人机中间底盘有许多螺丝孔可以扩展安装位置，安装方式如图 2 所示。

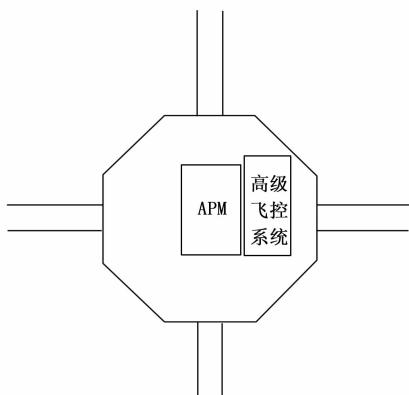


图 2 高级飞控系统安装示意图

由于无人机内部空间限制，需要将 PCB 设计尽量地紧凑，还需考虑航空环境比一般的普通环境要恶劣，电路板最终需要装在带屏蔽的金属盒内，做密封防水处理以保护

内部模块，以及提供良好的电磁屏蔽，采用航空航天级别 J30J 接插件引出通信接口以及电源线。

1.2 电源供电系统设计

稳定的硬件系统设计依赖于稳定的电源系统，选择 URB2405YMD-6WR3 型号 DC-DC 隔离电源模块作为外部宽电源 9~36 V 输入电压转换器，输出为 6 W，将隔离电源的 DC-DC 模块输出分为两路供电，一路给主处理器供电，一路给外围的芯片和接口供电，提高系统的电源安全性，主电源相关电路电源运行需要设计指示灯，放电源反接 MOS 管，压敏电阻 14D560 K 保护，以及防浪涌 TVS 保护二极管，以及电阻、电容、电感构成滤波与稳压电路，电源供电设计如图 3 所示。

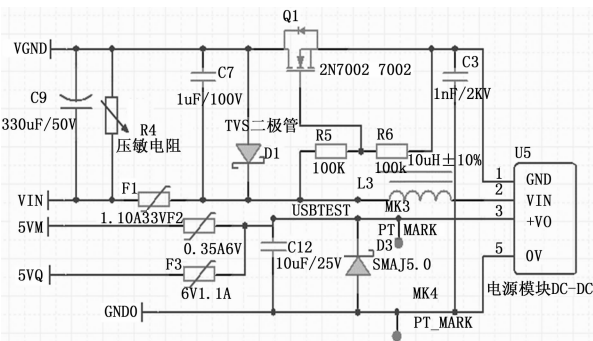


图 3 高级飞控系统电源模块设计图

2 高级飞控系统通信协议与操作系统

APM 飞控的程序为上层开发开放了基于 MAVLink 协议的控制 API，可以通过协议消息实现控制无人机，本文的 APM 软件版本为 ArduCopter V3.3，飞控硬件版本为 Pixhawk2.4.8，同时控制无人机需要在高级飞控系统中使用合适的嵌入式操作系统。

2.1 无人机 MAVLink 通信协议

在通信协议方面需要一种简单高效的协议，因为无人机的通信通常距离较远时通信数据量减少，而 MAVLink 提供了一种非常轻量级的消息传递协议，用于与无人机（以及机载无人机组件之间）进行通信。MAVLink 非常高效，由于它不需要任何其他框架，因此非常适合通信带宽非常有限的应用。除了常规的控制命令和消息，可以使用高级飞控系统控制复杂任务，如任务计划、航迹规划、特殊姿态控制等，该协议的完备性和科学性使得它协议在自驾仪领域获得了广泛的采用，APM 和 PX4 等飞控都使用此协议，本文的通信主要使用固有协议和自定义的扩展消息协议^[7]。

2.2 飞控 UCOS III 操作系统

APM 飞控由于出现较早，没有使用操作系统，现在已经出现很多开发不便的弊端，高级飞控系统的算法软件比较复杂，使用裸机开发已经不适合，需要选择一种合适的嵌入式实时操作系统，UCOS III 非常适合需要安全认证的航空航天系统。它由 Jean Labrosse 1998 年更新到 UCOS-II，并于 2000 年得到美国航天管理局 (FAA) 认证，可以用于

飞行器中,使用操作系统的开发方式可以方便的完成裸机所不具备的系统调度、优先级分配、多线程编程等方式,无人机控制需要高的实时性且多线程任务同时进行,本文选择 UCOSIII 为无人机的算法和程序提供基础的操作系统,本文在高级飞控系统的 MCU 上移植了 UCOSIII,并与 MAVLink 协议一起运行,可以实现协议的高速收发解析,保障通信功能的稳定高效。

3 高级飞控系统基本功能控制方式

采用科学的系统分层,使每一层的功能更加明确。两个模块各自处理自身数据,飞控模块专注于无人机的控制,高实时性和稳定性,高级飞控模块则专注于高级控制算法、通信组网、路径规划算法等功能。这种无人机控制方式充分发挥了开源飞控的强大功能和高级飞控的自定义高级功能特性使之能够适应各种需求场景。

3.1 一键起飞 APM 无人机算法设计

APM 等开源飞控的控制系统比较成熟,其操作步骤也比较严谨和复杂,无人机的一键起飞包含多步骤检查和判断,是无人机自动化起飞基本操作,本文设计控制 APM 飞控的一键起飞的流程,通过算法编程使无人机系统能够自动完成无人机的起飞的过程,可以有效减少操作者检查无人机、切换模式、解锁飞机、发送起飞命令的一些列操作流程,以一套自动化流程程序替代^[8],高级飞控系统一键起飞流程控制如图 4 所示。

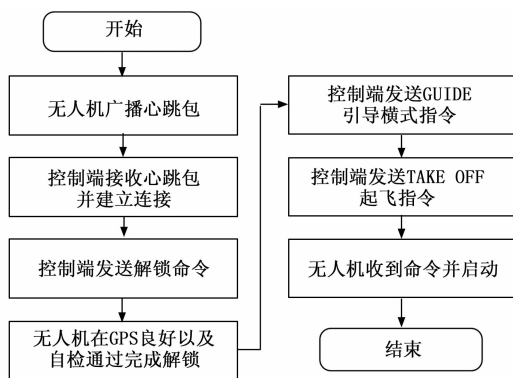


图 4 一键起飞控制流程图

3.1.1 解锁无人机

APM 无人机在 GPS 信号良好的情况下才能解锁,例如在室内信号不好的情况时无法解锁,无人机 GPS 信号良好的情况下,正面的主指示灯会由蓝色变色绿色,绿色灯闪烁代表 GPS 信号良好,当无人机解锁时,绿灯会变为常亮,解锁指令属于 CMD 命令指令,将 `mavlink_command_long_t` 的 `command` 参数填充为 400 (解锁/上锁),将 `param1` 参数设定为 0 解锁,1 为上锁,配置好解锁指令参数时,通过 MAVLink 协议参数指令消发出。

3.1.2 请求无人机数据流

通常需要发送请求数据流来接收无人机的全部数据流,否则某些设定的无人机只会广播心跳包,心跳包包含了无

人机基本模式、用户模式、无人机系统类型、无人机种类、系统状态、MAVLink 软件版本,全部数据流包含无人机的空速、高度、GPS 位置、传感器数据等。请求数据流的消息为协议 66 号 `mavlink_request_data_stream_t`,通过填充相应的参数即可完成数据流请求,设置参数 `start_stop` 为 1 即可开始请求数据。请求数据流为 66 号 MSG 消息包。

3.1.3 设定无人机飞行模式

APM 具有多种飞行模式有很多,常用模式有自稳模式、自动模式、引导模式、定高模式、留待模式、返航模式、定点模式、特技模式等,在不同应用场景下可发送对应指令进行切换,一键起飞功能需要将模式设置为 GUIDE 引导模式,发送 `mavlink_set_mode_t` 消息包将对应的模式参数 `custom_mode` 设置为 4 (GUIDE 引导模式)。

3.1.4 一键起飞

一键起飞命令需要无人机完成以上步骤之后,发送 MAVLink 的 CMD 命令 TAKEOFF 完成起飞动作,建议测试时将起飞参数高度设置为 10 m,其他默认即可,测试高级飞控系统程序按照软件流程发送一键起飞的算法命令,成功解锁并切换模式,然后无人机螺旋桨开始旋转。采用以上命令算法流程写入高级飞控系统后,在 GPS 良好的场地上,经测试完成一键起飞功能。

3.2 高级飞控系统的遥控器功能

无人机的遥控器需要手动操控,主要操作量为油门、偏航、俯仰和横滚,这些操作量的控制以人的判断为根据,结合现在技术进展飞快的机器视觉和激光雷达等技术,可以设计相关算法来代替人的判断,而执行这些操作,则需要使用到 MAVLink 协议的控制无人机姿态的方法。

本文设计的控制流程可以通过算法程序在高级飞控系统以及地面站实现遥控器的手柄摇杆量的操作功能,通过 MAVLink 的 #70 号消息可以实现模拟遥控器控制,本文所测试的 APM 版本遥控器可控制通道为 `chan1~chan8` 共 8 个通道,四旋翼需要用到 4 个 `chan` 通道,每个通道的控制数值范围为 1 000~2 000,此流程需要解锁无人机解锁命令、修改模式为自稳、发送遥控指令,实现对无人机模拟遥控器的直接解锁与启动,软件程序对 APM 本文测试将 PWM 通道的电机 `chan` 值设定为 1 600,无人机正确解锁并启动,遥控功能控制流程如图 5 所示。

3.3 高级飞控系统控制 APM 的任务功能

APM 飞控模式中有自动模式,自动模式下可以执行 APM 飞控所存储的任务,任务可以是航点或者其他命令,CMD 命令类型选择如 TAKE_OFF 起飞、CMD_NAV_WAYPOINT 导航至航点、LAND 返航、LOITER 悬停、RTL 返航等操作,都可以使用任务规划的航点命令来执行,将上面的操作写成一系列任务,当 APM 无人机切换到自动模式时将开始执行 APM 所存储的任务。

任务计划可以实时控制无人机,也可以提前规划写入控制量,使用 #39 号消息 `mission_item` 和任务协议将一系

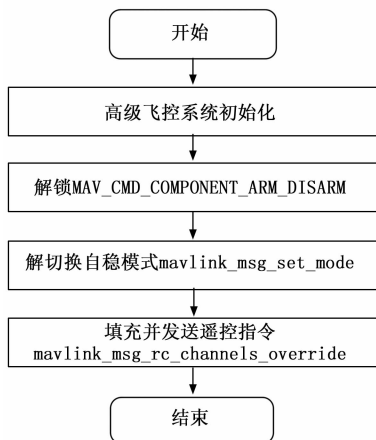


图 5 遥控功能控制流程图

列的任务写入 APM 飞控，由无人机自动执行写入的飞行计划，航点的任务参数说明如表 1 所示。

表 1 航点任务的参数说明

参数	设定值	说明
target_system	01	默认系统编号
target_component	01	默认组件编号
seq	0	任务序号
frame	0	坐标系
command	16	CMD 选择为航点
current	1	设为当前任务
autocontinue	1	自动执行下个航点
hold	0	保持时间
accept radius	3	航点半径
passradius	0	经过航点方式
yaw	0	偏航角
x	30	经度
y	120	纬度
z	100	高度

由多个航点任务所组成的典型任务结构可为第一个点 TAKEOFF 起飞，第二航点为目的航点 WAYPOINT，第三个航点为 RETURN_TO_LANUCH 返回出发点，通过高级飞控系统 APM 无人机模式切换为 AUTO 自动模式，将航点任务参数填充至 MISSION_ITEM，写入航点的任务协议流程图 6 所示。

4 高级飞控系统自定义功能设计

高级飞控系统的一个重要功能便是将控制分层，在高级飞控系统层上构建组网功能^[9]。在使用高级飞控系统控制多架无人机时无须一对一进行复杂繁琐的连接通信，而由一架主机执行算法程序以控制其他高级飞控系统完成对底层 APM 无人机的控制，提高了控制效率和系统的智能化，以及可以利用这套无人机组网协议构建智能控制集群算法^[10]、运行航迹规划等功能。

4.1 高级飞控系统组网架构

开源飞控无人机只具备地面站和无人机，或者遥控器

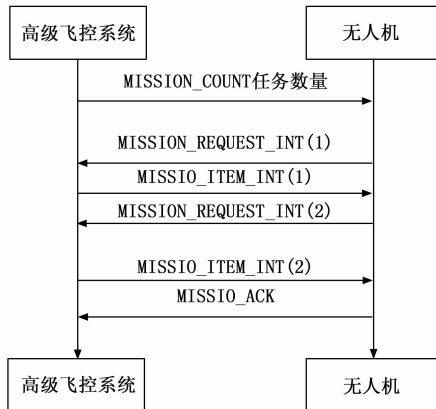


图 6 航点上传协议

和无人机之间的一对一通信，具备了组网条件下可以使用多无人机路径规划、任务分配等智能算法来集群规划无人机。本文所设计的高级飞控系统硬件接口连接无线电模块（测试采用了 LORA 无线通信模块），将所有通信模块调节到一个信道，采用主机轮询算法程序控制互相通信，将无人机间的通信链路打通，实现无人机间的互相通信。本文的组网功能是基于 MAVLink-V1.0 协议地址序号标识进行组网，组网无人机数量不超过 256，默认 APM 的系统（SYSID）地址为 01，在所有 MAVLink 指令都会携带目标地址（TARGETID），这样就构成基于地址身份识别的功能。高级飞控系统上通过算法程序可实现编队，无人机数量统计，任务分配等组网功能，地面站作为监控设备或者命名下达设备，配置 01 地址的高级飞控系统为主机，组网架构如图 7 所示。

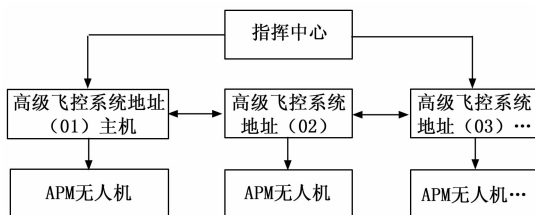


图 7 无人机组网架构

4.2 高级飞控系统通信协议配置与精简

自定义通信组网扩展消息仍然使用 MAVLink 协议，该协议具有自定义消息的功能，通过自定义扩展消息包，可完成大量参数的通信和设置。以源码库的 common.xml 为模板生成，从预留的自定义配置 150 开始的 id 消息来生成，名称（name）和 id 不能重复，按照标准格式参数填充，即可配置为自定义 MAVLink 消息包。

在组网系统中信息量会大增，更加精简的消息流，可以更快速地完成网络信息通信和降低通信负载。本文实际测试了 APM 无人机输出数据流的有效消息包，经过对数据流的分析验证，将消息包进行裁剪，裁剪过后的 MAVLink 消息包，消息核心数据保留 #0 心跳包、#1 系统状态、#2 系统时间、#24 定位 GPS 数据、#33 姿态数据、#36 伺

电机控制值输出、#62 无人机导航控制消息、#74 无人机空速计等速度参数、#141 无人机海拔和高度信息, 如果无人机添加了如光流等组件可以将对应的消息包再添加至数据结构体即可。

4.3 高级飞控系统的运算能力半实物仿真

无人机通信组网下的自动航迹规划与任务分配是无人机发展和研究的重点, 在控制无人机群的集群控制算法中, 常用有蚁群算法、鱼群算法、鸟群算法(粒子群算法)等^[11], 粒子群算法对于无人机群的目标搜索与路径规划有很好的效果。典型的无人机飞行航线与目标分配都需要人为手动操作, 将智能无人机算法在本文所设计的高级飞控系统上测试仿真, 使用智能算法的无人机规划将使得无人机任务性能得到提升。本文实验所采用的粒子群算法在嵌入式 C 语言平台设计, 运行在高级飞控系统中, 对无人机特性进行数学建模模拟, 无人机路径规划与任务分配仿真群算法参数如表 2 所示。

表 2 无人机粒子群算法参数设置

参数	设定值
搜索区域面积	100 000 m×100 000 m
无人机数量	9
目标数量	3
目标运动速度	150 m/s
无人机最大运动速度	200 m/s
无人机最小运动速度	150 m/s
无人机探测半径	8 000 m
最大通信半径	100 000 m
惯性权重 ω	0.5
认知系数 c_1	2
社会系数 c_2	2
每个粒子群粒子个数	50
跟踪因子 ω_1	1
探索因子 ω_2	2

运行占用 RAM 空间为 500 KB 字节的粒子群无人机搜索、路径规划、任务分配算法仿真时, 程序不断将无人机自身的位置坐标、目标坐标、状态信息等消息发送, 程序更新无人机位置与期望参数的迭代计算周期为 200 ms, 这个迭代更新速度满足无人机的实际更新速率要求 1 s 以内。高级飞控系统的运算输出作为无人机路线飞行航迹图, 将 STM32H7 处理器的无人机仿真算法位置通过串口传输给 PC 端, 模拟 9 架无人机的搜索路线, X 轴与 Y 轴代表空间的二维图, 航迹显示很好的规避免无人机搜索空间时路径重叠问题和搜索时自动规划无人机路线, PC 端可视化显示无人机航迹路线如图 8 所示。

5 结束语

本文所设计的高级飞控系统为开源飞控和高级自定义功能设计了可行方案, 采用本文所设计的控制方法可以对无人机进行高度的智能化和自动化控制, 测试了使用 MA-

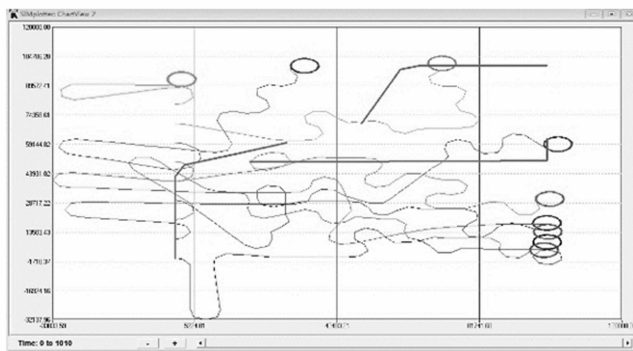


图 8 仿真多架无人机搜索航迹路径图

VLink 协议控制飞控的多种基础功能, 高级飞控稍作针对性优化就可以应用与其他同协议飞控如 PX4, 高级飞控系统可以作为编队组网算法、目标搜索算法、路径规划算法、任务分配法等高级控制功能的实现平台, 本文对这些二次开发功能进行了实际的测试与半实物仿真, 结果显示计算能力优异和运行稳定, 基于 MAVLink 协议可以将算法给出的控制量传递给无人机飞控实现对无人机的飞行任务操控, 这种控制方式和控制流程对于无人机二次开发具有相当架构和方法参考价值 and 实际应用价值。

参考文献:

- [1] 符长青, 曹兵, 李睿堃, 等. 无人机系统设计 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [2] Adrian B, Inna S, Meyer N. Attitude estimation for collision recovery of a quadcopter unmanned aerial vehicle [J]. The International Journal of Robotics Research, 2019, 38 (10/11): 1286-1306.
- [3] 方洵, 黄辉. 基于 APM 的微型无人船航向控制系统设计 [J]. 科技创新与应用, 2018 (30): 27-31.
- [4] 李松炜, 陈天福, 李丽, 等. 基于 APM 飞控技术系留式共轴双旋翼无人机系统设计 [J]. 电子世界, 2019 (11): 166-167.
- [5] 杨小川, 刘刚, 王运涛, 等. Pixhawk 开源飞控项目概述及其航空应用展望 [J]. 飞航导弹, 2018 (4): 25-32, 76.
- [6] 严婷婷, 张晖. 基于 STM32 的四旋翼飞行器飞控系统的设计 [J]. 机电信息, 2019 (32): 148-149.
- [7] Sathyan A, Ernest N D, Cohen K. An efficient genetic fuzzy approach to UAV swarm routing [J]. Unmanned Systems, 2016, 4 (2): 117-127.
- [8] 费浩彬, 鞠训光, 张微微, 等. 基于 MAVLink 实现无人机一键起飞 [J]. 计算机科学与应用, 2019, 9 (6): 1037-1044.
- [9] 唐建华. 无人机组网侦察关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [10] Sathyan A, Ernest N D, Cohen K. An efficient genetic fuzzy approach to UAV swarm routing [J]. Unmanned Systems, 2016, 4 (2): 117-127.
- [11] 熊华捷, 蔚保国, 何成龙. 基于改进粒子群算法的 UAV 航迹规划方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (2): 144-147.