

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210474

## 基于软件无线电的无人机入侵检测方法研究\*

姚 钊<sup>1</sup> 刘 琼<sup>1</sup> 谭智诚<sup>1,2</sup>

(1. 桂林航天工业学院广西高校无人机遥测重点实验室 桂林 541004; 2. 厦门大学信息科学与技术学院 厦门 361005)

**摘要:** 无人机的普及带来了诸多隐私安全问题,而要解决该问题就需对无人机信号进行动态有效检测,从而实现有效管制。本文提出了一种基于软件无线电的无人机入侵检测方法并进行了硬件实现。该方法利用自适应去噪及三次聚类方法实现了无人机信号的识别与分类。仿真结果表明,该方法在信噪比 $-16.2$  dB以上时检测概率达到100%。同时本文依托以AD9361+FPGA+STM32为核心的软件无线电平台进行了方法的工程化实现,实测结果表明方法实用有效,在室内复杂环境及室外环境下均能有效地识别出无人机信号及类型,具有很强的应用前景。

**关键词:** 软件无线电;无人机;入侵检测

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Research of UAV intrusion detection method based on software defined radio

Yao Xing<sup>1</sup> Liu Qiong<sup>1</sup> Tan Zhicheng<sup>1,2</sup>(1. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Unmanned Aerial Vehicle(UAV)Telemetry, Guilin University of Aerospace Technology, Guilin 541004, China;  
2. School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Since the popularity of UAVs has brought about many privacy and security problems, the solution should comply with dynamic and effective detection of UAV signals, so as to achieve effective control. This paper proposes a software radio intrusion detection method for UAV with hardware implementation. It uses adaptive denoising and cubic clustering to recognize and classify UAV signals. Simulation results show that the detection probability can reach 100% when the SNR is above  $-16.2$  dB. Based on the software radio platform AD9361+FPGA+STM32 as the core, it carries out the relevant engineering implementation. The measured results show that it is practical and effective, which can effectively identify UAV signals and types in both indoor and outdoor complex environments with strong application prospect.

**Keywords:** software defined radio; UAV; intrusion detection

## 0 引言

近年来,民用小型无人机发展迅速,遍布各行各业。但由于相关监管手段的缺乏,民用小型无人机安全问题日益突出,特别是个人组装无人机,黑飞现象尤为严重,近期频繁发生的非法入侵机场、无人机偷拍等事件,已严重危害社会公共及个人隐私安全<sup>[1]</sup>。在此背景下,针对无人机黑飞现象的相应反制措施显得尤为重要,而无论何种反制措施,其首要任务都是对无人机目标的检测。现有小型无人机的检测手段主要有声(声波)、光(视觉)、电(电磁波)三类,其

中电磁波手段因其全天候、检测距离远、实时性好等特点而被广泛研究<sup>[2]</sup>,并以此产生了多种无人机检测方法。

例如,文献[3]提出了基于谱图的无人机信号提取及参数估计方法<sup>[3]</sup>,但在低信噪比情况下其检测效果较差,且未进行硬件实现;文献[4]提出多组延时自相关方法,该方法受信噪比影响较大,实现依托硬件分为射频接收机和信号处理机<sup>[4]</sup>,成本高且体积大;文献[5]提出多特征匹配方法对无人机信号进行侦测与识别,低信噪比环境检测效果较好<sup>[5]</sup>,但其去噪环节中为固定门限,对复杂环境适应性有所影响,且其硬件实现成本较高。文献[6]使用软件无线电平

收稿日期:2022-06-25

\* 基金项目:广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2020KY21020)、桂林市重点研发计划(20210206-3)、广西重点研发计划(桂科AB21196066)、国家自然科学基金(61966010)项目资助

台进行信号采集,硬件体积小,成本较低,但其后续处理为结合开源软件无线电(GNU radio)以及人工进行判别<sup>[6]</sup>,未进行硬件实现,无法进行实时检测;文献[7-8]使用软件无线电平台进行了检测实现,但其仅对无人机信号有无进行判别<sup>[7-8]</sup>,未对无人机的具体型号进行分类。

随着人工智能在多领域的大量应用,文献[9-14]提出使用卷积神经网络、K近邻等多种机器学习方法对信号进行识别分类<sup>[9-14]</sup>,但这类方法需要大量样本训练,实现较为复杂,在低信噪比环境下检测效果较差,且对硬件要求较高。

针对现有研究方法中存在的低信噪比环境适应性差、检测方法复杂、不够灵活、实现成本较高等问题,本文提出了一种基于软件无线电的无人机入侵检测方法,同时依托以FPGA+STM32+AD9361为核心的小体积、低成本软件无线电平台对该方法进行具体硬件实现。

## 1 软件无线电平台介绍

传统无人机入侵监测系统将射频部分与基带部分分开设计处理,这大大增加系统的成本,降低灵活性及扩展性,同时随着现代电磁环境越发复杂多变,这类方式显得越来越不合时宜。随着数字集成电路的发展,已有不少专家学者对软件无线电相关架构进行了研究,同时市面上已出现部分软件无线电架构的无人机入侵监测系统,其中以AD9361+Zynq系列FPGA为核心的架构<sup>[15-16]</sup>为主流,但Zynq系列低端产品逻辑资源量较少,不利于后续相关算法的实现,而其高端产品价格较高,大大增加了产品研发成本。

基于这些因素考虑,在与主流架构价格相当的情况下,以减小系统尺寸为宗旨,本系统采用AD9361与Altera EP4CE115 FPGA为处理核心,同时以STM32F407替代Zynq系列FPGA中PS资源,组成了如图1所示的系统硬件,该硬件结构尺寸为87.2 mm×137.5 mm,价格1万以内。其中STM32F407主要负责AD9361的参数配置以及无人机识别库的存储读取,Altera EP4CE115主要负责无人机信号的处理及分类识别。

## 2 检测与识别流程

依托软件无线电平台硬件架构,检测与识别流程主要完成AD9361的配置、无人机识别库参数的存储读取、信号识别与分类等功能,由此实现无人机入侵动态监测,并及时通过上位机上报入侵结果。为实现上述内容,系统将软件分为AD9361配置模块、识别库动态维护模块、信号处理及分类模块、监测结果上报模块,形成的检测过程软件架构图如图2所示。

具体检测识别工作流程如图3所示。

1) 执行系统初始化,主要是系统中各硬件芯片的启动以及各类接口的初始化等工作;

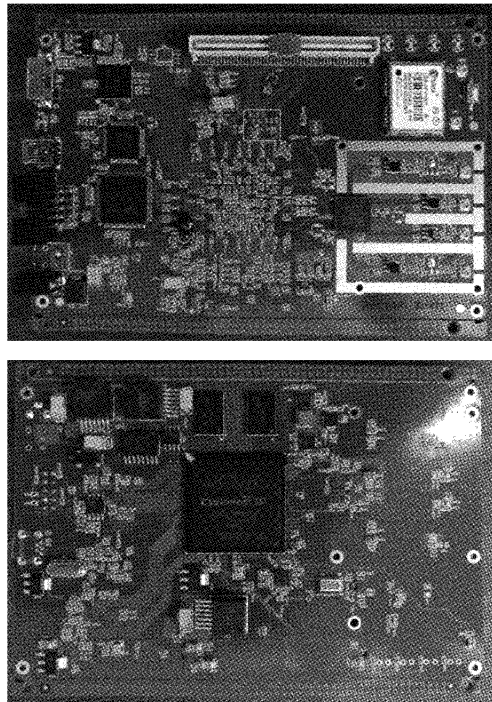


图1 平台硬件实物图

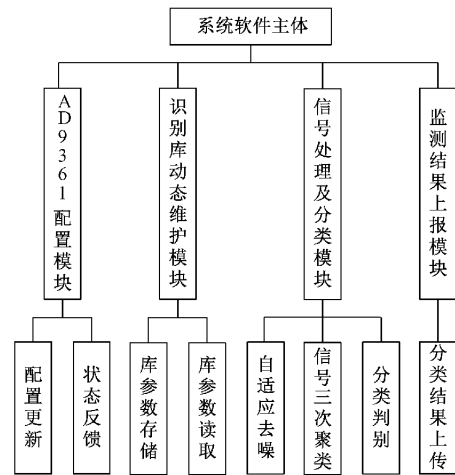


图2 系统软件架构图

2) 进行AD9361配置,设置AD9361相关工作寄存器,等待其配置完成,若失败则继续配置;

3) 进行识别库参数读取,此步骤主要读取存储器中的无人机识别库中的参数,为后续分类判别提供参数,此步骤只上电执行一次,若中途进行识别库参数存储,则需下次上电后进行参数读取;

4) 进行识别库参数存储,该步骤与后续各流程并行,其执行与否不会影响后续流程,属于另一流程分支,如图4所示,该流程在收到上位机参数存储指令后,则将存储器中的识别库参数进行更新;

5) 进行自适应去噪、信号三次聚类、分类判别,主要对采集到的信号依据脉宽、脉间间隔、带宽等参数进行归类,

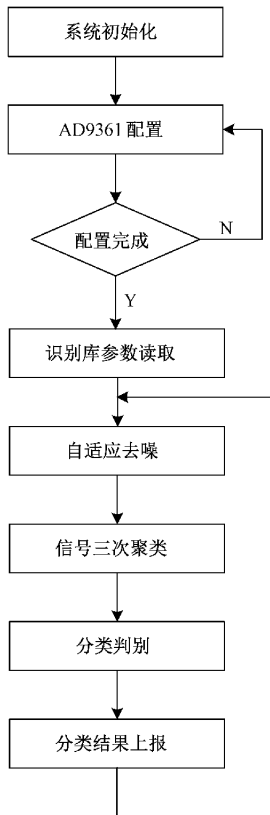


图 3 系统检测工作流程

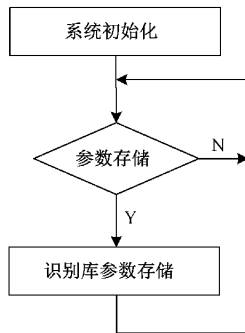


图 4 系统参数更新维护工作流程

并将各类的上述参数输出至后续模块;

6) 进行无人机分类结果上报, 根据前述步骤获得的识别库参数识别无人机类型, 将类型结果发送至上位机, 同时设置无人机信号出现后的容许匿隐时间, 若超时后仍未出现该类型无人机信号, 则认为该类型无人机已不存在, 并将该判别结果通知上位机做出相应显示。

下面主要对信号处理及分类模块所涉及的 5 项流程进行具体介绍。

### 2.1 自适应去噪

自适应去噪流程主要包括时频处理和动态去噪两个部分。由于无人机信号为跳频信号, 因而首先需对其进行时频分析, 考虑后续便于 FPGA 逻辑实现, 时频处理中设计每 256 点进行一次分段, 同时设置 50% 的交叠量, 如

第 1 段为 0~255 点。随后对每段进行傅里叶变换(如式(1)所示, 其中  $m$  为段号, 自 1) 开始, 将变换结果送至动态去噪过程。

$$y(k) = \sum_{n=(m-1) \times 128}^{(m-1) \times 128 + 255} x(n) e^{-j \frac{2\pi}{256} nk}, k = 0, 1, \dots, 255 \quad (1)$$

动态去噪的关键在于门限值  $noise\_th$ , 为减少后续硬件实现的资源消耗, 本文不对功率进行对数处理, 通过未经对数化的信号功率的统计直方图<sup>[17 18]</sup>来实现自适应去噪功能, 根据各段信号情况动态更新门限值, 具体实施步骤如下。

#### 1) 均分功率谱有效区间

计算每段信号频域功率  $y^2(k)$  ( $k = 0, 1, \dots, 255$ ) 的最大值  $y_{max}$ 、最小值  $y_{min}$  及均值  $y_{mean}$ ; 将此区间均分为 8 等份, 即每份取值如式(2)所示。

$$y\_n = \frac{y_{max} - y_{min}}{8} \quad (2)$$

#### 2) 统计各划分区间频点数, 建立统计直方图

统计功率由低到高, 落入划分区间  $[y_{min}, y_{min} + y\_n)$ ,  $[y_{min} + y\_n, y_{min} + 2 * y\_n)$ ,  $\dots, [y_{min} + y\_n, y_{min} + 8 * y\_n]$  的频点数  $y\_n0, y\_n1, \dots, y\_n7$ 。

#### 3) 估算门限值 $noise\_th$

依据信号功率值分布相比噪声分布集中的特性, 根据前两个划分区间频点数之和  $y\_n0 + y\_n1$  将信号分为噪声区、待定区(噪声或信号, 偏噪声)、待定区(噪声或信号, 偏信号)、信号区。

(1) 若  $y\_n0 + y\_n1 < 220$ , 判定为噪声区则该段信号全部滤除, 门限值设置为其最大值  $y_{max}$ ;

(2) 若  $y\_n0 + y\_n1 < 240$ , 判定为偏噪声的待定区, 则根据频段内起伏情况进一步进行分辨, 起伏较小为噪声干扰, 门限值设置为其最大值  $y_{max}$ , 反之则为信号, 根据功率由高到低过程中遇到的第一个频点数为 0 的区间, 以其上限值作为门限值;

(3) 若  $y\_n0 + y\_n1 < 250$ , 判定为偏信号的待定区, 则根据频段内起伏情况进一步进行分辨, 起伏较小为噪声干扰, 门限值设置为其最大值  $y_{max}$ , 反之则为信号, 根据功率由低到高过程中遇到的第一个频点数小于后一区间点数的区间, 以其下限值作为门限值;

(4) 若  $y\_n0 + y\_n1 \geq 250$ , 判定为信号区, 需进一步判断是否同时存在强弱信号情况, 以免同时存在多跳频信号且功率相差较大时出现丢失情况, 主要分 2 步进行, 先初判强信号, 将强信号剔除后细判是否存在弱信号。

具体执行流程如图 5 所示。

#### 4) 去噪二值化处理

以此动态门限值  $noise\_th$  对该段 256 点信号的功率值进行二值化, 超过门限值  $noise\_th$  的功率值设置为 1, 未超过的设置 0, 以便于后续检测处理。

使用上述方法对真实环境中采集的 4 种无人机信号进

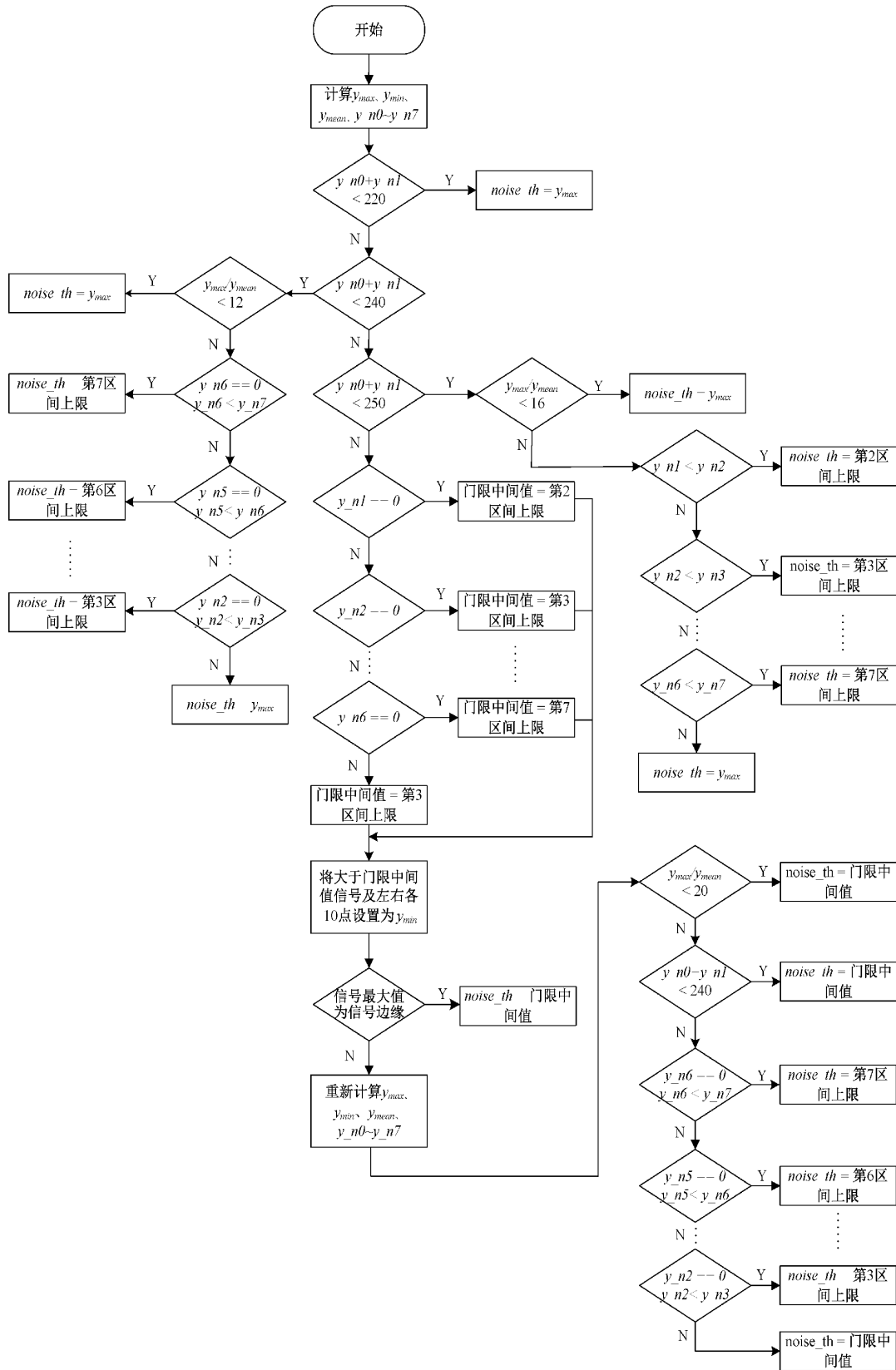


图 5 门限值估算执行流程

行处理后的效果如下,其中如图 6 所示为某段存在两类无人机的强弱信号(2 452 MHz 处存在另一功率较弱无人机



信号)经过本文方法处理后的效果图,强弱信号均得到识别,但由于门限降低也造成了强信号带宽被展宽,此问题将在后续三次聚类流程中解决。如图 7 所示为 11 712 段信号累积的未对数化的信号时频图,如图 8 所示为其对数形式的信号时频图,对比可看出信号功率值间相差较大,如图 9 所示为经过本文方法对未对数化的信号进行时频处理及动态去噪后的二值化时频图。

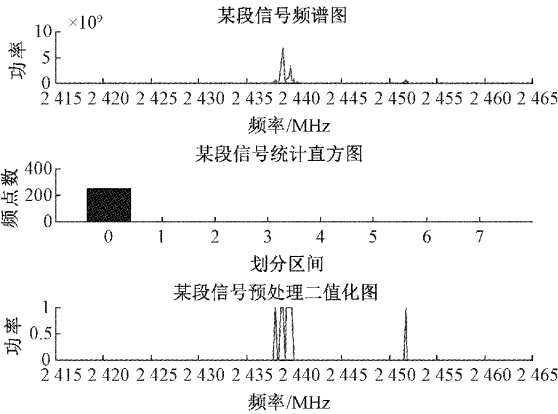


图 6 信号预处理效果图(存在强弱两类无人机信号)

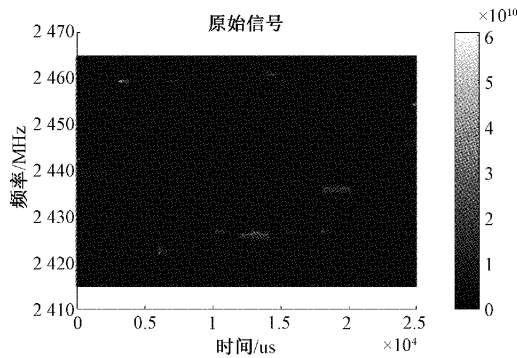


图 7 原始信号时频图(未对数化)

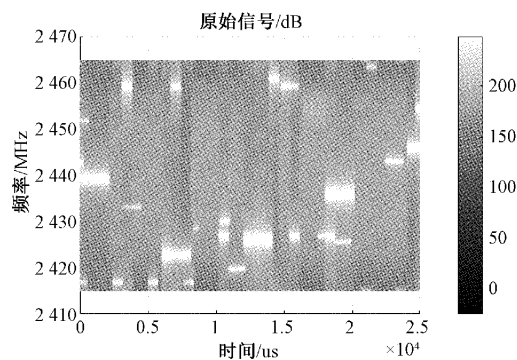


图 8 原始信号时频图(对数形式)

## 2.2 信号三次聚类

经预处理后信号需经过三次聚类(段内聚类、段间聚类及类间聚类),生成包含频率上下限值、起始时间、结束时间、带宽、脉宽的数组。

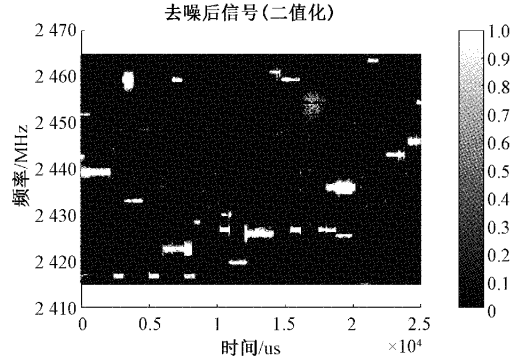


图 9 自适应去噪后信号二值化时频图

### 1)段内聚类

针对每段信号内 256 点对应频率的聚类,以获取信号尽可能真实的上下限频率值,其执行流程如下:

(1)取第一个功率值非 0 点作为频率基值;

(2)计算其他非 0 点与其的欧氏距离,若小于门限  $freqSel\_th$  则划为一类,反之则输出前一划分类的上下限频率值,同时更新频率基值,重复(2)直至遍历结束;

### 2)段间聚类

根据段内聚类结果进行各段信号间聚类,以获取包含频率上下限值、起始时间及结束时间的数组,其执行流程如下:

(1)将段内聚类输出的第一组频率上下限值及起始时间作为基值;

(2)计算后续输出的频率上下限值、起始时间与基值的欧氏距离,若同时小于门限  $freqSel2\_Th$ 、 $TimeSel2\_Th$  则划为一类,同时更新相关基值,重复步骤(2)直至信号处理结束;若在此过程中某类中时间与当前时间间隔超出设定值时,则输出该划分类的频率上下限值、起始时间及结束时间;

### 3)类间聚类

依据脉宽相近原则进行类别间聚类,以获取包含频率上下限值、起始时间、结束时间、带宽、脉宽的数组,其执行流程如下:

(1)将段间聚类输出的第一组信号的脉宽作为基值;

(2)计算后续段间聚类输出的脉宽值与其的欧式距离;若小于门限值  $Class\_STimeTh$ ,则划为一类,反之则更新基值,重复步骤(2)直至信号处理结束。

## 2.3 分类判别

将类间聚类输出的部分特征(脉宽、结束时间)与无人机识别库中存储的相应特征进行比较,设置特征判决门限  $Set\_TimeTh$ ,输出无人机存在与否标志及无人机类型,其执行流程如下:

1)当类间聚类输出数组超过 10 个或当前时间与结束时间超出设定值时,将数组中结束时间两两差值,以特征判决门限  $Set\_TimeTh$  对差值进行分类,计算每类个数。

个数最多类对应的差值作为该类别的脉间间隔时间。

2) 将脉间间隔时间以及当前信号的脉宽这两个特征参数进行,若接近并在门限范围则认定无人机存在,置位无人机存在与否标志,并给出具体所属的无人机类型,反之则清零无人机存在与否标志,重复进行步骤 1)、2)。

2.4 仿真测试

1) 加噪测试

使用 Matlab 依照实际无人机遥控参数(跳频周期 1.3 ms,跳频间隔 3.85 ms,带宽 1 MHz)产生模拟无人机跳频信号,并对其进行加噪测试(叠加高斯白噪声),利用本文方法对其进行检测,在不同信噪比条件下均进行 100 次实验,以分类判别输出的无人机类型作为判断依据,信噪比以 -20~0 dB 为区间,0.2 dB 为步进,所形成的无人机检测概率与信噪比的关系曲线如图 10 所示,当信噪比为 -16.4 dB 时,本文方法的检测概率为 90%,当信噪比大于等于 -16.2 dB 时,检测概率为 100%。文献[10-13]使用机器学习方法进行无人机检测,检测率 100% 时要求信噪比在 0 dB 以上,且该类方法实现对硬件要求较高,与非机器学习方法(文献[3-5])所提无人机检测方法性能对比如表 1 所示。

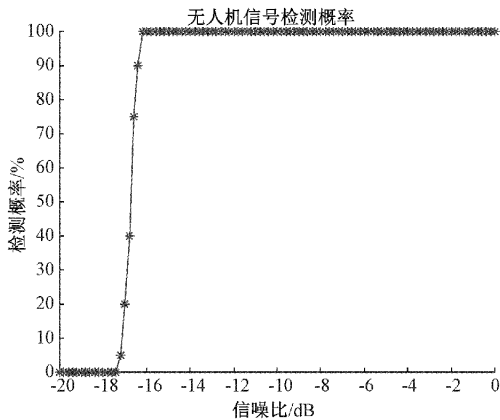


图 10 本文方法的无人机信号检测概率图

表 1 相关方法检测概率对比表

方法	检测概率 100% 情况下对应的信噪比
文献[5]	$\geq -15$ dB
文献[3]	$\geq -3$ dB
文献[4]	$\geq -2$ dB
本文方法	$\geq -16.2$ dB

2) 干扰测试

在无人机跳频信号中加入干扰,采用本文方法进行检验,以检验其在外部复杂电磁环境下工作时的抗干扰性能,主要模拟以下三类干扰:定频信号干扰(如 ZigBee、无人机图传、WiFi 信号)、其他跳频信号干扰(如蓝牙信号)、突发信号干扰。

(1) 定频信号干扰

设置信噪比为 -10 dB,加入不同信干比的定频干扰信

号各进行 100 次实验,以分类判别输出的无人机类型作为判断依据,信干比以 -40~0 dB 为区间,1 dB 为步进,所形成的无人机检测概率与信干比的关系曲线如图 11 所示,可知无论是否存在频率碰撞(无人机某跳频率与定频频率重合),当信干比大于 -30 dB 时,检测概率为 100%。

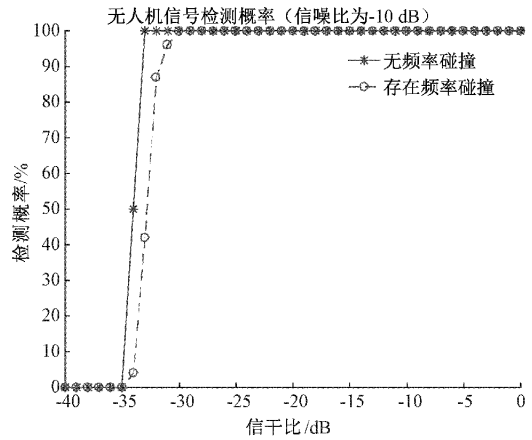


图 11 定频信号干扰下的无人机信号检测概率图

(2) 其他跳频信号干扰

当跳频干扰信号与无人机信号 1 个跳频周期内时间重合度小于 50% 时,不影响本文的无人机信号检测方法;当超过 50% 时,干扰信号与无人机信号幅度比小于 63 时,检测概率为 100%。

(3) 突发信号干扰

突发信号由于时间较短,其与无人机信号 1 个跳频周期内时间重合度一般小于 50%,因而不会影响本文无人机信号检测方法的性能。

3 具体实现与分析

针对上述检测流程,本文在第 1 节中介绍的软件无线电平台上进行了工程实现。

3.1 AD9361 配置模块

AD9361 配置模块主要运行于 STM32 上,FPGA 仅对配置所使用的 SPI 信号进行了透传。对于该模块的实现参考 AD9361 官方例程<sup>[19]</sup>,这里不做过多赘述,仅对参数设置情况进行介绍。

本系统中将 AD9361 设置为 1Rx1Tx 模式,仅开启 Rx1,接收 LO 频率设置为 2 440 MHz,接收采样速率设置为 60 MHz,带宽设置为 50 MHz,增益控制设置为 Fast AGC 模式。

3.2 识别库动态维护模块

识别库动态维护模块的实现分布于 STM32 和 FPGA 上,该模块主要分为识别库参数存储和参数读取两部分,本文中设置了 10 个无人机识别库参数。

1) 识别库参数存储:FPGA 通过串口接收上位机下发的参数存储指令,将其通过 EMIF 接口转发给 STM32,

STM32 收到对指令进行解析依据不同指令参数码选择参数写入 24C128 的规定位置,其流程如图 12 所示。

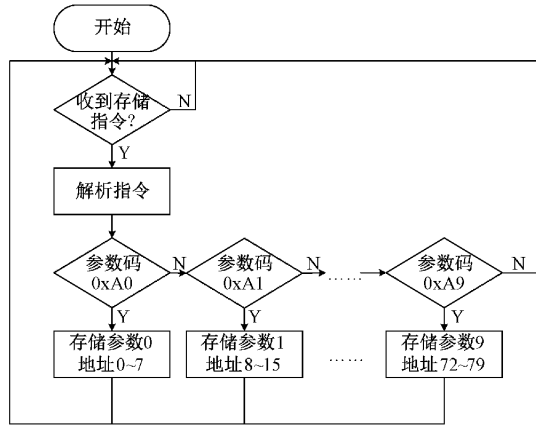


图 12 参数存储软件流程

2)识别库参数读取:STM32 上电初始化并对 AD9361 配置完成后读取 24C128 规定的参数位置,根据参数有效标志选择有效无人机识别库参数,并将其传至 FPGA 中,供分类判别环节使用,仅上电执行一次,其流程如图 13 所示。

3.3 信号处理及分类模块

信号处理及分类模块位于 FPGA 上,如第 2 节中所述其分为自适应去噪、信号三次聚类、分类判别 3 个部分。因第 2 节对其工作流程已进行详细介绍,在本节中只对对各模块的具体实现进行补充,不再对其流程过多表述。

1)自适应去噪

自适应去噪的时频处理中有 50%信号交叠,为了在 FPGA 中实现流水线处理,将数据流分为偶数和奇数段号

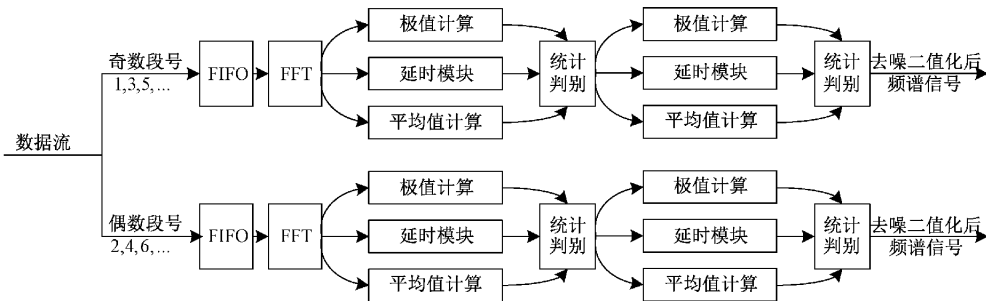


图 14 自适应去噪 FPGA 内部实现结构图

2)信号三次聚类

信号三次聚类的实现与 2.2 节描述基本相同,仅对每次聚类输出数量进行了限定,段内聚类每次最多输出 4 个信号,段间聚类设置了 16 路存储器,最多可处理同时存在 16 个不同信号的情况,类间聚类当输出数据超过 10 个或时间超过 10 ms,将当前聚类结果送至后续流程,该部分的仿真如图 15 所示,Class0 分类中该信号的脉宽为(3E1)H (2.118 4 ms),脉间间隔为(AFE)H(6.003 2 ms),符合类型 2 无人机(脉宽 2.12 ms,脉间间隔 6 ms, RadioLink

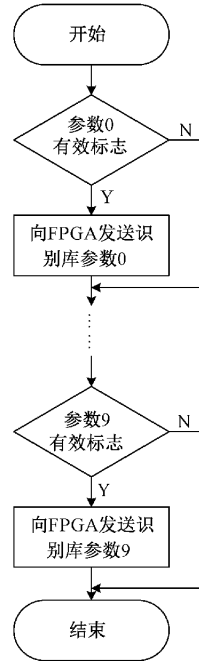


图 13 参数读取软件流程

分别处理,送入 FIFO 缓存,缓存目的是防止 FFT 未准备就绪情况下数据即输入,FFT 输出后进行平方和操作分三路送入极值计算、平均值计算、延时模块,延时模块的作用为等待极值(最大值、最小值)、平均值计算完成后送入统计判别模块与统计直方图区间点数进行联合判别;若属于信号区,则还需结合去除强信号后的二次极值、平均值计算结果与二次统计直方图区间点数进行联合判别,最终输出去噪二值化后的频谱信号。本部分在 FPGA 内部实现的结构如图 14 所示。

AT9S 遥控)特征。

3)分类判别

分类判别的实现基本与 2.3 节描述一致,仅对类别数量进行限制为 10 个,在 FPGA 资源允许情况下,可以视情况进行扩展。

3.4 监测结果上报模块

监测结果上报模块位于 FPGA 上,通过串口按照一定格式进行结果上报,便于上位机解包显示,本文中的格式为 5F+XX+F5,其中 5F 为包头,F5 为包尾,中间 XX 非 0



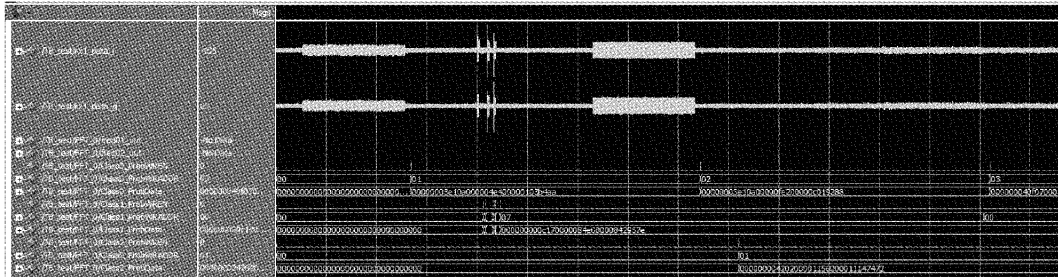


图 15 信号三次聚类仿真

则代表存在无人机信号,其中为 01 则代表存在类型 1 无人机,02 则代表存在类型 2 无人机,以此类推进行上报,同时

若某类型结果上报超过 10 ms,则认为该类型已不存在。如图 16 所示,显示当前存在类型 2 无人机。

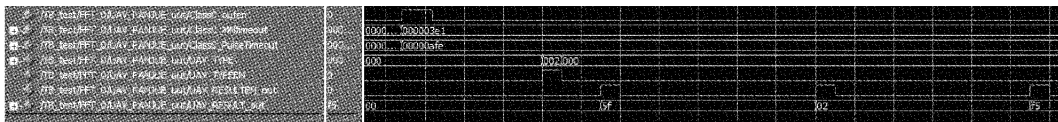


图 16 分类判别结果及监测结果上报仿真

### 3.5 FPGA 资源利用情况

FPGA 整体资源利用如图 17 所示,其中逻辑单元消耗较多,主要是由于程序可同时判别 10 类无人机信号,若根据实际情况进行删减,可大幅减少资源消耗。

Flow Status		Successful - Thu Apr 28 19:29:13 2022
Quartus II 64-Bit Version:		13.1.0 Build 162 10/23/2013 SJ Full Version
Revision Name		UAV_DETECT1
Top-level Entity Name		UAV_DETECT1
Family		Cyclone IV E
Device		EP1K10K10-10
Timing Models		Final
Total logic elements		99,191 / 114,480 (87 %)
Total combinational functions		82,016 / 114,480 (72 %)
Dedicated logic registers		45,512 / 114,480 (40 %)
Total registers		45538
Total pins		172 / 529 (33 %)
Total virtual pins		0
Total memory bits		109,328 / 3,981,312 (3 %)
Embedded Multiplier 9-bit elements		56 / 532 (11 %)
Total PLLs		1 / 4 (25 %)

图 17 FPGA 资源消耗

### 3.6 上位机设计

上位机基于 Labview 设计,其界面如图 18 所示,主要分为 3 个部分,最左侧为串口参数设置,中间为无人机识别库参数下发模块,可对识别库参数进行更新,最右侧为无人机监测结果(包括无人机存在性指示及具体无人机类型),可展示识别的无人机类型情况。

### 3.7 系统测试

本文系统在室内和室外环境中进行了测试,均达到预期效果,具体测试情况如下:

#### 1) 室内测试

室内测试时在存在多个路由器 WiFi 信号干扰的情况下,对 4 种类型无人机成功进行了识别,类型 1 无人机的上行链路为 FLYSKY FS-i6 遥控,类型 2 为 RadioLink AT9S 遥控,类型 3 为 WFLY ET06 遥控,类型 4 为 Devention

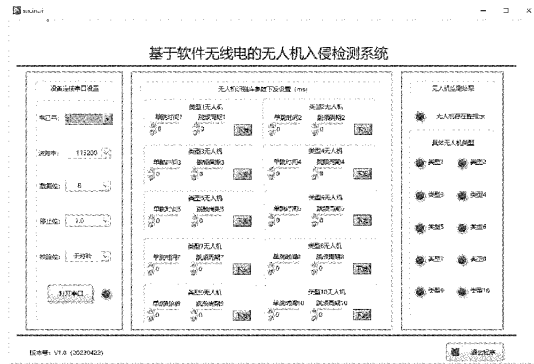


图 18 上位机界面

DEVO-10 遥控,测试 20 次,识别成功率 100%。室内测试环境如图 19 所示,上位机显示监测结果如图 20 所示。



图 19 室内测试环境

#### 2) 室外测试

室外测试环境如图 21 所示,在此环境下对类型 2 无人机进行实际测试,测试 20 次,识别成功率 100%,上位机显示监测结果如图 22 所示。





图 20 上位机监测结果(室内测试)

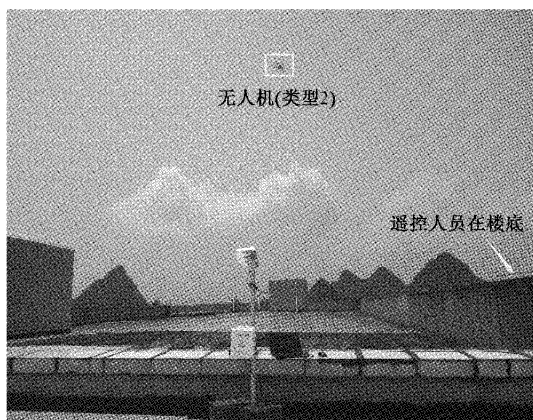


图 21 室外测试环境



图 22 上位机监测结果(室外测试)

## 4 结 论

本文针对无人机入侵场景,提出了一种基于软件无线电平台的入侵检测方法并进行了工程化实现,利用文中提出的信号处理及分类流程,结合预先存储并可动态更新的无人机识别库,能够实现对低信噪比环境下的无人机信号的有效识别与分类,该方法依托的系统体积小、成本较低,可用于个人用户家用、私营或小型的信息敏感场所等场景,具有较好的应用前景。当然本系统也存在着一些问

题,如系统目前采用的天线为具有方向性的平板天线,不利于全方位的监测,后续研究中将改为全向的炮筒天线。另外在后续研究中会在同类型无人机个数的识别、中频采集及无人机上行链路与下行链路联合检测等方面继续深入研究,形成稳定可靠的无人机检测方案,提高无人机入侵检测能力,为后续的无人机干扰流程提供更好地服务。

## 参考文献

- [1] 袁双,蒋志科,阎剑. 对低慢小无人机的干扰技术研究[J]. 国外电子测量技术,2022,41(5):62-67.
- [2] 冯登超,梁力水,刘建强,等. 无人机低空告警监视系统结构设计探索[J]. 电子测量技术,2018,41(9):141-145.
- [3] 杨亚南. 无人机信号的侦收与识别方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2018.
- [4] 王举权. 无人机通信信号的非合作检测与解码技术[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
- [5] 蒋平. 基于信号特征的无人机侦测技术研究及实现[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2021.
- [6] 兰聪. 基于软件无线电的无人机信号侦收识别与定位技术的研究[D]. 宁夏:宁夏大学,2019.
- [7] 郑佳. 基于软件无线电的无人机辐射信号侦察分析技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2018.
- [8] 徐淑正,孙忆南,皇甫丽英,等. 基于软件无线电平台的无人机入侵检测[J]. 实验室研究与探索,2018,37(12):64-67.
- [9] 许敏,李博涵,王凯,等. 特定辐射源个体识别算法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2021,35(10):116-123.
- [10] 何兵,樊宽刚,欧阳清华,等. 基于信号指纹的无人机遥控端个体识别方法[J]. 传感器与微系统,2022,41(2):58-61.
- [11] 管祥民,马健翔,张维东. 一种基于射频信号倒频谱的民用无人机识别和分类方法[J]. 南京航空航天大学学报(英文版),2021,38(4):597-606.
- [12] 李彬,徐怡杭,罗杰. 采用残差神经网络的无人机遥控信号识别监测算法[J]. 西安交通大学学报,2021,55(12):146-154.
- [13] 郝云飞. 基于深度学习的无人机信号检测与识别技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2019.
- [14] 普运伟,郭江,刘涛涛,等. 基于模糊函数等高线与栈式降噪自编码器的雷达辐射源信号识别[J]. 仪器仪表学报,2021,42(1):207-216.
- [15] 胡婉如,王竹刚,胡俊杰,等. 一种基于 Zynq-7000 + AD9361 的通用调制平台设计[J]. 电讯技术,2020,60(12):1485-1490.
- [16] 张鹏辉,张翠翠,赵耀,等. 基于 ZYNQ-7000 FPGA 和 AD9361 的软件无线电平台设计[J]. 实验技术与管理,2019,36(8):85-93.

- [17] 赵肖迪,李芳,熊俊,等.应用形态学的自适应门限干扰检测算法[J].信号处理,2020,36(4):593-601.
- [18] 张玉龙,张更新,胡婧,等.一种基于统计直方图的信号检测算法[J].军事通信技术,2017,38(1):26-30,34.
- [19] 王凯笛.基于 AD9361 的宽带无线通信平台研发[D].

西安:西安电子科技大学,2020.

#### 作者简介

姚铎,硕士,工程师,主要研究方向为反无人机技术,无人机技术应用等。

E-mail:191836754@qq.com