

基于多跳自相关检测无人机信号的探索

肖宏文

贵州空管分局，贵州省贵阳市，550012；

摘要：随着无人机行业蓬勃发展，民用无人机的数量飞速增加，而无人机的“低、小、慢”特点使其在传统监视技术中难以得到有效的管理，因此提升民用无人机的监管与防制工作十分重要。论文以跳频信号时频图像特征与干扰信号时频图像特征的区别为基础，利用连通区域聚类的算法，从接收信号中将无人机信号提取出来，再研究基于多跳自相关对跳频信号的检测算法，探索结合连通区域聚类与多跳自相关检测两种算法，完成无人机检测。

关键词：连通区域聚类；时频分析；无人机信号检测；多跳自相关检测；

DOI:10. 69979/3041-0673. 25. 02. 013

引言

在无人机监管与防治工作当中，如何识别无人机信号是需要解决的关键性问题。无人机采用跳频通信作为控制信号，其优点在于减少外界干扰信号所带来的误差，提高系统的抗干扰性能，保障系统稳定运行。

跳频图案是跳频信号跟踪与探测的关键依据。跳频通信中，信号的发射频率随时间按跳频序列进行改变，属于瞬时窄带信号。观察其的频谱特性可知跳频通信是在宽频上不停跳变的窄带通信。

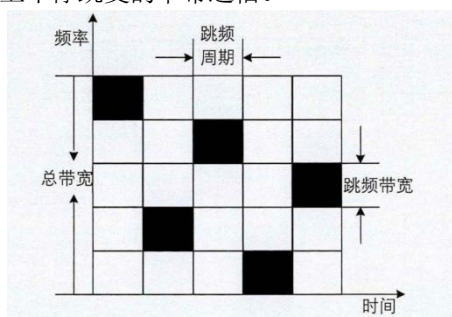


图 1 跳频图案

论文以跳频信号时频图像特征与干扰信号时频图像特征的区别为基础，利用连通区域聚类的算法，从接收信号中将无人机信号提取出来，再研究基于多跳自相关对跳频信号的检测算法，探索结合连通区域聚类与多跳自相关检测两种算法，来对无人机是否存在进行判断，从而完成无人机检测。

1 跳频信号分选及参数估计

干扰信号分为高斯白噪声、斜变信号、猝发信号等，系统接收到信号后对背景噪音的去除通过混频即可实现，其他干扰噪音的去除是跳频信号识别技术需要解决的问题。

1.1 电磁环境分析

ISM 频段分配供工业、医学、科学使用，其中小型无人机使频段具体范围为 2.4GHz-5.8GHz。现代社会电磁环境复杂，无人机信号使用频段为工业、医学、科学公用频段，易受同频干扰。常见干扰信号类型以时频图像特征分为定频信号（WIFI 信号、图传信号）、突发信号、斜变信号以及随机噪声，并且该频段中不为无人机发出的跳频信号如蓝牙信号与遥控信号也可成为干扰信号。

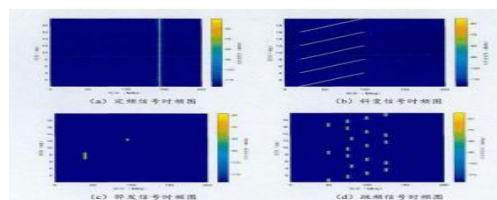


图 2 不同信号时频图像^[1]

随机噪声充斥在电磁环境中，密度与能量分布随机、幅度值微小，时频图像如图 2（a）、（b）、（c）、（d）的蓝色背景所示。

表 1 不同干扰信号时频特性

干扰信号类型	时频图像（如图 2）	特征及影响
定频信号	(a)	定频信号长时间占用一同一个频率，在时频图上表现为平行于时间轴的一条长直线。它可能导致一部分目标信号被淹没，影响检测结果。
斜变信号	(b)	斜变信号是一组频率随时间线性变化的信号，在时频图上表现为周期性的斜线。对比于其他信号时变信号占用较宽的带宽，斜变信号容易与目标信号发生碰撞，从而影响目标检测。
突变信号	(c)	突发信号特点：随机出现，信号持续时间短，信号出现时间、带宽都具有不确定性。

跳频信号 (d) 频率随时间周期性跳变的信号, 同一跳频信号各个调频点跳频周期一致, 带宽一致幅值相近。

连通区域聚类通过对接收信号进行时频分析后通过形态学处理和图像处理将跳频信号从干扰信号中提取出来, 以此来帮助定位系统实现信号探测跟踪。

1.2 连通区域聚类

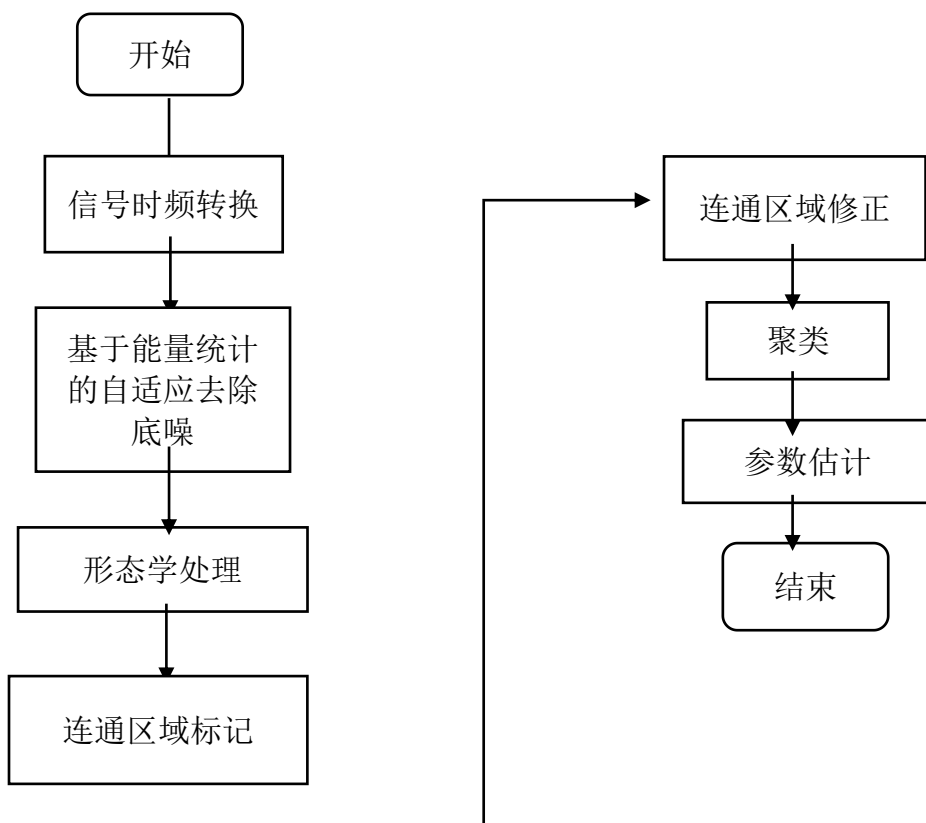


图 3 连通区域标记法整体处理图

图 3 为连通区域标记法处理信号的整体流程图, 连通区域标记法提取噪声的具体步骤如下: 第一步, 对接收信号进行时频分析, 得到接收信号的时频图像, 利用基于能量统计的自适应算法对背景噪声进行去除; 接下来, 根据图 2 结合表 1 对干扰信号与跳频信号的时频图像的不同特征进行分析, 总结出不同规律。以此设置不同条件参数, 对时频图像的参数区域进行标记、修复、聚类得到去除干扰信号后的时频图像。

1.2.1 基于能量统计的自适应门限去底噪

对接收信号进行短时傅里叶变化, 得到的时频图如图 4 所示, 除了目标信号以外。接收信号中会混入大量的干扰信号。

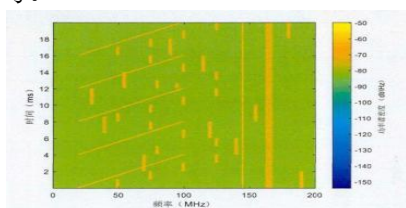


图 4 接受信号时频图^[1]

背景噪声是一种均匀分布于整个电磁环境中弱信号, 因为信号能量若, 可通过对信号能量进行门限设置, 区分背景噪声与其他信号, 设整个时频分布矩阵的平均能量为:

$$\bar{P} = \frac{1}{N_t \times N_f} \sum_{m=1}^{N_f} \sum_{n=1}^{N_t} A(m, n) \quad (1-1)$$

式中 $A(m, n)$ 为二维时频分布矩阵, N_f 频域点个数, N_t 时域点个数。

设去噪门限 th 为:

$$th = a \times \frac{1}{N_t \times N_f} \sum_{m=1}^{N_f} \sum_{n=1}^{N_t} A(m, n) \quad (1-2)$$

式中, a 为去噪系数, 表示平均能量倍数。

将信号小于门限值的值设置为 0, 得到去底噪后的二维时频分布。

1.2.2 形态学处理

对于噪音过大,导致信噪比不理想的接收信号来说,设置能量门限去除背景噪声后,会导致接收信号的时频图像出现断裂等情况。对去底噪后的时频图像进行形态学处理就是为解决此情况。如对孤立点进行去除、对达到一定条件的时频空隙进行填补,以此连接分裂断开的时频点。

1.2.3 连通区域标记

本文采用区域生长算法进行连通区域标记,将经过形态学处理后的时频图像转换成一个二值矩阵,设该二值矩阵为 A 。建立两个与矩阵 A 大小相同、数值为 0 的矩阵,分别记作 B 以及 $queue$ 。矩阵 B 用于存储分类标记完成的点、矩阵 $queue$ 用于存储区域生长种子进行八邻点扫描,以完成连通区域标记。以及建立参数 $labelIndex = 0$ 以区分不同区域。算法实现步骤如下

步骤一:对二值矩阵 A 中的元素逐一进行扫描;

步骤二:找出未被标记的非零点记做 P 后;

步骤三: $labelIndex = labelIndex + 1$, 将 $labelIndex$ 值赋给矩阵 B 中相对应的 P 点;

步骤四:对 P 点的八邻点进行扫描查看是否有未被标记的非零点,并将其放入矩阵 $queue$ 中

步骤五:判断 $queue$ 是否为 0;若 $queue = 0$,则表示该连通区域标记完成;若 $queue$ 不等于 0 的话,取出其中的生长种子,重复步骤四直至完成该连通区域扫描。

重复上述步骤直至整个二值矩阵的参数扫描完成。

A	B
1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0	1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0
1 1 1 0 0 0 0 1 1 0 0 0	1 1 1 0 0 0 0 4 4 0 0 0
1 1 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0	1 1 0 0 0 0 0 4 4 0 0 0
1 1 0 0 1 0 1 1 0 0 0 1	1 1 0 0 3 0 4 4 0 0 5
0 0 1 1 1 0 1 1 0 0 0 1	0 0 3 3 3 0 4 4 0 0 5
0 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 1	0 0 0 0 3 0 0 0 0 0 5
1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1	2 2 2 0 0 0 0 0 5 5 5
1 1 1 0 0 0 0 0 1 1 1 1	2 2 2 0 0 0 0 0 5 5 5

图 5 连通区域标记示意图

1.2.4 时频参数提取

在进行区域连通标记完了以后,将对每个连通区域进行特征提取以方便后面以区域特征对连通区域进行修正以及聚类。

对每个连通区域进行参数提取:连通区域左上角的位置坐标: (x,y) 、连通区域在 x 轴的长度: L 、连通区域 y 轴长度: H 。由这些参数构成最小矩阵边框的四个向量 (x,y,L,H) 。

根据以上参数可求得,起始时间: x 、结束时间: $x + L$ 、

跳频周期: L 、中心频点: $y + 2H$ 、带宽: H 。

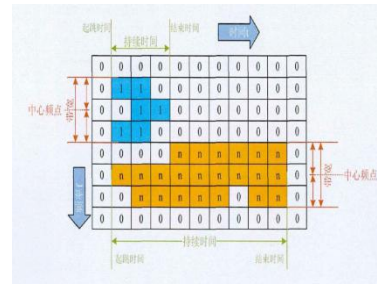


图 6 信号段参数提取示意图^[1]

1.2.5 连通区域修正

在完成了连通区域的参数提取以后,结合时频特征本文需要对连通区域进行进一步的优化,修正方法根据不同的情况对信号段进行拼接或者拆解。

(a) 信号段拼接

在信噪比低的情况下,对接收信号去底噪时可能会把部分信号置 0 剔除,造成信号“断裂”。

设第 i 个信号段结束时间为 $(x_i + L_i)$, 中心频率为 $(y_i + H_i/2)$, 第 j 个信号段起始时间为 x_j , 中心频率为 $(y_j + H_j/2)$, 拼接条件:

$$\begin{aligned} |(x_i + L_i) - x_j| &\leq \Delta_t \\ |(y_i + H_i/2) - (y_j + H_j/2)| &\leq \Delta_f \end{aligned} \quad (1-3)$$

满足以上条件的信号段之间点设置为 1, 从而连接两个区域。

(b) 信号段拆解

当系统利用短时傅里叶变换对接收信号进行时频转换时,由于受到处理设备时频分辨率的影响,信号频域边沿会出现带宽激增;当信号遇到同频干扰时,噪声信号会叠加在有用信号上,难以排除产生毛刺;以及当跳频信号与斜变信号发生碰撞时,上述情况都会对实际信号的带宽及时长的判断造成误差。

本文可以用最小矩形框的占零比对毛刺、斜变信号与跳频信号进行区分,毛刺与跳频信号的占零比很大达到 80%,而跳频信号的占零比小于 20%。所以本文用式 1-4 进行判别是否有斜变信号

$$\frac{\text{信号段零点数}}{\text{信号段内总点数}} \geq \Delta n \quad (1-4)$$

对连通区域逐行扫描计算该行内的零点占比,按表 2 对每行的信号情况进行判断、处理,以此消除毛刺及斜变信号。

表 2 零点占比情况判断及处置方式

每行零点占比	判断情况	处置方式
--------	------	------

90%以上	斜变信号	零点比高于 50%的行全 部置零, 消 除斜变信号 及毛刺
50%-90%区间	毛刺导致带宽 误判	
20%以下	信号交叉情况	

1.2.6 聚类

聚类算法根据将信号参数特性相同的信号段进行连接

a) 基于跳频周期和带宽的信号聚类

该方法利用跳频信号的周期与带宽作为聚类依据, 判断两个信号段是否为同一信号来源, 单一以其中一个条件作为标准, 将导致判断依据不充足, 产生聚类误差。实际操作中, 二维目标须建立模型进行归一化后变成单个目标, 才可对单个目标设置门限值进行判断是否聚类。

b) 基于出现时刻的聚类

为精确的判断两信号段是否为同源信号, 在利用跳频信号周期与带宽对信号段进行筛选后, 接下来进行基于出现时刻的判断。跳频信号中频率更换时间点为等差数列, 以这个特性作为判断依据, 能帮助系统更精确的找到跳频信号。具体步骤如下:

建立数据集 X , 数据集中的元素为对应每个连通区域的起始时刻, 设定差值门限 ε , 簇类别个数 count , 具体步骤如下:

输入: 数据集 X , 差值门限 ε , 类别个数 count ,

簇集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_K\}$

输出: 新的簇集合 C'

根据驻留时间聚类以后某段中存在 n 个信号段, 提取每个信号段的起始时刻 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 。

将起始时间从小到大进行排序, 计算出相邻跳频信号的起始时间差值 $\{d_1, d_2, \dots, d_n\}$ 。

计算平均时间差 T , 判断 $|d_i - T| \leq \varepsilon$, 若满足该条件则认为该时间与其他时间是等间距的, 对下一个信号进行检查。若不满足该条件则将该信号段设置新的聚类标号后再次重新区每个信号的起始时刻。往复这个过程直至所有信号起始时间满足等差序列条件。

以出现时刻为判断依据, 将不满足起始时间为等差数列的干扰信号进行排除, 也可以通过起始时刻为划分段将混在跳频信号的干扰信号拆解。残留干扰信号可通过调整 Minpts 的最小聚类点数进行剔除。

2 基于多跳自相关的无人机遥控信号检测方法

基于多跳自相关的跳频信号检测方法是通过混

有白噪声的跳频信号进行自相关运算, 通过含有跳频信号自相关函数的增量对无人机信号有无进行判断。

(1) 检测思想

接收机接收信号为:

$$X(t) = S_{\text{hop}}(t) + n(t) \quad (2-1)$$

式中, $S_{\text{hop}}(t)$ 代表跳频信号, $n(t)$ 代表高斯白噪声, 均值为 0。

$X(t)$ 自相关函数:

$$R_x(\tau) = \frac{1}{T} \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T X(t)X(t+\tau)dt \\ = R_{ss}(\tau) + R_{sn}(\tau) + R_{ns}(\tau) + R_{nn}(\tau) \quad (2-2)$$

式中, T 为接收数据时间, 包含多个跳频周期 T_h , $R_{ss}(\tau)$ 、 $R_{nn}(\tau)$ 表示自相关函数, $R_{sn}(\tau)$ 、 $R_{ns}(\tau)$ 表示为无人机和白噪声的互相关函数。信号与白噪声信号不想关, 所以它们的互相关函数接近与 0。由此可知:

$$R_x(\tau) = R_{ss}(\tau) + R_{nn}(\tau) \quad (2-3)$$

假设接收到的信号中包含 N 个跳信号, 不同的跳信号之间相关性近乎为 0, 并且忽略掉接收数据中包含不完整的跳频周期数据的影响

$$R_{ss}(\tau) = \sum_{k=1}^N R_{S_k S_k}(\tau), k \text{ 为整数} \quad (2-4)$$

则第 k 个信号可表示为

$$S_k(t) = A \cos(2\pi f_k t + \theta_k)$$

所以 $R_{S_k S_k}(\tau)$ 可表示为

$$R_{S_k S_k}(\tau) = \frac{1}{T_h} \left\{ \int_0^{T_h-\tau} A^2 \cos(2\pi f_k \tau + \theta_k) \cos[2\pi f_k(t + \tau) + \theta_k] dt + \int_{T_h-\tau}^{T_h} A^2 \cos(2\pi f_k t + \theta_k) \cos[2\pi f_{k+1}(t + \tau) + \theta_{k+1}] dt \right\} \\ = \frac{A^2}{2} \cos(2\pi f_k \tau) \frac{T_h - \tau}{T_h}, t \leq T_h \quad (2-6)$$

当接收到的信号包含跳频信号时,

$$R_x(\tau) = \begin{cases} \sum_{k=1}^N \frac{A^2}{2} \cos(2\pi f_k \tau) \frac{T_h - \tau}{T_h} + R_{nn}(\tau), & 0 \leq \tau \leq T_h \\ R_{nn}(\tau) & , T_h < \tau < T \end{cases} \quad (2-7)$$

当接收信号不包含跳频信号时

$$R_x(\tau) = \begin{cases} N_0 & \tau = 0 \\ R_{nn}(\tau) & \tau > 0 \end{cases} \quad (2-8)$$

(2) 检测统计量

本文通过多跳自相关的检测推导过程, 将公式 (2-7) 与 (2-8) 进行对比可以发现以下规律:

如若接受信号中存在跳频信号, 当延迟小于跳频周期的时候, 接受到的混合信号自相关等于相同跳的自相关以及噪声自相关之和; 当 $T_h < \tau < T$ 时, 信号自相关仅仅为噪声自相关。比较这两种情况, 可以得出当跳频

信号存在时, 延迟时间大于或小于跳频周期会带来一个增量的改变。

如若跳频信号不存在, 不论延迟时间大于或小于跳频周期, 最后混频信号都仅有白噪声的自相关。

通过以上规律本文可以发现, 本文接收到跳频信号后对延迟时间大于和小与跳频周期分别进行自相关函数验算将两种结果分别存入检测统计量, 最后设计一个门限值, 对两个检测统计量是否出现增量进行判断, 从而检测出是否有跳频信号。

$$E1 = \frac{1}{N_h} \sum_{k=1}^{N_h} |R_X(k)|^2 \quad (2-9)$$

$$E2 = \frac{1}{N-N_h} \sum_{k=N_l+1}^N |R_X(k)|^2 \quad (2-10)$$

3 无人机信号识别的研究分析总结

基于多跳自相关的检测方法以白噪音与跳频信号自相关函数分布特性的不同, 为设置门限值的依据, 当接收信号的自相关函数值高于门限值时, 系统判定跳频信号的存在。这样的方法即使在低信噪比的情况下也能有一个较为准确的检测性能, 但该方法抗干扰检测性差, 仅适用于白噪声干扰的情况下的信号检测, 但在实际情

况中, 社会电磁环境复杂, 而 ISM 频段属于民用频段, 干扰信息多且情况较为复杂。所收到的干扰信号包括定频信号、白噪声、突发信号以及斜变信号甚至是由非无人机发射的跳频信号。所以仅仅利用多跳自相关检测方法是不能满足现实需求的。本文建议可以通过连通区域聚类的方法将不为跳频信号的干扰信号进行剔除, 再利用自相关算法对所符合所需要跳频周期的跳频信号进行挑选。这样减小了非跳频信号对检测结果的影响, 对是否存在无人机进行判断。

参考文献

- [1] 刘丽. 民用无人机跳频信号分析与识别技术研究[D]. 北京邮电大学, 2019.
- [2] 谭畅. 无人机无源测向方法与实现技术研究[D]. 电子科技大学, 2019.
- [3] 刘若兰. 跳频通信信号检测及参数估计方法研究[D]. 电子科技大学, 2016.
- [4] 蔡传雨. 无人机测控信号识别与截获方法研究[D]. 电子科技大学, 2017.