

无人机侦听与反制中的规划与决策问题

旋翼无人机由于其灵活性、维护/改装成本低廉、起降场地要求相对较低、操作人员安全性好、“低小慢”不易被探测等特点，已被广泛应用于战场（如当今的中东战场）侦察、打击。相对的，如何对旋翼无人机进行反制也成为一个重要研究问题。

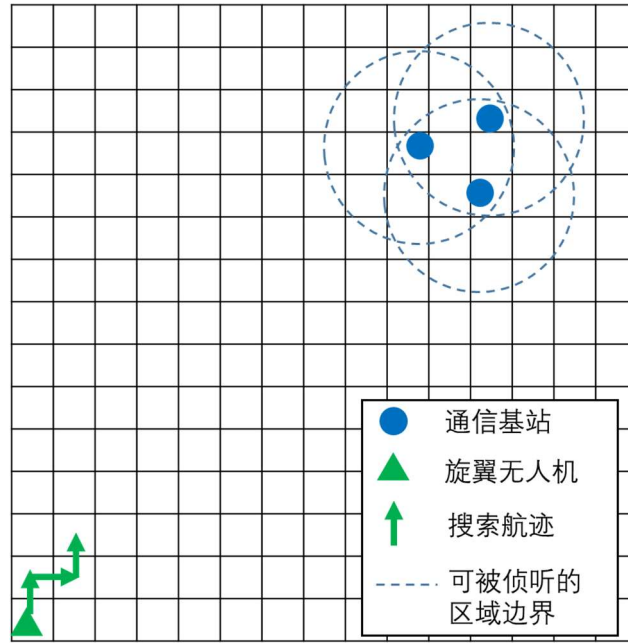


图 1. 旋翼无人机侦听搜索示意图

旋翼无人机侦听：旋翼无人机从起始位置出发（起始水平坐标 (a_0, b_0) ，坐标单位为米，在恒定高度 $H=150$ 米巡航），计划对已知数量 K 个通信基站（其位置为 $(a_1, b_1), \dots, (a_K, b_K)$ ，其高度忽略不计）进行侦听，但是无人机并不知晓通信基站的确切位置，因此无人机需要搜索前进并同时侦听。旋翼无人机搜索前进的方向为前、后、左、右，飞行速度 l_0 米/秒。在第 t 个时刻，旋翼无人机的水平坐标为 $(x(t), y(t))$ ，则此时旋翼无人机与第 k 个通信基站之间的距离为 $d_k(t) = (H^2 + (x(t) - a_k)^2 + (y(t) - b_k)^2)^{1/2}$ （单位：米），无人机收到第 k 个通信基站的信息速率评价函数 $R_k = \log_2(1 + Ph_k / \sigma^2)$ （单位：比特/（秒·赫兹）或 bps/Hz），其中基站的发送功率 $P = 10$ 瓦特； h_k 为第 k 个基站与无人机之间的信道功率增益，满足 $h_k = 1/d_k^2(t)$ ；噪声功率 $\sigma^2 = 2 \times 10^{-5}$ 瓦特。在第 t 个时刻，旋翼无人机侦听

K 个通信基站所接受的和信息速率评价函数为 $R(t) = \sum_{k=1}^K R_k$ 。旋翼无人机持续搜索以发现最佳的侦听位置，即通过决策前、后、左、右搜索方向，最大化长期折扣预期

$$\max E \left\{ \sum_{t=1}^{\infty} \gamma^{t-1} R(t) \right\},$$

其中， $\gamma \in [0, 1]$ 是折扣因子。注意， R_k 和 $R(t)$ 仅为旋翼无人机用于决策搜索方向的评价函数，并非实际可达到的信息速率；当信噪比 Ph_k / σ^2 小于门限 $\rho_1 = 3.1623$ （约为 5 dB）时，信息不能正确译码。因此，由门限 ρ_1 可发现对于通信基站 k 存在一个不可被侦听的安全区域。

旋翼无人机的反制：旋翼无人机飞行中需保证飞控信号正常接收，飞控信号以跳频形式传输，即在不同时刻选择不同频率传输，频率变换每秒发生 217 次。若在飞控信号占据的时-频资源块（图中蓝色矩形部分）上出现干扰信号，且干扰信号功率与噪声功率 σ^2 的比值高于门限 $\rho_2 = 3.1623$ （约为 5 dB）时，则无人机不能译码相应时-频资源块的飞控信号，无人机发出 NACK（重传请求）信号，要求重传飞控信号；如果一个周期的飞控信号都被干扰不能译码，无人机发出 sos 信号，并自行降落。因此，反制旋翼无人机时，即使干扰机无跳频图样的先验信息，也可以通过不同时刻、频率上截获的 NACK 信号以及截获的 sos 信号调整干扰信号的发送频率、时刻，并判断反制成功。需要注意的是，类似于基站与无人机之间存在信道功率增益，干扰机与无人机之间也存在信道功率增益，即干扰信号在传播过程中会衰减。

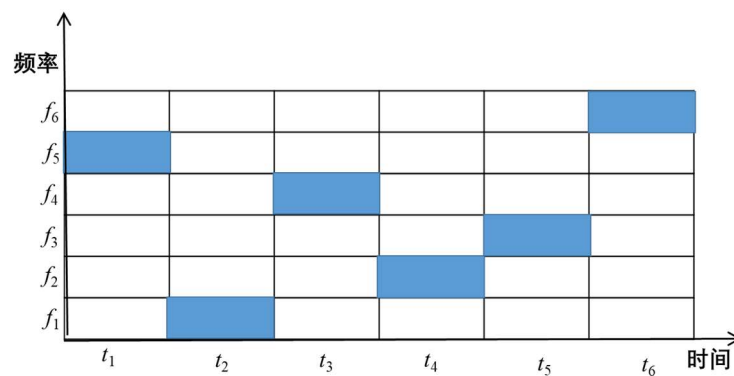


图 2. 飞控信号一周期内跳频图样示意图

请你们团队结合实际，研究并解决以下问题：

- 1) 给定旋翼无人机的起始水平坐标 $(100, 100)$ ，旋翼无人机的水平飞行速度 $0 \leq l_0 \leq 10$ 米/秒（速度可自由设置）。旋翼无人机计划侦听 3 个通信基站（无人机仅知道需要侦听的基站数量，不知道基站的位置）；建模时，3 个基站的坐标分别为 $(1350, 1950)$ 、 $(1600, 1790)$ 、 $(1590, 2090)$ 。请你们团队建立包含旋翼无人机、通信基站、干扰机等的位置、航迹、信道、信号模型，对路径决策与规划问题建模，并推导求解问题的方法，在此基础上建立旋翼无人机完成侦听任务的航迹决策与规划算法，并解释算法参数选择。生成无人机搜索侦听的航迹图；结合建立的模型，指出旋翼无人机首次进入任一通信基站可被侦听区域的时间；研究平均和信息速率评价函数（某一时刻的平均和信息速率评价函数值等于此前各个时刻和信息速率评价函数值的平均值）与时间（或算法迭代次数）的关系。注意，算法设计的目标为：1. 旋翼无人机尽快进入基站的被侦听区域；2. 平均和信息速率评价函数尽快收敛到较高数值（可对比不同算法）。
- 2) 本题研究旋翼无人机反制，其中旋翼无人机实际飞控信号跳频图样如图 2 所示。假设干扰机发送信号到达旋翼无人机时的信号功率满足门限 ρ_2 ，若干扰机已知无人机飞控信号跳频频率以及跳频周期，但不知具体跳频图样，试设计算法，使旋翼无人机迫降。如果干扰机未知跳频周期，仅知道每个跳频时刻飞控信号只在一个频率传输，试设计算法迫降无人机。注意：说明算法参数取值选择，并讨论算法的收敛速度，并指出 20 次仿真时，平均迫降无人机的时间（注：跳频时频率变换每秒发生 217 次）。
- 3) 在问题 2) 和问题 3) 的基础上，假设旋翼无人机的水平飞行速度 $0 \leq l_0 \leq 10$ 米/秒，干扰机未知跳频周期，仅知道每个跳频时刻飞控信号只在一个频率传输（如图 2 所示）。3 个基站的坐标分别为 $(1350, 1950)$ 、 $(1600, 1790)$ 、 $(1590, 2090)$ 。旋翼无人机随机从 $(100, 100)$ 和 $(2700, 3800)$ 两个位置出发。研究 50 次仿真中，基站均不被侦听时，求解干扰机的功率、部署位置、部署数量。即以尽可能少的干扰机，尽可能低的发射功率，尽可能靠近基站处部署，在尽可能远处迫降旋翼无人机（此时，无人机须迫降在基站可被侦听的区域的边界外，即确保基站不被侦听）。需用仿真结果/图（如航迹、无人机位置等）说明以上要求均被满足。