

通过模拟物理退火过程的随机搜索与概率接受机制，在决策变量的可行域内寻找使有效遮蔽时间 Δt 最大化的最优解，具体步骤如下：

步骤 1 初始化参数

- **初始解生成**: 在决策变量可行域内随机生成初始解 $S_0 = (\alpha_0, v_{FY1,0})$, 其中 $\alpha_0 \in [0, 2\pi]$, $v_{FY1,0} \in [70, 140]$;
- **初始温度 T_0** : 设定较高的初始温度 (如 $T_0 = 100$), 确保算法初期能接受较差解, 扩大搜索范围;
- **降温系数 k** : 设定降温速率 (如 $k = 0.95$), 控制温度随迭代逐步降低;
- **终止温度 T_{end}** : 设定停止阈值 (如 $T_{\text{end}} = 10^{-5}$), 当温度低于此值时终止迭代;
- **迭代次数 L** : 每轮温度下的迭代步数 (如 $L = 50$), 确保在当前温度下充分搜索邻域。

步骤 2 目标函数计算 (核心步骤) 对任意解 $S = (\alpha, v_{FY1})$, 计算其对应的有效遮蔽时间 Δt , 步骤如下:

- **无人机运动模拟**: 根据 α 和 v_{FY1} , 计算无人机在投放时刻 t_1 的位置 $(x_{FY1,t_1}, y_{FY1,t_1}, z_{FY1,t_1})$;
- **烟幕弹起爆位置计算**: 基于 $t_2 = t_1 + \Delta t_{\text{delay}}$ (Δt_{delay} 为烟幕弹飞行时间, 固定参数), 计算起爆位置 $(x_{FY11,t_2}, y_{FY11,t_2}, z_{FY11,t_2})$, 其中 x 、 y 方向按无人机速度惯性运动 ($\lambda = \alpha$, 与无人机同方向), z 方向受重力下落;
- **烟幕云团位置随时间变化**: 对 $t \in [t_2, t_2 + \Delta t_0]$, 计算云团中心坐标 $(x_{FY11,t}, y_{FY11,t}, z_{FY11,t})$, 其中 z 方向以 v_1 下沉;
- **真目标采样**: 在圆柱面 (真目标) 上均匀采样若干点 (如不同角度和高度), 覆盖目标关键区域;
- **遮挡时间判定**: 对每个采样点, 结合导弹飞行轨迹 (预设参数), 通过判别式 $\Delta \geq 0$ 判断 t 时刻是否遮挡, 记录所有有效遮挡的时间区间, 总时长即为 Δt 。

步骤 3 邻域解生成

为当前解 $S = (\alpha, v_{FY1})$ 生成邻域解 $S' = (\alpha', v'_{FY1})$, 确保新解在可行域内:

- $\alpha' = \alpha + \Delta\alpha$, 其中 $\Delta\alpha$ 为随机扰动 (如 ± 0.1 弧度), 若 α' 超出 $[0, 2\pi]$ 则取模调整;
- $v'_{FY1} = v_{FY1} + \Delta v$, 其中 Δv 为随机扰动 (如 ± 5 m/s), 若 v'_{FY1} 超出 $[70, 140]$ 则截断至边界。

步骤 4 判断准则 (接受/拒绝新解)

- 计算新解与当前解的目标函数差值: $\Delta E = \Delta t(S') - \Delta t(S)$;
- 若 $\Delta E > 0$ (新解更优): 直接接受 S' 作为当前解;
- 若 $\Delta E \leq 0$ (新解较差): 以概率 $P = \exp\left(\frac{\Delta E}{T}\right)$ 接受 S' , 其中 T 为当前温度。温度越高, 接受较差解的概率越大, 利于跳出局部最优。

步骤 5 降温与迭代

- 每完成 L 次迭代后，按 $T = k \cdot T$ 降低温度；
- 重复“邻域搜索 \rightarrow 接受准则 \rightarrow 降温”过程，直至温度 $T \leq T_{\text{end}}$ 。

步骤 6 终止与最优解输出

迭代终止后，输出历史最优解 $S^* = (\alpha^*, v_{\text{FY1}}^*)$ 及其对应的最大有效遮蔽时间 Δt^* 。