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 $S_0 = (\alpha_0, v_{\text{FY1},0})$，其中 $\alpha_0 \in [0, 2\pi]$，$v_{\text{FY1},0} \in [70, 140]$；
- **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 $S = (\alpha, v_{\text{FY1}})$，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 $(x_{\text{FY1},t_1}, y_{\text{FY1},t_1}, z_{\text{FY1},t_1})$；
- **烟幕弹起爆位置计算：**基于 $t_2 = t_1 + \Delta t_{\text{delay}}$（$\Delta t_{\text{delay}}$ 为烟幕弹飞行时间，固定参数），计算起爆位置 $(x_{\text{FY11},t_2}, y_{\text{FY11},t_2}, z_{\text{FY11},t_2})$，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 $(x_{\text{FY11},t}, y_{\text{FY11},t}, z_{\text{FY11},t})$，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 $S = (\alpha, v_{\text{FY1}})$ 生成邻域解 $S' = (\alpha', v'_{\text{FY1}})$，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；
- $v'_{\text{FY1}} = v_{\text{FY1}} + \Delta v$，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 $P = \exp\left(\dfrac{\Delta E}{T}\right)$ 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^*。

按照上述算法思路, 利用 Python 求解得

图 **1**