遍历算法通过对决策变量可行域网格化离散,枚举所有离散解并计算有效遮蔽时间 Δt ,最终筛选最优解,核心步骤如下:

步骤 1 明确优化模型核心要素

- 目标函数: $\max \Delta t$ (导弹路径与烟幕有效球形区域 (r = 2.5m) 的交集时长);
- 决策变量:
 - 飞行方向角 $\alpha \in [0, 2\pi]$;
 - 飞行速度 v_{FY1} ∈ [70, 140] m/s;
 - 投放时刻 t_1 ∈ [0, 10] s;
 - 弹飞行时间 $\Delta t_{\text{delay}} = t_2 t_1 \in [1, 5]$ s。

• 关键约束:

- 无人机位置: $x_{\text{FY}1,t} = x_{\text{FY}1,0} + v_{\text{FY}1}t\cos\alpha, y_{\text{FY}1,t} = y_{\text{FY}1,0} + v_{\text{FY}1}t\sin\alpha, z_{\text{FY}1,t} = z_{\text{FY}1,0}$;
- 烟幕起爆位置: $x_{\text{FY}11,t_2} = x_{\text{FY}1,t_1} v_{\text{FY}1} \Delta t_{\text{delay}} \cos \lambda, y_{\text{FY}11,t_2} = y_{\text{FY}1,t_1} v_{\text{FY}1} \Delta t_{\text{delay}} \sin \lambda,$ $z_{\text{FY}11,t_2} = z_{\text{FY}1,t_1} \frac{1}{2}g\Delta t_{\text{delay}}^2;$
- 烟幕云团位置: $x_{\text{FY}11,t} = x_{\text{FY}11,t_2}$, $y_{\text{FY}11,t} = y_{\text{FY}11,t_2}$, $z_{\text{FY}11,t_2} = z_{\text{FY}11,t_2} v_1(t-t_2)$ $(t \in [t_2, t_2 + 20]s)$;
- 真目标圆柱面: $x_1^2 + (y_1 y_0)^2 = r_0^2$, $z_1 \in [0, h_0]$ $(y_0 = 200, r_0 = 7, h_0 = 10)$;
- 遮挡判断: $\Delta > 0$ 为遮挡, $\Delta < 0$ 为未遮挡。

步骤 2 决策变量网格化离散

对连续变量按固定步长离散,生成网格点:

- α : 步长 $\Delta \alpha = \pi/20$, 离散为 $\alpha_k = k \cdot \Delta \alpha \ (k = 0, 1, ..., 39)$;
- v_{FYI} : 步长 $\Delta v = 5\text{m/s}$, 离散为 $v_m = 70 + m \cdot \Delta v \ (m = 0, 1, ..., 14)$;
- t_1 : 步长 $\Delta t_1 = 0.5$ s, 离散为 $t_{1,n} = 0 + n \cdot \Delta t_1 \ (n = 0, 1, ..., 20)$;
- Δt_{delay} : 步长 $\Delta t_d = 0.5$ s,离散为 $\Delta t_{d,p} = 1 + p \cdot \Delta t_d \ (p = 0, 1, \dots, 8)$ 。

步骤 3 枚举所有离散解

构建所有决策变量网格点的组合, 生成离散解集合:

$$S = \{S_{k,m,n,p} = (\alpha_k, v_m, t_{1,n}, \Delta t_{d,p}) \mid k = 0, \dots, 39; \ m = 0, \dots, 14; \ n = 0, \dots, 20; \ p = 0, \dots, 8\}$$

总组合数为 $40 \times 15 \times 21 \times 9 = 113400$ 组。

步骤 4 计算每个解的 Δt

对任意 $S_{k,m,n,p}$, 按以下步骤计算 Δt :

- 算无人机投放位置: 代入 $t=t_{1,n}$ 、 $\alpha=\alpha_k$ 、 $v=v_m$,得 $(x_{\mathrm{FYl},t_1},y_{\mathrm{FYl},t_1},z_{\mathrm{FYl},t_1})$;
- 算烟幕起爆位置: $t_2 = t_{1,n} + \Delta t_{d,p}$,代入起爆位置公式,得 $(x_{\text{FY}11,t_2}, y_{\text{FY}11,t_2}, z_{\text{FY}11,t_2})$;

- 算烟幕实时位置: 对 $t \in [t_2, t_2 + 20]$ s(步长 0.1s),得 $(x_{\text{FYII},t}, y_{\text{FYII},t}, z_{\text{FYII},t})$;
- 真目标采样与遮挡判断: 在圆柱面取 50 个采样点,对每个 t 和采样点,验证 $\Delta \geq 0$ 是否成立;
- 统计 Δt : 合并遮挡时间区间,总时长即为该解的 Δt 。

步骤 5 筛选最优解

比较所有离散解的 Δt ,输出最大 Δt^* 及对应最优决策变量:

$$(\alpha^*, v_{\text{FY}1}^*, t_1^*, t_2^*) = \arg\max_{S_{k,m,n,p}} \Delta t(S_{k,m,n,p}).$$

步骤 6 局部精度优化

对 α^* 、 $v_{\rm FY1}^*$ 附近区域缩小步长(如 $\Delta\alpha=\pi/40$ 、 $\Delta v=2{\rm m/s}$),再次遍历,提升最优解精度。