

无人机投放烟幕干扰弹最佳路径策略

刘昊 张英婷 韦铸娥**

南宁学院信息工程学院, 南宁 530200

摘要 针对空地导弹对固定目标的精确打击威胁, 研究无人机投放烟幕干扰弹条件下的最优遮蔽策略。基于经典力学与空间几何关系, 建立导弹—无人机—烟幕云团的三维运动模型, 并构造以目标有效遮蔽时长为核心的定量评价判据。针对单枚干扰弹、单机多弹、多机协同及多导弹来袭等典型防御场景, 提出融合粗随机搜索、Nelder-Mead 连续优化与子模覆盖贪心算法的分层求解方法, 实现无人机航向与速度、干扰弹投放位置及延迟起爆时间的联合优化。结果表明, 在有限干扰弹数量约束下, 该方法可显著延长目标有效遮蔽时间, 在多机多导弹场景中获得近最优协同干扰方案, 兼顾计算效率与解的稳定性。所建模型具有良好的通用性与可扩展性, 可为复杂空防条件下烟幕干扰投放策略的规划与优化提供定量分析框架。

关键字 矢量运算, 贪心算法, Nelder-Mead 优化, 粗随机搜索

Optimal Path Strategy for Deploying Smoke Screen Countermeasures Using Drones

Liu Hao Zhang Yingting Wei Zhue**

College of Information Engineering, Nanning University,
Nanning 530200, China.

Abstract—This study addresses optimal screening strategies against precise air-to-ground missile attacks on fixed targets using UAV-deployed smoke-screen countermeasures. A three-dimensional kinematic model of missile, UAV, and smoke cloud motion is developed based on classical mechanics, with the effective screening duration as the evaluation criterion. For representative scenarios including single- and multi-munition deployment, multi-UAV cooperation, and multi-missile engagements, a hierarchical optimization method combining coarse randomized search, Nelder-Mead optimization, and a submodular greedy algorithm is proposed to jointly optimize UAV motion and munition deployment parameters. Results demonstrate that the proposed method significantly extends effective screening time under limited resources and achieves near-optimal cooperative interference performance while maintaining computational efficiency and solution stability.

Keywords—Vector operations, greedy algorithm, Nelder-Mead optimization, coarse random search

1 引言

制空权是引导整个战争局势走向的关键, 导弹空对地目标打击的精准度决定着绝对制空权, 近距空中支援是由支援飞机打击靠近己方部队的敌方目标, 实现支援地面作战的空中行动。核心目标是为地面部队提供及时、准确的火力支援^[1]。传统的近距空中支援作战模式以有人机为主, 但飞行员存在固有生理因素限制, 如精度估算、飞机操纵准确性、反应时间等因素, 大大影响了作战效果^[2]。针对无人机在精确投放任务中的自主引导问题, 相关领域专家学者提出了航路规划算法和轨迹跟踪控制技术相结合的算法模型。一般使用直觉模糊博弈^[3,4]、遗传算法^[5]、动态贝叶斯网络^[6]、影响图^[7]、滚动时域^[8,9], 以及近似动态规划^[10]等方法, 实现固定区域内的航路规划。但上述方法都存在一些局限性, 如直觉模糊博弈、影响图等都要求对自主引导问题的模型构建清晰而完整^[11]。这使得构

建自主引导问题模型变得极为复杂。

现通过无人机投放干扰弹策略进行防护, 干扰敌方导弹, 对目标起保护作用, 若是能够在无人机与干扰弹资源使用最少的情况下实现较长的遮蔽时间^[12], 则对于战争的优势将会有进一步提升。本文基于经典力学和优化算法, 提出了一种提升烟幕干扰效率的投放方案。通过构建数学模型, 利用贪心算法寻找烟幕弹干扰的最优地点和最优时间解, 并结合 Nelder-Mead 优化进行局部精化, 以实现投弹数量与遮蔽时效的平衡。

对于敌机袭击、无人机实际情况和烟幕弹作出如下假设: 具有长续航能力的无人机挂载某型烟幕干扰弹在特定空域巡飞, 受领任务后, 无人机投放烟幕干扰弹在来袭武器和保护目标之间形成烟幕遮蔽。每架无人机投放两枚烟幕干扰弹至少间隔 1 s。烟幕干扰弹脱离无人机后, 在重力作用下运动。烟幕干扰弹起爆后瞬时形成球状烟幕云团, 由于采用特定技术, 该

* ** 通讯作者: 韦铸娥 361762849@qq.com

烟幕云团以 3 m/s 的速度匀速下沉。据试验数据知,云团中心 10 m 范围内的烟幕浓度在起爆 20 s 内可为目标提供有效遮蔽。来袭武器为空地导弹,该型导弹飞行速度 300 m/s。导弹的飞行方向直指一个为掩护某半径 7 m、高 10 m 的圆柱形固定目标而专门设置的假目标。以假目标为原点,水平面为 xoy 平面,真目标下底面的圆心为 $(0, 200, 0)$ 。警戒雷达发现来袭导弹时,3 枚导弹 M1、M2、M3 分别位于 $(20000, 0, 2000)$ 、 $(19000, 600, 2100)$ 、 $(18000, -600, 1900)$;5 架无人机的位置信息分别为 FY1、FY2、FY3、FY4、FY5 分别于 $(17800, 0, 1800)$ 、 $(12000, 1400, 1400)$ 、 $(6000, -3000, 700)$ 、 $(11000, 2000, 1800)$ 、 $(13000, -2000, 1300)$ 。在导弹来袭过程中,通过投放烟幕干扰弹尽量避免来袭导弹发现真目标。无人机可根据需要瞬时调整飞行方向,以 70~140 m/s 的速度等高度匀速直线飞行。每架无人机的航向、速度可不相同,但一旦确定就不再调整。

根据上述假定情况,本文分别对以下问题进行求解:

问题 1 利用无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹实施对 M1 的干扰, FY1 以 120 m/s 的速度朝向假目标方向飞行,受领任务 1.5 s 后即投放 1 枚烟幕干扰弹,间隔 3.6 s 后起爆,计算烟幕干扰弹对 M1 的有效遮蔽时长。

问题 2 利用无人机 FY1 投放 1 枚烟幕干扰弹实施对 M1 的干扰,确定 FY1 的飞行方向、飞行速度、烟幕干扰弹投放点、烟幕干扰弹起爆点,使得遮蔽时间尽可能长。

问题 3 利用无人机 FY1 投放 3 枚烟幕干扰弹,实施对 M1 的干扰。制定烟幕干扰弹的投放策略。

问题 4 利用 FY1、FY2、FY3 等架无人机,各投放 1 枚干扰弹,实施对 M1 的干,求干扰弹的投放策略。

问题 5 利用 5 架无人机,每架无人机至多投放 3 枚烟幕干扰弹,实施对 M1、M2、M3 等 3 枚来袭导弹的干扰。给出烟幕干扰弹的投放策略^[13]。

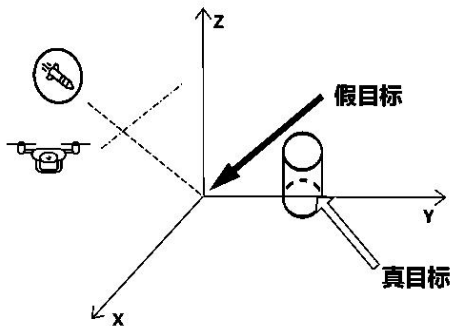


图 1 空间示意图

2 模型的建立与求解

2.1 问题 1 的模型与求解

根据问题 1 的情景和约束条件,敌机、无人机、真目标、假目标和烟幕弹的空间示意图如图 1 所示。

使用运动学公式进行求解。由图 1 得出如下运动方程。

导弹匀速直线运动飞向“假目标”,以假目标为原点,建立空间直角坐标系,所以导弹飞行的单位方向向量为: $d_M = \frac{0 - M_0}{|M_0|} = -\frac{M_0}{|M_0|}$ 。

故导弹轨迹方程为: $M(t) = M_0 + v_M t d_M (t \geq 0)$, 其中 $v_M = 300 \text{ m/s}$, M_0 为导弹初始位置。

同理,无人机等高匀速直线运动故可设运动方程为: $\vec{F}(t) = \vec{F}_0 + \vec{v}_F t \vec{d}_F (t \geq 0)$, 其中 $\vec{v}_F \in [70, 140]$, 与单位方向 $\vec{d}_F$ 固定, $\vec{F}$ 为无人机初始位置。

扰弹脱离后自由落体,设在 $t = t_d$ 时从 $\vec{F}(t_d)$ 投放,忽略阻力,干扰弹投放的瞬间继续保持一个与无人机相同的水平惯性速度,同时该点竖直方向上的速度为 0,设重力加速度 $g \approx 9.8 \text{ m/s}^2$,当弹体 $t \geq t_d$ 的弹道:

$$\vec{P}(t) = (x_d, y_d, z_d) + v_F (t - t_d) \vec{d}_F - \frac{1}{2} g (t - t_d)^2 \vec{e}_z,$$

其中 $(x_d, y_d, z_d) = \vec{F}(t_d)$, $\vec{e}_z = (0, 0, 1)$ 。

设起爆延迟为 Δ , 则起爆时间 $t_e = t_d + \Delta$, 起爆点: $\vec{P}_e = \vec{P}(t_e)$ 。

设轨迹函数为如下线性形式:

$$\vec{M}(t) = \vec{A} + \vec{b}t, \vec{C}(t) = \vec{E} + \vec{c}t \quad (t \in [t_e, t_e + 20]),$$

其中

$$\vec{A} = \vec{M}_0, \vec{b} = v_M \vec{d}_M, \vec{c} = (0, 0, -3),$$

$$\vec{E} = \vec{P} - \vec{c}t_e = (x_e, y_e, z_e + 3t_e).$$

令常量 $\vec{R}$, 定义: $\vec{U}(t) = \vec{R} - \vec{A} - \vec{b}t = \vec{u}_0 - \vec{b}t$,

$$\vec{V}(t) = \vec{C}(t) - \vec{A} - \vec{b}t = \vec{v}_0 + (\vec{c} - \vec{b})t,$$

其中 $\vec{u}_0 = \vec{R} - \vec{A}$, $\vec{v}_0 = \vec{E} - \vec{A}$ 。

$$\alpha(t) = \vec{U} \cdot \vec{U} = |\vec{u}_0|^2 - 2(\vec{u}_0 \cdot \vec{b})t + |\vec{b}|^2 t^2,$$

$$\begin{aligned} \beta(t) &= \vec{V} \cdot \vec{U} \\ &= \vec{v}_0 \cdot \vec{u}_0 + ((\vec{c} - \vec{b}) \cdot \vec{u}_0 - \vec{v}_0 \cdot \vec{b})t - ((\vec{c} - \vec{b}) \cdot \vec{b})t^2, \end{aligned}$$

$$\gamma(t) = \vec{V} \cdot \vec{V} = |\vec{v}_0|^2 + 2\vec{v}_0 \cdot ((\vec{c} - \vec{b})t) + |\vec{c} - \vec{b}|^2 t^2.$$

于是, $s^*(t) = \frac{\beta(t)}{\alpha(t)}, \delta_{line}^2(t) = \gamma(t) - \frac{\beta^2(t)}{\alpha(t)}$ 。

将数据带入模型,通过 Python 程序求解得到结果如图 2 所示。

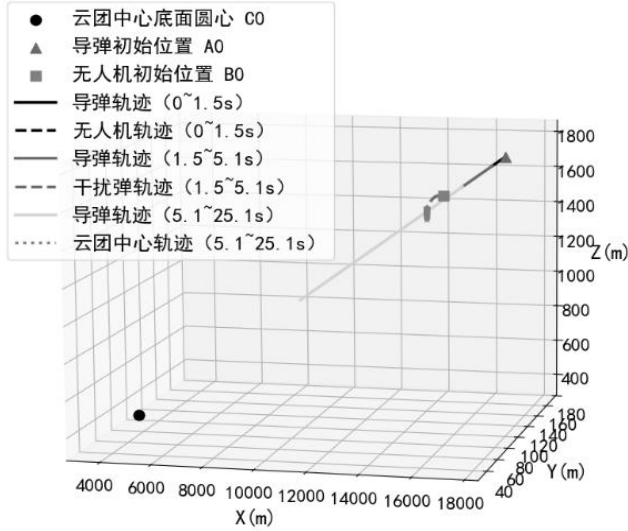


图 2 FY1 空间轨迹示意图

通过上述判定方法使用 Python 解得爆炸点内 $P_e \approx (17191.105, 0.000, 1674.922), t \in [5.10, 25.10]$ 的采样结果里,没有任何个时刻满足遮蔽判据,由图 2 可以看出,起爆时刻处的导弹——目标连线与云心的最近距离为 31.98m,云团的 $R=10$,故没有发生遮挡,当云团继续运动后,得到有效遮挡时间为 $t=1.3917s$,其余相关参数结果如表 1。

表 1 程序结果

相关参数	结果
导弹进入云团时刻	9.3892
导弹离开云团时刻	9.448
真目标完全遮挡时间	8.0564
完全遮挡总时间	1.3917

干扰弹与该直线的距离 $d=31.98m$,其中云团半径 $R=10$,由于爆炸后云团在水平方向仍继承一个原有的速度,此时平抛运动轨迹改变,变为斜直线运动,水平速度大于垂直速度,不难看出云团飞行轨迹与导弹飞行轨迹有交点,在干扰弹起爆后重新计时,9.38s 后导弹进入云团,9.44s 后云团越过云团,故有效遮挡时间 $t=1.39s$ 。

2.2 问题 2 的模型与求解

无人机 FY1 的飞行方向 d_F ,飞行速度 v_F ,投放时刻 t_d 与起爆时间 Δ 的最优组合方案,使得对来袭导弹 M1 的有效遮蔽总时长尽可能的长,具体建模和程序设计思路如图 3 所示。

Nelder-Mead 算法是求解多参数优化问题的搜索算法,适用于解决由多变量构成的目标函数的最小化问题^[14,15],是一种基于单纯性在无导数情况下进行局部搜索的直接方法^[16,17]。

本文实际计算得遮蔽时间段应该设定在 $[0, t_{hit}]$ 内。所以目标函数设定为:

$$\max imize J(\theta, v_F, t_d, \Delta) = total_time([t_e, t_e + 20] \cap [0, t_{hit}])$$

其中约束条件如下:

$$v_F \in [70, 140]; t_d \geq 0; \text{每枚干扰弹投弹间隔} \geq 1s;$$

$$\Delta \geq 0 (\Delta \text{上限最多设定为 } 20s); t_e \leq t_{hit};$$

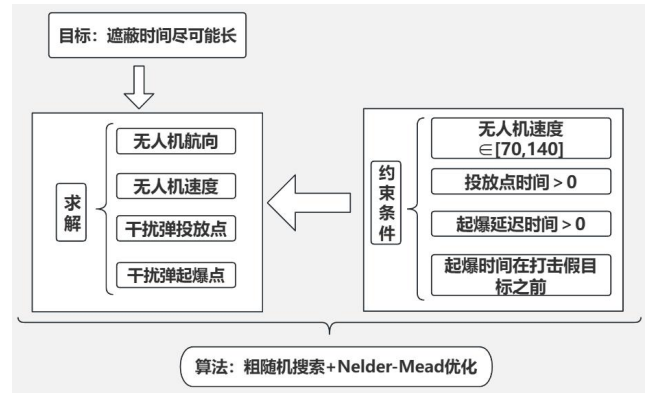


图 3 建模流程图

本文先依据以下约束条件通过做粗网格搜索快速定位候选区域:

- (1) θ 在 $[0, \arctan 0.1]$ 的网格点 (每 0.1°);
- (2) v_F 在 $[70, 140]$ 以步长 $5m/s$;
- (3) t_d 在 $[0, t_{hit}]$ 以步长 $0.5s$;
- (4) Δ 在 $[0, 20]$ 以步长 $0.5s$ 。

利用局部连续化精化候选选项,即对每个候选单独进行精化,通过 Nelder-Mead 对 x 进行精细化处理,记录每次迭代的最大 J 的值。其中真实的目标函数:

$$J = \int_0^{\min(t_e + 20, t_{hit})} I(t) dt。$$

由于连续性数据无法被计算机直接处理,对数据进行离散化处理,取时间网格 $t_i = t_e + i\Delta t, i = 0, \dots, N$, 则:

$$J \approx \sum_{i=0}^N I(t_i) \Delta t,$$

其中 $I(t_i)$ 通过在真目标的圆柱上做采样点集合 $\{R_j\}$ 来近似判断:

$$I(t_i) \approx 1(\exists j \text{ s.t. } s^*(t_i; R_j) \in [0, 1] \wedge \delta(t_i; R_j) \leq R_{cloud})。$$

当随着 $\Delta t \rightarrow 0$ 与圆柱采样密度 $\rightarrow \infty$ ，离散近似收敛到积分值，即具有数值一致性，故本文在数值实现中，将积分 $\int I(t)dt$ 用矩形法离散化为 $\sum I(t_i)\Delta t$ ，利用圆柱上等间距的网格布点近似连续成目标集合。

表 2 详细方案

相关参数	结果
FY1 飞行方向 θ	178.01°
FY1 飞行速度 v_F	96.50m/s
投放时刻 t_d	0.04s
延迟起爆时间 Δ	2.84s
投放点 P_0	(17796.49, 0.12, 1800)
起爆点 P_e	(17522.66, 9.64, 1760.50)

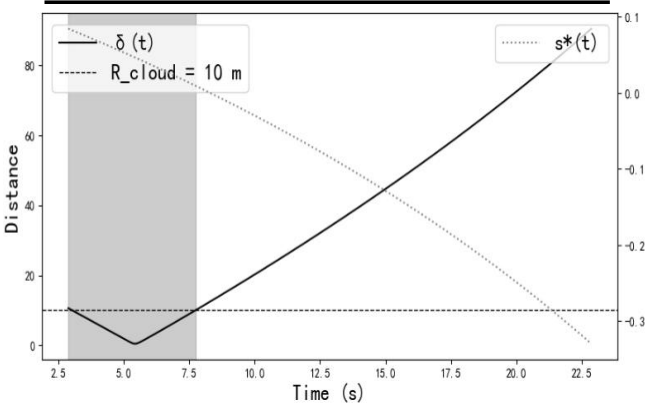


图 4 $\delta(t)$ 与 $s(t)$ 判据随时间变化曲线

带入数据后，得到最长遮蔽时间为 4.88s，具体结果如表 2。

通过粗随机搜索检索到最大遮蔽时长为 3.0s，经过 Nelder-Mead 精化得到最大遮蔽时长为 4.9s，在 $\pm 5^\circ$ 鲁棒性检验下综合判断得出：最小 0.00s，最大 4.88s，平均 1.82s。由图 4 可以看出，灰色区域为干扰区，时间大致在 (2.5s, 8s) 之间，无人机出发时开始投弹，这时导弹与真目标采样点连线与云团所形成的遮蔽点随时间的增大而增多，大概 5s 之后，部分连线穿过云团中心开始外移，这时连线与云团的遮蔽点逐渐减少直至消失，详细结果见上述表 2。

2.3 问题 3 的模型建立与求解

通过初始数据参数：导弹与无人机初始位置，无人机速度、方向以及干扰弹的投放地点和起爆延迟，计算轨迹，将生成轨迹进行生成模块化处理，进而对遮蔽时间进行判定，核心优化模块通过粗网格搜索与 Nelder-Mead 精化求解最优策略，最终可视化输出结果。

通过问题 2 中建立的模型，不难发现，在其他条件不变的情况下，继续粗随机搜索相同的区域，并取三次投掷干扰弹最大遮蔽时间。本文建立如下求解过程：

令每枚干扰弹在 i 次时刻投放为 $t_{d,i}$ ，起爆延迟为 Δ_i ，起爆时刻 $t_{e,i} = t_{d,i} + \Delta_i$ ，爆炸点 $P_{e,i}$ ，所以对于某一时刻 t 的值，定义指示函数为：

$$I_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{若云} i \text{在时刻} t \text{能遮蔽真目标} \\ 0, & \text{其他结果} \end{cases}$$

求目标最大化为： $J(\theta, v_F, \{t_{d,i}, \Delta_i\}_{i=1}^3) = \int_0^{t_{\max}} I(t)dt$ 。

为方便数值计算，将目标函数离散化为 $J \approx \sum_k I(t_k)\Delta t$ 。约束条件与问题 2 相同。

在有限区域内对无人机航向 θ 和速度 v_F 做随机网格采样，随机搜索法是一维搜索法，先确定一个大致的范围，然后随机对这个范围内的点进行比较，设定一个迭代次数的上限^[18]。如果在迭代次数的范围内找到最优值，则终止迭代，对每个无人机进行贪心顺序放置三枚干扰弹，第一枚在 (θ, v_F) 得粗网格上搜索使得求得 J 最大^[19, 20]，使用粗布网格与粗圆柱采样可有效提升运算速率，保证在投弹间隔在大于 1s 的前提下，第 2、3 枚分别搜索能最大提升总体 J 的 (t_d, Δ) ，尽量保证每次评估都可以联合遮蔽，在第一枚干扰弹的粗搜索中保留最优的候选项，对最好的候选使用 Nelder-Mead 对所有 6 个时间变量 $(t_{d,1:3}, \Delta_{1:3})$ 做局部精化，这时固定无人机航向与飞行速度，用细时步和密圆柱采样对最终方案做高精度验证并输出表 3 结果。

基于前述模型计算结果，表 3 给出了三枚烟雾干扰弹在统一飞行工况下的最优投放与起爆方案。从图 5、图 6 可以观察到，无人机在三次投放过程中均保持近似正南方向 179.36° 以及恒定速度 115 m/s 飞行，投放高度固定在 1800 m。在时间性能方面，三枚干扰弹的有效干扰时长依次为 3.07 s、1.37 s 和 0.83 s，呈现明显递减趋势。这种有效时长的下降并不意味着后续干扰弹性能不足，而是高速突防条件下相对运动关系的直接体现。

表 3 单架无人机(三枚干扰弹)投弹策略

干扰弹编号	干扰弹1	干扰弹2	干扰弹3
无人机方向	179.36	179.36	179.36
无人机速度m/s	115	115	115
投放点的x坐标	13200.29	12740.32	12280.35
投放点的y坐标	51.68	56.85	62.02
投放点的z坐标	1800	1800	1800
起爆点的x坐标	12280.35	11705.38	11475.4
起爆点的y坐标	62.02	68.48	71.06
起爆点的z坐标	1486.4	1403.1	1559.9
干扰时长 (s)	3.07	1.37	0.83

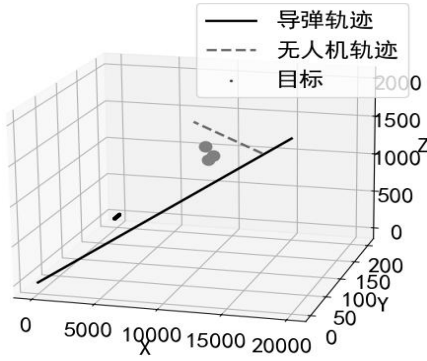


图 5 FY1 3 枚投弹轨迹示意图

2.4 问题 4 的模型汇总与求解

在问题二的基础之上，增加两台新无人机 FY2、FY3，通过制定无人机的飞行航线、飞行速度、投弹时间以及起爆位置，使得干扰弹对 M1 的遮蔽时长最长。工程上常用的模态分析方法有 Hozel-Mycklested 法、振型叠加法、传递矩阵法等，然而据此得到的导弹结构动特性与试验结果往往有显著差异。

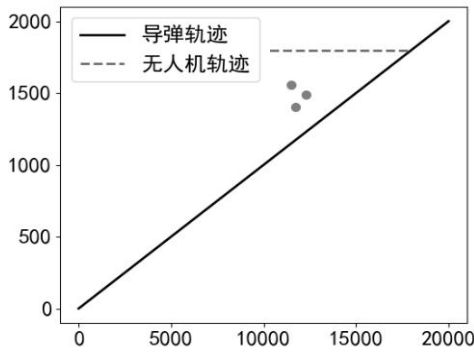


图 6 平面 xOZ 示意图

随着理论和数值计算方法的发展，导弹的模型修正技术成为众多动力学分析方法中的一个关键技术^[21]。本文延续使用离散化候选池+贪心算法+局部连续精化结构，每个元素用向量化方法预计算其在粗时间网格上的遮蔽向量，贪心算法的每次选择能带来最大新增遮蔽时间元素，Nelder-Mead 精化目标用细时间网格与更密的圆柱点进行高精度评估，对每个贪心元素做小幅度扰动再精化，选最优者最为求解结果，这种方法避免了局部优解对于全局解的干扰。

云团在时刻 t 对目标点 R 的遮蔽判断为：

$$\Pi_{i,k}(t;R) = 1(0 \leq s^*(t;R) \leq 1 \wedge \delta^2(t;R)R_{cloud}^2),$$

其中所有依赖于 $C_{i,k(t)}$ 与 $M(t)$ 。云团联合遮蔽指示为： $1_{masked}(t) = 1(\exists R \in R, \exists i,k : \Pi_{i,k}(t;R) = 1)$ 。

由于本次有 3 架无人机，遮蔽集是多云团并集，为保证目标集合函数 J 依然是单调且对应元素等于候

选云团子模，定义离散覆盖函数： $\tilde{J}(S) = \Delta t \cdot \left| \bigcup_{x \in S} A_x \right|$ 。

这个结果是单调且子模的，所以在离散候选池上对规模采用贪心算法保证给出 $(1 - \frac{1}{e})$ 的近似，故三个无人机本质上只是把候选机扩大成三组来自不同源的候选。带入数据，本文通过 Python 程序计算结果如表 4 所示。

由图 7 不难看出，无人机 FY1、FY2 与 FY3 的投掷轨道均在导弹 M1 附近，干扰弹投掷分布较为合理，综合遮蔽时间高达 15.02s。

由表 4 得出，UAV1 的行角为 0° 且是在投放瞬间起爆 $\Delta = 0$ ，烟幕云团在导弹飞行早期迅速形成，形成第一段遮蔽区间，UAV2 航角 225° 起爆延迟 $\Delta = 8$ ，起爆位置位于导弹航迹侧向区域，该阶段遮蔽有效填补了 UAV1 遮蔽结束后的时间空隙，确保效果在时间轴上的连续性。

表 4 无人机投弹策略

无人机编号	FY1	FY2	FY3
运动方向	0	255	135
运动速度 (m/s)	70	93.33	93.33
投放点x坐标	17940	11142.04	3492.13
投放点y坐标	0	542.04	-492.13
投放点z坐标	1800	1400	700
起爆点x坐标	17940	10614.07	2832.16
起爆点y坐标	0	14.07	167.84
起爆点z坐标	1800	1086.4	210
有效干扰时长	3.28	3.7	8.04

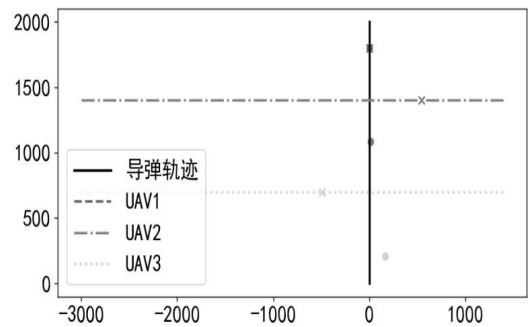


图 7 Y-Z 平面投影图

UAV3 的航角为 135° ，飞行方向与 UAV2 形成对称分布其起爆位置距目标较近，在导弹末段飞行钟起到遮蔽作用，最终形成 8.00s 遮蔽时间，是本次协同干扰的关键组成部分。

2.5 问题 5 的模型汇总与求解

问题五将无人机投入量扩大至 5 架且每架无人机

投弹数量最多增加为 3 枚，以此来应对来自三个不同方位的导弹 M1、M2、M3。本文结合问题 3 和问题 4 的最大遮蔽时长的优化目标： $\max J(\{t_{d,i}, \Delta_i, \theta_i, v_{F,i}\})$ 。本文设定遮蔽时长目标值，即认为遮蔽时长大于目标值后，干扰弹数量使用最少的为最佳策略： $\min N \text{ s.t. } J \geq J_{req}$ 。通过上述转换，将最大化连续函数转变为带整数变量的优化问题，其问题本质就为组合优化与连续优化的混合问题。

将模型构建过程分为两个阶段：

阶段一：先使用问题 4 的模型，在加入无人机 FY4、FY5 的情况下求出最多干扰弹的最大时长 $J_{\max}$ 。

阶段二：通过设定一个合理的阈值，然后逐步减少干扰弹数量，检查能否达到要求，即先用所有的候选投弹，减少一个的候选投弹，再至减少 N 个的候选弹数，每次迭代都重新做一轮交换，直到恰好达到目标设定。将数据与条件带入得，求解得到结果如表 5—9 所示。

表 5 FY1 投放策略

方案	烟幕干扰弹1	烟幕干扰弹2
投放点x坐标 (m)	17639.79	12477.66
投放点y坐标 (m)	6.29	-388.03
投放点z坐标 (m)	1800	1800
起爆点x坐标 (m)	17322.76	11450.16
起爆点y坐标 (m)	18.74	-462.94
起爆点z坐标 (m)	1722.93	987.39
有效干扰时长 (s)	3.40	2.65
干扰的导弹编号	M1	M1

表 6 FY2 投放策略

方案	烟幕干扰弹1	烟幕干扰弹2
投放点x坐标 (m)	5710.8	5623.67
投放点y坐标 (m)	230.9	214.7
投放点z坐标 (m)	1400	1400
起爆点x坐标 (m)	4136.9	4085.15
起爆点y坐标 (m)	-61.67	-71.3
起爆点z坐标 (m)	260.98	311.62
有效干扰时长 (s)	0.71	0.94
干扰的导弹编号	M2	M1

表 7 FY3 投放策略

方案	烟幕干扰弹1	烟幕干扰弹2
投放点x坐标 (m)	2852	2656.81
投放点y坐标 (m)	-701.8	-599.29
投放点z坐标 (m)	700	700
起爆点x坐标 (m)	1804.9	1581.64
起爆点y坐标 (m)	62.63	225.64
起爆点z坐标 (m)	212.65	186.2
有效干扰时长 (s)	8.45	3.9
干扰的导弹编号	M3	M1

表 8 FY4 投放策略

方案	烟幕干扰弹1	烟幕干扰弹2
投放点x坐标 (m)	11312	11334.57
投放点y坐标 (m)	1137.5	1144.12
投放点z坐标 (m)	1500	1500
起爆点x坐标 (m)	10309	10309.14
起爆点y坐标 (m)	846.11	846.11
起爆点z坐标 (m)	665.62	665.62
有效干扰时长 (s)	0.44	0.43
干扰的导弹编号	M2	M2

表 9 FY5 投放策略

方案	烟幕干扰弹1	烟幕干扰弹2
投放点x坐标 (m)	5962.9	4981.35
投放点y坐标 (m)	-494.9	-128.93
投放点z坐标 (m)	1000	1000
起爆点x坐标 (m)	4864.58	3812.1
起爆点y坐标 (m)	-85.1	306.99
起爆点z坐标 (m)	389.4	307.92
有效干扰时长 (s)	0.95	1.95
干扰的导弹编号	M3	M1

通过图 10 可以看出五架无人机得投弹均尽可能多的分布在三个导弹的路线附近，尽可能进行多覆盖遮挡，得到最优组合策略为五架无人机各投弹两枚，共计十枚，总遮挡时间 23.820s，具体投弹地点和延迟引爆时间见上表。

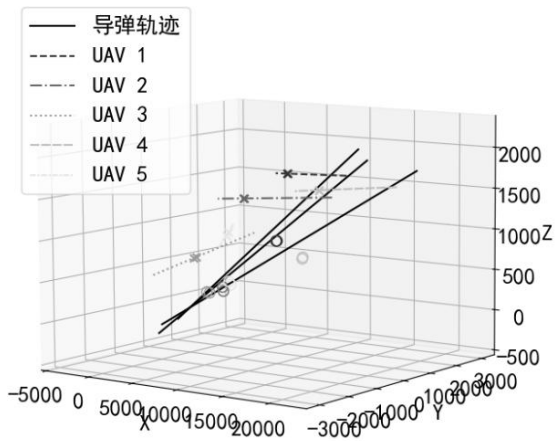


图 10 FY1-FY5 空间轨迹示意图

从单弹精化结果可以看出，有效遮蔽时间几乎全部由 UAV 3 与 UAV 5 的个别投弹贡献，UAV 3 的两枚干扰弹分别产生了 12.35s 与 2.90 s 的遮蔽时间，合计超过 15 s，UAV 5 的第二枚干扰弹在中后段形成了 1.95 s 的有效遮蔽，其余无人机（UAV 1、UAV 2、UAV 4）的投弹虽然在几何上接近导弹航迹，但在精化判据下未能形成实际遮挡。这说明在当前参数组合下，遮蔽效果高度依赖于“投弹一起爆—云团运动”与导弹视线的时空耦合关系，而非单纯的靠近导弹航迹，

以进一步提升模型准确率^[22]，使模型具有较强的现实意义与应用价值^[23]。

3 结束语

本文围绕无人机防御场景构建了较为精细的烟幕干扰投放模型，并在空间向量框架下综合运用了粗随机搜索与Nelder-Mead优化等多种算法，使“投弹一起爆一遮蔽”的关键环节得以在复杂条件中稳定地求解。该模型在精准度、适应性取得了较好的平衡。需要指出的是本文的研究仍建立在若干理想化假设之上，忽略了真实战场环境中的风场扰动、对抗双方策略博弈等因素。未来可在此基础上进一步引入随机扰动与不确定性分析，使模型更贴近实际作战需求。

参 考 文 献

- [1] 张明明,魏屹,万鸣,等. 近距空中支援作战对武器弹药的需求研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(02): 440-447.
- [2] 张明明,万鸣,余伏章,等. 基于自主攻击技术的无人机近距空中支援作战研究[J]. 火力与指挥控制, 2025, 50(11): 196-202.
- [3] 李世豪,丁勇,高振龙. 基于直觉模糊博弈的无人机空战机动决策[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(05): 1063-1070.
- [4] 李世豪. 复杂空战环境下基于博弈模型的无人机机动决策方法研究[D]. 南京航空航天大学, 2019. DOI: 10.27239/d.cnki.gnhhu.2019.000327.
- [5] 邓可,彭宣淇,周德云. 基于矩阵对策与遗传算法的无人机空战决策[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(12): 61-66+71.
- [6] 孟光磊,罗元强,梁宵,等. 基于动态贝叶斯网络的空战决策方法[J]. 指挥控制与仿真, 2017, 39(03): 49-54.
- [7] 董彦非,申洋,张恒喜. 空战机动决策中的影响图方法[J]. 电光与控制, 2001, (01): 49-53.
- [8] 傅莉,谢福怀,孟光磊,等. 基于滚动时域的无人机空战决策专家系统[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(11): 1994-1999. DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2014.0726.
- [9] 付昭旺,李战武,强晓明,等. 基于滚动时域控制的战斗机空战机动决策[J]. 电光与控制, 2013, 20(03): 20-24+29.
- [10] 黄长强,赵克新,韩邦杰,等. 一种近似动态规划的无人机机动决策方法[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(10): 2447-2452.
- [11] 张堃,李珂,邹杰,等. 基于深度迁移强化学习的无人机投放自主引导机动控制算法[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 103-110. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.014.
- [12] 赵鑫. SDN高效安全链路发现及控制器优化部署[D]. 大连理工大学, 2018.
- [13] 朱卓,刘琦妍,张策. 基于遗传算法的自主干扰决策方法[J]. 中国民航大学学报, 2023, 41(04): 58-64.
- [14] 隋鑫,张迪,马志赛,等. 基于Nelder-Mead和遗传算法的结构动力学模型修正分析[J]. 强度与环境, 2025, 52(02): 41-47. DOI: 10.19447/j.cnki.11-1773/v.2025.02.006.
- [15] 牛洁,薄景山,王福昌,等. 基于Nelder-Mead单纯形算法的设计反应谱标定方法[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(05): 165-175. DOI: 10.13197/j.eceev.2021.05.165.niuj.016.
- [16] 牛洁. 震级和震中距对黄土场地设计反应谱的影响[D]. 防灾科技学院, 2021. DOI: 10.27899/d.cnki.gfzkj.2021.000009.
- [17] 凌建洋. 化工流程分析与优化系统的开发及应用[D]. 青岛科技大学, 2021. DOI: 10.27264/d.cnki.gqdhc.2021.000010.
- [18] 刘紫亮,居翔,张永芳,等. 基于改进随机搜索算法的随机森林调参优化[J]. 网络安全技术与应用, 2022, (04): 49-51.
- [19] 管雪梅,何中生,杨渠三. 基于改进随机森林回归模型的木材染色配方预测研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(06): 231-237.
- [20] 张石,郑东健,陈卓研. 基于改进PSO-RF算法的大坝变形预测模型[J]. 水利水电科技进展, 2022, 42(06): 39-44.
- [21] 李炳蔚,戴新进,王亮. 基于多目标优化算法的导弹动力学模型修正技术[J]. 强度与环境, 2012, 39(06): 30-35.
- [22] 梁国际,刘兰华. 基于深度学习的玉米异常果穗智能筛分方法[J]. 计算机技术与教育学报, 2022, 10(5): 18-23.
- [23] 刘兰华,蓝凡立,梁国际. 基于EfficientNet的异常驾驶行为识别方法[J]. 计算机技术与教育学报, 2022, 10(2): 135-140.