

引用格式: 李高星, 方胜良, 范有臣, 等. 基于电磁网格的路径规划算法研究[J]. 信息对抗技术, 2025, 4(5): 89-96. [LI Gaoxing, FANG Shengliang, FAN Youchen, et al. Path planning algorithm based on electromagnetic grid[J]. Information Countermeasure Technology, 2025, 4(5): 89-96. (in Chinese)]

# 基于电磁网格的路径规划算法研究

李高星<sup>1</sup>, 方胜良<sup>1\*</sup>, 范有臣<sup>1</sup>, 张 驰<sup>2</sup>

(1. 航天工程大学航天信息学院, 北京 101416; 2. 北京大学前沿交叉学科研究院, 北京 100871)

**摘要** 在现代军事与民用领域, 无人飞行器路径规划技术面临复杂电磁环境的严峻挑战, 如威胁区域动态分布、传统算法难以平衡安全性与效率、三维空间建模精度不足等。针对上述问题, 提出一种基于电磁网格的改进 A\* 路径规划算法。电磁网格依托 GeoSOT-3D 框架对电磁环境进行多维精细化建模, 支持多源信息的动态融合, 为路径规划提供高精度环境表征。该算法在传统 A\* 算法的基础上, 引入概率因子重构损失函数, 以雷达探测概率量化威胁代价, 结合三维对角距离优化启发式搜索, 实现了路径长度、安全性与计算效率的动态平衡。实验结果表明: 相比传统 A\* 算法, 所提方法规划的路径可使威胁区网格数减少 46.94%, 计算效率提升 36.97%; 且支持通过调节危险系数适配不同任务需求。该研究为复杂电磁环境下无人飞行器作战任务提供了高鲁棒性的路径规划解决方案。

**关键词** 电磁网格; A\* 算法; 路径规划

中图分类号 TN 97

文章编号 2097-163X(2025)05-0089-08

文献标志码 A

DOI 10.12399/j.issn.2097-163x.2025.05.007

## Path planning algorithm based on electromagnetic grid

LI Gaoxing<sup>1</sup>, FANG Shengliang<sup>1\*</sup>, FAN Youchen<sup>1</sup>, ZHANG Chi<sup>2</sup>

(1. School of Space Information, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Academy for Advanced Interdisciplinary Studies, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract** In modern military and civilian fields, UAV path planning in complex electromagnetic environments encounters severe challenges, such as dynamic distribution of threat areas, difficulty in balancing safety and efficiency with traditional algorithms, and insufficient accuracy in three-dimensional spatial modeling. To address these issues, an improved A\* path planning algorithm based on electromagnetic grid was proposed. Relying on the GeoSOT-3D framework, the electromagnetic grid conducts multi-dimensional and refined modeling of the electromagnetic environment, supports the dynamic fusion of multi-source information, and provides high-precision environmental representation for path planning. On the basis of the traditional A\* algorithm, this algorithm introduces a probability factor to reconstruct the loss function, quantifies the threat cost using radar detection probability, and combines 3D diagonal distance to optimize heuristic search, thereby achieving a dynamic balance among path length, safety, and computational efficiency. Experimental results show that compared with the traditional A\* algorithm, the proposed method reduces the number of threat area grids by 46.94% and improves computational efficiency by

36.97%；它 also supports adaptation to different task requirements by adjusting the danger coefficient. This study provides a highly robust path planning solution for UAV combat missions in complex electromagnetic environments.

**Keywords** electromagnetic grid; A\* algorithm; path planning

## 0 引言

随着无人飞行器在军事侦察、灾害救援等领域的广泛应用,复杂电磁环境下的三维路径规划技术已成为提升任务成功率的关键。特别是在复杂电磁环境下,无人飞行器需要高效、安全地完成侦察、打击、救援等任务,这让其路径规划在现代军事和民用领域中的重要性愈发凸显。然而,传统路径规划算法在处理动态威胁区域、三维空间建模等方面存在明显不足,难以满足现代无人飞行器任务的需求。现代战场中,雷达、通信干扰等多源威胁动态分布,传统路径规划算法通常将威胁区域简化为绝对禁区,虽然在一定程度上保障了基础安全性,却严重损失了路径灵活性与规划效率<sup>[1-4]</sup>。

尽管围绕 A\* 算法改进的研究已取得一定进展,例如文献[5-6]通过融合启发式函数提升轨迹平滑性,文献[7-8]引入代价通行机制以允许有限穿越威胁区,但这些方法仍存在显著局限:一是威胁区代价模型多依赖经验权重,未定量关联雷达探测概率、电磁干扰强度等动态环境参数;二是算法普遍局限于二维空间,难以适应城市峡谷、低空突防等三维场景的精细化需求;三是传统启发函数以欧氏距离为主导,在复杂电磁环境中易陷入局部最优,导致计算效率与安全性难以平衡。

电磁网格剖分和 A\* 路径规划算法是无人飞行器路径规划领域的 2 个重要方向:A\* 算法作为一种广泛应用的启发式搜索算法,在路径规划中展现出优异的性能;而电磁网格剖分通过对电磁环境进行精细化建模,为路径规划提供高精度的环境表征。目前,已有研究致力于将电磁环境建模与无人飞行器路径规划相结合:文献[9]提出基于电磁场强度的路径规划方法,通过建立电磁场模型来指导无人飞行器避开高电磁威胁区域;文献[10]则利用全球多尺度剖分网格框架 GeoSOT-3D (geographic coordinate subdividing grid with three dimension integral coding on 2<sup>n</sup>-tree) 对电磁环境进行建模,为无人飞行器路径规

划提供了高精度的环境表征。然而,这些研究大多局限于二维空间,难以满足复杂三维场景的需求。针对上述问题,本文提出一种基于电磁网格的改进 A\* 三维路径规划算法:通过 GeoSOT-3D 网格框架对电磁环境进行多尺度建模,融合雷达探测概率、频谱占用率等多源数据,构建动态威胁场;在此基础上,设计融合三维对角距离与威胁概率的自适应代价函数,利用概率因子动态调节路径长度与安全性的权重,并结合二十六邻域搜索策略优化节点扩展效率。实验表明,该方法在威胁规避精度与计算实时性上均优于传统算法。

## 1 基础理论

### 1.1 电磁网格剖分

电磁网格作为一种新型环境建模方法,其核心在于通过多尺度、多维度的网格化表征,实现对复杂电磁环境的高效建模与动态感知。本文基于 GeoSOT-3D,将地球空间(经度、纬度、高度)按 2<sup>n</sup> 规则进行递归剖分,形成三维八叉树网格结构,如图 1 所示。

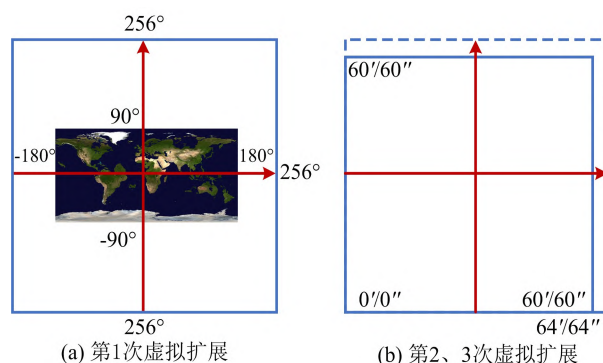


图 1 3 次虚拟扩展示意图

Fig. 1 Schematic diagram of three virtual expansions

具体而言,首先,对地理坐标系(CGCS2000)下的空间维度进行 3 次虚拟扩展:经度扩展至 512°、纬度扩展至 512°、高度扩展至 80 000 km;随后,逐级剖分为均等的立方体网格单元。这种剖分方式不仅解决了传统经纬度网格在极区和高

空区域的形变问题,还通过八进制编码(如 G002620644460460)实现全球空间的无缝索引,为电磁环境数据的标准化存储与快速检索奠定基础。电磁网格建模的优势体现在 3 个方面:

1) 多维数据融合能力。各网格单元可集成时空属性(如图 2 所示的某地网格第 63 层级时间编码 T9506855360376340484)、电磁场强度、雷达探测概率、频谱占用率等多源数据,通过张量化建模形成动态电磁态势场。

2) 动态环境适应性。网格支持层级化剖分(如图 2 第 15 级网格对应 8'分辨率),可根据任务需求动态调整建模精度——低层级网格(如第 12 级)适用于全局路径粗规划,高层级网格(如第 18 级)支持局部威胁精细化规避。

3) 计算效率优化。八叉树结构天然支持快速邻域搜索与数据聚合,例如,无人飞行器在规划路径时,仅需加载相邻网格的电磁威胁数据,

避免全局环境建模的计算开销。

以图 2 中网格为例,其第 15 级网格(8'分辨率)中存储了实时频谱序列、雷达回波强度及电磁干扰分布信息。当无人飞行器途经该区域时,算法可通过网格编码快速调用对应位置的电磁威胁概率,并结合高度维数据(如低空建筑物雷达遮蔽效应)动态调整飞行路径。这种“数据—网格—决策”的闭环建模机制,使得电磁网格成为复杂电磁环境下无人飞行器路径规划的理想载体。

本文的电磁网格是基于 GeoSOT-3D 对电磁信息进行网格离散化处理的。GeoSOT-3D 是基于  $2^n$  三维整型数组的全球经纬剖分网格,其核心思路为:采用 CGCS2000 国家大地坐标系的地理参考框架及参考椭球参数,对地球经度、纬度、高度方向进行 3 次空间虚拟扩展,随后逐步规则剖分,最终形成三维的八叉树网格空间<sup>[10]</sup>,如图 3 所示。

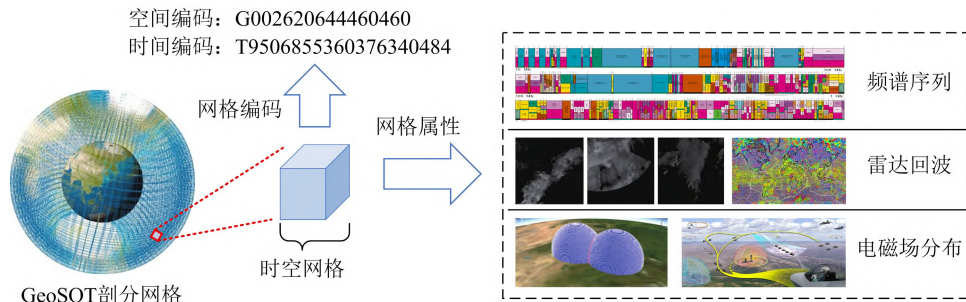


图 2 电磁网格示意图

Fig. 2 Schematic diagram of electromagnetic grid

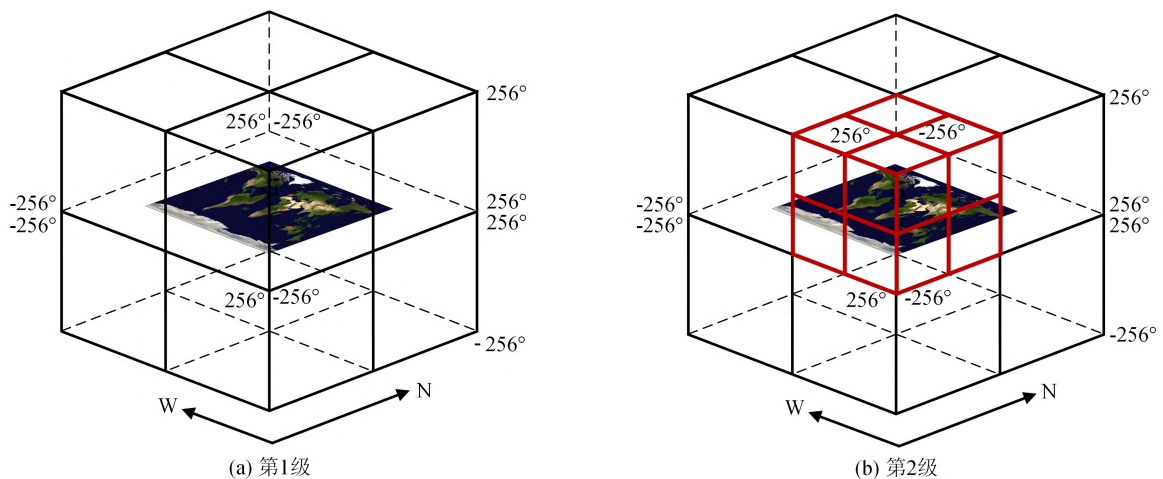


图 3 剖分示意图

Fig. 3 Schematic diagram of subdivision

电磁网格以 GeoSOT-3D 为基本单位,针对不同类型的电磁对象,进行电磁信息网格填充。针对点对象,其电磁网格由网格空间的三维位置、网格时间、网格属性组成,各网格中存储着经过建模算

法后形成张量化的各类电磁信息<sup>[9]</sup>。如图 2 中某地地理位置坐标为(39°51'N, 116°18'E, 0 m),若采用 15 层级网格表达,则对应的空间八进制编码为 G002620644460460;时间对应“2014-05-11T10:21:

50.000002”,其对应的 63 层级多尺度时间十进制编码为 T9506855360376340484。以上为网格的时空位置信息描述;假设在此刻计算得到的电磁信息包含频谱序列数据、雷达回波、电磁场分布信息。

## 1.2 A\* 路径规划算法

A\* 算法是一种启发式搜索算法,广泛应用于路径规划。通过融合 Dijkstra 算法的优点和贪婪最佳优先搜索的启发式方法,A\* 算法在效率和效果上均表现优异。其使用损失函数  $f(n)$  来指导搜索过程,即:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中, $g(n)$  为从起点到节点  $n$  的实际代价, $h(n)$  为从节点  $n$  到目标节点的估计代价。 $h(n)$  为启发式估计,通常使用曼哈顿距离、欧氏距离和对角线距离,其算法步骤分为 3 步:初始化、循环搜索和路径重构。在初始化阶段,创建 OpenSet 表和 CloseSet 表,OpenSet 表初始时仅包含起点,CloseSet 表初始为空;同时,设置  $g(n)$  为 0, $f(n) = g(n) + h(n)$ 。在循环搜索阶段,将起点放入 CloseSet 表,并将起点作为父节点不断搜索相邻节点放入 OpenSet 表,取 OpenSet 表中  $f(n)$  最小的节点放入 CloseSet 表并将该节点更新为起点,重复往返直至到达终点。在路径重构阶段,从目标节点回溯到起点得到完整路径<sup>[11]</sup>。

## 2 方法设计

本文对威胁区空间利用建模算法进行离散化时空建模,并且采用改进的算法在网格空间中进行路径规划任务,提出飞行器在雷达探测威胁区的网格图概率 A\* 路径规划算法。

### 2.1 网格距离定义

为更加适应网格条件下飞行器在有威胁区域飞行路径规划场景,重新定义网格下距离表示方法:任取三维网格空间中的 2 个网格  $m$  和  $n$ ,其坐标分别为  $(x_m, y_m, z_m)$  和  $(x_n, y_n, z_n)$ 。定义 2 个网格在经度、纬度、高度 3 个维度之间相差的网格数依次为  $d_x, d_y, d_z$ ,对其从小到大排序,排序结果为  $d_{\delta_1}, d_{\delta_2}, d_{\delta_3}$  ( $d_{\delta_1} < d_{\delta_2} < d_{\delta_3}$ )。由于飞行器在三维网格空间中向二十六邻域移动,以网格体块之间间隔的体块数量来表示距离的话,则网格体块的距离表示方式共有 3 种:在面相邻体块之间的网格体块距离为 1;在边相邻体块之间的网格体块距离为  $\sqrt{2}$ ;在角相邻体块之间的网格体

块距离为  $\sqrt{3}$ 。因此,飞行器向相邻网格移动的距离的取值集合为  $\{\sqrt{3}, \sqrt{2}, 1\}$ ,网格距离定义和邻域移动如图 4 所示。

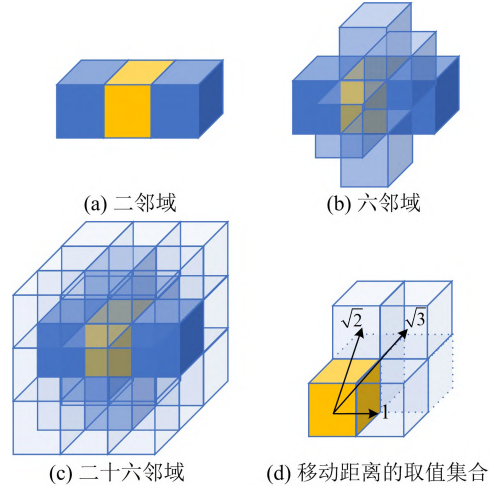


图 4 邻域移动示意图

Fig. 4 Diagram of neighborhood movement

令  $D_{Dis, \min}(m, n)$  表示  $m$  和  $n$  间最短距离,通常被称作三维空间中的对角距离,其表达式为:

$$\begin{cases} D_{Dis,1} = (\sqrt{3} - 3) \times d_{\delta_1} \\ D_{Dis,2} = (\sqrt{2} - 2) \times (d_{\delta_2} - d_{\delta_1}) \\ D_{Dis,3} = d_{\delta_1} + d_{\delta_2} + d_{\delta_3} \\ D_{Dis, \min}(m, n) = \sum_{i=1}^3 D_{Dis,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $D_{Dis,3}$  是网格  $m$  到网格  $n$  的曼哈顿距离。计算传统的 A\* 算法的启发式函数  $h(n)$  通常是 2 个网格之间的欧式距离或曼哈顿距离。相比于欧式距离代价, $D_{Dis, \min}(m, n)$  更接近网格的实际代价,而且代价更低,因此概率 A\* 算法选择三维空间中的对角距离作为启发式函数。

### 2.2 基于网格的路径规划 A\* 算法改进

基于 2.1 节的距离定义,提出一个新的损失函数  $F_{PA^*}$ ,其中不但包含了距离信息,还包含了雷达探测概率信息,使得飞行器在进行路径规划时,可考虑距离和安全性的综合影响,其表达式为:

$$\begin{cases} F_{PA^*} = G_{PA^*}(P_N, \alpha) + H_{PA^*}(P_N, \alpha) \\ G_{PA^*}(n, \alpha) = l(P(n))^{1-\alpha} g^\alpha(n) \\ H_{PA^*}(n, \alpha) = l(p(n))^{1-\alpha} h(n) \\ l(x) = 1 - \ln(1 - x) \\ h(n) = D_{Dis, \min}(n, t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $G_{PA^*}(P_N, \alpha)$  表示提出的代价函数,

$H_{PA^*}(P_N, \alpha)$ 表示提出的启发函数;  $p(n) = p_n$ , 表示飞行器在网格  $n$  处被雷达探测到的概率;  $P(n) = 1 - \prod_i^n (1 - p_i)$ ,  $i$  为起始网格。由于  $p_i$  是在网格  $n$  被雷达探测到的概率, 因此  $1 - p_i$  是在网格  $n$  不被雷达探测到的概率,  $\prod_i^n (1 - p_i)$  指的是到当前网格  $n$ , 飞行器一直不被探测到的概率, 而  $P(n)$  即沿当前路径到当前网格  $n$ , 飞行器至少被探测到一次的概率, 出于安全性考虑的话,  $P(n)$  越小越好。  $l(x)$  是一个映射函数: 当被探测到概率为 0 时(一定不会被探测到),  $l(x) = 1$ ; 当被探测概率趋于 1 时(几乎一定会被探测到),  $l(x) \rightarrow +\infty$ , 与实际的探测趋势保持一致。  $g(x)$  代表起点到当前网格  $n$  的实际代价,  $h(x)$  代表当前网格  $n$  到目标节点  $t$  的估计代价;  $\alpha \in [0, 1]$ , 是“距离”和“安全性”间的调节因子。

基于此, 飞行器在雷达探测威胁区的网格图概率  $A^*$  路径规划算法一般表达式如下:

$$E_S = f_\theta(E, P_S, P_E, P_R, A, \alpha, \beta) \quad (4)$$

式中,  $f_\theta$  为算法利用的网格计算算子;  $E_S$  为最终规划的路径网格位置集合;  $E$  为威胁区的空间范围, 即经度、纬度、高度的边界坐标;  $P_S, P_E$  分别为飞行器的起始点和目标点三维坐标  $(x, y, z)$ ;  $P_R$  为雷达辐射源中心坐标点集合;  $A$  表示雷达方程的参数集合; 空间划分精度  $\beta$  用于确定网格层级; 飞行危险系数  $\alpha (\alpha \in [0, 1])$  为调节路径安全性与路径长度的关键参数, 其对结果影响如图 5 所示。

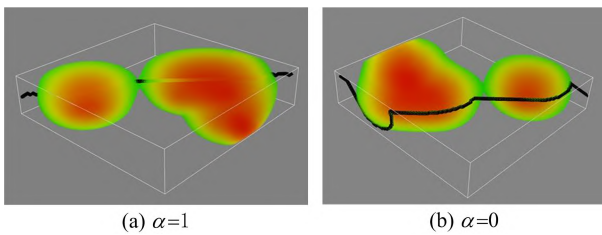


图5 算法路径规划示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the path planning of the algorithm

算法首先根据威胁区空间三维范围生成电磁信息探测概率空间网格图, 每个网格内的值是通过雷达信息数据模型生成的雷达联合探测概率值。其次将飞行器的起终点坐标转换到对应的网格中, 将路径规划问题放到网格图空间中进行计算。在计算过程中, 考虑网格距离和网格探测概率的损失函数, 且通过危险系数定量描述。具体流程如算法 1 所示。

### 算法 1 飞行器威胁区网格路径规划算法流程

Input:  $E, P_S, P_E, P_R, A, \alpha, \beta$

Output:  $E_S$

- Step 1 根据  $\beta$  选择合适的网格层级  $L$ , 利用雷达辐射方程  $f_r(A | P_R)$  计算雷达联合探测概率, 利用网格图建模算法生成电磁信息时空网格图。
- Step 2 初始化 OpenSet 和 CloseSet 表以及 Cost 代价表, 将起点  $P_S$  对应的网格位置  $G_S = (i_S, j_S, k_S)$  放入到 OpenSet。
- Step 3 While:
- ① 若 OpenSet 不为空, 取出 Cost 表总代价最小的网格  $P_M$ , 否则跳转到 step 4;
  - ② 将  $P_M$  放入 CloseSet 表, 若  $P_M$  为终点  $G_M = (i_M, j_M, k_M)$  或达到最大循环次数, 则跳转到 step 4;
  - ③ 将  $P_M$  的三维邻接网格节点依次进行循环判断;
  - ④ 若当前节点不在威胁区  $E$  表内, 则遍历下一个邻接点;
  - ⑤ 若邻接网格节点  $P_N$  已经在 CloseSet 内, 则遍历下一个邻接点;
  - ⑥ 若  $P_N$  不在 OpenSet 内, 计算总代价  $F_{PA^*} = G_{PA^*}(P_N, \alpha) + H_{PA^*}(P_N, \alpha)$  后放入 OpenSet 和 Cost 表;
  - ⑦ 若在 OpenSet 里, 则查看  $P_N$  是否需要在 Cost 表中更新。
- Step 4 回溯得到所有网格位置  $\sum_{i=0}^M G_i$ 。
- Step 5 算法结束。

## 3 实验论证

### 3.1 实验设置

为充分直观显示改进算法在网格下的改进以及为后续不限于无人飞行器平台的其他飞行器进行应用, 设置辐射区域的范围: 经度  $[118^\circ\text{E}, 122^\circ\text{E}]$ , 纬度  $[23^\circ\text{N}, 25^\circ\text{N}]$ , 高度  $[0, 200 \text{ km}]$ 。设置 200 km 高度是为了覆盖从近地低空到亚轨道的多类空域场景。随机设置 5 个性能相同的辐射源, 坐标分别为  $[119^\circ\text{E}, 23.5^\circ\text{N}, 50 \text{ km}]$ ,  $[120.5^\circ\text{E}, 22.5^\circ\text{N}, 120 \text{ km}]$ ,  $[121^\circ\text{E}, 24^\circ\text{N}, 80 \text{ km}]$ ,  $[120^\circ\text{E}, 24^\circ\text{N}, 150 \text{ km}]$ ,  $[121.5^\circ\text{E}, 23^\circ\text{N}, 100 \text{ km}]$ 。提供路径规划的信息: 路线 1 的起点坐标为  $(118.32^\circ\text{E}, 24.45^\circ\text{N}, 0 \text{ km})$ , 终点坐标为  $(121.31^\circ\text{E}, 22.84^\circ\text{N}, 200 \text{ km})$ ; 路线 2 的起点坐标为  $(118.8^\circ\text{E}, 24.8^\circ\text{N}, 0 \text{ km})$ , 终点坐标与路线 1 相同。设置网格剖分采取 12 层级 ( $8'$ ) 和 13 层级 ( $4'$ ), 选择联合雷达探测概率  $\bar{P}_{d,w}$  进行计算:

$$\bar{P}_{d,w} = 1 - \prod_{w=1}^n (1 - 0.1^{\frac{AR_w^4}{\sigma_w}}) \quad (5)$$

式中,辐射源个数  $n=5$ ,为试验强对抗条件下的大型无人飞行器场景,参考文献[12]中,中大型空中目标的典型雷达截面积(RCS)范围为  $30\sim 50 \text{ m}^2$ ,因此设置目标飞行器最大平均反射截面积  $\bar{\sigma}_w = 40 \text{ m}^2$ ,目标反射截面积和最大探测距离四次方的商  $A=400$ ,初始辐射功率为  $58 \text{ kW}$ ,雷达天线均为全向天线。威胁区的阈值概率为  $0.2$ ,即规划的路线若经过探测概率超过  $0.2$  的空间网格区域,则路径在该节点处不安全。实验场景如图 6 所示。

采用以  $A^*$  算法以及本文提出的对代价函数与启发函数均进行改进的算法为基准,对于传统的  $A^*$  算法的设置为使用三维欧氏距离作为启发函数,且不考虑网格的威胁权重(即威胁代价恒为  $0$ ),仅以路径长度为优化目标;对于本文所提算法使用三维对角距离作为启发函数,并引入雷达探测概率作为威胁权重,实现路径长度与安全性的平衡,分别用  $g(x)+h(x)$  和  $g_p(x)+h_p(x)$  表示,并以仅对  $A^*$  算法代价函数进行改进的算法  $g_p(x)+h(x)$  和仅对  $A^*$  算法启发函数进行改进的算法  $g(x)+h_p(x)$  作为对比方法,分别

对不同方法、不同危险系数和不同路线在不同层级的 3 种情况进行实验验证。

实验在 Windows 10 Professional 64 bit 操作系统, Cesium 1.76、NodeJS 12.14、JavaScript 1.8 可视化软件及脚本和 PyCharm 2018.2.3、Python 3.6、Visual Studio 2017、C++ 后台编译器及框架下实现。

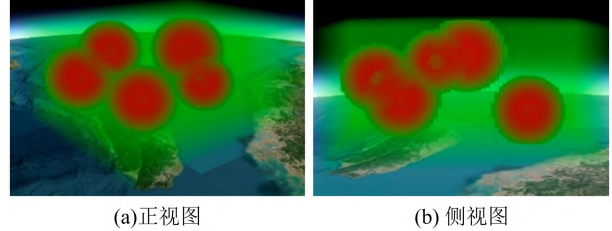


图 6 实验场景示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the experimental scenario

### 3.2 不同方法对比

实验指标结合路径长度、通行代价、算法迭代次数、路径计算时间、与规划路径路过威胁区网格数进行综合分析,其中路径长度以网格距离为单位,以上指标均是越低越好。首先统一设置  $\alpha=0.5$  保持条件相同(原  $A^*$  算法未考虑危险系数)。具体实验结果见表 1 所列。

表 1 不同路径规划算法在相同条件下的规划效率对比

Tab. 1 Comparison of planning efficiency of different path planning algorithms under the same conditions

方法	危险系数 $\alpha$	路径长度 /km	通行代价 /km	迭代次数 /次	路径计算时间 /s	威胁区网格数 /个	总网格数 /个
$g(x)+h(x)$	—	74.267	74.267	120	0.119	23	49
$g(x)+h_p(x)$	0.5	86.364	86.364	2 698	0.667	0	58
$g_p(x)+h(x)$	0.5	74.267	27.564	48	0.064	22	49
$g_p(x)+h_p(x)$	0.5	77.781	13.629	49	0.075	0	50

由实验结果可以发现:原始的  $g(x)+h(x)$  虽然规划的路径最短,共 49 个,但是路过了 23 个威胁区网格,由于其没有考虑威胁区的影响,因此无法有效进行避障路径的规划;对启发函数进行优化后,  $g(x)+h_p(x)$  在启发计算过程会将考虑路径的安全性,但由于过于考虑,导致模型绕路多走了较长的距离,虽完全避开威胁区网格,但是路径长度和耗时都比较高;只对代价函数进行优化后,  $g_p(x)+h(x)$  本质上仍然未考虑安全性的影响,虽然相比原始方法,模型在通行代价、路径规划效率上都有提升,但整体上依然路过较多的危险区网格;改进的考虑威胁区的  $A^*$  路径规划算法  $g_p(x)+h_p(x)$ ,综合平衡了威胁区网格数和路径长度的代价,在保证飞行器路径安全的前提

下,以更低的时间代价,规划出了最优路线。相比于原始的  $g(x)+h(x)$ ,规划的路径使得威胁区网格数减少  $46.94\%$ ,路径计算时间缩短  $36.97\%$ 。

### 3.3 不同危险系数对比

在 3.2 节基础上,对比以上方法分别在危险系数  $\alpha=0, 0.5, 0.8$  时的路径规划效果,实验结果见表 2 所列。

表 2 中可看出,当  $\alpha=0$  时,  $g(x)+h_p(x)$  耗时过长,无法在指定步数内给出计算结果,这是由于该算法着重考虑了安全性,但危险系数为  $0$ ,导致算法无法考虑安全性,造成规划的矛盾导致的。进一步分析可知:当  $\alpha$  越小,即对威胁区的考虑比例越大,算法会用更长的路径为代价,换取路径的安全性的提升。例如当  $\alpha=0.8$  的时候,

$g_p(x)+h_p(x)$ 相较于  $g(x)+h(x)$ 方法,路径长度增加 829 m,但是在网格数都为 49 时,路径计算时间缩短 48.74%,威胁网格数减少 22 个,降低 44.90%。反之,当  $\alpha=1$  时,算法退化为仅考虑距离优化的 A\* 算法,所规划的路线仅追求最

短路径,完全不纳入安全性因素。

### 3.4 不同路线在不同层级下的对比

考虑  $g(x)+h(x)$ 和  $g_p(x)+h_p(x)$ 这 2 种方法在不同路线在不同层级下的效果对比,根据实验数据中路线 1 和路线 2 的信息,其结果见表 3 所列。

表 2 不同路径规划算法在不同危险系数下的规划效率对比

Tab.2 Comparison of planning efficiency of different path planning algorithms under different coefficients

方法	危险系数 $\alpha$	路径长度 /km	通行代价 /km	迭代次数 /次	路径计算时间 /s	威胁区网格数 /个	总网格数 /个
$g(x)+h(x)$	1	74.267	74.267	120	0.119	23	49
	0	—	—	—	—	—	—
$g(x)+h_p(x)$	0.5	86.364	86.364	2 698	0.667	0	58
	0.8	83.967	83.967	1 737	0.392	0	54
$g_p(x)+h(x)$	0	75.539	14.562	48	0.085	22	49
	0.5	74.267	27.564	48	0.064	22	49
	0.8	74.267	48.322	48	0.046	16	49
$g_p(x)+h_p(x)$	0	79.196	1.989	50	0.082	0	51
	0.5	77.781	13.629	49	0.075	0	50
	0.8	75.096	39.685	48	0.061	1	49

表 3 不同路线在不同层级下的路径规划效率对比

Tab.3 Comparison of path planning efficiency of different routes at different levels

路线	方法	层级	危险系数 $\alpha$	路径长度 /km	通行代价 /km	迭代次数 /次	路径计算时间/s	威胁区网格数 /个	总网格数 /个
路线 1	$g(x)+h(x)$	13	1	74.267	74.267	120	0.119	23	49
		12	1	38.073	38.073	38	0.019	12	25
		0	79.196	1.989	50	0.082	0	51	
	$g_p(x)+h_p(x)$	13	0.5	77.781	13.629	49	0.075	0	50
		0.8	75.096	39.685	48	0.061	1	49	
		0	41.487	1.452	27	0.042	0	28	
		12	0.5	40.073	8.142	26	0.016	0	27
路线 2	$g(x)+h(x)$	13	1	68.093	68.093	221	0.069	13	49
		12	1	34.826	34.826	87	0.017	6	25
	$g_p(x)+h_p(x)$	0	72.543	1.612	48	0.073	0	49	
		13	0.5	72.543	11.609	48	0.068	0	49
		0.8	70.636	36.802	49	0.063	0	49	
		0	36.734	1.286	24	0.016	0	25	
		12	0.5	36.734	7.215	24	0.015	0	25
0.8	36.093	20.212	24	0.014	0	25			

实验结果表明,路线 2 和路线 1 在方法优势以及不同危险系数下的趋势具有一致性,  $g_p(x)+h_p(x)$ 对比  $g(x)+h(x)$ 方法,路径计算时间平均缩短 7.34%,威胁网格数平均减少 36.20%,这验证了网格图下规划算法的有效性。因此,在实际任务中,需要结合任务的需求选择合适的危险系数,以平衡路径长度与安

全性。同时,网格图层级越低(即单个网格跨度越大),规划涉及的总网格数越少,计算耗时也越短,但是规划精度会降低,不利于细粒度的路径规划任务(例如小型侦察无人飞行器的战术级航迹规划等)。因此,网格图层级同样要根据任务需求进行合理选择,以开展网格图建模与规划。

## 4 结束语

本文针对复杂电磁环境下飞行器三维路径规划的安全性及效率平衡问题,提出了一种基于电磁网络的概率 A\* 算法。通过 GeoSOT-3D 网格框架对雷达探测概率、频谱干扰等多源威胁进行动态建模,重构三维对角距离作为启发函数,并设计融合路径长度与威胁概率的自适应损失函数,实现了安全性与规划效率的定量权衡。实验表明,相较于传统 A\* 算法,本文方法在威胁规避成功率上增长显著,在路径计算时间上也有所缩短,接下来会进一步在多飞行器协同、应对突发电磁威胁适应性和算法轻量化上开展工作。

### 参考文献

- [1] HNAIEN H, ABOUD A, TOUATI H, et al. Joint localization and data-based path planning for UAV-assisted IoT networks: a heuristic approach[J]. SN Computer Science, 2025, 6(1): 160.
- [2] CHEN F K, LIU Q Y, CONG X H, et al. Three-dimensional path planning of UAV in complex urban environment[J]. Frontiers in Computing and Intelligent Systems, 2023, 5(2): 112-120.
- [3] YUAN W K, YANG F, ZHANG B T, et al. Multi-target points path planning for UAV in complex environments[C]//Proceedings of the 35th Chinese Process Control Conference. [S.l. :s. n.], 2024:12781-12788.
- [4] JEAUNEAU V, JOUANNEAU L, KOTENKOFF A. Path planner methods for UAVs in real environment [J]. IFAC-PapersOnline, 2018, 51(22): 292-297.
- [5] 艾聪, 宋大雷. 面向信息采集的无人机路径规划[J]. 微处理机, 2025, 46(1): 42-46.  
AI Cong, SONG Dalei. Unmanned aerial vehicles path planning for information gathering[J]. Microprocessors, 2025, 46(1): 42-46. (in Chinese)
- [6] 张丽丽, 黄辰, 杜宇飞. 基于改进 A\* 算法的无人机路径规划研究[J]. 电子制作, 2023, 31(5): 81-83.  
ZHANG Lili, HUANG Chen, DU Yufei. Research on UAV path planning based on improved A\* algorithm[J]. Electronic Production, 2023, 31(5): 81-83. (in Chinese)
- [7] 闫少华, 石星雨, 张兆宁. 基于改进 A\* 算法的城市物流无人机三维路径规划[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(29): 12781-12788.  
YAN Shaohua, SHI Xingyu, ZHANG Zhaoning. Three-dimensional path planning of urban logistics UAVs [J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(29): 12781-12788. (in Chinese)
- [8] 叶魏涛, 张蔚. 基于雷达威胁的路径距离最小航路规划算法[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(1): 121-124.

YE Weitao, ZHANG Wei. Research on minimum distance route planning algorithm based on threat of radar[J]. Fire Control & Command Control, 2022, 47(1): 121-124. (in Chinese)

- [9] 陈晓宏, 储飞黄, 方胜良, 等. 基于剖分网格改进 A\* 算法的航迹规划研究[J]. 电光与控制, 2022, 29(7): 17-21.  
CHEN Xiaohong, CHU Feihuang, FANG Shengliang, et al. Trajectory planning based on A\* algorithm improved by subdivision grid[J]. Electronic Optics & Control, 2022, 29(7): 17-21. (in Chinese)
- [10] 程承旗, 任伏虎, 濮国梁, 等. 空间信息剖分组织导论[M]. 北京: 科学出版社, 2012.  
CHENG Chengqi, REN Fuhu, PU Guoliang, et al. Introduction to the organization of spatial information subdivision[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [11] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths[J]. IEEE Transactions on Systems Science & Cybernetics, 1972, 4(2): 28-29.
- [12] RICHARDS M A. Fundamentals of radar signal processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2005.

### 作者简介

#### 李高星

女, 2000 年生, 硕士研究生, 研究方向为信号处理, 电磁频谱图  
E-mail: emlgxh@163.com



#### 方胜良

男, 1968 年生, 博士, 教授, 研究方向为智能电磁空间, 电磁频谱图  
E-mail: eeifsly@163.com



#### 范有臣

男, 1987 年生, 博士, 讲师, 研究方向为信号处理、光电对抗  
E-mail: 465377900@qq.com



#### 张驰

男, 1997 年生, 博士研究生, 研究方向为时空特征、神经网络与设计  
E-mail: chiizhang@pku.edu.cn

