

“快速山火反应”无人机系统

总结

由于澳大利亚东南部干旱，森林大火蔓延全国，影响新南威尔士州和维多利亚州东部。为了帮助维多利亚州政府应对未来的森林火灾灾害，我们建立了“快速山火响应”系统，用三种模型评估无人机安排。

对于模型 1，为了解决不规则的火灾区域和多样化的 SSA 无人机探测模式，我们使用了区域离散化方法，将火灾数据和多无人机合作转化为约束方程。然后，我们将离散化区域中的信息划分为不同的层。无人机层和信息层表示一个 SSA 无人机的搜索模式和搜索区域。火焰层代表野火的严重程度，可以通过模型 2 得到。最后，平衡信息探测收益和 SSA 无人机数量，同时考虑 EOC 位置约束，优化 SSA 无人机搜索模式和 EOC 位置。

对于模型 2，我们讨论了全球变暖情况下火灾的变化。我们首先形成了一个两级函数，将温度映射到着火概率，将着火概率映射到燃烧面积大小。为了获得着火概率和着火面积大小的相关性，我们使用元胞自动机模型模拟着火概率对着火面积的影响并拟合它们之间的关系。然后，我们咨询了进一步的研究，估计了由于气候因素引起的温度变化，并评估了今年和未来十年的着火概率。最后，我们模拟了平均火灾场景并估计了它们的火灾严重程度。

对于模型 3，我们首先评估了地形对通信的影响，并利用地形的第二次梯度测量了一个区域的通信屏蔽效果。然后我们参照模型 1 中得到的 SSA 无人机位置，对无线电中继无人机的数量和位置进行优化。我们进一步考虑通信的连续性，计算出移动条件下最终的无线电直放无人机数量。

基于上述三个模型，我们估计建立“快速山火响应”系统需要 10 架 SSA 无人机和 2 架无线电直放无人机。未来十年，成像相机和遥测传感器(用于 SSA 无人机)的成本将会增加。我们还建议，火区面积对无人机部署的影响较大，地形条件的影响较小。

关键词:无人机、优化、区域离散化、火灾动态模型、元胞自动机

内容

总结

.....	1
1 介绍	2
1.1 问题的背景	2
1.2 问题的重述	2
1.3 模型框架	3.
假设和理由	4
2 符号	4
2.1 符号用于本文	4
3 模型推导	5
3.1 模型制备	5
3.2 模型 1:SSA 无人机和转换端优化模型	7
3.3 模型 2:CA 火灾预测模型	9
3.4 模型 3:Ratio-Repeater 无人机优化模型	14
4 测试模型	16
4.1 模型 1 敏感性分析	16
4.2 模型 2 灵敏度分析	17
4.3 模型 3 敏感性分析	18
5 的结论	18
5.1 总结的结果	18
6 模型评估和进一步的讨论	20.
6.1 优势	20.
6.2 可能的改进	20.
7 参考	20.
预算要求	22

1 介绍

1.1 问题背景

自 2019 年 9 月以来，澳大利亚山火已持续燃烧 200 多天，覆盖面积达 600 万公顷，是亚马逊雨林大火烧毁面积的 7 倍。位于澳大利亚东南海岸的维多利亚州，损失达 7 亿澳元。

无人机探测系统广泛应用于航拍、环境探测等领域，具有巨大的工业前景^[1]。由于损失巨大，我们引入了无人机系统来探测火灾数据，并建立实时通信。

1.2 问题重述

我们需要开发一个名为“快速山火响应”(Rapid Bushfire response)的野火灾害救援响应系统，并根据澳大利亚维多利亚州的情况提高其响应能力。

● 我们所知道的:

- 一、澳大利亚及各国野火历史资料
- (一)澳大利亚东南部地理信息

● 我们拥有的:

- (四)两种无人机。SSA 无人机用于视频遥测，无线电中继器无人机用于扩大低功率无线电在前线的使用范围。
- (四)移动 EOC 1 架。负责与紧急情况有关的行动和活动以及启动和部署资源的请求的中央指挥和控制点

● 我们应该做的:

- (一)确定无人机种类和数量。无人机编队应满足并平衡能力、安全和经济需求。
- (四)确定 SSA 无人机最受需求的位置。SSA 无人机具有视频遥测能力，作为无人机编队的主体，保障消防人员安全和最严重火灾区域的数据安全。
- (四)确定无线电中继器无人机的最佳悬停位置。无线电直放无人机是 SSA 多架无人机向 EOC 传输信息的核心。
- (一)提出调度方案。为每类无人机制定飞行计划，确保信息持续传递。

“快速应对山火”无人机系统的简单结构如图 1 所示。

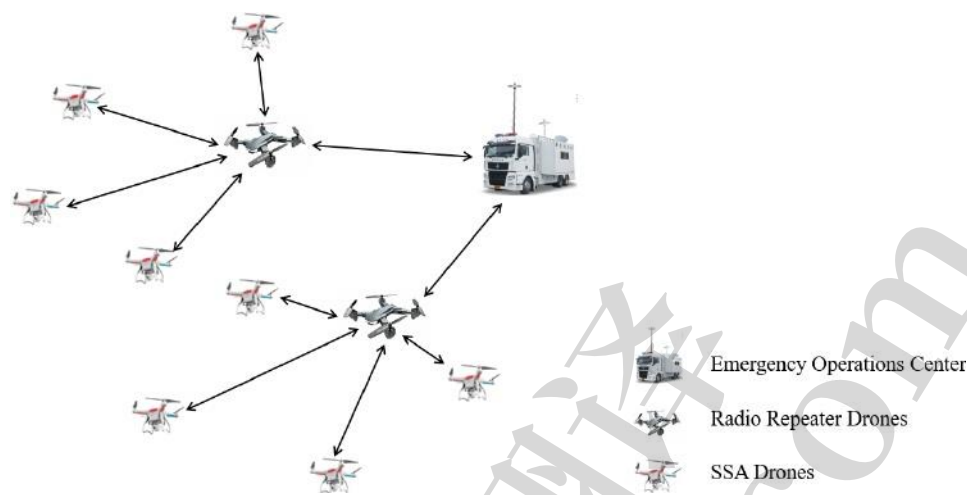


图 1 “林火快速反应” 无人机系统

1.3 模型框架

我们将问题分解为三个链式的子问题，并建立三个模型分别进行求解。

CA 火灾预测模型预测了可能发生的火灾的规模和规模。它估计温度与野火之间的关系，并基于元胞自动机模型预测火灾场。

SSA 无人机优化模型使用野火估计，生成 SSA 无人机分布。为了平衡无人机的观测收益和成本，我们定义了一个变量来确定无人机在某一时期某一区域的观测收益。

无线电直放站无人机优化模型参考了 SSA 无人机分布，优化了无线电直放站分布和 EOC 位置。该模型参考无线电通信约束对无线电直放站无人机进行优化。

模型整体算法流程图如图 2 所示：

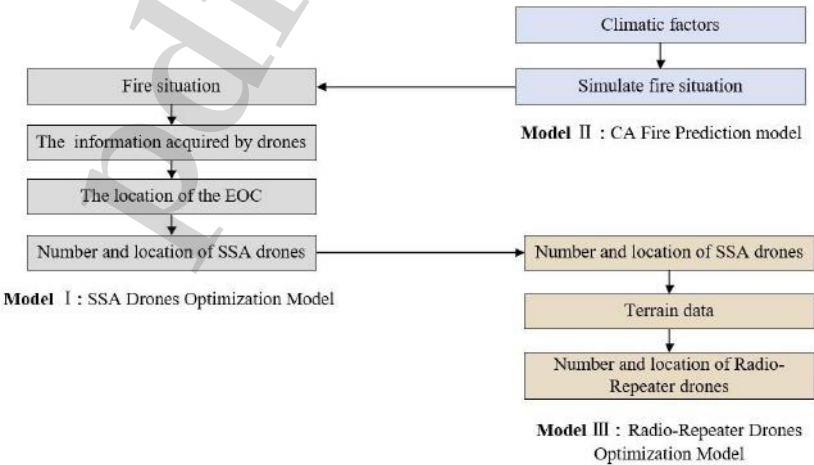


图 2 模型概述

假设和理由

1.在所有火灾影响因素中，只有温度在未来十年发生变化。

理由:考虑到全球变暖是气候变化的主要因素，未来 10 年气温将缓慢上升，而湿度和风速的变化是不可预测的，因此可以认为是不变的。

2.火场和飞行模式可以离散化。

理由:将火场离散化为区域时，最小传播区域 $5km \times 5km$

在 5 瓦的发射机中，距离单元小于最大通信距离的五分之一，尺寸单元对于以 20km/s 速度飞行的无人机来说是合理的，最大电池寿命为 2.5 小时。因此，离散化方法只会给结果带来很小的误差。

3.每个空间单位的观测收益服从边际效用递减规律。理由:随着每个空间单位观测时间的增加，边际观测收益减少。

4.无人机只能在应急行动中心充电，离开时充好电。

理由:由于设备要求，无人机只能在 EOCs 充电，为了保证效率最大化，无人机应该完全充电。

5.无人机以 20m/s 的最大速度飞行，直到到达指定位置。理由:由于飞行时间的限制，以最大速度飞行可以最大限度地减少在路上消耗的时间。

6.地形只影响通信距离。

理由:由于无人机在地面上空盘旋，地形对飞行距离的影响很小。同时，不平坦的地形和高度差阻碍了无线电信号的发送。

2 符号

2.1 本文使用的符号

表 1 本文使用的符号

象征	描述	Unit
	无人机最大速度	km/hr
	裁量空间单位的大小	km^2
M,N	横向和纵向方向上单位面积的总数 m 的位置，SSA 为 SSA 无人机，	-
	RRD 为无线电中继无人机，EOC 为 EOC。	-
(i_m,j_m)	监控 SSA 无人机的类型	-
		-
x_{kij}	指示 SSA 无人机是否在此区域的状态变量。 表示无人机在这个区域;表示无人机不在这个区域	$x_{kij} = 1$ $x_{kij} = 0$

图 1		
	探测模式 k 中无人机在该区域的对接时间	人力资源
t_{\max}	无人机的最大飞行时间	人力资源
$t_{rem}(i,j)$	SSA 无人机从 EOC 飞行到 无人机探测性能指标	人力资源 (i,j)
I_{kij}	无人机在该领域获取的信息量 无人机探测范围	人力资源
	这一地区火灾的严重程度。 $h_{ij} \in [0, 1)$	人力资源
	SSA 无人机的边界贡献	-
	元胞自动机中每个单位区域的火情状态的状态值。 $w_{ij} = 0, 1, 2, 3, 4, 5$	-
T	火区地面温度(火灾前)	公里
p_i, p_e	元胞自动机中的临界着火和熄灭概率模型。	-
	火区大小	-
	地形矩阵	-
	传输距离比	$^{\circ}\text{C}$
	无线电中继器无人机 r 的移动参数	-
t_{charge}	无人机内置电池的充电时间	公里 ¹
t_{road}	无人机在路上花费的时间	公里 ²
t_{hov}	无线电中继无人机的悬停时间	人

3 模型推导

3.1 模型准备

3.1.1 数据 1。数据收集

我们使用的数据主要包括澳大利亚西南部的高程数据、澳大利亚野火数据集、澳大利亚 2019-2020 年森林火灾区域和全球森林观察。数据来源汇总在表 2 中。

表 2 数据来源整理数据库名称数据库网站		数据类型
澳大利亚西南部的高程数据	https://topex.ucsd.edu/cgi-bin/get_data.cgi	地理位置
澳大利亚野火数据集	https://www.kesci.com/mw/dataset/5e21588a2823a10036b575bf	地理位置
2019- 2020 年澳大利亚森林火灾面积	https://www.datafountain.cn/datasets/5395	地理位置
全球森林观察组织	https://www.globalforestwatch.org/	地理位置
FW_Veg_Rem_Combined	https://github.com/varunr89/smokey/blob/master/Wild-fire_att_description.txt	气候

2.数据清理

根据澳大利亚维多利亚州的经纬度范围和行政边界，我们从所有数据中提取了维多利亚州的地形和火灾细节数据。维多利亚州的地形数据如下图 3 所示。

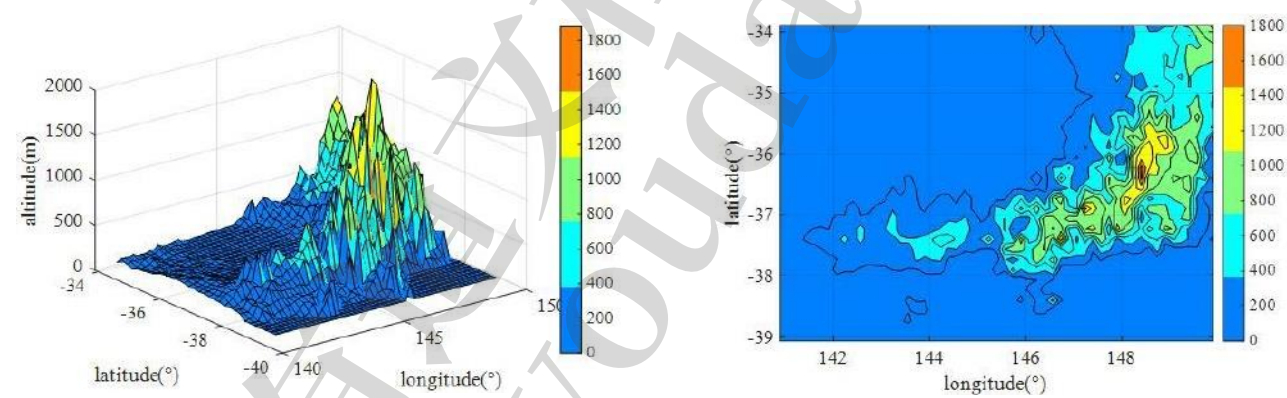


图 3 澳大利亚东南部的地形图和简要等高线

3.1.2 地理坐标系

为了找到具有地理坐标的任意两点之间的真实距离，我们将球坐标系映射到平面直角坐标系。有了火灾区域的经纬度范围，就可以在直角坐标系中得到一个矩形的火场区域。直角坐标系中任意两点之间的直线距离，即为两地之间的实际距离。

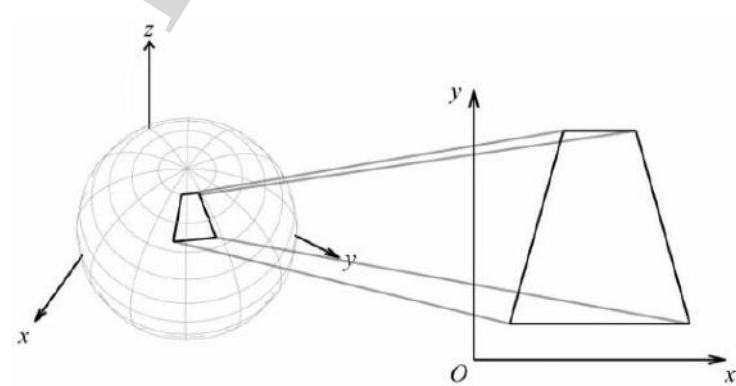


图 4 球坐标变换

3.2 模型一:SSA 无人机和 EOC 优化模型

由于区域探测要求，无人机持续监测火区。然而，受限于功率和通信，无法探测到所有感兴趣区域。因此，我们根据不同区域的重要性优化了它们的检测时间。^[2]

3.2.1 区域离散化

我们首先将面积离散化为 $M \times N$ 矩阵，每个单位面积为 $5km \times 5km$ 。然后我们将该矩阵分为 4 层来分析不同的信息，无人机层(x ，表示无人机悬停区域的 0-1 状态变量矩阵)，时间层(t ，表示该单元悬停时间的矩阵)，信息层(I ，表示 SSA 无人机从该单元收集的信息的矩阵)和火焰层(h ，表示野火严重程度的矩阵)。我们将这四层结合起来，优化 SSA 无人机的数量，平衡能力和经济。

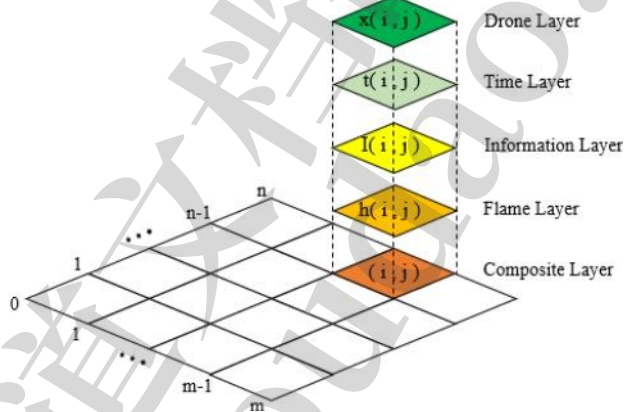


图 5 优化模型中的不同层次

考虑到一架 SSA 无人机的功率限制，我们假设一架无人机一次检测到一个或两个街区，因此一架 SSA 无人机有 5 种不同的检测模式：

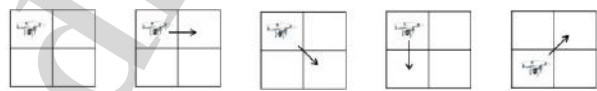


图 6 SSA 无人机的探测模式

通过将无人机层划分为 5 个子层，我们代表了 5 种无人机检测行为

$$x_1 \dots x_5$$

可以将同一层具有相同检测模式的无人机放在一起，用其检测模式的左上角来识别每一架无人机。

在催眠无人机笔直飞向最终观察目的地的同时，我们可以将总观察时间设为最大电池续航时间减去在路上花费的时间：

$$t_{rem}(i,j) = t_{max} - \frac{2\sqrt{S_d}}{v} \sqrt{(i - i_{EOC})^2 + (j - j_{EOC})^2} \tag{1}$$

假设在两个块检测中对每个块的观测时间进行均匀划分，我们可以

五种模式导出的观测时间 $t_{1...5}$ 为

$$\begin{cases} t_{1ij} = x_{1ij} t_{rem}(i, j) \\ t_{2ij} = \frac{1}{2} (x_{2i-1j}, x_{2ij}) (t_{rem}(i + 0.5, j), t_{rem}(i - 0.5, j))^T \\ t_{3ij} = \frac{1}{2} (x_{3i-1j-1}, x_{3ij}) (t_{rem}(i + 0.5, j + 0.5), t_{rem}(i - 0.5, j - 0.5))^T \\ t_{4ij} = \frac{1}{2} (x_{3ij-1}, x_{3ij}) (t_{rem}(i, j + 0.5), t_{rem}(i, j - 0.5))^T \\ t_{5ij} = \frac{1}{2} (x_{5i-1j}, x_{5ij-1}) (t_{rem}(i + 0.5, j), t_{rem}(i, j + 0.5))^T \end{cases} \tag{2}$$

考虑到边际观测收益递减，我们可以假定无人机在某一区域获取的信息量为：

$$\begin{cases} I_{ij} = 1 - e^{-\lambda \sum_{k=1}^5 t_{kij}} \\ \lambda = \frac{vR}{S_d} \end{cases} \tag{3}$$

在多商品条件下，我们将无人机优化问题考虑为一个多目标整数规划问题，并将优化模型的目标函数设为：

$$\max \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I_{ij} h_{ij} - \alpha \sum_{k=1}^5 \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N x_{kij} \tag{4}$$

在这 $\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I_{ij} h_{ij}$ 代表 SSA 无人机的探测收益。是火灾区域的严重程度

(i,j)，由于“地面部队”在恶劣地区面临的危险越大，值越高，

，这个火力单位的信息就越有价值。是用仿 $\sum_{k=1}^5 \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N x_{kij}$ 下一节会进一步讨论。表示 SSA 无人机的总数，

作为阈值，它阻止算法在新无人机的贡献-时添加无人机

Tion 小于，平衡了经济需求和火区探测。

综上所述，SSA 无人机优化模型结构可以可视化如下：

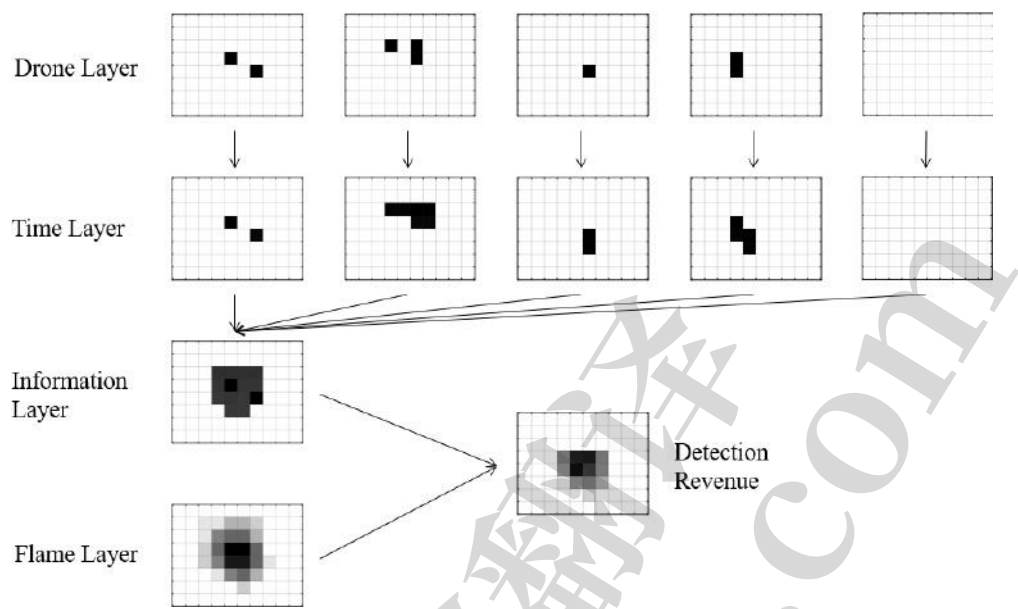


图 7 SSA 无人机优化模型结构

3.2.2 EOC 位置约束

为了保证 EOC 位置的合理性，我们可以假设 EOC 位于离散区域内。

$$\begin{cases} 0 \leq i_{EOC} \leq M \\ 0 \leq j_{EOC} \leq N \\ i_{EOC}, j_{EOC} \in \mathbb{Z} \end{cases}$$

(5)

更重要的是，我们有位于火灾区域外的 EOCs:

$$(i_{EOC} - i)(j_{EOC} - j) \neq 0, \forall h_{ij} \neq 0$$

(6)

为了将等式 6 引入到编程问题中，我们可以将其重写为:

$$h_{ij} \leq h_{ij}((i_{EOC} - i)(N + 1) - (j_{EOC} - j))^2$$

(7)

式 7 在时没有效果 h_{ij} 是 0，但当大于 0 时表示火，它呢抑制 $(i_{EOC} - i)(N + 1) - (j_{EOC} - j)$ 从 0，因此 EOC 不会被优化为防火区。

3.3 模型 2:CA 火灾预测模型

考虑到火灾场空间分布数据的缺乏，采用元胞自动机模型模拟矩形区域内的火灾场分布。设置与温度相关的着火概率，将全球变暖因子带入火场的面积和分布。然后通过进一步研究估算了气候因素引起的温度变化，评估了今年和未来 10 年的着火概率。在这里我们形成了一个两级函数，将温度映射到点火概率，将点火概率映射到火场大小。由此产生的模型可以用来生成目前以及未来十年的火场分布。

3.3.1 野火模拟

1.模拟的准备

我们为 单位区域设置了三种状态:已燃、已燃和未燃。考虑到持续时间

燃烧, 这个模型为每个点的火定义了一个生命。如果燃烧, 这个点的状态值 w_{ij} 减少 1。这里我们设置状态值。

$w_{ij}=5$ 表示未燃状态;表示燃烧状态 $w_{ij}=1,2,3,4$ 等于机组剩余寿命;表示单位燃尽状态 $w_{ij}=0$ 注意, 火

Field 的大小与之前的模型相同, 但这个模型的“单位面积”要小 100 倍, 以达到更高的精度。

传统森林火灾模型生成的火区形状规则且不收敛。在这里, 生成收敛为不规则形状并根据气象因素变化的自然火区。我们通过引入随机的点火和灭火事件, 改进了传统的森林火灾模型。将临界着火概率设置为温度的函数以考虑天气因素, 将灭火概率设置为时间的递增函数以模拟投入灭火的力量不断增长的情况, 同时保证收敛性。

我们将树木着火看作是一个随机事件, 其概率取决于其在中的邻居

$S \times S$ 区域, 这比只考虑相邻的树更符合实际事件, 带来更多

随机性。这里我们将某棵树是否点燃的概率考虑为线性叠加

该区域所有邻居的 Tion, 而 $S \times S$ 的贡献取决于它与周围的距离

这棵树。因此, 我们通过将 高斯滤波器应用于燃烧树矩阵乘以临界点火概率来获得点火概率。注意这里, 临界点火概率是 a

树的点火概率当它的所有邻居在 $S \times S$ 区域正在燃烧。

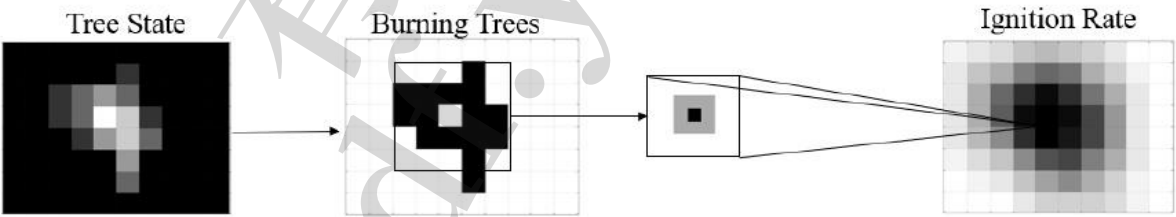


图 8 点火速率计算

为了模拟点火和灭火, 我们可以生成随机矩阵。当随机数大于树点火或熄灭的概率时。然后我们就可以用点燃的树、熄灭的树和先前状态的燃烧树的矩阵来计算当前状态的燃烧树。

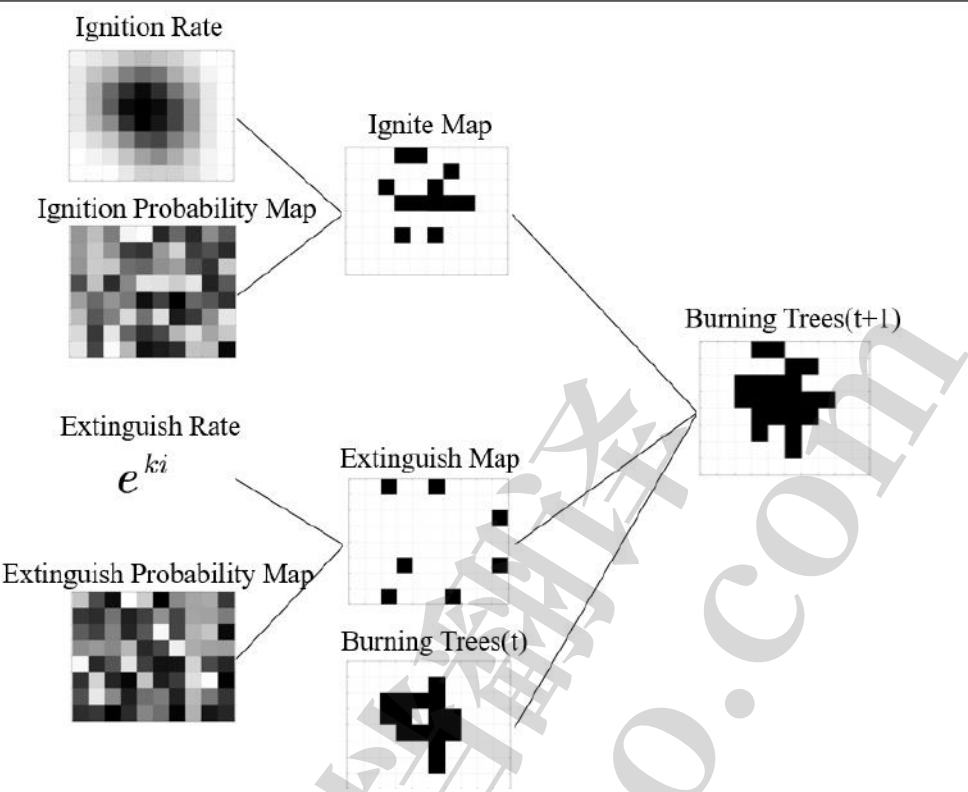


图 9 烧树计算

我们可以通过减少状态值来获得当前树的状态 1。

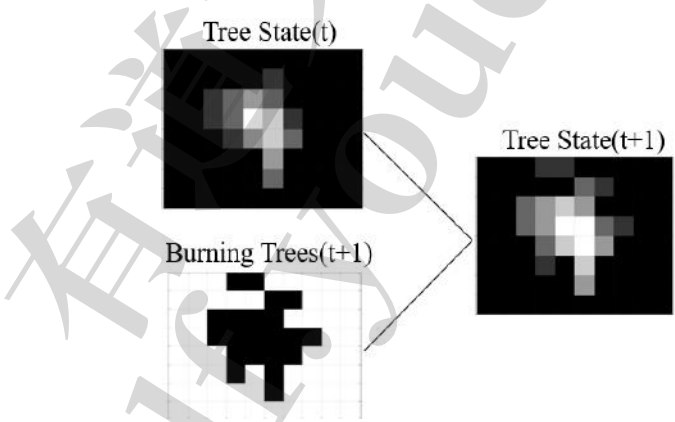


图 10 树状态计算

2.模拟方法

模拟算法如下:首先，将火场中心的四个点设为火，即设置。其次， $w_{ij} = 4$ 一时刻的点火概率和与随机矩阵比较得到新火点的位置。第三，的状态变量燃点，即单位状态值，负一。第四，计算 $w_{ij} = 1, 2, 3, 4$ Guish 下一时刻的概率，并与随机矩阵进行比较，得到新的 extin- guish 树和集合。第五 $w_{ij} = 0$ 燃烧时间矩阵，判断火焰严重程度。最后，重新计算各点的着火概率。具体算法流程图如下。

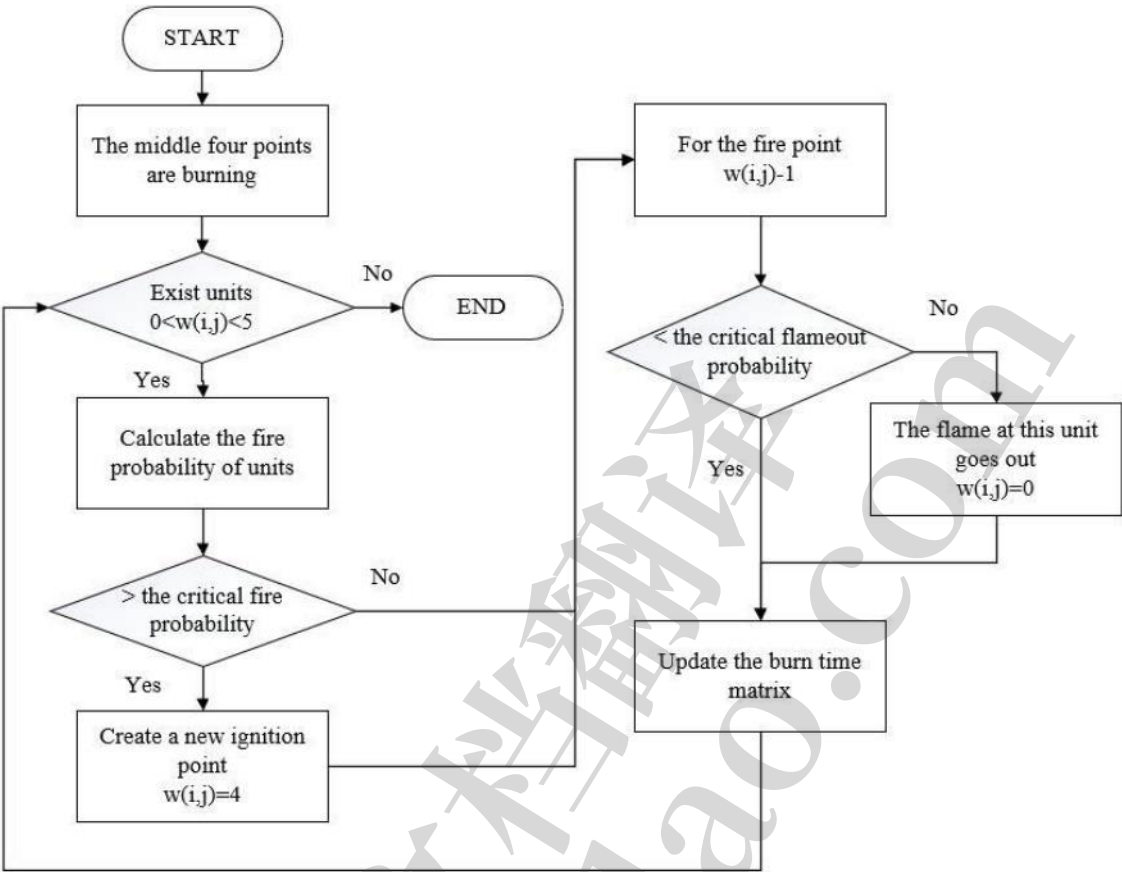


图 11 基于元胞自动机的火灾模拟模型

今年条件下的模拟结果如下:

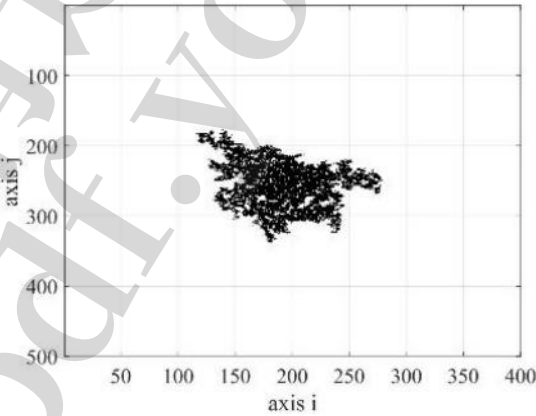


图 12 今年条件下的仿真结果

在模型收敛后，我们累计每个点已经烧光的时间来确定
大火的严重程度，即假设模型收敛在，而树 r 被点燃在，我 t_{con}
有 $t_{sev,r} = t_{con} - t_{ign,r}$ 灾的中心和蔓延范围。我们把所有的都调整到 0-1，然后
将其转换为具有平均池化的 $M \times N$ 维矩阵，以表征火灾的空间严重性分布，这是我们用于上一个模型的值。

我们可以将这个矩阵可视化:

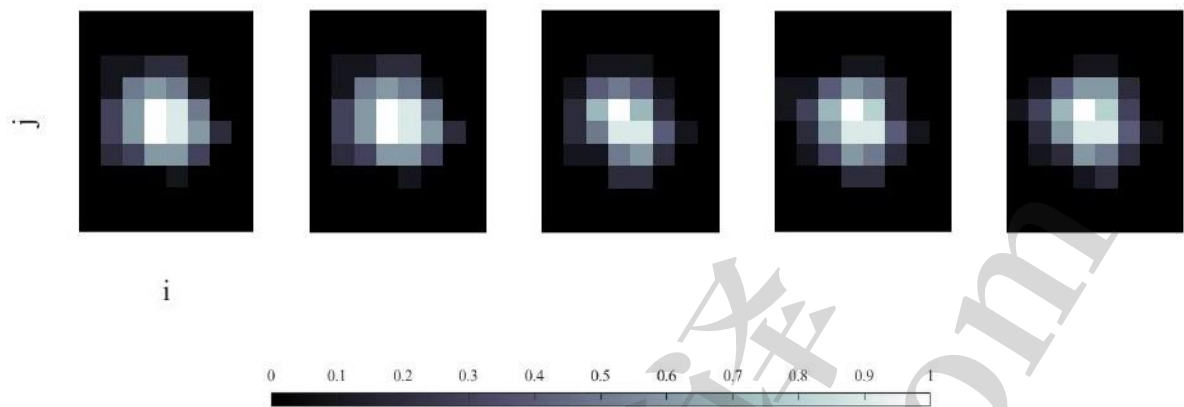


图 13 火灾严重程度矩阵(5 次模拟)

图中颜色越浅，单位火焰烈度越高。**3.3.2 全球变暖对野火模拟的影响**

为了分析全球变暖对该模型的影响，我们建立了以下关系。首先，通过对临界着火概率从 0.7 到 0.95 的遍历，得到了临界着火概率与火灾面积之间的模拟结果;再通过 MATLAB 的曲线拟合工具确定这两个变量之间的关系，如下图所示。

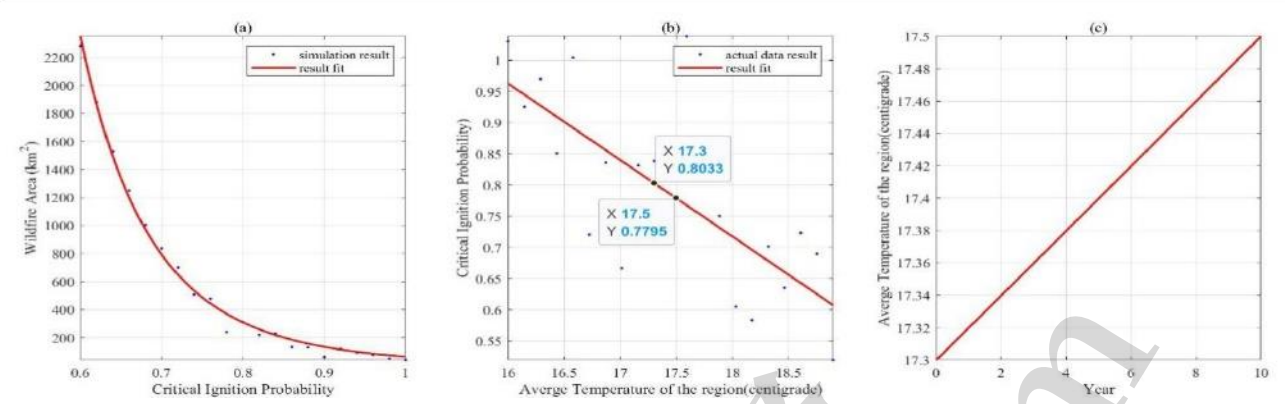
$$S_f = 64.12p_i^{-7.051} \quad (p_i \in [0.6, 1]) \tag{8}$$

利用上面的公式，我们可以推测出带有着火面积的临界着火概率。结合以往林火的火区大小和平均温度，可以得到临界着火概率与该区域平均温度的关系。

$$p_i = -0.1226T + 2.924 \quad (T \in [16, 18.9]) \tag{9}$$

在分析时间与温度的关系时，我们发现温度的变化包括季节周期性变化和长期生长。对于全年的温度预测，我们可以忽略温度的季节周期性变化。因此，该区域的温度随时间呈指数增长。由于过去 50 年平均气温上升了 1.5 摄氏度，它们的关系如下

$$T = 17.3e^{0.0011t} \quad (t = 1, 2, 3, \dots, 10) \tag{10}$$



(a) Critical Ignition Probability and Wildfire Area relationship

(b) Average Temperature and Critical Ignition Probability relationship

(c) Average temperature change due to global warming

图 14 拟合结果

我们将今年和十年后的临界点火概率估计为 $p_i = 0.76, p_i' = 0.79$ 。

将它们带入仿真模型，可以得到各自的平均火力分布，确定无人机系统的需求变化。

3.4 模型 3:比率中继无人机优化模型

我们首先评估了地形对通信的影响，用地形的第二次梯度来衡量一个区域的通信屏蔽效应。然后我们考虑了通信连续性要求，即要求无线电中继无人机在某一位置连续悬停。根据型号 1 的 SSA 无人机的位置和数量。我们可以通过优化模型得到无线电中继无人机的位置和数量。

3.4.1 地形对无线电范围的影响

考虑到地形对无人机通信的影响，我们从维多利亚的一个火灾区域提取地形数据。然后我们使用 Laplacian 算子获取地形的第二次梯度，该梯度表示高度变化的幅度。然后我们将第二梯度转换为信号传输范围。具体变换方法如下。

$$M = \eta \ln(|\nabla^2 E| + 1)$$

(11)

强制值范围到 $[2, 5]$ 。该矩阵表示 SSA 无人机在火场的发射范围。每个单位对应的区域。SSA 无人机或 ECT 中继器之间的传输限制为总和的 SSA 无人机的发射范围和无线电中继器无人机的发射范围。

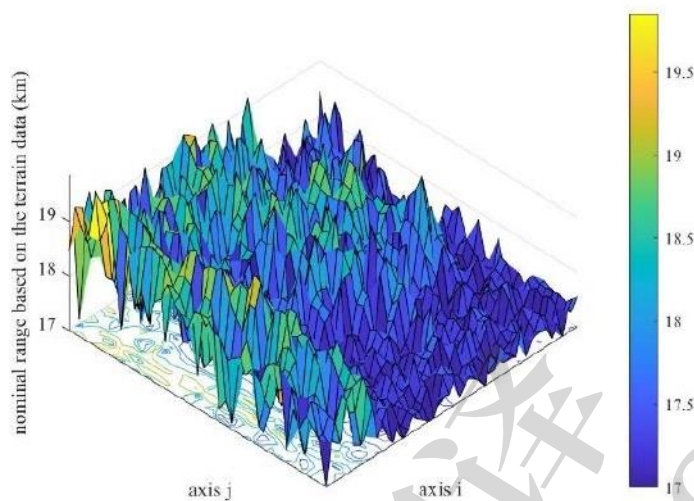


图 15 各空间单元的发射范围

3.4.2 无线电直放无人机优化模型

为了将信号限制适应到编程问题中，我们可以首先将发射范围离散化，并计算每个 SSA 无人机和 EOC 的发射限制。然后，我们可以通过比较空间距离与发射限制来限制无线电中继器无人机的位置。

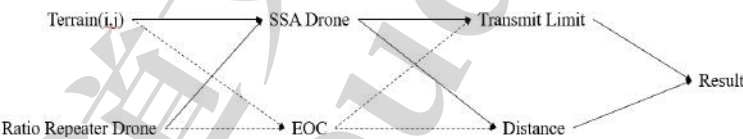


图 16 考虑地形因素的信号发射限制约束

由于我们假设 SSA 无人机可以与至少一架无线电转发器无人机通信，EOC 可以与所有无线电转发器无人机通信，我们有：

$$\begin{cases} \min_{r \in \{RRD\}} \sqrt{(i_r - i_{SSA})^2 + (j_r - j_{SSA})^2} \times \sqrt{S_d} \leq T_{i_{SSA}, j_{SSA}} \\ \max_{r \in \{RRD\}} \sqrt{(i_r - i_{EOC})^2 + (j_r - j_{EOC})^2} \times \sqrt{S_d} \leq T_{i_{EOC}, j_{EOC}} \end{cases} \tag{12}$$

然而，由于我们不能直接在一个编程问题中优化无线电中继器无人机的总数，我们可以手动设置无线电中继器无人机的数量，并找到符合约束的可行结果。为了将问题应用到编程中，我们可以将优化对象设置为 ratio repeater 和 EOC 之间的距离之和。

$$\min \sum_{r \in \{RRD\}} \sqrt{(i_r - i_{EOC})^2 + (j_r - j_{EOC})^2} \tag{13}$$

3.4.3 无线电直放站无人机调度方案

对于无线电直放无人机来说，需要考虑通信的可靠性，因此我们需要确保在整个野火过程中，在计算的位置上有一个比率直放无人机。因此，当无人机需要返航充电时，就需要另一架无人机进行更换。

对于 WileE-15.2X 混合动力无人机，无人机的悬停时间和充电时间决定了这个位置需要多少架无人机，如下图所示。

$$\beta_r = \begin{cases} 2 & t_{charge} + t_{road,r} \leq t_{hov,r} \\ 3 & t_{charge} + t_{road,r} > t_{hov,r} \end{cases}$$

(14)

对于公式 13，我们知道

$$t_{hov,r} = t_{\max} - t_{road,r} = t_{\max} - \frac{\sqrt{(i_r - i_{EOC})^2 + (j_r - j_{EOC})^2}}{v} \times \sqrt{S_d}$$

(15)

综上所述，我们可以知道无线电中继无人机的总数，即：

$$\sum_{r \in \{RRD\}} \beta_r$$

4 测试模型

4.1 模型 1 敏感性分析

1.无人机检测性能指标灵敏度分析

对于型号 1，无人机探测性能指标取决于无人机的探测范围。不同的探测器具有不同的探测能力，我们可以通过求解其邻域范围内的不同参数来验证灵敏度分析，从而得出不同的探测范围对该模型中无人机数量和分布的影响。

对于无人机探测性能指标，我们将 0.005 作为[0.01,0.03]范围内的步长，观察值的变化对模型求解结果的影响。结果如下表所示：

表 3 无人机检测性能指标与无人机数量的关系

λ	无人机的数量
0.010	3
0.015	5
0.020	6
0.025	5
0.030	5

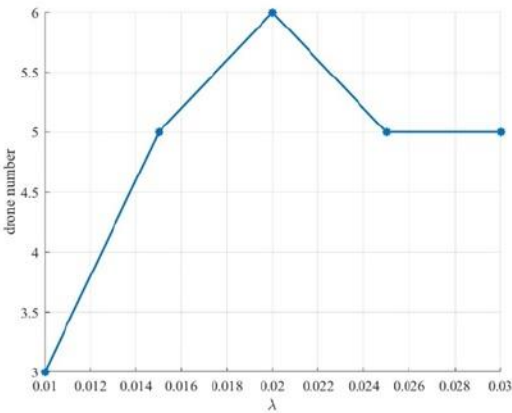


图 17 无人机检测性能指标与无人机数量的关系

从结果可以看出，当 λ 的值大于一定阈值时，模型求解的无人机数量稳定在 5 架。由此可见，该参数的稳定性是鲁棒的。

3 边界参数敏感性分析

边界参数平衡了增加 SSA 无人机的成本增加。当探测收益贡献大于增加的成本时，就增加 SSA 无人机。

对于边界参数 α ，我们使用 0.1 作为[0.3,0.7]范围内的步长，观察其对结果的影响。结果如下表 4 所示

表 4 边界贡献与无人机数量的关系

α	无人机的数量
0.3	7
0.4	6
0.5	6
0.6	4
0.7	3

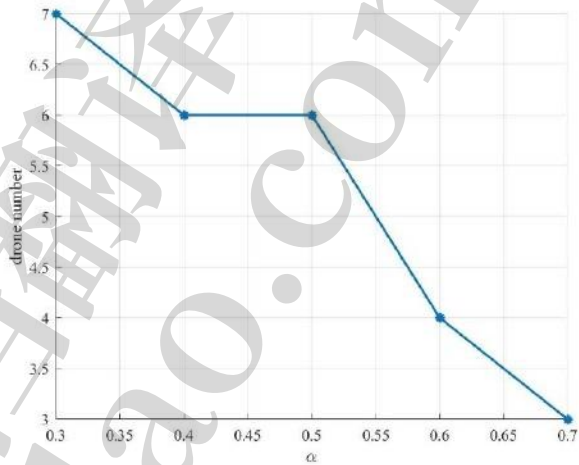


图 19 边界贡献与无人机数量的关系

从表中可以看出，该参数对无人机的结果影响较大，说明该参数灵敏度较高，稳定性较差。考虑到它的物理意义，这是合理的。

4.2 模型 2 敏感性分析

对于元胞自动机，由于模型所涉及的随机模拟过程，相同参数值的不同检验可能会导致不同的火场分布。因此，我们改变某个参数的值，针对每个值对模型进行两次求解，以验证灵敏度。

对于临界点火概率，我们在[0.74,0.83]范围内以 0.03 作为步长，观察其值的变化对模型求解结果的影响。结果如下表 5 所示：

表 5 临界点火概率与无人机数量的关系

	无人机的数量	无人机的数量
	模拟 1	模拟 2
0.74	10	10
0.77	6	6
0.80	6	5
0.83	4	4

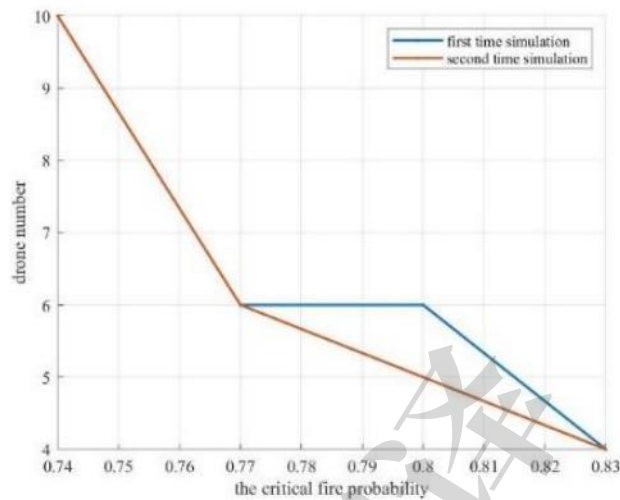


图 20 临界点火概率灵敏度分析

可以推断，k 值的变化对模型求解结果的影响较大，说明参数的敏感性较高。因此，在模型构建过程中需要准确模拟 k 值，否则求解结果会产生误差。

4.3 模型 3 灵敏度分析

进一步应用模型 2 灵敏度分析结果检验了临界点火概率对无线电直放站无人机定位的影响。

表 6 两次独立仿真下无线电直放站无人机位置

无线电直放站关键点火位置无线电直放站位置		
概率	无人机仿真 1	无人机仿真 2
0.74	(3,4)	(2,5)
0.77	(0,3)	(0,3)
0.80	(0,3)	(2,5)
0.83	(2,4)	(2,4)

结果表明，在不同模拟或不同火区情况下，无线电直放无人机的位置往往停留在 EOC 附近，变化较小。

5 的结论

5.1 结果总结

5.1.1 问题 1 的结果

通过元胞自动机，根据澳大利亚火灾的火灾数据，我们可以得到分布

如下其中一场火灾，其中临界点火概率在哪里。我们跑了五个 simu- $p_i = 0.76$

措施。然后我们得到了火焰严重度分布矩阵。我们将其可视化，如图 10 所示。

有道文档翻译
pdf.youdao.com

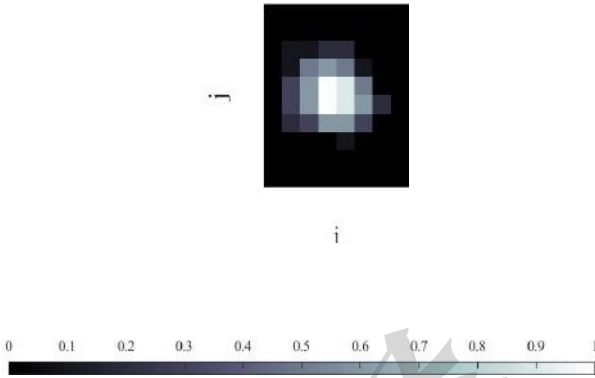


图 21 火焰严重度分布矩阵

将火灾严重程度数据带入我们拥有的优化模型 1:

$$\max \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N I_{ij} h_{ij} - \alpha \sum_{k=1}^5 \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N x_{kij} \tag{16}$$

通过 lingo, 5 种 SSA 无人机监控模式和 EOC 位置的矩阵为得到, 而 SSA 无人机的总数为。EOC 的位置为 $(1 \sum_{k=1}^5 \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N x_{kij} = 8$

将 EOC 和 SSA 的位置带入优化模型 3, 我们有:

$$\min \sum_{r \in \{RRD\}} \sqrt{(i_r - i_{EOC})^2 + (j_r - j_{EOC})^2} \tag{17}$$

这里我们可以将规划问题中无线电中继器无人机的总数设置为 1 时求解优化模型。我们可以进一步计算无线电直放站无人机的总数

移动距离变化条件下的无人机:。因此, 总数量

$$\sum_{r \in \{RRD\}} \beta_r = 2$$

2 种无人机的数量为 10 架。

5.1.2 问题 2 的结果

是 .无线电中继无人机的数量被称为。

由于全球变暖, 维多利亚的地表温度会升高, 这将影响到点火

该地区的 Tion 概率。十年后临界点火概率为。通过

$$p_i = 0.79$$

细胞自动机。遵循问题 1 相同的优化过程。SSA 无人机的数量

$$\sum_{k=1}^5 \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N x_{kij} = 10 \qquad \sum_{r \in \{RRD\}} \beta_r = 2$$

因此，未来十年，由于全球变暖，热成像相机和遥测传感器的成本增加。

有道文档翻译
pdf.youdao.com

5.1.3 问题 3 的结果

我们选择了 3 个不同的区域来模拟结果，但是无线中继器的位置保持不变。我们认为，由于平均火力区域和 SSA 无人机悬停区域较小，对发射限制的约束大多为松散约束。此外，地形对传输限制的影响太小，直放无人机稳健地靠近 EOC 的趋势削弱了这种影响。这是合理的，因为地形通常对飞机的影响较小。

6.模型评估和进一步讨论

6.1 优势

- 通过仿真和历史数据验证，该模型鲁棒性强，适用性广。了解火灾情况，可以快速解决 EOC 和 UAV 的部署位置，可以提高火灾救援的效率。
- 该模型遵循封装原则，三个子模型均可根据实际需要独立修改。

6.2 可能的改进

- 没有考虑天气和地形因素对无人机飞行的影响。
- 火场预测模型假设各向同性火焰扩散，然而植被覆盖不一致，我们可以进一步将地形因素引入元胞自动机模型。

7 参考

[1]魏伟, 郝明, X.金琦, S.长银, “多旋翼无人机机体标准化设计方法研究”, 第 6 期。5, pp. 147150, 2014。

[2]向廷利, 王洪军, 石迎春。面向区域覆盖的多机协同探测任务分配策略[J]。空军工程大学学报(自然科学版), 2019,20(06):33-38+71。

[3]牛若云, 翟攀茂, 孙明华。森林火险气象指数及其构建方法综述[J]。气象, 2006(12):3-9。

[4]张文文, 王秋华, 王瑞臣, 龙腾腾, 魏建恒, 高忠良。澳大利亚桉树林火研究进展[J/OL]。世界林业研究:1- 10[2021-02-07].<https://doi.org/10.13348/j.cnki.sjllyj.2021.0004.y>。

[5]李成新, 赵良辰, 李东云, 马家辉。基于 CA 系统的澳大利亚林火蔓延预测模型及应急物资调度应用[J]。林业调查与规划, 2020,45(05):62-69+89。

[6]刘家昌, 唐斌, 邹媛。利用 GIS 分析森林火灾发生的影响因素及其时空分布特征——以美国加利福尼亚州为例[J]。东北林业大学学报, 2020,48(07):70-74。

[7]李炳华、朱继平、肖德智、彭晨。基于小样本数据信息扩散的重大火灾发生频率估计方法[J]。火灾科学，2010,19(02):82- 88。

[8]刘畅。基于元胞自动机的林火蔓延模型研究与仿真[D]。大连理工大学，2012。

[9]杨福龙。基于元胞自动机的林火蔓延三维模拟[D]。北京林业大学，2016。

[10]周培恒。基于元胞自动机的区域灾害后果演化模型研究[D]。大连理工大学，2015。

有道文档翻译
pdf.youdao.com

预算要求

:非洲金

发件人:MCM/ICM 战队#2104673

时间:2021 年 2 月 5 日, 星期五

主题:为维多利亚州政府建立“快速山火反应”无人机系统的预算请求

尊敬的先生或女士:

了解到 CFA 正准备设立一个名为“森林火灾快速反应”的新部门, 并在最近开发一种无人机系统来应对森林火灾。我们非常乐意分享我们的数学模型来给出一些建议。

从 2019 年到 2020 年, 澳大利亚发生了毁灭性的森林火灾, 对每个州的环境都造成了严重破坏, 严重影响了人们的正常生活。为了遏制火势蔓延, 减少财产损失, 必须设计应急系统, 以更好地帮助维多利亚州政府救援火灾。

由于无人机不受路况限制, 可以观察灾区情况, 运输救援物资。因此被广泛应用于火灾、地震、飓风等自然灾害的救援中。我们的团队开发了一种用于火灾探测和信息传输的无人机系统。该系统可用于观察森林火灾, 并提供消防队员与指挥中心之间的通信服务。

首先, 我们建立了基于气候数据的火灾预测模型。通过收集维多利亚州的气候数据, 并结合未来的气候变化趋势, 我们可以预测未来十年该地区发生火灾的概率和强度。然后通过对火灾区域进行离散化, 我们构建了考虑火灾严重程度的 SSA 无人机部署模型。通过 SSA 无人机的数量和位置, 我们可以得到考虑维多利亚地形对信号传输影响的无线电中继无人机的数量和位置。

为了减少政府的财务负担, 我们建议购买可充电无人机, 并找到满足救援需求的最小无人机数量。我们建议大家在未来十年购买 10 架 SSA 无人机和 2 架无线电中继器无人机应对维多利亚州的森林火灾, 否则可能无法覆盖整个火灾现场, 确保所有消防人员的通信安全。

我们希望我们的模式能够帮助 CFA 提高消防救援效率, 保障消防人员的安全, 减少火灾造成的损失。

真诚的您, #
2104673 团队

附注:附件中的预算请求表在下一页。

预算要求			
项目申请部门生效日期			
“快速山火响应”无人机系统，星期五，2021 年 2 月 5 日			
题目:用于火灾探测和信息传输的无人机系统			
目的: 探测火灾状况，提高火灾救援效率，减少火灾造成的损失。提供消防人员与救援中心之间的通信服务，确保消防人员的安全。			
资金如何使用: 资金主要用于购买 WileE-15.2X 混合动力无人机、手持双向无线电、热成像摄像机以及遥测传感器和中继器。			
预计支出	价格	Num	评论
WileE-15.2X 混合无人机	12000 美元	12	配备无线电中继器或具有视频和遥测功能。
热成像摄像机和遥测传感器	1000 美元	10	之间的便携式通信设备消防队员和 EOC 之间。
无线电中继		2	自动转播的收发器更高功率的信号。
汇报部门:团队#2104673 MCM/ICM			
		申请单位:CFA	
		日期:2021 年 2 月 5 日(星期五)	