

# 消防无人机大面积部署方案优化模型

王蕾蕾<sup>1</sup> 罗建雷<sup>2</sup> 汪露露<sup>3</sup> 李春雷<sup>1\*</sup>

(1、兰州理工大学石油化工学院,甘肃 兰州 730050 2、兰州理工大学计算机与通信学院,甘肃 兰州 730050

3、兰州理工大学理学院,甘肃 兰州 730050)

**摘要:**澳大利亚在 2019 年末至 2020 年春发生了史无前例的山林大火,这场大火持续了四个月以上,造成了巨大的经济损失和生态损失。在火灾中,消防人员使用无人机对火灾进行实时监控和态势感知(SSA),同时,地面部队也可以通过携带中继器的无人机和 EOC 进行沟通。本文结合扫描频率、传感器覆盖面积占比、通信覆盖面积、信号质量和无人机损坏五个方面计算出所需的无人机数量,得出每个地区配备 82 台无人机(包括 37 架 SSA 无人机、45 架通信无人机),可轻松应对该地区未来十年 85% 以上的火灾。

**关键词:**消防无人机;GN 算法;阈值法;系统规划

**中图分类号:**V279,TP391

**文献标识码:**A

**文章编号:**2096-4390(2021)19-0095-02

## 1 概述

2019 年到 2020 年的火灾季节,澳大利亚几乎每个州都发生了毁灭性的野火,其中以新南威士尔州和维多利亚州东部最为严重,气候变化导致的严重干旱和持续热浪使火势加剧。消防员使用携带高清晰度热成像摄像机以及遥测传感器的 SSA 无人机,对前线人员可穿戴设备的数据进行监测和报告。双向无线电通信允许“地面启动”先锋团队向 EOC 提供状态报告,并允许 EOC 直接向前锋团队下达命令。部署的人员携带 VHF/UHF 频段的手持式无线电,其覆盖范围受低发射频率的限制,并且主要取决于各种地形的影响,而天气对其影响很小。基于以上背景,本文建立了数学模型来解决以下问题:

考虑能力和安全性与经济性之间的平衡,观察通信任务的地形,将火灾事件的影响大小和频率作为参数创建数学模型,确定 CFA 的拟议新部门“快速丛林大火响应”购买的 SSA 无人机和无线电直放站无人机的最佳混合数量。

## 2 预测模型

模型应该基于过去,适用于现在和未来,所以需要有一个基于过去数据的预测模型。通过研究维多利亚州的火灾数据并结合自然界火灾发生的规律,本文认为每年发生的火灾由自然频发火灾、自然周期性火灾、偶然性火灾和补偿火灾四部分组成。其中,自然火灾的多发次数应该是一个常数,与规模和时间无关,是每年不可避免的火灾数量,本文使用常数 C 来表示它。自然周期火灾的数量具有周期性,自然界万物的生长,每到一定时间,就会发生火灾。

为了确定自然周期火灾的数量,本文使用傅立叶变换进行分析 and 计算决定。本文选择的时间是天为单位,在数轴上离散分布,所以应该使用非周期离散傅里叶变换:

$$NR_{(F(n(t)-C))}$$

意外火灾的数量是指一些随机发生的意外火灾,它是介于 (0, n) 之间的随机数。概率服从正态分布,关于 y 轴对称,用 P 表示。其次,本文还考虑了火灾事故的赔偿金额,维多利亚政府减少火灾次数的政策受每年火灾多发区群众娱乐活动的影响,旅游旺季发生火灾时,要对火灾进行动态补偿预测,用 NP 表示。

综上所述,预测结果如式所示:

$$N_{(t)} = C + F_{(t)}^{-1} + P_{(t)} + NP_{(t)}$$

## 3 确定无人机数目的模型建立

综合考虑各方面实际情况,无人机的数量应满足以下条件:关于 SSA 无人机数量确定的扫描频率和传感器覆盖占比、关于通信无人机数量确定的通信覆盖面积和信号质量以及关于冗余无人机数量确定的因素——无人机发生的损坏数。

### 3.1 扫描频率

目前,空中飞行的无人机数量可分为两类:单体无人机和多架无人机。对于单个无人机,其工作流程可以简化为相同的单循环,是无人机工作时间和充电时间的叠加。对于单个周期,本文给出表达式:

$$f_{(t)} = \varepsilon_t - \varepsilon_{(t-t_0)}$$

其中  $t_0$  为无人机工作时间,  $t$  是自火灾发生后到现在为止的工作时间。

对于一片区域,多架无人机飞过此区域的概率不同,则这片区域能被扫描的频率也不尽相同。当前飞在天上工作的无人机数量可以分成两类情况:单架次无人机和多架次无人机,对于单架次无人机,它的工作流程可以简化成相同单一周期的叠加,单一周期即无人机工作时间和充电时间的叠加。整个施救期间,对于无人机的工作规律,本文给出了以下表达式:

$$F_{(t)} = F_{(t)} + F_{(t-T)} + F_{(t-2T)} + \dots + F_{(t-(n-1)T)}$$

对于多架此无人机,本文以最初放飞的那架无人机做参考,其它无人机在它的工作时长上波动,其波动范围与后续无人机的放飞时间有关,给出表达式:

$$F_{A(t)} = F_{(t)} + F_{(t-\tau_A)} + F_{(t-\tau_B)} + \dots + F_{(t-\tau_n)}$$

其中,  $t_{(A)}$  是后续无人机相对于施救工作开始时刻的放飞时间。它是无人机平均出动次数,以及可以满足工作需求的无人机平均架次。这样一来,它与无人机的数量  $n$  有关,我们只需要根据上面的表达式来确定  $n$ 。

### 3.2 传感器覆盖占比

本文需要先确定没有重复着火点的火灾群,定义两点火灾强度相加为传播压力,两点距离为传播阻力,则两点的传播系数就是压力和阻力的比值。本文使用两种方法来确定火灾群:其一是“阈值法”,即对两点之间的传播系数做减法,减到 0 就

**基金项目:**本文系兰州理工大学一流专业建设之红柳特色优势专业专项建设经费;(编号:19HLJS02001)的阶段性研究成果。

**作者简介:**王蕾蕾(2000,1-),女,汉族,籍贯:甘肃华亭,学生,本科在读。

**通讯作者:**李春雷。

剔除该边,最后留下的相邻的点就是一个火灾群;其二是 GN 算法,即一种凝聚性的社区结构发现算法。算法用边介数的概念来探测边的位置,某边的边介数定义为网络上所有顶点之间的最短路径通过该边的次数。GN 算法就是基于此思想反复计算当前网络的最短路径,计算每条边的边介数,删除边介数最大的边,最后在一定的条件下,算法停止,即可得到网络的社区结构,即火灾群。

根据实际情况,上述两种方法交替使用,即可得到一些火灾群。

### 3.3 通信覆盖面积

本文基于地形影响的信号范围建立了信号强度模型,以确定通信覆盖面积。先建立信源强度模型,即信号强度等于信源功率强度和衰减的差值,其中衰减是由空间中的电磁干扰与遮挡造成的,干扰和遮挡统称为阻力,那么我们就可以得出一个三维空间内的一个阻力空间函数  $f(x,y)$ ,其次,火场某点的信号强度就是信源强度和直线传播途径中阻力的积分。

对此,本文给出某点信号强度的公式:

$$P_{s_{ir}} = P_{s_{ou}} - \int_0^{x_0} f_{res}(x, \frac{y_0}{x_0}x)dx$$

其中  $P_{s_{ou}}$  是信源强度,一般情况下其大小是  $-22\text{dB}$ 。由于直线传播途径中受阻力的影响,某点的信号强度有一定程度的损失,当  $P_{s_{ou}} > -100\text{dB}$  时,本文给出关于单个无人机通信覆盖面积的计算公式:

$$S = \iint_{P_{s_{ir}} > -100\text{dB}} 1dxdy$$

对所有的工作无人机的通信覆盖面积进行叠加,即可得到符合我们需求的通信覆盖面积。

### 3.4 信号质量

搜索区域里每个信号点的信号强度的平均数,信号质量可以量化成信号强度的平均数,对火场中每一点的信号强度进行求和,再与所取得的信号点的总数求比值,即可得到信号强度的平均数,即信号质量。

### 4 模型求解

首先,统计维多利亚每天的火灾发生次数,然后删除火灾次数超过 100 次的天数,并对剩余数据进行平均,就得到在维多利亚州发现的频繁火灾的平均数量是 14 起。接下来,在消除之前从每日数据中减去 14,然后通过傅里叶变换,就可以很容易地观察到一些自然周期。本文发现了大约两周的火灾周期,这应该与维多利亚人的生命周期有关。

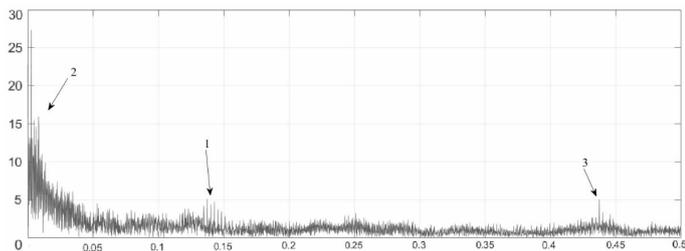


图 1 多幅图像傅里叶变换后的幅频图

在对维多利亚州局部火灾的预测中,本文还对我国大兴安岭和大凉山林区的防火系统进行了分析。最后,我们确定了相对有代表的条件,如表 1 所示:

对于一个区域,扫描频率在大部分时间内需要大于 2。当 SSA 无人机数量为 3 架时,平均约有 1.8 架 SSA 无人机在空中

表 1 无人机系统能力

能力	单位	价值
驻地扫描部队	出动次数	>2 次
监测能力	%	>35
信号覆盖范围	KM	4000-5600
信号质量	dB	>-60
最大应对能力		超大型连续火力

飞行,不满足要求。当 SSA 无人机数量增加到 4 架时,平均数量达到 2.3 架。因此,对于一支救援队来说,最好装备 4 架 SSA 无人机。

在探究无人机复盖率之前,我们首先探究了维多利亚的大规模火灾。我们选取了 2019 年 12 月 31 日的的数据,分别用 1000、5000 和 10000 三个阈值和两个 GN 算法进行计算。最终获得 42 起大火,其中小规模火灾所占比例最大。平均每场火灾探测到 5-16 个火点,当天发生 5 起火灾,平均每场火灾探测到数千个火点。考虑到这场火灾是一种非常罕见的火灾,我们决定以每场大火中的 20 个火点作为参考,火灾周长在 800-900 公里之间。

经过计算,在复盖率为 35 %的前提下,应至少有 6 支 SSA 无人机编队同时在异地进行探索。根据 DJI 无人机公司的保险数据,如果在 10 年内频繁使用,将有 13 架无人机丢失。根据该计划,维多利亚政府需要购买 37 架 SSA 无人机以满足未来 10 年的使用需求。

有信号覆盖(信号强度小于  $-100\text{dB}$ )面积约 890 平方公里。其次,我们导入了维多利亚州的地形图,在东维多利亚州平均信号复盖面积为 730 平方公里。为了达到 4000 平方公里的复盖范围,需要 6 架以上的通信无人机。考虑到无人机的工作时间,一个地面队需要配备 8-10 架通信无人机。对于一次中型群火,需要派遣 4 架地面部队,13 架冗余无人机,至少需要购买 45 架通信无人机。

最后,澳大利亚政府应该购买至少 82 架无人机(包括 37 架 SSA 无人机和 45 架通信无人机)应对森林火灾。若每年旺季发生 4 起群火,重点地区应配备 328 架无人机。

### 5 结论

本套模型结构简洁、逻辑自洽,且计算后的答案有着较高的质量,模型中所运用的自然界思维,不仅发现了维多利亚的起火周期,而且计算简单,易于理解,为深一步探索提供了参考。但对于细节的处理稍缺分析,未能清晰的指导该套无人机系统的使用,后续工作应从具体细微处着手,进一步了解系统的应用方法。

### 参考文献

[1]崔明,王培,孔英剑,赵建普.浅析无人机在森林火灾类型评估工作中的应用[J].内蒙古林业调查设计,2021,44(01):88-90.  
 [2]耿斯元.防火隔离带的设置分析[J].消防界(电子版),2021,7(01):73-74.  
 [3]李诚信,赵良辰,李东运,马佳惠.基于 CA 系统的澳大利亚森林火灾蔓延预测模型及应急物资调度应用 [J]. 林业调查规划,2020,45(05):62-69+89.  
 [4]王红军,向庭立,潘继飞.多重优化的分布式无线覆盖探测算法[J].国防科技大学学报,2020,42(02):127-134.  
 [5]向庭立,王红军,杨刚,孟祥豪.分布式无人机网络覆盖优化算法[J].空军工程大学学报(自然科学版),2019,20(04):59-65.