

# 哈尔滨工业大学深圳校区

## 毕业设计（论文）中期报告

题        目    带时间敏感性的无人机网络  
                    扫描覆盖算法设计与实现

姓        名    胡    聪

学        号    180110505

学        院    计算机科学与技术学院

专        业    计算机科学与技术

指 导 教 师    堵宏伟

日        期    2022 年 3 月 23 日

## 目 录

<b>1 课题主要研究内容及进度 .....</b>	<b>- 1 -</b>
1.1 课题主要研究内容 .....	- 1 -
1.2 进度介绍 .....	- 2 -
<b>2 已完成的研究工作及结果 .....</b>	<b>- 3 -</b>
2.1 带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的建立 .....	- 3 -
2.2 带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法设计 .....	- 6 -
2.3 算法改进与对比 .....	- 9 -
<b>3 后期拟完成的研究工作及进度安排 .....</b>	<b>- 11 -</b>
3.1 后期拟完成的研究工作 .....	- 11 -
3.2 进度安排 .....	- 11 -
<b>4 存在的困难及解决方案 .....</b>	<b>- 12 -</b>
4.1 存在的困难 .....	- 12 -
4.2 解决方案 .....	- 12 -
<b>5 论文按时完成的可能性 .....</b>	<b>- 13 -</b>

# 1 课题主要研究内容及进度

## 1.1 课题主要研究内容

本课题将从以下几个方面开展研究：

### 1. 带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的建立。

近年来，随着无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）技术的高速发展，其在航拍、物流、农业、公共安全和救援等领域有着非常广阔的发展前景，在这些领域中，常常需要多个无人机对特定区域进行扫描以完成需要进行的任务。在无线传感器网络（Wireless Sensor Networks, WSN）的一些监控任务中，不需要使用静态传感器持续监控兴趣点（Point of Interest, POI），而是只需要使用一些移动传感器定期对兴趣点进行巡逻。通过这种方式可以使用少量的移动传感器覆盖更多的兴趣点，这种覆盖模式就被称作扫描覆盖。本文将研究在紧急情况下多无人机的时间敏感性的扫描覆盖问题。

### 2. 带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法设计。

扫描覆盖问题作为无线传感器网络领域的一个较新的研究话题，近年来受到了广泛关注。在进行算法设计时，应该首先针对目前较为优秀的扫描覆盖算法，例如WTSC、G-MSCR等进行研究，在进行了充分的研究和学习之后，自行设计改进后的无人机网络扫描覆盖算法，并对算法的可行性进行分析，最后进行算法的设计和代码实现。

### 3. 评估该算法性能，通过仿真实验验证该算法的优越性。

算法设计完成后，应该对实验数据进行对比，在兴趣点数量一定，改变无人机数量或无人机数量一定，改变兴趣点数量的情况下，将设计完成的算法与其他优秀算法进行性能的比较，验证改进后的算法是否拥有更高的性能。

### 4. 设计一个有较高完成度的系统，可以模拟对无人机救援情况进行调度。

最后需要设计一个拥有较为美观的前端界面的系统，在该系统中，用户可以自行输入无人机数量、兴趣点的数量和位置、无人机参数等信息，系统会根据用户输入的信息生成最佳的无人机路径规划方案，来模拟无人机参与救援时的实际

调度情况，同时系统中也会提供不同算法的解决方案，方便用户对无人机调度方案进行选择。

## 1.2 进度介绍

目前已完成的工作：

- （1）带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的建立。通过查阅相关论文资料，结合自身对问题的理解，确定了该问题的主要研究内容和研究方法；
- （2）带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法设计与改进；该部分主要参考 Greedy Cost Selection 算法，并在时间敏感性和路径优先选择的问题上进行了相应改进；
- （3）算法的性能比较。在控制兴趣点数量不变，更改无人机数量和控制无人机数量不变，更改兴趣点数量的情况下对改进后算法和原算法进行了相应的性能对比。

目前正在进行的工作：

- （1）对算法进行进一步的性能优化：目前算法的时间敏感性问题的解决方案还存在诸多不足，后续考虑使用一些经典算法（如遗传算法、蚁群算法等）再对此部分进行改进；
- （2）无人机调度模拟系统的设计：计划设计一个调度系统，用户可以使用算法对无人机进行模拟调度，通过输入无人机和兴趣点的相关信息，系统会生成无人机的最优调度顺序。

## 2 已完成的研究工作及结果

### 2.1 带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的建立

近年来，随着无人机技术的高速发展，新一代无人机已经可以实现多无人机组成无人机网络，协同工作，以提高工作效率。在紧急救灾等重要场景中，无人机可以提供紧急通信支持、灾情现场调查等帮助，这些行动对时间要求较为敏感，如果无人机不能及时到达，可能会错过最佳救援时间。因此，为了实现对灾区的最大救援，我们需要为多架无人机组成的无人机网络设计一种最佳的协同扫描覆盖方案。与传统的移动传感器相比，无人机的移动速度更快，活动范围更广，续航时间更长，非常适合执行各种高危险度的任务。

在救灾过程中，无人机需要在一定时间内快速到达需要被救援的地点，以提供支援。这些地点对于时间要求较为敏感，如果无人机不能及时到达，可能会错过最佳救援时机，我们称这些点为兴趣点。如图 1 所示，每个兴趣点都会有不同的时间敏感性，如果兴趣点的时间敏感性为 15 分钟，这意味着这个兴趣点需要在 15 分钟内被无人机所覆盖。

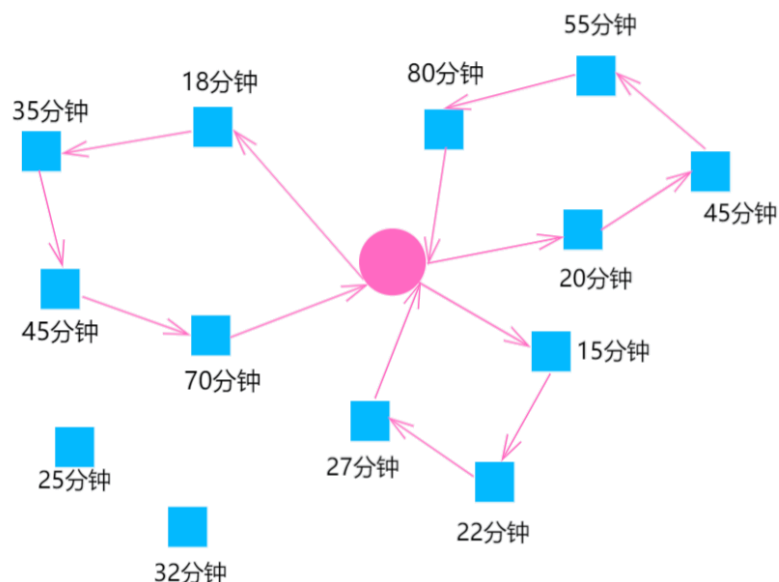


图 1 兴趣点的时间敏感性

如何规划无人机的扫描覆盖路径以满足尽可能多的兴趣点的时间敏感性是本问题的关键。同时，考虑到无人机存在续航时间限制，因此在该问题中应该尽可能提高无人机的覆盖率。

在本问题中，无人机到兴趣点之间的距离与其时间敏感程度无明显关系，因此在设计算法时应该有效协调距离和时间敏感性之间的关系，并据此对于无人机的路径规划进行决策。

假设有  $n$  个兴趣点 (POI)，用  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  进行表示。这些兴趣点在目标区域内随机分布，位置已知，且为静态。在基地中有  $m$  架无人机 (UAV) 对这些兴趣点进行扫描覆盖，基地的位置固定，每架无人机从基地开始，进行扫描覆盖任务，最后返回至基地中。

无人机的整个飞行时间可以分为三个阶段：

$$T = T_a + T_c + T_d \quad (1)$$

无人机在某一时间开始起飞。 $T_a$  表示无人机上升阶段所花费的时间，在这个阶段，无人机从基地出发，上升至某一高度。 $T_c$  表示无人机从基地出发后完成任务至返回基地上空所花费的时间。 $T_d$  表示无人机返回至基地后降落所需要的时间。出于简化问题的需要，我们可以认为无人机返回基地时即视为完成本次扫描覆盖任务，所以无人机在任务期间的最大飞行时间可以简化为：

$$T_m = T_a + T_c \quad (2)$$

在飞行阶段，无人机以固定高度和固定速度  $v$  飞行，因此我们可以将原本的三维路径规划问题简化为二维路径规划问题，这样我们可以认为所有的兴趣点都在一个二维平面上，任意两个兴趣点之间的距离就是它们的直线距离。

任务进行时， $m$  架无人机同时执行扫描覆盖任务。当无人机飞到兴趣点所在位置时，即认为该兴趣点已被成功覆盖。同时，在整个任务流程中，每个兴趣点只需要被唯一的无人机覆盖一次。在无人机从一个兴趣点飞向另一个兴趣点时，无人机需要一定的时间来转动，这可能会影响无人机的路径规划。

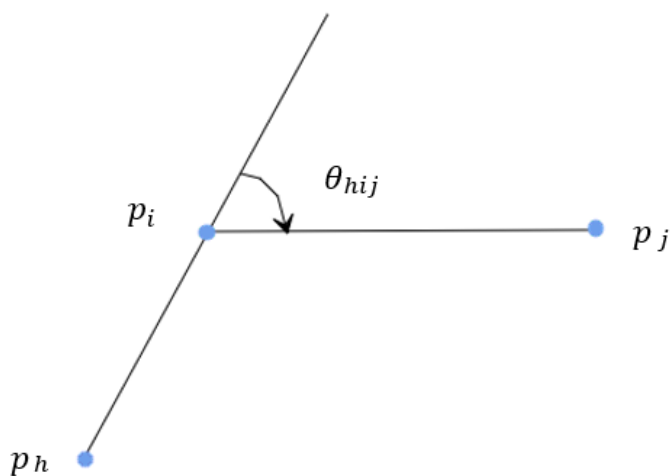


图 2 无人机转动示意图

如图 2 所示，无人机从兴趣点  $p_h$  飞到  $p_i$ ，然后从兴趣点  $p_i$  飞到  $p_j$ ，无人机转动的角度  $\theta_{hij}$  可以使用余弦定理进行计算：

$$\theta_{hij} = \pi - \arccos \frac{d_{ij}^2 + d_{hi}^2 - d_{hj}^2}{2 \cdot d_{ij} \cdot d_{hi}} \quad (3)$$

同时，无人机从兴趣点  $p_i$  飞往兴趣点  $p_j$  的过程所需要的时间可以分为两部分：

$$t_j = \frac{\theta_{hij}}{\omega} + \frac{d_{ij}}{v} \quad (4)$$

第一部分是无人机的转弯时间，第二部分是无人机直线飞行的时间，其中  $\omega$  和  $v$  分别代表无人机的角速度和线速度。

当然，这里也要考虑特殊情况。如果某一兴趣点  $p_k$  是无人机返回基地前所访问的最后一个兴趣点，那么还需要在时间中加上无人机返回基地的时间。

$$t_{jr} = t_j + \frac{\theta_{Bij}}{\omega} + \frac{d_{iB}}{v} \quad (5)$$

由于不同兴趣点的紧急情况不同，对于  $n$  个兴趣点来说，它们都有自身的时间敏感性  $T_s = \{ts_1, ts_2, \dots, ts_n\}$ 。考虑现实中的情况，兴趣点可能会允许无人机在超时后一定时间内到达，也视作成功覆盖，所以我们设置一个公差系数  $e$ ，

无人机在 $(1+e) \cdot t_{si}$ 时间内对兴趣点  $p_i$  进行了覆盖即视为成功。

在设置了公差系数后，我们在分析无人机的扫描覆盖时，就可以引入两个数据：准时率  $R_o$  和有效覆盖率  $R_e$ 。

$$R_o = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ik}}{n} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n c_{ik}}{n} \quad (7)$$

综上，对带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题进行定义：给定一组兴趣点  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ，每个兴趣点都有自己的时间敏感性  $T_s = \{ts_1, ts_2, \dots, ts_n\}$ ，初始时在基地  $B$  中停放有无人机  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ，该问题的目标是最大化有效覆盖率，同时确保无人机在最大任务时间  $T_m$  内结束扫描覆盖任务，并返回基地  $B$ 。

## 2.2 带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法设计

该算法的基本思想是在一次扫描覆盖任务中连续为每个无人机生成扫描路径，每个无人机的扫描路径，其起点和终点都是基地  $B$ 。在路径规划过程中，我们需要设计一个成本函数来计算无人机访问每个兴趣点的成本，该成本与无人机到达兴趣点所需要的时间、兴趣点的时间敏感性以及当前无人机的续航时间等。我们使用贪婪策略，每次选择覆盖成本最低的兴趣点，从而为无人机选取有效覆盖率最高的扫描覆盖路径。

---

### 算法 1：带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法

---

输入：兴趣点的集合  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ，兴趣点的时间敏感性  $T_s = \{ts_1, ts_2, \dots, ts_n\}$ ，无人机的集合  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ ，基地  $B$ ，无人机的最大续航时间  $T_m$ ，无人机的线速度  $v$  和角速度  $\omega$ 。

输出：无人机的规划路径集合  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ ，准时率  $R_o$  和有效覆盖率  $R_e$ 。

- 1: 依次检查兴趣点的时间敏感性  $T_s$  是否合理。
- 2: for  $k = 1 \rightarrow m$  do
- 3:     设置  $O_k = \emptyset$



---

```

4:   设置  $T_k = T_a$ 
5:   设置标志变量
6:   while  $P \neq \emptyset$  and  $B \notin O_k$  do
7:       for  $P_i \in P$  do
8:           if 兴趣点仍然存活 and 无人机续航时间允许 then
9:               计算  $cost_i$ 
10:            else
11:                 $cost_i = +\infty$ 
12:            end if
13:        end for
14:        选择代价最小的  $m$  个兴趣点，分配给  $m$  架无人机作为第一个点
15:        if 兴趣点存在 then
16:            将其添加到路径  $O_k$  中，并从  $P$  中移除
17:            计算时间相关变量，修改标志变量
18:            重新为  $m$  架无人机计算各个兴趣点的代价
19:        else
20:            将  $B$  添加到  $O_k$  中
21:        end if
22:    end while
23: end for
24: 计算准时率  $R_o$  和有效覆盖率  $R_e$ .
25: return  $O, R_o, R_e$ 
    
```

---

首先，在无人机出发之前，我们需要检查无人机的剩余续航时间，如果无人机的续航时间小于无人机从基地直线飞往兴趣点的时间，则无人机不能继续任务，需要在基地进行充电等作业。接下来，算法将为  $m$  架无人机规划扫描覆盖路径  $O = \{O_1, O_2, \dots, O_m\}$ 。初始时，每架无人机的扫描覆盖路径  $O_i$  均为空。算法将会对这  $m$  架无人机同时进行路径规划。

$T_k$  是记录无人机起飞后所花费时间的变量，其初始值为  $T_a$ ，即无人机从基地起飞后升空所花费的时间。对于每个兴趣点，首先通过公式（4）和公式（5）来计算  $t_i$  和  $t_{ir}$ ，然后通过下面两个条件判断该兴趣点是否可以被访问：

(1) 当无人机飞到兴趣点时, 该兴趣点仍然存活。也就是说, 到达兴趣点的时间在  $(1+e) \cdot ts_i$  内;

(2) 无人机剩余的续航时间足以飞到该兴趣点, 然后再返回基地  $B$ 。

当这两个条件同时满足时, 就认为这个兴趣点是可以访问的。接下来我们设计一个成本函数来评估兴趣点的访问成本。

$$\varphi = \frac{T_k}{T_m}$$

$$cost_i = t_i + (t_{si} - T_k)^{2\varphi} \quad (8)$$

系数  $\varphi$  反映了当前无人机的扫描覆盖进度, 扫描覆盖任务越接近尾声, 访问兴趣点的优先级越高, 剩余的访问时间越短。在成本函数中, 距离当前位置最近且剩余访问时间最短的兴趣点成本最低, 将会被优先访问。如果兴趣点此时已不可被访问, 那么我们将成本设置为无穷大。

计算完成所有兴趣点的访问成本后, 我们开始为这  $m$  架无人机规划路径。依次选择  $m$  个代价最低的兴趣点, 分配给这  $m$  架无人机作为离开基地的第一个兴趣点, 然后重新为这  $m$  架无人机计算各个兴趣点的代价, 无人机选择下一个代价最小的兴趣点作为下一个目标点。

接下来更新  $T_k$ , 然后判断下一个目标点是否被有效覆盖和准时覆盖, 如果这个目标点不存在, 即当前所有兴趣点的访问成本都为无穷大, 这说明没有合适的无人机, 在这种情况下无人机应该返回基地  $B$ 。

为了提高线路规划的准确覆盖率, 无人机在访问全部已规划好的兴趣点后, 还应该在续航允许的条件下访问已超时的兴趣点, 实现对兴趣点尽可能多的覆盖。

当所有的无人机均返回基地或兴趣点的集合  $P$  变为空集时, 说明无人机的路径已经规划完成。然后, 算法会根据公式 (6) 和公式 (7) 来计算有效覆盖率  $R_e$  和无人机的准时率  $R_o$ , 算法结束。

## 2.3 算法改进与对比

相比设计时参考的相关算法，本算法主要有以下方面的改进：

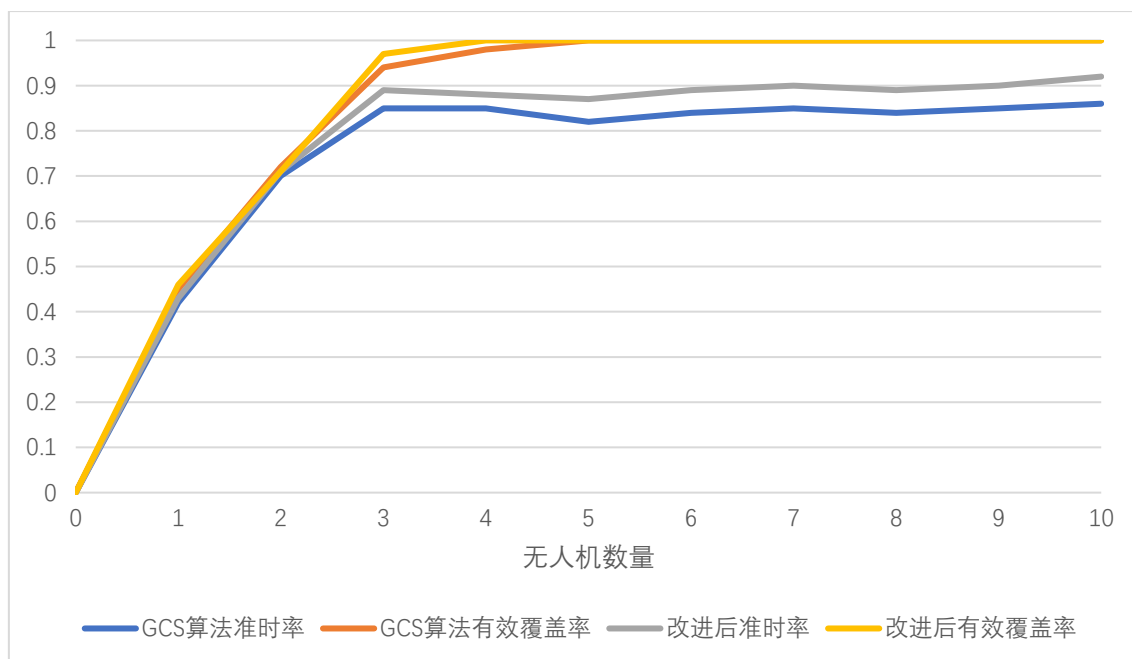
（1）代价函数重新调整了权重，无人机续航时间与兴趣点存活时间之间的关系对于无人机访问兴趣点的先后顺序的影响权重较大，所以提高了该项数据在代价函数中的优先级；

（2）优化了路径规划的顺序，同时考虑  $m$  架无人机访问兴趣点的代价，再进行线路的规划，可以提高无人机对于兴趣点的有效覆盖率和准时率；

（3）在无人机返回基地之前，若还有空余续航时间，仍然会访问已超时的兴趣点，从而实现对兴趣点的全覆盖。

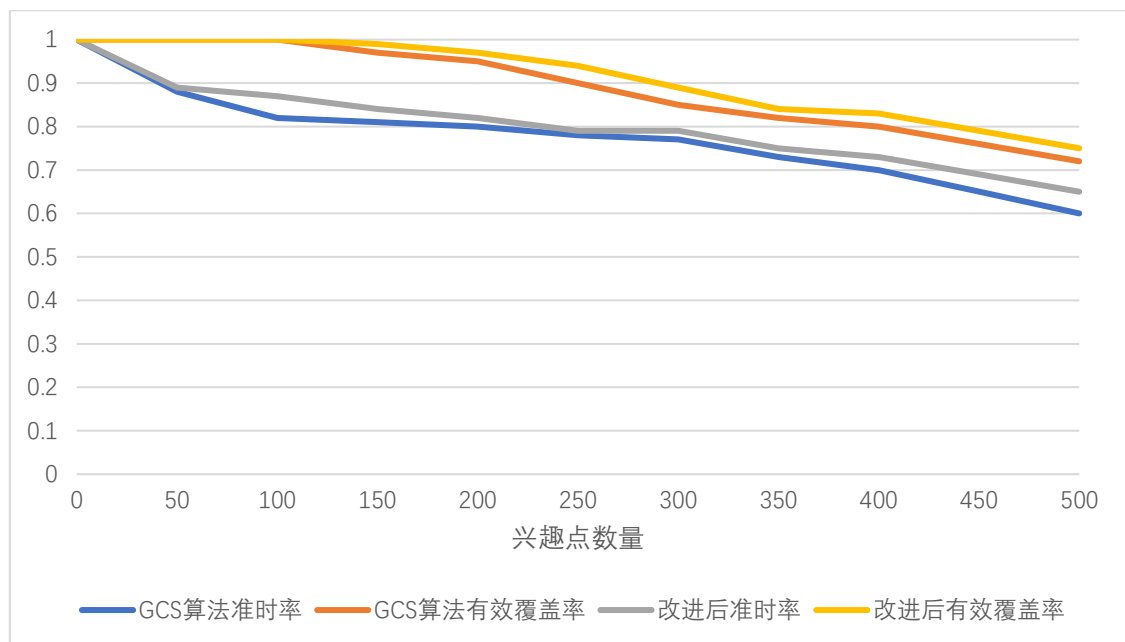
下面对改进前后的算法进行性能的对比：

（1）兴趣点数量固定，改变无人机数量；



图表 1 兴趣点数量为100的情况下算法的准时率和有效覆盖率

（2）无人机数量固定，改变兴趣点数量；



图表 2 无人机数量为5的情况下算法的准时率和有效覆盖率

结合图表1和图表2，可以看到在改进后，算法的准时率和有效覆盖率相较改进前提升大约为3%至5%。

### 3 后期拟完成的研究工作及进度安排

#### 3.1 后期拟完成的研究工作

后续需要完成的工作主要是：

- （1）首要任务是继续完善文中提出的带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法设计和实现；
- （2）分析算法性能，整理已经得出的实验数据，对算法的优越性进行评价；
- （3）设计一个有较高完成度的系统，可以通过 UI 界面显示不同算法对无人机调度情况的差异；
- （4）整理实验成果，撰写结题报告。

#### 3.2 进度安排

具体进度安排如下：

2022 年 3 月 27 日——2022 年 4 月 15 日：学习研究解决时间敏感性问题的算法。

2022 年 4 月 16 日——2022 年 4 月 26 日：利用学习成果，进一步对算法进行性能优化。

2022 年 4 月 27 日——2022 年 5 月 15 日：设计前文提到的前端界面，完成整个系统的大体框架。

2022 年 5 月 16 日——2022 年 6 月 20 日：继续完善系统整体，整理实验成果并撰写结题报告。

## 4 存在的困难及解决方案

### 4.1 存在的困难

1. 目前实验进度与开题时预期相比存在一定程度的落后，主要原因是开题时对于进度预估存在一定偏差，且疫情导致的推迟开学也使得进度落后；
2. 开题时提到实验采用 Network Simulator 进行网络仿真，但是由于开学时间推迟，且目前个人电脑中配置环境存在一定困难，导致无法达成预期，目前代码采用 Python 实现；
3. 实验目标存在一定变更。本次中期报告中提到的 UI 界面为中期时新增目标，可能会影响实验进度。

### 4.2 解决方案

针对目前存在的问题和困难，提出以下解决方案：

1. 提高每日工作时间，提高效率，尽快达到预期进度；
2. 调整实验工作顺序，将需要用到实验环境的实验步骤调整至返校以后再进行。

## 5 论文按时完成的可能性

本课题目前已经完成了带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的建立，带时间敏感性的无人机网络扫描覆盖问题的算法设计。

目前正在进行相关算法的代码实现，以及该算法与目前已有的较为优秀的扫描覆盖算法之间的性能比较，将要进行算法的性能优化、系统设计等。

综上所述，论文能够按期完成，并取得一定的研究成果。